

## Le City Information Management comme outil d'aide à la décision pour la création de communauté énergétique

**Auteur :** Baert, Fiona

**Promoteur(s) :** Leclercq, Pierre

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master : ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en "urban and environmental engineering"

**Année académique :** 2019-2020

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/9014>

---

### Avertissement à l'attention des usagers :

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de  
master "Ingénieur Civil en Architecture"

Finalité "Urban and Environmental Engineering"

---

# Le City Information Management comme outil d'aide à la décision pour la création de communauté énergétique

Etude des outils de City Information Modeling et Management  
existants pour la simulation de production d'énergie

---

par

**Baert Fiona**

Promoteur: **Pierre Leclercq**

Jury: **Pierre Leclercq**  
**Vincent Lemort**  
**Christelle Degard**  
**Anabelle Rahhal**

Année académique: **2019 - 2020**





# Abstract

The purpose of this work is to determine the relevance of the use of City Information Management (CIM) tools in order to assess the possibility of creating an energy community on a given perimeter. This research is part of the current environmental context which has given birth to European directives. They enforce on States the development of new legal frameworks for the creation of these communities. In addition, in the construction sector, the Building Information Management (BIM), CIM's little brother, is used more and more.

Thereby, this work focuses on the possible production of electricity in an area located in Seraing as well as its consumption to assess the impact that the creation of an energy community could have.

To achieve this, a CIM model of the area was created. Different tools allowing the estimation of electricity production via photovoltaic panels were studied and compared. Using two software, production could be estimated and compared with consumption also estimated. Finally, an assessment was made on the factor of diversity of functions present within the area and its interest in balancing consumption and electricity production.

Although the results obtained highlight a lack of information to provide a realistic, precise and completely adapted diagnosis for the situation in the area studied, conclusions could be drawn regarding the software available on the market, the methodology presented as well as the choice of photovoltaic panel installations.

# Résumé

Ce mémoire a pour objectif de déterminer la pertinence de l'utilisation d'outils de *City Information Management* (CIM) afin d'évaluer la possibilité de création d'une communauté d'énergie sur un périmètre donné. Cette recherche s'inscrit dans le contexte actuel environnemental ayant donné lieu à des directives européennes imposant aux États le développement de nouveaux cadres légaux pour la création de ces communautés. De plus, dans le domaine de la construction le *Building Information Management* (BIM), petit frère du CIM, est de plus en plus utilisé.

Concrètement, ce travail s'intéresse donc à la production d'électricité possible sur une zone située à Seraing ainsi qu'à sa consommation pour évaluer l'impact que pourrait avoir la création d'une communauté d'énergie.

Pour ce faire, une maquette CIM de la zone a été créée. Différents outils de simulation de production via des panneaux solaire ont été étudiés et comparés. À l'aide de deux logiciels, la production a pu être estimée et mise en parallèle à la consommation également estimée. Enfin, une évaluation a été réalisée sur le facteur de mixité des fonctions présentes au sein de la zone et de son intérêt pour équilibrer la consommation et la production d'électricité.

Bien que les résultats obtenus mettent en évidence une carence d'informations pour porter un diagnostic réaliste, précis et tout à fait adapté à la situation de la zone étudiée, des conclusions ont pu être tirées quant aux logiciels disponibles sur le marché, la méthodologie présentée ainsi qu'au choix d'installations de panneaux photovoltaïques.

# Remerciements

Avant de commencer, je souhaite vivement remercier l'ensemble des personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail de fin d'études.

Tout d'abord, je souhaite destiner mes remerciements à Monsieur Pierre Leclercq, promoteur de ce mémoire, pour son suivi et ses conseils clairs tout au long de la réalisation de celui-ci mais également durant mes études.

Ensuite, je tiens à adresser mes remerciements à Christelle Degard, chargée de projet à l'AREBS et à Anabelle Rahhal, doctorante à l'Université de Liège, pour le temps qu'elles m'ont consacré ainsi que pour leur aide et leurs conseils avisés.

Je remercie également tous les professionnels qui ont pris le temps de me recevoir afin d'éclaircir certains sujets particuliers et sans lesquels ce travail n'aurait pas abouti à cela.

Finalement, je remercie chaleureusement mes proches qui, malgré la distance imposée pour la plus part d'entre eux, m'ont soutenue et encouragée.

# Sommaire

|                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Abstract</b>                                                                                 | <b>ii</b>  |
| <b>Résumé</b>                                                                                   | <b>iii</b> |
| <b>Remerciements</b>                                                                            | <b>iv</b>  |
| <b>Sommaire</b>                                                                                 | <b>v</b>   |
| <br>                                                                                            |            |
| <b>1 Introduction</b>                                                                           | <b>1</b>   |
| <br>                                                                                            |            |
| <b>2 Etat de l’art</b>                                                                          | <b>3</b>   |
| 2.1 Le BIM aujourd’hui et les prémices du CIM . . . . .                                         | 3          |
| 2.1.1 Le BIM . . . . .                                                                          | 3          |
| 2.1.2 Le GIS . . . . .                                                                          | 6          |
| 2.1.3 Le CIM . . . . .                                                                          | 6          |
| 2.2 Le CIM et l’énergie . . . . .                                                               | 11         |
| 2.2.1 Exemple de cas d’étude . . . . .                                                          | 13         |
| 2.3 Les énergies renouvelables, le panneau photovoltaïque . . . . .                             | 17         |
| 2.3.1 La technologie des panneaux photovoltaïques . . . . .                                     | 19         |
| 2.3.2 Exemple de projets de PV . . . . .                                                        | 25         |
| 2.4 Les communautés énergétiques vues par la directive européenne et le décret wallon . . . . . | 29         |
| 2.4.1 Les directives européennes . . . . .                                                      | 29         |
| 2.4.2 Le décret wallon . . . . .                                                                | 31         |
| 2.4.3 Exemple de communauté d’énergie . . . . .                                                 | 32         |
| <br>                                                                                            |            |
| <b>3 Question de recherche</b>                                                                  | <b>35</b>  |

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>Méthodologie</b>                                                                            | <b>36</b> |
| 4.1      | Description générale de la démarche . . . . .                                                  | 36        |
| 4.2      | Présentation du cas d'étude . . . . .                                                          | 38        |
| 4.2.1    | Introduction de Seraing . . . . .                                                              | 38        |
| 4.2.2    | Définition de la zone d'étude . . . . .                                                        | 41        |
| 4.2.3    | Caractéristiques de la zone choisie . . . . .                                                  | 44        |
| 4.2.4    | Données géométriques et informations d'utilisation des parcelles . .                           | 48        |
| 4.3      | Modélisation de la zone . . . . .                                                              | 50        |
| 4.3.1    | Protocole de modélisation . . . . .                                                            | 51        |
| 4.3.2    | Export des informations de toitures . . . . .                                                  | 54        |
| 4.4      | Simulation de production d'électricité par panneaux photovoltaïques . . . .                    | 57        |
| 4.4.1    | Logiciels exclus . . . . .                                                                     | 57        |
| 4.4.2    | Logiciels retenus . . . . .                                                                    | 62        |
| 4.4.3    | Conclusion de la simulation . . . . .                                                          | 73        |
| 4.5      | Simulation de la consommation d'électricité . . . . .                                          | 73        |
| 4.5.1    | Collecte de consommation électrique de bâtiments sur la zone . . .                             | 74        |
| 4.5.2    | Données de consommation . . . . .                                                              | 74        |
| 4.5.3    | Données géométriques . . . . .                                                                 | 76        |
| <b>5</b> | <b>Résultats et Interprétations</b>                                                            | <b>77</b> |
| 5.1      | Résultats des simulations de la production . . . . .                                           | 77        |
| 5.1.1    | Résultats avec Insight . . . . .                                                               | 77        |
| 5.1.2    | Résultats avec PVGIS . . . . .                                                                 | 78        |
| 5.2      | Interprétation des simulations de la production . . . . .                                      | 83        |
| 5.2.1    | Comparaison des résultats issus d'Insight et de PVGIS . . . . .                                | 83        |
| 5.2.2    | Comparaison des scénarios simulés dans PVGIS avec Excel . . . . .                              | 83        |
| 5.2.3    | Comparaison avec un cas de production réel . . . . .                                           | 86        |
| 5.3      | Estimation de la consommation de la zone . . . . .                                             | 87        |
| 5.3.1    | Calculs . . . . .                                                                              | 87        |
| 5.3.2    | Comparaison avec des cas de consommation réels . . . . .                                       | 87        |
| 5.4      | Comparaison de la production et de la consommation . . . . .                                   | 88        |
| 5.4.1    | Courbe de charge annuelle . . . . .                                                            | 90        |
| 5.4.2    | Courbe de charge hebdomadaire et journalière . . . . .                                         | 93        |
| <b>6</b> | <b>Discussion</b>                                                                              | <b>96</b> |
| 6.1      | Utilisation d'outils de CIM pour la simulation de production d'électricité .                   | 96        |
| 6.2      | Mise en relation de la demande en électricité de la zone mixte avec la<br>production . . . . . | 97        |

---

|          |                                                                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3      | Utilisation du CIM comme outil d'aide à la prise de décision pour la création de communauté énergétique . . . . . | 98         |
| 6.4      | Limites de la recherche . . . . .                                                                                 | 98         |
| 6.4.1    | Limites des données d'entrée . . . . .                                                                            | 98         |
| 6.4.2    | Limites de la simulation . . . . .                                                                                | 99         |
| 6.5      | Perspectives . . . . .                                                                                            | 102        |
| <b>7</b> | <b>Conclusion</b>                                                                                                 | <b>104</b> |
|          | <b>Références</b>                                                                                                 | <b>106</b> |
|          | <b>Liste de Figures</b>                                                                                           | <b>111</b> |
|          | <b>Liste des Tableaux</b>                                                                                         | <b>114</b> |
| <b>A</b> | <b>Tableau des entretiens</b>                                                                                     | <b>115</b> |
| <b>B</b> | <b>Méthodologie de Chen, Lu, Xue, Tang et Li (2018) pour la génération de toiture</b>                             | <b>117</b> |
| <b>C</b> | <b>Master Plan de Seraing</b>                                                                                     | <b>118</b> |
| <b>D</b> | <b>Code Dynamo pour informer la maquette Revit</b>                                                                | <b>120</b> |
| <b>E</b> | <b>Code Dynamo pour informer la maquette Revit</b>                                                                | <b>123</b> |

# Chapitre 1

## Introduction

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans un contexte où la transition énergétique résulte d'une prise de conscience internationale des problèmes environnementaux. L'Union Européenne a ainsi mis en place une série d'objectifs à atteindre d'ici 2020. Ceux-ci visent une diminution de 20% des émissions de gaz à effet de serre, de la consommation en énergie globale et de l'utilisation des énergies fossiles au profit d'énergies renouvelables (« Directive 2007/2/CE », 2007). Pour stimuler cette transition, des mesures énergétiques importantes doivent être prises afin "d'accélérer et élargir les investissements dans des technologies énergétiques plus propres, plus intelligentes et plus efficaces, tout en veillant à ce que tous les éléments clés de l'approvisionnement énergétique, y compris les réseaux électriques, restent fiables et robustes" (IEA (2018), p. 67). Ainsi, au niveau européen, des directives ont été créées afin de conseiller et d'orienter la législation et leur application à ce sujet au sein des Pays Membres. C'est ainsi qu'en Belgique, suite aux directives suivantes : « Directive (UE) 2019/944 » (2019), « Directive (UE) 2018/2001 » (2018), un décret sur la création de communautés énergétiques a été adopté.

Au delà de la législation, le secteur de la construction se métamorphose et s'oriente progressivement vers des méthodes permettant une gestion efficiente des ressources et de l'énergie. Cette transition s'articule notamment par l'adoption du Building Information Modeling (BIM) comme méthode de travail réunissant tous les acteurs de la construction pour concevoir des bâtiments de meilleure qualité tant d'un point de vue écologique qu'économique (Vieira, Calmon & Cavalcante Faroni, 2017). À l'échelle de la ville, de nouveaux outils et méthodes ont également été mis en place pour permettre d'appréhender la ville dans sa globalité. En effet, le City Information Modeling (CIM), méthode récente, intègre la géométrie des lieux et l'ensemble des flux tels que les flux de personnes, d'électricité ou d'eau (Xu, Ding, Luo & Ma, 2014).

Le CIM est un outil qui semble adapté à la mise en place et à la gestion de ces communautés d'énergie mais les recherches effectuées à ce jour sur le CIM n'intègre que peu les énergies renouvelables. Or, l'objectif de ces communautés n'est-il pas, entre autres, d'inclure une production durable d'énergie ? Il est donc important de positionner ces énergies au centre des recherches effectuées sur le CIM. En effet, ce dernier permettrait de nourrir la décision de la création de ces communautés par des simulations et pourrait également se révéler être un outil de gestion précieux permettant une consommation la plus intelligente possible en regard de la production au coeur du territoire.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier le potentiel qu'offre la méthode CIM pour rendre à une ville plus d'efficacité énergétique et l'aider à diminuer son impact sur l'environnement. Pour cela, une étude énergétique sera présentée sur une zone d'étude afin de déterminer la capacité du CIM à aider les pouvoirs publics quant à la mise en place de communautés énergétiques.

Ainsi, ce travail est composé de cinq chapitres. Le premier établit une revue et une analyse des connaissances scientifiques et des recherches effectuées sur les sujets du CIM, de la technologie des panneaux photovoltaïques ainsi que des communautés d'énergie et de leur législation. Le deuxième chapitre est dédié au développement des questions de recherche en regard aux conclusions tirées de l'état de l'art. La méthodologie suivie afin de répondre à ces questions de recherche, est ensuite exposée. Enfin, les résultats sont présentés et interprétés avant de conclure par la discussion ainsi que la présentation des limites de ce mémoire et des futures voies de recherche.



# Chapitre 2

## Etat de l'art

### 2.1 Le BIM aujourd'hui et les prémices du CIM

#### 2.1.1 Le BIM

Le contexte écologique actuel met l'accent sur la gestion efficiente des ressources dans le secteur de la construction (Volk, Stengel & Schultmann, 2014). Dans cette optique, l'intérêt pour le BIM est grandissant. En effet, il permet de nombreuses économies lors de la conception, planification, construction et maintenance d'un bâtiment (Eastman, Teicholz, Sacks & Liston, 2011).

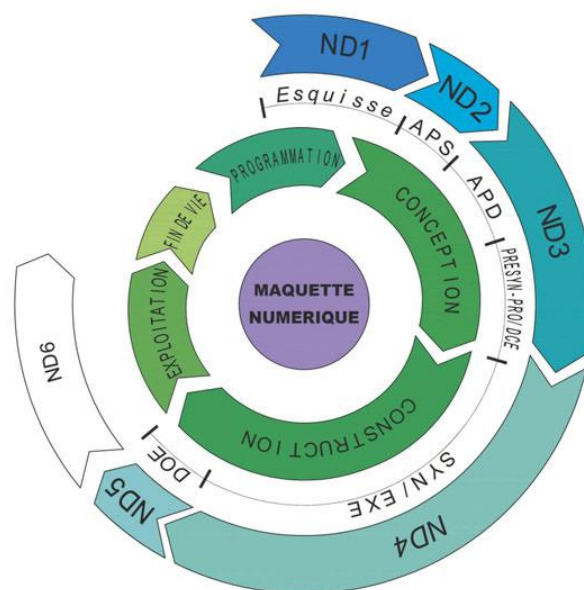
Le BIM, acronyme pour Building Information Modeling/Model/Management, est une nouvelle méthode de travail dans le domaine de l'architecture, l'ingénierie et la construction (architecture, engineering and construction AEC) qui s'inscrit dans un contexte de digitalisation où les projets sont de plus en plus complexes (Vieira et al., 2017). Il permet de créer et gérer des bâtiments tout au long de leur vie grâce à des éléments "informés" (Deng, Cheng & Anumba, 2016).

Le but est d'utiliser un processus de travail intégré et non fragmenté par phase (Dastbaz, Gorse & Moncaster, 2017). En effet, le BIM est alimenté par trois niveaux différents :

- le Building Information Model, qui s'adresse donc à la maquette et à la modélisation entière du bâtiment en trois dimensions avec des éléments contenant de l'information. Cette notion est définie comme suit par Building SMART France : "Il s'agit d'une représentation 3D des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. Mais outre les 3 dimensions, elle intègre aussi la dimension temps (4D), les datas « financières (5D), environnementales (6D), patrimoniales (7D), etc. C'est donc avant tout une base de données techniques, constituée d'objets définis

par leurs caractéristiques et leurs relations entre eux. Le tout forme un ensemble structuré d'informations sur un ouvrage."(BuildingSMART, 2019)

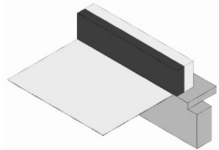
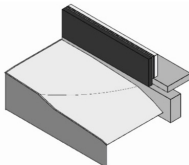
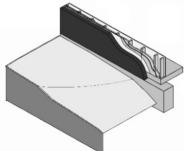
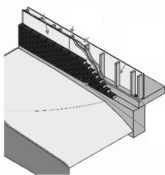
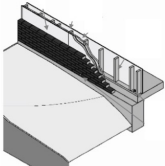
- le Building Information Modeling, qui s'oriente vers la gestion de l'information. Ce concept est défini comme " l'ensemble des processus et méthodes utilisés, à la fois pour structurer et organiser l'information, mais aussi pour construire les maquettes numériques. Cette définition est également relative au processus de travail, y compris les échanges autour de maquettes numériques." (Renou et Chemise, 2018, p. 4).
- le Building Information Management, qui exprime le processus humain, organisationnel et technique pour la mise en place du BIM. Cette notion : "correspond à la gestion de l'ensemble des études de chaque intervenant, intégré à la maquette numérique commune. Cela correspond à l'établissement d'une plate-forme collaborative qui organise les échanges et contrôle le partage des informations entre les acteurs tout au long du processus."(Hoyet, Duchène et De Fouquet, 2016, p. 3).



**FIGURE 2.1** – BIM : les 6 LOD et phase correspondantes (Hoyet, Duchène et De Fouquet, 2016, p. 26)

Pour rappel, le format de référence en BIM est l'"Industry Foundation Classes" (IFC) qui a été initié en 1994 par BuildingSmart (Deng et al., 2016). Ce format est un format ouvert, c'est-à-dire que tous les logiciels orientés objets sont pourvus d'un export et import IFC. Il est donc le format d'échange entre les acteurs d'un projet BIM (Jusuf, Mousseau, Godfroid & Soh Jin Hui, 2017).

Il existe six niveaux de détails et d'informations d'une maquette BIM (Level Of Detail/Developpment/Datas : LOD) qui correspondent chacun à des phases différentes du projet (figure 2.1) (Hoyet et al., 2016). Les niveaux de détails attendus sont détaillés dans le tableau 2.1, avec comme exemple un mur de façade extérieure.

| LOD                                   | Informations et détails graphiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Exemple                                                                               |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>100 : Concept</b>                  | L'élément peut être représenté graphiquement dans le modèle avec un symbole ou une autre représentation générique.                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                       |
| <b>200: Conception schématique</b>    | L'élément est représenté graphiquement dans le modèle comme un système générique, un objet ou un assemblage avec des quantités, une taille, une forme, un emplacement et une orientation approximatifs. Des informations non graphiques peuvent également être attachées à l'élément de modèle.                                                      |    |
| <b>300: Conception détaillée</b>      | L'élément est représenté graphiquement dans le modèle en tant que système, objet ou assemblage spécifique en termes de quantité, taille, forme, emplacement et orientation. Des informations non graphiques peuvent également être attachées à l'élément de modèle.                                                                                  |   |
| <b>350: Construction</b>              | L'élément est représenté graphiquement dans le modèle en tant que système, objet ou assemblage spécifique en termes de quantité, taille, forme, emplacement, orientation et interfaces avec d'autres systèmes de construction. Des informations non graphiques peuvent également être attachées à l'élément de modèle.                               |  |
| <b>400: Fabrication et assemblage</b> | L'élément est représenté graphiquement dans le modèle en tant que système, objet ou assemblage spécifique en termes de taille, forme, emplacement, quantité et orientation avec des informations détaillées, de fabrication, d'assemblage et d'installation. Des informations non graphiques peuvent également être attachées à l'élément de modèle. |  |
| <b>500: As-built</b>                  | L'élément est une représentation vérifiée sur le terrain en termes de taille, forme, emplacement, quantité et orientation. Des informations non graphiques peuvent également être attachées aux éléments du modèle.                                                                                                                                  |  |

**TABLE 2.1** – BIM : les 6 LOD (Adapté du BIMforum, 2019)

Cette démarche est au coeur des changements dans l'AEC. Au vu de l'étendue de l'utilisation de cette méthode aujourd'hui, nous n'irons pas plus loin dans ses caractéristiques pour permettre de détailler plus en profondeur de nouveaux concepts.

### 2.1.2 Le GIS

Le Geographic Information System (GIS) est un outil puissant pour les analyses d'un point de vue spatial (Clarke & Gaydos, 1998). En effet, ce dispositif permet à l'échelle d'une ville d'intégrer des informations et de les visualiser facilement, ainsi que de les analyser et de simuler des prévisions (Sweeney, 1999).

Le format associé à ce type de modèle est le "City Geography Markup Language" : CityGML. Développé au début des années 2000, ce format permet de représenter aussi bien les aspects géométriques, topologiques et sémantiques des villes. Ce type de fichier peut même contenir des informations géométriques en trois dimensions (Kolbe, Gröger & Plümer, 2005).

Comme pour le BIM, il existe différents LOD comme modélisés à la figure 2.2. Par contre, pour le BIM, les LOD sont au nombre de six alors que pour le GIS, il y en a cinq. Le niveau de détails augmente du LOD 0 au LOD 4. Dans le cas d'un bâtiment en LOD0, il sera représenté par sa projection au sol. En LOD1, il deviendra un parallélépipède. En LOD2, il sera modifié pour ajouter un toit représentatif. En LOD3, le toit, les ouvertures (fenêtres et portes) et la topographie du site seront modélisés. Enfin, en LOD4, la structure intérieure du bâtiment sera ajoutée (Donkers, Ledoux, Zhao et Stoter, 2015 ; Gröger et Plümer, 2012).

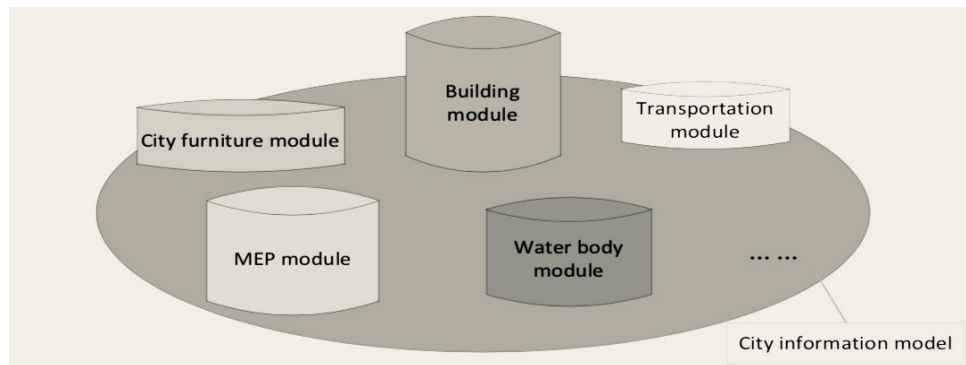


**FIGURE 2.2** – CityGML : les 5 LOD (Biljecki (2017), p. 7)

### 2.1.3 Le CIM

Le City Information Modeling (CIM) est une méthode qui organise des informations interdisciplinaires à l'échelle d'une ville par une maquette 3D (Beirao, Montenegro & Duarte, 2009). Thompson, Greenhalgh, Muldoon-Smith, Charlton et Dolník (2016) définissent le CIM comme "une approche interdisciplinaire et holistique de la génération de modèles de données spatiales dans laquelle l'intégration, l'application et la visualisation des données de la ville sont utilisées pour gérer et arbitrer la demande de terres, de biens et de ressources environnementales ; l'objectif étant d'équilibrer les besoins de multiples

parties prenantes afin de réaliser des villes durables et vivables dans lesquelles les citoyens jouent un rôle majeur dans la gouvernance des villes" [traduction libre] (p. 80).



**FIGURE 2.3** – Composition d'une maquette CIM, (Xu, Ding, Luo et Ma, 2014, p. 2)

Comme illustré par le schéma ci-dessus (figure 2.3), une maquette CIM peut être divisée en plusieurs composants, tous alimentant la base de données qui permet de gérer la ville. Ces cinq sous-modules sont :

- Le module "bâtiment" :

Il contient toutes les informations des bâtiments de la ville. L'architecture, la structure et le format des informations disponibles sont différents en fonction de la période de construction. En effet, les plans "as-built" peuvent aussi bien être un fichier réalisé à la main et numérisé qu'un fichier CAD ou un fichier IFC. Dans le cas où aucune information n'est disponible, un scan 3D interne et externe du bâtiment pourra être utile afin de définir son emprise volumique dans la ville ainsi que ses caractéristiques.

- Le module "transport" :

Il inclut le réseau routier de la ville ainsi que les informations de fréquentation. Si certaines ou la totalité des routes sont monitorées en temps réel, il est alors possible d'obtenir les informations de localisation des véhicules et par conséquent, d'avoir une vue du trafic actuel.

- Le module "espace urbain" :

Il comprend les entités comme les places ou les parcs. Dans le cas où ces surfaces sont, elles aussi, suivies en temps réel, le pouvoir public pourra plus facilement comprendre et analyser les besoins des habitants par leur usage des espaces et les adapter en conséquence.

- Le module "MEP" :

Il englobe les systèmes de ventilation, d'eau et d'électricité. Des capteurs peuvent être introduits dans le réseau de distribution et d'évacuation pour obtenir des informations en temps réel et améliorer le service.

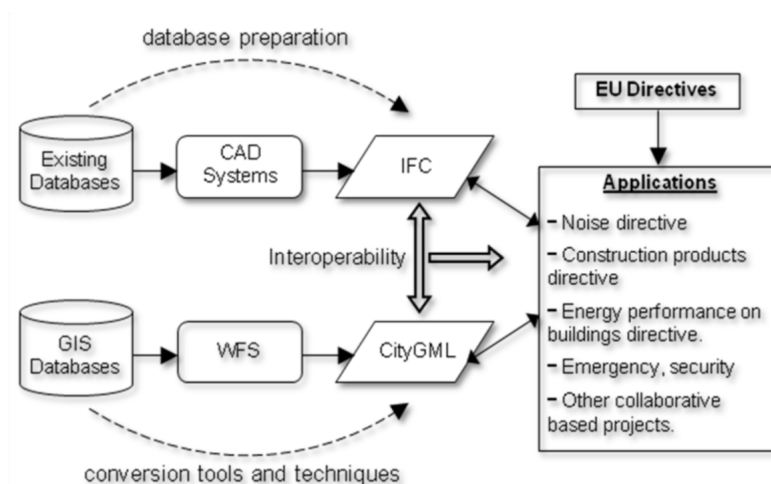
- Le module "ressource naturelle" :

La gestion de l'eau étant fondamentale à l'échelle d'un territoire, ce module permet d'analyser, d'optimiser et de prédire ces flux. Il contient donc tous les éléments de la ville formés d'eau, c'est-à-dire les lacs, les rivières, les fleuves et la mer.

(Xu et al., 2014; Fadli et AlSaeed, 2020)

La difficulté majeure est la création de la maquette CIM. En effet, elle comprend aussi bien des données géométriques telles que la volumétrie, que des données analytiques comme la composition des murs ou la localisation. Le but est donc d'intégrer les maquettes BIM dans un système d'information géographique (GIS) (Zhu, Wright, Wang & Wang, 2018). Pour cela, il faut combiner un fichier de format IFC et un autre de format CityGML qui sont respectivement les standards en termes de modélisation pour ces deux modèles sémantiques (Hijazi, Ehlers, Zlatanova, Becker & van Berlo, 2011).

Cette fusion des formats est aussi motivée au niveau européen par différentes initiatives dont la directive "Infrastructure for Spatial Information in the European Community" (INSPIRE) (« Directive 2007/2/CE », 2007). Cette intégration permet d'étendre les études possibles non plus à un seul bâtiment mais à l'ensemble d'une ville (voir figure 2.4).



**FIGURE 2.4** – Intégration IFC et CityGML (El-Mekawy, Östman et Hijazi, 2012, p. 6)

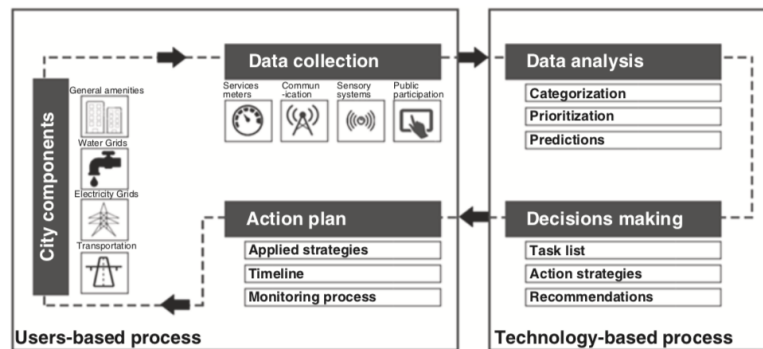
Techniquement parlant, différents processus et outils ont été développés afin de faciliter cette intégration (tableau 2.2), tels que la transformation unidirectionnelle d'un fichier IFC en CityGML. Celle-ci a été étudiée par Nouvel, Bahu, Kaden, Kaempfer et Cipriano (2015) via des extensions de domaines d'application (Application Domain Extension : ADE). Jusuf et al. (2017) se sont penchés sur cette question en utilisant un moteur de

manipulation des fonctionnalités (Feature Manipulation Engine : FME) qui permet de modifier le format IFC. La transformation bidirectionnelle a été développée par Deng et al. (2016) grâce à une plateforme de programmation et à une transformation d'un fichier ou d'un autre dans un langage de référence. Le problème majeur, pour les deux méthodes présentées ci-dessus, est la perte de données (Wang, Pan & Luo, 2019). De plus, celles-ci ne permettent pas la génération de modèles 3D (Donkers et al., 2015). Pour pallier à ces inconvénients, El-Mekawy, Östman et Hijazi (2012) et Song et al. (2017) prônent la création d'un modèle "unifié" (unified building model : UBM) qui comprendrait les fichiers IFC et CityGML. Xu et al. (2014) se sont basés sur ce UBM pour créer leur modèle en établissant un lien entre chaque sous-module des fichiers IFC et CityGML. Ils ont ensuite utilisé l'*OmniClass* pour classifier la structure de la maquette CIM.

| Type d'intégration                      | Outil                                                                      | Auteurs                                     | Remarque                         |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Transformation unidirectionnelle</b> | Extensions de domaine d'application                                        | Nouvel et al., 2015                         | Pas de génération de modèle 3D   |
|                                         | Moteur de manipulation des fonctionnalités                                 | Jusuf et al., 2017                          |                                  |
| <b>Transformation bidirectionnelle</b>  | Plateforme de programmation et transformation dans un langage de référence | Deng et al., 2016                           |                                  |
| <b>Modèle unifié</b>                    | Fichier comprenant l'IFC et le CityGML                                     | El-Mekawy et al., 2012<br>Song et al., 2017 | /                                |
|                                         |                                                                            | Xu et al., 2014                             | Omniclass pour la classification |

**TABLE 2.2** – Tableau récapitulatif des méthodes d'intégration IFC et CityGML

Dans le cadre de ce travail, l'utilité de la maquette CIM construite pour la prise de décision sera étudiée. En effet, elle permettra entre autres de faire le lien entre les composants d'une ville et les données collectées afin de réaliser des simulations (figure 2.5). L'objectif final est ainsi d'augmenter l'efficacité énergétique de la ville (Fadli & AlSaeed, 2020).



**FIGURE 2.5** – Boucle de la méthode de la *Smart City* (Fadli et AlSaeed, 2020, p. 116)

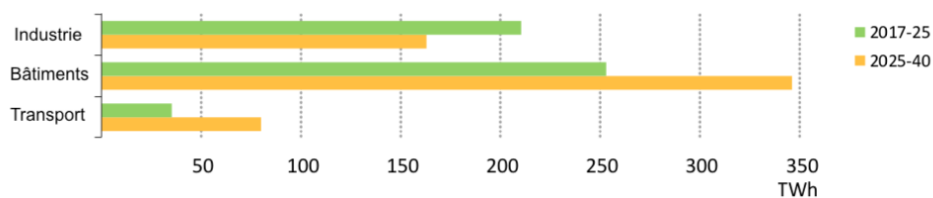
Le CIM est aujourd'hui un sujet de recherche répandu car il permet d'étudier tous les enjeux d'une ville. Celui-ci se révèle être un outil majeur dans le développement de villes plus durables.

Pour pouvoir étudier ces enjeux, il est nécessaire de commencer par modéliser les différents facteurs et ainsi, créer un jumeau numérique de la ville. Cette phase passe par une fusion des formats de BIM et de GIS. En effet, le résultat escompté est d'allier l'échelle de travail du GIS avec le détail du BIM. La fusion de ces deux formats est néanmoins délicate et dépend des données d'entrée et du fichier requis en sortie. Néanmoins, le résultat de celle-ci fait partie des éléments-clés pour réaliser différentes simulations afin d'éclairer la prise de décision des pouvoirs locaux. Cette aide à destination des organes de décision est l'un des objectifs de ce mémoire.



## 2.2 Le CIM et l'énergie

Le contexte écologique actuel encourage la gestion efficiente des ressources. L'un des challenges futurs est la production de l'énergie face à une demande grandissante. En effet, selon le rapport *World Energy Outlook* (WEO) publié par l'"*International Energy Agency*" en 2018, la demande globale en énergie primaire augmentera de 25% entre 2017 et 2040. Concernant l'électricité, sa demande s'élèvera de 26%. Comme représenté par la figure 2.6, le plus important consommateur restera le secteur du bâtiment. Quant au domaine du transport, l'émergence de la mobilité électrique sur le marché entraînera une consommation deux fois plus importante (IEA, 2018).



**FIGURE 2.6** – Variation annuelle moyenne de la consommation finale totale d'électricité par secteur, 2017-2025 et 2025-2040 (IEA, 2018, p. 58)

Face à ces préoccupations énergétiques, le CIM pourrait se révéler être un outil puissant, permettant de contribuer à une meilleure gestion énergétique. En effet, la prise en compte des interactions entre les bâtiments, lors de leur construction et de leur utilisation telle que la mutualisation des charges énergétiques, pourrait aider à obtenir une vision globale à l'échelle de la ville en matière de gestion énergétique (Nouvel et al., 2015).

Afin de relever et d'analyser la littérature scientifique liant les sujets du CIM et de l'énergie, une recherche par mots-clés a été menée au sein des bases de données de Google Scholar, Science Direct ainsi que de l'Université de Liège. Pour ce faire, nous avons utilisé les mots-clés suivants : "*City Information Modeling*" et "*Energy*". La période de recherche s'étend sur cinq ans (de 2015 à 2020). Les résultats divisés par année sont représentés par la figure 2.7. De cette illustration, nous notons une croissance de publications montrant l'intérêt grandissant des scientifiques pour l'association de ces deux sujets d'étude. De même en 2020, cinq articles ont déjà été publiés durant les trois premiers mois.

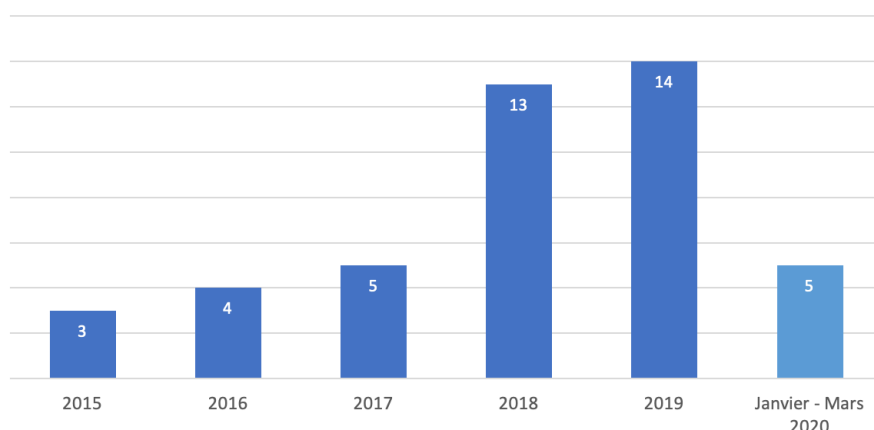


FIGURE 2.7 – Nombre d'articles répondant aux critères, 2015-2020

Au total, quarante-quatre articles abordant des sujets variés, ont été analysés par nos soins selon trois grandes thématiques : le type de modèle numérique, le type de l'étude énergétique qui peut aller de la simulation avec ou sans énergie renouvelable, utilisant l'"*internet of things*" (IoT)<sup>1</sup> ou des compteurs intelligents et enfin, l'implication des citoyens par leur participation ou via la création de communauté d'énergie (figure 2.8). En outre, nous avons ajouté un critère supplémentaire, la présence d'une étude portant sur un cas concret ou non au sein de chaque article et ce, afin de distinguer les revues de littérature des recherches appliquées.

Pour la thématique "**modèle numérique**", nous observons une majorité d'études incluant une maquette CIM (32/44 soit 72%) mais cette méthode n'est pas toujours en lien avec le GIS. Par contre, le rapport entre le CIM et le BIM est fort. En effet, pour les mots-clés utilisés, 37 articles sur 44 traitent du BIM, soit un total de 84%.

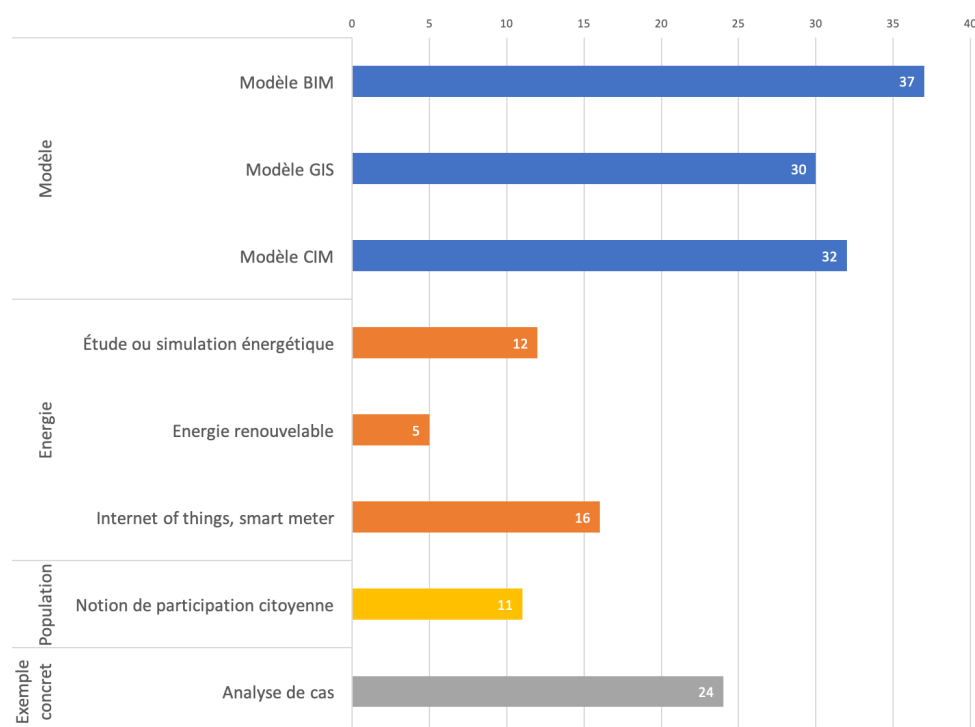
Concernant le sujet de **l'énergie**, seulement 12/44 (soit 27%) mène une étude portant sur un aspect énergétique. Par contre, en ce qui concerne les capteurs intelligents ou l'IoT, 16 articles (soit 32%) traitent ce sujet. Cette technologie qui permet un relevé en temps réel de différents facteurs, émerge depuis seulement quelques années. Nous remarquons effectivement que 80% des articles les citant datent d'il y a deux ans ou moins.

Par rapport aux énergies renouvelables, seulement 5 articles y font référence. Or, celles-ci représenteront 52% de l'électricité produite d'ici 2040 selon un rapport de l'*International Energy Agency* (IEA) (2018). De plus, l'Union Européenne a pour objectif d'atteindre les 32% de la consommation finale brute en énergie renouvelable (« Directive (UE) 2018/2001 », 2018). Au vu de ces facteurs et objectifs, il semble primordial de considérer davantage

1. Objets inter-connectés, capables de créer et de transmettre des données.

cette transition énergétique au sein des futures études. À son niveau, la présente recherche s'ajoutera donc aux études déjà effectuées sur le sujet et permettra de mettre l'accent sur cette carence.

Concernant **la population**, notons qu'il est important d'intégrer les citoyens au sein de la démarche et que malgré la difficulté de la transition, leur prise de conscience permettrait la diminution de leur consommation (« Directive (UE) 2019/944 », 2019).



**FIGURE 2.8** – Nombre d'articles par sujet

### 2.2.1 Exemple de cas d'étude

Comme explicité au sein de la section précédente (page 9), des études existent déjà sur l'intégration BIM, GIS et CIM mais aussi sur l'utilité de ce dernier pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et par extension, de la ville. Cependant, la consommation des bâtiments repose sur de nombreux éléments comme les conditions météorologiques, le comportement des utilisateurs, les caractéristiques des bâtiments. Afin d'aider les décideurs à choisir la meilleure option possible en termes de planification énergétique urbaine, des outils doivent être développés (Chalal, Benachir, White & Shrahily, 2016). L'intégration BIM et GIS développée plus haut est une première étape. Nous nous sommes intéressés à deux cas d'études énergétiques via le CIM. Ces derniers sont décrits

de manière synthétique ci-après en relevant des éléments que nous estimons pertinents et à retenir pour la suite de la présente recherche.

### Cas d'étude à Sonnenberg et Grünbühl, Allemagne

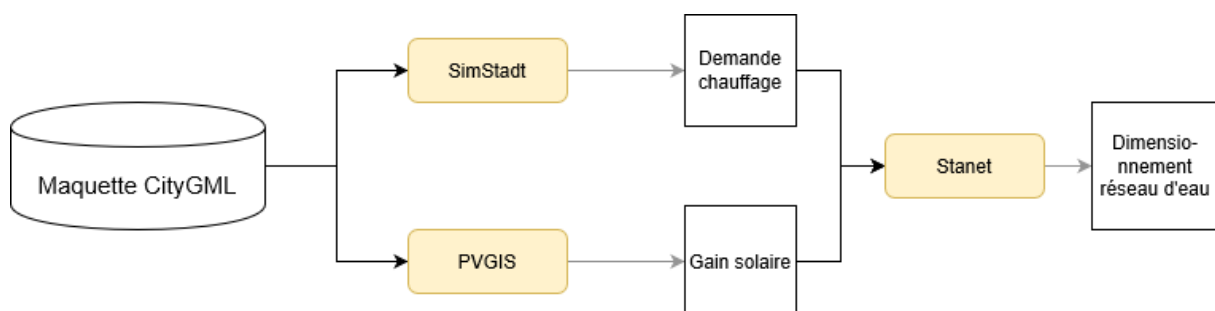
Agugiario, Benner, Cipriano et Nouvel (2018) se sont penchés sur cette question et utilisent des ADE sur l'énergie pour venir apporter des propriétés énergétiques aux éléments d'un fichier CityGML. Ils soulignent la complexité de la gestion de la structure de la base de données, nécessitant la connaissance de langage de programmation.

Une étude de cas a été réalisée sur les districts de Sonnenberg et Grünbühl à Ludwigsburg en Allemagne. Le but est de dimensionner le réseau d'eau en fonction de la demande pour raccorder le quartier au réseau d'eau chaude urbain. La zone choisie est composée de 250 bâtiments. La moitié sont à caractère résidentiel et l'autre, composée d'immeubles de bureaux, administratifs ou polyvalents. Un fichier CityGML au LOD2 leur a été fourni par la ville. La méthodologie suivie est retranscrite au sein de la figure 2.9.

Des données d'irradiation solaire ont été extraites de la banque de données en ligne de PVGIS pour ensuite calculer l'irradiation solaire entrante sur chaque surface de façades et de toits via un algorithme de calcul de radiosité simplifié. Cela leur a permis d'avoir une idée précise du gain solaire.

Au niveau thermique, les auteurs ont utilisé le logiciel SimStadt, développé par l'Université des Sciences Appliquées de Stuttgart, pour estimer la demande de chauffage.

Ces données ont ensuite été transférées sur le logiciel Stanet, ce qui a permis le dimensionnement des conduites, débits, pressions et températures de l'eau.



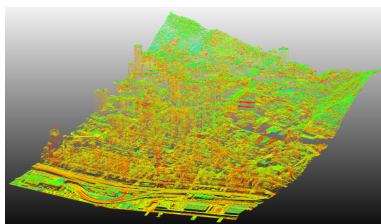
**FIGURE 2.9** – Méthodologie suivie par Agugiario, Benner, Cipriano et Nouvel, 2018

De cet exemple, nous retenons l'utilisation d'une maquette de base GIS fournie par la ville, ainsi que l'utilisation de la banque de données en ligne PVGIS dans le but d'estimer l'irradiation solaire sur différentes surfaces.

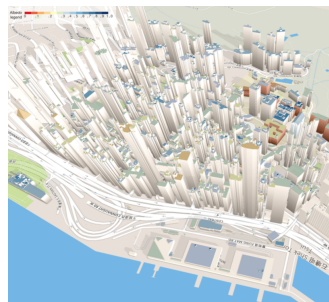
## Cas d'étude à Hong Kong

Xue, Lu, Tan et Chen (2019) ont étudié une zone englobant le campus universitaire de Hong Kong. L'objectif de l'étude est de visualiser la quantité de rayonnement solaire réfléchi des toits. Selon l'étude de Akbari, Menon et Rosenfeld (2009), des toits à albedo élevé peuvent compenser de grandes quantités d'émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, pour prendre en compte ce facteur dans les simulations, une modélisation de ce dernier est nécessaire.

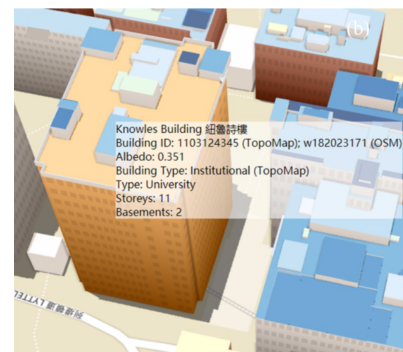
L'étude a été menée sur un espace de 0,3 kilomètre carré, principalement occupé par des tours d'immeubles. La méthodologie suivie est celle développée dans Chen, Lu, Xue, Tang et Li (2018) expliquée dans l'annexe B. Les données géométriques ont été récoltées via un *light detection and ranging* (LiDAR) par le département de génie civil et de développement (CEDD) du gouvernement de Hong Kong (comme c'était le cas dans Chen et al. (2018)). Le modèle résultant comprend 1.087 blocs de bâtiments et 1.288 éléments de toit (figure 2.10).



**FIGURE 2.10** – Modèle LiDAR(Xue et al., 2019, p. 3)



**FIGURE 2.11** – Intégration LiDAR et *Open Street Map*(Xue et al., 2019, p. 4)

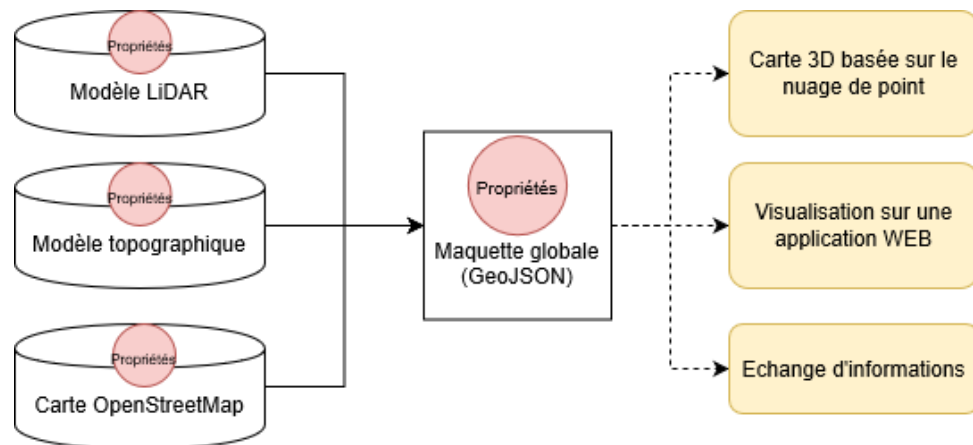


**FIGURE 2.12** – Propriétés de la maquette globale (Xue et al., 2019, p. 5)

Ce modèle a ensuite été fusionné avec la carte topographique des lieux ainsi qu'avec la carte OpenStreetMap pour produire le résultat exposé à la figure 2.11. Les propriétés sémantiques ont été enrichies et peuvent être lues grâce à un système de visualisation Web. Les propriétés ajoutées sont (figure 2.12) :

- le nom du bâtiment,
- l'identifiant des bâtiments sur la carte topographique et OpenStreetMap,
- l'albédo du toit,
- le type de bâtiment,
- le nombre d'étages et
- le nombre de sous-sols.

Ces éléments sont intégrés dans le format GeoJSON, format ouvert de type GIS, ce qui permet donc de partager les informations facilement. La méthode globale de cet exemple est reprise figure 2.13. L'objectif est de permettre l'utilisation de cette technique de création de maquette pour faciliter l'étude de la durabilité.



**FIGURE 2.13** – Méthodologie suivie par Xue et al., 2019

Dans ce cas d'étude, nous notons que les auteurs ont utilisé différentes sources de données pour créer la maquette finale qui reprend des informations propres à chaque bâtiment. Cette maquette est ensuite exportée dans un format ouvert de GIS, permettant ainsi la réalisation d'une future étude de l'impact de ce facteur (l'albedo) sur la durabilité d'une ville.

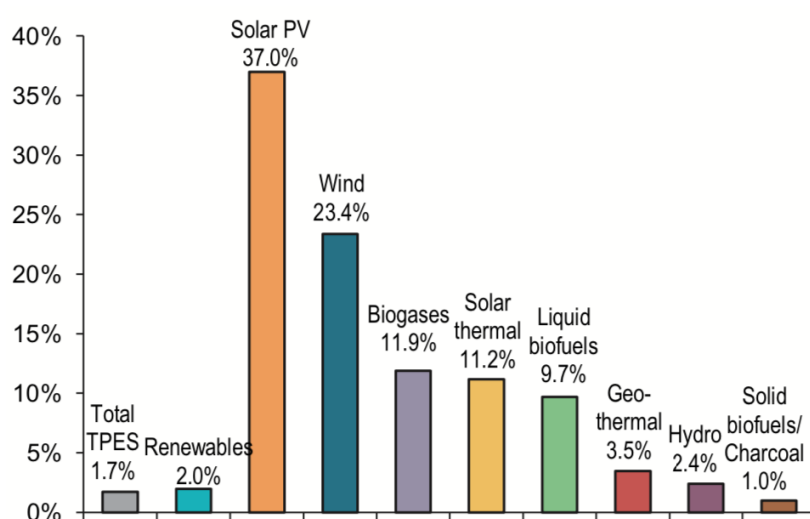
La revue de littérature permet de souligner le peu de recherches réalisées sur l'utilisation du CIM pour la mise en place et la gestion d'énergie renouvelable. Or, intégrer les énergies renouvelables au cœur des recherches scientifiques semble être primordial afin d'appuyer la transition énergétique. Ce travail se positionnera donc sur cet axe d'étude.

Les exemples présentés dans cette section nous apportent déjà des pistes quant à la direction à prendre pour la recherche de données : s'adresser à la ville pour collecter des informations sur les relevés existants et s'informer sur les plateformes en ligne pour recueillir des données d'irradiation solaire (comme PVGIS). Enfin, l'encodage du fichier final doit être réalisé en format ouvert afin de mener au mieux la simulation.

## 2.3 Les énergies renouvelables, le panneau photovoltaïque

Selon les chiffres publiés dans IEA (2019a), 13,5% de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire était produit à partir de sources renouvelables en 2017. Les plus grandes sources sont les biocarburants solides à hauteur de 60,7% et l'hydroélectricité à hauteur de 18,5% selon cette même étude.

Depuis 1990, la part d'énergie renouvelable augmente en moyenne de 2% chaque année, ce qui est légèrement supérieur à l'augmentation de l'alimentation en énergie mondiale qui s'élève à 1,7%. Sur la figure 2.14 représentant l'augmentation de l'utilisation des différentes technologies, nous pouvons remarquer que l'énergie solaire connaît la croissance la plus importante (37%), suivie par l'énergie éolienne (23%).

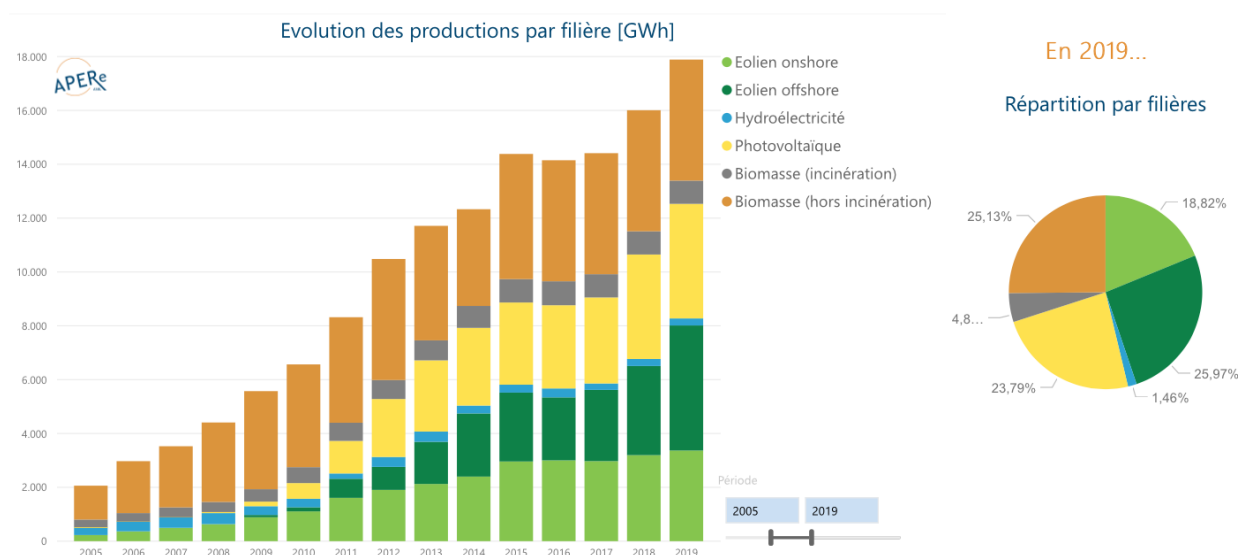


**FIGURE 2.14** – Taux de croissance annuels moyens de l'offre mondiale d'énergies renouvelables de 1990 à 2017 (IEA, 2019a, p. 4)

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie et l'Alliance Solaire International, le potentiel solaire est prodigieux. Si nous savions capter la lumière solaire frappant la terre pendant deux heures, nous pourrions subvenir à la totalité des besoins en énergie pour toute une année (IEA & ISA, 2019). Cela appuie le fait que "combinée à des progrès technologiques rapides et à une baisse des coûts, l'énergie solaire promet d'être un très grand contributeur d'énergie propre et abordable, en particulier pour les 7 milliards de personnes qui devraient vivre dans la ceinture solaire de notre planète d'ici le milieu du siècle " [traduction libre] (IEA et ISA, 2019, p. 4).

La technologie des panneaux solaires s'étend rapidement dans le monde. Son coût a fortement diminué ces dix dernières années bien que cela représente toujours un important investissement initial pour le client final, qui à long terme est risqué (IEA & ISA, 2019).

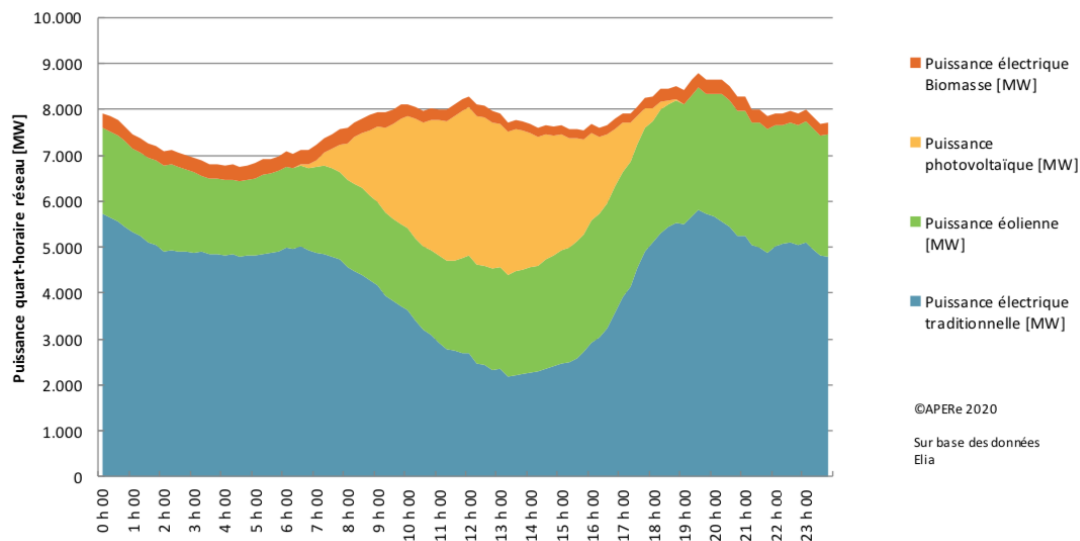
En Belgique, la part d'électricité produite grâce aux énergies renouvelables s'élevait à 2,4% en 2005 et 21,1% en 2019 selon l'Association pour la Promotion des Energies Renouvelables (APERe). De plus, selon un graphique basé sur des données extraites des bilans régionaux SPW DGO4 (Wallonie), Bruxelles Environnement, VITO (Flandre), Eurostat (Belgique) jusqu'en 2017 et estimations de l'APERe à partir de 2018, 23,8% de cette électricité a été produite via du photovoltaïque en 2019 (figure 2.15). Cela correspond à une production de 4.256,03 GWh sur l'année 2019 (APERe, 2020c). Cette production est assurée par une puissance d'installation de 4.826 MWc, qui équivaut à 35 kilomètres carré de surface de panneaux (APERe, 2020b).



**FIGURE 2.15** – Évolution de l'électricité d'origine renouvelable par filière en Belgique de 2005 à 2019 (APERe, 2020c)

Il est pertinent de relever que le 28 mars 2020 entre 9h et 17h, la moitié de la consommation électrique totale du pays a été produite via des sources renouvelables sur base de données d'ELIA (figure 2.16), un pic de 70% ayant été enregistré à 13h. Il est bien sûr nécessaire de tenir compte du contexte de confinement qui réduit notre consommation et du fait que cette journée ait été favorable à la production d'énergie renouvelable. Toutefois, cela permet de consolider la certitude qu'une production d'énergie verte est possible à grande échelle (APERe, 2020a).





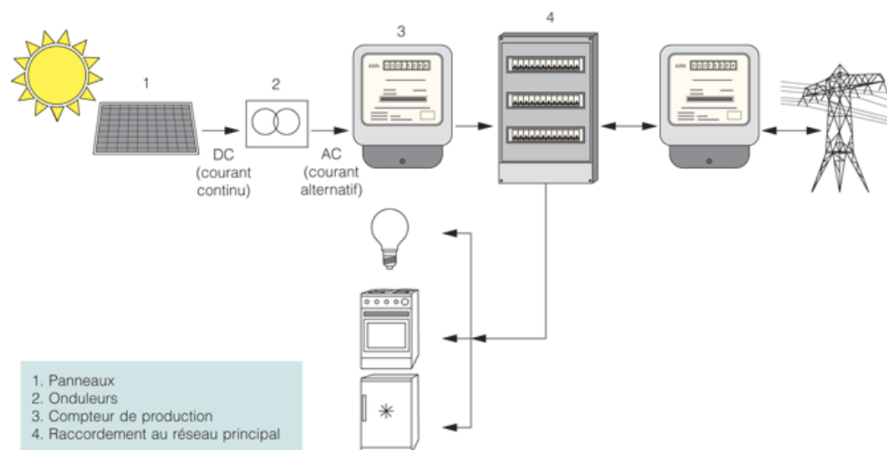
**FIGURE 2.16** – Consommation d'électricité en Belgique Parts Renouvelables - 28 Mars 2020 (APERe, 2020a)

### 2.3.1 La technologie des panneaux photovoltaïques

Les panneaux solaires photovoltaïques (PV) permettent de capter la lumière pour la transformer directement en électricité. Ces principaux composants sont des cellules connectées entre elles, emballées dans un cadre avec une protection à l'arrière et du verre transparent sur la face avant, le tout formant un panneau. Les panneaux sont ensuite combinés et l'ensemble est ensuite fixé à une structure portante (IEA, 2019b ; Bayod-Rújula, 2019).

Cette installation de panneaux solaires photovoltaïques est mise en place dans un circuit électrique comprenant d'autres éléments. Tout d'abord, il est nécessaire d'intégrer un ou plusieurs onduleur(s) permettant de transformer l'électricité de courant continu en courant alternatif. Il est également possible de raccorder le(s) onduleur(s) à un compteur de production. L'électricité est ensuite redistribuée via un raccordement au réseau principal vers une consommation immédiate par le propriétaire des PV ou vers le réseau public (figure 2.17) (CSTC, 2013).

Les PV les plus répandus sont ceux à base de silicium. En effet, ils représentent 80% du marché actuel. Il en existe d'autres types que nous détaillerons à la page suivante (IEA & ISA, 2019).



**FIGURE 2.17** – Éléments d'un système photovoltaïque (CSTC, 2013)

Un panneau photovoltaïque peut être qualifié par son rendement et par sa puissance crête. Le rendement d'un module de panneau photovoltaïque est défini comme : "le rapport entre l'énergie électrique produite par ce module et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante" (Energieplus, 2010c).

$$n[\%] = \frac{P_{produite}[kW]}{P_{incidente}[kW]}$$

De plus, pour comparer différents modules, un test standardisé (*Standard Test Conditions* : STC) est réalisé et détermine la puissance crête. Cette dernière est définie comme "la puissance électrique produite par la cellule (ou un panneau) lorsqu'elle est soumise aux conditions STC " (Energieplus, 2010c). Les conditions STC sont définies comme suit :

- irradiance : 100 mW / cm<sup>2</sup> (1000 W / m<sup>2</sup>),
- distribution spectrale : (*Air Mass* : AM) 1,5,
- incidence normale,
- température de la cellule : 25 °C.

Autrement dit, si un panneau a un rendement de 15%, cela veut dire que pour 100W sur une surface d'un mètre carré, le PV produira 15W (Bayod-Rújula, 2019).

### La matière première : le silicium

Afin de choisir le type d'installation de panneaux le plus adapté à notre étude, nous allons parcourir et analyser les différentes technologies disponibles.

Le matériau le plus utilisé pour fabriquer ces cellules est le silicium. Ce silicium est utilisé sous différentes formes pour concevoir des PV aux caractéristiques distinctes (table 2.3). La plus répandue aujourd'hui est le silicium monocristallin (x-Si ou sc-Si,

ou m-Si), suivi du silicium polycristallin (p Si), puis du silicium amorphe (a Si) et finalement, des cellules à haute performance (Bayod-Rújula, 2019 ; Kalogirou, 2014). Voici donc les caractéristiques de ces différentes cellules :

— Cellule monocristalline de silicium :

La cellule est composée, comme son nom l'indique, de silicium pur qui forme une seule structure de réseau cristallin. Le coût est relativement élevé dû au processus de fabrication complexe mais sa production de masse a permis une économie d'échelle. Ainsi, son prix est maintenant assez compétitif et il devrait dominer le marché dans les années à venir.

— Cellule multicristalline de silicium :

La cellule est composée de plusieurs grains de silicium monocristallin. Le processus de fabrication est plus simple que pour le premier type de cellule. Il en résulte un coût plus bas. Par contre, ces cellules sont un peu moins efficaces que les premières.

— Cellule de silicium amorphe :

Ce type de cellules est composé d'une fine couche de silicium amorphe, d'où son nom "photovoltaïque à couche mince". Ce silicium en phase amorphe absorbe mieux la lumière que lorsqu'il est sous forme cristalline. Cependant, son rendement n'est que de 6-7%. Pour l'améliorer, il est possible de l'assembler avec des modules de silicium cristallin. cela permet d'augmenter son rendement pour atteindre 9-10%.

— Cellule à haute performance :

Les cellules à haute performance utilisent d'autres matières premières qui absorbent beaucoup mieux la lumière incidente. Le coût de ce type de cellules est très élevé et elles sont donc étudiées principalement dans des systèmes de concentration ou aussi dans le cadre d'application spatiale car elles ont une très bonne résistance au rayonnement et à la radiation.

Un résumé de ces différentes technologies et des cas d'application généraux se trouve dans la table 2.3. Nous pouvons en conclure que le type de panneaux le plus adapté à une installation sur toiture en Belgique est un PV à cellule mono ou multicristalline.

| Technologie                          |      | Avantage(s)                                                  | Inconvénient(s)                                             | Rendement[%] | Application(s)                                   |
|--------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------|
| Cellule monocristalline de silicium  | x-Si | Haut rendement                                               | Processus de fabrication compliqué, coût relativement élevé | 14-16        | Espace restreint et climat tempéré               |
| Cellule multicristalline de silicium | P Si | Processus de fabrication (plus*) simple, coût (plus*) faible | Rendement (plus*) faible                                    | 13-15        | Toit résidentiel ou commercial                   |
| Cellule de silicium amorphe          | a Si | Peu cher, Peut être déposé sur des surfaces flexibles        | Rendement très faible                                       | 6-7          | Espace abondant et climat chaud                  |
| Cellule haute performance            |      | Très absorbante                                              | Très cher                                                   | 18-21        | Système de concentration ou application spatiale |

\* comparé à la cellule monocristalline de silicium

**TABLE 2.3** – Tableau comparatif des technologies des cellules photovoltaïques (Bayod-Rújula, 2019 ; Kalogirou, 2014 ; do Nascimento et al., 2020)

### Facteurs influençant la production

L'énergie solaire dépend premièrement de **l'inclinaison de la terre** qui découpe une année en différentes saisons. Comme on peut le voir sur la figure 2.18, le gisement solaire est plus important durant les mois d'été que durant ceux d'hiver (CSTC, 2013 ; Energieplus, 2010a). De plus, une année n'est pas l'autre, comme illustré à la figure 2.19 où chaque couleur représente une année différente. Sur 10 ans, nous observons donc de grandes différences de production allant jusqu'à 32%. En effet, au mois de mai, la production s'élevait à 151 kWh/kWc en 2011 alors qu'en 2013, la production enregistrée n'était que de 106 kWh/kWc. Cette différence importante s'explique par un facteur météorologique influençant l'ensoleillement et la couverture nuageuse.

Dans un second temps, elle oscille en fonction de **l'orientation et de l'inclinaison sa surface**. Ainsi, comme on peut le voir sur la figure 2.20, la position optimale est une surface inclinée à 35°, plein sud (Energieplus, 2010a). Ce facteur influence grandement la production finale, ainsi lors du pré-dimensionnement un coefficient de correction est à intégrer dans le calcul. Pour une surface de 1 kWc, non ombré, en position optimale, la production moyenne en Belgique s'élève à 950 kWh (Energieplus, 2010b).

De plus, toujours d'un point de vue de la radiation solaire disponible, **l'ombrage** est un facteur important à prendre en compte pour la simulation de production (CSTC, 2013).

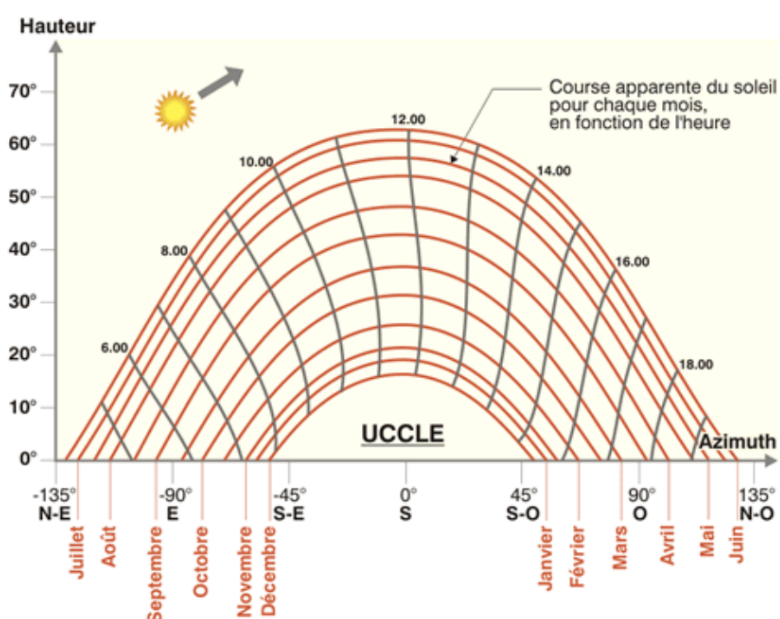


FIGURE 2.18 – Gisement solaire à Uccle (Energieplus, 2010a)

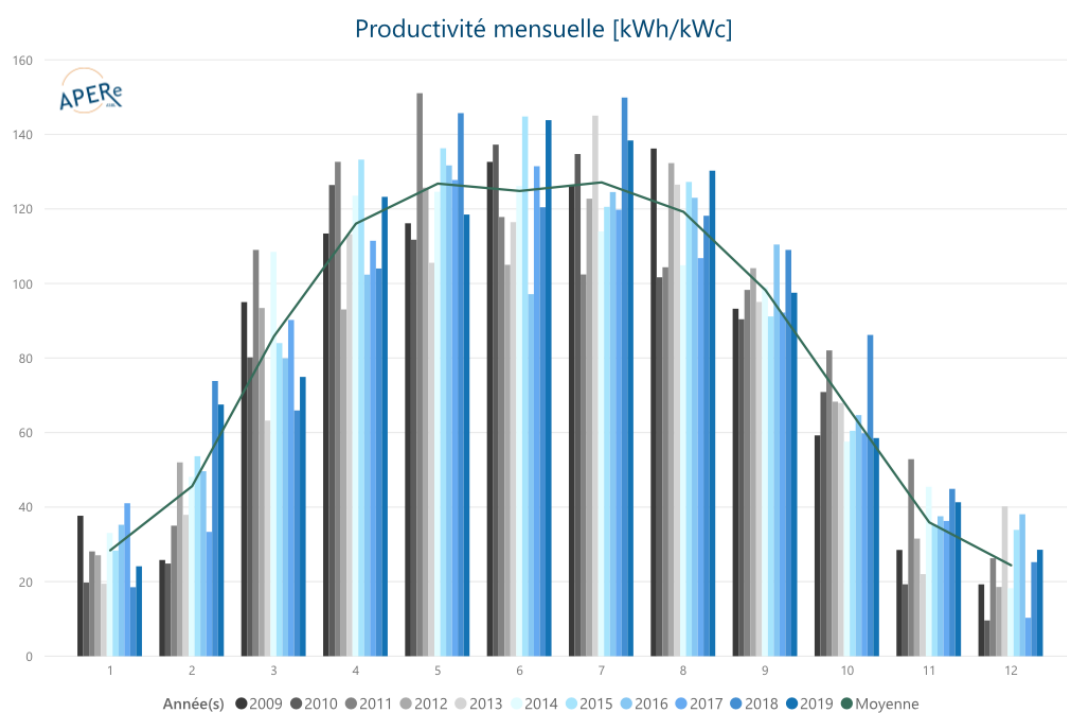
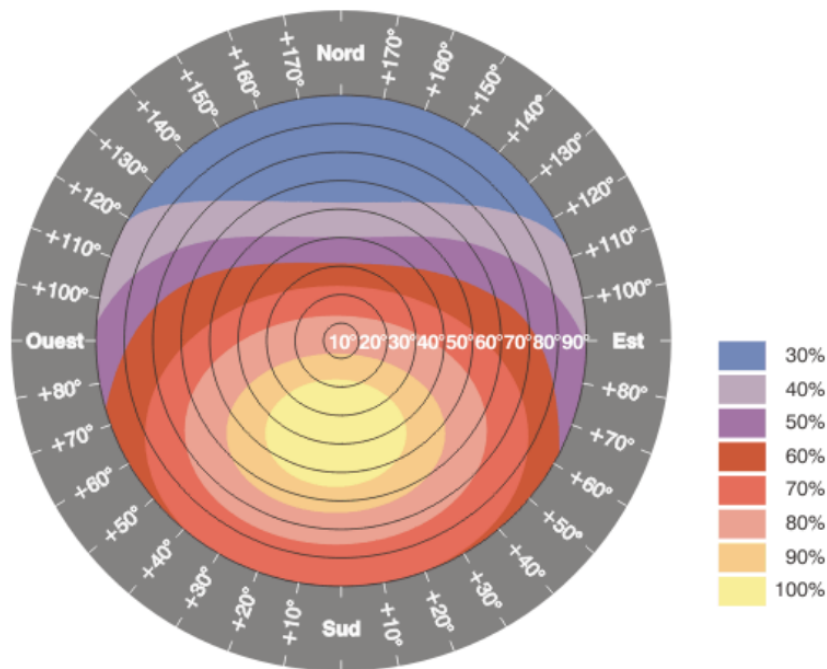


FIGURE 2.19 – Comparaison des productivités mensuelles photovoltaïques entre 2009 et 2019 (APERe, 2020b)



**FIGURE 2.20** – Influence de l'orientation et de l'inclinaison du toit (Energieplus, 2010a)

Finalement, d'un point de vue plus technique, **la température de la cellule** influence son rendement. Ainsi, par degré supplémentaire (au dessus de 25°C), une perte de rendement de 0,5% est observée. Il est donc idéal de prévoir une ventilation suffisante à l'arrière des panneaux (Energieplus, 2010c).

### Pré-dimensionnement d'une installation

Comme expliqué plus haut, la production moyenne annuelle en Belgique est de 950 Kwh/kWc pour une orientation idéale c'est à dire 0° d'azimuth et 35° de pente. Si les conditions sont différentes, la production est à multiplier par un facteur de correction. Ce dernier dépend donc de l'inclinaison et de l'orientation du panneau par rapport au sud (figure 2.20) (Energieplus, 2010b).

La formule pour le calcul de production est le suivant :

$$electricite\ produite\ annuellement[kWh] = nombre\ de\ kWc * 950[kWh] * \alpha$$

$\alpha$  étant le facteur de correction que l'on retrouve à la figure 2.20.

Le nombre de kWc dépend du rendement du panneau choisi et de la surface disponible.

Si :

- la puissance crête par  $m^2 = X$  [Wc/ $m^2$ ],
- la surface =  $Y$  [ $m^2$ ],
- et le nombre de  $m^2$  nécessaire à la production de 1 kWc =  $Z$  [ $m^2$ /kWc].

Nous obtenons :

$$Z[m^2/kWc] = \frac{1000}{X}$$

$$\text{nombre de kWc} = \frac{Y[m^2]}{Z[m^2/kWc]}$$

Ainsi, il est possible d'estimer la production d'une installation en fonction de la surface disponible (Energieplus, 2010b).

## Conclusion

Des chiffres-clés mettent en valeur l'évolution importante de la technologie des PV par rapport aux autres énergies renouvelables, la Belgique suivant cette tendance. À ce jour, la technologie de PV la plus appropriée à notre climat est la cellule mono ou multicristalline. En outre, leur production finale sur une année dépend bien entendu, de l'ensoleillement total sur l'année mais également de l'inclinaison et de l'orientation auxquelles les PV sont installés, et de l'ombrage possible. "Malgré la chute des coûts, l'expansion de l'énergie solaire dépend encore en grande partie de la définition d'objectifs ambitieux par les décideurs et de la mise en œuvre de politiques, de conceptions de marché et de cadres réglementaires sains, notamment pour la recherche, le développement et le déploiement technologiques"[traduction libre] (IEA et ISA, 2019, p. 2).

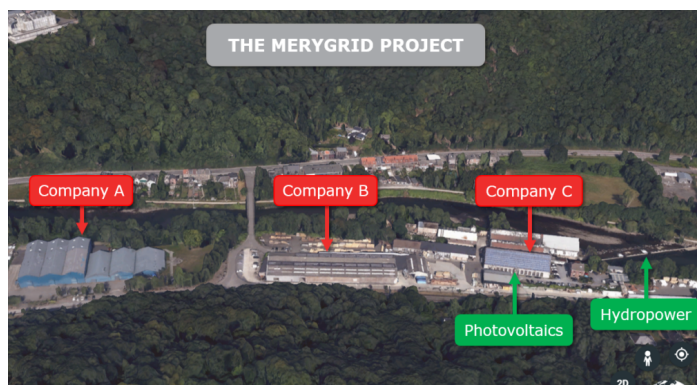
### 2.3.2 Exemple de projets de PV

#### Projet Mérygrid

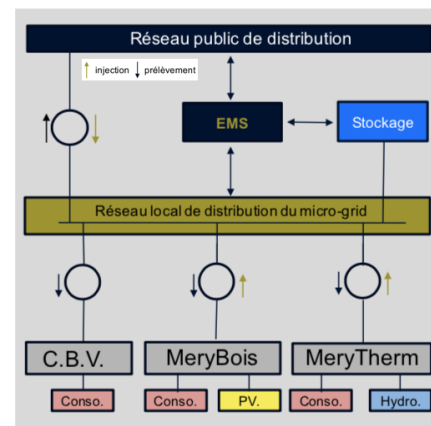
S'inscrivant dans le plan Marshall 4.0 pour la mise en œuvre d'un *Cloud* énergétique, le projet Mérygrid est également en lien avec la « Directive (UE) 2018/2001 » (2018). Ce projet pilote permet à trois entreprises de s'alimenter en électricité renouvelable régulière et moins chère. Il est situé à Méry dans la province de Liège. Les entreprises concernées par ce projet sont Merybois, Merytherm et CBV. Elles sont localisées en bord de l'Ourthe, comme nous le remarquons sur la figure 2.21. Au préalable, Merybois possédait déjà une installation photovoltaïque de 60 kWc et Merytherm, une centrale hydroélectrique d'une capacité de 200 kVA (Warichet, 2017 ; Legrand, 2018).

L'objectif du projet est de valoriser la production d'énergie locale (qui ne comprend pas d'installation supplémentaire) en la mettant à disposition sur un micro réseau et en la stockant (figure 2.22). En outre, une plateforme de supervision *Energy Management System* (EMS) permet d'optimiser les flux énergétiques et financiers ainsi que de gérer le système de stockage (Warichet, 2017 ; Legrand, 2018).

La production sur un an s'élève à 1.000 MWh pour une consommation de 600 MWh seulement. Le stockage choisi est une batterie au lithium d'une capacité de 300 kWh et de puissance de 600 kW. Elle est abritée dans un conteneur avec le convertisseur AC/DC et le supracondensateur (Warichet, 2017).



**FIGURE 2.21** – Vue aérienne du projet Méry-grid (Legrand, 2018, p. 1)



**FIGURE 2.22** – Réseau mis en place pour Mérygrid (Warichet, 2017, p. 22)

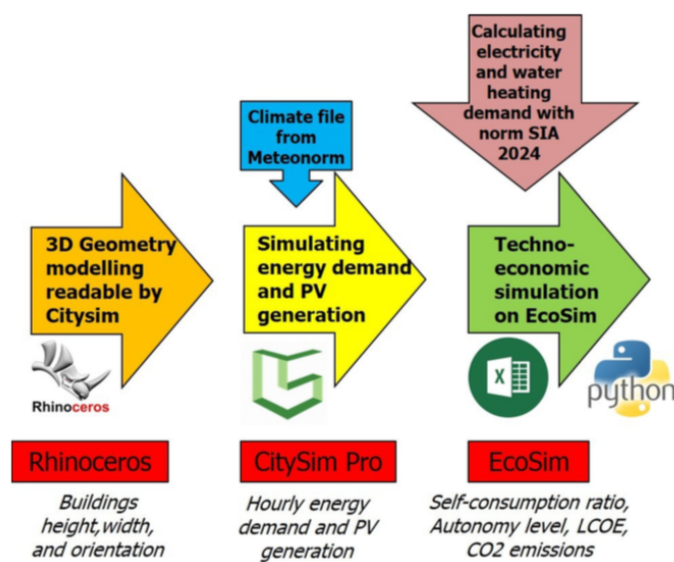
Grâce à ce micro réseau, ces entreprises peuvent donc partager, stocker et revendre l'énergie produite grâce à l'exploitation de sources renouvelables (Warichet, 2017).

### Etude de cas à Basel, Suisse

Siraganyan, Mauree, Robin, Uhlhorn et Scartezzini (2019) se sont penchés sur la question de la production d'électricité via des énergies renouvelables à l'échelle d'un quartier dans le cadre de la création de communautés énergétiques, autorisée depuis janvier 2018 en Suisse. Pour leur recherche, ces derniers ont étudié une zone résidentielle composée de six bâtiments totalisant 120 appartements. Au sein de celle-ci, l'électricité est produite grâce à des panneaux photovoltaïques et stockée à l'aide de batteries (Siraganyan et al., 2019).



Leur étude est divisée en trois étapes présentées ci-dessous (figure 2.23). La première consiste à modéliser la géométrie de la zone via le logiciel Rhino. La demande en électricité et la production des panneaux sont ensuite simulées grâce à l'outil CitySim Pro et enfin, les aspects techniques et économiques sont pris en compte par l'outil EcoSim (Siraganyan et al., 2019).



**FIGURE 2.23** – Workflow de l'étude (Siraganyan, Mauree, Robin, Uhlhorn et Scartezzini, 2019, p. 3)

La géométrie est importée dans le logiciel CitySim Pro via un fichier DXF ou XML. Cet outil estime la demande et la production d'électricité en utilisant la base de données "Meteonorm" (Siraganyan et al., 2019).

Concernant la demande, elle est simulée par bâtiment en fonction des appareils, de l'éclairage et du système de ventilation par tranche horaire et ce, sur une année. Pour chacun des éléments pris en compte, la puissance moyenne a été définie par les normes suisses pour un usage domestique (Siraganyan et al., 2019).

Quant à la production électrique, elle est calculée sur base de l'irradiation solaire obtenue grâce au logiciel CitySim, multipliée par les pertes et par l'efficacité PV. Les auteurs obtiennent ainsi la génération électrique heure par heure (Siraganyan et al., 2019).

Ces chercheurs ont ensuite établi différents scénarios à partir de deux variables : la surface utilisée et la puissance (en kWc) de PV installés. Un pourcentage d'autoconsommation, d'autonomie et une quantité de CO2 non émis est déduit des chiffres calculés précédemment (Siraganyan et al., 2019).

Par leur recherche, ils ont pu conclure qu'en recouvrant 70% de la surface des toitures par des PV correspondant à une puissance de 302 kWc, le taux d'autoconsommation atteint les 42% et l'autonomie s'élève à 27%. Cependant, en couplant ce circuit à une batterie de 260 kWh, ces deux derniers indicateurs augmentent respectivement à 63% et 40%. De plus, la rentabilité économique est largement amplifiée. La comparaison de différents systèmes réalisée par Siraganyan et al. (2019) permet donc de souligner les bénéfices de cette dernière installation.

Bien que le panneau solaire photovoltaïque promette de contribuer grandement à la transition énergétique, il représente toujours un risque pour le client final du point de vue de son investissement. D'autre part, certains pays manquent encore d'un cadre légal clair pour le déploiement de cette technologie (IEA & ISA, 2019).

Concernant le pré-dimensionnement d'une installation de panneaux, les recherches présentées nous poussent à privilégier l'installation de panneaux à cellule mono ou multicristalline ayant chacune des rendements de 14-16% et 13-15%. Notons que la production moyenne annuelle est de 930 kWh/kWc en Belgique. Grâce aux formules décrites dans la section 2.3.1, il est possible d'estimer la production annuelle.

Les projets détaillés au sein de cette section mettent en avant la réelle possibilité de produire entièrement ou en partie son électricité via des énergies renouvelable que ce soit dans le cas d'industrie (à Liège) ou de logement (en Suisse). En effet, pour le premier, le projet Mérygrid démontre que des industries peuvent être totalement indépendantes même si elles sont gourmandes en énergie. Remarquons que leur installation de PV et la centrale hydroélectrique produisent sur un an l'équivalent de la consommation moyenne de 250 ménages belges (Engie, 2019). L'électricité excédentaire est revendue sur le réseau. Dans le second cas à Basel en Suisse, le taux d'autoconsommation s'élève à 63%. Dans les deux situations, un système de batterie est mis en place et présente un grand intérêt. À titre d'exemple, pour les logements, il permet d'augmenter de 50% le taux d'autoconsommation.

## 2.4 Les communautés énergétiques vues par la directive européenne et le décret wallon

### 2.4.1 Les directives européennes

Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne souhaitent promouvoir et étendre la production d'énergie via des sources renouvelables. En effet, la production d'énergie renouvelable est un enjeu majeur pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'objectif pour 2030 au sein de l'Union Européenne (UE) est de produire au moins 32% d'énergie à partir de sources renouvelables parmi la consommation finale brute (« Directive (UE) 2018/2001 », 2018). Ainsi, l'UE espère respecter les engagements pris lors de l'accord de Paris, consistant à réduire d'au moins 40% ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à celle de 1990.

En outre, le Parlement Européen encourage les États membres à surpasser cet objectif au vu de la baisse significative du coût des technologies dans le domaine du renouvelable.

Dans ce contexte et au regard des directives européennes relatives à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (2018) et aux règles communes pour le marché intérieur de l'électricité (2019), plusieurs faits sont pris en considération. Tout d'abord, une production décentralisée permet d'utiliser les sources locales mais aussi de garantir une sécurité de disponibilité de l'énergie. De plus, elle permet de réduire les distances de transport, ce qui a pour avantage d'en diminuer les pertes. Ensuite, la décentralisation de la production permet à la population locale d'être plus sensibilisée à sa consommation et ainsi, de la réduire. Enfin, les collectivités organisées pour la gestion de l'énergie apportent de nouveaux emplois à l'échelle locale. Bien évidemment, ces directives nécessitent une adaptation de la législation des pays de l'Union (« Directive (UE) 2018/2001 », 2018 ; « Directive (UE) 2019/944 », 2019).

Concernant la population, sa participation dans la démarche est fortement encouragée comme présenté à la section 2.2. En effet, la « Directive (UE) 2019/944 » (2019) explique notamment que "les technologies de production décentralisée d'énergie et l'automatisation des consommateurs ont permis à l'énergie communautaire d'être un moyen efficace et rentable de répondre aux besoins et aux attentes des citoyens en matière de sources d'énergie, de services énergétiques et de participation locale" (p. 6). Les citoyens sont invités à participer à la production et au partage d'énergie en s'impliquant dans une communauté. Et pour qu'ils deviennent de véritables acteurs, il est indispensable de prévoir

un accès à leurs informations de consommation et ce, en temps réel (« Directive (UE) 2018/2001 », 2018 ; « Directive (UE) 2019/944 », 2019).

Pour que cet accès soit possible, des systèmes intelligents de mesure doivent être installés. La directive de 2019 propose aux entreprises d'électricité d'optimiser leur utilisation en présentant de nouveaux services de gestion de l'énergie. Ceux-ci se baseraient sur des éléments de mesure intelligents interopérables et en élaborant des *packages* tarifaires. Ces capteurs pourront donc transmettre l'information de consommation en temps quasi réel à l'utilisateur. Les clients finaux doivent aussi pouvoir accéder à un historique de leur consommation et le visualiser facilement et ce, sans frais supplémentaires. Ces nouveaux services permettront à ces derniers d'être sensibilisés à leurs mode de consommation et de l'adapter en fonction de la disponibilité (« Directive (UE) 2018/2001 », 2018 ; « Directive (UE) 2019/944 », 2019).

Ces communautés peuvent produire, consommer, stocker et vendre de l'énergie renouvelable. De plus, leurs membres ont la possibilité de partager l'énergie produite via des unités de production dont la communauté détient la propriété. Ces communautés d'énergie n'ont pas pour but de faire du profit et doivent proposer à ses membres une énergie à un prix abordable. La mise en place de ces communautés permet d'adopter plus facilement des technologies novatrices pour la production d'énergie verte et des nouveaux modes de consommation notamment grâce à un réseau de distribution intelligent mais aussi à la participation des membres à cette transition. La directive de 2019 (p. 16) définit "une communauté énergétique citoyenne comme une entité juridique qui :

1. repose sur une participation ouverte et volontaire, et qui est effectivement contrôlée par des membres ou des actionnaires qui sont des personnes physiques, des autorités locales, y compris des communes, ou des petites entreprises,
2. dont le principal objectif est de proposer des avantages communautaires environnementaux, économiques ou sociaux à ses membres ou aux territoires locaux où elle exerce ses activités, plutôt que de générer des profits financiers, et
3. peut prendre part à la production, y compris à partir de sources renouvelables, à la distribution, à la fourniture, à la consommation, à l'agrégation, et au stockage d'énergie, ou fournir des services liés à l'efficacité énergétique, des services de recharge pour les véhicules électriques ou d'autres services énergétiques à ses membres ou actionnaires."

Pour que ce concept fonctionne, les directives proposent la mise en place de nouvelles mesures. Elles insistent notamment sur la coopération entre les gestionnaires de réseau de

distribution (GRD) et ces communautés pour faciliter les transferts d'électricité en leur sein, sous réserve d'une indemnisation due au GRD. En outre, la directive demande aux pays membres d'éliminer les éventuels obstacles réglementaires et administratifs (« Directive (UE) 2018/2001 », 2018 ; « Directive (UE) 2019/944 », 2019).

### 2.4.2 Le décret wallon

Pour s'inscrire dans ce mouvement de la transition énergétique et écologique et suivre la voie indiquée par le Parlement Européen, un décret wallon a vu le jour. Ce décret wallon du 2 mai 2019 modifiant les décrets du 12 avril 2001 relatif à l'organisation du marché régional de l'électricité, du 19 décembre 2002 relatif à l'organisation du marché régional du gaz et du 19 janvier 2017 relatif à la méthodologie tarifaire applicable aux gestionnaires de réseaux de distribution de gaz et d'électricité, va permettre le développement de communautés énergétiques renouvelables (CER) (Gouvernement Wallon, 2019).

Il légalise donc l'autoconsommation collective au sein d'un groupe de personnes faisant partie d'un périmètre déterminé. Les entreprises privées ont l'opportunité de s'associer afin de mutualiser l'énergie produite via des énergies renouvelables et avec des installations dont elles sont propriétaires (Gouvernement Wallon, 2019).

Le but recherché est de limiter les injections intermittentes sur le réseau public en favorisant une production locale et en circuit court de l'électricité. Des moyens de stockage peuvent être pris en considération si la communauté le décide (Gouvernement Wallon, 2019).

Ce décret définit les notions suivantes : communauté d'énergie renouvelable, électricité autoconsommée collectivement ainsi que périmètre local. Au sein de ce décret, la CWaPE et le GRD jouent un rôle important car ils définissent le périmètre local dans lequel la CER peut s'étendre. Ils prennent notamment en compte les contraintes techniques du réseau et la qualité des participants. En fonction de ce périmètre local, la CWaPE et le GRD, ou le cas échéant le gouvernement, fixent les droits et obligations en terme de seuil d'autoconsommation (Gouvernement Wallon, 2019).

Chaque participant à une CER doit être équipé d'un compteur quart horaire permettant d'enregistrer les informations de production et de consommation toutes les 15 minutes. Une redevance peut être demandée par le GRD pour l'utilisation de ses installations (Gouvernement Wallon, 2019).

Ce décret se veut particulièrement flexible et adaptable. En effet, le parlement attend le retour des projets pilotes mis en place pour publier des arrêtés qui fixeront un cadre aux CER en fonction de l'expérience acquise suite à la mise en place des projets (Gouvernement Wallon, 2019).

Bien que la Région Wallonne soit avant-gardiste par rapport à l'adoption de ce décret relatif au communauté d'énergie, il serait, selon APERe, 2020a, incomplet et même en contradiction avec la directive sur certains points. Par exemple, ce décret ne prévoit qu'une activité d'autoconsommation collective pour ces communautés. Or, selon la directive, l'autoconsommation est l'une des actions d'une communauté mais il en est prévu de nombreuses autres, comme nous l'avons vu dans le point 3 de la définition proposée dans la « Directive (UE) 2019/944 », 2019. Une révision est donc nécessaire pour assurer une bonne transposition et doit être entérinée pour cette fin d'année 2020 selon les délais imposés par la directive (APERe, 2020a).

### 2.4.3 Exemple de communauté d'énergie

#### Le projet CoLéco

Mis en place par l'agence de développement territorial IDETA, le projet Coléco est un projet pilote concernant neuf communes en Wallonie Picarde. Son objectif est de favoriser la consommation de l'énergie au moment où elle est produite. Autrement dit, ils veulent mettre en place des communautés d'énergie pour promouvoir l'autoconsommation collective. Ce projet s'inspire directement des directives européennes expliquées à la section précédente.

À Mouscron, le projet a pour but d'installer entre 70 et 100 KWc sur la toiture de l'école communale Saint-Exupéry. Cette école a été choisie notamment en réponse à la participation des élèves à de nombreux challenges et championnats autour des énergies renouvelables et de la réduction de la consommation d'énergie. Ils avaient donc émis l'idée et l'envie d'installer des panneaux photovoltaïques sur le préau de leur cour de récréation. De plus, cette école est dans une zone résidentielle dense avec une majorité de personnes en précarité.

Ce site présente donc l'avantage d'avoir une population assez présente durant la journée et ne pouvant pas prétendre à investir dans une installation de panneaux photovoltaïques. En effet, les petites maisons ouvrières ont une surface de toiture assez réduite, surtout si l'on retire les fenêtres de toit et les cheminées.

Enfin, les habitants de cette zone n'auraient généralement pas les fonds financiers nécessaires à une telle installation.

Ce projet permet donc de tester sur le terrain ce concept de communauté énergétique en s'inscrivant dans une volonté de réduction d'émission des gaz à effet de serre grâce à l'exploitation de l'énergie solaire. D'un point de vue social, il permet l'accès à une population précaire à de l'énergie de qualité. En effet, l'électricité produite sera revendue à prix coûtant aux habitants. Cela leur permettra de faire des économies non négligeables sur leurs factures d'électricité.

En 2017, une coopérative a été créée. Une zone de partage d'énergie est délimitée. Celle-ci ne peut comprendre que des bâtiments connectés à la même borne basse tension du distributeur de la zone. Autrement dit, cela réduit et délimite de façon stricte les habitants pouvant prétendre entrer dans la communauté. La zone est donc constituée entièrement de maisons unifamiliales et en compte plus ou moins 200. Un autre point limitant est la structure actuelle de la toiture de l'école. En effet dans ce cas ci, la charpente ne répond plus aux normes de l'Eurocodes, une étude de la stabilité de la structure est en cours et une rénovation est donc prévue avant la pose des panneaux.

La puissance installée sera calculée sur base de la consommation moyenne d'un ménage qui équivaut à 3500 KWh par an (selon le régulateur fédéral (CREG) et Eurostat) et sur la consommation sur quelque mois de membres de la coopérative ayant accepté d'avoir chez eux un compteur intelligent. Cela pourra grandement aider les personnes en charge du dimensionnement des panneaux puisqu'elles auront accès à un profil journalier précis des futurs utilisateurs. Malheureusement, peu de personnes ont accepté d'avoir un tel système installé chez eux. Quant à l'école, elle aura besoin de 40 kWc pour son utilisation. Le reste de la puissance installée sera en fonction et pour les membres. Aucun système de stockage n'est prévu à ce jour sachant tout de même que l'été est la saison avec la plus haute production et que durant cette période, l'école est fermée. L'électricité doit donc être redistribuée aux citoyens, aux membres. Sinon, elle sera revendue à très bas prix sur le réseau général.

Différentes réunions pour sensibiliser les habitants ont été organisées. Malheureusement, sur les 200 personnes concernées, seules 20 personnes se sont inscrites comme membres dans la coopérative. Selon le responsable du projet, le manque de sensibilité à la cause environnementale des populations précarisées ainsi que la méfiance à l'égard d'un service gratuit seraient les premières explications possibles à ce faible intérêt.

Une éducation des habitants est aussi nécessaire pour leur apprendre les bons réflexes. Étant donné que la période de production des panneaux est en général entre 10h et 16h, il faut expliquer aux habitants qu'il est préférable pour eux de consommer dans ce créneau horaire pour utiliser de l'énergie verte disponible sur le réseau et à plus bas coût. Un SMS leur sera envoyé en cas de surproduction des panneaux. Grâce à cela, ils pourront décider de faire fonctionner leur machine à laver ou leur lave-vaisselle afin d'utiliser le trop-plein d'énergie. Au final, le membre de la coopérative recevra deux factures : l'une venant de son fournisseur d'électricité habituel et l'autre, venant de la coopérative. La projection prévoit des économies financières de 10 à 15% qui pourront être comptabilisées sur la facture annuelle actuelle.

Données récoltées lors de l'entretien n°V avec Monsieur Fontaine, administrateur de la coopérative CoLéco (voir annexe A).

La mise en place d'un cadre légal est un facteur essentiel à l'évolution du marché des PV. Afin de privilégier l'énergie renouvelable, deux directives européennes ont été développées et poussent les États membres à légiférer ce domaine. En Belgique, un décret wallon permettant le développement de communautés énergétiques renouvelables a été approuvé en mai 2019. De nouveaux arrêtés sont attendus après l'acquisition d'expérience grâce aux projets pilotes amorcés sur le territoire.

La production de l'électricité au sein des communautés d'énergie de façon décentralisée et la modification du statut du citoyen passif en citoyen acteur permettraient une certaine prise de conscience de leur part et une réduction de leur consommation. Cependant, pour obtenir ce résultat, une éducation des utilisateurs est indispensable, comme nous l'explique, entre autres, le responsable du projet CoLéco.

Cette façon de consommer collectivement l'électricité a également pour avantage de donner accès à cette énergie renouvelable au plus grand nombre, ce qui a été confirmé par l'analyse du projet CoLéco.



# Chapitre 3

## Question de recherche

Dans le contexte actuel de transition énergétique, trois points importants ont été mis en lumière au sein de l'état de l'art et nous ont permis d'aboutir à cette question de recherche.

Le premier point concerne l'utilisation de l'outil CIM pour la gestion efficiente de l'énergie à l'échelle d'une ville.

Le deuxième aspect porte sur le mode de production d'énergie par le panneau photovoltaïque.

Le troisième et dernier constat attrait au nouveau décret wallon facilitant la mise en place de communautés énergétiques renouvelables. Concrètement, des voisins liés par une charte ont la possibilité de partager l'énergie produite en leur sein.

Suite à ce bilan, ce travail de fin d'études s'axe sur l'utilisation de la maquette CIM pour pouvoir prédire la production énergétique possible d'une zone et ainsi, déterminer si la création d'une communauté énergétique est pertinente sur un territoire donné.

La question de recherche générale s'énonce comme suit :

**Comment le *City Information Modeling* et *Management* peut-il aider à la prise de décision pour la création de communauté d'énergie renouvelable ?**

Pour y répondre, nous allons identifier les éléments opérationnels du CIM et les mettre en oeuvre afin d'évaluer le potentiel photovoltaïque d'un quartier mixte. Cette analyse nous permettra ensuite de comparer cette production potentielle à la demande en électricité estimée au sein de la zone.

# Chapitre 4

## Méthodologie

### 4.1 Description générale de la démarche

La démarche globale est détaillée par la figure à la page suivante (figure 4.1). Celle-ci illustre la méthode de recherche depuis la modélisation générale du cas d'étude à la simulation de la production et de la consommation.

Pour tenter de répondre à la question de recherche, nous avons effectué une étude sur un cas concret et suivi une méthode divisée en trois étapes principales. La première concerne la modélisation du cas d'étude, la seconde consiste en la simulation de production et la troisième propose une simulation de consommation électrique sur cette zone.

À l'étape une, un protocole de modélisation a été mis en place se basant sur les exemples de cas renseignés dans l'état de l'art. La méthode appliquée est l'utilisation d'une maquette unifiée (El-Mekawy et al., 2012 ; Song et al., 2017) pour créer une maquette CIM de la zone. L'étape deux consiste en la réalisation des simulations de production d'électricité via des PV grâce à ce modèle. Pour cela, plusieurs outils et logiciels seront testés et certains seront écartés de l'étude. Finalement, la troisième et dernière étape concerne l'estimation de la consommation globale de la zone en fonction des informations contenues dans la maquette CIM.

Au chapitre suivant, la comparaison entre la consommation et la production de la zone sera dévoilée afin de déterminer la pertinence d'une création de communauté énergétique sur cette zone. Grâce à cette méthode développée sur un cas concret, nous espérons ainsi répondre aux questions de recherche énoncées.

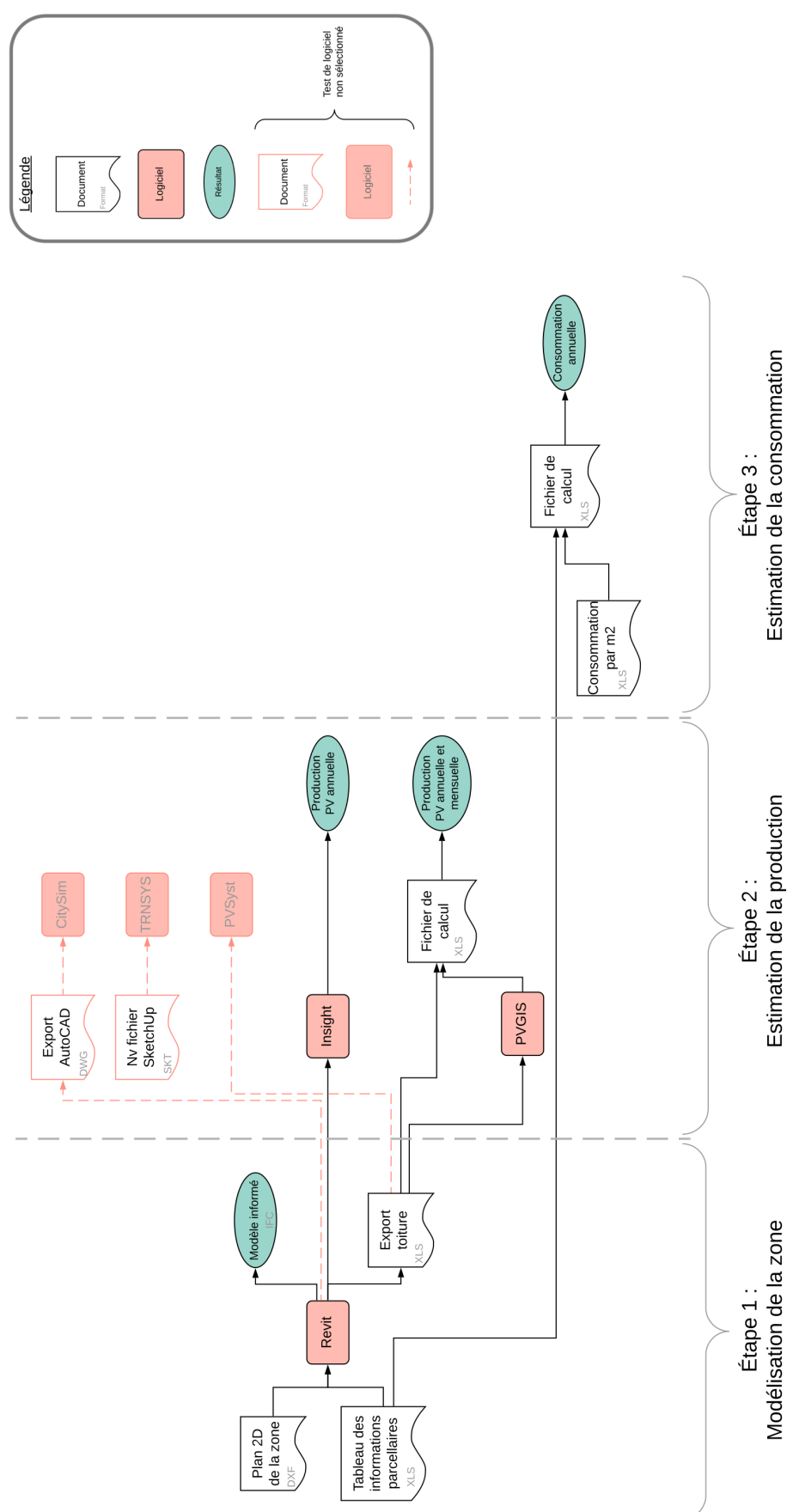


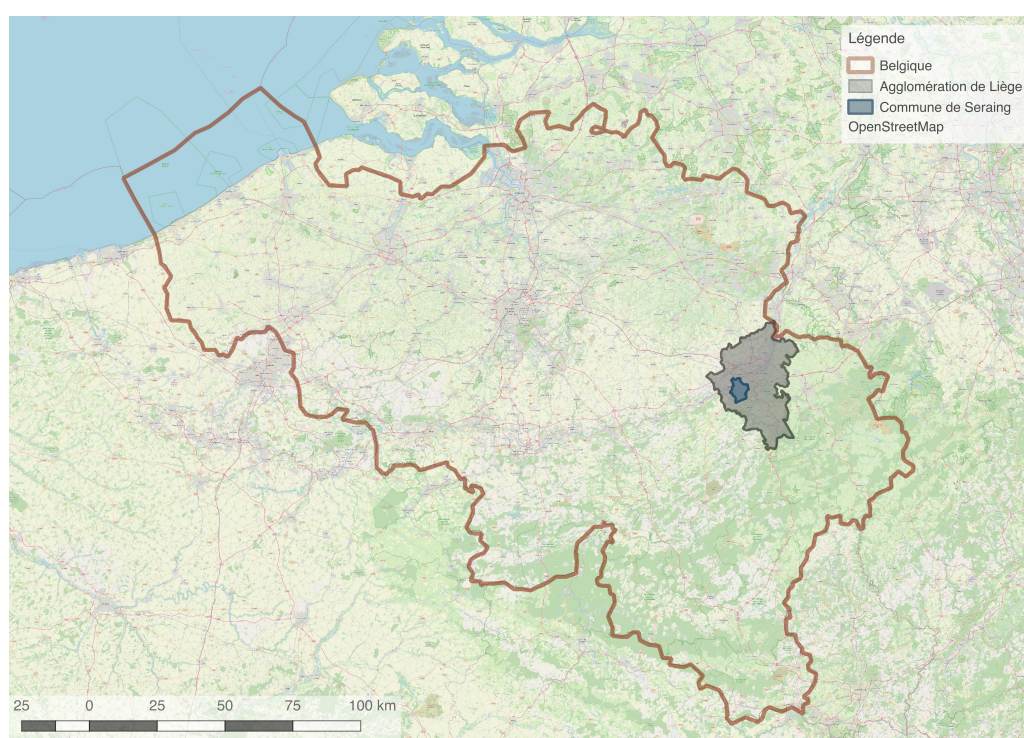
FIGURE 4.1 – Schéma de la méthode générale

## 4.2 Présentation du cas d'étude

Étant donné qu'un projet similaire avait été lancé à Seraing, des contacts ont été pris par le promoteur avec les membres décideurs de la commune. Malheureusement, cette première initiative n'a pas abouti. Grâce au carnet d'adresses du LUCID, nous avons pu échanger avec l'AREBS (Association de Redéploiement Économique du Bassin Sérésien) pour discuter de la possibilité de choisir un autre cas d'étude à Seraing. Travaillant sur un projet similaire, l'une des chargé(e)s de projet de l'AREBS a accepté de suivre cette recherche.

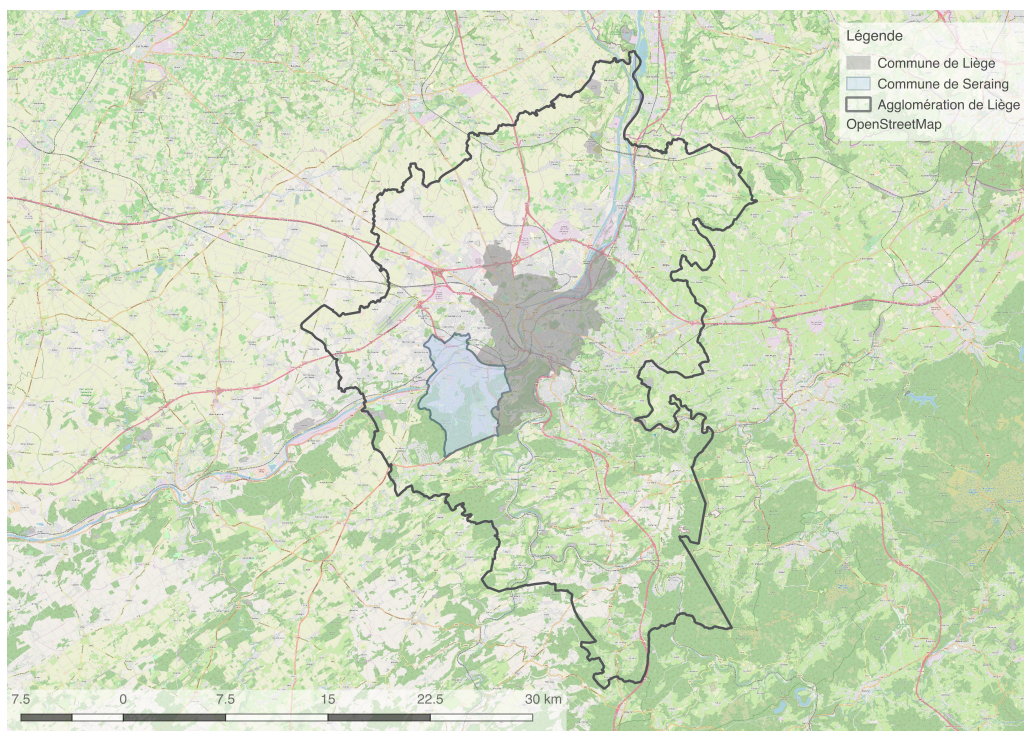
### 4.2.1 Introduction de Seraing

#### Localisation et aperçu historique de Seraing



**FIGURE 4.2** – Carte : localisation de Liège en Belgique

Seraing se situe dans l'agglomération de Liège, au sud-est de la Belgique. Cette commune se situe à proximité de la frontière des Pays-bas mais aussi de l'Allemagne (voir figure 4.2). Seraing fait partie de la province et de l'agglomération de Liège. Elle se trouve au sud-ouest de Liège en bordure de la Meuse et s'étend principalement vers le sud de cette dernière. La commune joue un rôle d'articulation entre le milieu urbain et rural (figure 4.3).



**FIGURE 4.3** – Carte : localisation de Seraing dans Liège

Anciennement connue comme l’un des lieux de résidence des Princes-Évêques, cette commune a connu son âge d’or lors de sa période industrielle intense dès le XIX<sup>ème</sup> siècle. Suite au déclin du charbonnage et de la sidérurgie dans la région, nombreuses sont les entreprises qui ont dû fermer leurs portes, laissant ainsi de multiples sites en friche à la terre particulièrement polluée.

### Master plan

Un master plan (annexe C) sur l’ensemble de la ville prévoit de réhabiliter ces terrains pour redonner vie à la ville. Ce master plan, développé par Eriges (Régie Communale Autonome) et l’AREBS, s’étend sur un périmètre d’intervention prioritaire de 800 hectares. Sur la totalité de la zone, 130 hectares sont des friches industrielles situées de façon aléatoire sur le territoire. Ce projet est décliné en trois catégories :

- un plan d’aménagement global,
- un plan de mobilité,
- et un plan d’espace vert (Depret, 2016).

En complément à ce master plan, Seraing participe au projet européen Remo-urban (*Regeneration model for accelerating the smart urban transformation*). Celui-ci a pour objectif la mise en place de villes intelligentes. Il s’axe sur trois pôles : l’énergie, la mobilité

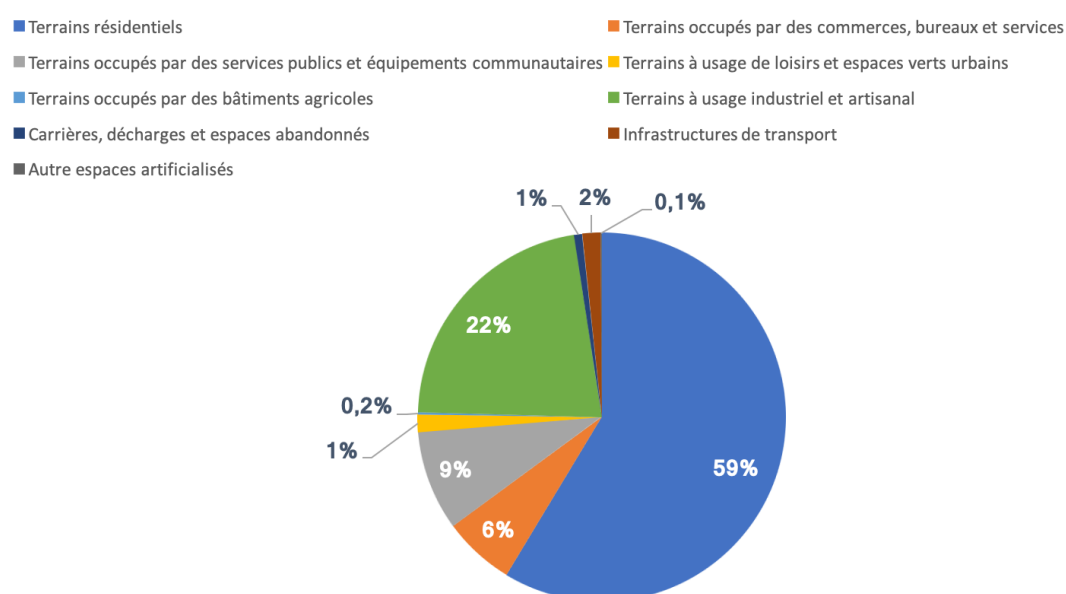


et les TIC (Technologies de l'Information et de la Communication)(Depret, 2016).

Ces différents projets font de Seraing, une ville où l'implantation d'un projet de communauté citoyenne d'énergie fait sens. Pour conduire cette expérience, il a fallu définir un périmètre d'étude dont la démarche est explicitée à la sous-section 4.2.2.

### Chiffres-clés de Seraing

**Occupation du sol** Cette commune est artificialisée à hauteur de 41,5% de sa surface totale. Cette surface est répartie (figure 4.4) comme suit : 58,7% de terrains à destination résidentielle, 22,2% de terrains à usage industriel et artisanal, 8,8% de terrains occupés par des services publics et équipements communautaires et enfin, les terrains occupés par des commerces, bureaux et services représentant 6,3%. D'autres fonctions y sont présentes mais à des pourcentages plus inférieurs, allant de 1,6% à 0,2%, dans l'ordre décroissant : les infrastructures de transport, les terrains à usage de loisirs et espaces verts urbains, les terrains occupés par des bâtiments agricoles et les autres espaces artificialisés (IWEPS, 2019).



**FIGURE 4.4** – Répartition de la superficie artificialisée de l'entité Seraing (sur base de : IWEPS, 2019)

**Population** Actuellement, Seraing compte 64.000 habitants dont l'âge moyen est de 40 ans. Parmi la population, 24% des citoyens ont moins de 20 ans et 18%, plus de 65 ans (en 2019) (IWEPS, 2019).

En 2017, le revenu médian était de 20.021€ , inférieur à celui de Wallonie (22.849€). Cette même année, le taux de chômage administratif à Seraing était plus élevé qu'en Wallonie (21,6% contre 13,8%). Quant à la proportion de personnes travaillant à temps partiel (34% en 2017), elle est équivalente au chiffre de la Wallonie. Remarquons tout de même la grande disparité entre hommes (13,8%) et femmes (56,6%) (IWEPS, 2019).

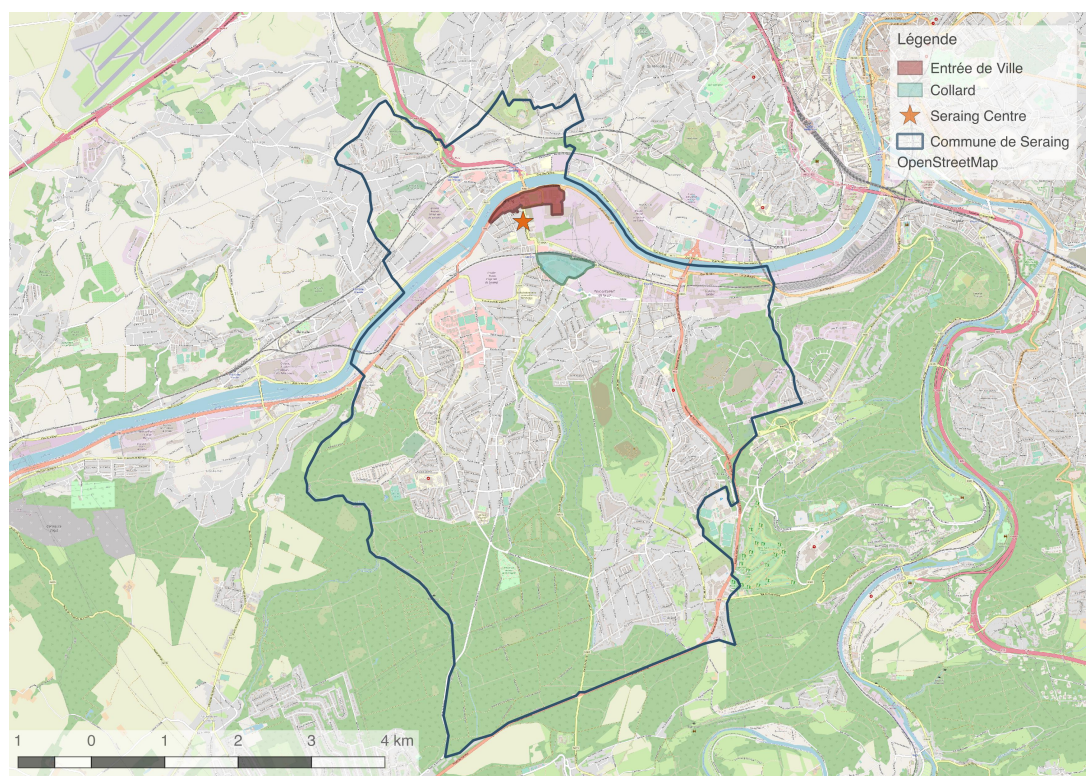
Nous pouvons donc en conclure que les habitants de la zone étudiée présentent un profil plus défavorisé et sont moins intégrés professionnellement que la moyenne des Wallons. Sachant que 21,6% de la population active sont des chômeurs et 34% sont des travailleurs à temps partiel, nous pourrions émettre l'hypothèse qu'ils sont davantage à leur domicile que les travailleurs à temps plein. De plus, 23,5% de la population a plus de 65 ans. Dès lors, la consommation électrique de ces chômeurs, travailleurs à temps partiel et retraités, serait plus importante dans le cours de la journée tout en participant aux pics de consommation en début et fin de journée.

## 4.2.2 Définition de la zone d'étude

La première étape a été de définir une zone de travail. L'AREBS a mis en lumière deux sites potentiels intéressants pour cette étude et intégrés dans la requalification du master plan de Seraing.

Pour effectuer notre choix, nous avons analysé ces deux quartiers sur base des activités présentes ainsi que des installations de panneaux solaires existantes (figure 4.5), l'objectif étant de privilégier la zone la plus représentative de l'usage des sols de la commune (voir chiffres-clés de Seraing). Ainsi, la zone idéale est composée de bâtiments à usage résidentiel, de bâtiments industriels et de bâtiments publics tels qu'une maison communale, d'écoles et de bureaux avec des pourcentages de superficie proches de ceux de la commune. Concernant les panneaux solaires, nous choisirons la zone possédant le plus d'installations possibles et de tailles différentes. Cela nous permettra par la suite de tenter de collecter les informations de production réelle afin de les comparer avec la production simulée.

Voici en détail les deux sites analysés en fonction de leur atouts et des éléments qui nous intéressent pour cette étude.



**FIGURE 4.5** – Carte : localisation des zones

#### — Site de la zone industrielle Collard

La zone Collard se trouve en dessous des voies de chemin de fer et à un kilomètre du centre (figure 4.6). Sa surface est de 15,5 hectares, dont 15% de parcelles d'habitations (maisons mitoyennes de type ouvrière) et 85% de commerces et services dont une carrosserie et des grandes surfaces (Lidl et Colruyt). Identifiée en rose sur la figure 4.6, la zone commerciale et industrielle occupe une large part du site. La mixité des activités est donc assez faible. Cette zone comprend également  $3200m^2$  de panneaux solaires répartis sur des toits d'entreprises et de commerces. Aucune des habitations n'en possède.



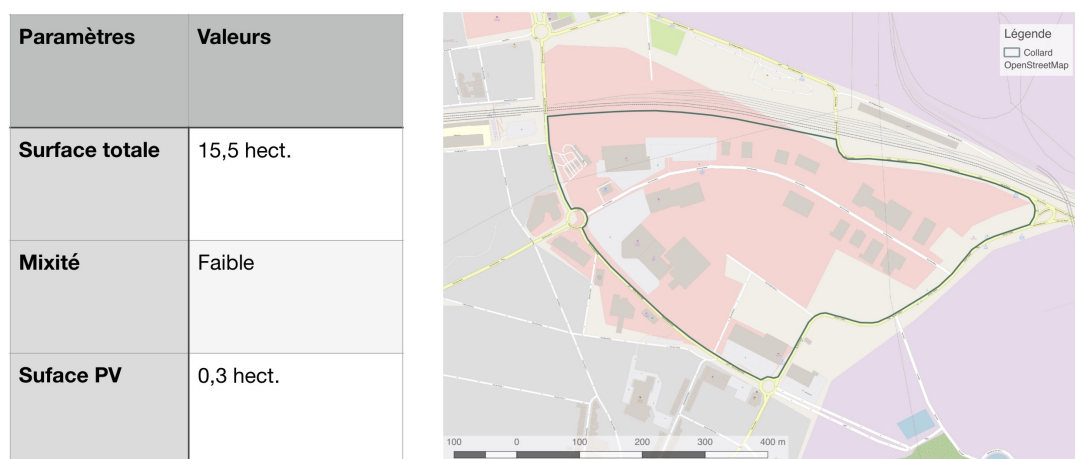


FIGURE 4.6 – Caractéristiques de la zone Collard

#### — Site de l'entrée de ville

Cette zone (figure 4.7) se caractérise par une mixité plus importante des bâtiments : une école secondaire, des parcelles d'habitation, des services et commerces (Forem, CSC, coiffeurs, restaurants), des bâtiments publics (hôtel de ville et cité administrative), des bureaux et une industrie (John Cockerill). Du point de vue des panneaux photovoltaïques, l'installation la plus importante se situe sur le site de John Cockerill :  $9200m^2$ . Cette installation pilote fait partie du projet MiRIS (pour Micro Réseau Intégré Seraing) composée de 6.500 panneaux connectés à des batteries de stockage et dimensionnée à l'aide du logiciel PVSyst. Notons également que l'école possède, elle aussi, une installation conséquente de  $1200m^2$ . Enfin, nous observons une petite installation sur le toit du Forem, de la cité administrative ainsi que sur quelques bâtiments d'habitation.

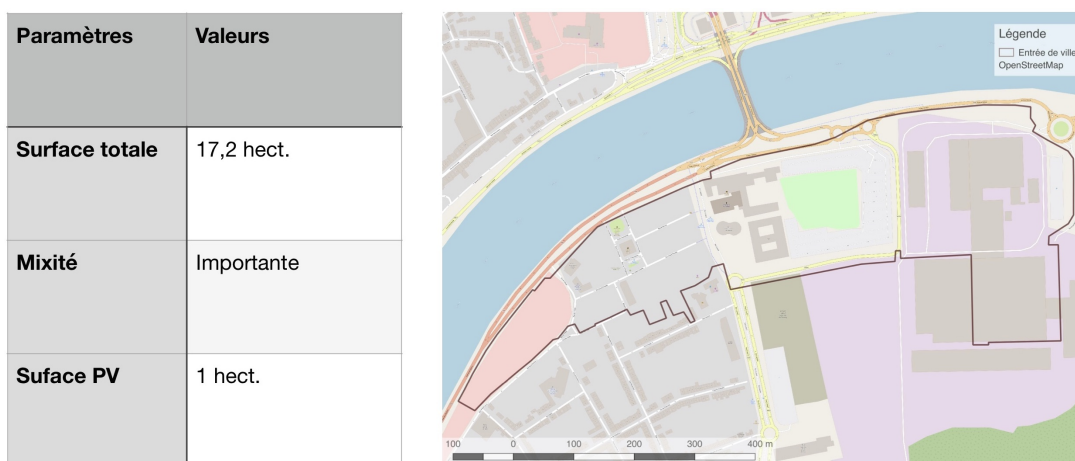


FIGURE 4.7 – Caractéristiques de la zone d'entrée de ville

Ainsi, la zone choisie est celle de l'entrée de Seraing en bord de Meuse. Cette décision est motivée principalement par l'importante mixité qui entraîne une diversité de consommation électrique. De plus, il sera peut être possible de collecter sur cette zone des informations de production d'électricité via des installations de panneaux photovoltaïques de différentes tailles pertinentes pour notre recherche.

### 4.2.3 Caractéristiques de la zone choisie

Le contour de la zone est dessiné sur base des parcelles cadastrales, extraites du plan cadastral de Seraing dont nous parlerons plus tard dans la section sur les données géométriques.

#### Les fonctions présentes

Ci-dessous, voici les différentes natures cadastrales de la zone (figure 4.8). Nous en dénombrons au total 22. Le tableau 4.1 présente chacune de ces catégories, leur définition (SPF Finances, 2017), le nombre de parcelles pour chacune d'entre elles, leur localisation et le pourcentage d'occupation par rapport à l'aire totale parcellaire de la zone.

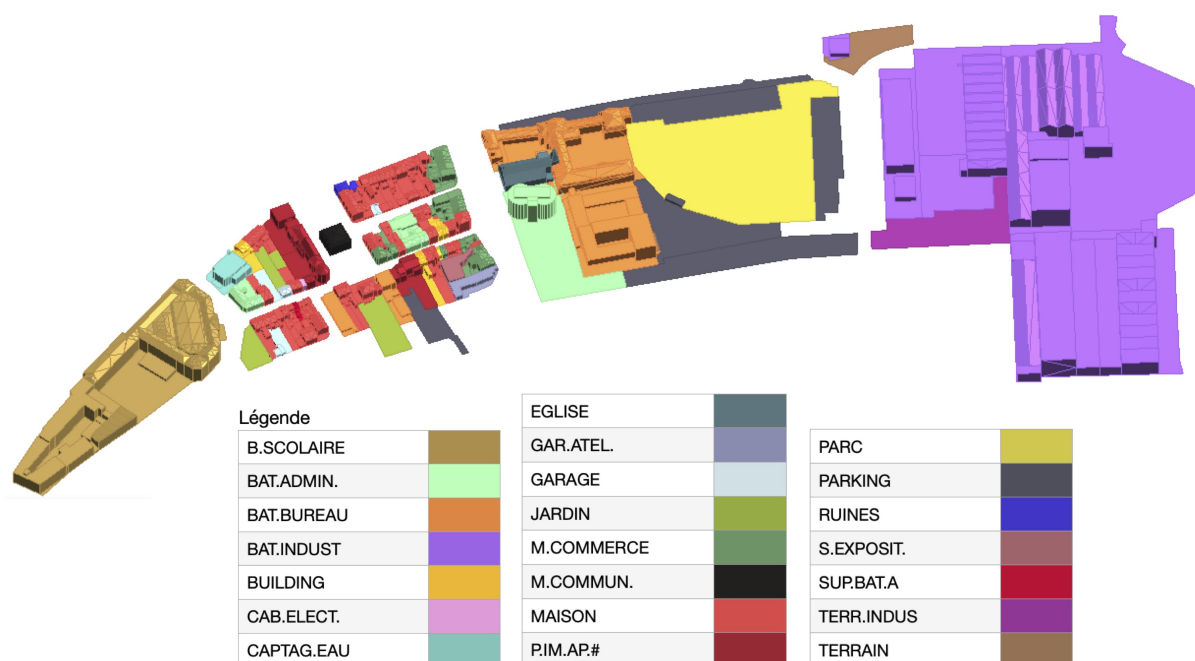


FIGURE 4.8 – Nature cadastrale des parcelles (plan cadastral de Seraing)

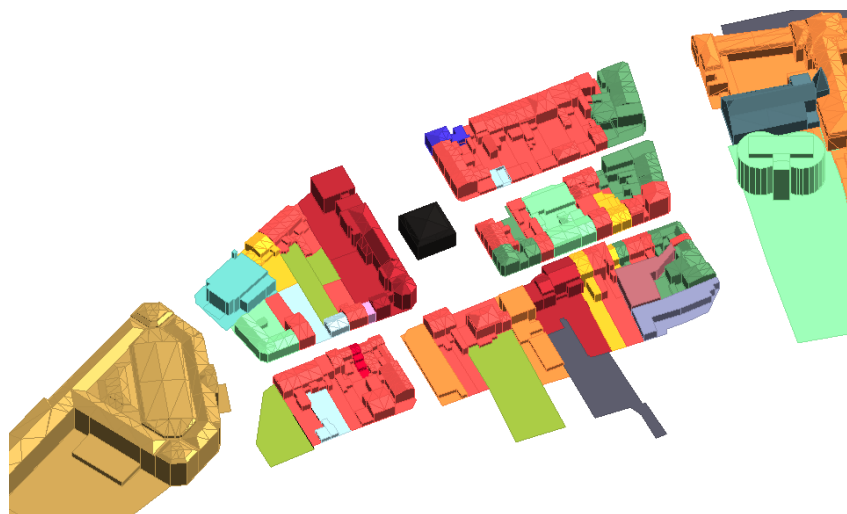
| Abréviation | Définition du cadastre                                                                                                                                                                         | Nbre sur site | % surface parcellaire |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|
| B.SCOLAIRE  | Bâtiment scolaire; bâtiment destiné à l'enseignement primaire, moyen ou supérieur non universitaire; aussi école maternelle ou gardienne et lycée, collège, athénée, internat, petit séminaire | 1             | 8,6 %                 |
| BAT.ADMIN.  | Bâtiment administratif; bâtiment appartenant à un organisme public (Etat, Province, Commune, etc.) et servant de surface pour bureaux ou à l'exercice de la mission de cet organisme           | 3             | 4,6 %                 |
| BAT.BUREAU  | Bâtiment appartenant à une personne ou à une entreprise privée, servant de surface pour bureaux                                                                                                | 5             | 8,3 %                 |
| BAT.INDUST  | Bâtiment industriel; Attention: ce terme ne peut être utilisé que si, pour un bâtiment industriel, on ne peut employer un autre terme, figurant dans les rubriques V à IX.                     | 2             | 41,7 %                |
| BUILDING    | Immeuble à appartements ou habitation plurifamiliale appartenant à seul propriétaire, sans acte de base                                                                                        | 4             | 0,7 %                 |
| CAB.ELECT.  | Cabine électrique                                                                                                                                                                              | 1             | 0,01 %                |
| CAPTAG.EAU  | Bâtiment pour la récupération et le captage de l'eau; aussi station de pompage, lavoir public                                                                                                  | 1             | 0,5 %                 |
| EGLISE      | Aussi cathédrale, basilique                                                                                                                                                                    | 1             | 0,6 %                 |
| GAR.ATEL.   | "Garage-atelier" pour la réparation et l'entretien de véhicules; aussi carrosserie, "charronnerie"                                                                                             | 1             | 0,4 %                 |
| GARAGE      | Garage individuel pour véhicules ou box pour automobiles; ensemble de garages individuels ou de boxes pour automobiles                                                                         | 6             | 0,5 %                 |
| JARDIN      | Jardin potager                                                                                                                                                                                 | 4             | 1,7 %                 |
| M.COMMERCE  | Maison de commerce : bâtiment spécialement équipé pour l'exercice d'un commerce de détail                                                                                                      | 17            | 1,6 %                 |
| M.COMMUN.   | Maison communale, hôtel de ville                                                                                                                                                               | 1             | 0,2 %                 |
| MAISON      | /                                                                                                                                                                                              | 47            | 5,2 %                 |

| Abréviation | Définition du cadastre                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Nbre sur site | % surface parcellaire |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|
| P.IM.AP.#   | Partie d'un immeuble à appartements                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 3             | 1,8 %                 |
| PARC        | Jardin d'agrément privé ou public, jardin botanique                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1             | 10 %                  |
| PARKING     | Parcage à ciel ouvert, ne faisant pas partie d'un immeuble à appartements multiples                                                                                                                                                                                                                                        | 6             | 9,6 %                 |
| RUINES      | Débris d'un édifice ancien ou écroulé dont l'exploitation normale n'est pas possible (maison incendiée, etc.)                                                                                                                                                                                                              | 1             | 0,1 %                 |
| S.EXPOSIT.  | Salle d'exposition                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1             | 0,3 %                 |
| SUP.BAT.A   | Nature de la parcelle-plan sur laquelle est érigé un building appartenant à un seul propriétaire et comprenant des locaux indépendants ou encore une ou plusieurs entités d'habitation ou d'exploitation pouvant bénéficier de l'immunisation du précompte immobilier sur bases de l'art. 253, 2° ou de lois particulières | 1             | 0,01 %                |
| TERR.INDUS  | Terrain industriel, lieu de chargement et de débarquement                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1             | 2,6 %                 |
| TERRAIN     | Terrain qui en raison du manque de pièce justificative ne peut être considéré effectivement comme terrain à bâtir                                                                                                                                                                                                          | 2             | 1,1 %                 |

**TABLE 4.1** – Tableau des fonctions reprises au cadastre (partie 2) Définition provenant du SPF Finances (2017)

Les bâtiments industriels occupent une majeure partie de l'espace et sont concentrés à l'est de la zone. Puis, nous identifions le bâtiment scolaire à l'ouest et ensuite, au centre, les bâtiments de bureaux et les maisons.

Sur la figure 4.9, nous remarquons que la majorité des bâtiments au niveau de la place Kuborn sont totalement répertoriés comme type "M.COMMERCE". Or, aux étages se trouvent parfois des appartements. Ceci est dû au fait que le Service Public Fédéral des Finances (SPF Finances) utilise une nature unique qui correspond à la destination principale de la parcelle. "Le choix de cette nature a été opéré en fonction des dispositions légales et administratives existant en matière de parcellage et de la disposition des lieux." (SPF Finances, 2017, p. 12)



**FIGURE 4.9** – Nature cadastrale des parcelles, zoom (plan cadastral de Seraing)

Suite à cette première analyse, nous remarquons également que si un bâtiment est classé dans la catégorie "RUINES", celui-ci fait aussi partie de la liste des bâtiments inoccupés sur Seraing construite par Eriges. En effet, dans le cadre du projet Urbact, une carte des bâtiments inoccupés a été dressée. Sur la zone faisant l'objet de notre étude, 19 bâtiments ont été identifiés comme inoccupés. Ces bâtiments sont des maisons ou des commerces. Trois d'entre eux sont repris dans le projet Primo qui vise à acquérir des maisons inhabitées pour les rénover et les mettre en location.

Nous devons souligner aussi le fait que seules les "petites et moyennes entreprises" ont le droit de participer à une communauté d'énergie selon l'article 9 du décret du Gouvernement Wallon (2019). Pour le cas d'étude, nous avons pris le parti de conserver l'industrie présente sur le site afin d'étudier la mixité sectorielle de la zone en regard de la production.

### Cas à part de la station de relevage

Cette zone comprend également un bâtiment de L'Association Intercommunale pour le Démergement et l'Épuration (AIDE) repris dans la catégorie "CAPTAG.EAU". L'AIDE est un organisme s'occupant du traitement des eaux usées ainsi que son rejet dans la Meuse. Dû au passé industriel et à la forte exploitation des sous-sols, un important affaissement a été observé ayant pour conséquence un niveau de la Meuse plus haut que le niveau des caves. Pour pallier à ce problème de taille, des stations de pompage ont été installées pour relever les eaux usées et permettre leur déversement dans la Meuse.

L'une de ces stations de pompage se situe au sein du site choisi. Étant donné que ce système date de 1937, il profite d'un réseau électrique indépendant en haute tension. Ce réseau comprend de nombreux points d'injection avec un compteur chacun. Cependant, aucune des stations ne dispose d'un compteur. Il est donc impossible de connaître leur consommation propre. Le réseau compte à ce jour 10 points d'injection (informations récoltées lors de l'entretien n°II).

La station concernée, la numéro 6, comporte six pompes de capacité de 800L/s. Le pompage dépend entièrement des événements pluvieux et du bassin de collecte des eaux. Les pompes fonctionnent donc selon la demande. Dès lors, elles sont rarement toutes actives en même temps. Par conséquent, ces éléments rendent l'approximation de la consommation très complexe (informations récoltées lors de l'entretien n°II).

Pour ces différentes raisons, la station de pompage est exclue de la simulation de consommation d'électricité.

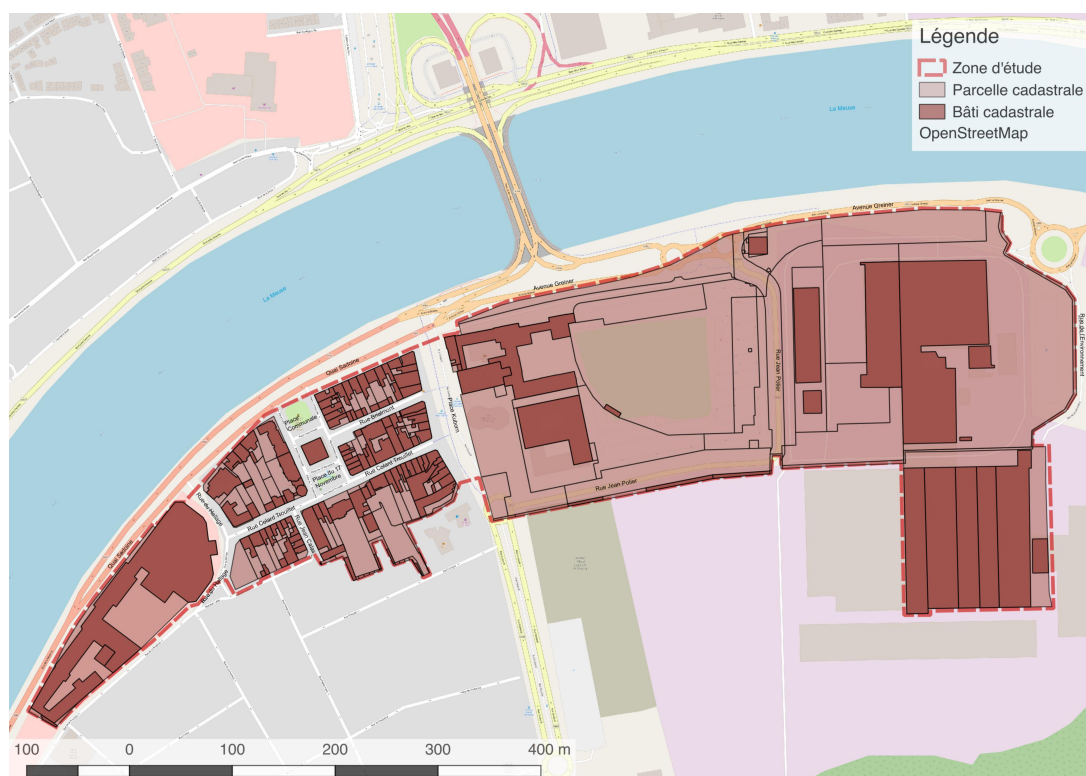
#### 4.2.4 Données géométriques et informations d'utilisation des parcelles

Après avoir défini la zone, nous avons collecté différentes données : des données géométriques ainsi que des données relatives aux parcelles et aux bâtiments sur la zone. Celles-ci ont ensuite intégrées au modèle 3D, ce qui a permis d'effectuer des simulations de production d'électricité via des panneaux photovoltaïques. Enfin, nous avons réalisé une comparaison entre la consommation et la production de la zone afin de déterminer la pertinence de la création d'une communauté énergétique.

Comme expliqué dans l'état de l'art, peu nombreux sont les cas où les chercheurs ont reçu une maquette 3D toute faite de leur zone d'étude. Par exemple, dans le cas de Xue et al. (2019), ils se sont basés sur un relevé au LiDAR en combinaison avec une carte topographique et une carte OpenStreetMap pour former un modèle global. Siraganyan et al. (2019) ont, eux, créé leur maquette en utilisant le logiciel Rhinoceros mais ils ne précisent pas leurs sources.

En ce qui nous concerne, aucune maquette 3D n'est disponible pour notre zone d'étude. Cependant, un fichier Shapefile nous a été fourni. Ainsi, nous avons construit une maquette de site 3D informée afin de mener à bien la simulation et éviter les problèmes de perte de données ou d'utilisation de fichiers uniquement 2D. La base de cette maquette est le

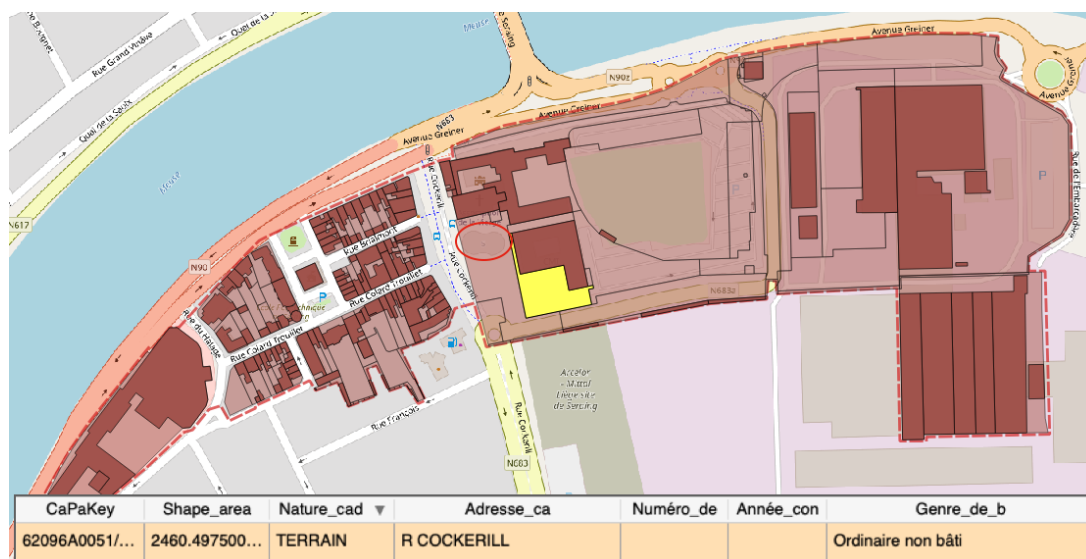
modèle 2D renseignée en format SHP. Celui-ci a ensuite été transformé en fichier DXF pour permettre sa lecture dans l'outil SketchUp. Par la suite, nous avons effectué un travail de "réinformation" grâce à un plug-in de Revit pour redonner à chaque élément (chaque parcelle) ses informations de base issu du fichier SHP. Celui-ci n'est autre que le plan cadastral fourni par la Ville de Seraing. Il contient l'information géométrique 2D comme nous le remarquons à la figure 4.10 ainsi que des informations relatives à chaque parcelle dont le CaPaKey (numéro d'identification unique à chaque parcelle repris dans le cadastre), la surface, la nature cadastrale, l'adresse et le type de bâtiments présents.



**FIGURE 4.10** – Plan cadastral, parcellaire et bâti de Seraing

Malheureusement, le fichier n'est pas tout à fait à jour et lors de l'exploitation des données, certaines incohérences ont fait surface. Citons notamment l'absence de la cité administrative sur le cadastre bâti (ovale rouge sur la figure 4.11), ainsi que certaines informations en non-adéquation avec la réalité de terrain. À titre d'exemple, le terrain sélectionné en jaune sur la figure 4.11 est occupé par un bâtiment de bureaux. Or, les informations sur sa nature cadastrale et son genre de bâti sont de la catégorie "TERRAIN" pour le premier et "Ordinaire non bâti" pour le second (figure 4.11). Dès lors, le fichier a été passé en revue pour corriger les incohérences évidentes.





**FIGURE 4.11** – Exemple d'incohérences du plan cadastral

Les dernières données géométriques dont nous avons besoin pour modéliser les bâtiments en 3D, sont la hauteur et la pente des toitures. Pour cela, une première approche a été de faire une requête sur la plateforme en ligne "Cadmapper" qui permet de télécharger un fichier SketchUp de la zone délimitée. Malheureusement, sur la zone d'étude, seule la cité administrative apparaît. Grâce à un autre plan cadastral contenant des informations de hauteur, reçu dans le cadre d'un cours de master 1 et datant de 2010, la hauteur d'autres bâtiments a pu être déterminée. Quant aux hauteurs restantes, elles ont été définies par déduction en utilisant l'outil Google Earth. Concernant les pentes, elles ont été modélisées sur base des hauteurs déterminées et déduites des gouttières et du faîte de toit.

### 4.3 Modélisation de la zone

Pour notre recherche, il était primordial de créer une maquette CIM de la zone. Cela nous permet de mettre l'accent sur l'importance de la disponibilité des informations attachées à chaque élément. Cela est fondamental pour la mise en oeuvre de l'étude et surtout pour la bonne compréhension par le pouvoir décideur. Ce dernier doit pouvoir comprendre le projet dans son ensemble mais aussi interpréter le rôle de chaque élément pour le bon fonctionnement du projet dans sa globalité.

Dans la suite de cette section, nous allons expliquer comment les données présentées dans la partie précédente ont été exploitées afin de créer une maquette CIM de la zone. Puis, nous ferons le point sur les logiciels utilisés.



### 4.3.1 Protocole de modélisation

La maquette réalisée est à l'image de la maquette "unifié" (UBM) de El-Mekawy et al. (2012) et Song et al. (2017) expliquée dans la revue de littérature (page 8).

Le processus de création de la maquette CIM peut être divisé en trois phases (figure 4.12) :

- La phase 1 consiste en la lecture du plan cadastral et à son export en deux formats différents.
- La phase 2 utilise l'un des exports comme base de modélisation avec Google Earth pour créer la maquette 3D qui est ensuite importée dans Revit.
- La phase 3 exploite cette maquette dans Revit ainsi que l'autre export créé en phase une pour pouvoir délivrer une maquette CIM.

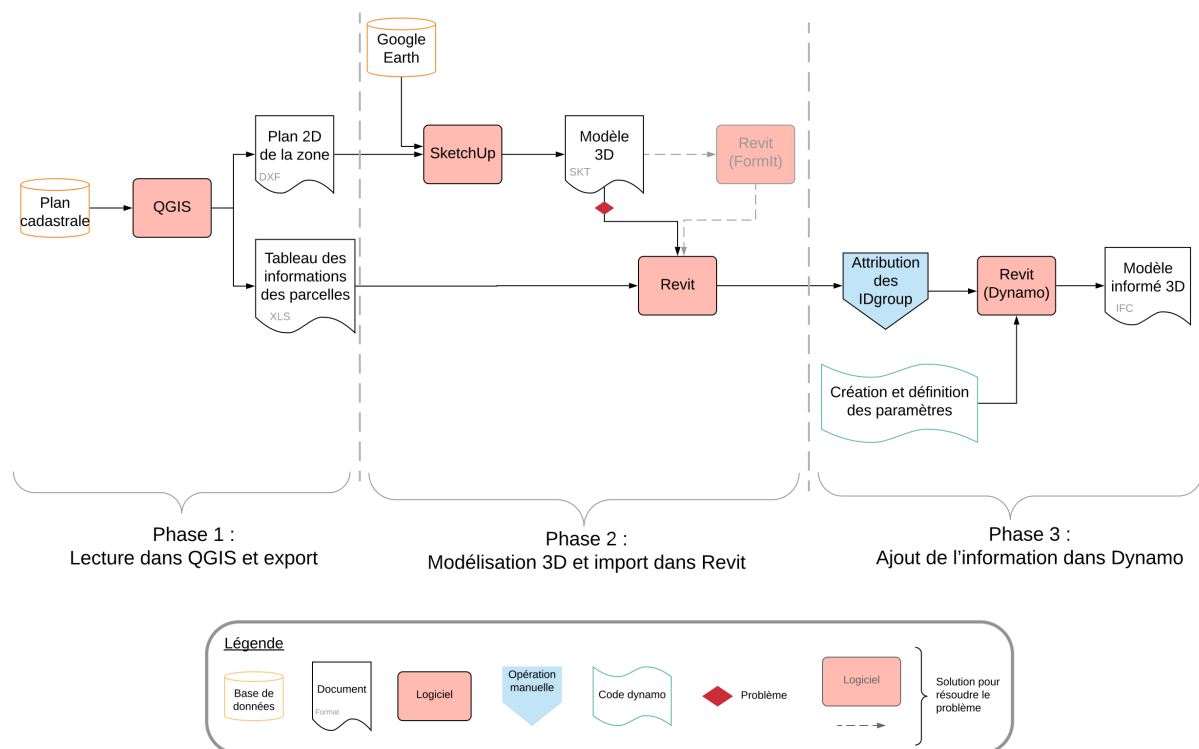


FIGURE 4.12 – Méthode de modélisation

#### Phase 1 : Lecture dans QGIS et export

Comme expliqué précédemment, la base de la modélisation est le plan cadastral. Ce fichier nous a été transmis en format shp. Grâce à QGIS (un logiciel de GIS), la géométrie a été exportée en DXF, de même que les informations relatives à chaque parcelle exportées en XLS.

## Phase 2 : Modélisation 3D et export dans Revit

Dans SketchUp, la volumétrie des bâtiments a été créée sur base de l’empreinte des bâtiments contenue dans le fichier DXF exporté en phase 1. Le fichier SketchUp est organisé de telle manière que le groupe de la parcelle contient le sous-groupe de la surface de la parcelle et le sous-groupe du bâtiment. Les surfaces du bâtiment sont attribués à deux calques différents, l’un contient les surfaces de murs et l’autre, les surfaces de toitures.

Puis, ce fichier SketchUp est importé dans Revit. Dans ce logiciel, la manipulation des groupes et des calques formés dans SketchUp n’est pas possible. Il permet néanmoins d’ouvrir le fichier obtenu en SKT mais la lecture des triangulations est complexe et lors de l’export IFC, nous observons des volumétries manquantes. Une conversion du fichier SKT en fichier FormIt pour ensuite l’importer dans Revit, a permis de résoudre cet obstacle grâce à un plug-in de Revit installé automatiquement dans la version 2020, nommé *FormIt converteur*.

## Phase 3 : Ajout de l’information dans Dynamo

Après avoir importé ce fichier, nous y avons intégré de l’information, ce qui permet à l’utilisateur final de pouvoir identifier les bâtiments en fonction de leurs caractéristiques et cela, rapidement grâce à un *viewer* IFC. Dans notre cas, nous avons réintégré les informations attribuées à chaque parcelle dans le fichier shp. Pour ce faire, nous avons utilisé le tableau exporté en phase 1 contenant les informations que nous voulons faire apparaître.

Pour pouvoir établir une correspondance entre les parcelles de la maquette et la ligne la concernant dans le fichier Excel, un identifiant a été créé. Il est nommé "IDgroup" et est composé d’un numéro allant de 1 à 110 pour les 110 parcelles de la zone. Nous avons ainsi réalisé à la main un travail d’attribution du numéro d’IDgroup pour chaque parcelle.

Grâce à un code Dynamo développé dans ce but, les paramètres y sont instaurés et complétés de façon automatique grâce à l’importation du fichier Excel et à la concordance des numéros IDgroup. En effet, comme on peut le voir sur cette image 4.13, le code prend en input les deux fonctions en orange, c’est à dire l’Excel (au dessus) et les éléments importés (en dessous). La fonction 1 va donc chercher le fichier pour importer le tableau sous forme de liste. La première colonne est retirée de la liste car elle comporte les IDgroup. Avec l’intitulé de chaque colonne, nous avons créé un paramètre. Cette étape correspond à la fonction 2. Le groupe 3 s’occupe des éléments présents dans le fichier Revit, les sélectionne tous et enlève de la liste les éléments n’ayant pas de numéro IDgroup (comme par

exemple, la surface de la zone). Les éléments restant ont été triés en fonction de la valeur de l'IDgroup grâce à la fonction 4. Enfin, le groupe 5 recherche les paramètres créés à la fonction 2, le tableau des valeurs ainsi que les éléments correspondants aux parcelles. Il complète également chaque paramètre avec la valeur correspondante de l'IDgroup. L'entièreté du code est disponible en annexe D.

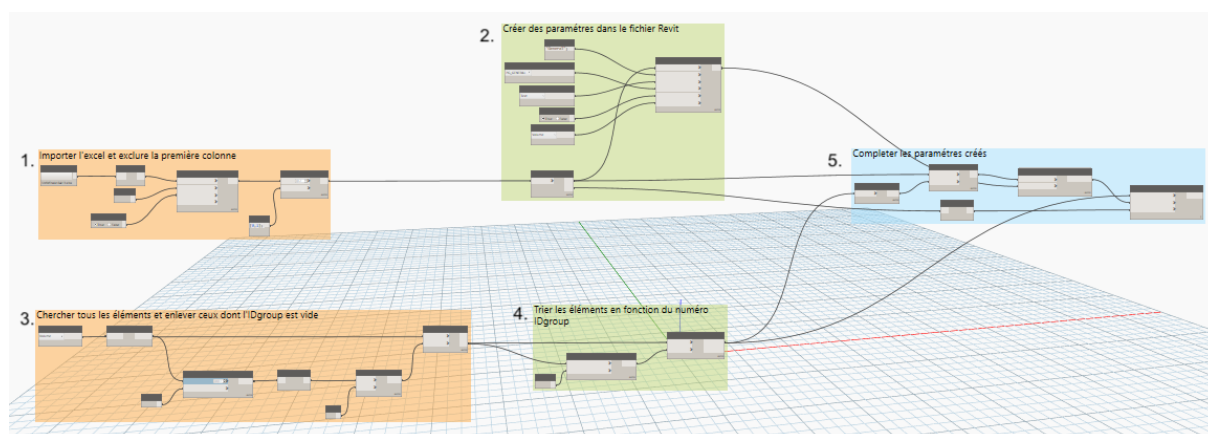


FIGURE 4.13 – Code dynamo pour intégrer les paramètres

Ainsi, nous avons obtenu une maquette Revit informée. Par la suite, un export IFC a été réalisé et permet à un utilisateur lambda d'exploiter la maquette. Cette situation est illustrée par un exemple à la figure 4.14 où le fichier IFC est ouvert avec BIMcollab ZOOM.

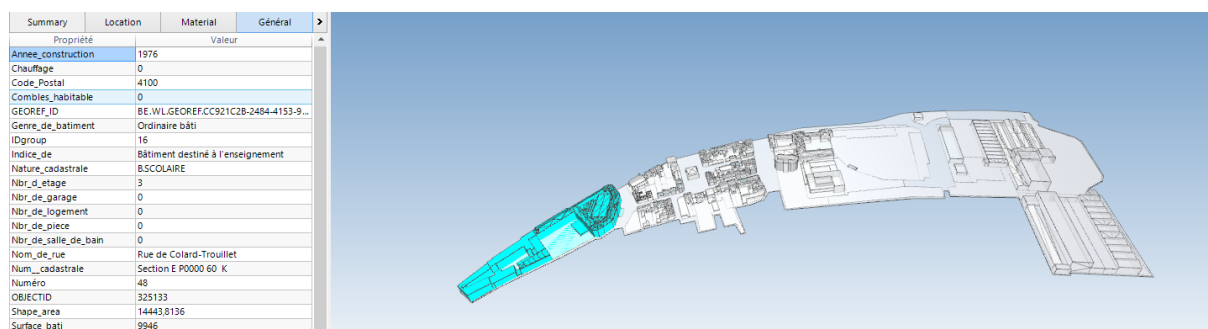


FIGURE 4.14 – Maquette IFC dans BIMcollab Zoom

## Logiciels

Les logiciels utilisés pour la modélisation sont donc :

- QGIS (Mac) pour l'exploitation du fichier shp et les exports en format dxf et xls.
- SketchUp (Mac) pour la modélisation 3D.

- Excel (Mac) pour la gestion du tableau d'informations.
- Autodesk Revit (Windows) ainsi que les compléments *FormIt converter* et Dynamo qui sont installés automatiquement avec Revit. Un package Dynamo est par contre nécessaire. Il s'agit de "Clockwork", ces derniers ont été utilisés pour la création de la maquette CIM informée.
- BIMcollab ZOOM (Windows) pour la visualisation de l'IFC.

Les formats d'échange sont illustrés dans le tableau ci-dessous (tableau 4.2).

| Information exportée        | Type de logiciel natif | Nom et version du logiciel natif                                                                                         | Format natif | Format d'export | Type de logiciel d'import | Nom et version du logiciel d'import                                                                                       |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Plan cadastral              | SIG                    | QGIS, version 2.18.28                   | SHP          | DXF             | Modeleur                  | SketchUp, version 18.0.16976           |
| Informations plan cadastral | SIG                    | QGIS, version 2.18.28                   | SHP          | XLS             | Tableur                   | Excel, version 15.32                   |
| Maquette 3D                 | Modeleur               | SketchUp, version 18.0.16976           | SKT          | AXM             | Modeleur                  | Plug-in FormIt converteur Revit 2020  |
| Maquette 3D                 | Modeleur               | Plug-in FormIt converteur Revit 2020  | AXM          | RVT             | Modeleur                  | Revit 2020                           |
| Maquette CIM                | Modeleur               | Revit 2020                            | RVT          | IFC             | Viewer                    | BIMcollab ZOOM, version 3.2          |

TABLE 4.2 – Modélisation import, export

### 4.3.2 Export des informations de toitures

Concernant les toitures, certaines simulations nécessitent d'exporter des propriétés.

Malheureusement et après beaucoup de temps consacré à la manière de transformer les surfaces de volume de toiture en *IFCroof* via un code dynamo, nous faisons face à un échec. Celui-ci s'explique notamment par la triangulation des toitures venant de SketchUp. À cause de celle-ci, il est très compliqué de récupérer les contours des toitures pour ainsi créer des éléments IFC.

Une solution pourrait être de transformer à la main ces surfaces en toiture via l'outil "toit par face". Les surfaces sont sélectionnées une par une pour devenir des toitures, mais même avec cette technique, des problèmes apparaissent comme nous pouvons l'observer à l'exemple illustré par la figure 4.15.

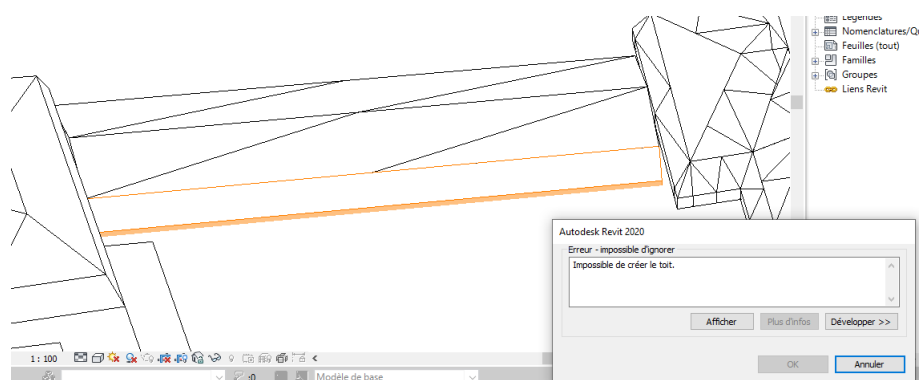


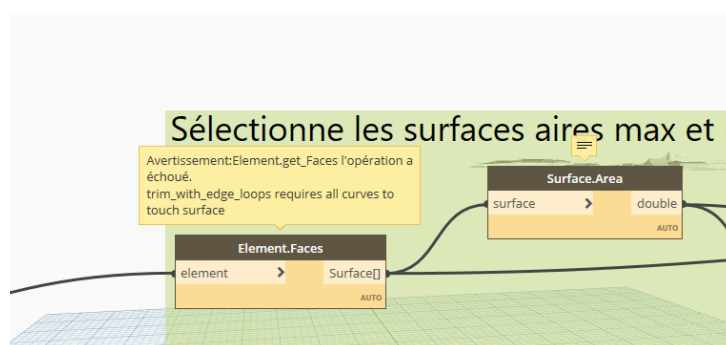
FIGURE 4.15 – Modélisation des toitures : problème de triangulation (1)

Dans ce cas, Revit nous propose de trianguler la toiture. La surface est divisée et peut être découpée en deux, trois ou quatre surfaces. Dans le cas où la triangulation divise la surface de telle manière qu'un hexagone se forme au milieu et le sépare totalement des arêtes de la surface, la transformation par face n'est plus possible. Ainsi, certains cas présentent des trous dans les toitures, ce qui pose un premier problème majeur. Cela concerne une vingtaine de toitures situées dans la zone résidentielle au milieu de la zone d'étude, comme nous le remarquons à la figure 4.16, les formes oranges représentant le manque de toiture.



FIGURE 4.16 – Modélisation des toitures : problème de triangulation (2)

De plus, le passage dans Dynamo est également complexe pour attribuer de nouveaux paramètres aux toitures relatifs à leur pente, leur orientation ainsi qu'à la présence de PV. Le code est élaboré sur base de cinq toits créés avec le même outil que les toitures de notre cas. Au passage de l'analyse sur tous les toits de la zone, une erreur apparaît (figure 4.17). Le message indique que toutes les courbes doivent toucher la surface. Nous en concluons qu'il s'agit donc encore d'un problème lié à la triangulation.



**FIGURE 4.17** – Modélisation des toitures : problème de triangulation (3)

Au vu des ressources disponibles, nous n'avons pas su résoudre ce problème mais nous l'avons contourné. Nous avons ainsi décidé de repartir des surfaces de la catégorie volume au nombre de 1691 pour exporter les données que nous jugeons nécessaires dans un fichier Excel. Les informations exportées sont donc l'aire, les vecteurs X, Y et Z de la normale à la surface et la pente de la surface grâce à un code décrit à la figure 4.18. Pour cette étape, différentes précautions sont à prendre. Premièrement, il est primordial de vérifier les unités de Revit dans l'onglet "Gérer" et sélectionner les [m] si ce n'est pas le cas. Deuxièmement, les surfaces que nous avons modélisées dans SketchUp doivent être correctement orientées. Pour information, dans SketchUp, les surfaces blanches auront un vecteur pointant vers le haut et pour les surface grises, celui-ci pointera vers le bas. Si les surfaces sont grises, le vecteur aura une composante z négative. Il est donc nécessaire que toutes les faces soient blanches.

La pente de la surface a été définie en calculant l'angle entre le plan XY et le plan de la surface (figure 4.18). Le détail de ce code se trouve à l'annexe E.

Malheureusement, ce processus rompt complètement le lien avec le fichier Revit. Il n'y a plus aucun moyen de savoir quelle ligne du fichier Excel correspond à quelle toiture en 3D. Un export avec les numéros uniques a été testé mais étant donné que les toits sont regroupés par parcelle, il existe un numéro par groupe et non, par surface.

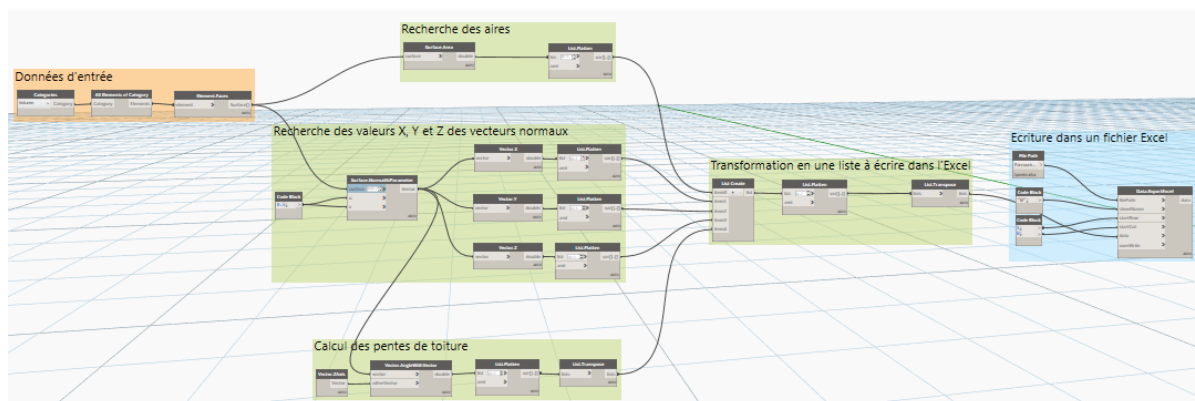


FIGURE 4.18 – Modélisation des toitures : code pour l’export Excel

## 4.4 Simulation de production d’électricité par panneaux photovoltaïques

Afin d’estimer la production totale d’énergie future au sein de la zone par des panneaux photovoltaïques, nous avons analysé l’apport de cinq logiciels capables de simuler celle-ci. Deux d’entre eux (Insight et PVGIS combiné à Excel) ont été sélectionnés pour les raisons éclaircies par la suite.

Avant tout développement, notons tout d’abord que la zone de notre simulation est composée de nombreux bâtiments dont les toitures, leur pente et leur orientation sont diverses et variées. Or, cette diversité ne convient pas à l’utilisation de certains logiciels. En effet, ceux-ci ne prennent en input qu’une seule et unique pente et inclinaison.

### 4.4.1 Logiciels exclus

#### CitySim

CitySim est un logiciel développé au laboratoire d’énergie solaire et physique du bâtiment à l’École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Il permet de réaliser des simulations et de l’optimisation à l’échelle d’un quartier urbain. Cet outil a notamment été utilisé dans l’étude menée par Siraganyan et al. (2019) en Suisse, exposée à la sous-section 2.3.2 (page 26) de l’état de l’art.

Concrètement, ce logiciel a pour fonctionnalité l’évaluation de la radiation solaire, du bilan énergétique net à ondes longues, des température de surfaces, du facteur de vue ainsi que des demandes en chauffage et refroidissement et ce, via une interface graphique qui utilise une visualisation intégrant le modèle 3D.

De prime abord, utiliser CitySim semble tout à fait pertinent dans le cadre de ce travail. Cependant, l'import qui nous intéresse est un fichier AutoCAD 2000 avec soit des face3D ou bien des polylignes. Après la transformation de notre fichier SketchUp en AutoCAD 2000, l'import dans CitySim n'est pas accompli et ne nous permet pas de l'utiliser pour cette recherche.

## TRNSYS

TRNSYS pour *Transient System Simulation* est un logiciel de simulation dynamique extrêmement flexible. Il est utilisé pour mimer le comportement des systèmes transitoires. Cet outil est composé de deux parties. La première, TRNBuild, examine un fichier d'entrée et solutionne le système de façon itérative. La deuxième partie, Simulation Studio, est constituée d'une bibliothèque de composants à connecter (éoliennes, processeurs de données météorologiques, équipements HVAC, etc.) pour créer le système voulu.

Il existe un plug-in de SketchUp permettant d'utiliser le modèle 3D créé comme base pour l'encodage des données géométriques. Malheureusement, ce plug-in ne permet pas d'utiliser une maquette SketchUp réalisée au préalable, ce qui est notre cas. Il est nécessaire de modéliser la géométrie dans un fichier .idf, par zone thermique et via les outils SketchUp. De plus, le nombre de zones thermiques maximum autorisé est de 99. Or, le territoire de notre étude est composé de 110 parcelles et sur une parcelle, il peut y avoir plusieurs constructions comme pour les bâtiments industriels ou pour les maisons avec une annexe indépendante. Ainsi, même si nous adaptions la modélisation afin qu'une zone thermique corresponde à un bâtiment (ce qui ne correspond pas à la réalité), nous n'aurions pas assez de zones thermiques pour modéliser l'entière des bâtiments. En outre, Simulation Studio n'autorise l'ouverture que d'un seul type 57 (type regroupant les caractéristiques géométries d'un bâtiment) par fichier.

Concernant les ombrages, leur modélisation est possible grâce à l'outil *shading*. En effet, les outils de SketchUp permettent de modéliser les bâtiments et la végétation aux alentours dont l'ombre est portée sur le bâtiment étudié. Ces différents éléments peuvent ensuite être transformés en matrice dans TRNBuild. Ces matrices sont des fichiers contenant la fraction de soleil sur une demi-sphère, comme illustré figure 4.19. Cependant, elles sont générées uniquement pour les fenêtres du bâtiment. Il n'est donc pas possible de déduire les ombres portées sur les surfaces de toitures. Or comme nous l'avons expliqué dans l'état de l'art, ce facteur peut évidemment influencer la production des panneaux photovoltaïques.



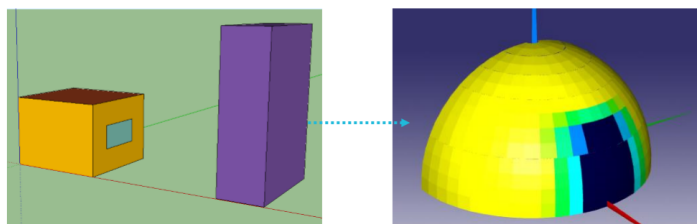


FIGURE 4.19 – TRNSYS : matrice d'ombre portée (Abrahams, 2020, p. 90)

Enfin, les composants des panneaux photovoltaïques ne se connectent pas de manière simple et évidente au bâtiment (type 57) dans Simulation Studio. En effet, TRNBuild calcule les rayonnements directs, diffus et totaux. Ces informations peuvent être utilisées comme output grâce à la manipulation illustrée à la figure suivante (figure 4.20).

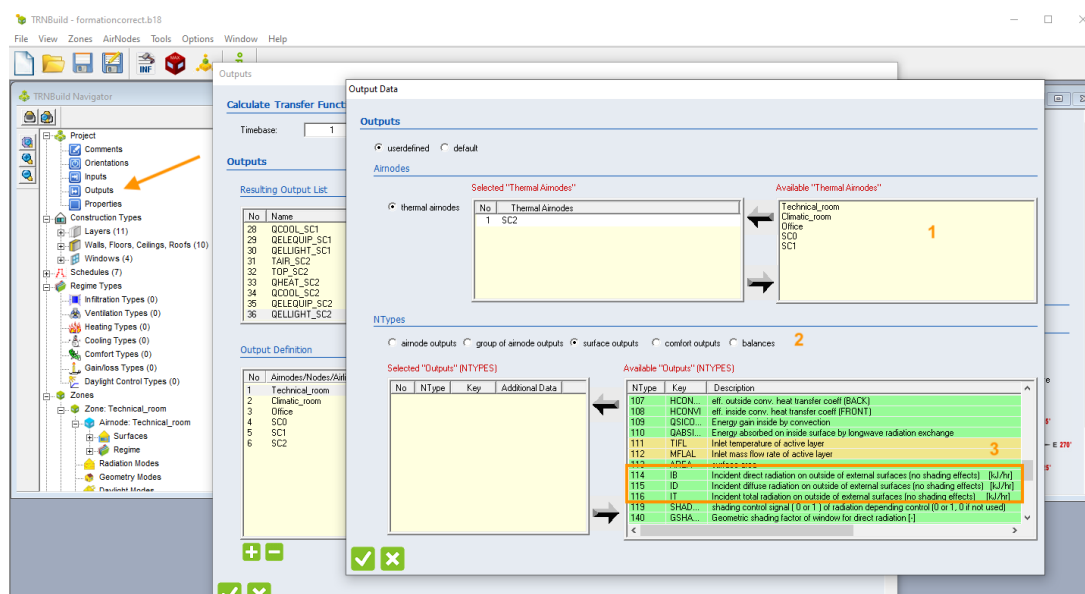


FIGURE 4.20 – TRNSYS : modification des outputs

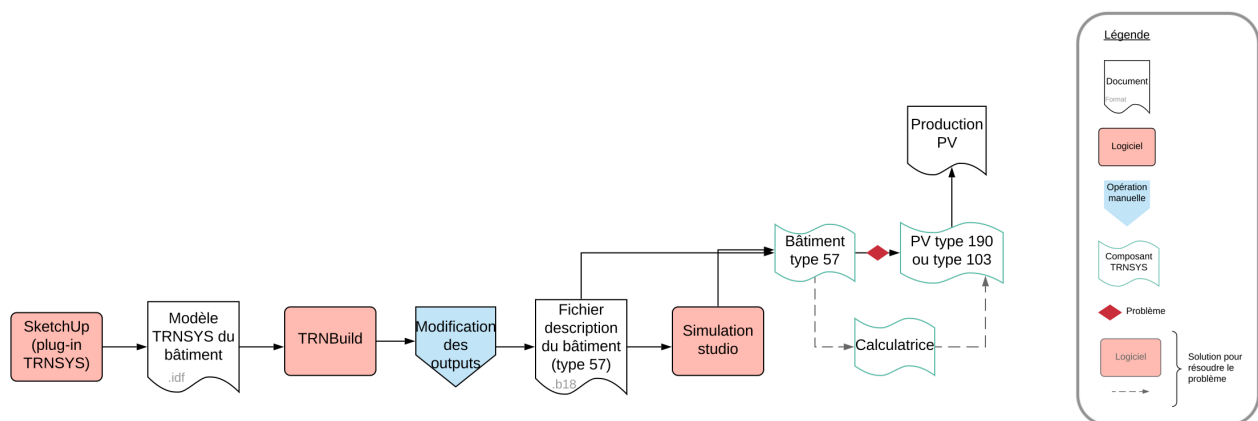
La manipulation se passe comme suit. Dans TRNBuild, nous allons modifier les outputs pour ajouter les rayonnements cités ci-dessus. Pour accéder aux outputs, nous devons d'abord sélectionner les zones disposant d'une surface de toiture (figure 4.20, point 1), choisir ensuite le type d'output *surface outputs* (figure 4.20, point 2) et enfin, sélectionner les trois rayonnements pertinents à savoir les types numéro 114, 115 et 116 (figure 4.20, point 3).

Après cette étape dans Simulation Studio, ces facteurs sont maintenant disponibles dans les outputs du type 57. Malheureusement le composant "panneau photovoltaïque" prend en input un rayonnement par  $m^2$  et non, le rayonnement sur la totalité de la sur-

face. Il nous faut donc passer par une étape intermédiaire en ajoutant une calculatrice au système pour transformer les outputs "rayonnement" du type 57, les diviser par la surface de toiture et finalement, les connecter avec les inputs du composant PV.

Après cette étape, il est donc possible de calculer la production électrique grâce aux panneaux sur l'entièreté de la toiture modélisée.

La démarche complète est illustrée étape par étape à la figure 4.21.



**FIGURE 4.21** – TRNSYS : méthode générale

En conclusion, avec TRNSYS, il est possible de mener une étude de production de panneaux photovoltaïques. Le plug-in de SketchUp permet :

- de modéliser facilement et simplement le bâtiment,
- d'avoir une vision 3D du bâtiment,
- de vérifier facilement les propriétés de chaque face,
- et, d'importer sans encodage toutes les données géométriques nécessaires à la simulation.

Par ailleurs, il n'est pas possible de modéliser plusieurs bâtiments et donc, encore moins tout un quartier. Ce logiciel est donc rejeté.

## PVSyst

L'outil PVSyst nous a été recommandé par les gestionnaires du projet MiRIS implémenté sur le site de l'usine John Cockerill au sein de notre périmètre d'étude.

Après avoir testé cet outil, nous pouvons affirmer que ce logiciel est très complet en terme de simulation de fonctionnement de l'entièreté du système de production. De nombreux paramètres sont à encoder, notamment sur les types de panneaux mais aussi

sur le convertisseur et l'onduleur. Malheureusement, il ne simule la production que pour une orientation et une pente de toiture. Notre site présentant de multiples orientations et pentes, et ce logiciel demandant de nombreuses données d'entrée, il ne sera donc pas sélectionné pour la présente recherche.

## TownScope

TownScope est un logiciel développé par le laboratoire "*Local Environment Management and Analysis*" (LEMA) de l'Université de Liège dans le cadre du projet européen POLIS.

Les analyses disponibles dans cet outil sont :

- le gisement solaire,
- le confort thermique,
- et, l'ouverture de ciel, les longueurs de vues et la visibilité.

Dans le cadre de ce travail, l'analyse pertinente nous intéressant est le gisement solaire. Le programme propose pour ce type d'étude une mesure de l'éclairement solaire direct, diffus et réfléchi. Malheureusement, il semble que la simulation ne soit possible que pour une seule journée à la fois ou une journée par mois. L'import du modèle 3D est possible dans les formats 3DS, VRML, DXF, OBJ et URB. De plus, ce logiciel permet de prendre en compte les ombrages mais pour que celles-ci soient réalistes, il faudrait importer l'entièreté du modèle (c'est-à-dire mur et toiture). Or et à première vue, il est possible uniquement de prendre en compte l'entièreté des faces pour la simulation ou de choisir une par une les faces sur lesquelles nous désirons réaliser celle-ci, ce qui se révélerait très laborieux. Enfin, aucune information n'est donnée quant au type d'export possible.

Ainsi, ce logiciel permet de mesurer la radiation solaire mais pour cette recherche, nous nous intéressons à la production d'électricité des panneaux photovoltaïques. Pour l'obtenir, il faudrait exporter les résultats et transformer cette radiation en production électrique et faire tourner plusieurs simulations pour des jours différents et extrapoler les résultats afin d'obtenir un résultat annuel.

## Conclusion

Pour conclure cette section dédiée aux logiciels non retenus pour la suite de ce travail, voici un tableau récapitulatif des raisons ayant mené à ce choix (tableau 4.3).

| Logiciel  | Raison(s) de l'exclusion                                                                                                                                                          |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CitySim   | - Import en AutoCAD 2000 non réalisable                                                                                                                                           |
| TRNSYS    | - Demande une modélisation propre dans SketchUp via les outils du plug-in<br>- Pas assez de zones thermiques possibles pour la modélisation complète des bâtiments du cas d'étude |
| PVSyst    | - Simulation pour une orientation et une pente<br>- Demande des inputs techniques                                                                                                 |
| TownScope | - Simulation pour une journée<br>- Calcul de radiation solaire et non de production électrique                                                                                    |

TABLE 4.3 – Tableau récapitulatif des logiciels non-retenus

#### 4.4.2 Logiciels retenus

##### Insight

Insight est un plug-in de Revit, développé par Autodesk. Il permet de mener des études énergétiques aussi bien au début de la conception qu'avec un modèle très détaillé. Les études proposées sont une analyse de lumière naturelle et une simulation de la demande de chauffage et de refroidissement mais également, l'analyse de la radiation solaire et de l'ombrage. Cette dernière est particulièrement intéressante pour notre étude. Pour ce faire, il est primordial d'entrer la localisation du site au préalable dans Revit via l'onglet "Gérer" afin d'obtenir les données météorologiques adéquates.

Le plug-in, une fois installé, est disponible dans l'onglet "Analyse" de Revit. Après son ouverture, plusieurs paramètres concernant l'analyse solaire sont à spécifier.

**Données d'entrée** Tout d'abord, les paramètres du type d'étude (figure 4.22) choisie "*Solar Energy - Annual PV*" intéressants pour cette étude sont au nombre de trois (figure 4.23) :

- le **choix de panneaux** (au nombre de trois) proposant chacun des rendements différents. Au vu des éléments apportés dans l'état de l'art à la section 2.3.1 concernant la technologie des PV, nous sélectionnons le PV avec un rendement de 16%. En effet, cette proposition est la plus proche par rapport aux PV retenus c'est-à-dire les cellules monocristalline de silicium (14-16%) et les multicristalline (13-15%) (table 2.3 dans l'état de l'art) ;
- le **pourcentage de toitures couvertes** qui est dans notre cas égale à 100%, ce paramètre fera l'objet d'une remarque par la suite ;
- la **grille d'analyse** contient le nombre de points auquel la radiation sera calculée. La valeur par défaut n'est pas modifiée.

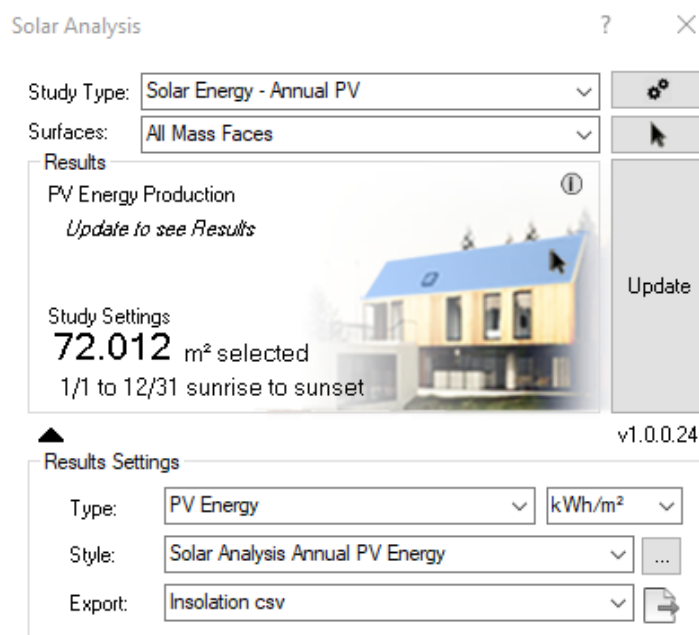


FIGURE 4.22 – Insight : interface

Les autres paramètres gardent leurs valeurs par défaut notamment parce que le coût ne fait pas partie du champs de cette recherche.

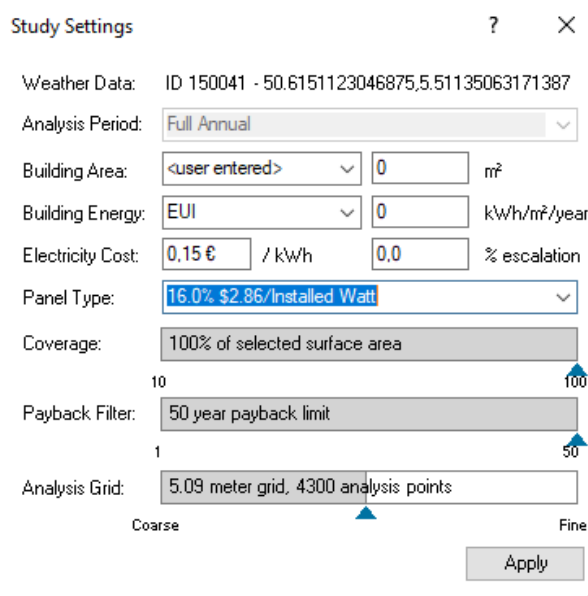


FIGURE 4.23 – Insight : paramètres du type d'étude

Puis, il est possible de choisir les surfaces utilisées pour la simulation. Ceci peut se faire de trois manières : la première, en sélectionnant dans le menu déroulant toutes les masses ; la deuxième opte pour tous les éléments de toiture extérieure et enfin, la troisième, en sélectionnant à la main les toitures désirées.

**Données de sortie** Concernant les résultats de la simulation, il est possible de les exporter et de les visualiser de différentes manières.

Le **type** (figure 4.22) propose de mettre en avant les résultats d'insolation solaire, de production des PV ou de délai de récupération. Ici, nous choisissons la production des PV en kWh/m<sup>2</sup>.

Le **style de visualisation** (figure 4.22) permet de choisir une visualisation sur l'année, le mois, le jour ou l'heure et d'attribuer une plage de couleur en fonction de la valeur du facteur sélectionné dans le type. Pour ce paramètre, nous choisissons de visualiser les résultats sur l'année.

L'export en csv proposé n'inclut malheureusement que les informations relatives à l'insolation solaire : l'insolation solaire cumulée par surface de toiture ainsi que celle en chaque point de l'étude.

**Scénario** Pour cette simulation sur Insight, un seul scénario est utilisé prenant en compte l'entièreté des surfaces de toitures recouvertes de PV et dans le cas où les toitures sont plates, les PV sont disposés sur la surface, c'est à dire horizontalement (tableau 4.4). Il n'y a donc aucune modification de pente ni de sélection des toitures.

Pour envisager d'autres scénarios, il faudrait modifier la maquette pour correspondre à ceux-ci.

|                   | Choix des toitures  | Inclinaison PV si toit plat | Pourcentage toiture |
|-------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>Scénario 1</b> | Toutes les surfaces | Non                         | 100 %               |

TABLE 4.4 – Insight : scénario

**Avantages** Le plug-in prend en compte toutes les toitures peu importe leur pentes et leur orientation. Il existe trois choix de panneaux avec des rendements différents. De plus, en restant dans l'univers Revit, cela nous permet de ne pas exporter le modèle et ainsi, d'éviter la perte de données et de rompre le lien BIM. Enfin, la simulation permet de choisir la période d'étude : d'une heure, à un mois et à un an.

**Inconvénients** Il n'est pas possible de sélectionner des toitures présentant un certain paramètre bien que le plug-in tourne sur Revit. Ensuite, malgré la présence intéressante d'un slider autorisant la modification du pourcentage de toitures recouvertes, il n'est pas possible de sélectionner les toitures que l'on ne souhaite pas inclure dans la simulation, ni celles présentant l'orientation et la pente la moins adéquate. En outre, il serait pertinent

pour les toitures plates qu'une option permette d'incliner et d'orienter les PV de façon optimale. Finalement, aucun détail n'est fourni quant au chiffre final de production sur un an. La base de données météorologiques n'est pas non plus précisée, sans compter que l'export disponible ne fonctionne que pour les informations sur l'insolation solaire.

|                          | Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Base de données</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas d'informations à importer</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Base météorologique utilisée inconnue</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Données d'entrée</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prend en compte toutes les toitures peu importe leur pente et orientation</li> <li>- Pas de perte d'informations liée à un export car interne à Revit</li> <li>- Choix entre trois types de panneaux</li> <li>- Choix du pourcentage de recouvrement</li> <li>- Choix de la période d'étude</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de choix des éléments de toitures en fonction de la valeur de paramètres</li> <li>- Pas de choix dans les toitures non recouvertes si facteur différent de 100%</li> <li>- Pas d'option permettant de choisir des PV à pente et orientation max. pour les toitures plates</li> </ul> |
| <b>Données de sortie</b> | /                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de détails sur le chiffre de production finale</li> <li>- Export des informations possibles que pour les résultats de l'insolation</li> </ul>                                                                                                                                        |

**TABLE 4.5** – Insight : avantages et inconvénients

## PVGIS combiné à Excel

Identiquement à PVSyst, cette interface ne calcule la production que pour une pente et une orientation données. Cependant et à la différence de PVSyst, peu d'informations sont à encoder, ce qui est moins chronophage. Nous allons donc exploiter PVGIS en parallèle avec le fichier Excel des informations exportées du modèle (voir la section 4.3.2).

PVGIS est une application en ligne disponible sur le site de la Commission Européenne (à l'adresse : <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>). Développée par le *Joint Research Center* (JRC) depuis 2001, il permet d'étudier la performance des PV, la radiation solaire et l'année météorologique typique (*typical meteorological year*, TMY). Ce logiciel de simulation est notamment utilisé par Agugiaro et al. (2018) dont le cas d'étude est détaillé dans l'état de l'art.

Concernant la performance des PV, trois types de calcul sont disponibles : les systèmes reliés au réseaux, les panneaux se déplaçant avec le soleil et les systèmes indépendants fonctionnant avec une batterie.

**Données d'entrée PGVIS** La première option, c'est-à-dire le système couplé au réseau, sera utilisée ici. Elle nécessite huit données d'entrée (figure 4.24) :

- la localisation du site,
- la base de données de radiation solaire,
- la technologie de PV utilisée,
- les kWc installés,
- les pertes du système,
- la position de montage,
- l'inclinaison,
- et, l'azimuth.

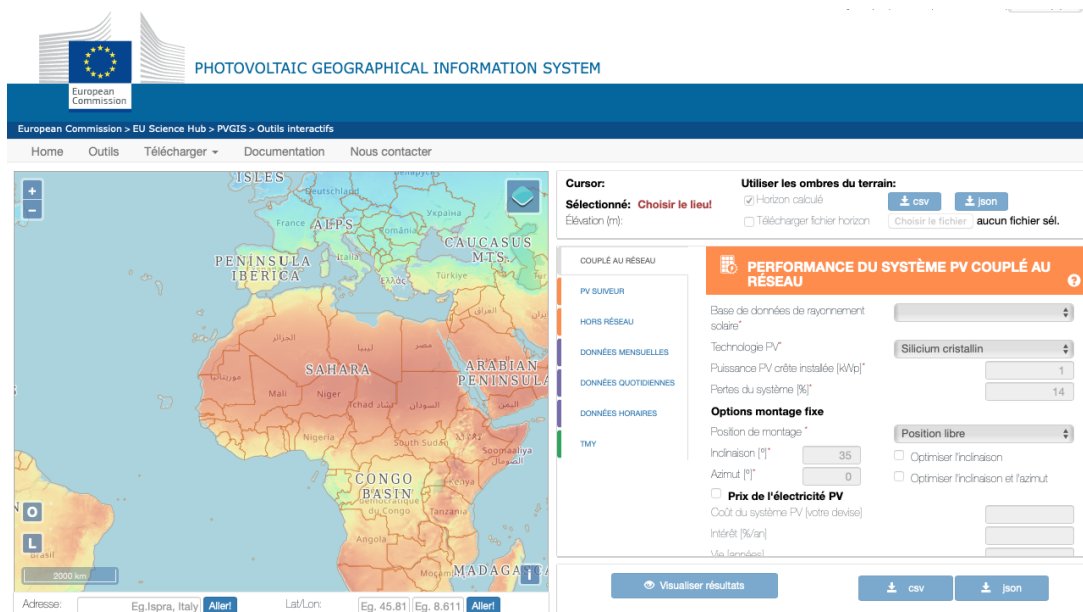


FIGURE 4.24 – PGVIS : interface

La **localisation** du site peut être sélectionnée via l'interface OpenStreetMap en se déplaçant directement sur la carte, en entrant l'adresse ou en indiquant les coordonnées.

En choisissant la localisation du site, la **base de donnée** correspondante à la localisation est automatiquement sélectionnée. Il existe quatre bases de données couvrant une partie importante du monde (figure 4.25). L'Europe est incluse dans trois des quatre propositions. Celle automatiquement sélectionnée est PGVIS-SARAH et sera utilisée pour nos simulations.

Concernant la **technologie de PV** choisie, nous privilégions les panneaux composés de silicium cristallin (cellule monocristalline ou multicristalline de silicium) pour les raisons explicitées dans l'état de l'art.



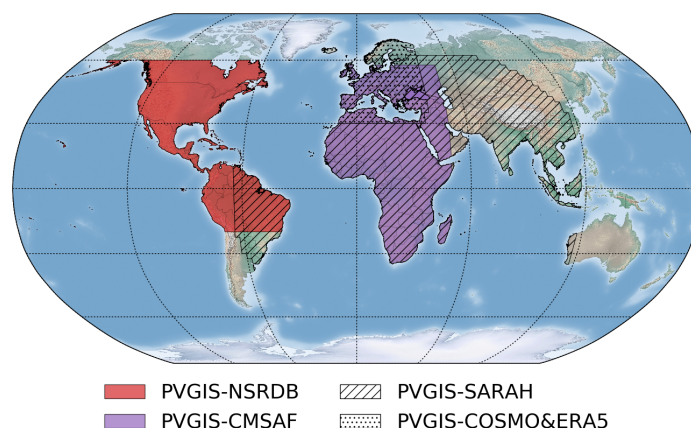


FIGURE 4.25 – PVGIS : carte des bases de données (Commission Européenne, 2019)

Pour les **pertes du système**, la valeur par défaut de 14% est conservée.

Pour l'option relative à la **position de montage**, nous avons identifié au sein de la littérature scientifique, l'influence de température du panneau sur la production. En effet, 1kWc de PV à une pente de 35° et une orientation sud (c'est-à-dire 0°) produit dans le cas d'un panneau en position libre 991,03 kWh, dans le cas d'un panneau intégré au bâtiment 960,06 kWh. La différence s'élève donc à 3%. Ce facteur impactant peu le résultat, il sera écarté par la suite et l'entièreté des simulations seront effectuées pour une position de montage intégré au bâtiment.

Finalement et concernant les informations relatives au **nombre de kWc installés, la pente et l'azimuth** ils sont tirés de l'Excel exporté de Revit, ceci étant expliqué à la section 4.3.2. Rappelons que ce fichier contient pour chaque surface de toit, sa surface, les vecteurs x, y et z de la normale à cette surface et son angle de pente. Un traitement de ces données a été réalisé et sera détaillé dans le paragraphe suivant. Au total, 26 cas (ayant chacun des kWc, pente et azimuth différents) seront encodés dans PVGIS afin de déterminer la production.

De plus, il est possible de prendre en compte l'horizon c'est-à-dire de modifier le rayonnement solaire si des éléments tels que des montagnes ou collines aux alentours sont présents. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de travailler avec l'horizon calculé par PVGIS.

**Traitement des données Excel** Le fichier obtenu lors de l'export Revit via Dynamo est composé des données extraites pour les 1691 surfaces de toit et se présente comme suit (figure 4.26). Comme nous pouvons le voir, ces informations méritent un premier traitement. En effet, de nombreuses valeurs sont très proches de 0 qu'elles soient positives (cadre rouge) ou négatives (cadre vert). Ainsi, les valeurs entre -0,01 et 0 et 0 et 0,01 sont transformées en 0. Il en est de même pour les valeurs du vecteur z, si elles sont comprises entre 0,99 et 1 alors leurs valeurs seront 1.

| surface (m2) | vecteur x  | vecteur y  | vecteur z  | pente      |
|--------------|------------|------------|------------|------------|
| 39,33286458  | 3,38E-31   | 0          | 1          | 1,94E-29   |
| 471,9743519  | -4,19E-32  | -4,82E-32  | 1          | 3,66E-30   |
| 573,9309569  | 1,67E-32   | 1,24E-32   | 1          | 1,19E-30   |
| 355,0029528  | 8,26E-33   | -8,47E-33  | 1          | 6,78E-31   |
| 50,34472667  | 5,07E-32   | -1,07E-31  | 1          | 6,77E-30   |
| 176,2913314  | 2,81E-32   | 5,87E-33   | 1          | 1,64E-30   |
| 999,8372027  | -5,93E-32  | 1,37E-33   | 1          | 3,40E-30   |
| 788,7392084  | -5,97E-33  | 4,51E-33   | 1          | 4,29E-31   |
| 12,36094879  | -4,17E-31  | 8,48E-31   | 1          | 5,41E-29   |
| 47,39614415  | 2,21E-32   | 1,10E-31   | 1          | 6,42E-30   |
| 51,05093198  | 0,06540564 | -0,2835048 | 0,95673777 | 16,9149365 |
| 57,26041649  | 1,76E-31   | 8,82E-32   | 1          | 1,13E-29   |
| 17,67720275  | 0,29762755 | 0,06567919 | 0,95242012 | 17,7454288 |

FIGURE 4.26 – PVGIS : extrait fichier Excel brut

Ensuite, nous avons attribué un type de toit, le type sera "toit plat" si  $x=0, y=0$  et  $z=1$ , sinon le toit sera considéré en pente. Puis, nous calculons l'**azimuth** des toitures grâce aux valeurs des composantes  $x$  et  $y$ . En effet, vu du dessus en 2D, l'angle d'orientation d'une surface, c'est-à-dire l'angle créé avec l'axe nord, peut être calculé de cette manière :

$$\alpha = \arctan \frac{x}{y}$$

avec  $\alpha$  = l'angle avec l'axe y [deg].

Puis, étant donné que PVGIS considère un azimuth de 0 lorsque l'orientation est plein sud. Les angles des orientations Nord-Ouest, Nord et Nord-Est, sont modifiés de telle sorte que l'axe de référence devienne l'axe sud. Enfin, étant donné que le diagramme de rendement d'un PV (figure 2.20, page 24 dans l'état de l'art) est symétrique par rapport à l'axe Nord-Sud, il n'y a pas lieu de faire de distinction entre une orientation est ou ouest. Ainsi, la valeur absolue des angles d'orientation est calculée.

Maintenant que nous avons les angles d'orientation pour chaque surface, nous allons les classer en six catégories : l'une dédiée aux toits plats et cinq, aux toits en pente en fonction de la valeur de l'azimuth. Ainsi, ces cinq classes varient entre les valeurs que nous pouvons lire au tableau suivant (tableau 4.6).

| Catégorie     | Orientation          | Intervalle de valeur de l'azimuth | Valeur de simulation |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|
| <b>P</b>      | Toiture plate        | 0°                                | 0°                   |
| <b>N</b>      | Nord                 | [180° - 157,5°[                   | 180°                 |
| <b>NE, NO</b> | Nord-Est, Nord-Ouest | [157,5° - 112,5°[                 | 135°                 |
| <b>E,O</b>    | Est, Ouest           | [112,5° - 67,5°[                  | 90°                  |
| <b>SE, SO</b> | Sud-Est, Sud-Ouest   | [67,5° - 22,5°[                   | 45°                  |
| <b>S</b>      | Sud                  | [22,5° - 0°]                      | 0°                   |

**TABLE 4.6** – PVGIS : catégories d'orientation

Au sujet des **angles de pente**, nous les avons également hiérarchisées. Toujours sur base du diagramme à la figure 2.20 dans le chapitre 2, nous avons décidé de créer cinq catégories : la première dédiée uniquement aux surfaces ayant un angle de pente supérieur à 0° et inférieur ou égal à 10°, et les quatre autres ayant un intervalle de 20° (tableau 4.7).

| Catégorie | Type de toiture  | Intervalle de valeur de la pente | Valeur de simulation |
|-----------|------------------|----------------------------------|----------------------|
| <b>0</b>  | Toiture plate    | 0°                               | 0°                   |
| <b>1</b>  | Toiture inclinée | [0° - 10°]                       | 5°                   |
| <b>2</b>  | Toiture inclinée | [10° - 30°[                      | 20°                  |
| <b>3</b>  | Toiture inclinée | [30° - 50°[                      | 40°                  |
| <b>4</b>  | Toiture inclinée | [50° - 70°[                      | 60°                  |
| <b>5</b>  | Toiture inclinée | [70° - 90°]                      | 80°                  |

**TABLE 4.7** – PVGIS : catégories de pente

Au final, nous obtenons 26 classes. 25 de ces classes concernent les toits en pente (figure 4.27) et une autre est attribuée aux toits plats. Chaque classe est caractérisée par sa catégorie d'orientation et sa catégorie de pente. Cette division a été réalisée de telle manière à obtenir un facteur de rendement le plus possible similaire pour l'ensemble de la classe afin que le résultat de production se rapproche au maximum de la réalité.

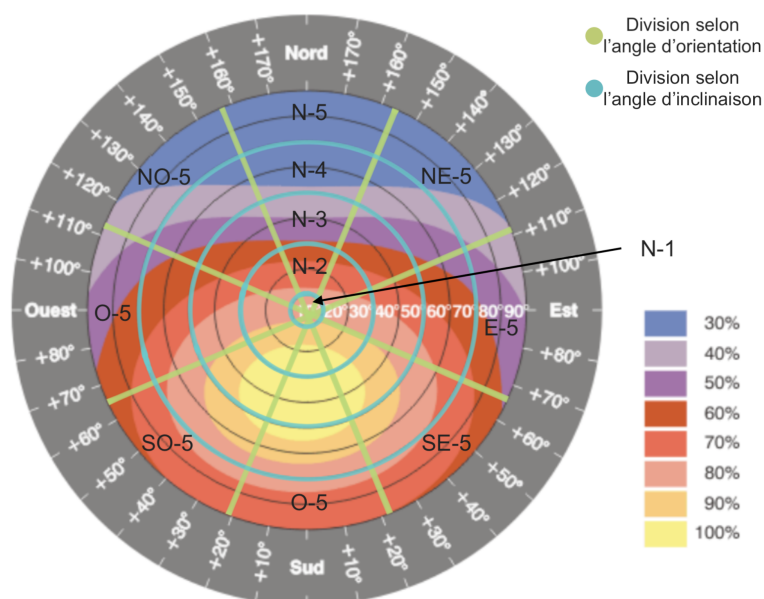


FIGURE 4.27 – PVGIS : illustration des classes

Pour chacune de ces classes, le **nombre de kwc** est calculé à partir de la somme des aires de toutes les surfaces d'une classe. Au vu des conclusions tirées à l'état de l'art quant à la technologie la plus adaptée à notre climat et du type d'installation, nous choisissons un rendement de 15%. Cela correspond aussi bien à des cellules monocristalline que multicristalline, en cohérence avec le choix de technologie fait dans PVGIS.

De la même manière qu'annoncée au sein de l'état de l'art (page 24), nous avons calculé le nombre de  $\text{m}^2$  nécessaire à la production de 1kWc. Il s'élève à  $6,67 [\text{m}^2/\text{kWc}]$ . Puis, nous divisons la somme des aires pour chaque classe par ce facteur et nous obtenons le nombre de kWc correspondant.

En somme, nous avons lancé une simulation sur PVGIS pour chaque classe (26 fois).

**Données de sortie** PVGIS dispose d'un viewer afin d'afficher directement les résultats de la simulation grâce à des chiffres-clés, un graphique de production par mois, un graphique de radiation par mois ainsi qu'un diagramme de la ligne d'horizon prise en compte. L'application comporte aussi trois exports : une fiche PDF incluant les détails de la simulation, un fichier CSV intégrant entre autre les valeurs de production journalière moyenne par mois et la production totale par mois, et un fichier JSON.

Ainsi, une feuille Excel reprenant les productions journalières moyennes par mois et la production totale par mois est complétée pour chaque classe.

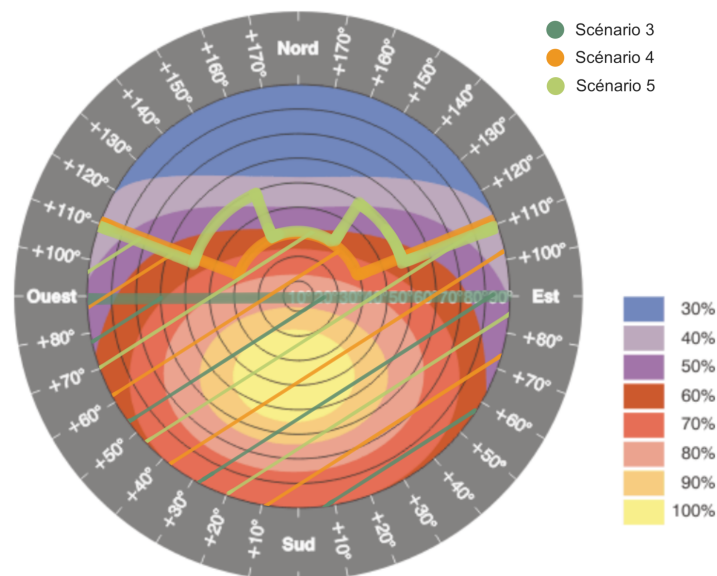
**Scénarios** Les scénarios envisagés pour cette simulation sont au nombre de cinq (tableau 4.8).

|                                                                                                        | Choix des toitures                   |                                            | Pente PV pour toit plat | Pourcentage toiture |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
|                                                                                                        | Orientation                          | Pente                                      |                         |                     |
| <b>Scénario 1</b>                                                                                      | Toutes les surfaces                  |                                            | 0°                      | 100 %               |
| <b>Scénario 2</b>                                                                                      | Toutes les surfaces                  |                                            | 35°                     | 100 %               |
| <b>Scénario 3</b><br> | [90°, -90°] Sud                      | Toutes pentes                              | 35°                     | 74 %                |
| <b>Scénario 4</b><br> | Classe d'orientation E, SE, S, SO, O | Toutes pentes                              | 35°                     | 96,4 %              |
|                                                                                                        | Classe d'orientation NO, N, NE       | Classe de pente 1 et 2 (donc [0°-30°[ )    |                         |                     |
| <b>Scénario 5</b><br> | Classe d'orientation E, SE, S, SO, O | Toutes pentes                              | 35°                     | 96,9 %              |
|                                                                                                        | Classe d'orientation NO et NE        | Classe de pente 1, 2 et 3 (donc [0°-50°[ ) |                         |                     |
|                                                                                                        | Classe d'orientation N               | Classe de pente 1 et 2 (donc [0°-30°[ )    |                         |                     |

**TABLE 4.8** – PVGIS : scénarios

- Le premier ne prend en compte aucune modification et nous permettra de comparer la production finale avec celle estimée par Insight. Ainsi, 100% des toitures sont utilisées sans aucun changement de pente.
- Le deuxième inclut toujours 100% des surfaces de toiture mais modifie les pentes de toiture dans le cas où les toitures sont plates. Celles-ci sont donc pourvues de panneaux à 35° de pente, plein sud.
- Le troisième conserve le changement appliqué aux toitures plates et ajoute une sélection des toitures en fonction de leur orientation. Ainsi, seules les toitures ayant une orientation est, sud-est, sud, sud-ouest ou ouest sont prises en compte pour la simulation.
- Le quatrième et le cinquième sélectionnent les toitures en fonction de leur orientation et de leur pente comme expliqué et illustré dans le tableau 4.8 et la figure 4.28.

Afin de prendre en compte les PV les plus productifs, la sélection a été effectuée tout d'abord sur les orientations, puis en combinaison aux pentes. Les résultats seront analysés pour choisir le scénario présentant le meilleur rendement par rapport au nombre de  $m^2$  de PV installés. Dans ce but, les scénarios 4 et 5 ont été développés. Parmi ceux-ci, le scénario ayant le plus faible rendement sera mis de côté et ne sera donc pas présenté dans le chapitre relatif aux résultats.



**FIGURE 4.28** – PVGIS : scénarios illustrés sur le graphique de rendement des PV (adapté de Energieplus, 2010a)

**Avantages** : Les avantages à combiner PVGIS et Excel sont tout d’abord la flexibilité, mais aussi le fait que la base de donnée soit connue et modifiable pour une autre proposée. De plus, le téléchargement de la base de données est possible. Par ailleurs, PVGIS propose des résultats de production pour un jour-type par mois ainsi qu’une moyenne de production mensuelle. Finalement, le dernier avantage est la facilité d’utilisation de cette application Web qui ne nécessite pas de connaissances poussées en système électrique pour PV.

**Inconvénients** : Les inconvénients concernant notamment l’utilisation de ce mariage de logiciels. Le temps nécessaire est particulièrement conséquent entre autres pour encoder dans PVGIS les trois caractéristiques pour chaque classe ainsi que pour télécharger et copier les résultats de la simulation dans le fichier Excel récapitulatif. De plus, la simulation ne permet pas de prendre en compte les ombrages autres que ceux de l’horizon, et de calculer la production pour des PV avec des caractéristiques différentes. Enfin, l’intégration BIM n’est plus et a été rompue par l’export en un fichier Excel des attributs de toiture.

|                          | Avantages                                                                        | Inconvénients                                                                                                                            |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Général</b>           | - Facile d'utilisation                                                           | - Encodage long et source d'erreur<br>- Lien BIM rompu                                                                                   |
| <b>Base de donnée</b>    | - Pas d'informations à importer<br>- Connu et téléchargeable                     | /                                                                                                                                        |
| <b>Données d'entrée</b>  | - Mariage flexible<br>- Choix de la technologie de PV utilisée entre trois types | - Pas de prise en compte des ombrages<br>- Pas de simulation possible pour de multiples toitures ayant des caractéristiques différentes. |
| <b>Données de sortie</b> | - Production moyenne pour un jour type par mois, production moyenne mensuelle    | /                                                                                                                                        |

TABLE 4.9 – PVGIS : avantages et inconvénients

### 4.4.3 Conclusion de la simulation

En conclusion, six logiciels ont été examinés afin de simuler la production électrique : CitySim, TRNSYS, PVSyst, TownScope, Insight et PVGIS combiné à Excel. Après une première évaluation des données d'entrée et de sortie de chacun, la sélection finale s'est portée sur Insight et PVGIS (avec Excel) pour la réalisation de l'étude.

Le premier logiciel a l'avantage de lier une continuité avec la maquette BIM créée mais offre très peu de flexibilité quant aux surfaces utilisées. Le second rompt complètement le lien BIM mais l'utilisation d'un fichier Excel rend les manipulations très flexibles bien que très fastidieuses.

Allier Excel à PVSyst aurait également été possible mais ce dernier nécessite de nombreuses données d'entrée ainsi que des connaissances approfondies en système lié au PV. Pour ces raisons, nous avons donc écarté cette option.

## 4.5 Simulation de la consommation d'électricité

Pour estimer si la consommation des PV suffit à la zone, il est nécessaire de comparer les productions et les consommations. Idéalement, cette comparaison devrait se faire au minimum à l'échelle mensuelle car selon la littérature scientifique, la production varie fortement selon les saisons de l'année. Dans le cadre de ce travail de fin d'études, nous ne disposons pas d'éléments suffisants pour envisager une telle estimation de la consommation. La comparaison sera donc réalisée sur une période d'un an.

### 4.5.1 Collecte de consommation électrique de bâtiments sur la zone

Une collecte de données a été menée pour estimer la consommation de la zone. Pour que ces informations soient exploitables, un relevé quart-horaire ou mensuel est nécessaire. Pour recueillir ce type d'informations, un compteur "*automatic meter reading*" (AMR) est impératif pour un relevé quart-horaire, de même qu'un compteur "*monthly meter reading*" (MMR) pour le relevé mensuel. Or, seules les industries et autres consommateurs importants ayant fait la demande, possèdent des compteurs AMR dans notre zone. L'industrie présente sur notre site n'a pas souhaité partager ses informations de consommation. De plus, l'opérateur des réseaux de distribution n'a pas pu nous transmettre la consommation par parcelle afin de respecter le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) de leurs consommateurs. La demande d'une consommation agrégée sur la zone est restée également sans réponse de leur part.

Le déploiement de compteurs intelligents est prévu (décret Wallon du 19 juillet 2019, article 35) mais les objectifs n'impliquent pas le changement de compteurs pour les habitations, à l'exception du défaut de paiement du client ou sur demande.

Après plusieurs démarches, nous avons réussi à obtenir les consommations de trois bâtiments dans les secteurs des bâtiments scolaires, des bureaux et des bâtiments administratifs. Deux de ces informations consistent en un relevé quart horaire de consommation et l'autre est un relevé mensuelle.

### 4.5.2 Données de consommation

Sur notre zone, les types de parcelles consommant de l'électricité sont au nombre de 14. Ils sont repris dans le tableau 4.10. Ces 14 types de nature cadastrale vont être assemblés en 7 classes pour estimer la consommation annuelle de la zone (tableau 4.11). Ces dernières sont basées sur un tableau établi par les auteurs du site Energieplus (2007).

Ce tableau propose des consommations par  $m^2$  en fonction des activités du bâtiment. Ces données sont reprises au tableau 4.12. Cependant, aucune information n'est attribuée pour la classe de bâtiment industriel. Dès lors, pour ce type de bâtiment particulièrement consommateur d'électricité selon la littérature, nous avons effectué des estimations sur base de la consommation d'électricité de ce secteur industriel en Belgique et du nombre d'industries sur le territoire (FEBEG, 2019). En connaissant le nombre d'industries en Belgique via StatBel (Bruwier, 2019), il est possible de déduire la consommation moyenne par entreprise.



| Abréviation cadastrale | % de surface parcellaire | Classe de consommation |
|------------------------|--------------------------|------------------------|
| BAT.INDUST             | 41,7 %                   | Industrie              |
| B.SCOLAIRE             | 8,6 %                    | Ecole                  |
| BAT.BUREAU             | 8,3 %                    | Bureau / public        |
| BAT.ADMIN.             | 4,6 %                    | Bureau / public        |
| MAISON                 | 5,2 %                    | Maison                 |
| P.IM.AP.#              | 1,8 %                    | Appartement            |
| M.COMMERCE             | 1,6 %                    | Commerce               |
| BUILDING               | 0,7 %                    | Appartement            |
| EGLISE                 | 0,6 %                    | Bureau / public        |
| GARAGE                 | 0,5 %                    | Maison                 |
| GAR.ATEL               | 0,4 %                    | Atelier / Entrepôt     |
| S.EXPOSIT.             | 0,3 %                    | Atelier / Entrepôt     |
| M.COMMUN.              | 0,2 %                    | Bureau / public        |
| SUP.BAT.A              | 0,01 %                   | Appartement            |

**TABLE 4.10** – Type de nature cadastrale contenant des bâtiments consommateurs d'électricité

| Classe de consommation | Nbr de type de cadastre | % de surface parcellaire * | % de surface parcellaire ** |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Industrie              | 1                       | 41,7 %                     | 55,9 %                      |
| Bureau / public        | 4                       | 13,8 %                     | 18,5 %                      |
| Ecole                  | 1                       | 8,6 %                      | 11,6 %                      |
| Maison                 | 2                       | 5,7 %                      | 7,6 %                       |
| Appartement            | 3                       | 2,5 %                      | 3,4 %                       |
| Commerce               | 1                       | 1,5 %                      | 2,1 %                       |
| Atelier / Entrepôt     | 2                       | 0,6 %                      | 0,8 %                       |

\* pourcentage par rapport à la totalité des surfaces parcellaires de la zone

\*\* pourcentage par rapport aux parcelles cadastrales repris au tableau précédent

**TABLE 4.11** – Classement des types de nature cadastrale en classes de consommation

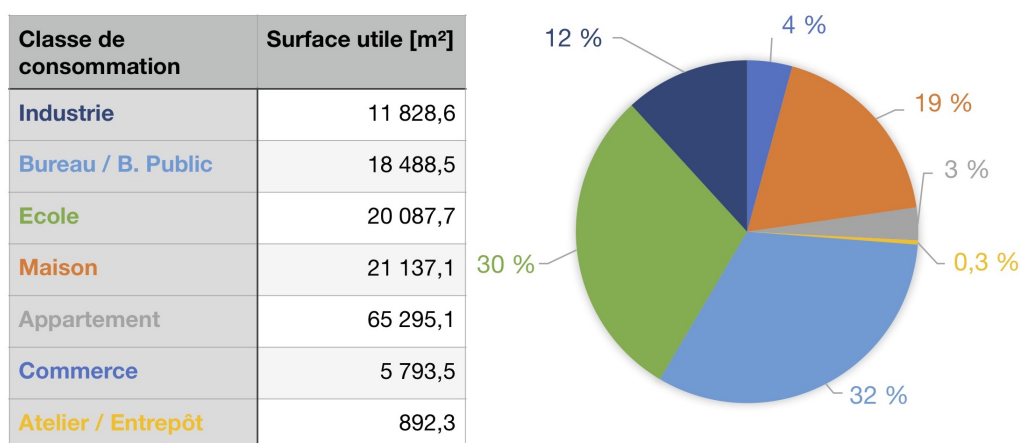
| Classe de consommation | Consommation [kWh/m <sup>2</sup> ] |
|------------------------|------------------------------------|
| Industrie              | /                                  |
| Bureau / public        | 35                                 |
| Ecole                  | 42                                 |
| Maison                 | 33                                 |
| Appartement            | 36                                 |
| Commerce               | 97                                 |
| Atelier / Entrepôt     | 35                                 |

**TABLE 4.12** – Consommation par  $m^2$  selon la classe de consommation (Energieplus, 2007)

### 4.5.3 Données géométriques

Grâce aux données récoltées dans le cadastre de la zone, nous connaissons la surface de bâti ainsi que le nombre d'étages pour chaque parcelle. Ainsi, il est possible de calculer l'aire totale pour chaque classe de consommation. La zone totalise donc 100.313  $m^2$  de surface utile répartie comme suit dans la figure 4.29.

Même si la consommation du site industriel ne dépend pas de sa surface utile, nous avons choisi de la calculer pour faciliter la comparaison des consommations qui suivra au chapitre suivant.



**FIGURE 4.29** – Surface utile par classe de consommation

# Chapitre 5

## Résultats et Interprétations

Ce chapitre présente les résultats des deux simulations exposées par le chapitre sur la méthodologie. Pour rappel, l'objectif de celles-ci est d'estimer la production possible sur la zone en utilisant les données de la maquette CIM développée. Cette estimation de la quantité d'électricité produite sera ensuite comparée aux consommations annuelles, mensuelles et journalières estimées sur la zone afin d'évaluer la capacité d'auto-suffisance de la potentielle communauté énergétique.

Les résultats des simulations seront tout d'abord exposés pour ensuite être analysés. Ils seront ensuite interprétés pour mener au chapitre suivant portant sur la discussion.

### 5.1 Résultats des simulations de la production

#### 5.1.1 Résultats avec Insight

Pour rappel, Insight prend en compte toutes les toitures et ce, sans modification par rapport à la modélisation. Ainsi, pour les toitures plates, les PV sont déposés sur ces dernières et sont donc à l'horizontal. Le logiciel fournit un résultat de production annuelle sans détails. Pour rappel, un seul scénario a été testé via ce canal de simulation. Il s'agit d'une installation de PV sur tous les toits de la zone peu importe leur orientation et sans modifier la pente, même si la toiture est plate.

Ainsi, pour une surface totale de  $72.012 \text{ m}^2$  de toitures, la production finale est estimée à (figure 5.1) :

$$9.266.712 \text{ kWh/an} \Leftrightarrow 9,266 \text{ GWh/an}$$

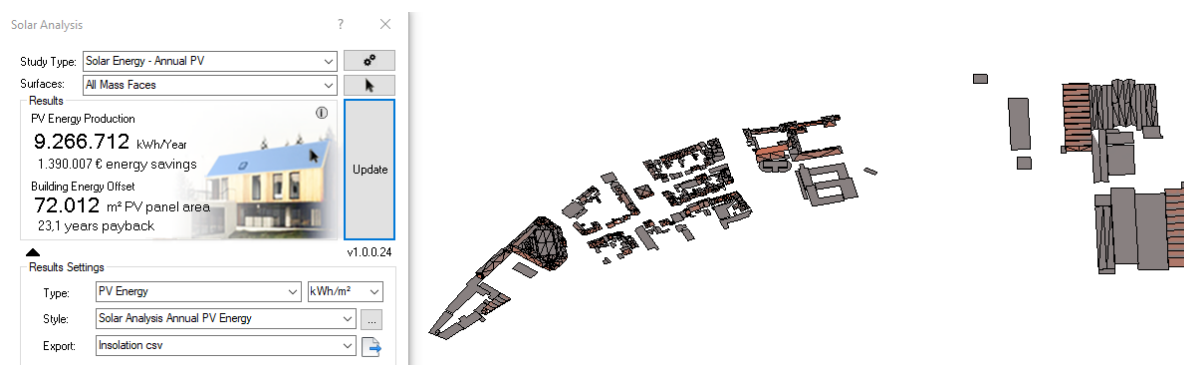


FIGURE 5.1 – Production annuelle par Insight

### 5.1.2 Résultats avec PVGIS

Suite à l'analyse des résultats, le scénario 5 est exclu. En effet, il présente un rendement plus faible que le quatrième scénario.

#### Scénario 1

Pour rappel, le scénario 1 prend en compte toutes les toitures sans aucune modification afin de le comparer aux résultats de la simulation d'Insight. Ci-dessous, vous trouverez un tableau récapitulatif (figure 5.2) de ce scénario qui totalise  $74.340 m^2$  de toitures.

Sur base de ces différents paramètres et de la base de données météorologiques fournie par PVGIS, nous obtenons une production annuelle de :

**9.584.940 kWh/an  $\Leftrightarrow$  9,58 GWh/an**  
dont 4,19 GWh/an de production pour les toitures plates  
et 5,3 GWh/an de production pour les toitures inclinées

La production mensuelle simulée pour ce premier scénario est illustrée par le graphique suivant (figure 5.3).

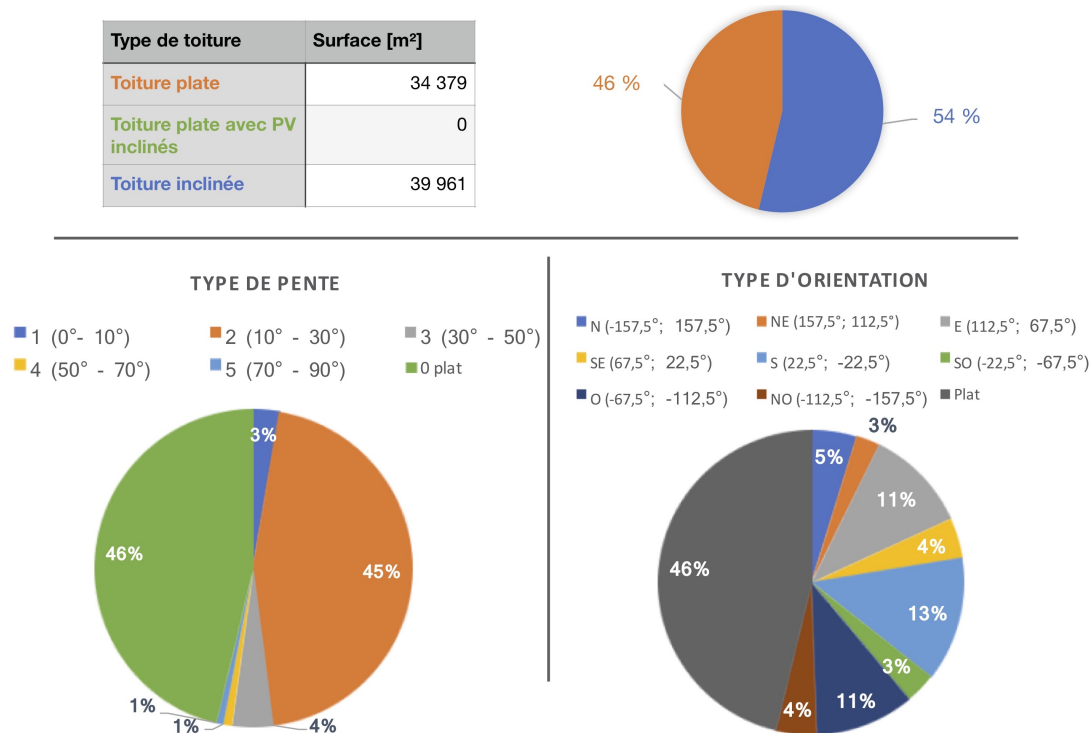


FIGURE 5.2 – PVGIS : scénario 1 : tableau récapitulatif

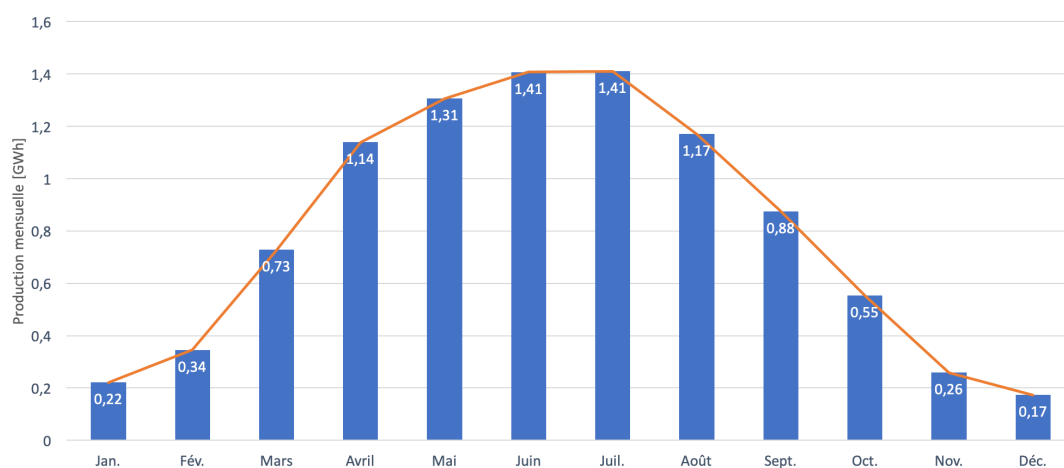


FIGURE 5.3 – PVGIS : scénario 1 : production mensuelle

## Scénario 2

Le scénario 2 intègre également toutes les surfaces de toitures mais modifie, contrairement au scénario 1, la pente des panneaux PV pour les toitures plates afin que ceux-ci soit orientés de façon optimale. Voici un tableau récapitulatif (figure 5.4) de ce scénario qui totalise 74.340 m<sup>2</sup> de toitures, tel qu'au scénario 1.

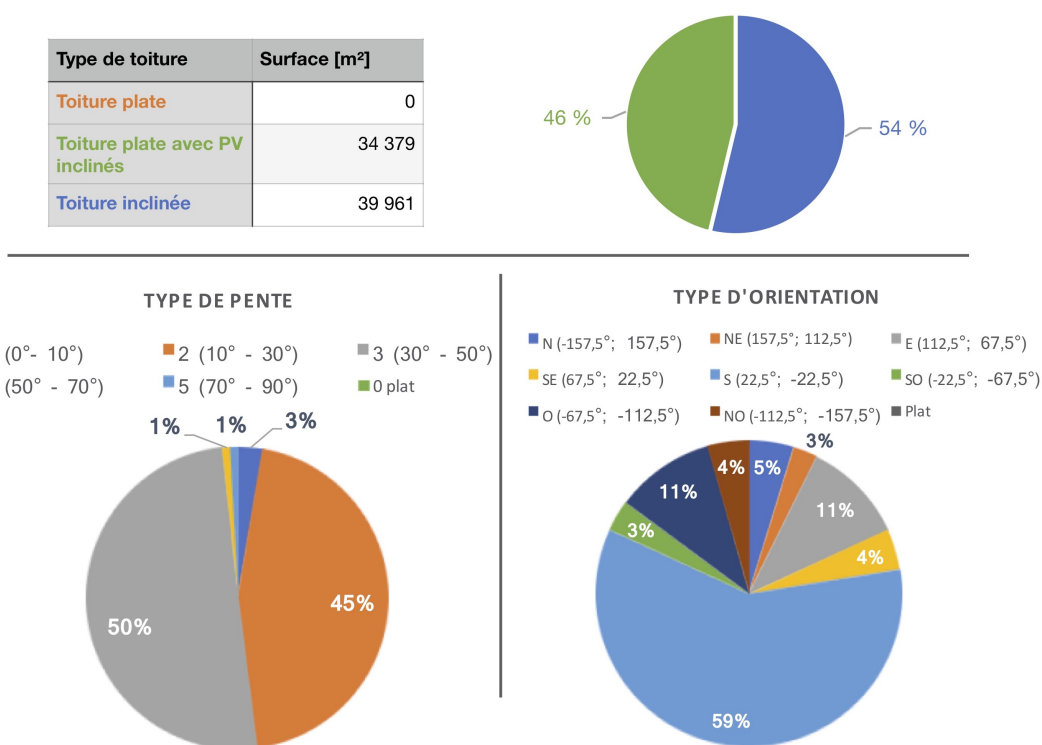


FIGURE 5.4 – PVGIS : scénario 2 : tableau récapitulatif

Sur base de ces différents paramètres et de la base de données météorologiques fournie par PVGIS, nous obtenons une production annuelle de :

**10.347.312 kWh/an  $\Leftrightarrow$  10,35 GWh/an**

dont 4,95 GWh/an de production pour les toitures plates avec PV inclinés  
et 5,3 GWh/an de production pour les toitures inclinées

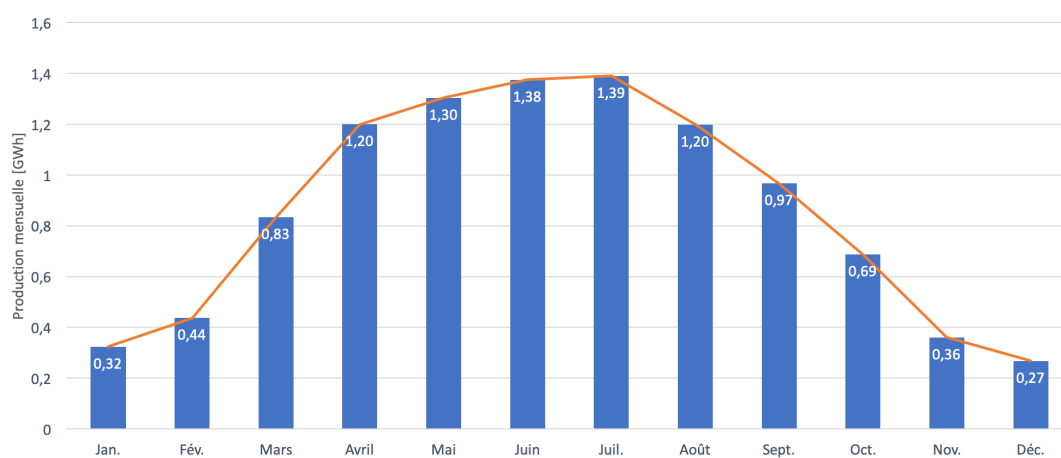
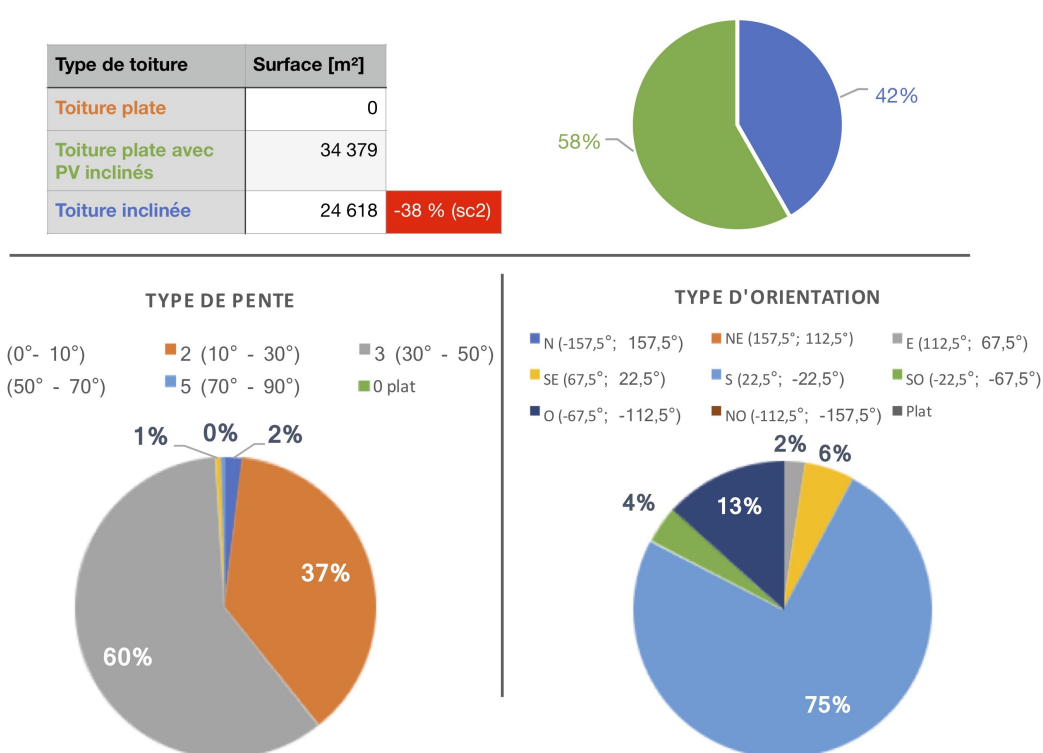


FIGURE 5.5 – PVGIS : scénario 2 : production mensuelle

La production mensuelle simulée pour ce second scénario est illustrée au graphique ci-dessus (figure 5.5).

### Scénario 3

Ce scénario prend en input uniquement les toitures orientées sud entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$  ainsi que des PV sur les toitures plates à  $35^\circ$  de pente plein sud. Ainsi, il comprend un total de  $58.997 \text{ m}^2$  de toitures, c'est-à-dire 26% de moins que les scénarios précédents pour les toitures inclinées (figure 5.6).



**FIGURE 5.6** – PVGIS : scénario 3 : tableau récapitulatif

Ainsi et selon la base de données météorologiques fournie par PVGIS, nous obtenons une production annuelle de :

**8.221.344 kWh/an  $\Leftrightarrow$  8,22 GWh/an**

dont 4,95 GWh/an de production pour les toitures plates avec PV inclinés  
et 3,26 GWh/an de production pour les toitures inclinées

La production mensuelle simulée pour ce scénario est illustrée au graphique suivant (figure 5.7).

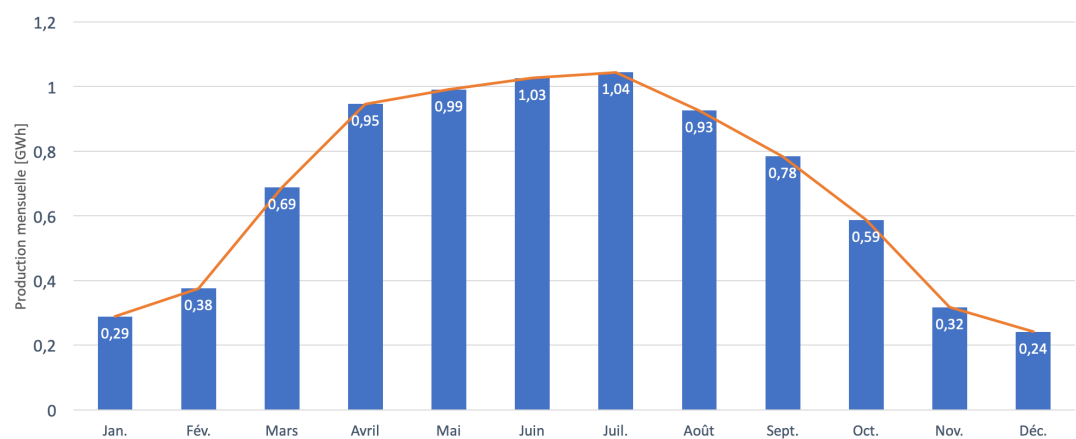


FIGURE 5.7 – PVGIS : scénario 3 : production mensuelle

Scénario 4

Le scénario 4 prend en compte toutes les toitures de la classe E, SE, S, SO, et O ainsi que ceux dans la classe de pente 0 et 1 pour les toitures de classe NO, N et NE. Nous obtenons donc une totalité 71.690 m<sup>2</sup> de surface, c’est à dire une diminution parmi les toitures inclinées de 6,6% par rapport au scénario 2 (figure 5.8).

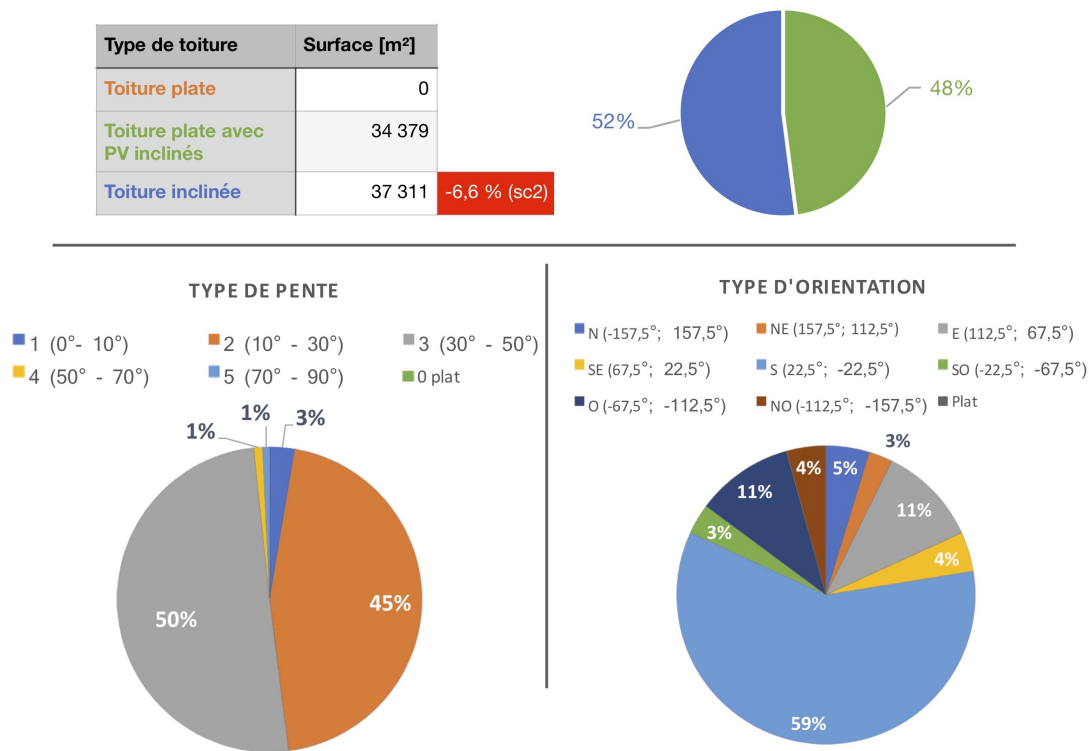


FIGURE 5.8 – PVGIS : scénario 4 : tableau récapitulatif

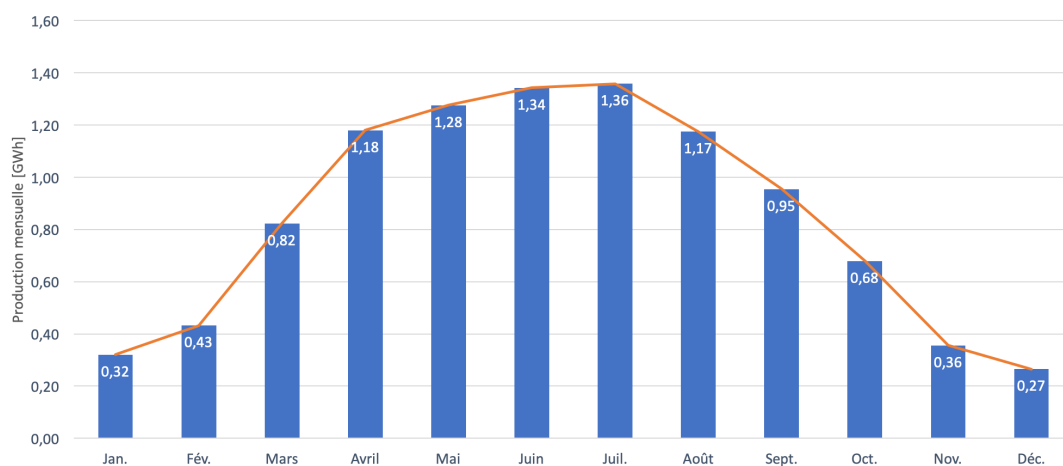


En entrant ces différents paramètres dans PVGIS, nous obtenons une production annuelle de :

**10.161.812 kWh/an  $\leq$  10,16 GWh/an**

Avec 4,95 GWh/an de production pour les toitures plates avec PV inclinés  
et 5,2 GWh/an de production pour les toitures inclinées

La distribution de la production pour ce dernier scénario sur l'année est illustrée sur le graphique à la figure 5.9.



**FIGURE 5.9** – PVGIS : scénario 4 : production mensuelle

## 5.2 Interprétation des simulations de la production

### 5.2.1 Comparaison des résultats issus d'Insight et de PVGIS

Sans modification de la pente et de l'orientation des PV sur les toitures plates, les résultats de la production estimée issus d'Insight et de PVGIS avec Excel (scénario 1) sont similaires. En effet, il n'y a seulement que 3% de différence entre les surfaces prises en compte et la production finale. Les rendements sont donc semblable (tableau 5.1). Nous pouvons en conclure que l'utilisation du logiciel Insight pour une première approximation de la production est pertinente, sans oublier sa rapidité. De plus et contrairement à l'utilisation de PVGIS et d'Excel, elle maintient la continuité du lien BIM.

### 5.2.2 Comparaison des scénarios simulés dans PVGIS avec Excel

Les quatre scénarios nous permettent de mettre en évidence la meilleure solution pour ce cas d'étude précis.

|                         | Surface [m <sup>2</sup> ] | Différence de surface | Production [kWh/an] | Différence de production | Rendement [kWh/an.m <sup>2</sup> ] |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------------|
| <b>Insight</b>          | 72 012                    | 3 %                   | 9 266 712           | 3 %                      | 128,7                              |
| <b>PVGIS scénario 1</b> | 74 340                    |                       | 9 584 940           |                          | 128,9                              |

TABLE 5.1 – Comparaison Insight et PVGIS scénario 1

En comparant les **deux premiers scénarios**, nous remarquons qu'un changement d'inclinaison des panneaux induit une augmentation de production de 16% pour ce type de toit. Ces toitures plates représentant 48% de la surface totale de toiture, la hausse de production totale est d'environ 8%.

Cependant, il est important de relever que la simulation a été réalisée sur base de l'installation de panneaux intégrés aux bâtiments. Or, les panneaux ajoutés sur les toitures plates sont généralement installés sur une structure, ce qui permet notamment une meilleure ventilation engendrant une production plus importante, comme expliqué dans l'état de l'art. Dès lors, la production estimée des PV installés sur des toitures plates devrait être légèrement supérieure. En effet, selon PVGIS, la position libre des panneaux impacterait la production de 3%.

La comparaison des scénarios 1 et 2 nous permet d'appuyer l'intérêt d'installer une structure pour positionner les panneaux à 35° de pente sur une toiture plate, est intéressant d'un point de vue de la production.

Pour le **scénario 3** ne sélectionnant que les toitures dont l'orientation se trouve entre -90° et 90° au sud en comparaison au scénario 2, nous pouvons observer que sa surface prise en compte pour l'étude diminue de 20%. La production totale annuelle diminue également de 20%. Cette importante diminution s'explique par le retrait de panneaux dont la majorité sont installés sur des toitures peu inclinées et qui engendrent un rendement conséquent. En effet, si nous consultons l'image 2.20 à la page 24 de l'état de l'art, nous remarquons que les panneaux peu inclinés (0°-25°) avec une orientation nord ont un facteur de rendement similaire à ceux orienté au sud.

Ainsi, nous avons décidé de mener une autre simulation pour mieux sélectionner les toitures. Les critères ne portent plus uniquement sur l'orientation mais aussi sur la pente des toitures. Au final, le **scénario 4** par rapport au scénario 2, observe une diminution de 3,5% de surface entraînant une baisse de production de seulement 1,4%.

|                                               | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 |
|-----------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Puissance crête [kWc]</b>                  | 11 162     | 11 162     | 8 858      | 10 764     |
| <b>Surface [m<sup>2</sup>]</b>                | 74 340     | 74 340     | 58 997     | 71 690     |
| <b>Production [kWh/an]</b>                    | 9 584 940  | 10 347 312 | 8 221 344  | 10 161 812 |
| <b>Rendement moyen [kWh/an.m<sup>2</sup>]</b> | 128,9      | 139,2      | 139,3      | 141,7      |

TABLE 5.2 – Comparaison des rendements moyens des quatre scénarios

Finalement, en comparant les rendements moyens calculés dans le tableau 5.2, nous pouvons conclure que **le scénario 4 est le plus efficient**. En effet, il propose d'installer la plus petite surface de panneaux photovoltaïques pour la plus grande production. De plus, nous pouvons observer sur la figure 5.10 une courbe de production pour le scénario 4 fortement similaire au scénario 2.

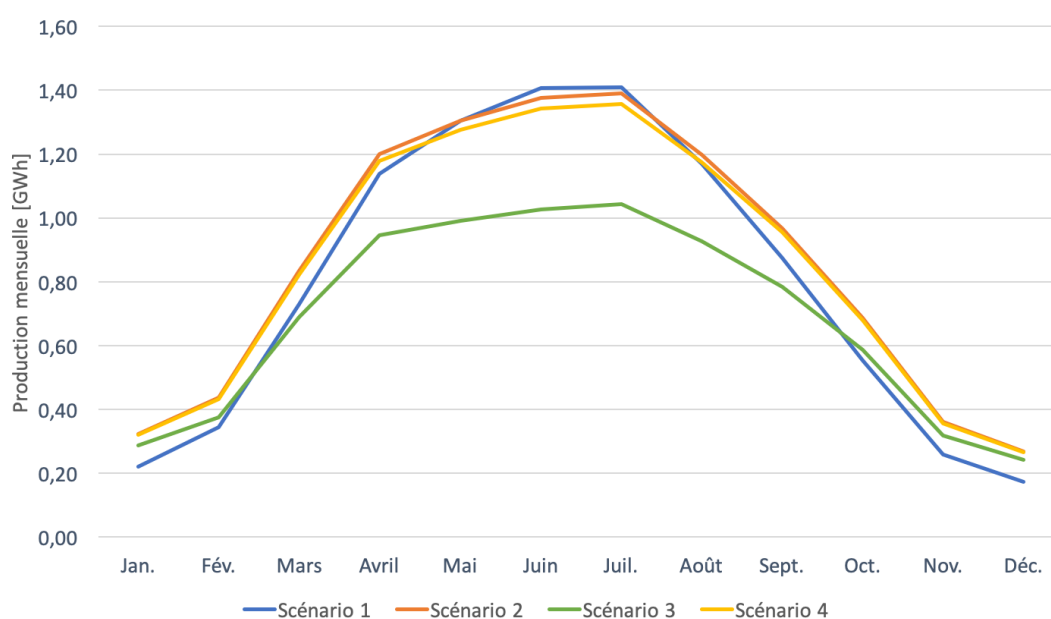


FIGURE 5.10 – Comparaison mensuelle des scénarios 1, 2, 3 &amp; 4 de simulation

En définitive, sélectionner les toitures en fonction de leur orientation n'est pas un choix de conception suffisant. Il est important d'évaluer aussi les pentes de toitures afin de déterminer le rendement des PV qui y seraient installés. Comme nous l'avons vu dans ce cas d'étude, la faible pente des toitures entraîne un rendement plus important. En conséquence, il est plus intéressant de prendre en compte ces toitures plutôt que de ne pas les exploiter.

### 5.2.3 Comparaison avec un cas de production réel

Pour évaluer l'exactitude des résultats obtenus, nous allons les comparer avec un cas réel de production sur la zone dont nous avons obtenu les données. Pour ce faire, nous avons réalisé une simulation reprenant la toiture du bâtiment concerné uniquement via le canal de la combinaison PVGIS et Excel. Les panneaux sont positionnés de la même façon dans notre simulation que dans la réalité. Le cas réel comprend les mois de référence de janvier et février 2020 tandis que les autres mois sont ceux de l'année 2019<sup>1</sup>.

La comparaison nous donne donc une différence de 17% en faveur de la production réelle, c'est-à-dire que la production réelle est supérieure de 17% à celle simulée sur une année. En analysant la production selon les mois, nous remarquons la grande variabilité de la différence illustrée par le graphique ci-dessous 5.11.



**FIGURE 5.11** – Comparaison mensuelle entre le cas réel et la simulation

Cette comparaison est cependant à prendre avec précaution. En effet, comme expliqué dans l'état de l'art, la production mensuelle varie fortement d'une année à l'autre selon la météo. Cette variation peut aller jusqu'à 42% (APERe, 2020b). Ainsi, il aurait été préférable de mener la comparaison sur base de plusieurs années de production réelle. Malheureusement, l'installation à propos de laquelle nous avons obtenu un rapport complet, date de fin février 2019.

Aucune autre comparaison n'a été accomplie car nous n'avons pas réussi à collecter d'autres données de ce type sur un an.

1. Pour des raisons de confidentialité, les chiffres exacts de la production ne sont pas révélés dans ce mémoire. En effet, la zone possédant peu d'installations de ce type, il serait facile de déduire l'équipement pris en référence dans ce travail.

## 5.3 Estimation de la consommation de la zone

### 5.3.1 Calculs

Grâce aux calculs explicités dans la méthodologie à la section 4.5, nous obtenons une consommation totale annuelle de :

$$13.514.680 \text{ kWh/an} \Leftrightarrow 13,51 \text{ GWh/an}$$

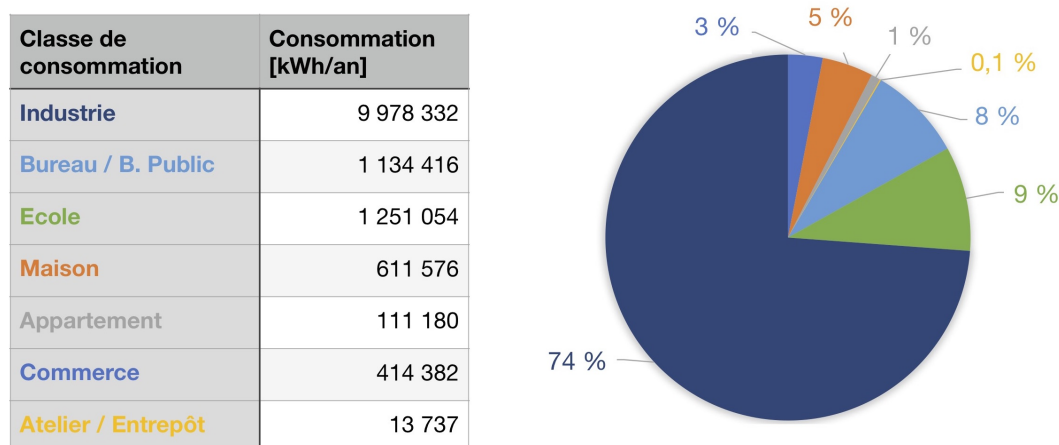


FIGURE 5.12 – Répartition de la consommation selon les fonctions

Bien que l'industrie ne représente que 12% de la surface prise en compte, elle comptabilise 74% de la consommation de notre zone, soit 9,9 GWh/an (figure 5.12). Ce constat est également valable à l'échelle de la Belgique entière. En effet, le secteur industriel est le plus gros consommateur d'électricité (figure 5.13) (FEBEG, 2019).

### 5.3.2 Comparaison avec des cas de consommation réels

Tout comme pour la production d'électricité, nous avons pu comparé la simulation réalisée de la consommation avec trois cas réels. Cette analyse souligne le caractère particulièrement approximatif de la simulation.

Ces comparaisons ont été menées au sein de deux classes de consommation<sup>2</sup>. Pour la première, nous constatons que la consommation simulée est presque **quatre fois** supérieure à la consommation réelle. Dans la seconde classe de consommation testée, nous disposons des données de consommation de deux bâtiments. Pour l'un, les résultats obtenus sont **fortement proches** de la réalité (1% de différence) tandis que pour le second, la simulation est **cinq fois** supérieure à la réalité.

2. Le nom des classe n'est pas divulgué pour des raisons de confidentialités.

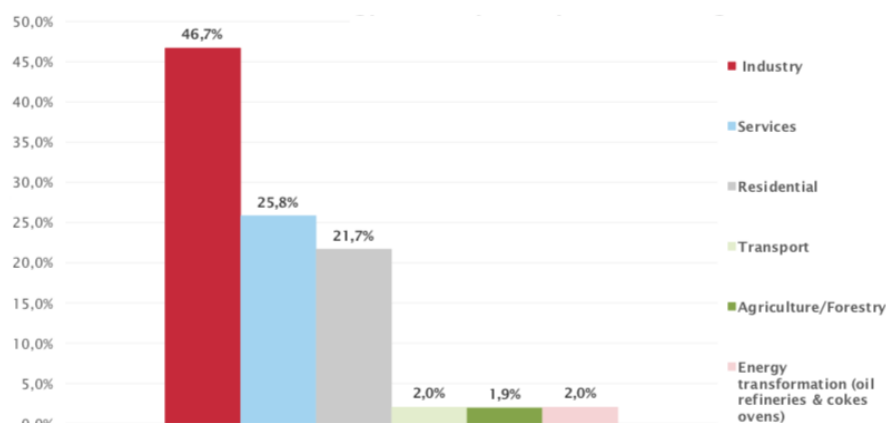


FIGURE 5.13 – Consommation d’électricité par secteur en Belgique en 2017 (FEBEG, 2019, p. 36)

## 5.4 Comparaison de la production et de la consommation

Suite à ces différents résultats et confrontations avec la réalité, nous pouvons donc conclure que **la production estimée pourrait couvrir 75% de la consommation estimée de la zone**. Cela représente déjà une importante quantité d’énergie dont la communauté pourrait bénéficier en auto-suffisance. Ainsi, **la création d’une communauté énergétique sur cette zone semble tout à fait intéressante**.

Néanmoins, comme souligné précédemment, autant l’estimation de production se rapproche de la réalité, autant l’estimation de la consommation est, quant à elle, très hypothétique. De plus, il serait plus judicieux de comparer la consommation et la production en quart horaire pour des jours types de l’année. En effet, comme cité dans l’état de l’art, les PV ne produisent de l’électricité qu’en journée. Il serait donc intéressant de comparer la courbe de charge de consommation journalière de la totalité de la zone avec celle de la production. Malheureusement, nous ne disposons pas de suffisamment d’informations pour modéliser de telle courbe propre à la zone étudiée.

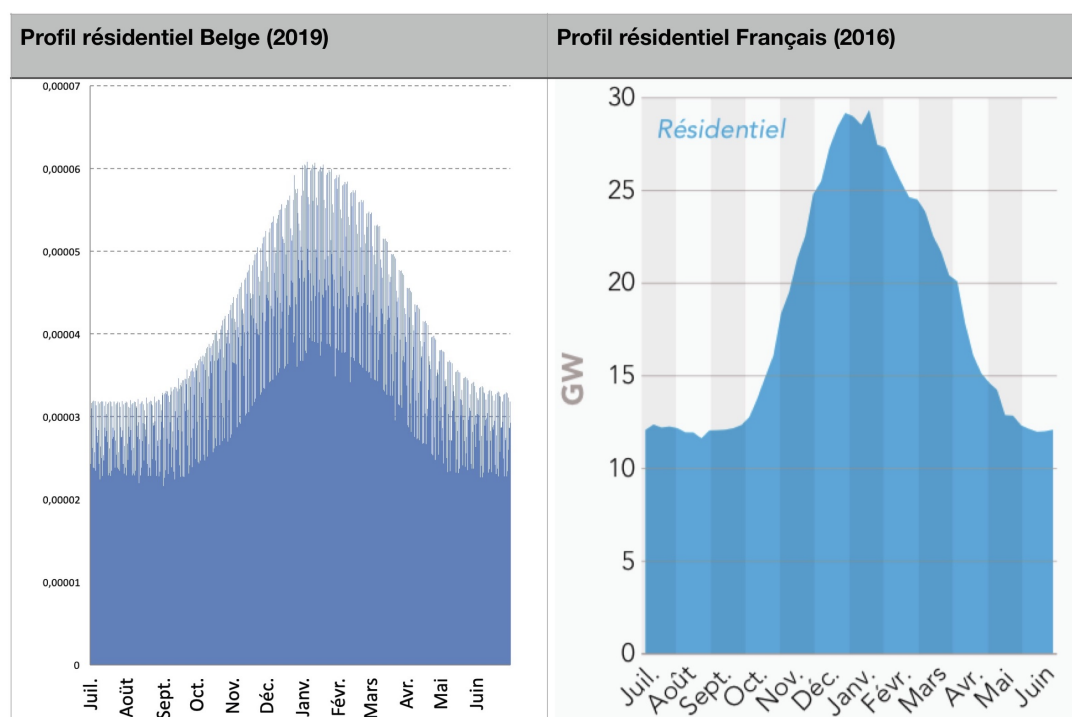
En Belgique, des statistiques sont disponibles sur le site Synergrid.be (la “Fédération de Gestionnaires de Réseaux Électricité et Gaz en Belgique”) (Synergrid, 2020) et relatent les consommations pour les secteurs résidentiel et non résidentiel. Ce profil de charge synthétique (*Synthetic Load profiles*, SLP) est fourni en pourcentage de consommation quart horaire sur une année. Au vu du manque de détails selon le type de secteur, nous avons décidé de chercher d’autres informations de consommation.

En France, un rapport du Réseau de Transport d'Électricité (RTE) publié en 2016 découpe les consommations selon trois secteurs : le secteur résidentiel, le secteur tertiaire et le secteur industriel. Cette distinction par secteur semble donc correspondre davantage à notre étude. Nous souhaitons tout de même attirer l'attention du lecteur sur le fait que le mix énergétique français diffère de ce que l'on peut trouver en Belgique.

Pour obtenir une interprétation de nos résultats selon les différents secteurs, nous avons donc utilisé les profils français. Avant cela et afin de déterminer si la marge d'erreur est importante ou non, nous avons comparé les profils de consommation belge et français pour le secteur résidentiel.

### Comparaison des profils de consommation français et belge

Comme explicité précédemment, les mixs énergétiques français et belge ne sont pas tout à fait similaires. Bien que leurs profils aient une allure assez semblable, des différences existent bel et bien. Si nous les comparons (figure 5.14), nous remarquons principalement que le pic de consommation hivernal est plus faible en Belgique qu'en France. Cela s'explique notamment par une utilisation du chauffage électrique plus importante en France.



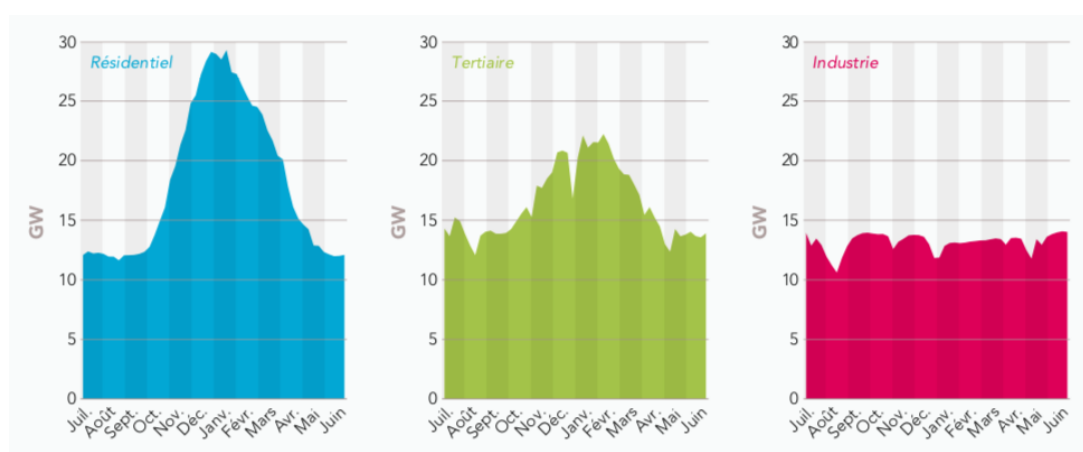
**FIGURE 5.14** – Comparaison des profils de consommation (Belgique : Synergrid, 2020) (France : RTE, 2016, p. 43)

De plus, nous pouvons étendre cette comparaison au secteur tertiaire qui utilise aussi un système de chauffage en hiver.

Au vu de cette comparaison France-Belgique, nous attirons donc l'attention du lecteur sur le fait que la consommation estimée est donc probablement surévaluée lors de la période hivernale dans la section suivante.

### 5.4.1 Courbe de charge annuelle

Ci-dessous, sont présentés les graphiques de charge annuelle pour les trois principaux secteurs : l'industrie, le secteur tertiaire et le secteur résidentiel (figure 5.15).



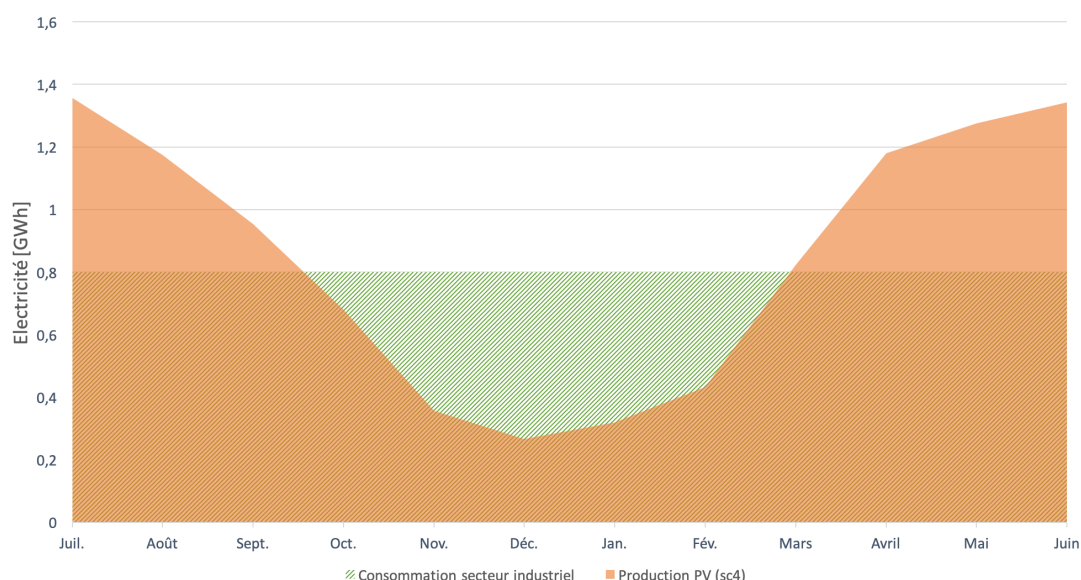
**FIGURE 5.15** – Courbe de charge annuelle par secteur (RTE, 2016, p. 43)

Pour le résidentiel et le tertiaire, nous pouvons identifier une forte hausse des courbes annuelles durant l'hiver qui s'explique par l'utilisation du chauffage. Par contre, cette forte saisonnalité de la consommation n'est pas marquée pour le secteur industriel dont la consommation est beaucoup plus constante durant l'année. En outre, des périodes de congé telles que les vacances d'été sont également identifiables par des baisses de consommation pour les secteurs tertiaire et industriel (RTE, 2016).

Si nous comparons ces courbes avec celle résultant de la simulation de production dans PVGIS pour le scénario 4 (figure 5.16). Nous remarquons bien qu'à l'inverse de la consommation, la production est plus importante durant les périodes estivales que durant l'hiver.

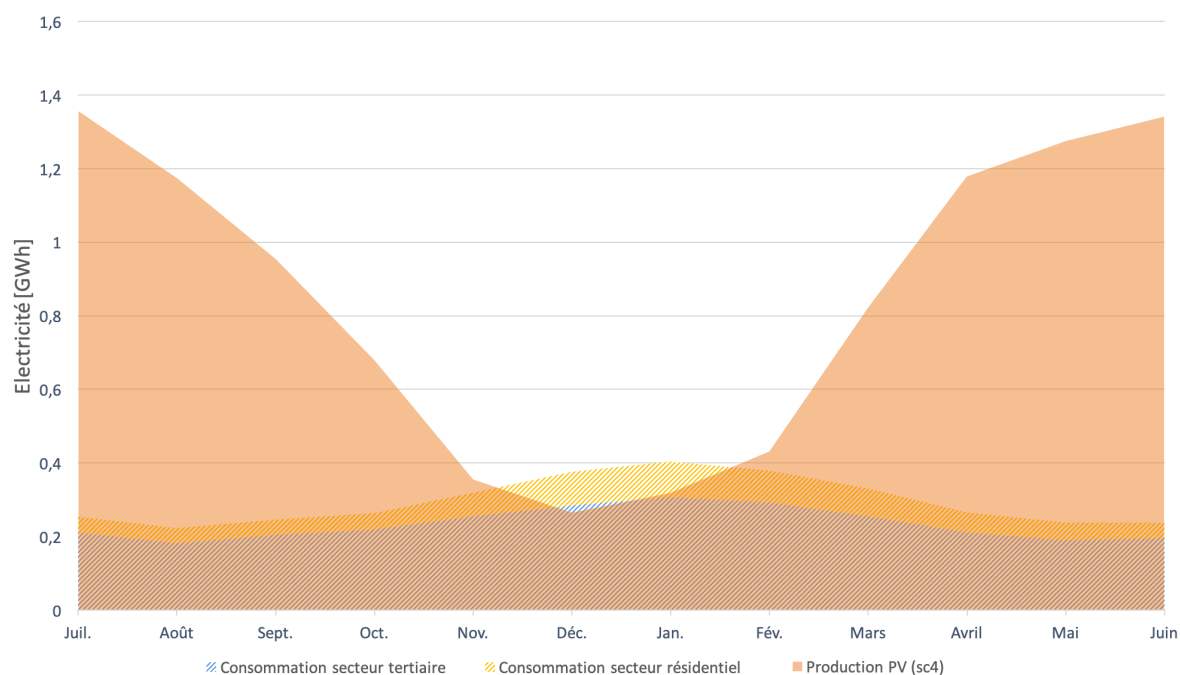


Dans notre cas particulier, la consommation provient à 74% de l'industrie dont le profil est donc très constant. Ainsi, si nous divisons la consommation de ce secteur par douze, nous obtenons une consommation mensuelle de 0,8 GWh. À elle seule, la production ne peut couvrir les besoins de ce secteur durant toute l'année et particulièrement, en hiver. Par contre, durant la période s'étendant de mars à mi-septembre, un surplus est généré. Celui-ci pourrait être distribué aux autres consommateurs de la zone. Rappelons tout de même que cette estimation de la consommation est plus qu'incertaine et que les terrains industriels représentent 44,3% de la zone étudiée. Or, cela n'est pas représentatif pour l'ensemble de la ville de Seraing puisque les terrains à usage industriel y sont présents à hauteur de 9,2% du territoire (section 4.2.1, page 40). Cette consommation pourrait être mieux distribuée sur le territoire.



**FIGURE 5.16** – Courbe de charge annuelle de production scénario 4 et consommation du secteur industriel

Si nous analysons la consommation des deux autres secteurs en partant de la répartition annuelle de consommation illustrée à la figure 5.15 et en sachant que les secteurs résidentiel et tertiaire englobent les classes de consommation suivantes : "Maison" et "Appartement"; "Bureaux et Bâtiment Public", "École", "Commerces" et "Ateliers et Entreprôts", nous obtenons donc le graphique à la figure 5.17.



**FIGURE 5.17** – Courbe de charge annuelle de production scénario 4 et consommation des secteurs résidentiel et tertiaire

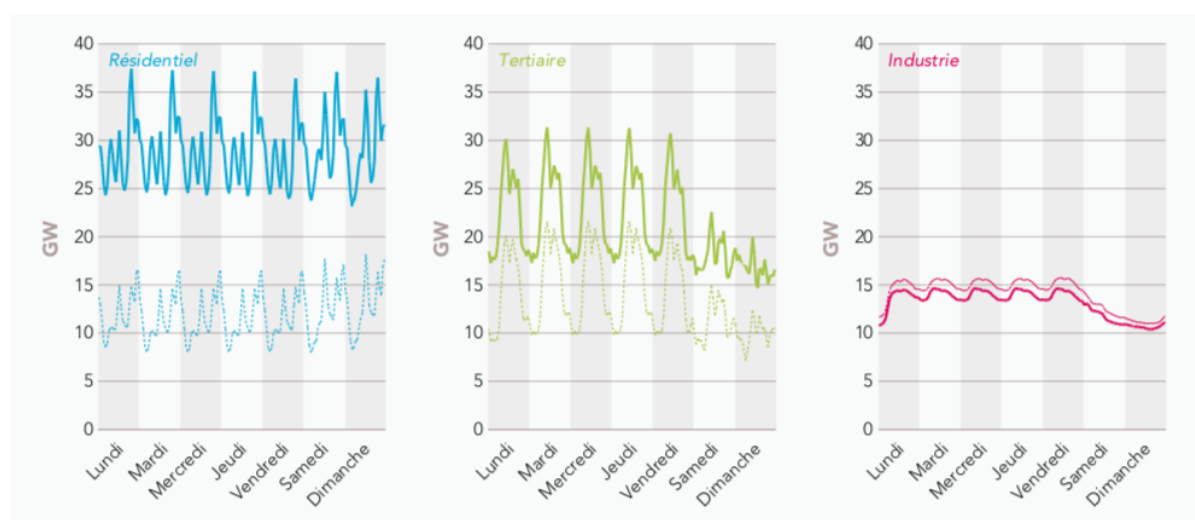
Cette illustration permet de bien visualiser la différence entre la haute période de production (l'été) et la haute période de consommation (l'hiver) due principalement au chauffage. Tout de même, nous observons que pour 10 mois sur 12, la demande est comblée. Cela étant dit, au vu de la comparaison effectuée en page 89, nous pouvons estimer que la production comble à 100% les besoins de ces deux secteurs .

Cependant, il reste un surplus très important dû à la grande surface allouée à la production (toits des bâtiments à caractère industriel). Cela nous amène donc à conclure qu'une zone composée uniquement de bâtiments résidentiels et tertiaires ne pourraient pas être autonome pour une année complète à moins de disposer de moyens de stockage. Cela étant dit, l'apport externe ou par une batterie est vraiment faible comparé à la demande comblé par la production des PV mais ceci est dû à l'étendu de l'installation qui ne le serait pas si le cas ne comprenait pas l'industrie.

Dans le cas où la consommation de l'industrie serait mieux répartie sur le territoire, un équilibre pourrait être trouvé moyennant le recours à un système de stockage.

### 5.4.2 Courbe de charge hebdomadaire et journalière

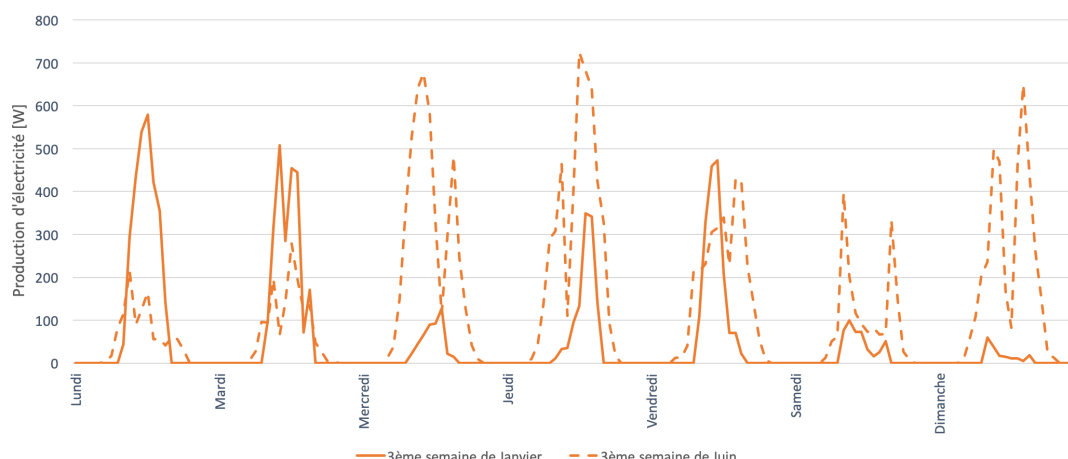
Cette sous-section a pour objectif de mettre l'accent sur la situation à l'échelle d'une semaine. Le rapport (RTE, 2016) propose également des profils de consommation hebdomadaires estimés pour les secteurs de l'industrie, tertiaire et résidentiel (figure 5.18).



**FIGURE 5.18** – Courbe de charge hebdomadaire par secteur (3e semaine de janvier en plein et 3e semaine de juin en pointillés) (RTE, 2016, p. 43)

Pour le secteur résidentiel, les pics se répètent tous les jours de la semaine et ils sont plus nombreux mais sans modification d'amplitude le weekend. La courbe du secteur tertiaire varie également fortement en fonction des jours et des horaires d'ouverture (figure 5.18). Pour ce secteur, nous pouvons relever une baisse de la consommation en fin de semaine due à une activité moindre. En outre, des hausses de consommation pour ces deux secteurs sont plus marquées le matin pendant l'hiver dû au démarrage du chauffage. Enfin, pour le secteur industriel, l'amplitude saisonnière est faible (RTE, 2016).

Afin de comparer ces deux courbes avec celles de la production, une simulation a été lancée sur PVGIS dans l'onglet "Données horaires" en entrant l'information suivante : 1 kWc orienté plein sud et à 35°. Des résultats, nous en tirons la figure ci-dessous (5.19) pour la 3ème semaine de janvier 2016 ainsi que celle de juin.



**FIGURE 5.19** – Courbe de production hebdomadaire pour 1kWc sur la zone

À l'échelle journalière :

— pour le résidentiel :

Ce diagramme nous permet d'appuyer le fait que le pic de consommation du soir ne correspond pas à une période de production. Il ne pourra pas donc être couvert par la production des PV. Cependant, cela est tout à fait envisageable pour le pic en milieu de journée. Durant le weekend, la consommation est plus marquée par plus de pics de même amplitude qu'en semaine.

— pour le tertiaire :

La consommation peut être prise en charge par la production moyennant quelques apports externes principalement les matins d'hiver ou autre en fonction de l'ensoleillement de la journée. Le weekend est caractérisé par une consommation très faible dû à la faible activité.

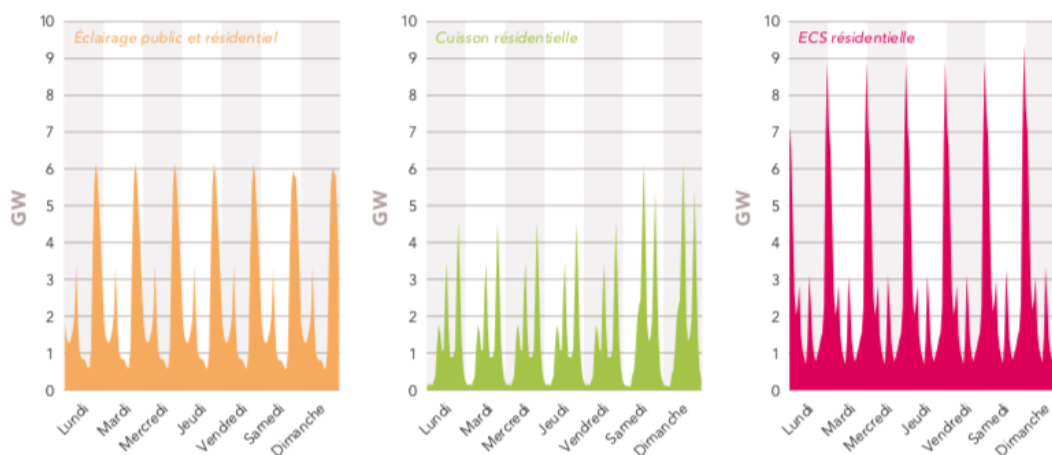
— pour l'industriel :

Nous remarquons bien une activité importante la semaine et surtout en journée bien qu'un fonctionnement de nuit est également marqué. Le secteur industriel dépendra donc d'un approvisionnement externe important.

Pour les deux premiers secteurs, nous remarquons donc qu'un équilibre se crée avec des consommations constantes la semaine et des pics semblant survenir à des moments différents. De plus durant le weekend, le secteur tertiaire consomme beaucoup moins contrairement au secteur résidentiel. Bien sûr, comme nous l'avons déjà dit, cela dépend fortement des heures d'ouverture et d'activité.

À titre d'exemple, pour le secteur résidentiel, la zone étudiée est composée de l'ordre d'une cinquantaine de foyers. Ceux-ci n'ont pas les mêmes habitudes de vie et activités.

Des pics de consommation apparaissent mais ne s'additionnent pas forcément. Ils peuvent se répartir dans le temps (figure 5.20).



**FIGURE 5.20** – Consommation hebdomadaire par type d'activité (une semaine de janvier) (RTE, 2016, p. 44)

En effet, tous les foyers n'organisent pas leur vie quotidienne de la même façon. Citons les heures de repas, par exemple. Il en va de même pour le secteur tertiaire. À titre d'exemple, les bureaux et l'école n'ont pas les mêmes heures d'ouverture. En outre, le niveau d'activité (et donc, de consommation d'énergie) varie selon les périodes de l'année. Représentant durant l'année scolaire une importante part de la demande en énergie, l'école fonctionne à vitesse réduite durant l'été, par exemple.

Enfin, nous avons pu constater que la population de Seraing est assez précarisée et qu'un quart des habitants sont à la retraite. Ainsi, nous pourrions imaginer que les habitants ayant ce profil consomment plus d'électricité durant la journée en comparaison aux profils types de la RTE.

# Chapitre 6

## Discussion

Ce chapitre se consacre à la discussion des résultats en répondant à la question principale de la recherche exposées au chapitre 3. Ainsi, nous aborderons tout d'abord l'utilisation des outils CIM dans le cadre de la simulation de production d'électricité via des PV. Ensuite, nous mettrons en regard la demande en électricité de cette zone mixte avec sa propre production avant de mettre l'accent sur l'utilité du CIM pour la prise de décision dans le cadre de la création de communauté d'énergie. Pour conclure ce chapitre, les limites de cette étude ainsi que les perspectives de recherches futures seront explicitées.

Avant d'aborder ce chapitre, nous souhaitons rappeler au lecteur que l'objectif de ce travail est de proposer une approche CIM instrumentée de l'estimation du gisement potentiel via PV sur un quartier. Ce travail pourrait donc servir par la suite aux réflexions stratégiques et économiques d'une communauté énergétique et ainsi, nourrir les calculs de rentabilité, le choix des dispositifs techniques et le mode d'articulation des acteurs.

### 6.1 Utilisation d'outils de CIM pour la simulation de production d'électricité

De nombreux logiciels de simulation de production d'électricité via des PV ont été testés dans le cadre de notre étude. Une présélection de six logiciels a ainsi été présentée, dont deux d'entre eux ont été retenus. Bien que cette recherche n'ait pas la prétention d'avoir expérimenté l'ensemble des outils disponibles en la matière, nous avons tout de même analysé en profondeur un échantillon de logiciels offrant de nombreuses possibilités. Cependant, peu sont les solutions adaptées au BIM ou au CIM permettant une telle simulation. En effet, parmi les logiciels explorés, seul le plug-in "Insight" répond à ces critères. L'implémentation récente du BIM et en particulier, du CIM, pourrait expliquer cela ainsi

que le caractère contemporain de la possibilité de création de communauté énergétique au sein de l'Union Européenne.

De ce fait, et mis à part Insight, les logiciels explorés sont adaptés à l'étude de production pour un bâtiment donné et non, d'une communauté tout entière. Une orientation et une pente sont prises en compte, c'est-à-dire une seule surface de toiture. En effet, la simulation se fait généralement surface par surface pour une maison avec deux pans de toiture, par exemple. L'une étant mieux orientée pour recevoir les PV que l'autre, l'étude d'une seule surface sera donc privilégiée. Dans le cas où de multiples surfaces sont à considérer, nous avons observé qu'un fichier reprenait les informations pour chaque surface (comme réalisé pour l'application de PVGIS allié avec Excel).

Il est donc très probable que l'augmentation de communautés énergétiques voyant le jour fasse apparaître de nouveaux logiciels ou plug-in de type "Insight" sur le marché afin de répondre à la demande et ainsi, de prévoir la production de façon plus rapide et précise. Pour cela, un important effort de modélisation sera nécessaire pour permettre l'établissement de modèles 3D de la ville. En effet, la base de données de ce travail est un fichier contenant des informations mais aussi un plan 2D. L'idéal serait donc de mettre à disposition des maquettes CIM du territoire en y intégrant le plus d'informations possibles tout en respectant les règles de confidentialité appliquées à certains domaines tels que la consommation électrique d'un ménage, par exemple. Cela permettrait d'obtenir une source d'information plus fiable concernant les géométries des bâtiments.

## 6.2 Mise en relation de la demande en électricité de la zone mixte avec la production

Par l'analyse des résultats, nous avons pu souligner l'intérêt de la mixité des fonctions au sein de la zone en termes de consommation. Cette variété induit des courbes de charge différentes et permet de s'équilibrer à certains moments comme le weekend pour le secteur résidentiel et tertiaire.

Malheureusement, le manque d'informations précises ne nous permet pas d'émettre un diagnostic rigoureux sur la consommation de la zone et ce, en particulier pour l'industrie fortement présente sur le site dont l'estimation de la consommation est très hypothétique.

## 6.3 Utilisation du CIM comme outil d'aide à la prise de décision pour la création de communauté énergétique

Nombreuses sont les étapes avant que le CIM puisse être un outil ouvert et compréhensible par les décideurs dont les pouvoirs publics. En effet, même si durant ce travail, nous avons privilégié l'utilisation de formats ouverts, ceux-ci restent largement méconnus du grand public. À titre d'exemple, la manipulation d'une maquette IFC dans un viewer peut représenter un challenge pour des personnes ne travaillant pas dans ce domaine. Il est donc nécessaire de rendre accessible aux décideurs le résultat final et d'apporter une attention particulière à la vulgarisation des conclusions issues de ce travail scientifique. Celui-ci pourrait ainsi être exploité afin de déterminer l'intérêt d'une création de communauté. Le pouvoir décideur ne pourra donc pas se passer d'un professionnel pour interpréter les résultats et ainsi, aboutir à la bonne compréhension des enjeux.

Enfin, le manque de données nécessite un travail conséquent qui pourrait engendrer davantage d'erreurs et qui pourrait conduire à une prise de décision insuffisamment éclairée. Un travail rigoureux de contrôle étape par étape est donc primordial.

## 6.4 Limites de la recherche

### 6.4.1 Limites des données d'entrée

#### Les données géométriques

Les données géométriques sont issues principalement du cadastre. Comme constaté précédemment, celui-ci n'est pas tout à fait à jour. Par exemple, il manquait le nouveau bâtiment de la cité administrative. D'autres changements, moins significatifs que cet exemple, ont également eu lieu récemment et ne sont pas non plus indiqués au plan cadastral.

Concernant la volumétrie, l'empreinte au sol des bâtiments est correcte mais les données de hauteur ainsi que de pente des toitures sont très approximatives.



## Les données de consommation

Une première limite de cette estimation de consommation est le fait que les chiffres de référence datent de 2007. Il est donc plus que probable qu'une évolution de la consommation ait eu lieu depuis lors, mais nous n'avons malheureusement pas trouvé de sources plus actuelles.

De plus, comme expliqué au sein de la méthodologie, les consommations ont été calculées en fonction des surfaces indiquées pour chaque nature cadastrale. Or, lorsque qu'un bâtiment abrite plusieurs fonctions, seule la fonction principale est énoncée. Par exemple au sein de notre zone, certaines maisons accueillent un commerce au rez-de-chaussée et à l'étage, un appartement. Cela induit donc des erreurs de répartition des surfaces en fonction de la nature cadastrale.

Finalement, la surface de l'empreinte du bâtiment a été multipliée par le nombre d'étages recensés au cadastre afin d'évaluer la surface totale d'un bien, ce qui peut également engendrer des erreurs. En effet, cette source peut comporter des informations obsolètes. En outre, des cas où la surface de plancher n'est pas la même d'un étage à un autre sont également possibles comme pour le cas d'un aménagement d'une mezzanine ou d'un renforcement de la façade.

### 6.4.2 Limites de la simulation

Tout d'abord, les simulations réalisées prennent en compte les toits dans leur totalité. Or, dans la réalité, ceux-ci peuvent disposer d'éléments comme des cheminées, des dômes ou des fenêtres de toit ne permettant pas l'exploitation entière et totale du toit par l'installation de PV. De plus, les panneaux sont fabriqués sur base de dimensions standards. Leur installation et assemblage pourraient donc aussi engendrer des surfaces non-utilisées. En prenant ces éléments en compte, nous estimons donc une perte de surface de l'ordre de 10%.

De plus, les surfaces des toitures ont besoin d'une stabilité suffisante pour recevoir des panneaux. Or, dans ce travail, l'entièreté des surfaces sont prises en compte. Des études de stabilité devraient être menées au préalable pour déterminer si la structure est suffisante, si des aménagements sont nécessaires ou s'il n'est pas possible d'utiliser la surface. Dans la présente recherche, aucun paramètre ne prend en compte ce facteur mais nous pouvons déjà estimer que l'installation sur les toitures de petites annexes ou de garages, n'est pas réaliste. Or, la majorité des habitations en possède, comme il est possible de le constater

à la figure 4.9. Nous remarquons également que leur pente de toiture sont plates pour le plus grand nombre. Au total, cette catégorie représente  $2.000\text{m}^2$ , soit seulement 5% des toitures plates et 2 % de la totalité des surfaces.

Ensuite, une différence de  $2.000\text{m}^2$  de surface de toitures a été observée entre la simulation avec Insight et la surface totale des toits exportée dans le fichier Excel. Cette différence pourrait être expliquée par la présence de deux surfaces, l'une en dessous de l'autre, qui seraient comptabilisées deux fois dans l'export Revit et une seule fois pour la simulation avec Insight. Bien que la même maquette soit utilisée pour les deux cas, Insight ne prend en compte que les surfaces supérieures recevant de la lumière naturelle.

Concernant la consommation, nous ne disposons pas de courbes de charges mensuelles et journalières pour cette recherche. Celles-ci sont pourtant essentielles afin d'estimer précisément la quantité d'énergie autoconsommée et celle qui devrait être stockée. En effet, la consommation dépend fortement des modes de vie des habitants, mais aussi des horaires d'ouverture de bureau et autres. Nous avons donc choisi de nous référer à des données produites par la RTE en France, qui ne reflètent pas exactement la situation en Belgique (et donc, du bassin sérésien) comme nous avons pu le constater mais qui s'en rapprochent. Quand à la production d'énergie estimée, elle ne dépend que de la météo mais leurs données disponibles par les logiciels ne sont pas certaines à 100%. Pour ces différentes raisons, la comparaison entre la consommation et la production bien qu'intéressante, présente des limites.

En comparant les résultats obtenus par la simulation menée grâce au plug-in "Insight" au scénario 1 de PVGIS, nous avons pu observer que ces deniers étaient très proches. Malheureusement, aucune des simulations réalisées ne prennent en compte les facteurs d'ombrage. Pour une sélection d'éléments de toiture plus accessible, la simulation a été menée sur un modèle ne comprenant que les toits des bâtiments. Sur Insight, il serait envisageable de mener une simulation en prenant en compte les ombrages, à condition que les toits soient bien classés en *IFC roof* ou qu'ils soient sélectionnés à la main. Cela dit, aucun paramètre de la simulation n'indique si ce facteur est pris en compte.

En outre, cette recherche est fortement impactée par la présence d'une industrie dans notre zone. Comme nous avons pu le remarquer notamment lors de l'estimation de la consommation mais également concernant les types de toiture, 45% des toitures sont plates sur le site industriel.

Puis, nous souhaiterions attirer l'attention du lecteur sur le cas de Seraing, qui est particulier. En effet, sa part de terrain à usage industriel et artisanal est de 9,2% alors que la moyenne wallonne s'élève à 1,4% (IWEPS, 2019). Ce cas d'étude n'est donc pas applicable tel quel pour d'autres territoires. Toutefois, une observation est faite sur l'indépendance énergétique qui avec ou sans demande industrielle, ne peut être aboutie sans un apport externe ou l'adoption d'un système de stockage.

Finalement, la simulation a été menée sans prendre en compte l'architecture du réseau électrique en place. De plus, nous utilisons l'hypothèse qu'il n'existe aucune perte dans le système, ce qui est une source évidente d'erreur.

### **Limites spécifiques à Insight**

À cause de l'absence d'export CSV pour les calculs de production, le résultat manque de beaucoup de détails. Ce résultat unique de la production annuelle ne peut être utilisé pour la comparaison mensuelle de la production et de la consommation. Il se révèle donc peu utile pour l'interprétation. Néanmoins, ce plug-in met en avant le développement d'application BIM/CIM permettant ce genre de simulations.

### **Limites spécifiques à PVGIS combiné à Excel**

Cette alliance bien que très flexible reste très longue et fastidieuse à mettre en place. De plus, la nécessaire catégorisation des toitures réalisée amène indubitablement un certain degré d'erreur. Il reste cependant relativement faible. En effet, l'écart maximum entre une valeur et celle de référence est de 10° pour la pente et de 12° pour l'orientation. Ainsi, la différence de rendement ne peut être que de 10% maximum, après analyse de l'image 2.20 page 24 de la revue de littérature.

Des limites concernent également les toitures plates. Étant donné que les chiffres exportés de Revit via Dynamo sont très précis, certaines surfaces qui devraient avoir des valeurs x et y égales à 0, ont en fait des valeurs légèrement supérieures ou inférieures (comme constaté à la figure 4.26, page 68). Ainsi, le nombre de toitures plates est probablement sous-estimé. Néanmoins, ceci n'a aucun impact sur le résultat de production. En effet, la première classe de pente prend en compte les toitures d'angle supérieur à 0° et inférieur à 10°. Pour cet angle, le facteur de rendement est toujours le même selon l'image 2.20.

## 6.5 Perspectives

Au vu des limites énoncées, différentes pistes d'évolution et de recherche sont envisagées afin de mener l'étude encore plus loin.

La première piste de recherche porte sur le développement d'un outil d'estimation de production d'électricité étendu à plusieurs bâtiments. En effet, il serait judicieux d'ajouter au sein de logiciels tels que PVSyst et PVGIS, une option permettant d'entrer les caractéristiques de différentes toitures afin de simplifier le travail et d'obtenir un résultat plus précis. En outre, il est fort probable que ce type d'expertise soit de plus en plus recherché dans le futur pour évaluer la pertinence d'aménagement de communauté énergétique. Un développement d'un outil BIM évolué dans ce domaine serait aussi très intéressant car les informations contenues dans ces maquettes pourraient être, elles aussi, utiles à ces simulations aussi bien pour la production que pour la consommation. Les surfaces de toitures y sont détaillées de façon précise ainsi que les réseaux électriques et les postes consommateurs d'électricité. Par conséquent, les résultats pourraient être plus fins permettant ainsi une meilleure comparaison pour une prise de décision qui n'en serait qu'améliorée.

La seconde piste serait de collecter des profils de consommation des bâtiments du périmètre grâce à des compteurs intelligents, ce qui permettrait d'évaluer la répartition des pics de consommation afin de déterminer précisément les besoins de stockage. De plus, grâce à ses compteurs intelligents, un suivi en temps réel de l'autoconsommation pourrait être mené.

Troisièmement, il serait pertinent de prendre en compte et de développer l'éducation des citoyens et organisations quant à leur consommation afin de déplacer au maximum leur demande en énergie durant les périodes de production. Cela permettrait de diminuer les besoins en stockage et ainsi, d'augmenter l'autoconsommation. En effet, l'efficacité énergétique n'est pas seulement un challenge technologique mais aussi social comme l'explique Jensen, Goggins, Røpke et Fahy (2019). "De nombreuses affirmations académiques affirment que les efforts actuels pour mettre en œuvre des politiques d'efficacité énergétique ne traitent pas de manière appropriée les aspects sociaux et culturels de la consommation d'énergie, limitant ainsi leur potentiel pour initier une transformation à long terme"(Jensen et al., 2019, p. 1).

---

La dernière piste serait de prendre en compte non seulement les consommations des bâtiments de la zone mais aussi, l'éclairage public ainsi que les moyens de transports électriques des habitants de la zone. Nous pourrions ainsi analyser la zone dans sa globalité et étudier la possibilité d'utiliser les voitures comme moyen de stockage et de transport de l'énergie vers le lieu de destination où l'utilisateur en a besoin.

# Chapitre 7

## Conclusion

Par la présente recherche, nous avons tout d’abord proposé au lecteur une évaluation des outils existants capables d’estimer la production d’une communauté énergétique, telle que celle envisagée au coeur de la ville de Seraing. En sélectionnant la méthode et les outils pertinents, nous avons ainsi abouti à une comparaison des choix d’installation et opté pour la plus efficiente avant de comparer la production à la consommation de la zone mixte. À notre échelle, nous avons également contribué à l’évaluation de l’utilité du CIM comme outil d’aide à la prise de décision pour la création d’une communauté d’énergie. Différents apprentissages et conclusions ont pu ainsi émerger de ce mémoire.

Premièrement, les différentes simulations et recherches réalisées nous permettent de souligner le faible nombre de logiciels sur le marché capables de prendre en compte plusieurs toitures (avec différentes orientations et inclinaisons) dans le but de mener une étude de production via des PV. Or, ce type de logiciels se révèle être primordial pour évaluer la pertinence des futures communautés d’énergie.

Deuxièmement, cette recherche confirme l’importance de l’orientation mais aussi de l’inclinaison comme facteurs de la production d’électricité via des PV. En effet, dans le cadre de cette étude, nous avons souligné que la sélection de toitures uniquement sur base de leur orientation n’est pas suffisante. Bon nombre de toitures peu inclinées étaient en effet écartées malgré un rendement assez élevé. Nous avons donc intégré celles-ci afin d’améliorer le rendement moyen tout en évitant d’installer des PV sur une toiture engendrant une faible production et ce, afin d’améliorer l’efficience de l’installation au sein de la communauté.

Troisièmement, en comparant la production et la consommation, nous pouvons conclure que la production des PV est capable de répondre à 75% des besoins des secteurs de l'industrie, du résidentiel et tertiaire.

Ces différents éléments nous permettent de clôturer ce travail par un avis favorable au développement d'une communauté énergétique sur la zone du point de vue des éléments étudiés dans ce travail. Cette conclusion est évidemment à nuancer au vu des limites énoncées et nécessiterait notamment une étude plus approfondie des consommations réelles des acteurs.

# Références

- Abrahams, P. (2020). TRNSYS 3D Plug-in version TRNSYS 18. Vidéoconférence.
- Agugiaro, G., Benner, J., Cipriano, P. & Nouvel, R. (2018, mars 5). The Energy Application Domain Extension for CityGML : enhancing interoperability for urban energy simulations. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 2.
- Akbari, H., Menon, S. & Rosenfeld, A. (2009). Global cooling : increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. *Climatic Change*, 94(3), 275-286.
- APERe. (2020a). Les Communautés Energétiques. Récupérée 15 mai 2020, à partir de <http://www.apere.org/sites/default/files/CCE-Introduction.pdf>
- APERe. (2020b). Observatoire photovoltaïque. Récupérée 27 mars 2020, à partir de <http://www.apere.org/fr/observatoire-photovoltaïque>
- APERe. (2020c). Production d'énergie renouvelable. Récupérée 27 mars 2020, à partir de <https://www.apere.org/fr/observatoire-energies-renouvelables>
- Bayod-Rújula, A. A. (2019). Chapter 8 - Solar photovoltaics (PV). In F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini & D. Ferrero (Éd.), *Solar Hydrogen Production* (p. 237-295).
- Beirao, J., Montenegro, N. & Duarte, J. P. (2009). Monitoring Urban Design Through Generative Design Support Tools : a Generative Grammar for Praia. *Proceedings of the APDR ...*
- Biljecki, F. (2017). *Level of detail in 3D city models* (thèse de doct., Delft University of Technology, Delft).
- Bruwier, C. (2019). *Statistiques structurelles sur les entreprises* (Analyse N° 5). STAT-BEL. Bruxelles.
- BuildingSMART. (2019, juin 24). Notions clés à connaître sur le BIM. Récupérée 3 mars 2020, à partir de <https://www.buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim/>
- Chalal, M. L., Benachir, M., White, M. & Shrahily, R. (2016, octobre 1). Energy planning and forecasting approaches for supporting physical improvement strategies in the building sector : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 761-776.



- Chen, K., Lu, W., Xue, F., Tang, P. & Li, L. H. (2018). Automatic building information model reconstruction in high-density urban areas : Augmenting multi-source data with architectural knowledge. *Automation in Construction*, 93, 22-34.
- Clarke, K. C. & Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS : long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699-714. Publisher : Taylor & Francis \_eprint : <https://doi.org/10.1080/136588198241617>.
- Commission Européenne. (2019). Getting started with PVGIS. Récupérée 3 mai 2020, à partir de <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/starting>
- CSTC. (2013). PEB – Systèmes photovoltaïques. Récupérée 27 mars 2020, à partir de <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=48&art=7&lang=fr#table1>
- Dastbaz, M., Gorse, C. & Moncaster, A. (Éd.). (2017). *Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction*.
- Deng, Y., Cheng, J. C. P. & Anumba, C. (2016, juillet 1). Mapping between BIM and 3d GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison. *Automation in Construction*, 67, 1-21.
- Depret, A. (2016). Seraing : un master plan pour une ville en transition. *Mouvement communal, Smart cities*(912), 18.
- Directive (UE) 2018/2001 du parlement Européen et du conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (refonte). (2018). *Official Journal of the European Union*, 128.
- Directive (UE) 2019/944 du parlement Européen et du conseil du 5 juin 2019 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité et modifiant la directive 2012/27/UE (refonte). (2019). *Official Journal of the European Union*, 75.
- Directive 2007/2/CE du parlement européen et du conseil du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne (INSPIRE). (2007, mars 14). *Journal officiel de l'Union européenne*, (108), 14.
- Donkers, S., Ledoux, H., Zhao, J. & Stoter, J. (2015). Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Transactions in GIS*, 20(4), 547-569. \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tgis.12162>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K. (2011). *BIM Handbook : A guide to Building Information Modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors* (1st edition). New Jersey, USA : John Wiley & Sons et Sons LTD.
- Energieplus. (2007). Situer sa consommation par rapport au secteur. Récupérée 17 mai 2020, à partir de <https://energieplus-lesite.be/evaluer/energie-et-les-consommations2/>

- analyser-la-consommation-electrique/situer-sa-consommation-par-rapport-au-secteur/#Comparer\_aux\_moyennes\_du\_secteur
- Energieplus. (2010a). Ensoleillement. Récupérée 27 mars 2020, à partir de <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/#01>
- Energieplus. (2010b). Prédimensionner l'installation [photovoltaïque]. Récupérée 19 avril 2020, à partir de <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaique/predimensionner-l-installation/>
- Energieplus. (2010c). Rendement et puissance crête des cellules photovoltaïques. Récupérée 27 mars 2020, à partir de <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaïques/>
- Engie. (2019). Comparez votre consommation électrique moyenne à celle de votre voisin. Récupérée 19 mai 2020, à partir de <https://www.engie.be/fr/blog/solutions-pour-la-maison/consommation-electricite-moyenne-belge/>
- Fadli, F. & AlSaeed, M. (2020). Smart interactive cities [SICs] : the use of computational tools and technologies [CTTs] as a systemic approach to reduce water and energy consumption in urban areas. *Data-driven Multivalence in the Built Environment*, 109-138.
- FEBEG. (2019). *Rapport Annuel 2018*. Fédération Belge des Entreprises Electrique et Gazière.
- Gouvernement Wallon. (2019). Décret modifiant les décrets des 12 avril 2001 relatif à l'organisation du marché régional de l'électricité, du 19 décembre 2002 relatif à l'organisation du marché régional du gaz et du 19 janvier 2017 relatif à la méthodologie tarifaire applicable aux gestionnaires de réseau de distribution de gaz et d'électricité en vue de favoriser le développement des communautés d'énergie renouvelable. Récupérée à partir de <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/19/19007/1.html>
- Gröger, G. & Plümer, L. (2012). CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, 12-33.
- Hijazi, I., Ehlers, M., Zlatanova, S., Becker, T. & van Berlo, L. (2011). Initial investigations for modeling interior utilities within 3d geo context : transforming IFC-interior utility to CityGML/UtilityNetworkADE. In T. H. Kolbe, G. König & C. Nagel (Éd.), *Advances in 3d geo-information sciences* (p. 95-113). Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.
- Hoyet, N., Duchène, F. & De Fouquet, M. (2016, septembre 7). *BIM et architecture* (Dunod). Paris.
- IEA. (2018). *World Energy Outlook*. International Energy Agency. Paris.
- IEA. (2019a). *Renewables information : overview*. International Energy Agency. 978-92-64-47214-3. Paris.

- IEA. (2019b). *Trends in PV Applications 2019*. International Energy Agency.
- IEA & ISA. (2019). *Solar Energy, Mapping the road ahead*. International Energy Agency & International Solar Alliance.
- IWEPS. (2019, janvier 1). WalStat - Détail de l'entité SERAING (Commune). Récupérée 13 mars 2020, à partir de [https://walstat.iweps.be/walstat-fiche-entite.php?entite\\_id=62096](https://walstat.iweps.be/walstat-fiche-entite.php?entite_id=62096)
- Jensen, C. L., Goggins, G., Røpke, I. & Fahy, F. (2019). Achieving sustainability transitions in residential energy use across Europe : The importance of problem framings. *Energy Policy*, 133, 110927.
- Jusuf, S. K., Mousseau, B., Godfroid, G. & Soh Jin Hui, V. (2017, septembre 1). Integrated modeling of CityGML and IFC for city/neighborhood development for urban microclimates analysis. *Energy Procedia*, 122, 145-150.
- Kalogirou, S. A. (2014). Chapter 9 – Photovoltaic Systems | Elsevier Enhanced Reader. In *Solar Energy Engineering* (Second edition, p. 481-540). Library Catalog : [reader.elsevier.com](http://reader.elsevier.com).
- Kolbe, T., Gröger, G. & Plümer, L. (2005). CityGML - Interoperable access to 3D city models. *Geo-information for Disaster Management*.
- Legrand, T. (2018). MéryGrid : gros plan sur le premier micro-grid de Belgique ! *Les Smart Grids, Réseaux*.
- El-Mekawy, M., Östman, A. & Hijazi, I. (2012). A Unified Building Model for 3D Urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(2), 120-145.
- Nouvel, R., Bahu, J.-M., Kaden, R., Kaempf, J. & Cipriano, P. (2015). Development of the CityGML Application Domain Extension Energy for Urban Energy Simulation. Library Catalog : [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), Lisbon, Portugal.
- Renou, J. & Chemise, S. (2018, janvier 18). *Revit pour le BIM, initiation générale et perfectionnement structure* (4e édition). Eyrolles. Paris : Eyrolles.
- RTE. (2016). *Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*. RTE. Paris.
- Siraganyan, K., Mauree, D., Robin, D., Uhlhorn, E. & Scartezzini, J.-L. (2019). Strategies to maximise the autonomy of neighbourhoods with the integration of renewable energies. *Journal of Physics : Conference Series*, 1343, 012109.
- Song, Y., Wang, X., Tan, Y., Wu, P., Sutrisna, M., Cheng, J. C. P. & Hampson, K. (2017, décembre). Trends and opportunities of BIM-GIS integration in the architecture, engineering and construction industry : a review from a spatio-temporal statistical perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 397.
- SPF Finances. (2017). *URBAIN : Explications utilisation outil de visualisation* (rapp. tech. N° 220). Service Public Fédéral Finances.

- Sweeney, M. (1999). Geographic information systems. *Water Environment Research*, 71(5), 551-556.
- Synergrid. (2020). Synthetic Load Profiles (SLP). Récupérée 27 mai 2020, à partir de [http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=16896&language\\_code=FRA#](http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=16896&language_code=FRA#)
- Thompson, E. M., Greenhalgh, P., Muldoon-Smith, K., Charlton, J. & Dolník, M. (2016, mars 29). Planners in the future city : using city information modelling to support planners as market actors. *Urban Planning*, 1(1), 79-94.
- Vieira, D. R., Calmon, J. L. & Cavalcante Faroni, M. C. (2017). Building Information Modeling (BIM) in Brazil's Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry : A Review and a Bibliometric Study. *Journal Modern Project Management*, 5(1), 22-37.
- Volk, R., Stengel, J. & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127.
- Wang, H., Pan, Y. & Luo, X. (2019, juillet 1). Integration of BIM and GIS in sustainable built environment : a review and bibliometric analysis. *Automation in Construction*, 103, 41-52.
- Warichet, L. (2017). MeryGrid, Projet pilote de micro-réseau intelligent à Méry. Récupérée 6 avril 2020, à partir de [https://fr.slideshare.net/cluster\\_tweed/energy-transition-conference-networking-event](https://fr.slideshare.net/cluster_tweed/energy-transition-conference-networking-event)
- Xu, X., Ding, L., Luo, H. & Ma, L. (2014, septembre). From building information modeling to city information modeling. *Journal of Information Technology in Construction*, 19, 292-307.
- Xue, F., Lu, W., Tan, T. & Chen, K. (2019). Semantic enrichment of city information models with LiDAR-based rooftop albedo.
- Zhu, J., Wright, G., Wang, J. & Wang, X. (2018). A Critical Review of the Integration of Geographic Information System and Building Information Modelling at the Data Level. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 66. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

# Liste des Figures

|      |                                                                                                                            |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | BIM : les 6 LOD et phase correspondantes (Hoyet, Duchène et De Fouquet, 2016, p. 26) . . . . .                             | 4  |
| 2.2  | CityGML : les 5 LOD (Biljecki (2017), p. 7) . . . . .                                                                      | 6  |
| 2.3  | Composition d’une maquette CIM, (Xu, Ding, Luo et Ma, 2014, p. 2) . . .                                                    | 7  |
| 2.4  | Intégration IFC et CityGML (El-Mekawy, Östman et Hijazi, 2012, p. 6) . .                                                   | 8  |
| 2.5  | Boucle de la méthode de la <i>Smart City</i> (Fadli et AlSaeed, 2020, p. 116) . .                                          | 10 |
| 2.6  | Variation annuelle moyenne de la consommation finale totale d’électricité par secteur, 2017-2025 et 2025-2040 . . . . .    | 11 |
| 2.7  | Nombre d’articles répondant aux critères, 2015-2020 . . . . .                                                              | 12 |
| 2.8  | Nombre d’articles par sujet . . . . .                                                                                      | 13 |
| 2.9  | Méthodologie suivie par Agugiaro, Benner, Cipriano et Nouvel, 2018 . . . .                                                 | 14 |
| 2.10 | Modèle LiDAR(Xue et al., 2019, p. 3) . . . . .                                                                             | 15 |
| 2.11 | Intégration LiDAR et <i>Open Street Map</i> (Xue et al., 2019, p. 4) . . . . .                                             | 15 |
| 2.12 | Propriétés de la maquette globale (Xue et al., 2019, p. 5) . . . . .                                                       | 15 |
| 2.13 | Méthodologie suivie par Xue et al., 2019 . . . . .                                                                         | 16 |
| 2.14 | Taux de croissance annuels moyens de l’offre mondiale d’énergies renouvelables de 1990 à 2017 (IEA, 2019a, p. 4) . . . . . | 17 |
| 2.15 | Évolution de l’électricité d’origine renouvelable par filière en Belgique de 2005 à 2019 (APERe, 2020c) . . . . .          | 18 |
| 2.16 | Consommation d’électricité en Belgique Parts Renouvelables - 28 Mars 2020 (APERe, 2020a) . . . . .                         | 19 |
| 2.17 | Éléments d’un système photovoltaïque (CSTC, 2013) . . . . .                                                                | 20 |
| 2.18 | Gisement solaire à Uccle (Energieplus, 2010a) . . . . .                                                                    | 23 |
| 2.19 | Comparaison des productivités mensuelles photovoltaïques entre 2009 et 2019 (APERe, 2020b) . . . . .                       | 23 |
| 2.20 | Influence de l’orientation et de l’inclinaison du toit (Energieplus, 2010a) . .                                            | 24 |
| 2.21 | Vue aérienne du projet Mérygrid (Legrand, 2018, p. 1) . . . . .                                                            | 26 |
| 2.22 | Réseau mis en place pour Mérygrid (Warichet, 2017, p. 22) . . . . .                                                        | 26 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.23 Workflow de l'étude (Siraganyan, Mauree, Robin, Uhlhorn et Scartezzini, 2019, p. 3) . . . . .             | 27 |
| 4.1 Schéma de la méthode générale . . . . .                                                                    | 37 |
| 4.2 Carte : localisation de Liège en Belgique . . . . .                                                        | 38 |
| 4.3 Carte : localisation de Seraing dans Liège . . . . .                                                       | 39 |
| 4.4 Répartition de la superficie artificialisée de l'entité Seraing (sur base de : IWEPS, 2019) . . . . .      | 40 |
| 4.5 Carte : localisation des zones . . . . .                                                                   | 42 |
| 4.6 Caractéristiques de la zone Collard . . . . .                                                              | 43 |
| 4.7 Caractéristiques de la zone d'entrée de ville . . . . .                                                    | 43 |
| 4.8 Nature cadastrale des parcelles (plan cadastral de Seraing) . . . . .                                      | 44 |
| 4.9 Nature cadastrale des parcelles, zoom (plan cadastral de Seraing) . . . . .                                | 47 |
| 4.10 Plan cadastral, parcellaire et bâti de Seraing . . . . .                                                  | 49 |
| 4.11 Exemple d'incohérences du plan cadastral . . . . .                                                        | 50 |
| 4.12 Méthode de modélisation . . . . .                                                                         | 51 |
| 4.13 Code dynamo pour intégrer les paramètres . . . . .                                                        | 53 |
| 4.14 Maquette IFC dans BIMcollab Zoom . . . . .                                                                | 53 |
| 4.15 Modélisation des toitures : problème de triangulation (1) . . . . .                                       | 55 |
| 4.16 Modélisation des toitures : problème de triangulation (2) . . . . .                                       | 55 |
| 4.17 Modélisation des toitures : problème de triangulation (3) . . . . .                                       | 56 |
| 4.18 Modélisation des toitures : code pour l'export Excel . . . . .                                            | 57 |
| 4.19 TRNSYS : matrice d'ombre portée (Abrahams, 2020, p. 90) . . . . .                                         | 59 |
| 4.20 TRNSYS : modification des outputs . . . . .                                                               | 59 |
| 4.21 TRNSYS : méthode générale . . . . .                                                                       | 60 |
| 4.22 Insight : interface . . . . .                                                                             | 63 |
| 4.23 Insight : paramètres du type d'étude . . . . .                                                            | 63 |
| 4.24 PVGIS : interface . . . . .                                                                               | 66 |
| 4.25 PVGIS : carte des bases de données (Commission Européenne, 2019) . . . .                                  | 67 |
| 4.26 PVGIS : extrait fichier Excel brut . . . . .                                                              | 68 |
| 4.27 PVGIS : illustration des classes . . . . .                                                                | 70 |
| 4.28 PVGIS : scénarios illustrés sur le graphique de rendement des PV (adapté de Energieplus, 2010a) . . . . . | 72 |
| 4.29 Surface utile par classe de consommation . . . . .                                                        | 76 |
| 5.1 Production annuelle par Insight . . . . .                                                                  | 78 |
| 5.2 PVGIS : scénario 1 : tableau récapitulatif . . . . .                                                       | 79 |
| 5.3 PVGIS : scénario 1 : production mensuelle . . . . .                                                        | 79 |

|      |                                                                                                                                             |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.4  | PVGIS : scénario 2 : tableau récapitulatif . . . . .                                                                                        | 80  |
| 5.5  | PVGIS : scénario 2 : production mensuelle . . . . .                                                                                         | 80  |
| 5.6  | PVGIS : scénario 3 : tableau récapitulatif . . . . .                                                                                        | 81  |
| 5.7  | PVGIS : scénario 3 : production mensuelle . . . . .                                                                                         | 82  |
| 5.8  | PVGIS : scénario 4 : tableau récapitulatif . . . . .                                                                                        | 82  |
| 5.9  | PVGIS : scénario 4 : production mensuelle . . . . .                                                                                         | 83  |
| 5.10 | Comparaison mensuelle des scénarios 1, 2, 3 & 4 de simulation . . . . .                                                                     | 85  |
| 5.11 | Comparaison mensuelle entre le cas réel et la simulation . . . . .                                                                          | 86  |
| 5.12 | Répartition de la consommation selon les fonctions . . . . .                                                                                | 87  |
| 5.13 | Consommation d'électricité par secteur en Belgique en 2017 (FEBEG, 2019, p. 36) . . . . .                                                   | 88  |
| 5.14 | Comparaison des profils de consommation (Belgique : Synergrid, 2020) (France : RTE, 2016, p. 43) . . . . .                                  | 89  |
| 5.15 | Courbe de charge annuelle par secteur (RTE, 2016, p. 43) . . . . .                                                                          | 90  |
| 5.16 | Courbe de charge annuelle de production scénario 4 et consommation du secteur industriel . . . . .                                          | 91  |
| 5.17 | Courbe de charge annuelle de production scénario 4 et consommation des secteurs résidentiel et tertiaire . . . . .                          | 92  |
| 5.18 | Courbe de charge hebdomadaire par secteur (3e semaine de janvier en plein et 3e semaine de juin en pointillés) (RTE, 2016, p. 43) . . . . . | 93  |
| 5.19 | Courbe de production hebdomadaire pour 1kWc sur la zone . . . . .                                                                           | 94  |
| 5.20 | Consommation hebdomadaire par type d'activité (une semaine de janvier) (RTE, 2016, p. 44) . . . . .                                         | 95  |
| B.1  | Méthodologie suivie par Chen et al., 2018, p. 26 . . . . .                                                                                  | 117 |
| D.1  | Code dynamo pour intégrer les paramètres . . . . .                                                                                          | 120 |
| D.2  | Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 1 . . . . .                                                                              | 121 |
| D.3  | Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 2 . . . . .                                                                              | 121 |
| D.4  | Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 3 . . . . .                                                                              | 122 |
| D.5  | Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 4 . . . . .                                                                              | 122 |
| D.6  | Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 5 . . . . .                                                                              | 122 |
| E.1  | Code dynamo pour exporter les informations des toitures en fichier Excel . . . . .                                                          | 123 |
| E.2  | Code Dynamo pour information toiture (1) . . . . .                                                                                          | 123 |
| E.3  | Code Dynamo pour information toiture (2) . . . . .                                                                                          | 124 |
| E.4  | Code Dynamo pour information toiture (3) . . . . .                                                                                          | 124 |
| E.5  | Code Dynamo pour information toiture (4) . . . . .                                                                                          | 125 |

# Liste des Tableaux

|      |                                                                                                                                                |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1  | BIM : les 6 LOD (Adapté du BIMforum, 2019) . . . . .                                                                                           | 5   |
| 2.2  | Tableau récapitulatif des méthodes d'intégration IFC et CityGML . . . . .                                                                      | 9   |
| 2.3  | Tableau comparatif des technologies des cellules photovoltaïques (Bayod-Rújula, 2019 ; Kalogirou, 2014 ; do Nascimento et al., 2020) . . . . . | 22  |
| 4.1  | Tableau des fonctions reprises au cadastre (partie 2) Définition provenant du SPF Finances (2017) . . . . .                                    | 46  |
| 4.2  | Modélisation import, export . . . . .                                                                                                          | 54  |
| 4.3  | Tableau récapitulatif des logiciels non-retenus . . . . .                                                                                      | 62  |
| 4.4  | Insight : scénario . . . . .                                                                                                                   | 64  |
| 4.5  | Insight : avantages et inconvénients . . . . .                                                                                                 | 65  |
| 4.6  | PVGIS : catégories d'orientation . . . . .                                                                                                     | 69  |
| 4.7  | PVGIS : catégories de pente . . . . .                                                                                                          | 69  |
| 4.8  | PVGIS : scénarios . . . . .                                                                                                                    | 71  |
| 4.9  | PVGIS : avantages et inconvénients . . . . .                                                                                                   | 73  |
| 4.10 | Type de nature cadastrale contenant des bâtiments consommateurs d'électricité . . . . .                                                        | 75  |
| 4.11 | Classement des types de nature cadastrale en classes de consommation . . . . .                                                                 | 75  |
| 4.12 | Consommation par $m^2$ selon la classe de consommation (Energieplus, 2007) . . . . .                                                           | 76  |
| 5.1  | Comparaison Insight et PVGIS scénario 1 . . . . .                                                                                              | 84  |
| 5.2  | Comparaison des rendements moyens des quatre scénarios . . . . .                                                                               | 85  |
| A.1  | Tableau des entretiens . . . . .                                                                                                               | 116 |



## Annexe A

### Tableau des entretiens

| N°  | Date de l'entretien | Personne(s) présente(s)           | Fonction                                                                                              | Sujet de l'entretien                                                                         |
|-----|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| I   | 30/10/2019          | Simon Lachi<br>Christelle Degard  | Responsable Innovation chez RESA<br>Chef de projet à l'AREBS                                          | Explication du système électrique de la zone et demande de données agrégées sur la zone      |
| II  | 4/12/2019           | Benoît Brahy                      | Chef de cellule Electromécanique à l'AIDE                                                             | Explication du fonctionnement des réseaux électriques des stations de pompage                |
| III | 27/01/2020          | Philippe Pirard<br>Pierre Darmont | Directeur en chef - Architecte à la province de Liège<br>Directeur technique à la province de Liège   | Collecte des données pour l'école de la province de Liège sur la zone                        |
| IV  | 18/02/2020          | Céline Soors<br>Christelle Degard | Service de l'urbanisme et aménagement du territoire à la Ville de Seraing<br>Chef de projet à l'AREBS | Collecte de données de la zone d'étude                                                       |
| V   | 21/02/2020          | Emmanuel Fontaine                 | Service Energie à la Ville de Mouscron et administrateur de la coopérative « CoLéco »                 | Informations sur la création de communauté énergétique dans le cadre du projet pilote CoLéco |
| VI  | 13/03/2020          | François Henry                    | Manager Technique à John Cockerill                                                                    | Collecte de données et explication du projet MiRIS                                           |

TABLE A.1 – Tableau des entretiens

## Annexe B

### Méthodologie de Chen et al. (2018) pour la génération de toiture

Chen et al. (2018) ont développé une méthode permettant de générer une maquette au LOD 2 d'une ville. Ils sont partis de données topographiques et d'un nuage de points construit par un relevé au LiDAR.

La procédure complète est décrite par figure B.1.

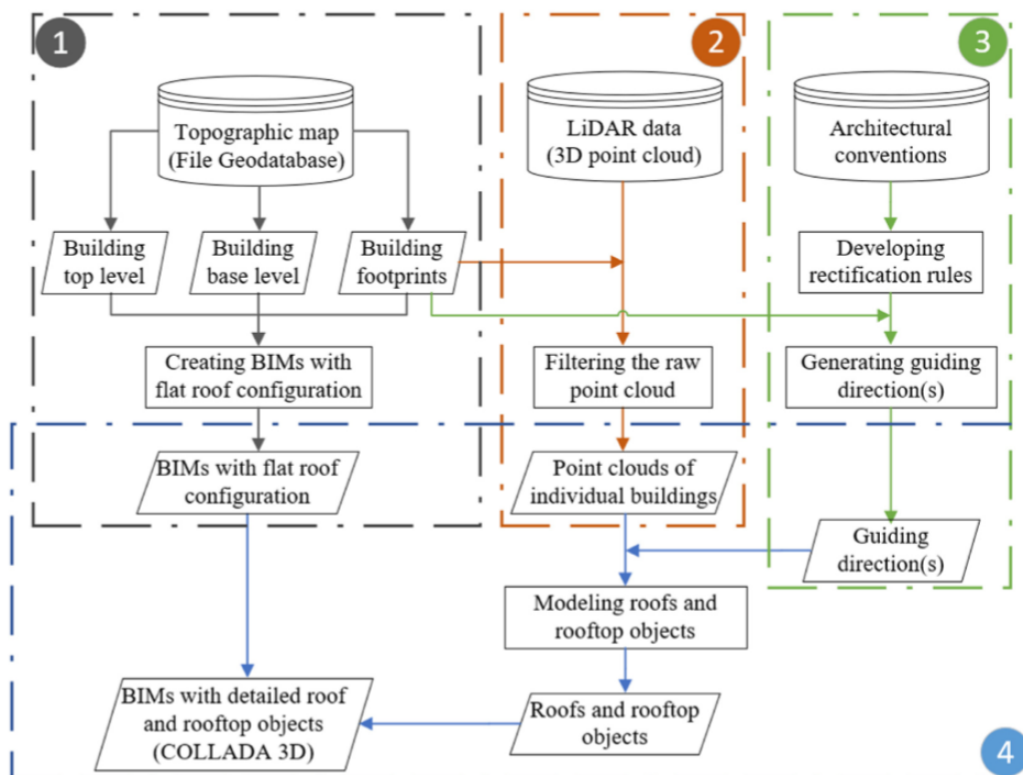
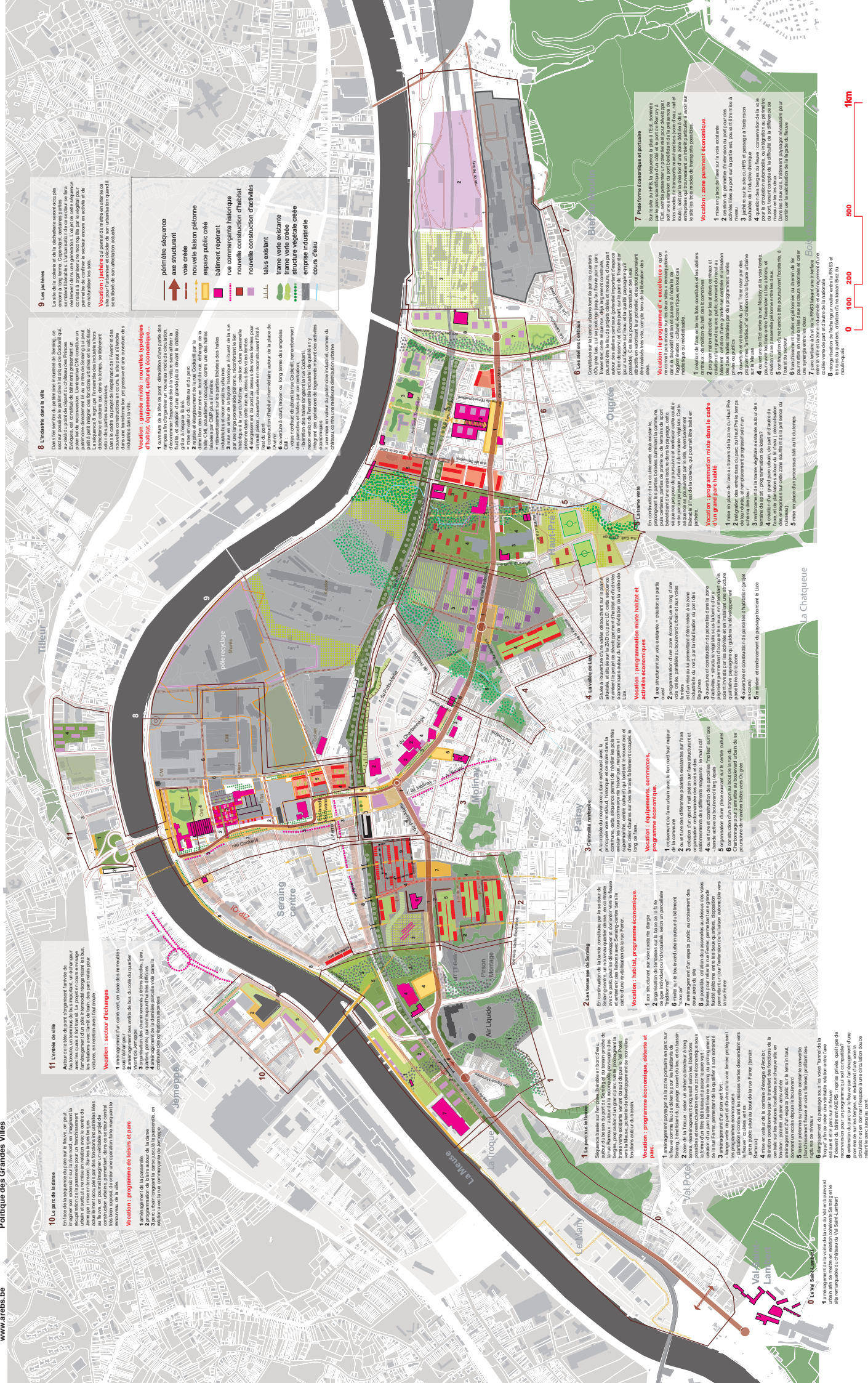


FIGURE B.1 – Méthodologie suivie par Chen et al., 2018, p. 26

## Annexe C

### Master Plan de Seraing



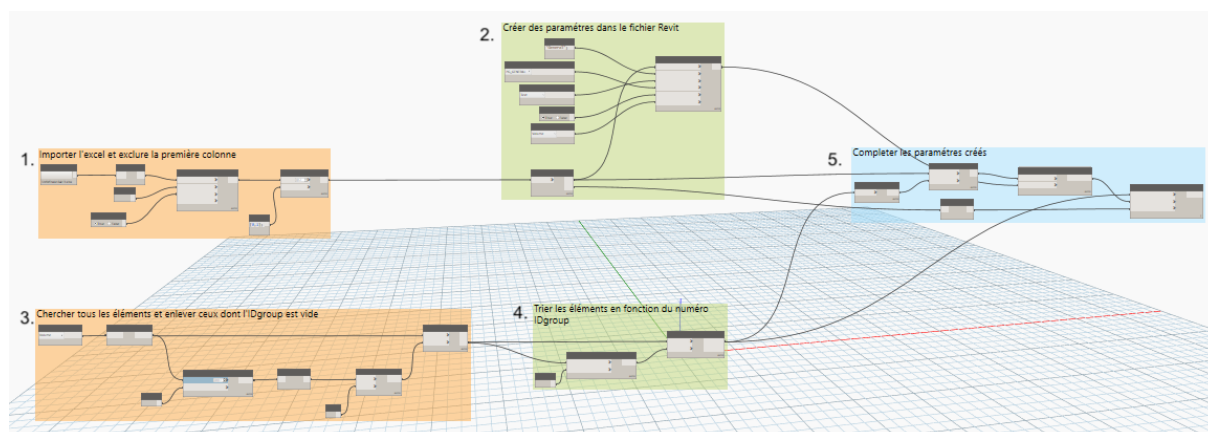




## Annexe D

# Code Dynamo pour informer la maquette Revit

Comme expliqué dans la méthodologie, ce code est divisé en 5 parties que voici figure D.1.



**FIGURE D.1** – Code dynamo pour intégrer les paramètres

Plus précisément, cela donne les figures D.2, D.3, D.4, D.5, D.6.

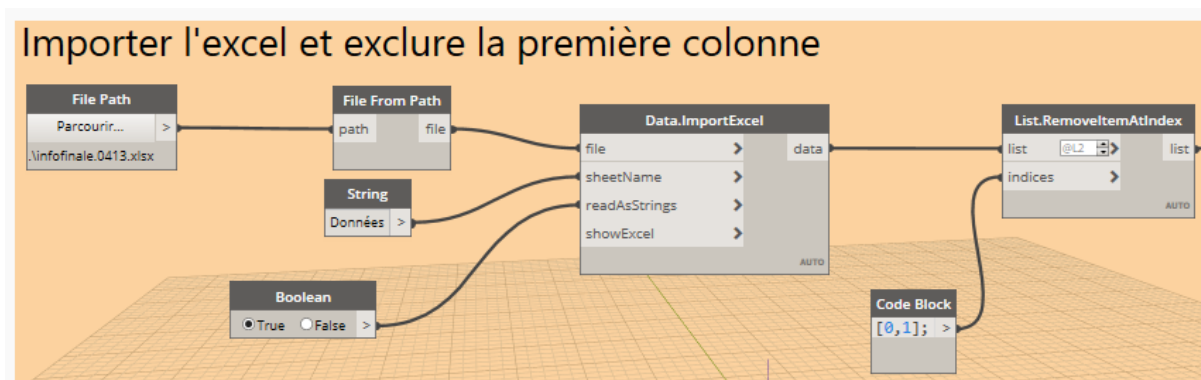


FIGURE D.2 – Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 1

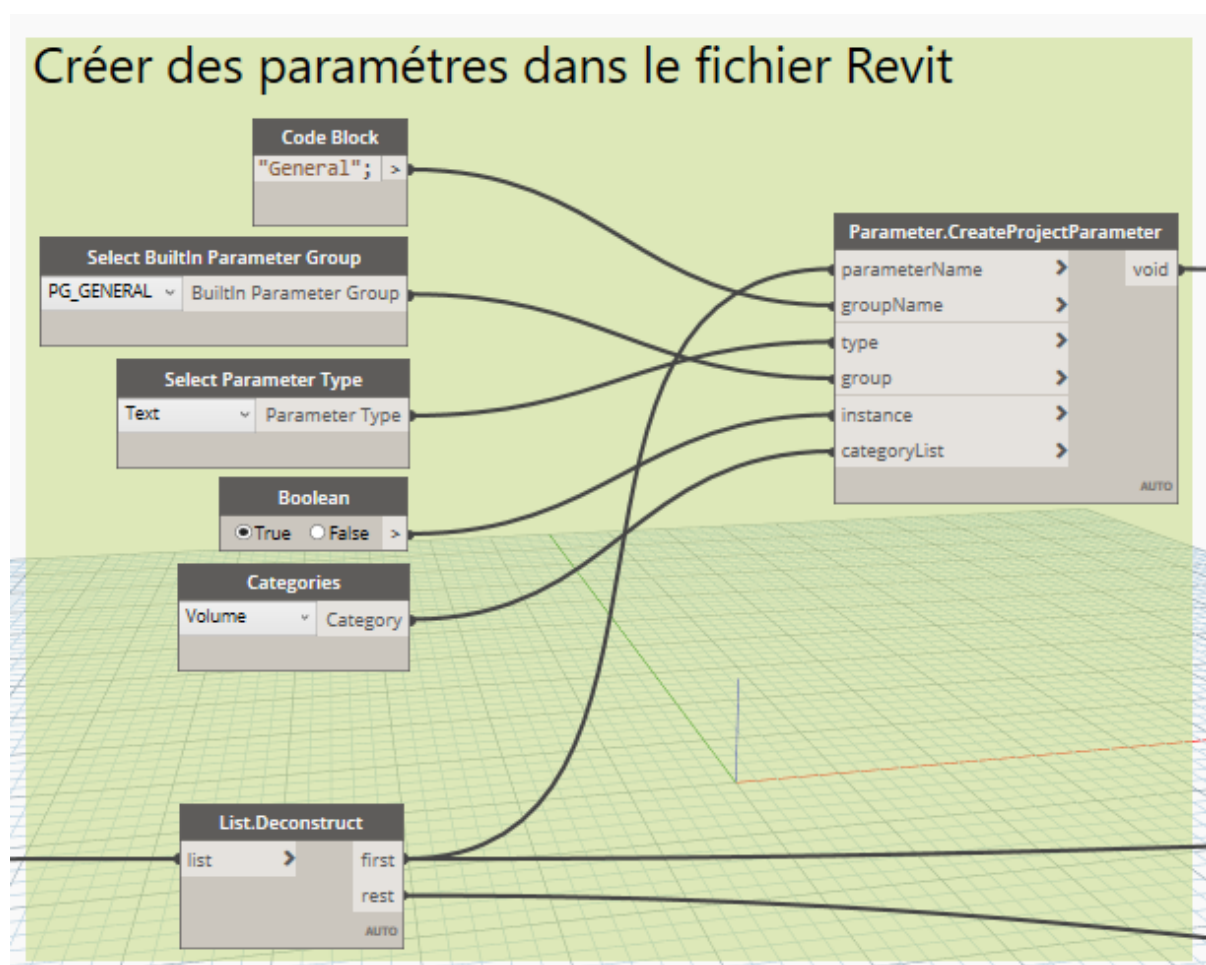


FIGURE D.3 – Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 2

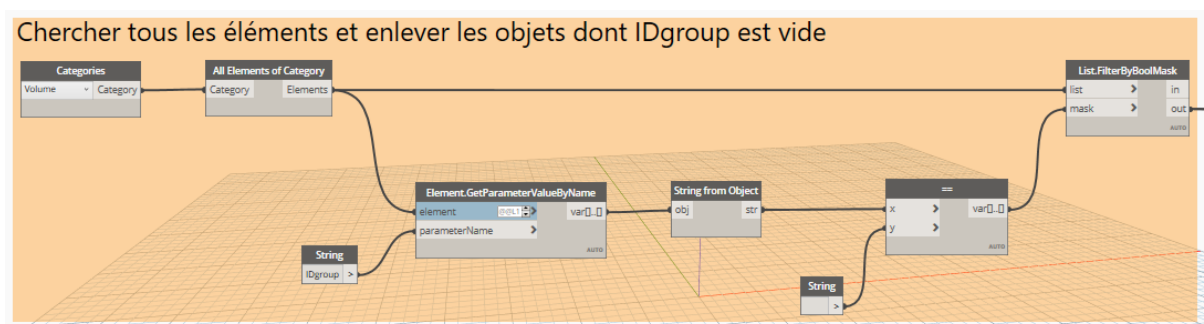


FIGURE D.4 – Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 3

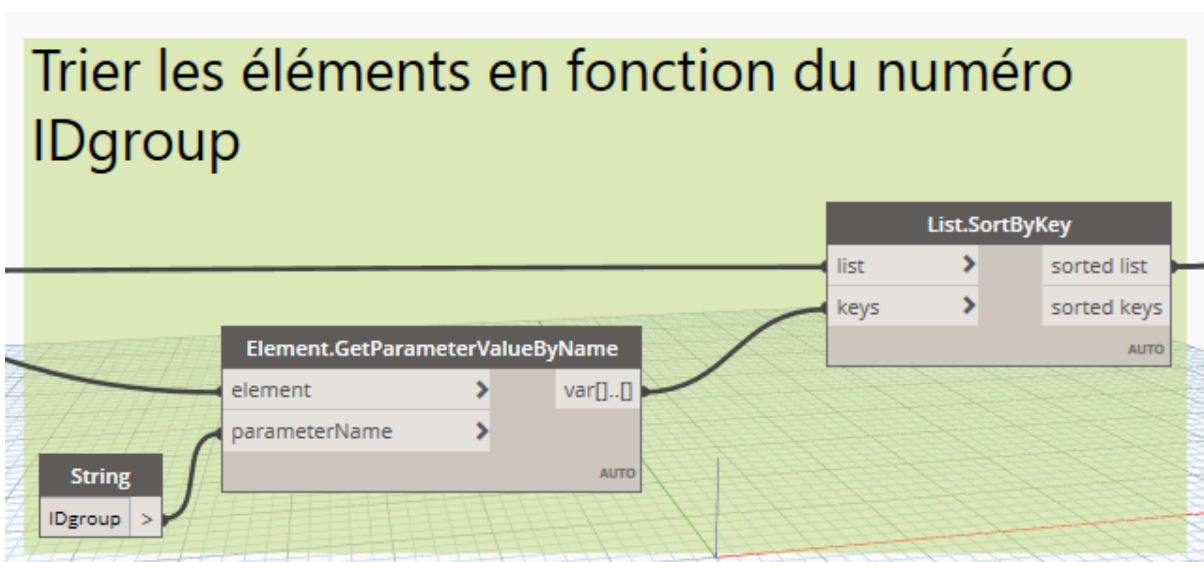


FIGURE D.5 – Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 4

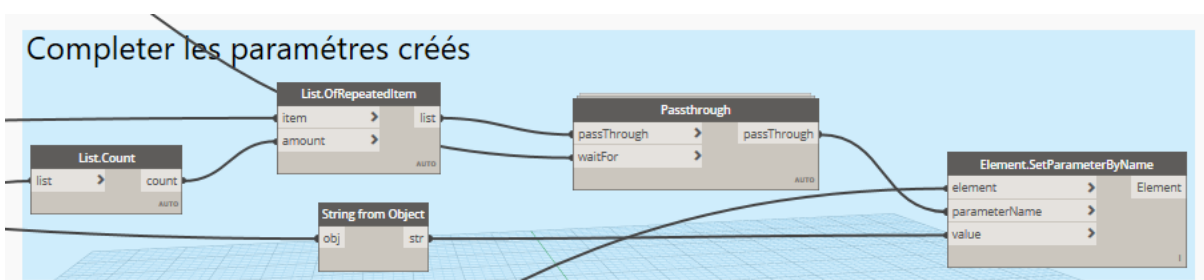


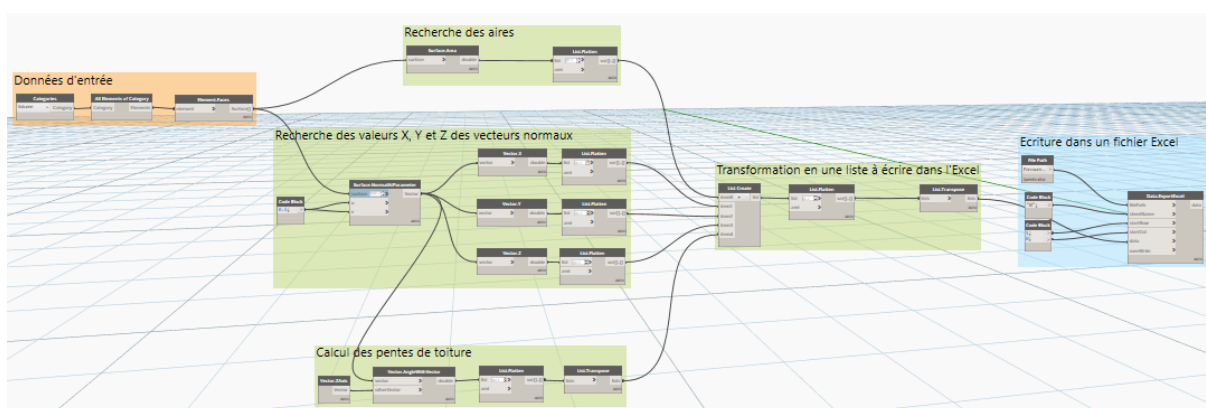
FIGURE D.6 – Code Dynamo pour intégrer les paramètres, fonction 5



## Annexe E

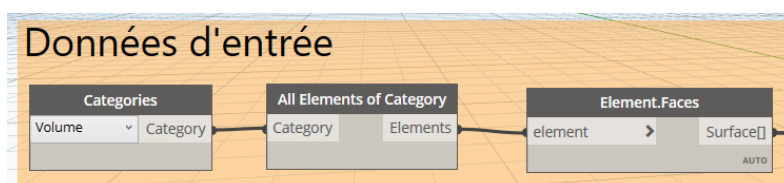
# Code Dynamo pour informer la maquette Revit

Le code Dynamo utilisé pour exporter les informations des toitures en fichier Excel, donne ceci en entier (figure E.1).



**FIGURE E.1** – Code dynamo pour exporter les informations des toitures en fichier Excel

Voici des zooms de chacune de ces parties pour améliorer la compréhension figures E.2, E.3, E.4, E.5.



**FIGURE E.2** – Code Dynamo pour information toiture (1)

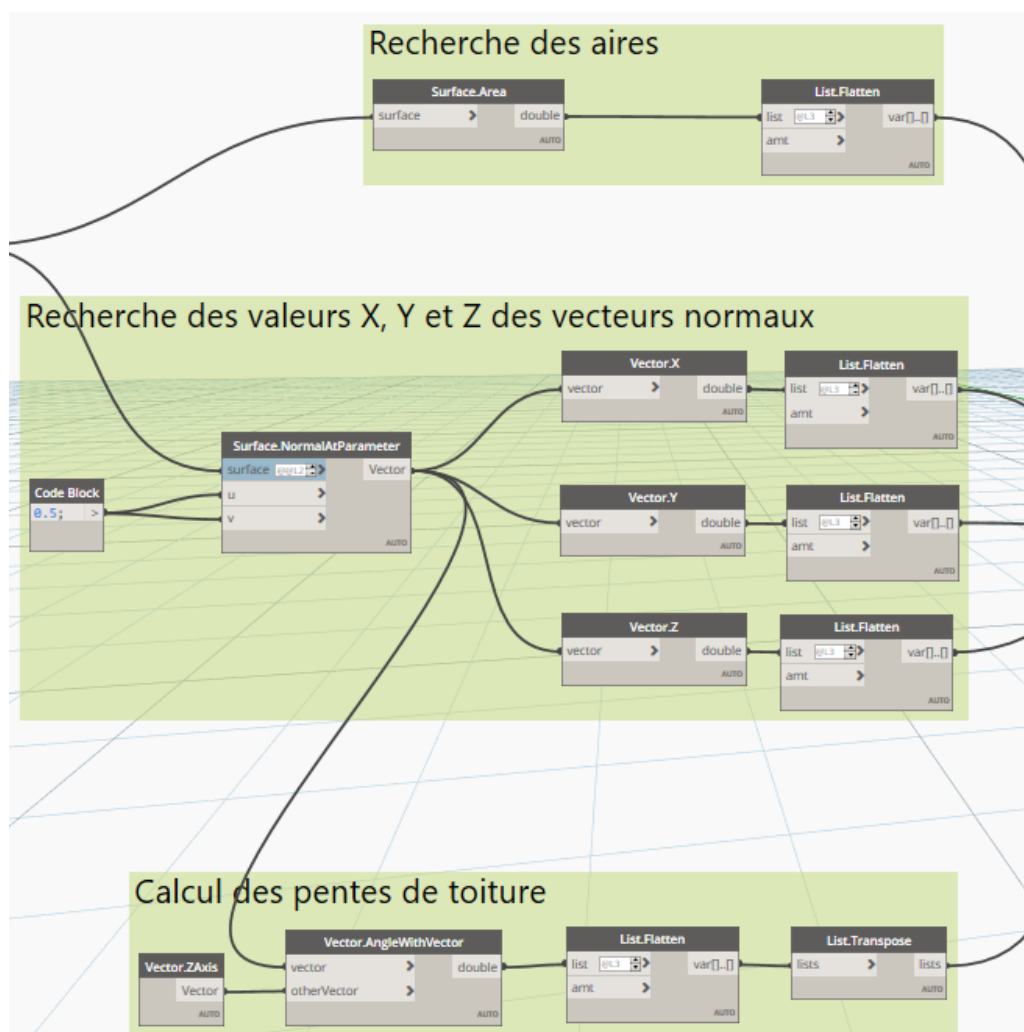


FIGURE E.3 – Code Dynamo pour information toiture (2)

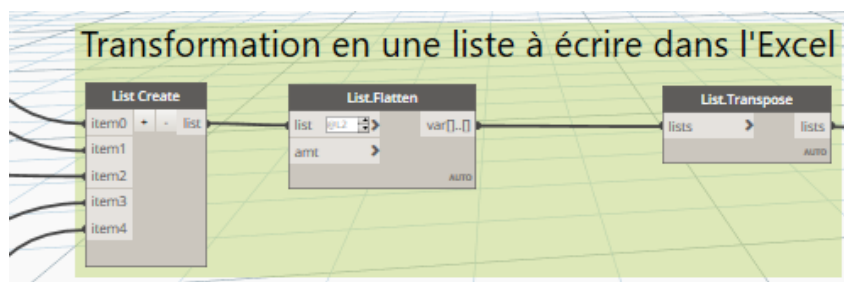


FIGURE E.4 – Code Dynamo pour information toiture (3)

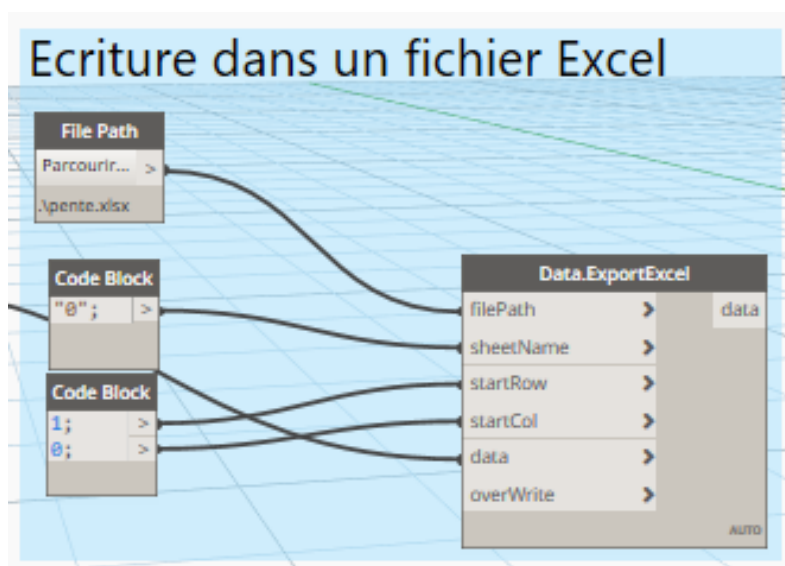


FIGURE E.5 – Code Dynamo pour information toiture (4)