

## Mémoire

**Auteur :** Gillen, Max

**Promoteur(s) :** Thomas, Sébastien; 2770

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables et bâtiments durables

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/14880>

---

*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.*

---

---

Faculté des Sciences

Département des Sciences et de Gestion de l'Environnement

Building Energy Monitoring & Simulation

(BEMS)

Faculté des Sciences,

de la Technologie et de la Médecine

Research Unit in Engineering Science

(RUES)

---

**Modélisation et simulation énergétique dynamique**  
**d'un micro-quartier avec optimisation du niveau**  
**d'autosuffisance**

**2021-2022**

présenté par **GILLEN Max**

en vue de l'obtention des diplômes de

**Master en Sciences et Gestion de l'Environnement - Finalité Énergies  
renouvelables et bâtiments durables (ULiège)**

**Master en Développement Durable - Finalité Énergie et Environnement (Uni.lu)**

*Composition du comité de lecture :*

*Promoteur : Sébastien Thomas*

*co-promoteur : Frank Scholzen*

*Lecteur(s) : Pauline Abrahams, Philippe André*

« Copyright »

---

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique\* de l'Université de Liège ainsi que de l'Université du Luxembourg»

« L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'ULiège ainsi que de l'Université du Luxembourg »

« Le présent document n'engage que son auteur. »

« Auteur du présent document : GILLEN Max, [xam.nellig@gmail.com](mailto:xam.nellig@gmail.com)»

## Abstract

Afin de promouvoir l'approvisionnement énergétique indépendant et l'autosuffisance des villages européens, cette étude vise à simuler un micro-quartier (MQ) du Grand-Duché de Luxembourg en termes d'approvisionnement et d'utilisation de l'énergie et ainsi tendre vers l'autonomie autant que possible. La production et la consommation de chaleur et d'électricité ont été couvertes. Pour atteindre cet objectif, plusieurs logiciels ont été comparés afin de choisir le plus approprié pour la tâche donnée. Ensuite, plusieurs scénarios ont été créés afin de les comparer en termes d'autosuffisance et de coût du cycle de vie respectifs. La partie discussion de ce travail a ensuite été dédiée de prendre une décision justifiée sur le scénario à mettre en œuvre.

## Remerciements

Avant tout développement sur ce mémoire, il me paraît opportun de commencer par des remerciements, à ceux qui m'ont supporté le plus pendant la réalisation de ce travail. Premièrement, je voudrais remercier mon maître de stage Ben Scheitler qui m'a non seulement laissé travailler sur mon mémoire quasiment chaque jour du stage que j'ai effectué, mais il m'était aussi très utile pour des conseils comme il a de l'expérience professionnelle dans le domaine des énergies renouvelables.

En outre, je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur soutien dans la réalisation de ce mémoire :

Ma famille, surtout mes parents, mon frère et ma grand-tante. En particulier, ma grand-tante qui m'a rassuré qu'elle est convaincu que je suis capable d'atteindre n'importe quel objectif que je me fixe, même si je doute beaucoup de moi-même. Ses mots m'ont rappelé de l'esprit de ma grand-mère qui n'a jamais douté de mes compétences et je dirais même que je suis devenu sentimental en y pensant.

Mon ami Luca Schreurs, qui peut être considéré comme personne extérieure qui bénéficie alors de plus de recul pour me donner des conseils sur la présentation de mes données, graphiques, résultats et interprétations.

Mon amie Nathalie Simonis qui a relu ce travail et n'a jamais hésité à donner un coup de main.

Mon promoteur principal Sébastien Thomas, qui m'a supporté en me rejoignant régulièrement par visioconférence pour me guider lors de mes recherches et lors de la rédaction du rapport de ce mémoire.

Pauline Abrahams, une assistante du Master en Sciences et Gestion de l'Environnement (MSGE) et encadrante qui franchit tous les obstacles pour aider ses étudiants. Son humilité, sa gentillesse, sa servabilité et tout simplement son attitude m'ont montré à quel point elle se préoccupe vraiment des personnes avec lesquelles elle travaille et franchement j'ai trouvé cela vraiment inspirant.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Remerciements</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>Liste des abréviations</b>                | <b>8</b>  |
| <b>Liste des figures</b>                     | <b>9</b>  |
| <b>Liste des tables</b>                      | <b>9</b>  |
| <b>Introduction</b>                          | <b>10</b> |
| <b>Contexte théorique des logiciels UBEM</b> | <b>11</b> |
| 2.1 Approches des outils UBEM                | 11        |
| 2.1.1 Approche de modélisation descendante   | 11        |
| 2.1.2 Approche de modélisation ascendante    | 12        |
| Basée sur la physique                        | 12        |
| Axée sur les données                         | 13        |
| Ordre réduit                                 | 14        |
| <b>Matériel et méthode</b>                   | <b>15</b> |
| 3.2 Matrice décisionnelle                    | 15        |
| Résultats & Discussion                       | 21        |
| 3.3 Législation                              | 22        |
| 3.4 flux de travail CEA                      | 23        |
| Création d'un scénario                       | 23        |
| Introduction                                 | 23        |
| Sélection de la zone                         | 24        |
| Choix du type de construction                | 25        |
| Sélection des données complémentaires        | 27        |
| Sélection des données météorologiques        | 27        |
| Sélection du site                            | 27        |
| Standards de construction                    | 28        |
| Adaptation de la base de donnée              | 29        |
| Synthèse des archéotypes                     | 32        |
| 3.5 Validation des données de sortie         | 33        |
| Modèle TRNSYS                                | 36        |
| 3.6 Description des scénarios                | 41        |
| Scénario 1                                   | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| Coûts accumulés   | 47        |
| Scénario 2  | 48        |
| Coûts d'enlèvement des anciennes technologies                         | 50        |
| Coûts des panneaux PV   | 50        |
| Coûts des rénovations   | 51        |
| Coûts des PAC air/eau   | 52        |
| Recettes annuelles  | 55        |
| Coûts accumulés   | 55        |
| Scénario 3  | 57        |
| Coûts des panneaux PVT  | 58        |
| Recettes annuelles  | 59        |
| Coûts accumulés   | 59        |
| <b>Résultats</b>  | <b>61</b> |
| <b>Discussion</b>   | <b>63</b> |
| Revue du logiciel CEA   | 63        |
| Revue des scénarios   | 64        |
| Généralités   | 64        |
| Discussion des résultats du cas d'étude                               | 65        |
| <b>Références</b>   | <b>67</b> |
| 5.1 Références des sources d'informations                             | 67        |
| 5.2 Références des sites internet des logiciels                       | 73        |
| 5.3 Documents de référence pour la création de la matrice décisionnel | 73        |
| 5.3.1 Documents de description des logiciels                          | 73        |
| 5.3.2 Documents comparatifs des logiciels                             | 74        |
| <b>Annexes</b>  | <b>75</b> |
| Annexe 1: Tables des valeurs U  | 75        |
| Annexe 2: Tables de CEA   | 77        |
| Annexe 3: Table de consommation énergétique du scénario 1             | 80        |
| Annexe 4: Analyse technico-économique du scénario 1                   | 81        |
| Annexe 5: Production & consommation énergétique du scénario 2         | 82        |
| Annexe 6: Analyse technico-économique du scénario 2                   | 83        |

Annexe 7: Consommations restantes du scénario 3 84

Annexe 8: Analyse technico-économique du scénario 3 85

*mots clés: Micro-quartier, Autonomie, Simulation, Chauffage, Electricité*

## Liste des abréviations

|         |   |
|---------|---|
| MQ      | Micro-Quartier  |
| QEP     | Quartier à Énergie Positif  |
| CCV     | Coût de Cycle de Vie  |
| STD     | Simulation Thermique Dynamique                                      |
| UBEM    | Urban Building Energy Modeling                                      |
| SIG     | Système d'information géographique                                  |
| IA      | Intelligence artificielle   |
| ML      | Machine Learning  |
| CEA     | City Energy Analyst   |
| DIMOSIM | District Modeller and Simulator                                     |
| MDT     | Microgrid Design Toolkit  |
| PV      | Photovoltaïque  |
| EV      | Electric Vehicles   |
| CAD     | Computer Assisted Design  |
| MSGE    | Master en Sciences et Gestion de l'Environnement                    |
| UE      | Union Européenne  |
| NZEB    | Nearly Zero Energy Building   |
| DPEB    | D directive européenne sur la Performance Énergétique des Bâtiments |
| OSM     | Open Street Maps  |
| HVAC    | Heating, Ventilation & Air Conditioning system                      |
| ECS     | Eau Chaude Sanitaire  |
| PAC     | Pompe à chaleur   |
| PCI     | Pouvoir Calorifique Inférieur                                       |
| TAS(e)  | Taux d'autosuffisance électrique                                    |
| TAS(c)  | Taux d'autosuffisance thermique                                     |
| TAS     | Taux d'autosuffisance énergétique                                   |
| COP     | Coefficient Of Performance  |
| SPF     | Seasonal Performance Factor   |

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| TAC | Taux d'autoconsommation  |
| PVT | Photovoltaïque Thermique |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Exemple d'un modèle de l'approche de simulation descendante basée sur la physique ( <a href="#">Umi</a> ) | 13 |
| Figure 2: Exemple d'un modèle de l'approche de simulation descendante d'ordre réduit ( <a href="#">CEA</a> )        | 15 |
| Figure 3: Création de scénario  | 23 |
| Figure 4: Zone Helper   | 24 |
| Figure 5: Ancienne photo de la Héiltzerstrooss (route de Holtz)   | 25 |
| Figure 6: Vue aérienne du village (estimation: 1955)  | 26 |
| Figure 7: Vue aérienne du village 2010  | 26 |
| Figure 8: Sélection du site   | 28 |
| Figure 9: Site du cas d'étude   | 29 |
| Figure 10: Comparaison d'irradiation solaire par surface (valeurs horaires) des logiciels                           | 33 |
| Figure 11: Simulation du bâtiment B1015 sur TRNSYS Simulation Studio  | 37 |
| Figure 12: Orientation du bâtiment B1015  | 37 |
| Figure 13: Angle azimutal du bâtiment B1015 [43]  | 38 |
| Figure 14: Mesures du site internet géoportail.lu   | 38 |
| Figure 15: Création de la zone  | 39 |
| Figure 16: Demande de chaleur pour chauffage du bâtiment B1015 sur TRNSYS   | 40 |
| Figure 17: Demande de chaleur pour chauffage du bâtiment B1015 sur TRNSYS (valeurs mensuels)                        | 40 |
| Figure 18: Surface occupée des hangars du bâtiment B1055  | 43 |
| Figure 19 : Consommation d'énergie finale Scénario 1  | 45 |
| Figure 20: Consommation d'énergie finale Scénario 2   | 48 |
| Figure 21: Potentiel PV pour le quartier (mensuel)  | 49 |
| Figure 22: Code pour automatiser une tâche répétitive en Excel en langue VisualBasic Assistant                      | 54 |
| Figure 23: Potentiel PV & ST  | 57 |
| Figure 24: CCV comparatif des scénarios 1 & 2   | 62 |
| Figure 25: TAS en relation avec CCV   | 65 |

## Liste des tables

|   |    |
|---|----|
| Table 1: Matrice décisionnelle  | 19 |
| Table 2: Standard de construction suisse  | 29 |
| Table 3: Standard de construction luxembourgeoise   | 29 |
| Table 4: Enveloppes des bâtiments   | 29 |
| Table 5: HVAC   | 30 |
| Table 6: Technologies de production de chaleur  | 31 |
| Table 7: Description des standards de construction  | 32 |
| Table 8: Valeurs de consommation d'électricité mesurées du bâtiment B1015                 | 34 |
| Table 9: Moyenne de consommation d'électricité du bâtiment B1015                          | 35 |
| Table 10: Valeurs de consommation de chaleur mesurées du bâtiment B1015                   | 35 |
| Table 11: Moyenne de consommation de chaleur du bâtiment B1015                            | 36 |
| Table 12: Comparaison des valeurs de consommation énergétique des logiciels de simulation | 41 |
| Table 13: Résumé des estimations du bâtiment B1055  | 43 |
| Table 14: Evolution des prix unitaires respectives au Luxembourg                          | 44 |
| Table 15: Synthèse des valeurs économiques du Scénario 1                                  | 47 |
| Table 16: Technologies de production de chaleur Scénario 2                                | 48 |
| Table 17: Résumé des estimations des panneaux PV  | 51 |
| Table 18: Table simplifiée des calculs effectués sur base horaire - Scénario 2            | 54 |
| Table 19: Synthèse des valeurs économiques du Scénario 2                                  | 56 |
| Table 20: Table simplifiée des calculs effectués sur base horaire - Scénario 3            | 58 |
| Table 21: Synthèse des valeurs économiques du Scénario 3                                  | 61 |
| Table 22: Synthèse des résultats  | 63 |

## 1. Introduction

Ce travail s'efforce d'ajouter aux recherches déjà consenties pour rendre les MQ (micro-quartiers) capables de répondre à leurs propres besoins de chauffage et d'électricité de la manière la plus écologique possible, afin de les rendre plus indépendants des fournisseurs d'énergie. Un micro-quartier est défini comme un ensemble d'îlots, ou un îlot remarquable par sa surface ou son usage (ex. : parc de la confluence), et son environnement immédiat selon l'Association Ivry Confluences Citoyen [1] bien qu'un quartier soit défini comme division administrative d'une ville par le dictionnaire Larousse [2]. Pourtant, ces micro-quartiers (MQ) ainsi que les quartiers à énergie positive (QEP) ont gagné de l'attention publique dans les années précédentes vu qu'ils peuvent jouer un rôle essentiel dans la transition énergétique [3] [4], particulièrement pour combattre la pression environnementale que l'urbanisation crée [5]. Plus précisément, on cherche alors à lancer une simulation qui permet d'optimiser un MQ en particulier en termes de taux d'autosuffisance énergétique, qui est défini comme l'énergie totale produite sur le site d'étude divisée par la consommation totale d'énergie pour le chauffage (des locaux + ECS) et l'électricité. Ce taux est calculé avec des valeurs énergétiques annuelles, principalement parce que toutes les saisons ont un impact très différent sur cette variable et que le temps reste beaucoup plus constant d'une année à l'autre. En 2017, la part d'énergie renouvelable de la consommation d'énergie électrique du Luxembourg s'est élevée à seulement 6,4% [6] et celle de la Belgique à 18% [7]. Ces chiffres montrent qu'il existe une marge de progression en termes de transition énergétique des pays européens.

En premier lieu, il convient alors de rechercher un logiciel apte à faire des simulations d'un MQ avec l'objectif de le rendre le plus autonome en termes de chauffage et d'électricité dans la mesure où cela est économiquement raisonnable. Pour atteindre cet objectif, une matrice décisionnelle a été mise en place afin de comparer les logiciels qui ont une chance raisonnable de convenir à cet usage.

On a alors dû fixer quelques suppositions essentielles pour simuler un cas d'étude plus spécifique, dont le site d'étude était la plus pertinente. Le village à choisir comme source d'inspiration pour le site de simulation pourrait alors être n'importe quel village avec un nombre raisonnable de bâtiments afin de pouvoir encore faire des ajustements individuels si nécessaire. C'est donc un village du Grand-Duché de Luxembourg qui a été choisi. Plus précisément, un village appelé Petit-Nobressart. Comme ce village ne compte que 60 bâtiments et qu'il est suffisamment éloigné des villages voisins pour ne pas être influencé par eux en termes d'ombrage ou de transferts de chaleur, il répondait à toutes les exigences du choix du site.

Dans un premier temps, on cherche à lancer une simulation réaliste de Petit-Nobressart. Il s'agit alors du scénario 1. Les autres scénarios permettent de voir les potentiels d'amélioration en termes d'autosuffisance énergétique et ils vont être élaborés ultérieurement. Il s'agit ici alors d'une recherche prospective où les développements futurs des différents scénarios ont été comparés. À ce stade, il semble également opportun de mentionner que tous les scénarios ont été comparés en termes de coût du cycle de vie (CCV) au moyen de bilans économiques, car il va de soi que dans le monde réel, plus on dépense d'argent, plus on peut augmenter l'autonomie et donc cette étude doit également intégrer les coûts des solutions apportées afin d'apporter des conclusions utiles. De plus, il est évident que de nombreuses estimations ont dû être réalisées afin de construire ces scénarios, on a alors travaillé avec une méthode inductive pour cette partie du travail.

Ledit logiciel, qui est utilisé pour lancer ces simulations, est choisi par l'élaboration d'une matrice décisionnelle, qui a été construite après quelques explications des démarches des logiciels de simulation.

## 2. Contexte théorique des logiciels UBEM

### 2.1 *Approches des outils UBEM*

Afin de réaliser une simulation thermique dynamique (STD) d'un ensemble des bâtiments, il existe quelques approches avec des différences en termes de niveau de détail. Une STD qui s'applique à un quartier entier est aussi appelé Urban Building Energy Modeling (UBEM) et cette simulation doit être complémentée par une simulation électrique afin de permettre une optimisation d'autosuffisance aussi bien du côté thermique que du côté électrique.

#### 2.1.1 *Approche de modélisation descendante*

L'approche descendante est fournie par les données d'entrées, comme la consommation énergétique d'un district, pour diviser ces valeurs totales raisonnablement et les attribuer aux bâtiments du district qui sont classifiés par leur type d'utilisation.

Comme les modèles descendants utilisent des données historiques à long terme pour estimer la consommation d'énergie, il faut toujours garder en tête qu'il s'agit d'une généralisation des conditions existantes [8] et donc cette approche ne serait pas optimale pour étudier les avancées technologiques spécifiques dans les politiques énergétiques [9]. En outre, ces modèles ne peuvent pas fournir une représentation précise et détaillée de la consommation énergétique des bâtiments individuels [10]. Généralement, cette approche peut être utilisée pour prédire la consommation d'énergie à long terme des parcs de logements et modélise

l'impact de différents scénarios et politiques d'énergie ainsi que d'émissions présentant un rapport entre les coûts et le bénéfice social [11].

### 2.1.2 Approche de modélisation ascendante

Par contre, l'approche ascendante commence par la simulation d'un ou de quelques bâtiments pour après appliquer ces principes sur une échelle plus large.

Cette approche peut être subdivisé comme suit:

- ❖ Basée sur la physique
- ❖ Axée sur les données
- ❖ modèles d'ordre réduit

#### Basée sur la physique

L'approche basée sur la physique repose sur des données quantitatives de la physique du bâtiment. Les données requises pour cette méthode comprennent des données du climat, des données géométriques des bâtiments et des données non géométriques de ceux-ci. Les données du climat peuvent être extraites d'une base de données météorologique comme Météonorm. La géométrie et l'orientation des bâtiments est typiquement modélisée avec une base de données des systèmes d'information géographique (SIG). Finalement, cette approche a besoin des données non géométriques comme les propriétés thermiques (valeurs U) des éléments du bâtiment (murs, fenêtres, toit, plancher, portes), les températures internes ou externes, les modèles de systèmes de chauffage, les taux de ventilation, le nombre d'appareils, le facteur d'occupation, les horaires et les charges internes [11] [10]. Ce modèle nécessite plusieurs hypothèses pour déterminer le comportement des occupants, ayant un impact significatif sur la consommation d'énergie du bâtiment [8] et une quantité importante de données techniques pour calculer la consommation d'énergie. Quelques exemples des logiciels se prêtant à cette approche sont [CityBES](#), [CitySim](#) et [Umi](#).

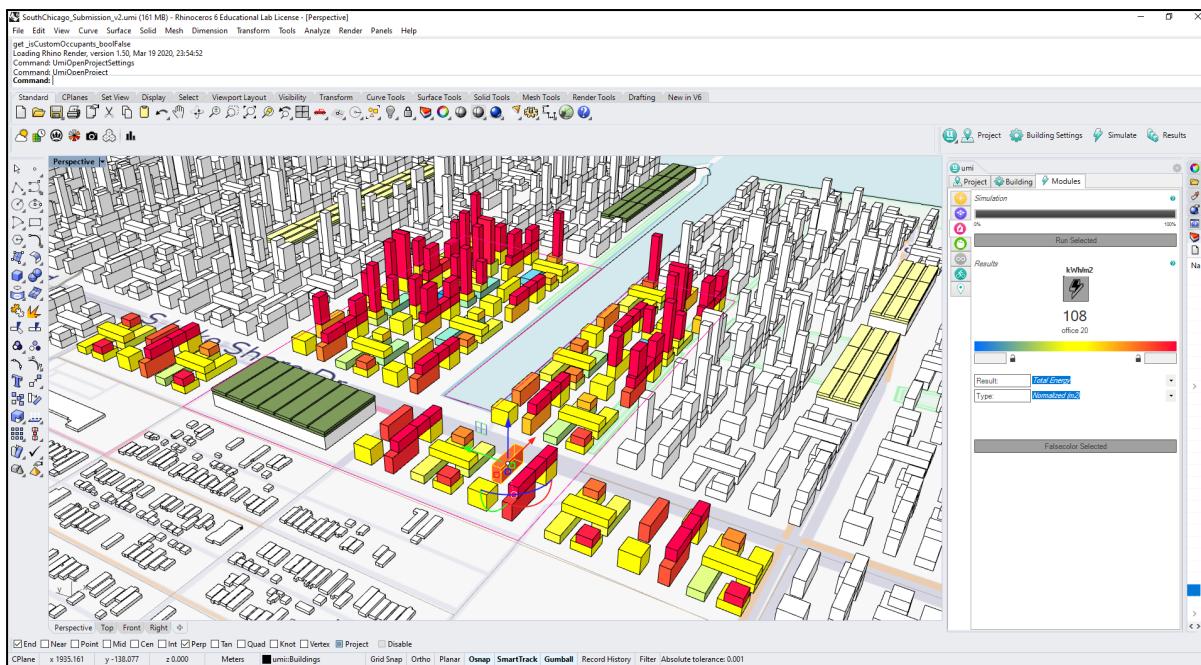


Figure 1: Exemple d'un modèle de l'approche de simulation descendante basée sur la physique ([Umi](#))

Le code couleur de la figure 1 va du jaune au rouge, indiquant une valeur de plus en plus élevée de la consommation d'énergie totale (annuel) par surface brute de plancher.

Un désavantage considérable de cette approche est notamment le manque de disponibilité d'informations physiques et techniques détaillées sur les bâtiments [11]. Un autre inconvénient serait qu'une validation des résultats par des données mesurées est fortement recommandée à cause des nombreuses hypothèses influençant la précision des résultats. Néanmoins, il s'agit de l'approche la plus populaire dans le domaine de la modélisation énergétique des bâtiments avec entre 400 et 600 publications par an entre 2017 et 2020 [11], partiellement due au fait que cette approche renonce aux données historiques détaillées sur la consommation d'énergie [12].

### Axée sur les données

En ce qui concerne la modélisation basée sur les données, celle-ci comprend des approches statistiques et d'intelligence artificielle (IA) [13].

L'approche statistique fait appel à des méthodes de régression comme la régression linéaire pour déterminer les modèles mathématiques inverses correspondant à la conception du bâtiment ou aux données des paramètres opérationnels. Ces modèles régressent la consommation énergétique totale du bâtiment en fonction des paramètres ou même des combinaisons de paramètres qui influencent la consommation d'énergie [8].

Une approche d'intelligence artificielle est principalement basée sur des techniques d'apprentissage automatique ou «Machine Learning» (ML) qui modélise la consommation d'énergie des bâtiments urbains en apprenant automatiquement les modèles de données. Le modèle apprend et s'entraîne avec l'ensemble des données historiques pour trouver l'association mathématique entre la consommation d'énergie des bâtiments et les facteurs influents tels que les caractéristiques du bâtiment, les propriétés urbaines et les caractéristiques d'occupation. Les désavantages principaux de cette méthode sont qu'elle nécessite un ordinateur de haute performance pour lancer les calculs et comme l'approche descendante, elle est dépendante des données historiques de consommation d'énergie des bâtiments. Par contre, même si cette méthode travaille avec des données historiques, elle nécessite seulement des données de facturation et des informations d'enquête simples pour fournir des résultats prometteurs.

### Ordre réduit

Une version simplifiée, qui combine les deux approches mentionnées précédemment, permet d'éviter les problèmes courants de disponibilité des données ainsi que la puissance de calcul et le temps nécessaires pour effectuer ces simulations. Les inconvénients sont que des moyennes de grandeurs physiques ont dû être prises et donc cette simplification s'accompagne d'une réduction de la précision des résultats. Il est également recommandé de valider et de calibrer le modèle plusieurs fois avant qu'il ne puisse produire des résultats satisfaisants.

Bien que l'approche de modélisation d'ordre réduit ascendant ne soit pas populaire dans le domaine de la modélisation énergétique urbaine, sa mise en œuvre gagne du terrain car elle combine les avantages des deux approches (basée sur la physique ainsi que axée sur les données).

Pour ces raisons, [CEA](#) et [TEASER](#) ont été développés en se prêtant cette méthode particulière.

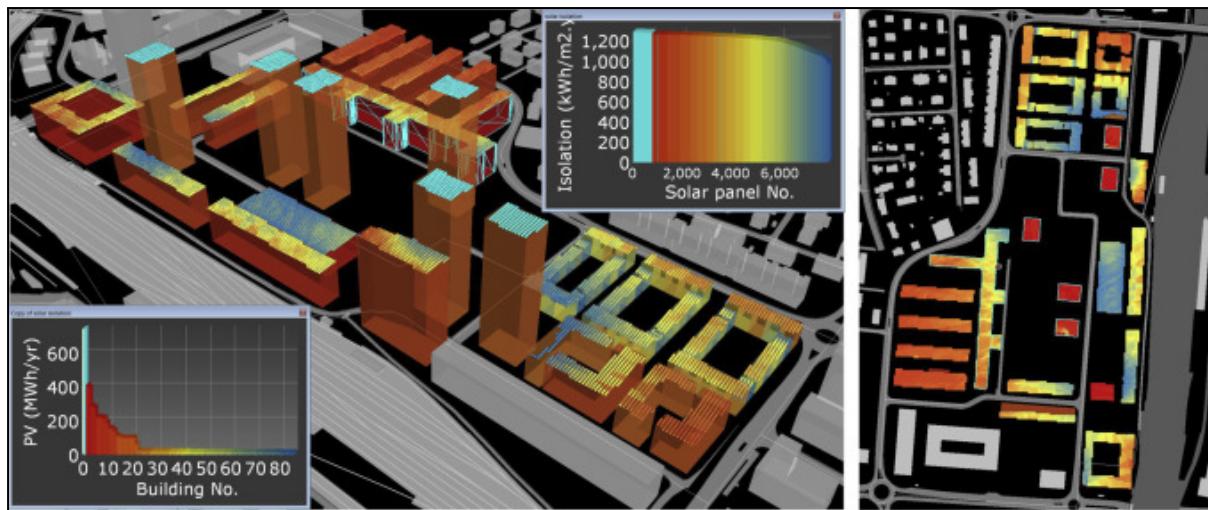


Figure 2: Exemple d'un modèle de l'approche de simulation descendante d'ordre réduit ([CEA](#)) ([Jimeno A. Fonseca et al.](#))

### 3. Matériel et méthode

#### 3.2 Matrice décisionnelle

Afin de faire un choix pertinent du logiciel qui aura les meilleurs prérequis pour atteindre l'objectif de ce travail, une matrice décisionnelle (cf. Table 1) a été établie. Parmi les logiciels qui font partie de cette liste, on retrouve:

8 logiciels d'Urban Building Energy Modelling (UBEM):

- Dimosim

- City Energy Analyst ([CEA](#)) (plug-in pour ArcGIS)

- Massive Urban Energy Building Simulations ([MUBES](#))
- Ubem.io ([umi](#) plug-in pour Rhino3d)

- TrnLizard (plug-in pour Rhino3d)


- Smart-E

- [CityBES](#)

**CityBES**

- [CitySim](#)



et 3 logiciels de simulation du réseau électrique des micro-quartiers [17]

- [Homer pro](#)



- [Enersquid](#)



- Microgrid Design Toolkit ([MDT](#))



Le résultat de la matrice décisionnelle va alors prendre le choix du logiciel qui a les meilleurs prérequis pour répondre aux besoins spécifiques du cas d'étude au niveau des capacités du logiciel. Une pondération est alors réalisée et expliquée ci-dessous.

Afin de simuler un district avec un maximum d'autosuffisance énergétique, il convient de posséder la capacité de modéliser des installations PV avec le logiciel choisi, vu qu'il s'agit d'une source d'énergie renouvelable avec le moindre coût d'énergie électrique [15]. La pondération choisie est de 2. La technologie des éoliennes est une autre énergie renouvelable qui dispose d'un rendement plus élevé [16]. Elle se distingue de la technologie des panneaux PV du point de vue technico-économique et de faisabilité, mais vu que le vent et le rayonnement solaire sont tous les deux des éléments d'une disponibilité variable, le même poids a été fixé pour cette énergie renouvelable.

Les véhicules électriques (Electric Vehicles: EVs) sont une bonne indication du niveau de détail que l'outil de simulation est capable de réaliser, mais vu qu'ils peuvent aussi être simulés assez facilement par une charge électrique supplémentaire, la pondération a été fixée à 1.

Le stockage d'énergie électrique doit être considéré avec le même degré de pertinence que les technologies de production d'énergie renouvelable, car sans une façon de stocker l'énergie produit localement, on est forcé soit de l'exploiter directement soit de l'injecter sur le réseau électrique et cette injection conduit forcément à une baisse du taux d'autoconsommation considérable à cause de l'inadéquation entre la production et la consommation; en d'autres termes, le soleil brille pendant la journée mais le EV est typiquement chargé pendant la nuit [17]. De plus, il s'agit d'une technologie avec une demande croissante car les énergies renouvelables dépendent principalement de la météo qui est variable et ne correspond pas toujours à la demande d'énergie électrique. Si on cherche à remplacer les sources d'énergie fossile avec les sources d'énergie renouvelable à long terme, on doit forcément stocker cette énergie pour combler le fossé entre la production et la consommation.

Le stockage d'énergie thermique est alors considéré avec la même pondération, car les aspects thermiques et électriques ont le même niveau d'importance pour ce travail vu qu'on recherche à atteindre un taux d'autosuffisance énergétique maximale.

Les logiciels des micro quartiers ne peuvent pas effectuer des simulations de chauffage en régime dynamique ni en statique, mais ils peuvent prendre en compte des besoins en chauffage. Vu qu'ils ne négligent pas entièrement l'aspect thermique, ils reçoivent 1 point pour cette capacité. Par contre, les logiciels d'UBEM sont capables de générer des simulations de chauffage en régime dynamique. Le niveau de détail de ces simulations dynamiques est très élevé, mais le logiciel CEA présente un manque de modèles détaillés des réseaux de chauffage et d'électricité ainsi que des simulations multizones [18]. Vu que chaque logiciel d'UBEM est quand même apte à réaliser des simulations de chauffage en dynamique, on a attribué 2 points pour cette capacité particulière.

En ce qui concerne les réseaux de chaleur, ceux-ci sont les plus utiles dans les zones à forte densité de population [19]. Étant donné qu'un réseau de chaleur en soi peut seulement apporter un impact positif considérable à l'environnement en fonction de la source d'énergie utilisée [19], la chaleur résiduelle des usines voisines serait une source d'énergie idéale. Par conséquent, la pondération a été fixée à seulement 1 point.

Dimosim, CEA, MUBES et CityBES sont capables de travailler avec des données de GIS (Geographic Information System) et de générer des simulations de chauffage en régime dynamique. Umi ne fonctionne pas encore avec des données SIG mais les développeurs sont en train de l'incorporer et dans la documentation de TRNLizard, Smart-E et CitySim, la

compatibilité avec SIG n'est pas mentionnée. Une pondération de 2 a été attribuée à cette capacité en particulier, parce que cette fonctionnalité aide considérablement en termes d'orientation des bâtiments par rapport au soleil et à la prise en compte des environnements et leur influence sur le site d'étude comme par exemple l'ombrage.

Finalement, la convivialité rentre dans le calcul avec une pondération de 3 parce qu'elle a un impact énorme sur la facilité d'extraire des résultats fiables et compréhensibles. De plus, elle est un indicateur clé de la sophistication du logiciel.

| Logiciel  | PV<br>(poids:2) | Éoliennes<br>(poids:2) | EV<br>(poids:1) | ECS<br>(poids: 2) | PAC<br>(poids: 1) | stockage<br>d'énergie<br>électrique<br>(poids:2) | stockage<br>d'énergie<br>thermique<br>(poids:2) | simulation de<br>réseau de<br>chauffage<br>(poids:2) | SIG<br>compatibilité<br>(poids: 1) | convivialité<br>(poids:3) | Score | Prix |
|---|-----------------|------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|--|---|--|------------------------------------|---------------------------|-------|------|
| DimoSim   | 1               | 0                      | 1               | 1                 | 1                 | 1  | 1   | 2  | 1                                  | 1                         | 0     | 17   |
| City Energy Analyst                               | 1               | 0                      | 1               | 1                 | 1                 | 0  | 1   | 2  | 1                                  | 1                         | 1     | 18   |
| Massive Urban Building Energy Simulations (MUBES) | 0               | 0                      | 0               | 1                 | 0                 | 0  | 0   | 2  | 1                                  | 1                         | 1     | 12   |
| Rhino3d + umi plug-in + district energy plug-in   | 1               | 1                      | 0               | 1                 | 1                 | 1  | 0   | 2  | 0                                  | 0                         | 1     | 16   |
| Rhino3d + TRNLizard + Ladybug Plug-ins            | 1               | 0                      | 0               | 0                 | 0                 | 0  | 0   | 2  | 0                                  | 0                         | 0     | 6    |
| Smart-E   | 1               | 0                      | 1               | 1                 | 0                 | 0  | 0   | 2  | 0                                  | 0                         | 1     | 12   |
| CityBES   | 1               | 0                      | 0               | 1                 | 0                 | 0  | 0   | 2  | 0                                  | 1                         | 1     | 13   |
| CitySim   | 1               | 1                      | 0               | 1                 | 1                 | 0  | 0   | 2  | 0                                  | 0                         | 1     | 14   |
| Honer pro   | 1               | 1                      | 1               | 0                 | 0                 | 1  | 0   | 1  | 0                                  | 0                         | 1     | 12   |
| Enersquid   | 1               | 1                      | 0               | 0                 | 0                 | 1  | 1   | 0  | 0                                  | 0                         | 1     | 12   |
| Microgrid Design Toolkit (MDT)                    | 1               | 1                      | 0               | 0                 | 0                 | 1  | 0   | 1  | 0                                  | 0                         | 1     | 11   |

Table 1: Matrice décisionnelle

Pour faciliter l'orientation du lecteur de la matrice décisionnelle, les couleurs vertes et rouges ont été utilisées respectivement pour indiquer un oui (1 ou 2 points) ou non (0 points). Si une information spécifique n'a pas pu être trouvée, ce paramètre est considéré comme étant manquant. La gamme des points ne dépasse souvent pas 1, car la plupart des critères sont soit satisfaits soit non. Seul l'aspect de simulation de chauffage permet une gamme de niveau de détail suffisamment large pour attribuer plus qu'un point. Donc, un point a été attribué s'il était possible de définir au moins une charge thermique comme valeur d'entrée et 2 points ont été attribués si le logiciel était apte à lancer des simulations de chauffage en régime dynamique.

Ce qui n'est pas rentré dans la matrice décisionnel, mais apporte quand même des informations pertinentes est le niveau de détail des calculs effectués par le logiciel, ce qui peut être jugé par le pas de temps. Ici, la documentation des logiciels ne précise la plage de manipulation de ce paramètre que pour Dimosim, Ladybug et Homer pro. Dans ce cas, le pas de temps peut être paramétré entre 1 minute et quelques heures. Par contre, Enersquid, Umi, CitySim et CEA fonctionnent avec un pas de temps horaire par défaut. Cependant, Smart-E marche avec un pas de temps de 10 minutes et CityBES avec un pas de temps de 5 minutes. La documentation des logiciels restants n'étaient malheureusement pas assez transparente pour préciser un pas de temps.

En ce qui concerne la communauté d'utilisateurs, la taille de celle-ci dépend largement de l'intérêt concret d'utilisation, car chaque outil d'UBEM dispose de ses propres points forts.

Pour l'instant, la plupart des logiciels d'UBEM sont encore dans un état précoce de développement. Dimosim peut seulement être téléchargé en contactant directement les développeurs et MUBES peut seulement être manipulé en travaillant avec la langue de programmation Python, ce qui limite la gamme des utilisateurs capable d'utiliser ce logiciel. Umi n'est pas un logiciel indépendant, mais fonctionne en relation avec Rhino3d, un logiciel de Design Assisté par Ordinateur ("Computer Assisted Design" ou CAD). TRNLizard, qui est également un plug-in pour Rhino3d et Enersquid, existe exclusivement en ligne ce qui conduit à une baisse des exécutions des simulations dans un laps de temps [\[20\]](#).

Par contre, l'abondance des informations disponibles pour le logiciel CEA indique qu'il s'agit d'un logiciel d'UBEM qui a déjà fait ses preuves. En outre, Homer pro est le logiciel des simulations des microgrids qui a été recommandé le plus souvent dans un forum en particulier du site des chercheurs scientifiques ResearchGate, ce qui indique une certaine réputation du logiciel.

## Résultats & Discussion

Une analyse de la matrice décisionnelle nous montre que presque tous les logiciels disposent de la fonctionnalité des PVs, ce qui n'est pas surprenant vu qu'il s'agit d'un élément de base dans le domaine des outils de simulation des quartiers.

Par contre, la fonctionnalité des éoliennes n'était pas supportée de quelques logiciels comme City Energy Analyst, ce qui est probablement due au fait qu'en réalité, une éolienne doit être éloignée du dernier bâtiment d'un village ou d'une ville de quelques centaines de mètres pour des raisons de sécurité. Pour les illustrer à l'aide d'un exemple, il convient de se référer à des plaques de glace qui peuvent être propulsées dans l'air sur des centaines de mètres, ce qui est un risque qui se pose surtout en hiver. Cette information a été recueillie par un travailleur du parc éolien de Sterpenich lors d'une visite éolienne, dans le cadre de la formation du Master en Science et Gestion de l'Environnement (MSG). Cependant, pour chaque pays de l'UE, il existe une distance minimale à respecter. Au Luxembourg, cette distance a été limitée à 300 mètres par l'article 11.3. de la loi ITM.SST 1840-2 de 2012 [21], sachant que des conditions plus contraignantes peuvent toujours être imposées par une autre autorité compétente, rendant encore plus rare la vue d'éoliennes dans les environnements urbains ce qui pourrait expliquer pourquoi les développeurs des logiciels comme CEA n'ont pas perçu la fonctionnalité des éoliennes comme essentielle.

La fonctionnalité de lancer des simulations thermiques dynamiques n'était pas supportée par des logiciels de simulation des microgrids, même si ces logiciels ont été capables de remplir la plupart des autres conditions du tableau.

En ce qui concerne le critère de convivialité, il s'agit d'un point assez subjectif et donc il convient d'être bien justifié. Le logiciel DIMOSIM n'a pas satisfait ce critère, car il n'est plus disponible en téléchargement. La combinaison du logiciel Rhino3d avec les plug-ins TRNLizard et Ladybug est une combinaison qui nécessite de l'expérience avec ce logiciel CAD, de connaître la langue de programmation visuelle Grasshopper et de travailler avec TRNSYS. De plus, TRNLizard comme plug-in ne dispose pas d'une large communauté d'utilisateurs ce qui oblige à contacter directement les développeurs en cas de problèmes.

Le rôle du prix du logiciel a été considéré à l'extérieur de la matrice décisionnelle car cet aspect mérite d'être traité par rapport au score donné. On peut alors constater que le score le plus haut a été atteint du logiciel CEA, ce qui veut dire que ce logiciel semble être le plus approprié pour répondre aux besoins spécifiques de ce travail. De plus, il est téléchargeable gratuitement, comme la plupart des logiciels considérés. La décision peut alors être prise, que ce logiciel sera utilisé pour la STD et la simulation électrique d'un quartier avec optimisation d'autosuffisance.

### 3.3 Législation

Avant de commencer à simuler, il est important de connaître les normes de construction qui s'appliquent au site étudié. Par conséquent, cette section traite de la législation en ce qui concerne ces normes de construction.

Au Luxembourg, la loi impose alors que chaque bâtiment d'habitation existant ou en construction qui est à louer ou à vendre sera accompagné d'un passeport énergétique, un label de qualité qui indique et détaille la performance énergétique du bâtiment en question [22]. Un bâtiment d'habitation est défini par une utilisation de moins de 90% de la surface de référence énergétique à des fins d'habitation. Ici, la gamme des notes va de A à I en ordre décroissant de performance.

Le passeport se compose de 3 catégories:

1. performance énergétique (besoin en énergie primaire)
2. classe d'isolation thermique (besoin en chaleur de chauffage)
3. classe de performance environnementale (émissions de  $CO_2$ )

Ce passeport est valable pour 10 ans. Après cette période, un nouveau passeport énergétique doit être créé sous la condition que le bâtiment soit loué ou vendu. Par contre, l'approche qui s'applique aux bâtiments fonctionnels se distingue en quelques aspects de celle des bâtiments d'habitation. Ici, la catégorie de bâtiments (exemples: hôtels, restaurants, hôpitaux, etc.) doit être indiquée pour faciliter les comparaisons des bâtiments fonctionnels [23]. En fait, le règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments [23] était une source des valeurs U indispensable pour les tâches effectuées sous la section 2.4 CEA workflow.

Dès le 31 décembre 2020, chaque bâtiment nouvellement construit dans l'Union Européenne (UE) doit obligatoirement satisfaire les conditions de la certification Nearly Zero Energy Building (NZEB) selon la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) [24]. Le terme NZEB est défini de manière légèrement différente par tous les États membres de l'UE [25], mais globalement il s'agit des bâtiments avec des performances énergétiques très élevées et le montant d'énergie requis doit être couvert d'une partie significative des énergies renouvelables.

En règle générale, le NZEB correspond aux conditions à satisfaire pour entrer dans la classe énergétique AAA [22].

### 3.4 flux de travail CEA

#### *Création d'un scénario*

##### Introduction

Etant donné que le logiciel City Energy Analyst (CEA) n'est disponible qu'en anglais, toutes les figures ci-après sont en anglais. En ouvrant le logiciel CEA, on peut soit ouvrir un projet existant, soit en démarrer un nouveau (cf. Figure 3). Après avoir démarré un nouveau projet, il faut créer un premier scénario avec une quantité minimale de données d'entrée. Selon cette logique, on peut créer un deuxième scénario comparatif très facilement puisqu'il suffit d'ajuster des paramètres spécifiques sans avoir à refaire le travail précédent. La quantité minimale de données à saisir est la sélection de la base de données, où l'on peut choisir entre le suisse, le singapourien ou une version modifiée de l'un ou l'autre, ainsi que les outils de gestion de données suivants : Zone, Environs, Rues, Terrain et Météo.

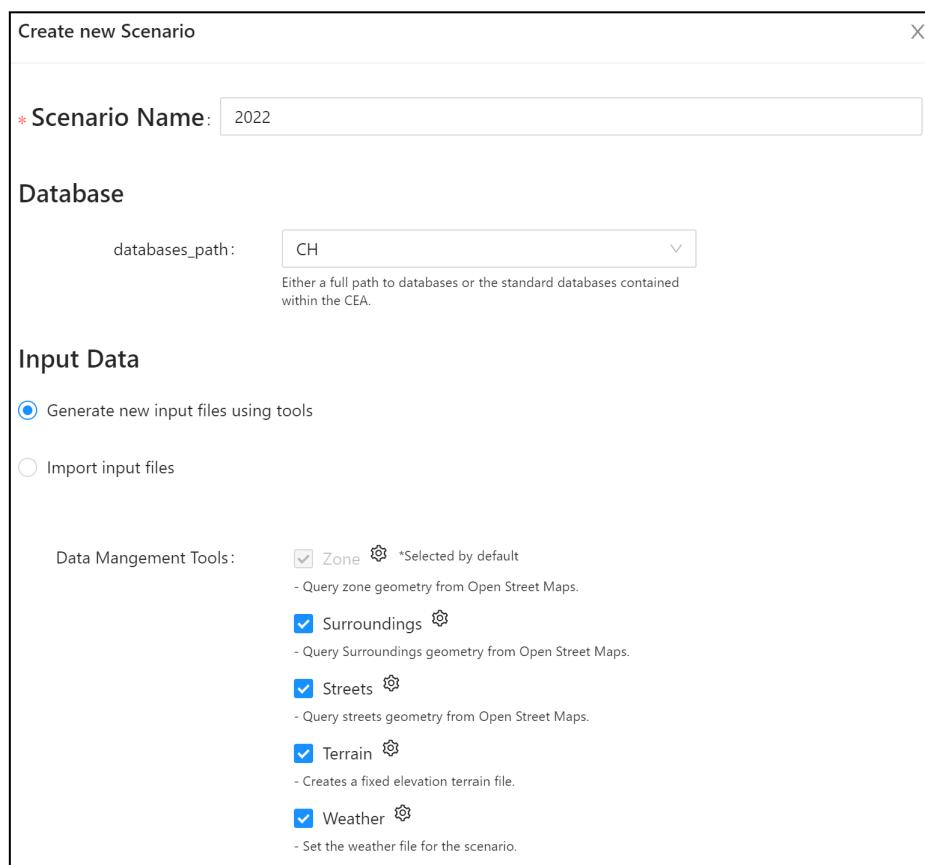


Figure 3: Création de scénarios

## Sélection de la zone

En ce qui concerne la zone (cf. Figure 4), il faut introduire des valeurs moyennes sur la hauteur des bâtiments et le nombre d'étages au-dessus et au-dessous du sol, ainsi que l'année de construction et le type d'occupation. Ces informations s'appliquent à tous les bâtiments de la zone d'étude.

Il est vrai qu'après on peut ajuster ces valeurs individuellement, donc on peut laisser Open Street Maps (OSM) s'occuper d'estimer ces valeurs a priori afin d'y revenir après pour faire quelques précisions.

**default**

**Zone helper** - Query zone geometry from Open Street Maps

|  |  |   |
|--|--|---|
| height-ag:   | <input type="text"/>   | Average height of buildings within the zone (in meters). Leave it blank to obtain from Open Street Maps (less accurate).                |
| floors-ag:   | <input type="text"/>   | Average number of floors above ground of all buildings within the zone. Leave it blank to obtain from Open Street Maps (less accurate). |
| year-construction:   | <input type="text"/>   | Average year of construction of buildings within the zone. Leave it blank to obtain from Open Street Maps (less accurate).              |
| height-bg:   | <input type="text" value="3"/>   | Average height of buildings below ground (in meters).   |
| floors-bg:   | <input type="text" value="1"/>   | Average number of floors below ground of all buildings within the zone.   |
| occupancy-type:  | <input style="width: 200px; border: 1px solid #ccc; padding: 2px; margin-bottom: 5px;" type="text" value="Get it from open street maps"/> Predominant occupancy type of all buildings. Use "Get it from open street maps" to obtain from Open Street Maps (less accurate). |   |
| <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Load default settings"/> <input style="background-color: #0070C0; color: white; border: none; padding: 2px 10px;" type="button" value="Save &amp; Close"/> |  |   |

Figure 4: Zone Helper

## Choix du type de construction

L'année de construction ainsi que le type d'occupation sont choisis afin de classer les bâtiments dans des catégories auxquelles des caractéristiques prédéfinies de la base de données sont attribuées. Bien que ces informations puissent être modifiées ultérieurement pour chaque bâtiment, il est recommandé de faire des choix judicieux ici aussi, car même si le nombre de bâtiments est seulement de 60, on souhaite limiter au maximum les modifications individuelles.

Afin de déterminer alors l'âge des bâtiments, beaucoup d'estimations ont dû être faites. Une grande aide pour ces estimations étaient les photos du livre «La commune d'Ell dans les anciens temps - Édition 1: Petit-Nobressart» de Romain Gaspar qui réside à Petit-Nobressart [\[26\]](#).

Dans la figure 5 on peut voir quelques résidences faisant partie des bâtiments les plus anciens du village.



Figure 5: Ancienne photo de la Héiltzerstrooss (route de Holtz)

Les figures 6&7 étaient d'un intérêt particulier, car ici on a pu faire une comparaison des bâtiments qui existaient déjà avant 1955 et qui persistent encore aujourd'hui. Forcément, toutes les autres constructions ne peuvent alors pas être estimées à avoir été bâties avant 1955.

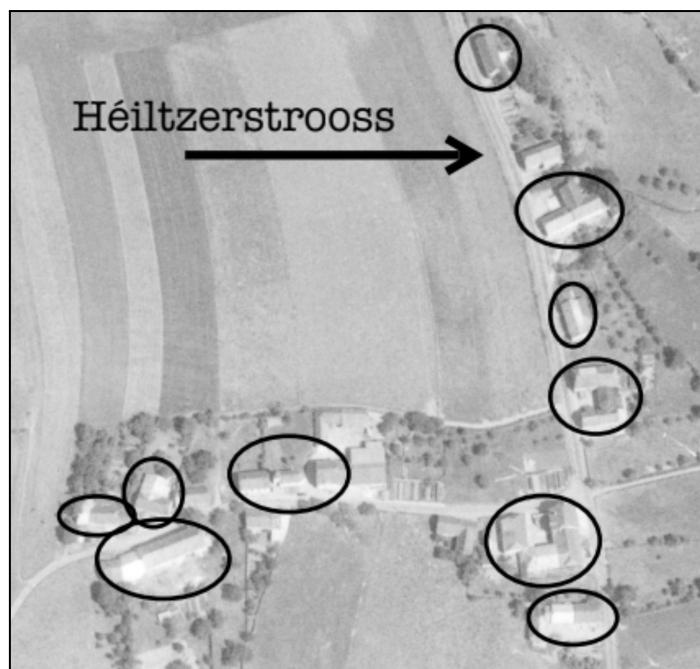


Figure 6: Vue aérienne du village (estimation: 1955)



Figure 7: Vue aérienne du village 2010

## Sélection des données complémentaires

Les cases Environs, Rues et Terrain doivent également être cochées dans la figure 3. Elles sont non seulement responsables de la modélisation des bâtiments à l'extérieur de la zone d'étude, projetant des ombres sur les bâtiments à l'intérieur de la zone d'étude, influençant ainsi ces derniers en termes de gains solaires et de potentiel PV, mais aussi de la modélisation des rues dans la zone d'étude et de l'élévation du site d'étude.

## Sélection des données météorologiques

Les fichiers météo qui existent au sein du CEA ne s'appliquent qu'à la Suisse et à Singapour. Il faut donc télécharger les fichiers météo d'une station météorologique située au Luxembourg. Sur le site de Meteonorm, on peut le télécharger, mais pour cela il faut une licence qui est gratuite seulement pour les étudiants. Sur le site Climate.OneBuilding.Org [27], ces données sont téléchargeables gratuitement pour tout le monde. Ici, il s'agit d'un fichier du format EnergyPlus Weather file (.epw) qui se base sur des données météorologiques moyennes de la période de 2004 à 2018. Afin de rendre l'ensemble de ce travail reproductible, la version gratuite a été choisie pour le reste de cette étude.

## Sélection du site

Lorsqu'il s'agit de la sélection du site (cf. Figure 8), CEA travaille avec les données SIG d'OpenStreetMap. Ici, il existe deux options pour créer ledit quartier :

- ❖ Modéliser un district entièrement nouveau quelque part au Luxembourg à l'aide de QGIS (logiciel de SIG) et importer ce fichier dans CEA.
- ❖ Prendre une commune déjà existante au Luxembourg et laisser CEA créer tous les bâtiments à partir des données SIG.

Il va sans dire que cette dernière option est beaucoup plus judicieuse dans ce cas, car elle est beaucoup plus efficace en termes de temps, les bâtiments existent dans la vie réelle et sont donc sûrs d'être conçus et dimensionnés de manière réaliste, et CEA attribue déjà des profils d'usage aux bâtiments en fonction de leur forme et de leurs dimensions. Ce dernier argument implique également déjà que certaines de ces attributions ne sont pas représentatives de la réalité puisque n'importe quel bâtiment d'une taille plus large pourrait être un gymnase, une école ou un bureau. Pour les besoins de cette étude, ces attributions doivent être modifiées manuellement pour correspondre aux types réels de bâtiments. De cette façon, on peut comparer les résultats de sortie aux valeurs historiques documentées.

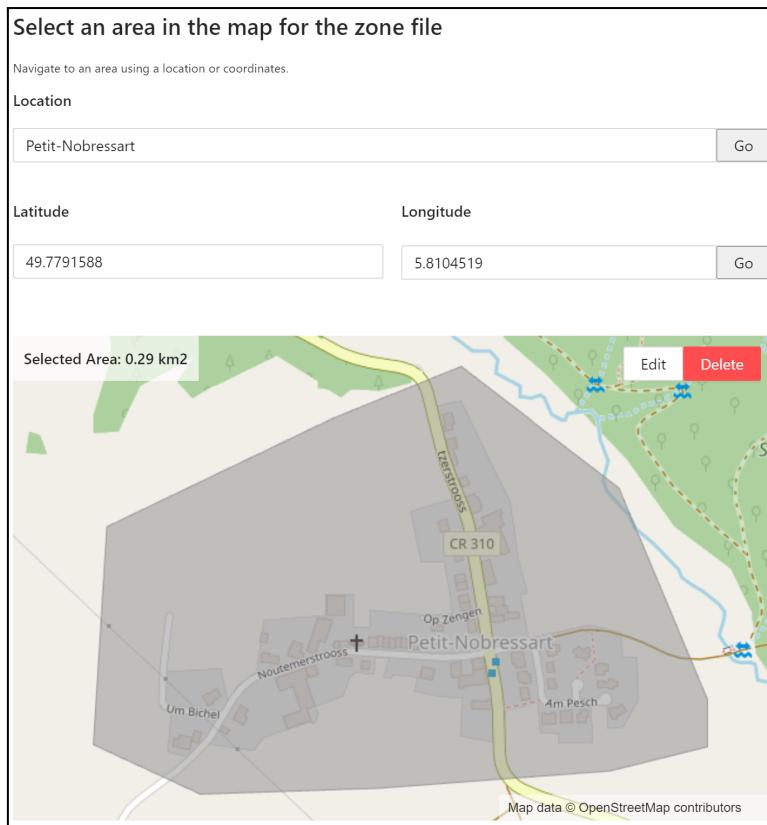


Figure 8: Sélection du site

### Standards de construction

Une fois ces informations saisies, le scénario peut être créé et un modèle 3D se construit automatiquement (cf. Figure 9). Les polygones représentent les bâtiments du site d'étude et le nom que le logiciel leur attribue commence toujours comme suit: «B100x» où la valeur du dernier nombre «x» change en fonction du bâtiment spécifique choisi. De plus, CEA suppose automatiquement les valeurs U des fenêtres, des murs, du plancher et du toit ainsi que les horaires d'occupation, l'étanchéité à l'air, etc. sur la base des archétypes de bâtiments. Ces archétypes proviennent d'une base de données suisse et, comme la Suisse ne fait pas partie de l'UE, les directives européennes fixant les exigences minimales des valeurs U ne s'appliquent pas à cette base de données, qui doit donc être adaptée par conséquence. Afin de réaliser cette adaptation pour arriver à une base de donnée plus représentative des standards de construction historique de l'UE et surtout du Luxembourg car les valeurs U sont imposées au niveau national, toutes les valeurs U ont été adaptées avec la table fournie par [28] bien que la table de la source [23] qui consistent essentiellement des valeurs types des valeurs U en fonction de l'âge de construction. La modification de cette base de donnée se limite au besoin du cas d'étude, donc quelques paramètres qui ne vont pas rentrer dans les simulations effectuées n'ont pas été modifiés comme par exemple les émissions  $CO_2$  lors des cycles de vie des matériaux de construction.

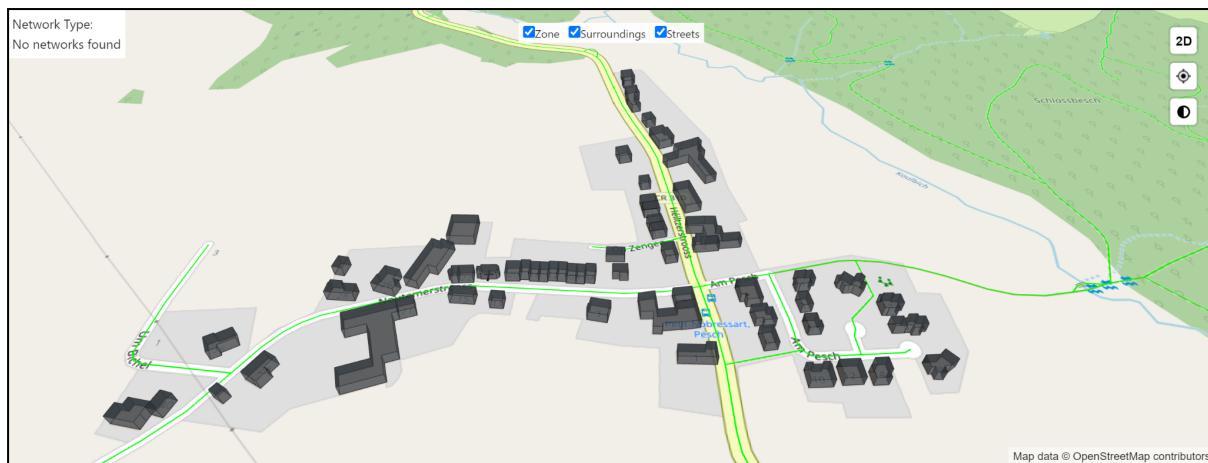


Figure 9: Site du cas d'étude

### *Adaptation de la base de donnée*

Premièrement, afin d'adapter la base de données, la table 2 a dû être modifiée pour construire ce qu'on peut voir à la table 3. Ici, une catégorisation plus fine a été nécessaire afin de pouvoir intégrer les valeurs U provenant d'un tableau avec des périodes de construction plus courtes.

|   | STANDARD  | Description  | YEAR_START | YEAR_END |
|---|-----------|--|------------|----------|
| 1 | STANDARD1 | Stone and Masonry from 1000's to 1920's                        | 1000       | 1920     |
| 2 | STANDARD2 | Concrete and Masonry from 1920's to 1970's                     | 1921       | 1970     |
| 3 | STANDARD3 | Concrete and Masonry from 1970's to 1980's                     | 1971       | 1980     |
| 4 | STANDARD4 | Concrete and Masonry from 1980's to 2000's                     | 1981       | 2000     |
| 5 | STANDARD5 | Concrete and Masonry from 2000's to 2020's                     | 2000       | 2040     |
| 6 | STANDARD6 | Concrete and Masonry from 2000's to 2020's - Minergie Standard | 2000       | 2040     |

Table 2: Standard de construction suisse

|    | STANDARD   | Description                            | YEAR_START | YEAR_END |
|----|------------|--|------------|----------|
| 1  | STANDARD1  | Stone and Masonry from 1000's to 1918  | 1000       | 1918     |
| 2  | STANDARD2  | Concrete and Masonry from 1919 to 1945 | 1919       | 1945     |
| 3  | STANDARD3  | Concrete and Masonry from 1946 to 1960 | 1946       | 1960     |
| 4  | STANDARD4  | Concrete and Masonry from 1961 to 1970 | 1961       | 1970     |
| 5  | STANDARD5  | Concrete and Masonry from 1971 to 1980 | 1971       | 1980     |
| 6  | STANDARD6  | Concrete and Masonry from 1981 to 1990 | 1981       | 1990     |
| 7  | STANDARD7  | Concrete and Masonry from 1991 to 2000 | 1991       | 2000     |
| 8  | STANDARD8  | Concrete and Masonry from 2001 to 2010 | 2001       | 2010     |
| 9  | STANDARD9  | Concrete and Masonry from 2011 to 2020 | 2011       | 2020     |
| 10 | STANDARD10 | Concrete and Masonry from 2020 to 2022 | 2021       | 2022     |

Table 3: Standard de construction luxembourgeoise

|    | STANDARD   | type_cons        | type_leak     | type_win   | type_roof | type_part | type_wall | type_floor | type_base | type_shade  | Es   | Hs_ag |
|----|------------|------------------|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------|------|-------|
| 1  | STANDARD1  | CONSTRUCTION_AS3 | TIGHTNESS_AS3 | WINDOW_AS1 | ROOF_AS8  | WALL_AS7  | WALL_AS9  | FLOOR_AS1  | FLOOR_AS4 | SHADING_AS2 | 0.82 | 0.82  |
| 2  | STANDARD2  | CONSTRUCTION_AS2 | TIGHTNESS_AS3 | WINDOW_AS2 | ROOF_AS9  | WALL_AS7  | WALL_AS10 | FLOOR_AS1  | FLOOR_AS4 | SHADING_AS2 | 0.82 | 0.82  |
| 3  | STANDARD3  | CONSTRUCTION_AS2 | TIGHTNESS_AS3 | WINDOW_AS2 | ROOF_AS10 | WALL_AS7  | WALL_AS11 | FLOOR_AS1  | FLOOR_AS4 | SHADING_AS2 | 0.82 | 0.82  |
| 4  | STANDARD4  | CONSTRUCTION_AS2 | TIGHTNESS_AS3 | WINDOW_AS3 | ROOF_AS11 | WALL_AS7  | WALL_AS12 | FLOOR_AS1  | FLOOR_AS4 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |
| 5  | STANDARD5  | CONSTRUCTION_AS2 | TIGHTNESS_AS2 | WINDOW_AS3 | ROOF_AS12 | WALL_AS7  | WALL_AS13 | FLOOR_AS3  | FLOOR_AS6 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |
| 6  | STANDARD6  | CONSTRUCTION_AS3 | TIGHTNESS_AS1 | WINDOW_AS3 | ROOF_AS13 | WALL_AS7  | WALL_AS14 | FLOOR_AS3  | FLOOR_AS6 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |
| 7  | STANDARD7  | CONSTRUCTION_AS3 | TIGHTNESS_AS1 | WINDOW_AS4 | ROOF_AS14 | WALL_AS7  | WALL_AS15 | FLOOR_AS3  | FLOOR_AS6 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |
| 8  | STANDARD8  | CONSTRUCTION_AS3 | TIGHTNESS_AS1 | WINDOW_AS5 | ROOF_AS15 | WALL_AS7  | WALL_AS16 | FLOOR_AS3  | FLOOR_AS6 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |
| 9  | STANDARD9  | CONSTRUCTION_AS3 | TIGHTNESS_AS1 | WINDOW_AS6 | ROOF_AS16 | WALL_AS7  | WALL_AS17 | FLOOR_AS3  | FLOOR_AS6 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |
| 10 | STANDARD10 | CONSTRUCTION_AS3 | TIGHTNESS_AS0 | WINDOW_AS6 | ROOF_AS16 | WALL_AS7  | WALL_AS17 | FLOOR_AS3  | FLOOR_AS6 | SHADING_AS1 | 0.82 | 0.82  |

Table 4: Enveloppes des bâtiments

Ensuite, la table des enveloppes des bâtiments a dû être modifiée selon les nouveaux standards. Ici, on a dû faire quelques suppositions dans les tableaux individuels dont la table 4 fait référence. La table d'inertie de la construction spécifie la capacité thermique par surface climatisée ( $C_m \cdot A_f$ ) exprimé en  $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ . Ce facteur a toujours été élevé à cause du béton qui peut être considéré comme une large masse thermique [29]. Même aujourd'hui le béton est utilisé lors des nouvelles constructions. Vu que la base de données suisse a supposé la pesanteur de construction de 1920 à 1980 comme moyennement lourde, cette logique a aussi été appliquée à la version modifiée de cette base de données. En fait, l'ossature poteau-poutre en béton armé a largement remplacé la maçonnerie traditionnelle en moellons enduits autour de cette période de temps ce qui pourrait expliquer la logique appliquée [30]. Les exigences minimales de l'étanchéité à l'air ont aussi changé aux cours du temps. La valeur  $n_{50}$  provient d'un test d'étanchéité à l'air à 50 Pascal de différence de pression [31] et elle est exprimée en  $h^{-1}$ . Il existe aussi des bâtiments non rénovés âgés de plus de 100 ans qui ne peuvent même pas atteindre 50 Pascals [32]. Ce facteur peut seulement être attribué aux archétypes des époques avec beaucoup d'incertitudes, mais aussi avec une grande influence à la performance énergétique du bâtiment. Ici, on a quand même supposé que même les bâtiments les plus vieux peuvent atteindre une étanchéité à l'air de  $3 h^{-1}$ , ce qui est classé comme «moyennement étanche» dans la base de données suisse, car la base de donnée suisse n'a jamais surpassé cette valeur pour les archétypes suisse et il existe des mesures documentées qui prouvent que même les bâtiments de plus que 100 ans peuvent atteindre des taux de renouvellement d'air en-dessous de  $5 h^{-1}$  [33]. Ces valeurs peuvent être retrouvées sur la table d'étanchéité à l'air (cf. annexe 1,5). Les valeurs U historiques ont aussi été attribuées aux standards de construction appropriés dans les tables correspondant. Ces valeurs proviennent principalement du livre des perspectives énergétiques du Luxembourg 2010-2070 [28] [23]. Dans ces tables de CEA, quelques informations n'ont pas dû être changées vu qu'il s'agissait de paramètres génériques qui sont applicables aussi en dehors de la Suisse comme l'ombrage des stores.

|    | STANDARD   | type_hs          | type_cs          | type_dhw          | type_ctrl           | type_vent            | heat_starts | heat_ends | cool_starts | cool_ends |
|----|------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 1  | STANDARD1  | HVAC_HEATING_AS1 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 2  | STANDARD2  | HVAC_HEATING_AS1 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 3  | STANDARD3  | HVAC_HEATING_AS1 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 4  | STANDARD4  | HVAC_HEATING_AS1 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 5  | STANDARD5  | HVAC_HEATING_AS2 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 6  | STANDARD6  | HVAC_HEATING_AS2 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 7  | STANDARD7  | HVAC_HEATING_AS2 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS1 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 8  | STANDARD8  | HVAC_HEATING_AS2 | HVAC_COOLING_AS0 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS2 | HVAC_VENTILATION_AS0 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 9  | STANDARD9  | HVAC_HEATING_AS4 | HVAC_COOLING_AS3 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS2 | HVAC_VENTILATION_AS1 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |
| 10 | STANDARD10 | HVAC_HEATING_AS4 | HVAC_COOLING_AS3 | HVAC_HOTWATER_AS1 | HVAC_CONTROLLER_AS3 | HVAC_VENTILATION_AS2 | 16 09       | 14 05     | 15 05       | 15 09     |

Table 5: HVAC

Une autre table principale qui collecte beaucoup des données des tables filles est la table 5: HVAC (acronyme pour Heating, Ventilation and Air Conditioning). Les tables de référence n'ont pas dû être changées dans ce cas, mais vu que la division des années de construction a été changée, les données des tables individuelles ont dû être distribuées d'une façon différente. Comme supposition, on a alors défini le standard de distribution de chaleur par un plancher chauffant dès l'année 2011 même si cette technologie s'est établie déjà dès 2007 [34] et même bien avant. Pourtant, le type de refroidissement est inexistant pour les bâtiments résidentiels. L'ECS est impérativement chauffé à 60°C pour éliminer les bactéries et surtout les légionnelles [35], donc le type de traitement du ECS est le même pour tous les standards de construction dans ce cas. On a aussi supposé la même évolution du type de régulateur du système HVAC qu'à la Suisse et que tous les bâtiments ont une ventilation naturelle consistant d'une ventilation par les fenêtres, avec l'exception des bâtiments construits dès 2011. Ici, une ventilation mécanique s'est établie en parallèle avec les exigences élevées de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe. Avec une étanchéité plus élevée, le risque de surchauffe rend aussi un système de climatisation nécessaire. L'horaire du chauffage ainsi que la température de chauffage ont aussi été estimés comme étant constants pendant les différentes années de construction.

|    | STANDARD   | type_hs            | type_dhw            | type_cs            | type_el                |
|----|------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| 1  | STANDARD1  | SUPPLY_HEATING_AS1 | SUPPLY_HOTWATER_AS1 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 2  | STANDARD2  | SUPPLY_HEATING_AS1 | SUPPLY_HOTWATER_AS1 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 3  | STANDARD3  | SUPPLY_HEATING_AS1 | SUPPLY_HOTWATER_AS1 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 4  | STANDARD4  | SUPPLY_HEATING_AS1 | SUPPLY_HOTWATER_AS1 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 5  | STANDARD5  | SUPPLY_HEATING_AS3 | SUPPLY_HOTWATER_AS3 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 6  | STANDARD6  | SUPPLY_HEATING_AS3 | SUPPLY_HOTWATER_AS3 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 7  | STANDARD7  | SUPPLY_HEATING_AS3 | SUPPLY_HOTWATER_AS3 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 8  | STANDARD8  | SUPPLY_HEATING_AS3 | SUPPLY_HOTWATER_AS3 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 9  | STANDARD9  | SUPPLY_HEATING_AS3 | SUPPLY_HOTWATER_AS3 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 10 | STANDARD10 | SUPPLY_HEATING_AS6 | SUPPLY_HOTWATER_AS6 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |

Table 6: Technologies de production de chaleur

La dernière table de pertinence considérable est la table 6. Ici, on a considéré que les bâtiments anciens disposent d'une chaudière à fioul (mazout) et les bâtiments plus récents disposent des chaudières à gaz naturel (cf. annexe 1,5). Par contre, dès 2011, les pompes à chaleur (PAC) ont gagné fortement en popularité. Ces hypothèses se basent sur le fait que la tendance d'installer des chaudières à mazout est en train de diminuer et la tendance d'opter pour une chaudière à gaz naturel est en train de croître [36]. De plus, la PAC a déjà commencé de se répandre parmi la population en 2006 [37]. On suppose que l'installation de chauffage est utilisée pour chauffer le bâtiment, mais aussi l'ECS et une installation de refroidissement n'a pas été estimée nécessaire vu qu'une installation de climatisation a été estimée comme étant largement suffisante pour les besoins de refroidissement dans le climat tempéré.

## Synthèse des archéotypes

Afin de permettre une vue globale des suppositions des données d'entrées de la base de données, la table 7 a été construite. Les valeurs U qui s'appliquent aux standards sont indiquées à l'annexe 1.

| Standard | Période de construction | Description  |
|----------|-------------------------|--|
| 1        | 1000 - 1918             | construction lourde, $n_{50} = 3 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 90/70, ventilation naturelle, chaudière à mazout                  |
| 2        | 1919 - 1945             | construction moyennement lourde, $n_{50} = 3 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 90/70, ventilation naturelle, chaudière à mazout      |
| 3        | 1946 - 1960             | construction moyennement lourde, $n_{50} = 3 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 90/70, ventilation naturelle, chaudière à mazout      |
| 4        | 1961 - 1970             | construction moyennement lourde, $n_{50} = 3 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 90/70, ventilation naturelle, chaudière à mazout      |
| 5        | 1971 - 1980             | construction moyennement lourde, $n_{50} = 2 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 70/55, ventilation naturelle, chauffage à gaz naturel |
| 6        | 1981 - 1990             | construction lourde, $n_{50} = 1 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 70/55, ventilation naturelle, chauffage à gaz naturel             |
| 7        | 1991 - 2000             | construction lourde, $n_{50} = 1 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 70/55, ventilation naturelle, chauffage à gaz naturel             |
| 8        | 2001 - 2010             | construction lourde, $n_{50} = 1 \text{ 1/h}$ , Radiateurs en régime 70/55, ventilation naturelle, chauffage à gaz naturel             |
| 9        | 2011 - 2020             | construction lourde, $n_{50} = 1 \text{ 1/h}$ , plancher chauffant, ventilation mécanique, chauffage à gaz naturel                     |
| 10       | 2021 - 2022             | construction lourde, $n_{50} = 0,6 \text{ 1/h}$ , plancher chauffant, ventilation mécanique avec économiseur, PAC géothermique         |

Table 7: Description des standards de construction

Maintenant que la base de données a été modifiée pour mieux représenter l'état de l'art de la construction du Luxembourg, les simulations peuvent être lancées. Une des données de sortie les plus critiques est la valeur pour la demande en chaleur des 60 bâtiments du site d'étude (Petit-Nobressart), qui consiste de 59 bâtiments résidentiels (unifamiliales ainsi que multifamiliales) et d'une église. Il convient alors de vérifier si elle est effectivement représentative de la réalité en utilisant un logiciel de simulation thermique dynamique (STD). Vu que le logiciel TRNSYS a beaucoup été abordé lors de la formation du MSGE, le choix a été fait de l'utiliser à cette fin.

### 3.5 Validation des données de sortie

D'abord, il convient de vérifier si CEA et TRNSYS travaillent effectivement avec les mêmes données d'entrée. Pour cette raison, le rayonnement solaire par surface a été tracé pour les deux logiciels et aucune différence majeure n'a été identifiée. Sur la figure 10, on peut clairement identifier les mêmes pics et minimums locaux pour les deux logiciels. Dans TRNSYS, ces données ont été extraites du fichier .epw assez facilement, seule une courte conversion de kJ/h en kW a été nécessaire (division par 3.600). Cependant, sur CEA, c'était un peu plus compliqué. Ici, l'exécution de la simulation du rayonnement solaire a créé 60 fichiers Excel à partir desquels il fallait recueillir le rayonnement solaire horaire sur le toit et la surface totale du toit pour chaque bâtiment individuellement. Le rayonnement solaire horaire total pour le MQ a ainsi été calculé et a été divisé par la surface totale du toit à l'échelle du MQ. Une explication plus détaillée de l'approche pour travailler efficacement avec des données de plusieurs fichiers d'Excel suit ultérieurement.

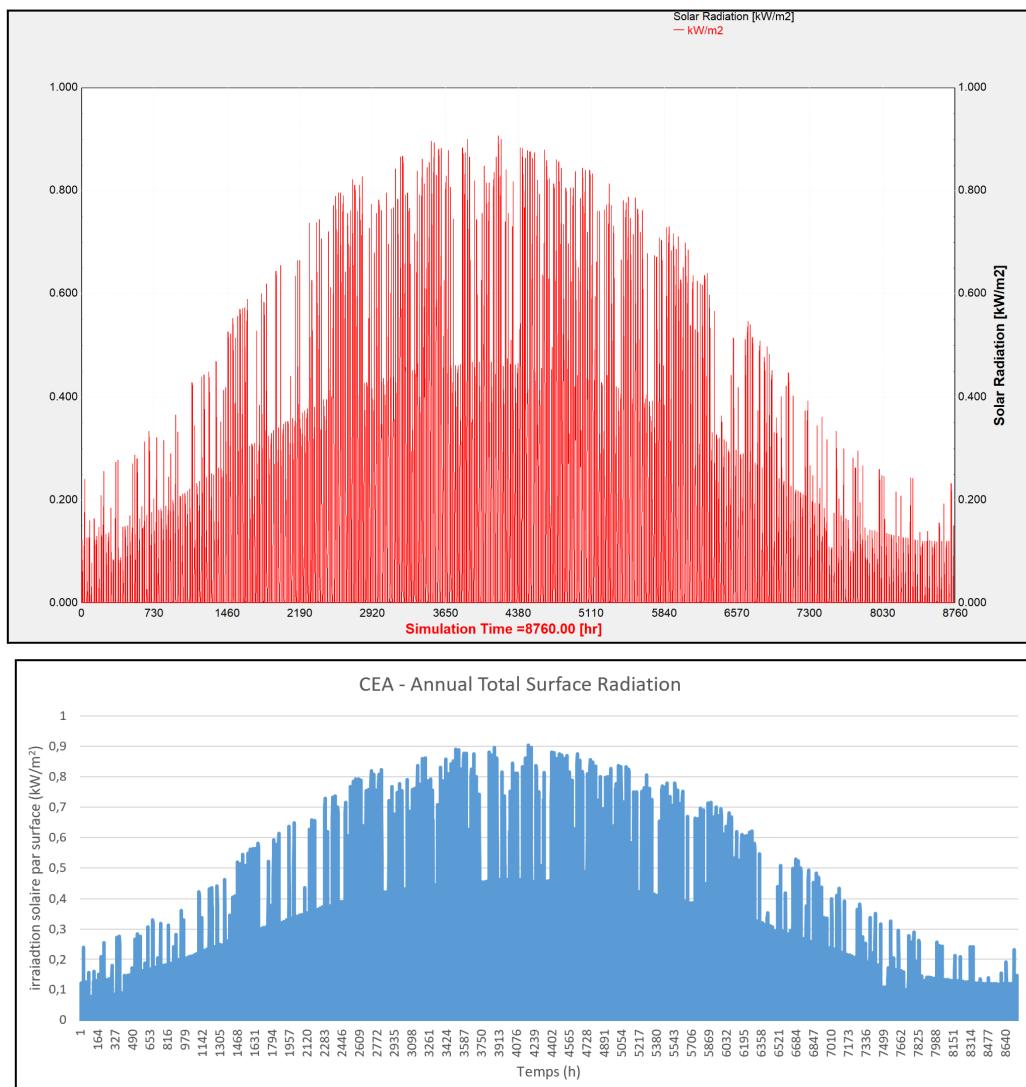


Figure 10: Comparaison d'irradiation solaire par surface (valeurs horaires) des logiciels

Afin de continuer avec une validation des calculs de la demande en électricité et en chauffage du quartier issu du logiciel CEA, il convient de les comparer aux valeurs mesurées. Ces valeurs proviennent d'une simulation du statu quo à Petit-Nobressart, où tous les bâtiments ont été modélisés à l'aide d'archétypes basés sur des dates estimées de construction.

À cause de la confidentialité de ces valeurs, ils ne sont disponibles que pour un bâtiment du quartier, le bâtiment B1015. Ce bâtiment possède alors des données mesurées accessibles au niveau de l'électricité ainsi que du chauffage (par l'accumulation des factures correspondantes). Ce bâtiment dispose d'une chaudière à mazout qui chauffe les locaux ainsi que l'ECS.

Ce qu'on constate dans la table 9 c'est que la consommation en énergie électrique est particulièrement élevée à l'année 2020. Ceci est dû à la pandémie de SARS-CoV-2 qui a causé la nécessité du confinement et par conséquent une hausse en consommation d'électricité a eu lieu. Ici, il s'agit donc d'une année exceptionnelle qui est ignorée dans le calcul de la moyenne de la table 9. Pour des raisons de manque de données des années 2017 et 2018, ces deux années ont aussi été laissées à côté lors du calcul de la moyenne. La consommation en énergie électrique déterminée par CEA était de 12.820 kWh/an. Il s'agit alors d'une surestimation de 180%. L'explication pour cette différence considérable est que CEA calcule cette valeur à partir de la surface occupée par le bâtiment qui est de 332,6m<sup>2</sup>. Par contre, la surface de ce bâtiment qui est effectivement utilisé à des fins d'habitation est de 189m<sup>2</sup>. Cette surestimation s'élève cependant à 176%, ce qui signifie que l'estimation de la consommation en énergie électrique par surface d'habitation est assez précise avec une déviation de 4%. Cela conduit à une estimation fiable de la consommation d'énergie électrique du quartier, mais il vaut mieux vérifier les données de sortie si on s'intéresse à un bâtiment du site d'étude en particulier.

| <b>début</b>  | <b>fin</b>    | <b>Consomation électrique (kWh)</b> |
|---------------|---------------|-------------------------------------|
| janvier 2021  | décembre 2021 | 7.124,20                            |
| octobre 2020  | décembre 2020 | 1.592,28                            |
| janvier 2020  | octobre 2020  | 7.073,00                            |
| décembre 2019 | décembre 2019 | 589,00                              |
| janvier 2019  | décembre 2019 | 5.636,00                            |
| décembre 2018 | décembre 2018 | 332,00                              |
| janvier 2017  | novembre 2017 | 7.469,00                            |
| décembre 2016 | décembre 2016 | 360,00                              |
| janvier 2016  | décembre 2016 | 7.625,00                            |
| décembre 2015 | décembre 2015 | 348,00                              |

Table 8: Valeurs de consommation d'électricité mesurées du Bâtiment B1015

| année          | Consommation électrique (kWh) |
|----------------|-------------------------------|
| 2021           | 7.124,20                      |
| 2020           | 8.665,28                      |
| 2019           | 6.225,00                      |
| 2016           | 7.985,00                      |
| <b>moyenne</b> | <b>7.111,40</b>               |

Table 9: Moyenne de consommation d'électricité du bâtiment B1015

En ce qui concerne les valeurs de consommation de chaleur, le bâtiment est équipé d'une chaudière à mazout pour le chauffage et l'ECS. La table 10 indique le volume de mazout qui a été acheté à des dates spécifiques. Avec ces données, la table 11 a été construite. La valeur de pertinence ici est la moyenne en consommation d'énergie thermique. Elle est calculée en multipliant le volume de mazout consommé par le pouvoir calorifique inférieur (PCI). Pour le mazout, le PCI s'élève à 9,94 kWh/litre [38]. Cette moyenne s'élève alors à 57.282,232 kWh/an. Le vrai besoin thermique du bâtiment s'élève donc à  $0,8 \times 57.282,232 = 45.825,79 \text{ kWh/an}$  pour tenir compte du rendement de la chaudière. Par contre, la valeur du besoin de chaleur pour chauffer les locaux de CEA est à 113.233 kWh/an (cf. Annexe 3) ce qui représente plus que le double des données issues des mesures. Une explication pour ceci suit ultérieurement.

| date       | Quantité Mazout (litres) |
|------------|--------------------------|
| 24/01/2022 | 2.618,00                 |
| 15/10/2021 | 2.455,00                 |
| 05/03/2021 | 2.830,00                 |
| 23/11/2020 | 1.905,00                 |
| 18/05/2020 | 2.920,00                 |
| 06/01/2020 | 2.536,00                 |
| 12/09/2019 | 2.565,00                 |
| 11/02/2019 | 3.560,00                 |
| 04/07/2018 | 2.473,00                 |
| 26/01/2018 | 2.190,00                 |
| 06/11/2017 | 2.145,00                 |
| 28/03/2017 | 3.474,00                 |
| 05/01/2017 | 1.502,00                 |
| 13/06/2016 | 3.296,00                 |
| 06/01/2016 | 2.461,00                 |

Table 10: Valeurs de consommation de chaleur mesurées du Bâtiment B1015

| année          | Consommation mazout (litres) | Consommation énergétique (kWh) |
|----------------|------------------------------|--------------------------------|
| 2021           | 5.073,00                     | 50.425,62                      |
| 2020           | 7.655,00                     | 76.090,70                      |
| 2019           | 5.101,00                     | 50.703,94                      |
| 2018           | 6.033,00                     | 59.968,02                      |
| 2017           | 7.809,00                     | 77.621,46                      |
| 2016           | 4.798,00                     | 47.692,12                      |
| <b>moyenne</b> | <b>5.762,80</b>              | <b>57.282,23</b>               |

Table 11: Moyenne de consommation de chaleur du Bâtiment B1015

### *Modèle TRNSYS*

Vu que le besoin en chaleur est beaucoup plus difficile à estimer que le besoin en électricité pour des raisons de plus des facteurs qui interviennent dans le calcul, comme par exemple les valeurs U, l'étanchéité à l'air, le débit de ventilation, etc..., on voudrait initier une simulation plus détaillée à l'aide d'un outil de simulation thermique dynamique (STD). Pour cette simulation, on a alors opté pour le logiciel TRNSYS ce qui inclut TRNBuild et TRNSYS Simulation Studio.

Premièrement, la structure type pour cette simulation a été construite dans TRNSYS Simulation Studio et la figure 11 montre bien les composants de celle-ci. Le type 15 est un composant permettant d'appeler des données météorologiques et de les utiliser dans la simulation. Plus précisément, le type 15-3 a été choisi dans ce cas, pour pouvoir choisir le même fichier de données météorologiques en format standard d'EnergyPlus (.epw) qu'à la simulation de CEA. Ceci permet de faire une comparaison juste. Le type 56 est un composant puissant qui permet d'incorporer dans la simulation toutes les données physiques d'un bâtiment dit "multizone". Le type 56 est typiquement le modèle de bâtiment multizone qui permet d'étudier le comportement thermique de celui-ci. Ce composant possède une interface qui lui est propre, appelée TRNBuild. Dans cette interface, l'utilisateur est en mesure de renseigner toutes les données physiques et géométriques du bâtiment étudié. Les systèmes HVAC ainsi que leur régulation peuvent en partie être encodés dans TRNSYS (ventilation, infiltration, gains internes, etc...).

L'outil d'équation, annoté Equa dans la figure 11, a dû être utilisé pour convertir la donnée de sortie (Qheat) de kJ en kWh, ce qui est réalisé par une division par 3.600. Le type24 est un intégrateur, utilisé afin d'intégrer les valeurs de besoin de chaleur sur la durée totale de simulation et d'en déduire une somme. Toutes les données d'intérêt, donc principalement la demande en chaleur, sont connectées au type 65d qui permet la création des graphes.

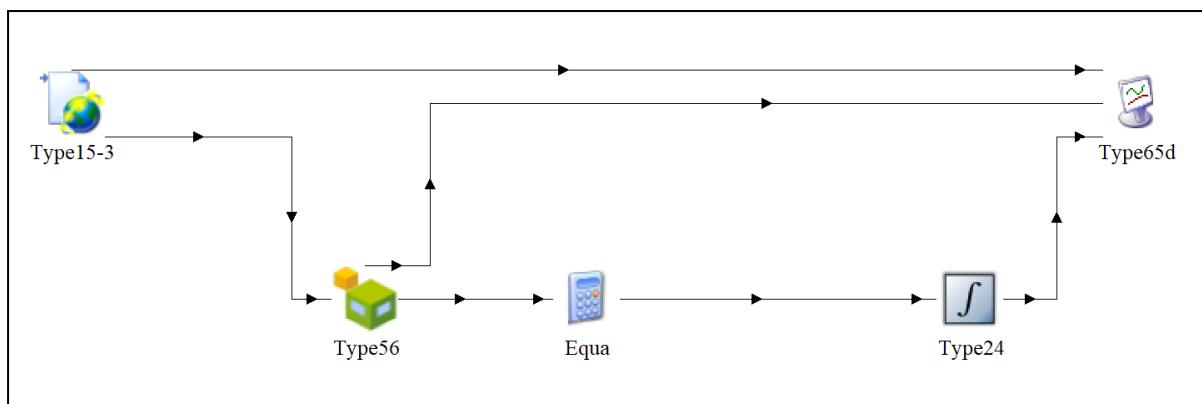


Figure 11: Simulation du bâtiment B1015 en Trnsys Simulation Studio

| No | Orientation | Calculation | Used by Surface |
|----|-------------|-------------|-----------------|
| 1  | E_253_90    | internal    | 3; 8; 15; 9;    |
| 2  | S_343_90    | internal    | 4; 16; 22;      |
| 3  | W_73_90     | internal    | 5; 10; 17; 23;  |
| 4  | N_163_90    | internal    | 6; 18;          |
| 5  | E_253_38    | internal    | 1; 13;          |
| 6  | W_73_38     | internal    | 2; 14;          |

Figure 12: Orientation du bâtiment B1015

La figure 12 montre l'orientation des 4 murs extérieurs ainsi que l'orientation des 2 côtés de la toiture. Vu que le bâtiment est orienté -17 degrés le long du nord (cf. Figure 13), on a dû considérer cette orientation pour toutes les 6 orientations de pertinence dont le bâtiment consiste. Les 4 premières orientations sont perpendiculaires au sol et les 2 dernières ont une inclinaison de 38 degrés (cf. Figure 14). Ici, il s'agit de l'inclinaison de la toiture et elle a été mesurée en utilisant le site internet geoportail.lu. Geoportail.lu a aussi été utilisé pour approximer les aires des surfaces d'importance et aussi le volume occupé par le bâtiment. Sur l'image satellite, on peut également voir que le bâtiment est entouré de quelques arbres, mais pas d'une forêt, de sorte que la valeur n50, qui a été fixée à 3 1/h pour les bâtiments de cette époque dans la base de données du CEA, a été divisée par 20 pour la transformer en taux d'infiltration réel. Typiquement, la valeur n50 est divisée par 30 pour les bâtiments protégés du vent et par 10 pour les bâtiments exposés, donc 20 représente une valeur d'intensité moyenne.



Figure 13: Angle azimutal du bâtiment B1015 [39]

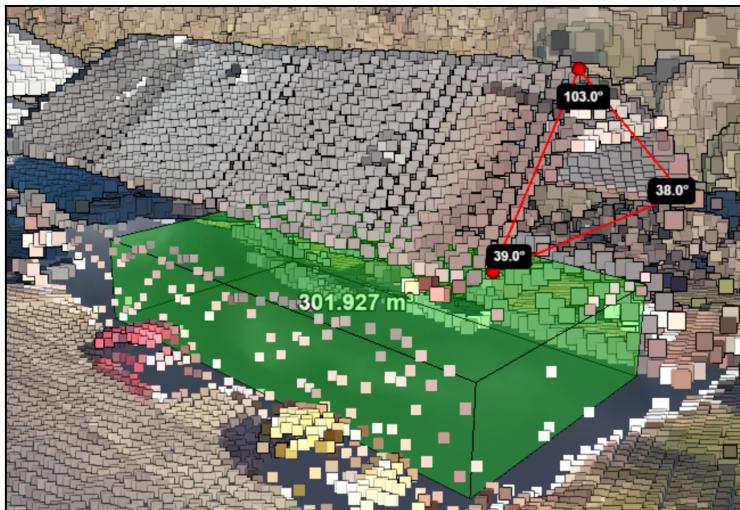


Figure 14: Mesures du site internet géoportail.lu

Ensuite, on a indiqué dans la figure 15 que notre bâtiment consiste en une zone avec un rez-de-chaussée et un étage comme air-nodes. Cette figure a été indiquée principalement pour des raisons de reproductibilité de ce travail. Le volume des air-nodes a été fixé à  $302\text{m}^3$  ce qui compose le volume chauffé visible sur la figure 14. Cette figure montre en même temps une fonctionnalité du Géoportail qui facilite énormément la détermination des volumes en déposant un cube dans l'interface 3D qui peut être manipulé en termes d'orientation, de dimensions et de sa position. Pourtant, la capacité thermique a été fixée à 5 fois la valeur par défaut pour tenir compte des éventuelles fournitures présentes (ex: meubles) [40] donc à  $1.812 \text{ kJ.K}^{-1}$  et finalement une surface occupée par le bâtiment de  $200\text{m}^2$ . Le garage du rez-de-chaussée de  $50\text{m}^2$  n'est pas chauffé. Pourtant, ces données viennent des mesures effectuées sur le site internet Géoportail.lu. La figure 14 donne un rendu visuel des valeurs mesurées.

### Airnodes

Rez-de-chaussée

Rez-de-chaussée

+ - ↕ number: 2

| surf-ID            | surf-type | construction-type | area   | category          |
|--------------------|-----------|-------------------|--------|-------------------|
| Additional Windows |           |                   |        |                   |
| 1                  | ROOF      | DECK_S            | 100.00 | EXTERNAL E_253_38 |
| 2                  | ROOF      | DECK_S            | 100.00 | EXTERNAL W_73_38  |
| 3                  | WALL      | AWAND_S           | 100.00 | EXTERNAL E_253_90 |
| 4                  | WALL      | AWAND_S           | 50.00  | EXTERNAL S_343_90 |
| 5                  | WALL      | AWAND_S           | 100.00 | EXTERNAL W_73_90  |
| 6                  | WALL      | AWAND_S           | 50.00  | EXTERNAL N_163_90 |
| 7                  | FLOOR     | AWAND_S           | 200.00 | BOUNDARY          |
| 11                 | WALL      | IWAND_S           | 200.00 | BOUNDARY          |

+ -

### Airnode Regime Data

volume: 302 m<sup>3</sup>      Infiltration      Heating      Gains/losses      Initial Values      Coupling

capacitance: 1812 kJ/K      Ventilation      Cooling      Comfort      Humidity

ref. floor area: 150 m<sup>2</sup>

### Windows (Total number: 9)

| surf-ID | surf-type | construction-type | area | category |
|---------|-----------|-------------------|------|----------|
|         |           |                   |      |          |

+ -

### Airnodes

Etage1

Etage1

+ - ↕ number: 2

| surf-ID            | surf-type | construction-type | area   | category          |
|--------------------|-----------|-------------------|--------|-------------------|
| Additional Windows |           |                   |        |                   |
| 13                 | ROOF      | DECK_S            | 100.00 | EXTERNAL E_253_38 |
| 14                 | ROOF      | DECK_S            | 100.00 | EXTERNAL W_73_38  |
| 15                 | WALL      | AWAND_S           | 100.00 | EXTERNAL E_253_90 |
| 16                 | WALL      | AWAND_S           | 50.00  | EXTERNAL S_343_90 |
| 17                 | WALL      | AWAND_S           | 100.00 | EXTERNAL W_73_90  |
| 18                 | WALL      | AWAND_S           | 50.00  | EXTERNAL N_163_90 |
| 19                 | FLOOR     | AWAND_S           | 200.00 | BOUNDARY          |
| 20                 | WALL      | IWAND_S           | 200.00 | BOUNDARY          |

+ -

### Airnode Regime Data

volume: 355 m<sup>3</sup>      Infiltration      Heating      Gains/losses      Initial Values      Coupling

capacitance: 2130 kJ/K      Ventilation      Cooling      Comfort      Humidity

ref. floor area: 200 m<sup>2</sup>

### Windows (Total number: 3)

| surf-ID | surf-type | construction-type | area | category |
|---------|-----------|-------------------|------|----------|
|         |           |                   |      |          |

+ -

Figure 15: Crédit de la zone

Sur la figure 16, la courbe rouge montre l'évolution de la demande de chaleur (axe des ordonnées) pour la durée d'une année type (axe des abscisses) avec des pas de temps horaire. Pourtant la courbe bleue montre l'évolution de la température à l'extérieur à des moments donnés. On constate ici que ce bâtiment consomme 41.991 kWh/an pour l'ensemble des 2 étages selon la simulation TRNSYS ou 120 kWh/m<sup>2</sup>/an comme valeur pour l'intensité de consommation énergétique du chauffage. Sur la figure 17, on voit comment cette valeur se répartit sur les mois d'une année type.

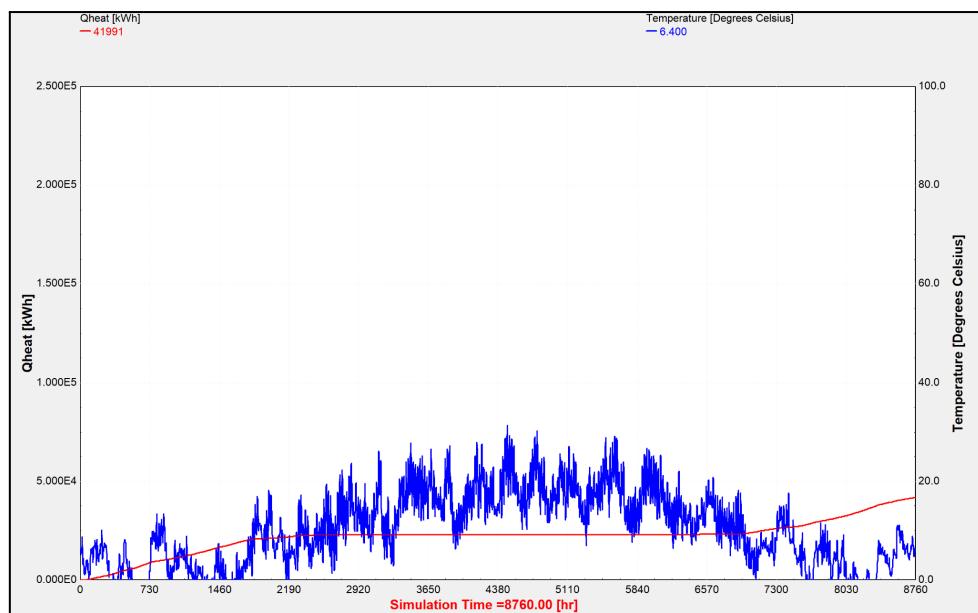


Figure 16: Demande de chaleur pour chauffage du bâtiment B1015 sur TRNSYS

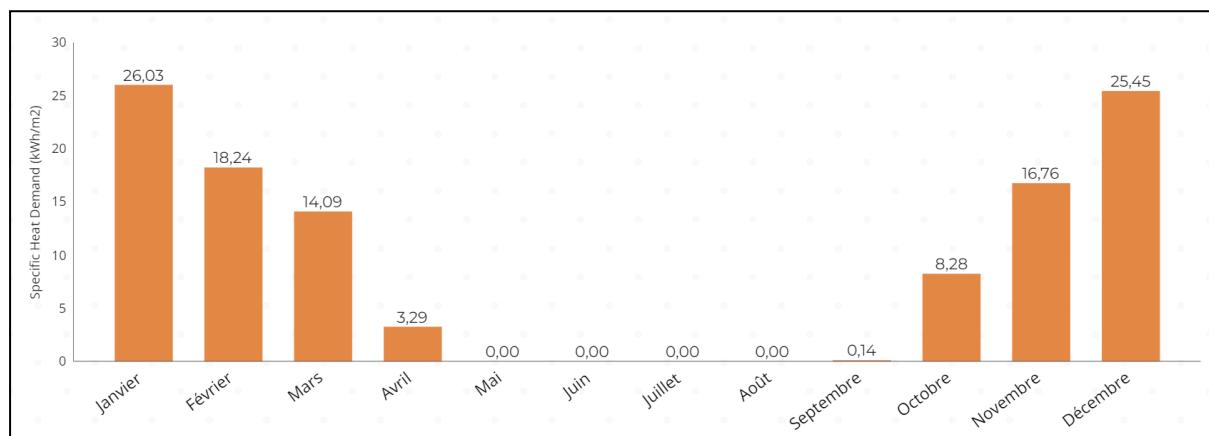


Figure 17: Demande de chaleur pour chauffage du bâtiment B1015 en TRNSYS (valeurs mensuels)

Pourtant, la valeur réelle provenant d'une moyenne annuelle en consommation de mazout (cf. Table 11), étant multipliée par un facteur de 0,8, était de 45.826 kWh/an. De cette valeur, on doit encore soustraire la demande en chaleur du ECS pour arriver à la demande thermique du chauffage. On sait que l'ECS représente en général 12,1% de la consommation énergétique [41] qui se compose du chauffage (45.826 kWh/an) ainsi que de l'électricité (7.111,4 kWh/an) (cf. Table 9). Donc, on a:

$$45.826 - 12,1\% \times (7.111,4 + 45.826) = 39.421 \text{ kWh}$$

Afin de synthétiser les calculs de l'intensité de l'utilisation de l'énergie, la table 12 a été construite. Ici, on peut remarquer que les deux logiciels de simulation surestiment légèrement l'intensité de la consommation d'énergie.

Ce qu'on constate aussi c'est que le CEA surestime largement la demande de chauffage, car il ne se rend pas compte qu'une grande partie de la surface brute du plancher du bâtiment n'a pas de demande de chauffage. En réalité, la surface brute de plancher est de 350m<sup>2</sup> et dans les données d'entrée de CEA (issues des données SIG), cette valeur est à 997,9m<sup>2</sup>. Cette surestimation donne lieu à des données de sortie assez peu fiables en termes de demande de chauffage et, pour atténuer ce problème, il faudrait vérifier la surface brute de plancher supposée des bâtiments d'un intérêt particulier dans le CEA, si on s'intéresse à la demande de chauffage totale de bâtiments spécifiques.

En outre, toutes les valeurs de l'intensité de l'utilisation de l'énergie sont en dessous de la moyenne pour l'archétype belge d'un bâtiment construit entre 1945-1969, qui est de 148,7 kWh/m<sup>2</sup>/an [42]. Cette comparaison a été faite, car on remarque de grandes différences dans les valeurs individuelles utilisées pour calculer la moyenne [42]. Donc les valeurs de la table 12 peuvent encore être considérées comme réalistes, même si ce bâtiment rentre dans la catégorie avant-guerre où il y a moins des statistiques fiables disponibles, surtout si on considère les fortes différences entre les valeurs moyennes des pays voisins [43].

|  | Réalité | TRNSYS | CEA     |
|--|---------|--------|---------|
| <b>Energy Use Intensity (kWh/m<sup>2</sup>/an)</b> | 112,63  | 120    | 113,47  |
| <b>Heating Demand (kWh/an)</b>                     | 39.421  | 41.991 | 113.233 |

Table 12: Comparaison des valeurs de consommation énergétique des logiciels de simulation

### 3.6 Description des scénarios

Maintenant que la partie validation est prise en charge, on peut passer à la création des 3 scénarios. Ici, on commence par une description de ce qui compose le scénario, puis on calcule l'autosuffisance et ensuite les coûts qui l'accompagnent. Ensuite, les scénarios peuvent être comparés équitablement.

#### Scénario 1

Le premier scénario consiste en un scénario de référence. L'objectif était d'être aussi proche de la réalité actuelle à Petit-Nobressart que possible. On a alors attribué les archétypes des bâtiments en fonction de leur âge estimé, aux résidences de ce village. Pourtant, le site d'étude consiste de 60 bâtiments, dont 59 sont utilisés à des fins d'habitation et un est une église. Le CEA attribue automatiquement une supposition en termes de type d'utilisation des bâtiments (exemples: résidence unifamiliale ou multifamiliale, école, musée, etc.). De plus, après avoir fourni des estimations de l'âge des bâtiments, le CEA attribue aussi les archétypes de l'article «Adaptation de la base de données - synthèse des archétypes» aux bâtiments. À

ce stade, le CEA dispose de données SIG et peut attribuer tous ses ensembles de données à tous les bâtiments. Ce qui signifie que, chaque bâtiment reçoit un horaire d'occupation, d'utilisation de l'eau, des appareils ménagers et de l'éclairage en fonction du type d'utilisation et à chaque bâtiment le logiciel attribue un système de chauffage, ainsi que des détails techniques concernant l'enveloppe du bâtiment en fonction de son âge de construction qui détermine l'archétype qui s'applique au bâtiment.

Ici, on s'intéresse principalement au taux d'autosuffisance en électricité et en chauffage. Vu que le logiciel CEA ne dispose pas de la capacité directe de détermination des taux d'autosuffisance, ils doivent être calculés à part.

Le taux d'autosuffisance électrique ou TAS(e) du MQ a directement pu être calculé à partir des valeurs annuelles:

$$TAS(e) = \text{électricité produite localement} / \text{demande en électricité}$$

La demande en électricité des bâtiments individuels a été déterminée par CEA et ces données sont alors stockées dans un fichier .csv. Il reste à déduire la somme, qui vaut 752,907 MWh.an<sup>-1</sup> (cf. Annexe 3). Cela veut dire qu'en moyenne, un bâtiment du site d'étude consomme 12,5 MWh d'énergie électrique par an, ce qui est très élevé. Pourtant, cette valeur peut être expliquée par le bâtiment B1055 qui consiste d'une exploitation agricole ainsi que d'une résidence et consomme 88,34 MWh d'énergie électrique par an selon le CEA. Pourtant, le logiciel considère qu'il s'agit d'une résidence multifamiliale et le type d'utilisation d'une ferme n'existe pas dans le CEA. Afin de vérifier que l'estimation en consommation électrique est toujours réaliste, un calcul de comparaison a été effectué.

La résidence consomme alors environ 4 MWh/an/personne [44], en supposant que la consommation moyenne par résident du Luxembourg s'applique dans ce cas. De plus, on peut considérer que 2,39 personnes habitent dans cette résidence, vu que le Luxembourg est composé de 645.397 habitants [45] et de 269.900 ménages [46]. La consommation électrique de l'espace qui est utilisé à des fins d'habitation, peut alors être estimée à environ 9,56 MWh/an.

Il reste alors 78,78 MWh d'énergie électrique qui devrait être consommée par l'exploitation agricole.

Si on continuait alors avec l'estimation de 498 kWh/vache/an [47], cela voudrait dire que 158 vaches pourraient être gardées dans cette étable. Ce qui est plausible car chaque vache pourrait alors occuper 7,96m<sup>2</sup> du bâtiment B1055, une surface tout à fait réaliste vu qu'elle est légèrement supérieur aux exigences minimales [48] en considérant que les hangars occupent 1.257m<sup>2</sup> en totale (cf. Figure 18). Cette comparaison est la preuve que la consommation électrique d'une ferme peut être estimée raisonnablement par le logiciel CEA. Un résumé des valeurs utilisées pour ces calculs est donné par la table 13.



Figure 18: Surface occupée des hangars du bâtiment B1055

|   |       |                     |
|---|-------|---------------------|
| Consommation électrique du bâtiment   | 88,34 | MWh/an              |
| Consommation moyenne par résident   | 4     | MWh/an/résident     |
| Nombre de personnes par résidence (moyenne)   | 2,39  | personnes/résidence |
| Consommation électrique estimée pour la partie  | 9,56  | MWh/an              |
| Consommation électrique restante  | 78,78 | MWh/an              |
| Consommation électrique par vache (moyenne)   | 498   | kWh/vache/an        |
| Estimation du nombre des vaches pouvant être gardées selon la consommation électrique | 158   | vaches              |
| Surface des hangars   | 1.257 | $m^2$               |
| Surface qui pourrait être occupé par chaque vache                                     | 7,96  | $m^2$               |

Table 13: Résumé des estimations du bâtiment B1055

Les bâtiments B1003, B1005 et B1006 disposent aussi d'une pompe à chaleur ce qui consomme 12,12 MWh de plus. Pour ce scénario, on a supposé que la production locale d'électricité est à 0 MWh/an ce qui n'est pas loin de la réalité pour ce village. Le TAS(e) est donc à 0%.

En ce qui concerne le taux d'autosuffisance en termes de chauffage ou TAS(c), la même approche a été appliquée. La demande en chaleur totale du district s'élève donc à 3.657,141 MWh/an (cf. Annexe 3) et la production de chaleur locale est aussi estimée à quasiment 0  $MWh.an^{-1}$ . Le TAS(c) est donc aussi à 0%. Cela veut alors forcément dire que le taux d'autosuffisance énergétique qui se compose de ces 2 TAS est aussi de 0%.

Pour déterminer le coût du cycle de vie de ce scénario, les coûts d'investissement s'élèvent à 0 € vu que les chaudières sont déjà installées et on compte simplement continuer leurs exploitations. Cela signifie que nous supposons commencer déjà au milieu du cycle de vie des installations de chauffage, mais vu qu'ils vont alors être remplacés au cours des 20 ans à venir, le cycle de vie de ce scénario peut quand même être considéré complet.

En ce qui concerne les coûts opérationnels, on utilise le CEA pour les déterminer.

Afin de simplifier les calculs économiques, on a opté pour prendre des moyennes pour les prix unitaires des sources d'énergies. Bien sûr, ceci n'est pas une représentation précise de la réalité car le marché du mazout, du gaz naturel et de l'électricité est constamment en train d'évoluer. Néanmoins, pour pouvoir créer des analyses technico-économiques d'une complexité raisonnable, on a dû fixer des prix unitaires.

Récemment, les prix du mazout, du gaz naturel et de l'électricité ont été témoins de hausses importantes, majoritairement à cause de la guerre en Ukraine [49]. Cette crise rend une estimation de l'évolution des prix unitaires des sources d'énergie encore plus imprévisible. On a alors exclu 2022 de cette analyse et on a opté pour la moyenne des 13 dernières années (cf. Table 14) comme valeur constante à insérer dans les tables des prix unitaires puisque la spéculation sur les développements futurs de la politique liée à la guerre n'entre pas dans le cadre de ce travail.

De plus, aucune tendance en termes de l'évolution des prix a été observée pour la période de temps étudiée.

| Mazout         |                      |                      | Gaz Naturel    |                      | Electricité  |                      |  |              |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------------|--------------|----------------------|--|--------------|
| année          | Prix par litre (€/l) | Prix par kWh (€/kWh) | année          | Prix par kWh (€/kWh) | année        | Prix par kWh (€/kWh) |  |              |
| 2008           | 0,68                 | 0,068                | 2008           | 0,039                | 2008         | 0,165                |  |              |
| 2009           | 0,48                 | 0,048                | 2009           | 0,038                | 2009         | 0,188                |  |              |
| 2010           | 0,606                | 0,061                | 2010           | 0,04                 | 2010         | 0,173                |  |              |
| 2011           | 0,739                | 0,074                | 2011           | 0,046                | 2011         | 0,168                |  |              |
| 2012           | 0,835                | 0,084                | 2012           | 0,051                | 2012         | 0,17                 |  |              |
| 2013           | 0,761                | 0,077                | 2013           | 0,048                | 2013         | 0,167                |  |              |
| 2014           | 0,702                | 0,071                | 2014           | 0,041                | 2014         | 0,174                |  |              |
| 2015           | 0,507                | 0,051                | 2015           | 0,038                | 2015         | 0,177                |  |              |
| 2016           | 0,521                | 0,052                | 2016           | 0,034                | 2016         | 0,17                 |  |              |
| 2017           | 0,545                | 0,055                | 2017           | 0,032                | 2017         | 0,162                |  |              |
| 2018           | 0,736                | 0,074                | 2018           | 0,033                | 2018         | 0,167                |  |              |
| 2019           | 0,629                | 0,063                | 2019           | 0,031                | 2019         | 0,18                 |  |              |
| 2020           | 0,389                | 0,039                | 2020           | 0,03                 | 2020         | 0,199                |  |              |
| 2021           | 0,7781               | 0,078                | 2021           | 0,041                | 2021         | 0,199                |  |              |
| 2022           | 1,319                | 0,133                | 2022           | 0,044                | 2022         | 0,195                |  |              |
| <b>moyenne</b> |                      | <b>0,064</b>         | <b>moyenne</b> |                      | <b>0,039</b> | <b>moyenne</b>       |  | <b>0,176</b> |

Table 14 : Evolution des prix unitaires respectives au Luxembourg

sources: [50] [51] [52] [53] [54] [55]

Ces données sont importantes pour calculer Opex\_var, qui représente les coûts opérationnels variables d'un mois à l'autre à cause d'une consommation variable. Opex\_fixe représente les coûts opérationnels qui sont fixes comme la maintenance. Ce montant est estimé à 1% des coûts d'investissement (Capex) dans la base de données du logiciel CEA.

Pourtant, toutes les valeurs d'Opex et de Capex de tous les paramètres pertinents dans le CEA sont exprimées en USD2015, il faut donc vérifier ce que cela équivaut en euros en 2022.

$$1 \text{ euro}2015 = 1,1154 \text{ euro}2022 \quad [56]$$

$$1 \text{ euro}2015 = 1,11 \text{ USD}2015 \quad [57]$$

Donc:

$$1,11 \text{ USD}2015 = 1,1154 \text{ euro}2022$$

$$1 \text{ USD}2015 = 1,0048647 \text{ euro}2022$$

$$1 \text{ euro}2022 = 0,9951589 \text{ USD}2015$$

Pour toutes les valeurs économiques qu'on a entré dans le logiciel CEA ainsi que toutes les valeurs qu'on a tirées du logiciel, on a dû réaliser cette conversion de devises.

$$\text{Besoin total en mazout: } 4.485,97 \text{ MWh. an}^{-1}$$

$$\text{Besoin total en gaz naturel: } 1.111,9 \text{ MWh. an}^{-1}$$

$$\text{Besoin total en électricité (pour chauffage): } 12,12 \text{ MWh. an}^{-1}$$

$$\text{Besoin total en électricité (pour éclairage, appareils ménagers, etc.): } 752,907 \text{ MWh. an}^{-1}$$

Ces chiffres viennent d'un fichier .csv généré par le CEA (cf. Annexe 3) appelé «demand». Un graphique pour visualiser les montants qui compose ces valeurs totales est aussi disponible (cf. Figure 19).

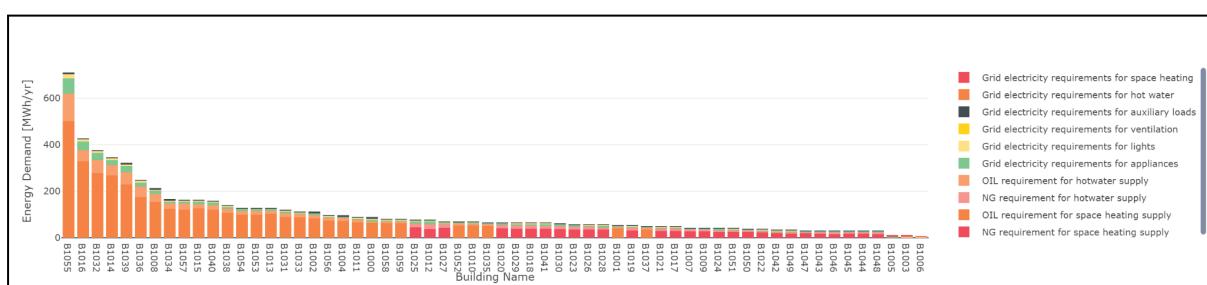


Figure 19: Consommation d'énergie finale Scénario 1

Afin de calculer les coûts opérationnels variables, il reste à sommer les produits du besoin en source d'énergie et les prix unitaires.

*coûts opérationnels variables*

$$\begin{aligned}
&= 4.485.970 \text{ kWh.} \text{an}^{-1} \times 0,064 \text{ €. kWh}^{-1} \\
&\quad + 1.111.900 \text{ kWh.} \text{an}^{-1} \times 0,039 \text{ €. kWh}^{-1} \\
&\quad + 12.120 \text{ kWh.} \text{an}^{-1} \times 0,176 \text{ €. kWh}^{-1} \\
&\quad + 752.907 \text{ kWh.} \text{an}^{-1} \times 0,176 \text{ €. kWh}^{-1} \\
&= 464.425 \text{ €.} \text{an}^{-1}
\end{aligned}$$

Même si les coûts d'investissements n'interviennent pas dans l'analyse technico-économique, il est quand même intéressant de voir ce que le logiciel donne comme indication.

Valeurs CEA:

- *coûts d'investissement du système*: 997.596 €
- *coûts O&M* = 9.976 €

*coûts d'entretien (opérationnels fixes)*

$$\begin{aligned}
&= 150 \text{ €.} \text{an}^{-1} \times 29 + 175 \text{ €.} \text{an}^{-1} \times 28 + 190 \text{ €.} \text{an}^{-1} \times 3 = 9.820 \text{ €.} \text{an}^{-1} \\
&\text{[58] [59] [60]}
\end{aligned}$$

Donc la supposition de CEA que les coûts opérationnels fixes représentent 1% des coûts d'investissements est tout à fait justifiée vu qu'il n'y a pas une grande différence entre la valeur calculée à la main et celle du logiciel CEA.

Comme les coûts de remplacement des anciennes installations jouent aussi un rôle crucial dans cette analyse économique, quelques valeurs génériques pour celles-ci ont été répertoriées ci-dessous. [\[61\]](#) [\[62\]](#) [\[63\]](#)

*chaudière à fioul*: 3.600€    *chauffage au gaz naturel*: 6.000€    *PAC*: 7.000€

La durée de vie de toutes ces technologies de chauffage est estimée à 20 ans.

Vu que la PAC est le nouveau standard des bâtiments plus récents, on n'estime pas qu'il s'agit d'une technologie qui doit être remplacée au cours des 20 prochaines années. Par contre, les chaudières à fioul et gaz naturel qui existent sur le site d'étude en 2022 vont certainement être remplacées avant l'année 2042. Ici, on a considéré qu'ils sont alors remplacés par la même technologie afin de ne pas dévier des consommations annuelles en mazout et en gaz naturel.

*coûts de remplacement* = 3.600 € × 29 + 6.000 € × 28 = 272.400 €

Vu qu'en réalité, une chaudière a une espérance de vie d'environ 20 ans et l'âge des chaudières actuellement installées est inconnue, on estime que chaque an 3 des 60 installations vont être remplacées. Comme ça, on a remplacé toutes les chaudières à la fin des 20 ans.

$$\text{coûts de remplacement} = \frac{3}{60} \times 272.400 \text{ €} = 13.620 \text{ €/an}$$

Coûts accumulés

$$\begin{aligned} \text{dépenses annuelles} &= \text{coûts opérationnels variables} + \text{coûts opérationnels fixes} \\ &\quad + \text{coûts de remplacement} \\ &= 487.865 \text{ €. an}^{-1} \end{aligned}$$

La table 15 est alors supposée aider à garder la vue d'ensemble des valeurs économiques de ce scénario.

|   |              |
|---|--------------|
| Coûts opérationnels variables           | 464.425 €/an |
| Coûts d'entretien (opérationnels fixes) | 9.820 €/an   |
| Coûts de remplacements                  | 13.620 €/an  |
| Somme                                   | 487.865 €/an |

Table 15: Synthèse des valeurs économiques du Scénario 1

La valeur résiduelle est supposée être de 0 € car à la fin de la période d'étude, quelques installations doivent être remplacées et quelques installations peuvent être exploitées au-delà de la période d'étude. On suppose alors qu'il existe une balance entre ces deux cas spécifiques.

Le coût du cycle de vie de tous les scénarios est alors composé des coûts d'acquisitions, des coûts d'installations, des coûts de maintenance et réparations, des coûts de remplacements ainsi que des éventuelles recettes de l'injection d'énergie dans le réseau électrique. La somme de ces coûts est annualisée pour une durée de 20 ans et actualisée avec un taux d'actualisation de 2,3 % [64] afin de représenter le pouvoir d'achat du présent.

Selon l'analyse technico-économique de ce scénario (cf. Annexe 4), le coût du cycle de vie de ce scénario s'élève alors à **7.751.092 €**.

## Scénario 2

Ce scénario suppose que des panneaux PV seront installés sur toutes les toitures des bâtiments du MQ afin de couvrir ces besoins électriques ainsi qu'une PAC air-eau qui est supposée remplacer la chaudière précédente de chaque bâtiment du site d'étude.

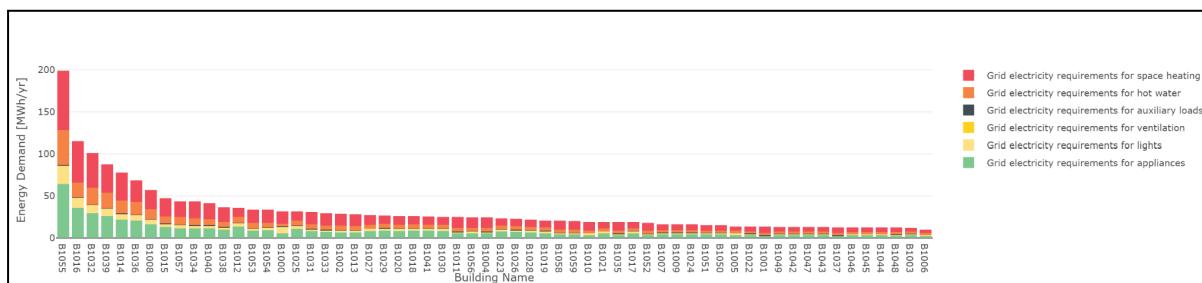
Il est clair qu'une PAC ne va pas être énergétiquement efficace sans amélioration au niveau de l'isolation d'un bâtiment ancien. C'est pour cette raison qu'on a alors aussi considéré l'investissement dans une rénovation de la plupart des bâtiments du site d'étude. Il convient alors de supposer un investissement dans une rénovation de tous les bâtiments datant du dernier siècle. Il est vrai qu'au cours des années 70, une réglementation thermique s'est établie en Europe [65], mais pour ce scénario, on a supposé qu'il existe quand même beaucoup de potentiel d'amélioration en termes d'isolation thermique pour les bâtiments datant de 1970 à 2000.

On compte donc équiper 57 bâtiments du site d'étude avec des PAC de différentes tailles. Ici, il convient de modifier la base de données déjà établie pour fournir tous les bâtiments du site d'étude en PAC air/eau (cf. Table 16). Ici, on a estimé que le Seasonal Performance Factor (SPF) est de 2,3 [66]. En résumé, le SPF représente la chaleur, qui a été générée annuellement, divisée par la consommation annuelle d'électricité. Ceci représente alors une valeur assez pessimiste vue qu'il s'agit du minimum du standard de conception des PAC air/eau européennes [67].

|    | STANDARD   | type_hs             | type_dhw             | type_cs            | type_el                |
|----|------------|---------------------|----------------------|--------------------|------------------------|
| 1  | STANDARD1  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 2  | STANDARD2  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 3  | STANDARD3  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 4  | STANDARD4  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 5  | STANDARD5  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 6  | STANDARD6  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 7  | STANDARD7  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 8  | STANDARD8  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 9  | STANDARD9  | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |
| 10 | STANDARD10 | SUPPLY_HEATING_AS12 | SUPPLY_HOTWATER_AS12 | SUPPLY_COOLING_AS0 | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 |

Table 16: Technologies de production de chaleur Scénario 2

Le graphique ci-dessous donne une bonne indication du besoin en électricité pour les PACs (cf. Figure 20), par contre le tableau d'Excel fourni par CEA permet de déterminer la somme de ces besoins électriques (cf. Annexe 5).



Pourtant, le taux d'autosuffisance énergétique se calcule comme suit:

$$TAS = \frac{\text{électricité produite localement}}{\text{demande énergétique totale}}$$

Cette demande énergétique totale consiste donc du besoin d'électricité pour l'éclairage, les appareils ménagers, la ventilation, les auxiliaires, le chauffage et l'eau chaude sanitaire du quartier.

L'électricité produite localement (cf. Figure 21) est supposée être issue des installations PV se situant sur les toitures des bâtiments, même si le logiciel propose de mettre des panneaux PV supplémentaires sur les murs des bâtiments. En outre, le CEA se rend compte qu'il s'agit ici des toitures à 2 pentes pour la plupart des bâtiments même si les bâtiments sont représentés par des polygones des toitures plates, car les surfaces ont été comparées avec des données fournies par les outils disponibles (géoportail.lu) et aucune différence a pu être constatée.

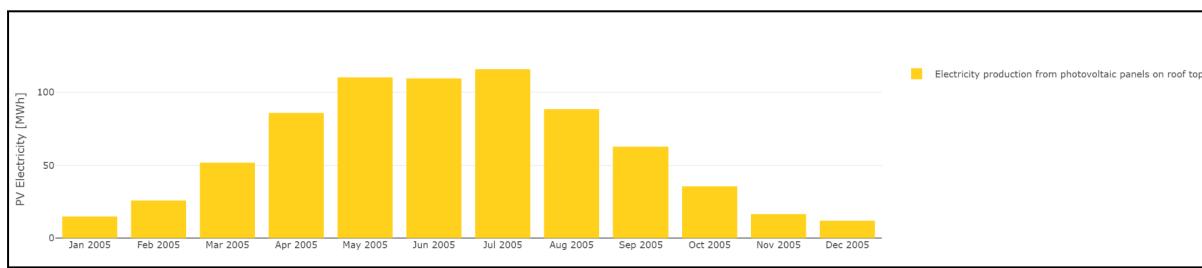


Figure 21: Potentiel PV pour le quartier (mensuel)

Le total bien que les valeurs horaires des 2 grandeurs physiques dont le TAS consiste est fourni par le logiciel CEA (cf. Annexe 5):

$$\begin{aligned}
 &\text{électricité produite localement: } 729,83 \text{ MWh} \\
 &\text{demande énergétique (électrique) totale: } 1.915,2 \text{ MWh} \\
 &TAS = 38,11\%
 \end{aligned}$$

Pourtant, en réalité il n'est pas possible d'exploiter cette production électrique directement au moment où elle est disponible. Une grande partie de la production doit alors être injectée sur le réseau, ce qui baisse le taux d'autoconsommation (TAC), mais n'influence pas le TAS. La démarche pour calculer la partie d'électricité qui est directement consommée est expliquée ultérieurement (cf. Table 18).

$$\begin{aligned}
 &\text{électricité produite localement et directement consommée : } 432,88 \text{ MWh} \\
 &\text{demande énergétique (électrique) total: } 1.915,2 \text{ MWh} \\
 &TAC = 22,6\%
 \end{aligned}$$

## Coûts d'enlèvement des anciennes technologies

Pour déterminer le coût du cycle de vie de ce scénario, il faut d'abord considérer que les anciennes technologies doivent être neutralisées ou enlevées.

*coûts d'enlèvement des anciennes technologies:*

*mazout: 1.500€ [68]*

*gaz naturel: 618,40€ [69]*

$$\text{coûts d'enlèvement: } 29 \times 1.500\text{€} + 28 \times 618\text{€} = 60.815\text{€}$$

## Coûts des panneaux PV

Dans la base de données de CEA, on remarque que les coûts d'investissement pour les panneaux PV monocristallins s'élèvent à  $3,6 \text{ €.Wc}^{-1}$  si la puissance installée est inférieure à 10 kWc et si la puissance est supérieure à 10 kWc, ce montant décroît jusqu'à  $2,6 \text{ €.Wc}^{-1}$ . Par contre, au Luxembourg en 2022 les coûts d'investissement s'élèvent plutôt à  $2.250 \text{ €.kWc}^{-1}$  [70], donc à  $2,25 \text{ €.Wc}^{-1}$ . Si on ajoute les subsides du gouvernement qui s'élève à 20% de l'investissement avec un maximum de 500€/kWc [71], on arrive même à  $1,8 \text{ €.Wc}^{-1}$ . On peut alors utiliser 2 différentes approches afin de déterminer les coûts d'investissement totaux (PV).

La 1ère approche dépend de l'énergie produite par l'entièreté des installations (cf. Annexe 5) avec l'hypothèse qu'un kWc produit généralement  $1.000 \text{ kWh.an}^{-1}$  [72] et la 2ème dépend de la surface couverte par les panneaux PV avec l'hypothèse d'une puissance moyenne de  $185 \text{ Wc.m}^{-2}$  [72].

$$1\text{ère approche: } 1,8 \text{ €.Wc}^{-1} \times 729.827 \text{ Wc} = 1.313.689 \text{ €}$$

Pour déterminer alors la surface totale des panneaux PV, on sait qu'en moyenne 67% [73] de toutes les surfaces des toitures orientées vers le soleil sont typiquement utilisées pour des panneaux PV. Les autres 33% sont occupés par des conduits de ventilations, des velux, des cheminées, etc. De plus, lors de la simulation effectuée par CEA, on a indiqué que seules les surfaces qui reçoivent une valeur supérieure à  $800 \text{ kWh.m}^{-2}$  d'irradiation solaire vont être considérées pour y mettre des panneaux PV. Pour cette raison, la surface effectivement couverte par des panneaux PV est de  $5.171,62 \text{ m}^2$  (cf. Annexe 5), donc beaucoup moins que la surface totale des toitures qui vaut  $14.091,56 \text{ m}^2$  (cf. Annexe 5).

$$2\text{ème approche: } 5.171,62 \text{ m}^2 \times 185 \text{ Wc.m}^{-2} \times 1,8 \text{ €.Wc}^{-1} = 1.722.149 \text{ €}$$

La table 17 est supposée donner une vue d'ensemble des estimations effectuées.

|   |           |                   |
|---|-----------|-------------------|
| Prix par puissance nominale d'un panneau PV           | 1,8       | €/Wc              |
| électricité produit (valeur annuelle)                 | 729.827   | kWh/an            |
| Puissance moyenne d'un panneau PV par surface occupée | 185       | Wc/m <sup>2</sup> |
| Surface occupée par des panneaux PV (Scénario 2)      | 5.171,62  | m <sup>2</sup>    |
| Coûts d'investissement (approche 1)                   | 1.313.689 | €                 |
| Coûts d'investissement (approche 2)                   | 1.722.149 | €                 |

Table 17: Résumé des estimations des panneaux PV

La deuxième approche pour effectuer ce calcul a été estimée comme étant plus représentative de la réalité car elle ne dépend pas de l'énergie produite qui peut être très variable d'une année à l'autre et donc on a continué avec la supposition de la 2ème approche pour estimer les coûts d'investissement des panneaux PV.

Les coûts opérationnels variables d'une installation des PV s'élèvent à quasiment 0 € car on exploite une source d'énergie qui est disponible gratuitement. Néanmoins, on a supposé que tous les 5 ans les installations PV seront nettoyées afin de garantir un rendement optimal au cours du temps d'exploitation [74]. De plus, on a estimé un coût unitaire de 22 €/m<sup>2</sup> de surface à nettoyer [75].

Pour conclure, on a compté avec 113.775 € pour le nettoyage des panneaux PV ( $22 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \times 5.171,62 \text{m}^2$ ). Ce montant est alors à payer tous les 5 ans comme coûts d'entretien (coûts opérationnels fixes).

### Coûts des rénovations

Afin de maintenir les coûts d'investissement des rénovations raisonnables, on a pensé à investir dans 2 domaines, notamment une isolation pour les murs extérieurs à l'intérieur ainsi qu'une isolation des rampants de toiture des bâtiments concernés. On a choisi ces zones spécifiques, car la plupart des pertes thermiques ont lieu dans les murs (35%) et la toiture (25%) [76]. Pour cet investissement, il existe des médianes au niveau des prix basées sur près de 1.500 chantiers [65].

$$\begin{aligned}
&\text{Coûts de l'investissement} \\
&\text{rampants de toiture: } 65 \text{ €. m}^{-2} \\
&\text{isolation des murs par l'intérieur: } 55 \text{ €. m}^{-2}
\end{aligned}$$

Vu qu'on a opté pour des médianes afin de déterminer les coûts de cet investissement, il sera réaliste de rentrer dans la catégorie du standard de performance III à la fin des travaux de rénovation. Cette classe détermine non seulement les valeurs U auquel s'attendre à la fin des travaux, mais aussi les subsides accordés par le gouvernement du Grand-Duché de

Luxembourg. La table indiquant l'entièreté des valeurs U à atteindre et les subsides correspondant peut être retrouvée dans les références [77].

*Valeurs U après rénovation*

*rampants de toiture:  $0,17 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$*

*isolation des murs par l'intérieur:  $0,29 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$*

*Subsides accordés*

*rampants de toiture:  $24 \text{ €.m}^{-2}$*

*isolation des murs par l'intérieur:  $25 \text{ €.m}^{-2}$*

*Coûts de l'investissement après subsides*

*rampants de toiture:  $41 \text{ €.m}^{-2}$*

*isolation des murs extérieurs par l'intérieur:  $30 \text{ €.m}^{-2}$*

La surface totale des toitures des bâtiments du site d'étude est de  $14.091,56\text{m}^2$  (cf. Annexe 5). Après avoir soustrait les surfaces des toitures des bâtiments construits dès 2000, il reste  $13.812,36\text{m}^2$ . Vu qu'il n'est pas nécessaire de rénover ces bâtiments, la surface de ces toitures a dû être soustraite.

Donc ces coûts s'élèvent à:  $13.812,36\text{m}^2 \times 41 \text{ €.m}^{-2} = 566.307 \text{ €}$

La surface totale des murs extérieurs des bâtiments du site d'étude est de  $28.018,09\text{m}^2$  (cf. Annexe 5), Après avoir soustrait les surfaces des murs extérieurs des bâtiments construits dès 2000, il reste  $27.117,17\text{m}^2$ .

Donc ces coûts s'élèvent à:  $27.117,17\text{m}^2 \times 30 \text{ €.m}^{-2} = 813.515 \text{ €}$

Les coûts totales de cet investissement s'élèvent alors à:

$$566.307 \text{ €} + 813.515 \text{ €} = 1.379.822 \text{ €}$$

Les coûts d'entretien s'élèvent dans ce cas à 0 €.

*Coûts des PAC air/eau*

*coûts d'investissement PAC air – eau Luxembourg:*

$$16.000 \text{ €} - 25\% \text{ subvention} = 12.000 \text{ €} [78]$$

Afin de calculer la puissance nominale moyenne d'une PAC air/eau qui était nécessaire pour notre site d'étude, quelques suppositions ont dû être réalisées.

On sait alors qu'un ménage moyen au Luxembourg réside sur une surface de  $129,9\text{m}^2$  [79].

On peut donc supposer 2 étages de  $65\text{m}^2$  ou un seul étage avec  $129,9\text{m}^2$ , au niveau du volume

chauffé, cela ne joue pas un rôle influent. Ce volume peut être calculé avec l'estimation réaliste qu'un étage a une hauteur de 2,5 mètres [80].

$$Volume \text{ chauffé} = 129,9m^2 \times 2,5m = 324,75m^3$$

Le coefficient de construction a été mis à 1,1 [81] afin de représenter un bâtiment bien isolé mais ne répondant à aucune des normes RT. Ces normes proviennent d'une réglementation environnementale introduite en 2000 et vue que la plupart des bâtiments de Petit-Nobressart datent du dernier siècle, cette norme ne peut pas être considérée comme représentative d'un bâtiment type du site d'étude.

La température extérieure de base a été mise à -15°C en repérant la localisation du Luxembourg sur une carte de la France [82] indiquant ces valeurs en fonction de la localisation et d'élévation. Cette élévation était contenue entre 300 et 400 mètres [83] ce qui nous a ramené à la valeur de -15°C.

La puissance nominale moyenne peut alors être calculée comme suit:

$$324,75m^3 \times 1,1 \frac{W}{K \times m^3} \times [20^\circ C - (-15^\circ C)] = 12,5kW$$

La valeur de 20°C représente dans ce cas la valeur désirée de la température ambiante à l'intérieur du bâtiment.

Vu qu'on compte aussi chauffer l'ECS avec cette PAC air/eau, il faut ajouter 250W par personne [84]. Pour le scénario 1, on a déjà calculé qu'en général, il y a 2,39 personnes par ménage [45] [46]. On arrive donc à la modification suivante concernant la puissance nominale moyenne d'une PAC air/eau.

$$12,5kW + 2,39 \times 0,25kW = 13,1kW$$

Vu qu'une PAC air/eau type coûte 12.000 € (installation et subventions inclus), on peut estimer que les coûts d'investissement s'élève alors à 916,21 €.kW<sup>-1</sup> de puissance installée.

$$valeur \text{ CEA: coût d'investissement} = 1.052.950 \text{ USD2015} = 1.058.072 \text{ €}$$

Ce prix est beaucoup plus élevé qu'une simple multiplication du prix moyen d'une PAC air/eau par le nombre des bâtiments du site d'étude (720.000 €). On pourrait expliquer ceci par le fait que dans ce village, on habite généralement sur une surface plus large que la norme luxembourgeoise vu que la densité de population est généralement moins élevée dans une zone rurale. Cela conduit forcément à des besoins et des consommations énergétiques plus importantes.

Ensuite, le besoin en électricité des PACs est partiellement couvert par les installations PV sur les toitures des bâtiments. Afin de déterminer le besoin en énergie électrique restante, on a soustrait les valeurs horaires de production par les valeurs horaires de demande pour chaque bâtiment individuel (cf. Table 18).

|      | GI           | GJ           | GK          |
|------|--------------|--------------|-------------|
| 3    | GRID_tot_kWh | E_rest_kWh   | E_utile_kWh |
| 4    | 67,73        | 67,73        | 0,00        |
| 5    | 74,15        | 74,15        | 0,00        |
| 6    | 81,32        | 81,32        | 0,00        |
| 7    | 91,93        | 91,93        | 0,00        |
| 8    | 100,03       | 100,03       | 0,00        |
| 9    | 128,80       | 128,80       | 0,00        |
| 8751 | 346,57       | 255,80       | 90,77       |
| 8752 | 496,24       | 412,41       | 83,83       |
| 8753 | 337,38       | 265,63       | 71,75       |
| 8754 | 309,81       | 309,81       | 0,00        |
| 8755 | 298,39       | 298,39       | 0,00        |
| 8756 | 304,74       | 304,74       | 0,00        |
| 8757 | 330,08       | 330,08       | 0,00        |
| 8758 | 481,92       | 481,92       | 0,00        |
| 8759 | 510,59       | 510,59       | 0,00        |
| 8760 | 299,03       | 299,03       | 0,00        |
| 8761 | 112,56       | 112,56       | 0,00        |
| 8762 | 106,22       | 106,22       | 0,00        |
| 8763 | 69,80        | 69,80        | 0,00        |
| 8764 |              |              |             |
| 8765 | 1.915.197,16 | 1.482.318,06 | 432.879,10  |
| 8766 |              |              |             |

Table 18: Table simplifiée des calculs effectués sur base horaire - Scénario 2

Cette tâche a été automatisée en utilisant des macros en Excel afin d'économiser du temps (cf. Figure 22). La signification du codage utilisé se résume essentiellement à une boucle automatisée qui ouvre un premier fichier Excel, copie une plage spécifique de cellules, la colle dans une plage spécifiée du fichier de destination, ferme le premier fichier Excel et ouvre le suivant où la même tâche est répétée pour tous les bâtiments du site étudié. Le même code que l'on peut voir dans la figure 22 a été modifié plusieurs fois pour s'appliquer à d'autres cas où un code similaire était nécessaire. Le code est indiqué pour des raisons de transparence de ce travail.

```

Private Sub CommandButton1_Click()
Dim i As Long
Dim wb As Workbook
Application.ScreenUpdating = False

For i = 1 To 60 Step 1

Set wb = Workbooks.Open("C:\Users\Max Gillen\Documents\MDD\Semestre4\TFE\Excel_sheets\Scénario2\demand\B" & i + 999 & ".csv")
With wb.Sheets("B" & i + 999)

wb.Sheets(1).Range("F1:F8761").Copy
ThisWorkbook.Sheets(1).Range("K3").Offset(columnoffset:=3 * i - 3).PasteSpecial xlPasteValues
wb.Application.CutCopyMode = False
wb.Close True

End With

Set wb = Workbooks.Open("C:\Users\Max Gillen\Documents\MDD\Semestre4\TFE\Excel_sheets\Scénario2\production\B" & i + 999 & "_PV.csv")
With wb.Sheets("B" & i + 999 & "_PV")

wb.Sheets(1).Range("F1:F8761").Copy
ThisWorkbook.Sheets(1).Range("L3").Offset(columnoffset:=3 * i - 3).PasteSpecial xlPasteValues
wb.Application.CutCopyMode = False
wb.Close True

End With

Next i

Set wb = Nothing
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

```

Figure 22: Code pour automatiser une tâche répétitive en Excel en langue VisualBasic Assistant

Il reste alors 1.482,32 MWh à acheter du réseau électrique (cf. Table 18).

Ces coûts représentent des coûts opérationnels variables.

$$\text{coûts d'électricité achetée du réseau} = 0,176 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \times 1.482.318 \text{ kWh}$$

$$= 259.967 \text{ €}$$

$$\text{coûts d'entretien (opérationnels fixes): } 60 * 190 \text{ €. an}^{-1} = 11.400 \text{ €. an}^{-1}$$

### Recettes annuelles

Afin de pouvoir estimer les recettes de l'injection d'électricité du site d'étude, il est important de connaître la taille de l'installation qui compte injecter de l'électricité. Ceci détermine la classe des tarifs qui s'applique à ladite injection. La valeur moyenne de production d'électricité des bâtiments du site d'étude s'élève à  $12.164 \text{ kWh.an}^{-1}$ . On peut donc supposer une taille moyenne d'installation PV de 12 kWc [72]. On rentre alors dans la classe qui paye  $0,1415 \text{ €. kWh}^{-1}$  [85].

$$\text{bénéfice d'électricité injecté} = 0,1415 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \times 296.950 \text{ kWh} = 42.018 \text{ €}$$

### Coûts accumulés

$$\begin{aligned} \text{dépenses initiales} &= \text{coûts d'enlèvement} + \text{coûts d'investissement PV} \\ &+ \text{coûts des rénovations} + \text{coûts d'investissement PAC} \\ &= 4.220.859 \text{ €} \end{aligned}$$

Naturellement, ces coûts d'investissement sont répartis entre les 60 bâtiments, mais pas de manière égale. Le montant à payer en termes d'investissement pour chaque bâtiment dépend de la taille et des exigences énergétiques du bâtiment. En guise d'approximation, on peut diviser cette somme totale des coûts d'investissement entre tous les bâtiments, pour avoir une meilleure idée de la somme à dépenser au niveau individuel.

$$4.220.859 \text{ €} / 60 = 70.348 \text{ €}$$

Il s'agit d'une somme d'argent que le citoyen moyen du Luxembourg ne peut pas payer à partir de ses réserves financières. Il est recommandé de disposer d'une réserve de 10.000 € [86] et comme cette réserve est destinée à être dépensée pour des nécessités absolues, il serait plus réaliste d'estimer un prêt de la totalité de la somme qui doit être payée. Cela revient à une somme proche du maximum de ce qu'indique le prétendu outil de simulation de la banque BIL, qui serait de 75.000 € [87]. Cet outil de simulation fonctionne par pas de 1.000 €, nous avons donc décidé d'arrondir le coût à 71.000 € pour tenir compte des frais supplémentaires négligés. De plus, si nous supposons que le citoyen moyen du

Petit-Nobressart a plus de 30 ans, le taux sera fixé à 3% au lieu de 2,5%. La durée du crédit sera également fixée au maximum pour que l'impact des dépenses mensuelles soit le plus faible possible. Ainsi, ce crédit aura une durée totale de 60 mois.

La mensualité résultante serait alors de 1.276 € pour chaque immeuble. Petit-Nobressart étant composé de 60 bâtiments, le coût total annuel de remboursement des prêts s'élèverait à ce qui suit :

$$1.276 \text{ €} \times 60 \times 12 = 918.562 \text{ €}$$

Il faudrait alors payer pendant une durée de 60 mois, soit 5 années consécutives.

$$\begin{aligned} \text{dépenses annuelles} &= \text{coûts opérationnels fixes PV} + \text{coûts opérationnels variables PV} \\ &+ \text{coûts opérationnels fixes PAC} + \text{coûts opérationnels variables PAC} \\ &+ \text{coûts d'électricité achetée du réseau} \\ &= 271.367 \text{ €} + 113.776 \text{ €. } 5an^{-1} \end{aligned}$$

Les 5 premières années des investissements, des dépenses supplémentaires de 918.562 € doivent alors être prises en considération.

$$\text{Recettes} = \text{bénéfice d'électricité injecté} = 42.018 \text{ €. } an^{-1}$$

Afin de faciliter la vue d'ensemble de l'analyse technico-économique, la table 19 est censée synthétiser les valeurs économiques qu'on a fixées.

|   |                |
|---|----------------|
| Coûts d'enlèvement des anciennes technologies | 60.815€        |
| Coûts des investissements PV                  | 1.722.149€     |
| Coûts opérationnels fixes PV                  | 113.776 €/5ans |
| Coûts opérationnels variables PV              | 0 €/an         |
| Coûts de rénovations                          | 1.379.822€     |
| Coûts des investissements PAC                 | 1.058.072€     |
| Coûts opérationnels fixes PAC                 | 11.400 €/an    |
| Coûts opérationnels variables PAC             | 259.967 €/an   |
| Coûts d'électricité achetée du réseau         | idem.          |
| Mensualités des investissements               | 918.562 €/an   |
| Dépenses annuelles                            | 271.367 €/an   |
| Recettes                                      | 42.018 €/an    |
| Dépenses - Recettes (annuelle)                | variables      |

Table 19: Synthèse des valeurs économiques du Scénario 2

La valeur résiduelle de toutes ces installations à la fin des 20 prochaines années est quand même considérable, car le système entier a atteint la fin de son cycle de vie. Si on estime la valeur résiduelle alors à -288.000 € afin de pouvoir remplacer toutes les PAC à leurs fin de cycle de vie ( $4.800 \text{ €} \times 60$ )[\[88\]](#), on arrive à un coût de cycle de vie de ce scénario de **8.464.029 €** (cf. Annexe 6).

### Scénario 3

Le troisième scénario porte sur une nouvelle technologie, qui a fait son apparition sur le marché des technologies renouvelables. Il s'agit des panneaux PVT qui génèrent de l'électricité et qui peuvent en même temps être utilisés pour supporter un système de chauffage [\[89\]](#). Ils sont essentiellement constitués d'un échangeur de chaleur sous forme d'un panneau solaire thermique, surmonté d'un panneau PV.

Ils ont été choisis pour composer ce scénario en grande partie en raison de sa disponibilité dans le logiciel CEA, mais aussi parce qu'ils promettent d'améliorer l'indépendance en termes d'électricité et de chaleur à la fois, donc avec un seul investissement. Cependant, ce scénario suppose que ces panneaux sont installés sur tous les toits du village étudié.

La figure 23 montre le potentiel énorme qui existe ici. Le faisceau gauche des mois respectifs représente la production d'électricité et le faisceau droit la chaleur extraite des échangeurs de chaleur des panneaux PVT. En rouge on peut voir l'énergie extraite des panneaux fixés sur les murs au sud et en jaune l'énergie extraite des panneaux sur les toitures. Le potentiel en jaune est donc l'information clé de ce graphe, vu qu'on se préoccupe exclusivement des panneaux PVT installé sur les toitures.

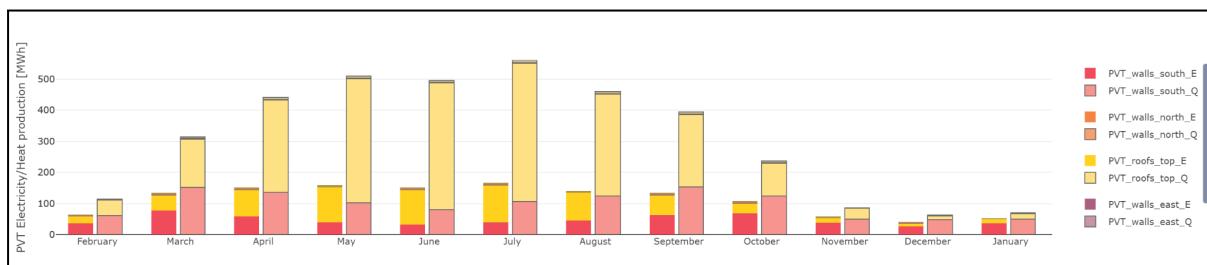


Figure 23: Potentiel PV & ST

Afin de déterminer des données d'importance pour les calculs suivants, la table 20 a été construite en utilisant une version légèrement modifiée du macro utilisé dans le scénario 2.

|      | SL               | SM             | SN                  | SO                  | SP             | SQ          | SR             | SS          |
|------|------------------|----------------|---------------------|---------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| 2    | Qtot_village_kWh | E_syst_tot_kWh | PVT_roofs_top_Q_kWh | PVT_roofs_top_E_kWh | Q_restante_kWh | Q_utile_kWh | E_restante_kWh | E_utile_kWh |
| 3    | 314,97           | 40,14          | 0,00                | 0,00                | 306,52         | 8,45        | 40,14          | 0,00        |
| 4    | 335,48           | 40,16          | 0,00                | 0,00                | 326,79         | 8,69        | 40,16          | 0,00        |
| 5    | 351,08           | 40,16          | 0,00                | 0,00                | 342,13         | 8,95        | 40,16          | 0,00        |
| 8757 | 717,24           | 249,16         | 0,00                | 0,00                | 705,68         | 11,56       | 249,16         | 0,00        |
| 8758 | 660,62           | 309,72         | 0,00                | 0,00                | 649,47         | 11,15       | 309,72         | 0,00        |
| 8759 | 716,37           | 73,15          | 0,00                | 0,00                | 704,19         | 12,18       | 73,15          | 0,00        |
| 8760 | 294,33           | 71,44          | 0,00                | 0,00                | 286,78         | 7,55        | 71,44          | 0,00        |
| 8761 | 303,92           | 70,06          | 0,00                | 0,00                | 296,06         | 7,86        | 70,06          | 0,00        |
| 8762 | 311,08           | 40,13          | 0,00                | 0,00                | 302,82         | 8,26        | 40,13          | 0,00        |
| 8763 |                  |                |                     |                     |                |             |                |             |
| 8764 | 3.650.964,07     | 752.899,81     | 2.478.076,56        | 733.523,67          | 2.961.387,64   | 689.576,43  | 525.692,05     | 227.207,76  |

Table 20: Table simplifiée des calculs effectués sur base horaire - Scénario 3

Si on suppose alors que la demande en chaleur reste la même qu'au scénario 1, le taux d'autosuffisance énergétique pourrait être calculé comme suit:

$$TAS(e) = \frac{\text{énergie électrique produite localement}}{\text{demande en électricité total}} = \frac{733.523,7 \text{ kWh}}{752.907 \text{ kWh}} = 97,4\%$$

$$TAS(c) = \frac{\text{énergie thermique produit localement}}{\text{demande en chaleur total}} = \frac{2.478.077 \text{ kWh}}{3.650.964,07 \text{ kWh}} = 67,8\%$$

$$TAS = \frac{3.211.600,7 \text{ kWh}}{4.403.871,07 \text{ kWh}} = 72,9 \%$$

Le problème ici c'est que la demande en chaleur est très élevée en hiver où il y a la plus faible production d'énergie thermique par les panneaux PVT. Ceci veut dire qu'une large partie de la chaleur produite est perdue, ce qui baisse le TAS(c). Pour considérer ce phénomène, il est alors important de prendre la différence entre la demande de chaleur horaire et la production de chaleur horaire afin d'arriver à la production de chaleur qui est effectivement exploitable. Pourtant, le besoin en énergie électrique n'est aussi pas couvert parfaitement ce qui influence le TAC, mais ne joue aucun rôle en termes de TAS(e).

$$TAC = \frac{\text{énergie électrique produite et consommée localement}}{\text{demande en électricité total}} = \frac{227.207,761 \text{ kWh}}{752.907 \text{ kWh}} = 30,2\%$$

$$TAS(c) = \frac{\text{énergie thermique utile produit localement}}{\text{demande en chaleur total}} = \frac{689.576,43 \text{ kWh}}{3.650.964,07 \text{ kWh}} = 18,9\%$$

$$TAS = \frac{\text{énergie électrique produite localement} + \text{énergie thermique utile produit localement}}{\text{demande énergétique totale}}$$

$$= \frac{1.423.100,13 \text{ kWh}}{4.403.871,07 \text{ kWh}} = 32,3\%$$

Ce qui est pertinent ici est que la chaleur non utilisée est effectivement perdue, mais l'électricité non utilisée est injectée dans le réseau.

### Coûts des panneaux PVT

Les coûts d'investissement des panneaux PVT peuvent être calculés à partir du fichier .csv fourni par CEA. Ici, la surface occupée par les panneaux est indiquée individuellement pour chaque bâtiment du site. Cette somme peut alors être divisée par la surface d'un panneau PVT type pour approximer combien de panneaux il nécessite pour atteindre les valeurs données de production de chaleur et d'électricité.

$$5.171,62m^2 / 1,98m^2 = 2.611,93 \text{ panneaux} \quad [90]$$

Si on opte alors pour couvrir un maximum d'espace des toitures, on arrive à 2.611 panneaux PVT.

On peut alors continuer avec une supposition du prix unitaire d'un panneau PVT. Ici, le prix est plus élevé que chez un panneau PV ordinaire et vu qu'il s'agit d'une nouvelle technologie, il n'est pas clair si on profite des subsides de l'État. On suppose alors que le consommateur doit couvrir les coûts d'investissement sans aides gouvernementales.

Ce prix unitaire s'élève alors à:  $11.850\text{€} / 4\text{ kWc}$  [\[89\]](#) =  $2,96 \text{ €. Wc}^{-1}$

La puissance d'un module peut être estimée à 380Wc [\[90\]](#).

Avec ces estimations, on peut calculer les coûts d'investissement totaux:

$$2,96 \frac{\text{€}}{\text{Wc}} \times 380 \frac{\text{Wc}}{\text{panneau}} = 1.124,8 \frac{\text{€}}{\text{panneau}}$$

$$\text{coûts d'investissement: } 2.611 \text{ panneaux} \times 1.124,8 \frac{\text{€}}{\text{panneau}} = 2.936.853\text{€}$$

Les coûts d'investissement par bâtiment s'élèveraient alors à 48.848 €, qui devraient être payés en demandant un prêt de 49.000 €. Cela conduirait à des mensualités de 880 € en utilisant les mêmes hypothèses et l'outil de simulation de prêt que pour le scénario 2. Le montant suivant devrait donc être remboursé annuellement dans un délai de 5 ans :

$$880 \text{ €} \times 60 \times 12 = 633.938 \text{ €}$$

Recettes annuelles

$$\begin{aligned} \text{électricité vendu} &= \text{production d'électricité non utilisée} \times \text{tarif d'injection} \\ &= 506.315,939 \text{ kWh} \times 0,1415 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 71.644 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\text{Recettes} = \text{électricité vendu} = 71.644 \text{ €}$$

## Coûts accumulés

En ce qui concerne l'entretien, le même processus de nettoyage que pour les panneaux PV ordinaires s'applique.

$$\text{coûts d'entretien PVT} = 22 \frac{\text{€}}{m^2} \times 5.171,62 m^2 = 113.776 \text{ €}$$

En ce qui concerne les dépenses annuelles, il faut toujours acheter une somme considérable de mazout, de gaz naturel et d'électricité comme au scénario 1, mais déjà beaucoup moins (cf. Annexe 7).

$$\text{dépenses de chauffage} = 4.031.570 kWh \times 0,064 \frac{\text{€}}{kWh}$$

$$+ 940.243 kWh \times 0,039 \frac{\text{€}}{kWh}$$

$$+ 2.001,91 kWh \times 0,176 \frac{\text{€}}{kWh}$$

$$= 294.867 \text{ €}$$

$$\text{énergie électrique achetée} = 525.699,239 \frac{kWh}{an} \times 0,176 \frac{\text{€}}{kWh}$$

$$= 92.196 \text{ €/an}$$

$$\text{coûts supplémentaires} = \text{coûts d'entretien du scénario 1} + \text{coûts de remplacements des chaudières}$$

$$\text{coûts supplémentaires} = 9.820 \text{ €/an} + 13.620 \text{ €/an} = 23.440 \text{ €/an}$$

$$\begin{aligned} \text{dépenses annuelles} &= \text{coûts d'entretien PVT} + \text{dépenses de chauffage} \\ &\quad + \text{énergie électrique achetée} + \text{coûts supplémentaires} \end{aligned}$$

$$= 113.776 \text{ €/5ans} + 294.867 \text{ €} + 92.196 \text{ €/an} + 23.440 \text{ €/an}$$

$$= 410.503 \text{ €} + 113.776 \text{ €/5ans}$$

Les 5 premières années, des dépenses supplémentaires de 633.938 € doivent être prises en considération.

Finalement, il reste à indiquer la table de synthèse des données de ce scénario pour donner un aperçu des données économiques (cf. Table 21).

|   |                     |                      |
|---|---------------------|----------------------|
| Coûts des investissements PVT               | 2.936.853 €         |                      |
| Coûts d'entretien (opérationnels fixes)     | 113.776 €/5ans      |                      |
| Coûts opérationnels variables (chauffage)   | 294.867 €/an        |                      |
| Coûts opérationnels variables (électricité) | 92.196 €/an         |                      |
| Coûts supplémentaires                       | 23.440 €/an         |                      |
| Mensualités des investissements             | <b>633.938 €/an</b> | <b>pour 5 ans</b>    |
| Dépenses annuelles                          | <b>410.503 €/an</b> | <b>113.776 €/5an</b> |
| Recettes                                    | <b>71.644 €/an</b>  |                      |
| Dépenses - Recettes (annuelle)              |                     | variables            |

Table 21: Synthèse des valeurs économiques du Scénario 3

La valeur résiduelle de ce scénario à la fin des 20 prochaines années a été estimée à 978.951 € ( $\frac{1}{3} \times 2.936.853 €$ ), car la durée de vie de ces panneaux PVT est à 30 ans [91] et alors on pourrait simplement continuer à les exploiter. Donc on arrive à un coût du cycle de vie de ce scénario de **8.066.190 €** (cf. Annexe 8).

## 4. Résultats

Si on compare le scénario 2, qui consistait principalement en des PAC et des panneaux PV et le scénario 3, qui consistait en des panneaux PVT avec le scénario de référence (scénario 1), on constate que le coût du cycle de vie est le moins élevé pour le scénario de référence et le plus élevé pour le scénario 2. Ceci n'est pas une exception dans le domaine des énergies. Pourtant, la différence des coûts d'une option à l'alternative verte est ce que Bill Gates appelle la prime verte. La prime verte fait alors référence aux coûts additionnels qu'on doit payer pour l'alternative verte d'un produit émettant des quantités considérables de gaz à effet de serre. Afin d'arriver à zéro carbone net en 2050, il faut commencer par les changements avec la moindre prime verte, comme le photovoltaïque [92]. Cette prime verte aide aussi à prendre en compte les coûts liés à l'environnement qu'on peut généralement éviter en évitant cette alternative verte.

Cependant, le scénario 2 a une prime verte de 712.937€ (cf. Figure 24), vu que ce montant représente le surplus qui est à payer afin d'augmenter l'indépendance des combustibles fossiles du site d'étude. Le taux d'autosuffisance énergétique qui correspond à ce scénario est de 38,1%. Il existe des sources fiables indiquant qu'un investissement dans le domaine des PAC est financièrement irrationnel et que les PAC peuvent seulement être vues comme bénéficiaires en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> [93]. Généralement, les installations PV ont la réputation d'être économiquement rentables même sans subsides gouvernementaux et cet effet est renforcé plus que le prix unitaire d'électricité croît [94]. Pourtant, la combinaison de ces deux investissements avec les rénovations et les enlèvements

des anciennes technologies n'a pas pu être rendue lucrative par les installations PV. Les coûts d'investissement sont trop élevés pour les compenser par le bénéfice des installations PV.

La prime verte du scénario 3 est de 315.098 € (cf. Figure 24) et ce scénario permet un taux d'autosuffisance de 32,3%. Le bénéfice de l'injection d'énergie électrique dans le réseau n'était pas suffisant pour annuler les coûts d'investissement des panneaux PVT. Ceci pourrait être expliqué par le prix élevé de ces panneaux en les comparant avec des panneaux PV ordinaires. Par contre, la prime verte est moins élevée que pour le scénario 2.

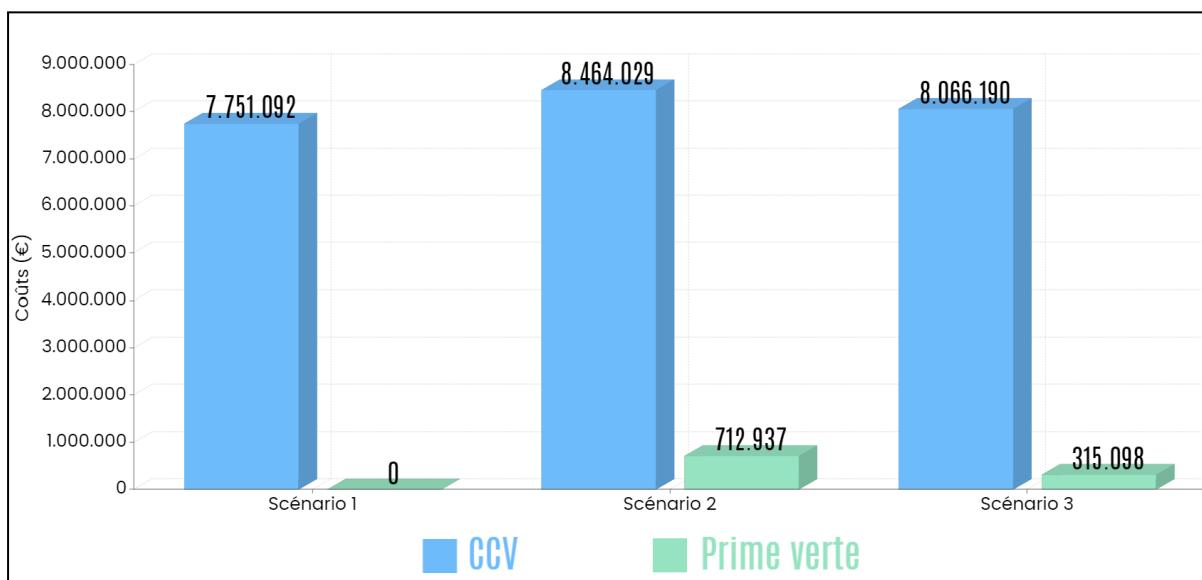


Figure 24: CCV comparatif des scénarios 1 & 2

Le scénario 3 était dès le début une façon de complémenter un système existant au lieu de remplacer ce système dans son intégralité.

Le coût du cycle de vie du scénario 2 est de 8.464.029 € et son taux d'autosuffisance énergétique est de 38,1%, ce qui vaut  $222.095 \frac{\text{€}}{\%}$ . Pourtant, le coût du cycle de vie du scénario 3 est de 8.066.190 € et son taux d'autosuffisance énergétique est de 32,31%, ce qui vaut  $249.650 \frac{\text{€}}{\%}$ . Son prix par pourcentage d'autosuffisance est alors de 12,4% plus élevé que celui du scénario 2.

$$\frac{CCV/TAS \text{ Scénario 3}}{CCV/TAS \text{ Scénario 2}} - 1 = 12,4 \%$$

Ceci implique que le scénario 2 pourrait être économiquement intéressant même si son coût du cycle de vie est plus élevé. Le fait que son taux d'autosuffisance soit élevé d'un facteur plus important le rend intéressant.

$$\frac{CCV \text{ Scénario 2}}{CCV \text{ Scénario 3}} - 1 = \frac{8.464.029,21 \text{ €}}{8.066.189,89 \text{ €}} - 1 = 4,9 \%$$

$$\frac{TAS \text{ Scénario 2}}{TAS \text{ Scénario 3}} - 1 = \frac{38,11 \%}{32,31 \%} - 1 = 18 \%$$

La table 22 donne une vue synthétique des résultats en relation avec les hypothèses prises pour chaque scénario.

|                             | Scénario 1   | Scénario 2   | Scénario 3   |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Conservation des chaudières | ✓            | ✗            | ✓            |
| Rénovations d'isolations    | ✗            | ✓            | ✗            |
| PAC air/eau                 | ✗            | ✓            | ✗            |
| panneaux PV/PVT             | ✗            | ✓            | ✓            |
| CCV (€)                     | 7.751.092,00 | 8.464.029,00 | 8.066.190,00 |
| CCV (%)                     | 100          | 109,2        | 104,1        |
| Prime verte (€)             | 0            | 712.937,00   | 315.098,00   |
| TAS (%)                     | 0            | 38,1         | 32,3         |
| CCV/TAS (€/%)               | ∞            | 222.095,00   | 249.650,00   |

Table 22: Synthèse des résultats

## 5. Discussion

### *Revue du logiciel CEA*

CEA a fait preuve de fiabilité sur une grande échelle, mais les données de sortie sur une petite échelle (bâtiments individuels) doivent être vues avec un œil critique. Pour illustrer cette affirmation, on peut diviser les coûts totaux de chauffage du scénario 1 par le nombre de bâtiments de la zone étudiée, ce qui donnerait 5.540 €. Pour répondre à la question de savoir pourquoi ce prix est si élevé, on peut examiner les hypothèses que le logiciel CEA formule sur la base des fichiers SIG. En comparant la représentation 3D du village dans CEA (cf. Figure 10) avec le site d'étude en vie réelle, on peut identifier que de nombreux grands hangars ont été pris en compte comme des bâtiments ordinaires avec plusieurs étages et une demande de chauffage. C'est ce qui fait forcément augmenter la consommation de chauffage et donc le prix à payer. Cela met en évidence le fait que cet outil fonctionne plus précisément dans les environnements urbains, où il y a moins de bâtiments sans demande de chauffage.

Un autre point négatif de CEA serait que les données de sortie des simulations du logiciel ont distribué les coûts opérationnels variables aléatoirement aux bâtiments, ce qui n'est pas grave si on se préoccupe des valeurs totales, mais dans la vie réelle cela voudrait dire qu'un des voisins reçoit une facture de chauffage qui ne correspond pas à sa consommation. Pourtant, ceci n'est pas le seul axe d'amélioration qu'on remarque lorsqu'on travaille avec le logiciel CEA. Les points suivants soulignent davantage les domaines qui laisse une marge d'amélioration.

- Sauvegarder des bases de données ne marchait pas, on a dû les exporter pour les sauvegarder
- Importer un scénario lors de la création d'un autre ne marchait pas, ce qui n'est pas grave car on a pu créer plusieurs bases de données afin de les échanger pour chaque scénario de pertinence
- Surface des murs des bâtiments était à extraire des fichiers .csv individuels pour chaque bâtiment et ils étaient subdivisés par rapport à leurs orientations. On a alors dû créer un nouveau document Excel pour sommer ces variables issues d'une multitude des fichiers .csv . Pour plus de 60 bâtiments, cette tâche deviendrait simplement irréalisable. Pourtant, il existe une façon d'éviter cette tâche répétitive en l'automatisant. Le maître mot c'est «macros», une des fonctions d'Excel qui permet d'automatiser des tâches répétitives.

De plus, le CEA pourrait donner la possibilité d'implémenter la capacité AgriPV afin d'augmenter d'autant plus l'exploitation du potentiel solaire. AgriPV se réfère aux installations des panneaux PV sur des terres agricoles qui peuvent alors être exploitées en termes d'alimentation ainsi que d'électricité [95].

Tous ces commentaires montrent que le CEA dispose clairement d'axes d'amélioration, néanmoins il existe beaucoup d'aspects qui ont été appréciés comme la facilité de générer des graphiques, la base de donnée suisse qui est composé de nombreuses suppositions qui sont proche de la réalité, la convivialité, le fait que le logiciel soit disponible gratuitement et le fait que le logiciel ne nécessite pas d'ordinateur de haute performance.

## *Revue des scénarios*

### *Généralités*

Premièrement, il est important d'attirer l'attention sur le fait que l'auto-suffisance à 100% serait déraisonnable d'un point de vue économique. Globalement, il sera plus judicieux de diriger les efforts vers un Net Zero Energy District (NZED) ou un Positive Energy District (PED). Selon [96], il est possible de réduire les Life Cycle Costs (LCC) ou coûts du cycle de vie (CCV) par 49% si on atteint une auto-suffisance de 95% (PED) et une réduction du CCV de 66% si on atteint une auto-suffisance de 76% (NZED) (cf. Figure 25). Pour nos scénarios, les TAS sont beaucoup moins élevés, néanmoins il est intéressant de jeter un coup d'œil sur la relation entre le TAS et le CCV des autres cas d'études.

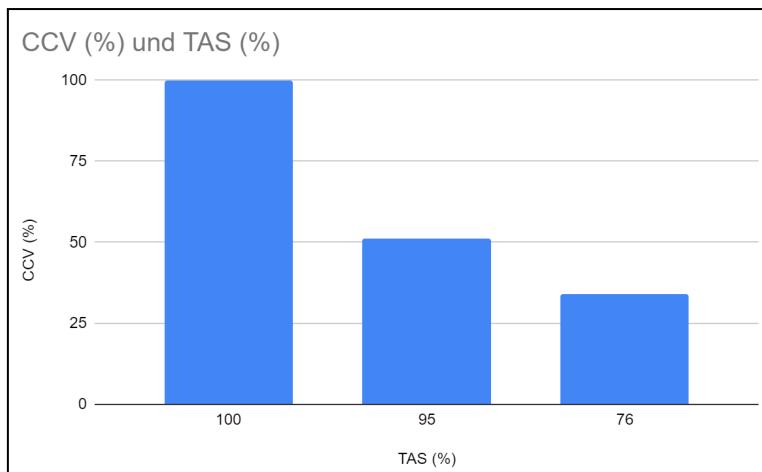


Figure 25: TAS en relation avec CCV

### *Discussion des résultats du cas d'étude*

Le but de cette étude était de simuler un MQ et d'optimiser son autosuffisance. Les scénarios simulés ayant donné des résultats prometteurs, une comparaison permettrait de mieux appréhender d'autres facteurs pouvant jouer un rôle dans la prise de décision, tels que l'importance des coûts engendrés.

Si on compare alors scénario 2 au scénario 3, on constate que le scénario 2 peut directement exploiter plus que la moitié de sa production électrique pourtant le scénario 3 doit injecter la majorité de sa production dans le réseau électrique, ce qui baisse le taux d'autoconsommation. Ceci peut être expliqué par le besoin électrique qui est constamment très élevé du côté du scénario 2. Cela montre un des avantages de la transition énergétique ou en d'autres termes l'électrification du domaine de chauffage résidentiel.

De plus, si on compare le scénario 2 avec le scénario 3 en termes d'autosuffisance énergétique (chauffage, ECS et électricité), on constate que le scénario 2 a un avantage sur le scénario 3 en termes d'autosuffisance, mais en même temps il est légèrement plus coûteux.

- Le CCV du scénario 2 est 4,9% plus élevé que chez le scénario 3
- Le taux d'autosuffisance du scénario 2 est 18% plus élevé que celui du scénario 3
- Le CCV par pourcentage d'autosuffisance du scénario 3 est 12,4% plus élevé que celui du scénario 2

Compte tenu des faits énumérés ci-dessus, le scénario favorable dépend de l'objectif de cette décision. Chaque scénario présente des arguments valables et convaincants. Si l'objectif de la décision était d'augmenter le taux d'autosuffisance énergétique du site étudié avec un budget limité, le scénario 3 serait le choix à prendre. Il est vrai que ce scénario apporte un prix plus élevé par pourcentage d'autosuffisance mais globalement, son coût du cycle de vie est moins élevé, ce qui est un facteur non négligeable lors de la prise de décision. Par contre, si l'objectif était d'optimiser le taux d'autosuffisance énergétique sans faire d'économies, le scénario 2 serait intéressant, surtout si l'on considère que l'on paie généralement moins par pourcentage d'autosuffisance que dans le scénario 3 et on atteint plus d'indépendance énergétique et donc forcément aussi plus d'autosuffisance énergétique.

Cette étude ayant limité le nombre de scénarios à 3, il n'est pas possible de se prononcer sur la relation entre le coût du cycle de vie et le taux d'autosuffisance énergétique, ni même sur l'existence d'une telle relation. Pour une future étude, il serait intéressant d'approfondir ce sujet particulier afin de trouver un équilibre optimal entre le coût du cycle de vie et le taux d'autosuffisance énergétique.

## 6. Références

### 5.1 Références des sources d'informations

- [1] «Micro-quartiers», Urbanicc, 2018, Disponible sur:  
[«https://urbanicc.fr/index.php/micro-quartiers/#:~:text=Le%20micro%2Dquartier%20est%20d%C3%A9fini»](https://urbanicc.fr/index.php/micro-quartiers/#:~:text=Le%20micro%2Dquartier%20est%20d%C3%A9fini)  
 (consulté le 12 mai 2022)
- [2] «Quartier», Larousse, Disponible sur:  
[«https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/quartier/65536»](https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/quartier/65536)  
 (consulté le 12 mai 2022)
- [3] Boutin Véronique, Feasel Mark, Cunic Kevin, Wild Jean, «Microgrids: Comment contribuent-ils à la transition énergétique», article 3.1, encyclopédie de l'énergie, Disponible sur:  
[«https://www.encyclopedie-energie.org/microgrids-comment-contribuent-ils-a-la-transition-energetique/»](https://www.encyclopedie-energie.org/microgrids-comment-contribuent-ils-a-la-transition-energetique/)  
 (consulté le 25 mars 2022)
- [4] Erkinai Derkenbaeva, Solmaria Halleck Vega, Gert Jan Hofstede, Eveline van Leeuwen, «Positive energy districts: Mainstreaming energy transition in urban areas», abstract, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 153, 2022, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121010510»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121010510)  
 (consulté le 14 avril 2022)
- [5] Edward J. Donahue, «Microgrids: Applications, Solutions, Case Studies and Demonstrations», abstract, IntechOpen, 2018, Disponible sur:  
[«https://www.intechopen.com/chapters/65253»](https://www.intechopen.com/chapters/65253)  
 (consulté le 25 mars 2022)
- [6] «Luxembourg 2020 - Energy Policy Review», chap. Executive Summary, sect. Energy Sector «Targets and Policy», paragr. 2 | International Energy Agency, 2020, Disponible sur:  
[«https://iea.blob.core.windows.net/assets/8875d562-756c-414c-bc7e-5fc115b1a38c/Luxembourg\\_2020\\_Energy\\_Policy\\_Review.pdf»](https://iea.blob.core.windows.net/assets/8875d562-756c-414c-bc7e-5fc115b1a38c/Luxembourg_2020_Energy_Policy_Review.pdf)  
 (consulté le 7 mars 2022)
- [7] Benjamin Wilkin, «18% de renouvelables dans l'électricité consommée en Belgique en 2017», Renouuelle.be, 2018, Disponible sur:  
[«https://www.renouuelle.be/fr/18-de-renouvelables-dans-lelectricite-consommee-en-belgique-en-2017/»](https://www.renouuelle.be/fr/18-de-renouvelables-dans-lelectricite-consommee-en-belgique-en-2017/)  
 (consulté le 7 mars 2022)
- [8] Lukas G. Swan & V. Ismet Ugursal, «Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques», art. 3.2.1, Section: Introduction paragr. 3, art. 5.1 «Statistical Techniques» p. 1825, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 13 Issue 8, 2009, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001949»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001949)  
 (consulté le 26 février)
- [9] M. Kavgić, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanović, M. Djurović-Petrović, «review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector», art. 2.1, Building and Environment Volume 45 Issue 7, 2010, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310000338»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310000338)  
 (consulté le 2 mars 2022)
- [10] D. Johnston, «A physically-based energy and carbon dioxide emission model of the uk housing stock», Ph.D. thesis, art. 3.3.3, paragr. 2, Leeds Metropolitan University, 2003, Disponible sur:  
[«https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.194.7917&rep=rep1&type=pdf»](https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.194.7917&rep=rep1&type=pdf)  
 (consulté le 2 mars 2022)
- [11] Usman Ali, Mohammad Haris Shamsi, Cathal Hoare, Eleni Mangina, James O'Donnell, «Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis», Fig. 6 p. 7, article 3.2.2 «Physics-based methods» paragr. 6, Fig. 10 p. 10, Fig. 8 p. 9, Energy and Buildings Volume 246, 2021, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821003571»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821003571)  
 (consulté le 24 mars 2022)
- [12] Wenliang Li, Yuyu Zhou, Kristen Cetin, Jiyong Eom, Yu Wang, Gang Chene, Xuesong Zhang, «Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures», Table 1 p. 2447, Energy Volume 141, 2017, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217319291»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217319291)  
 (consulté le 2 mars 2022)
- [13] Narjes Abbasabadi Mehdi Ashayeri, «Urban energy use modeling methods and tools: A review and an outlook», art. 2.1 «Data-driven models» p.4, Building and Environment Volume 161, 2019, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319304809?casa\\_token=XJFihcunflYAAAAA.pgI4RbH4iUIII-oWrCuonuMFmqZOclHNGGnSDiqU4s1gJmxEUfr0\\_v0Mgf6YBV51ODYhN1eIxY»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319304809?casa_token=XJFihcunflYAAAAA.pgI4RbH4iUIII-oWrCuonuMFmqZOclHNGGnSDiqU4s1gJmxEUfr0_v0Mgf6YBV51ODYhN1eIxY)  
 (consulté le 2 mars 2022)
- [14] Venkatesan Vijaya, «Which software is best suitable for Microgrid Simulation?», ResearchGate.net, 2017, Disponible sur:  
[«https://www.researchgate.net/post/Which-software-is-best-suitable-for-Microgrid-Simulation»](https://www.researchgate.net/post/Which-software-is-best-suitable-for-Microgrid-Simulation)

(consulté le 21 mars 2022)

[15] Agence Internationale d'Energie, «World Energy Outlook 2020», AIE, 2020, Disponible sur:  
[«https://www.carbonbrief.org/solar-is-now-cheapest-electricity-in-history-confirms-iea»](https://www.carbonbrief.org/solar-is-now-cheapest-electricity-in-history-confirms-iea)  
 (consulté le 13 février 2022)

[16] «Which renewable energy is better, wind or solar?», sect. «Which is more efficient?», Regen Power, 2021, Disponible sur:  
[«https://regenpower.com/articles/which-renewable-energy-is-better-wind-or-solar/»](https://regenpower.com/articles/which-renewable-energy-is-better-wind-or-solar/)  
 (consulté le 1 mars 2022)

[17] Driving electric, «Can solar panels charge an electric car?» sect. «Building a solar-powered EV charging station», 2021, Disponible sur:  
[«https://www.drivingelectric.com/your-questions-answered/132/can-solar-panels-charge-electric-car»](https://www.drivingelectric.com/your-questions-answered/132/can-solar-panels-charge-electric-car)  
 (consulté le 1 mars 2022)

[18] Enora Garreau , Yassine Abdelouadoud , Eunice Herrera , Werner Keilholz , G.-E. Kyriakodis, Vincent Partenay, Peter Riederer, «District MODeller and SIMulator (DIMOSIM) – A dynamic simulation platform based on a bottom-up approach for district and territory energetic assessment», sect. «Introduction» paragr. 2 p. 2, Energy and Buildings Volume 251, 2021, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821006381»](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821006381)  
 (consulté le 21 mars 2022)

[19] Dave Keating, «What role can district heating play in the energy transition?», Paragr. 7, art. «A city dilemma» paragr. 4, Energy Monitor, 2021, Disponible sur:  
[«https://www.energymonitor.ai/sectors/heating-cooling/what-role-can-district-heating-play-in-the-energy-transition»](https://www.energymonitor.ai/sectors/heating-cooling/what-role-can-district-heating-play-in-the-energy-transition)  
 (consulté le 13 avril 2022)

[20] «Advantages And Disadvantages – Web Apps», sect. «Disadvantages of Web apps», ObjectiveIt.com, 2015, Disponible sur:  
[«https://objectiveit.com/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-web-apps/#:~:text=Disadvantages%20Of%20Web%20Apps%3A&text=Reduced%20Speed%20%E2%80%93%20It's%20likely%20that.across%20a%20variety%20of%20browsers.»](https://objectiveit.com/blog/the-advantages-and-disadvantages-of-web-apps/#:~:text=Disadvantages%20Of%20Web%20Apps%3A&text=Reduced%20Speed%20%E2%80%93%20It's%20likely%20that.across%20a%20variety%20of%20browsers.)  
 (consulté le 21 mars 2022)

[21] «Inspection du Travail et des Mines», Éoliennes - Prescriptions de sécurité types, art. 11.3, Grand-duché du Luxembourg, 2012, Disponible sur:  
[«https://itm.public.lu/dam-assets/fr/securite-sante/conditions-types/itm-cl-1100-2000/ITM-SST-1840-2.pdf»](https://itm.public.lu/dam-assets/fr/securite-sante/conditions-types/itm-cl-1100-2000/ITM-SST-1840-2.pdf)  
 (consulté le 25 mars 2022)

[22] myenergy.lu, «Passeport énergétique», p. 1, sect. «L'évolution des exigences énergétiques pour les nouvelles constructions» p. 5, MyEnergy G.I.E., 2019, Disponible sur:  
[«https://www.myenergy.lu/fr/mediatheque/1/telechargements/telecharger/921»](https://www.myenergy.lu/fr/mediatheque/1/telechargements/telecharger/921)  
 (consulté le 14 mars 2020)

[23] «Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments», art. 2.5 p. 44, Journal officiel du Grand-Duché du Luxembourg, 2021, Disponible sur:  
[«https://data.legilux.public.lu/file/eli-etat-leg-rgd-2021-06-09-a439-jo-fr-pdf.pdf»](https://data.legilux.public.lu/file/eli-etat-leg-rgd-2021-06-09-a439-jo-fr-pdf.pdf)  
 (consulté le 14 mars 2022)

[24] Pat Barry, «Nearly Zero Energy Building Standard», sect. «What is the NZEB standard?» paragr. 1, Irish Green Building Council, 2018, Disponible sur:  
[«https://www.igbc.ie/nzeb/#:~:text=too%20E2%80%93%20nZEB%20buildings,-What%20is%20the%20nZEB%20standard%3F,bodies%20by%2031st%20December%202018.»](https://www.igbc.ie/nzeb/#:~:text=too%20E2%80%93%20nZEB%20buildings,-What%20is%20the%20nZEB%20standard%3F,bodies%20by%2031st%20December%202018.)  
 (consulté le 14 mars 2022)

[25] Zebra 2020 Data Tool, «nZEB definitions by country», Enerdata, 2020, Disponible sur:  
[«https://zebra-monitoring.enerdata.net/overall-building-activities/nzeb-definitions-by-country.html#:~:text=According%20to%20the%20EP,BD%2C%20a%20sources%20produced%20on%2Dsite%20or»](https://zebra-monitoring.enerdata.net/overall-building-activities/nzeb-definitions-by-country.html#:~:text=According%20to%20the%20EP,BD%2C%20a%20sources%20produced%20on%2Dsite%20or)  
 (consulté le 26 mars 2022)

[26] Romain Gaspar, «La commune d'Ell dans les anciennes temps - Édition 1: Petit-Nobressart»  
 Disponible uniquement sous forme de brochure à la commune d'ell, 2010  
 (consulté le 22 avril 2022)

[27] Climate.OneBuilding.Org - source du fichier météorologique du Grand-Duché du Luxembourg  
 Disponible sur:  
[«https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_6\\_Europe/default.html»](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/default.html)  
 (consulté le 16 avril 2022)

[28] Martin Ploss, Tobias Hatt, Rainer Vallentin, Michaela Kern, «Energieperspektiven Luxemburg 2010-2070, p.49, Energieinstitut Vorarlberg, 2018, Disponible sur:  
[«https://meco.gouvernement.lu/de/publications/rapport-etude-analyse/minist-economie/domaine-energie/energieperspektiven-luxemburg-2010-2070.html»](https://meco.gouvernement.lu/de/publications/rapport-etude-analyse/minist-economie/domaine-energie/energieperspektiven-luxemburg-2010-2070.html)  
 (consulté le 19 avril 2022)

[29] «Thermal mass», sect. Introduction, greenspec, Disponible sur:  
[«https://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass#:~:text='Thermal%20mass%20describes%20a%20material's,having%20low%20thermal%20mass'»](https://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass#:~:text='Thermal%20mass%20describes%20a%20material's,having%20low%20thermal%20mass')  
 (consulté le 20 avril 2022)

- [30] Dominique Groleau, «Constructions des années 1930-1950», art. Matériaux constructifs, Grand Poitiers, 2016, Disponible sur: [https://www.grandpoitiers.fr/fileadmin/Habitat\\_et\\_urbanisme/Patrimoine\\_architectural/Fiche\\_conseil\\_6\\_Constructions\\_annees\\_1930\\_1950.pdf](https://www.grandpoitiers.fr/fileadmin/Habitat_et_urbanisme/Patrimoine_architectural/Fiche_conseil_6_Constructions_annees_1930_1950.pdf)  
(consulté le 20 avril 2022)
- [31] «Air pressure n50 test», Designing Buildings, 2022, Disponible sur:  
[https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Air\\_pressure\\_n50\\_test](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Air_pressure_n50_test)  
(consulté le 20 avril 2022)
- [32] Lloyd Alter, «Every house should have a blower door test», Treehugger, 2019, Disponible sur:  
<https://www.treehugger.com/every-house-should-have-blower-door-test-4852249>  
(consulté le 20 avril 2022)
- [33] «Importance d'une bonne étanchéité», table: Taux de ventilation à 50 PA de bâtiments en fonction de l'année de construction, Energieplus-Lesite.be, 2007, Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/evaluer/etancheite-a-l-air3/evaluer-l-etancheite-a-l-air/>  
(consulté le 01 mai 2022)
- [34] Claude-V. Marsolais, «un plancher chauffant pour économiser», art. 1 paragr. 5, La presse, 2007, Disponible sur:  
<https://www.lapresse.ca/maison/renovation/200601/30/01-868559-un-plancher-chauffant-pour-economiser.php>  
(consulté le 21 avril 2022)
- [35] Gérard Scheiden, «Note importante concernant la prévention des infections à Légionnelles», Le gouvernement du Grand-Duché du Luxembourg - Ministère de la santé, 2019, Disponible sur:  
<https://mint.gouvernement.lu/dam-assets/circulaires/2019/juillet-decembre/3729-annexe.pdf>  
(consulté le 21 avril 2022)
- [36] International Energy Agency, «Luxembourg 2020 - Energy Policy Review», p. 58, IEA, 2020, Disponible sur:  
[https://iea.blob.core.windows.net/assets/8875d562-756c-414c-bc7e-5fc115b1a38c/Luxembourg\\_2020\\_Energy\\_Policy\\_Review.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/8875d562-756c-414c-bc7e-5fc115b1a38c/Luxembourg_2020_Energy_Policy_Review.pdf)  
(consulté le 20 avril 2022)
- [37] Arne Gonschor, «DIE WÄRMEPUMPE 2022 – DAS HEIZSYSTEM DER ZUKUNFT?», art. Die drei Varianten der Wärmepumpe graph. Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2001-2020, wegatech, Disponible sur:  
<https://www.wegatech.de/ratgeber/waermepumpe/>  
(consulté le 22 avril 2022)
- [38] «Prix de l'énergie», Table: *Pouvoir calorifique des autres combustibles*, Energieplus-lesite.be, Disponible sur:  
<https://energieplus-lesite.be/donnees/couts2/prix-de-l-energie/>  
(consulté le 28 avril 2022)
- [39] «Rose Des Vents», Simple Png Transparent Images, FreePikPsd, 2019, Disponible sur:  
<https://freepikpsd.com/rose-des-vents-simple-png-transparent-images/296226/>  
(consulté le 14 mai 2022)
- [40] David Bradley, «[TRNSYS-users] Type 56 Zone Air Capacitance», [TRNSYS-users] forum, 2011, Disponible sur:  
<http://lists.onebuilding.org/pipermail/trnsys-users-onebuilding.org/2011-June/021781.html>  
(consulté le 02 mai 2022)
- [41] «L'eau chaude sanitaire», art. Introduction, Agence de la transition écologique, 2016, Disponible sur:  
<https://expertises.ademe.fr/batiment/passer-a-l-action/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire#:~:text=Dans%20le%20r%C3%A9sidentiel%2C%20l'eau%20est%20%25%20pour%20la%20cuisson.>  
(consulté le 21 mai 2022)
- [42] Shady Attia, Ahmed Mustafa, Nicolas Giry, Mathieu, Popineau, Mathilde Cuchet, Numan Gulirmak, «Developing two benchmark models for post-world war II residential buildings», sect. 3.2 Figure 6.a, sect. 3.3.1 table 3, Energy and Buildings Volume 244, 2021, Disponible sur:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821003364#b0020>  
(consulté le 21 mai 2022)
- [43] Stephen Marcus, «How much energy do you use to heat your home, and what's the cost?», sect. Energy consumption by country: comparing the energy used to heat your home to European standards graphe, Ovoenergy.com, 2021, Disponible sur:  
<https://www.ovovenergy.com/guides/energy-guides/how-much-heating-energy-do-you-use>  
(consulté le 21 mai 2022)
- [44] Jeremy Zabatta, «La consommation d'électricité a augmenté au Luxembourg», art. Le prix de l'énergie en légère hausse paragr. 2, LeQuotidien.lu, 2016, Disponible sur:  
<https://lequotidien.lu/a-la-une/la-consommation-delectricite-a-augmente-au-luxembourg/>  
(consulté le 19 mai 2022)
- [45] «La démographie luxembourgeoise en chiffres», Statec, 2022, Disponible sur:  
<https://statistiques.public.lu/fr/publications/series/en-chiffres/2022/20220511.html>  
(consulté le 18 mai 2022)
- [46] «Le Luxembourg en chiffres 2021», p. 14 table ménages et constructions, Statec, 2021, Disponible sur:  
<https://luxembourg.public.lu/dam-assets/publications/le-luxembourg-en-chiffres/luxembourg-chiffres.pdf>

(consulté le 18 mai 2022)

[47] Anne Prigent et Hervé Quintin, «CONSUMMATION ÉLECTRIQUE DANS LES ÉLEVAGES LAITIERS 800 élevages enquêtés, Bretagne Contrôle Laitier, 2010, Disponible sur:  
[http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/13035/\\$File/Consommation%20%C3%A9lectrique%20dans%20les%20%C3%A9levages%20laitiers.%20800%20%C3%A9levages%20enqu%C3%AAt%C3%A9s.pdf?OpenElement](http://www.chambres-agriculture-bretagne.fr/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/13035/$File/Consommation%20%C3%A9lectrique%20dans%20les%20%C3%A9levages%20laitiers.%20800%20%C3%A9levages%20enqu%C3%AAt%C3%A9s.pdf?OpenElement)  
(consulté le 17 mai 2022)

[48] «TAILLE DES STABULATIONS POUR LES BOVINS ALLAITANTS.», ProvinceDeLiege.be, Disponible sur:  
<https://www.provincedeliege.be/sites/default/files/media/358/Taille%20stabulation%20bovins%20allaitant.pdf>  
(consulté le 17 mai 2022)

[49] Andrea Lubbeck, «Essence à 2\$/L: voici exactement pourquoi la guerre en Ukraine fait monter le prix de l'essence ici», 24heures.ca, 2022, Disponible sur:  
<https://www.24heures.ca/2022/03/09/essence-a-2-l-voici-pourquoi-la-guerre-en-ukraine-a-un-impact-sur-le-prix-de-lessence-ici>  
(consulté le 02 mai 2022)

[50] «Official prices and history», art. Maxima Price History Petrol.lu, Disponible sur:  
<http://www.petrol.lu/en/official-prices/>  
(consulté le 02 mai 2022)

[51] Jeremy Zabatta, «Mazout, gaz, carburants... les prix flambent», figure: Évolution du prix du litre de mazout depuis 2008 au Luxembourg, Paperjam.lu, 2021, Disponible sur:  
<https://paperjam.lu/article/mazout-gaz-carburant-prix-flam#:~:text=En%20analysant%20l'%C3%A9volution%20des%20augment%C3%A9s%20de%2034%C2%25>  
(consulté le 02 mai 2022)

[52] N. Sønnichsen, « of natural gas for industry in Luxembourg from 2008 to 2020», graphe | Statistica.com, 2022, Disponible sur:  
<https://www.statista.com/statistics/595636/natural-gas-price-luxembourg/>  
(consulté le 03 mai 2022)

[53] Aaron Grunwald, «Taxes have pushed up Luxembourg's natural gas bills», Art. Electricity prices for EU household consumers, Delano.lu, 2021, Disponible sur:  
<https://delano.lu/article/taxes-have-pushed-up-luxembourg>  
(consulté le 03/05/2022)

[54] «Luxembourg - prix de l'électricité domestique», 2ième graphe, CountryEconomy.com, 2021, Disponible sur:  
<https://fr.countryeconomy.com/energie-et-environnement/electricite-prix-domestique/luxembourg>  
(consulté le 03 mai 2022)

[55] «Enovos - nos tarifs d'électricité verte», (pdf), Enovos.lu, 2022, Disponible sur:  
[https://www.enovos.lu/content/download/8505/file\\_rate\\_fr/enovos-naturstrom-home\\_v1\\_fr\\_v1.pdf](https://www.enovos.lu/content/download/8505/file_rate_fr/enovos-naturstrom-home_v1_fr_v1.pdf)  
(consulté le 03 mai 2022)

[56] Ian Webster, «The Euro has lost 10% of its value since 2015», CPI Inflation Calculator, 2022, Disponible sur:  
<https://www.in2013dollars.com/europe/inflation/2015>  
(consulté le 22 avril 2022)

[57] «Euro to US Dollar Spot Exchange Rates for 2015», ExchangeRates.org.uk, 2022, Disponible sur:  
<https://www.exchangerates.org.uk/EUR-USD-spot-exchange-rates-history-2015.html>  
(consulté le 22 avril 2022)

[58] «Procéder à l'entretien d'une chaudière fioul», sect. le prix de l'entretien d'une chaudière à fioul, engie.fr, 2022, Disponible sur:  
<https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-chaudiere/entretien-chaudiere-fioul.html>  
(consulté le 26 avril 2022)

[59] «Comment se passe un entretien de chaudière à gaz?», sect. Tout ce qu'il faut retenir sur votre chaudière gaz, engie.fr, 2022, Disponible sur:  
<https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-chaudiere/deroulement-visite-entretien-chaudiere.html#:~:text=L'entretien%20de%20votre%20chaudi%C3%A8re%20gaz%20doit%20%C3%AAtre%20r%C3%A9alis%C3%A9%20une,%C3%A9galement%20de%20l'eau%20chaude.>  
(consulté le 26 avril 2022)

[60] «Entretien de la pompe à chaleur: le guide complet», sect. Combien coûte l'entretien d'une pompe à chaleur?, engie.fr, 2022, Disponible sur:  
[https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-pompe-a-chaleur/entretien-pompe-a-chaleur.html#:~:text=L'obligation%20d'entretien%20de%20la%20pompe%20%C3%A0%20chaleur.-Les%20d%C3%A9penses%20%C3%A9conomis%C3%A9es%20sont%20%C3%A0%2015%20ans](https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-pompe-a-chaleur/entretien-pompe-a-chaleur.html#:~:text=L'obligation%20d'entretien%20de%20la%20pompe%20%C3%A0%20chaleur.-Les%20d%C3%A9penses%20%C3%A9conomis%C3%A9es%20sont%20%C3%A9valu%C3%A9es%20%C3%A0%2015%20ans)  
(consulté le 26 avril 2022)

[61] «Prix d'une chaudière fioul, sect. prix d'un remplacement d'une chaudière fioul, prix-pose.com, 2022, Disponible sur:  
<https://www.prix-pose.com/chaudiere-fioul/#:~:text=Prix%20d'un%20remplacement%20de%20la%20pompe%20%C3%A0%20chaleur.-Les%20d%C3%A9penses%20%C3%A9conomis%C3%A9es%20sont%20%C3%A0%2015%20ans>  
(consulté le 26 avril 2022)

[62] «Prix de remplacement d'une chaudière», travaux.com, 2019, Disponible sur:  
[«https://www.travaux.com/chauffage/guide-des-prix/combien-coute-le-replacement-dune-chaudiere»](https://www.travaux.com/chauffage/guide-des-prix/combien-coute-le-replacement-dune-chaudiere)  
(consulté le 26 avril 2022)

[63] «Prix d'une pompe à chaleur air-eau, sol-eau... Quel coût prévoir?», sect. Le coût des pompes à chaleur aérothermiques paragr. 2, engie.fr, 2022, Disponible sur:  
[«https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-pompe-a-chaleur/cout-pompe-a-chaleur.html#:~:text=En%20moyenne%2C%20le%20co%C3%BBt%20de%20avoisine%20les%204%20000%20%20E2%82%AC.»](https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-pompe-a-chaleur/cout-pompe-a-chaleur.html#:~:text=En%20moyenne%2C%20le%20co%C3%BBt%20de%20avoisine%20les%204%20000%20%20E2%82%AC.)  
(consulté le 26 avril 2022)

[64] «Taux d'actualisation : Historique», spac-actuaires.fr, Disponible sur:  
[«https://www.spac-actuaires.fr/lexique/taux-dactualisation-historique/»](https://www.spac-actuaires.fr/lexique/taux-dactualisation-historique/)  
(consulté le 10 mai 2022)

[65] Matthieu, «Quelle isolation pour une maison ancienne ? Nos conseils», art. Votre maison est-elle considérée comme ancienne ?, art. Combien ça coûte d'isoler un vieux logement ?, Hellio.com, 2022, Disponible sur:  
[«https://particulier.hellio.com/blog/travaux/isolation-maison-ancienne»](https://particulier.hellio.com/blog/travaux/isolation-maison-ancienne)  
(consulté le 10 mai 2022)

[66] Eleni Tsoukanta, «Wärmepumpen: 2021 locken besonders hohe Förderungen vom Staat», sect. Die technischen Details sind wichtig, Net4Energy.com, 2021, Disponible sur:  
[«https://www.net4energy.com/de-lu/heizen/waermepumpe-foerderung»](https://www.net4energy.com/de-lu/heizen/waermepumpe-foerderung)  
(consulté le 27 avril 2022)

[67] Yauheni Kachalouski, Matuška Tomáš, «Performance of heat pump system for water heating in European climate», art. Introduction, E3S Web of Conferences, Disponible sur:  
[«https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/42/e3sconf\\_cpeee2020\\_03006.pdf»](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/42/e3sconf_cpeee2020_03006.pdf)  
(consulté le 20 mai 2022)

[68] «Enlèvement d'une cuve fioul : tout savoir sur le coût et les aides», art. Quel est le coût de l'enlèvement d'une cuve de fioul ?, butagaz.fr, Disponible sur:  
[«https://www.butagaz.fr/espace-energies/environnement/transition-energetique/enlement-dune-cuve-fioul-tout-savoir-sur-le»](https://www.butagaz.fr/espace-energies/environnement/transition-energetique/enlement-dune-cuve-fioul-tout-savoir-sur-le)  
(consulté le 04 mai 2022)

[69] Alexandre, «Quels sont les frais d'enlèvement d'une citerne de gaz ?», art. Quel est le prix d'enlèvement d'une citerne de gaz ?, Le-Propane.fr, 2020, Disponible sur:  
[«https://le-propane.fr/citerne-propane/enlement-citerne-gaz/»](https://le-propane.fr/citerne-propane/enlement-citerne-gaz/)  
(consulté le 04 mai 2022)

[70] «Le guide complet sur les panneaux photovoltaïques au Luxembourg», art. Prix des panneaux solaires, EcoHabitatLux.lu, 2022, Disponible sur:  
[«https://ecohabitatlux.lu/le-guide-complet-sur-les-panneaux-photovoltaïques-au-luxembourg/»](https://ecohabitatlux.lu/le-guide-complet-sur-les-panneaux-photovoltaïques-au-luxembourg/)  
(consulté le 27 avril 2022)

[71] «10 choses à savoir sur les panneaux photovoltaïques», art. 4) Vous bénéficiez d'une subvention, Devis.lu, Disponible sur:  
[«https://devis.lu/panneau-solaire-photovoltaïque-3/articles/10-choses-a-savoir-sur-les-panneaux-photovoltaïques»](https://devis.lu/panneau-solaire-photovoltaïque-3/articles/10-choses-a-savoir-sur-les-panneaux-photovoltaïques)  
(consulté le 27 avril 2022)

[72] Jimmy Saudoyer, Reda Idriss, Johan Verhaegen, Elie Chabrilat et Nicolas Vandernoot, «Panneaux solaires photovoltaïques», art. Puissance maximale, table p. 7 | Homegrade.brussels, 2020, Disponible sur:  
[«https://homegrade.brussels/wp-content/uploads/Publications\\_internes/brochures/Homegrade\\_broFR\\_PanneauxSolairesPhotovoltaiques.pdf»](https://homegrade.brussels/wp-content/uploads/Publications_internes/brochures/Homegrade_broFR_PanneauxSolairesPhotovoltaiques.pdf)  
(consulté le 11 mai 2022)

[73] Alina Walch, Martin Rüdisüli, Roberto Castello, «Quantification of existing rooftop PV hourly generation capacity and validation against measurement data», table 2 p. 4, Journal of Physics Conference Series, 2021, Disponible sur:  
[«https://www.researchgate.net/publication/356368438\\_Quantification\\_of\\_existing\\_rooftop\\_PV\\_hourly\\_generation\\_capacity\\_and\\_validation\\_against\\_measurement\\_data»](https://www.researchgate.net/publication/356368438_Quantification_of_existing_rooftop_PV_hourly_generation_capacity_and_validation_against_measurement_data)  
(consulté le 22 avril 2022)

[74] «Prévoir l'entretien et le nettoyage», Klima-agence.lu, Disponible sur:  
[«https://www.klima-agence.lu/fr/cleversolar/particuliers-entreprises/etapes-a-suivre/prevoir-l-entretien-et-le-nettoyage»](https://www.klima-agence.lu/fr/cleversolar/particuliers-entreprises/etapes-a-suivre/prevoir-l-entretien-et-le-nettoyage)  
(consulté le 27 avril 2022)

[75] «Nettoyage et entretien des panneaux solaires photovoltaïques, art. le prix d'un nettoyage des panneaux, Energies-nouvelles.net, 2022, Disponible sur:  
[«https://www.energies-nouvelles.net/nettoyage-panneaux-photovoltaïques/#:~:text=Le%20prix%20d'un%20nettoyage.%20M2%2C%20200%20euros%20TTC»](https://www.energies-nouvelles.net/nettoyage-panneaux-photovoltaïques/#:~:text=Le%20prix%20d'un%20nettoyage.%20M2%2C%20200%20euros%20TTC)  
(consulté le 27 avril 2022)

[76] «Where am I losing heat in my home?», art. The Thermal Envelope, TheGreenAge, 2016, Disponible sur:  
[«https://www.thegreenage.co.uk/where-am-i-losing-heat-home/»](https://www.thegreenage.co.uk/where-am-i-losing-heat-home/)  
(consulté le 23 mai 2022)

[77] «Applying for financial aid for energy efficiency renovation of a residential building», (PRIMe House 2017), table Exigences à respecter par les éléments de construction rénovés, table Subvention de base, Guichet.Public.lu, Disponible sur:  
<https://guichet.public.lu/fr/citoyens/logement/renovation-transformation/performances-energie/assainissement-energetique-regime-2017.html>  
(consulté le 10 mai 2022)

[78] «Installation d'une POMPE À CHALEUR au Luxembourg», sect. Le prix d'une pompe-à-chaleur (PAC) au Luxembourg, sect. Une aide jusqu'à 50% du prix total, UnAirMeilleur.com, Disponible sur:  
[https://www.unairmeilleur.com/pompe-a-chaleur-luxembourg#:~:text=Le%20prix%20d'une%20pompe.%2Dchaleur%20\(PAC\)%20au%20Luxembourg&text=Il%20s'agit%20donc%20tr%C3%A8s,000%20et%202020%20000%20euros.](https://www.unairmeilleur.com/pompe-a-chaleur-luxembourg#:~:text=Le%20prix%20d'une%20pompe.%2Dchaleur%20(PAC)%20au%20Luxembourg&text=Il%20s'agit%20donc%20tr%C3%A8s,000%20et%202020%20000%20euros.)  
(consulté le 26 avril 2022)

[79] «Logement au Luxembourg: les ménages disposent en moyenne de 129,9 m<sup>2</sup>», Wort.lu, 2013, Disponible sur:  
<https://www.wort.lu/fr/luxembourg/logement-au-luxembourg-les-menages-disposent-en-moyenne-de-129-9-m-512de1dfe4b0e3da456a838#:~:text=%2D%20Au%20Luxembourg%2C%20un%20m%C3%A9nage%20dispose%20surface%20du%20logement%20augmente%20%C3%A9galement.>  
(consulté le 22 avril 2022)

[80] «Règlement sur les bâties, les voies publiques et les sites», p. 8 Art. 2 Pièces destinées au séjour prolongé de personnes, Commune de Steinfort (Luxembourg), 2015, Disponible sur:  
<https://zaro.lu/wp-content/uploads/2018/04/Re%CC%80lement-ba%CC%82tisses-STEINFORT.pdf>  
(consulté le 18 mai 2022)

[81] «Pompe à chaleur : quelle puissance pour ma maison ?», art. Le coefficient de construction, art. La formule de calcul, Europe Energie, 2021, Disponible sur:  
<https://www.europe-energie.com/blog/pompe-a-chaleur-quelle-puissance/>  
(consulté le 18 mai 2022)

[82] «Qu'est ce que la température de base d'une zone ?», art. Comment connaître la température extérieure de base de sa région ?, Izibyedf, Disponible sur:  
<https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/temperature-exterieure-de-base>  
(consulté le 18 mai 2022)

[83] Carte topographique du Luxembourg, Disponible sur:  
<https://fr-fr.topographic-map.com/maps/ik/Luxembourg/>  
(consulté le 18 mai 2022)

[84] «Quel dimensionnement de votre PAC pour l'eau chaude sanitaire ?», art. Calcul des dimensions de la pompe à chaleur, Ooreka.fr, Disponible sur:  
<https://pompe-a-chaleur.ooreka.fr/astuce/voir/113912/quel-dimensionnement-de-votre-pac-pour-l-eau-chaude-sanitaire>  
(consulté le 18 mai 2022)

[85] «Clever Primes, table Nouveaux tarifs d'injection à partir du 1er avril 2021», Klima-Agence.lu, 2021, Disponible sur:  
[https://www.klima-agence.lu/uploads/editor/files/Fiche\\_Artisan\\_PV\\_A4\\_FR\\_WEB.pdf](https://www.klima-agence.lu/uploads/editor/files/Fiche_Artisan_PV_A4_FR_WEB.pdf)  
(consulté le 11 mai 2022)

[86] «Une réserve financière pour des dépenses imprévues: combien devriez-vous mettre de côté?», art. Une famille exemplaire paragr. 2, Baloise insurance, 2020, Disponible sur:  
<https://www.baloise.be/fr/blogs/reserve-financiere.html>  
(consulté le 25 mai 2022)

[87] «Simulez votre prêt», Banque Internationale à Luxembourg, Disponible sur:  
<https://www.bil.com/fr/particuliers/produits-et-services/emprunter/Pages/pret-personnel.aspx#/>  
(consulté le 25 mai 2022)

[88] «Prix de la réparation d'une pompe à chaleur», art. 3) Quel budget prévoir pour remplacer une pompe à chaleur ?, Travaux.com, 2019, Disponible sur:  
<https://www.travaux.com/chauffage/guide-des-prix/prix-de-reparation-d'une-pompe-a-chaleur>  
(consulté le 11 mai 2022)

[89] David Hilton, «Hybrid Solar Panels: A Guide to PVT Systems», art. Pros and Cons of Hybrid Solar Panels paragr. 4&5, art. How Much Do Hybrid Solar Panels Cost?, Homebuilding.co.uk, 2021, Disponible sur:  
<https://www.homebuilding.co.uk/advice/solar-pvt>  
(consulté le 11 mai 2022)

[90] «Triple Solar verder zonder gas - Datasheet», table Technische Gegevens, Triple Solar, Disponible sur:  
<https://triplesolar.eu/wp-content/uploads/2021/04/Triple-Solar-technische-documentatie-warmtepomppanelen-2021.pdf>  
(consulté le 11 mai 2022)

[91] «Introducing Triple Solar®», art. Why PVT heat pump panels?, Triple Solar, Disponible sur:  
<https://triplesolar.eu/introductie-pvt-warmtepomp-paneel/>  
(consulté le 11 mai 2022)

[92] «The Green Premium», art. First, which zero-carbon options should we be deploying now?, BreakthroughEnergy.org, Disponible sur: [«https://www.breakthroughenergy.org/our-challenge/the-green-premium»](https://www.breakthroughenergy.org/our-challenge/the-green-premium)  
(consulté le 04 mai 2022)

[93] Jack Woodfield, «Heat Pumps Are a ‘Financially Irrational’ Investment, Says Trade Body», Homebuilding.co.uk, 2022, Disponible sur: [«https://www.homebuilding.co.uk/news/heat-pumps-are-a-financially-irrational-investment-says-trade-body»](https://www.homebuilding.co.uk/news/heat-pumps-are-a-financially-irrational-investment-says-trade-body)  
(consulté le 12 mai 2022)

[94] «Est-ce rentable d’installer des panneaux photovoltaïques en 2022 ?», Ecoconso.be, 2022, Disponible sur: [«https://www.ecoconso.be/fr/content/est-ce-rentable-dinstaller-des-panneaux-photovoltaiques-en-2022»](https://www.ecoconso.be/fr/content/est-ce-rentable-dinstaller-des-panneaux-photovoltaiques-en-2022)  
(consulté le 18 mai 2022)

[95] Miguel Herrero, «Agrisolar: win-wins for farmers and photovoltaics», Disponible sur: [«https://enrd.ec.europa.eu/sites/default/files/tg3\\_egd\\_presentation\\_herrero\\_agripv.pdf»](https://enrd.ec.europa.eu/sites/default/files/tg3_egd_presentation_herrero_agripv.pdf)  
(consulté le 13 mai 2022)

[96] Ari Laitinen, Oscar Lindholm, Ala Hasan, Francesco Reda, Åsa Hedman, «A techno-economic analysis of an optimal self-sufficient district», art. Conclusion paragr. 4 & 5, Energy Conversion and Management Volume 236, 2021, Disponible sur: [«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689042100217X»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689042100217X)  
(consulté le 20 avril 2022)

## 5.2 Références des sites internet des logiciels

CEA: [«https://cityenergyanalyst.com/»](https://cityenergyanalyst.com/)

MUBES: [«https://github.com/KTH-UrbanT/mubes-ubem»](https://github.com/KTH-UrbanT/mubes-ubem)

Umi plug-in: [«https://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html»](https://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html)

TrnLizard: [«https://www.food4rhino.com/en/app/trnlizard»](https://www.food4rhino.com/en/app/trnlizard)

TEASER: [«https://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Forschung/OPEN-SOURCE/~modj/Teaser25/lidx/1/»](https://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Forschung/OPEN-SOURCE/~modj/Teaser25/lidx/1/)

CityBES: [«https://buildings.lbl.gov/urban-science/tools#:~:text=City%20Building%20Energy%20Saver%20»](https://buildings.lbl.gov/urban-science/tools#:~:text=City%20Building%20Energy%20Saver%20)

CitySim: [«https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/»](https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/)

Homer pro: [«https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html»](https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html)

Enersquid: [«https://www.enersquid.com/»](https://www.enersquid.com/)

Microgrid Design Toolkit (MDT): [«https://energy.sandia.gov/download-sandias-microgrid-design-toolkit-mdt/»](https://energy.sandia.gov/download-sandias-microgrid-design-toolkit-mdt/)

## 5.3 Documents de référence pour la création de la matrice décisionnel

### 5.3.1 Documents de description des logiciels

Enora Garreau, Yassine Abdelouadoud, Eunice Herrera, Werner Keilholz, G.-E. Kyriakodis, Vincent Partenay, Peter Riederer, «District MODeller and SIMulator (DIMOSIM) – A dynamic simulation platform based on a bottom-up approach for district and territory energetic assessment», Energy and Buildings Volume 251, 2021, Disponible sur: [«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821006381»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821006381)  
(consulté le 1 mars 2022)

Jimeno A. Fonseca, Thuy-An Nguyen, Arno Schlueter, Francois Marechal, «City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts», Energy and Buildings Volume 113, 2015, Disponible sur: [«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304199»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815304199)  
(consulté le 1 mars 2022)

CEA Documentation Release 3.27.0, Disponible sur:  
[«https://city-energy-analyst.readthedocs.io/\\_downloads/en/latest/pdf/»](https://city-energy-analyst.readthedocs.io/_downloads/en/latest/pdf/)  
(consulté le 1 mars 2022)

Xavier Faure, Tim Johansson et Oleksii Pasichnyi, «The Impact of Detail, Shadowing and Thermal Zoning Levels on Urban Building Energy Modelling (UBEM) on a District Scale», MDPI, 2022, Disponible sur:  
[«https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1525»](https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1525)  
 (consulté le 2 mars 2022)

Umi online documentation, Disponible sur:  
[«https://umidocs.readthedocs.io/en/latest/»](https://umidocs.readthedocs.io/en/latest/)  
 (consulté le 1 mars 2022)

Yixing Chen, Tianzhen Hong, Mary Ann Piette, «Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis», Applied Energy Volume 205, 2017, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310024»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310024)  
 (consulté le 24 mars 2022)

TRNSYS 18 - TRNLizard - Flyer, Disponible sur:  
[«https://trnsys.de/static/7d289bb2027e80be70536e1e13f51ae8/T18\\_flyer\\_TS\\_TRNLizard\\_en.pdf»](https://trnsys.de/static/7d289bb2027e80be70536e1e13f51ae8/T18_flyer_TS_TRNLizard_en.pdf)  
 (consulté le 1 mars 2022)

TRNSYS 18 - TRAnsient SYstem Simulation program - Documentation, Disponible sur:  
[«https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/trnsys18\\_0\\_updates.pdf»](https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/trnsys18_0_updates.pdf)  
 (consulté le 1 mars 2022)

Tianzhen Hong, Yixing Chen, Sang Hoon Lee, M. A. Piette, «CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy Efficiency», 5th International Urban Computing Workshop , 2016, Disponible sur:  
[«https://www.researchgate.net/publication/304824985\\_CityBES\\_A\\_Web-based\\_Platform\\_to\\_Support\\_City-Scale\\_Building\\_Energy\\_Efficiency»](https://www.researchgate.net/publication/304824985_CityBES_A_Web-based_Platform_to_Support_City-Scale_Building_Energy_Efficiency)  
 (consulté le 24 mars 2022)

Darren Robinson, Frédéric Haldi, Philippe Leroux et Diane Perez, «CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning», Building Simulation 2009: Eleventh International IBPSA Conference, 2009, Disponible sur:  
[«https://www.researchgate.net/publication/43652081\\_CITYSIM\\_Comprehensive\\_Micro-Simulation\\_of\\_Resource\\_Flows\\_for\\_Sustainable\\_Urban\\_Planning»](https://www.researchgate.net/publication/43652081_CITYSIM_Comprehensive_Micro-Simulation_of_Resource_Flows_for_Sustainable_Urban_Planning)  
 (consulté le 24 mars 2022)

Thomas Berthou, Bruno Duplessis, Philippe Rivière, Pascal Stabat, «SMART-E: A TOOL FOR ENERGY DEMAND SIMULATION AND OPTIMIZATION AT THE CITY SCALE», Mines ParisTech, PSL Research University, Centre for energy efficiency of systems, 2015, Disponible sur:  
[«https://www.researchgate.net/publication/291353173\\_SMART-E\\_A\\_TOOL\\_FOR\\_ENERGY\\_DEMAND\\_SIMULATION\\_AND\\_OPTIMIZATION\\_AT\\_THE\\_CITY\\_SCALE»](https://www.researchgate.net/publication/291353173_SMART-E_A_TOOL_FOR_ENERGY_DEMAND_SIMULATION_AND_OPTIMIZATION_AT_THE_CITY_SCALE)  
 (consulté le 24 mars 2022)

Linta Khalil, Kamran Liaquat Bhatti, M. Arslan Iqbal Awan, Mughees Riaz, Kiran Khalil, Nashitah Alwaz, «Optimization and designing of hybrid power system using HOMER pro», 2020, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320345016»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320345016)  
 (consulté le 2 mars 2022)

Manuel d'utilisation - Enersquid, Disponible sur:  
[«https://www.enersquid.com/users-guide»](https://www.enersquid.com/users-guide)  
 (consulté le 2 mars 2022)

John Eddy, Nadine E. Miner, Jason Stamp, Sandia's Microgrid Design Toolkit, 2017, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619017300544»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619017300544)  
 (consulté le 2 mars 2022)

### 5.3.2 Documents comparatifs des logiciels

Jonas Allegrini, Kristina Orehoung, Georgios Mavromatis, Florian Ruesch, Viktor Dorer, Ralph Evins, «A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems», Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 52, 2015, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115007704»](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115007704)  
 (consulté le 24 mars 2022)

Usman Ali, Mohammad Haris Shamsi, Cathal Hoare, Eleni Mangina, James O'Donnell, «Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis», Energy and Buildings Volume 246, 2021, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821003571»](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821003571)  
 (consulté le 24 mars 2022)

Martina Ferrando, Francesco Causone, Tianzhen Hong, Yixing Chen, «Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches», Sustainable Cities and Society Volume 62, 2020, Disponible sur:  
[«https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720306296»](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670720306296)  
 (consulté le 24 mars 2022)

Emmanuel Petueil, Adélaïde Mailhac, Lionel Cauchard, Romain Bonabe de Rouge, Raphael Parent, Emilien Paron, «ANALYSE DES OUTILS ET MÉTHODES EXISTANTS SUR L'ÉVALUATION ENERGIE ET CARBONÉ DES PROJETS D'AMÉNAGEMENT», 2019,  
Disponible sur:  
<https://www.effinergie.org/web/images/label/qepos/L2.3-QEC-ADEME-Analyse-outils-et-methodes-existantes.pdf>  
(consulté le 25 mars 2022)

Martina Ferrando, Francesco Causone, «An overview of urban building energy modelling (UBEM) tools», Energy Department, Politecnico di Milano, Milano, Italy, 2019, Disponible sur:  
[http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019\\_210632.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2019/BS2019_210632.pdf)  
(consulté le 25 mars 2022)

## 7. Annexes

### *Annexe 1: Tables des valeurs U*

| Kennwerte der Gebäudetypen des Bestandes im Ausgangszustand 2010 |             |                      |     |      |          | U-Werte in W/m²K) |      |             |         | g-Wert  |
|--|-------------|----------------------|-----|------|----------|-------------------|------|-------------|---------|---------|
| Kürzel   | BAK         | strategischer Typ    | Z   | WE   | EBF [m²] | Dach              | Wand | Kellerdecke | Fenster | Fenster |
| 10_EFH_A   | bis 1919    | Bed_sanierbar        | 2,0 | 1,0  | 168,0    | 1,80              | 1,60 | 1,10        | 2,60    | 0,75    |
| 11_EFH_B   | 1920 - 1945 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 156,0    | 1,40              | 1,20 | 0,80        | 2,30    | 0,75    |
| 12_EFH_C   | 1946 - 1960 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 156,0    | 1,20              | 1,00 | 1,00        | 2,30    | 0,75    |
| 13_EFH_D   | 1961 - 1970 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 160,0    | 0,80              | 1,10 | 1,00        | 2,00    | 0,65    |
| 14_EFH_E   | 1971 - 1980 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 168,0    | 0,60              | 0,60 | 0,80        | 2,00    | 0,65    |
| 15_EFH_F   | 1981 - 1990 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 180,0    | 0,50              | 0,60 | 0,60        | 2,00    | 0,65    |
| 16_EFH_G   | 1991 - 2000 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 187,0    | 0,40              | 0,45 | 0,50        | 1,80    | 0,65    |
| 17_EFH_H   | 2001 - 2010 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 200,0    | 0,30              | 0,35 | 0,40        | 1,50    | 0,65    |
| 24_DH_A  | bis 1919    | Bed_sanierbar        | 2,0 | 1,1  | 166,1    | 1,80              | 1,40 | 1,10        | 2,60    | 0,75    |
| 25_DH_B  | 1920 - 1945 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 157,3    | 1,40              | 1,20 | 0,80        | 2,30    | 0,75    |
| 26_DH_C  | 1946 - 1960 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 155,1    | 1,20              | 1,20 | 1,00        | 2,30    | 0,75    |
| 27_DH_D  | 1961 - 1970 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 158,4    | 0,80              | 1,10 | 1,00        | 2,00    | 0,65    |
| 28_DH_E  | 1971 - 1980 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,0  | 148,0    | 0,60              | 1,00 | 0,80        | 2,00    | 0,65    |
| 29_DH_F  | 1981 - 1990 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 170,5    | 0,50              | 0,90 | 0,60        | 2,00    | 0,65    |
| 30_DH_G  | 1991 - 2000 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 176,0    | 0,40              | 0,45 | 0,50        | 1,80    | 0,65    |
| 31_DH_H  | 2001 - 2010 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 190,3    | 0,30              | 0,35 | 0,40        | 1,50    | 0,65    |
| 38_RH_A  | bis 1919    | Bed_sanierbar        | 2,0 | 1,1  | 149,6    | 1,80              | 1,60 | 1,10        | 2,60    | 0,75    |
| 39_RH_B  | 1920 - 1945 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 146,3    | 1,40              | 1,40 | 0,80        | 2,30    | 0,75    |
| 40_RH_C  | 1946 - 1960 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 146,3    | 1,20              | 1,30 | 1,00        | 2,30    | 0,75    |
| 41_RH_D  | 1961 - 1970 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 147,4    | 0,80              | 1,10 | 1,00        | 2,00    | 0,65    |
| 42_RH_E  | 1971 - 1980 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 148,5    | 0,60              | 0,80 | 0,80        | 2,00    | 0,65    |
| 43_RH_F  | 1981 - 1990 | Bestand_bis_2010_EFH | 3,0 | 1,1  | 155,1    | 0,50              | 0,60 | 0,60        | 2,00    | 0,65    |
| 44_RH_G  | 1991 - 2000 | Bestand_bis_2010_EFH | 3,0 | 1,1  | 159,5    | 0,40              | 0,50 | 0,50        | 1,80    | 0,65    |
| 45_RH_H  | 2001 - 2010 | Bestand_bis_2010_EFH | 2,0 | 1,1  | 169,4    | 0,30              | 0,35 | 0,40        | 1,50    | 0,65    |
| 52_MFH<10_A  | bis 1919    | Bed_sanierbar        | 2,0 | 3,1  | 235,6    | 1,80              | 1,40 | 1,10        | 2,60    | 0,75    |
| 53_MFH<10_B  | 1920 - 1945 | Bestand_bis_2010_MFH | 2,0 | 3,1  | 238,7    | 1,40              | 1,20 | 0,80        | 2,30    | 0,75    |
| 54_MFH<10_C  | 1946 - 1960 | Bestand_bis_2010_MFH | 2,0 | 4,0  | 316,0    | 0,80              | 1,00 | 1,00        | 2,30    | 0,75    |
| 55_MFH<10_D  | 1961 - 1970 | Bestand_bis_2010_MFH | 2,0 | 4,8  | 398,4    | 0,80              | 1,10 | 1,00        | 2,00    | 0,65    |
| 56_MFH<10_E  | 1971 - 1980 | Bestand_bis_2010_MFH | 3,0 | 4,8  | 403,2    | 0,60              | 0,90 | 0,80        | 2,00    | 0,65    |
| 57_MFH<10_F  | 1981 - 1990 | Bestand_bis_2010_MFH | 3,0 | 4,8  | 403,2    | 0,50              | 0,60 | 0,60        | 2,00    | 0,65    |
| 58_MFH<10_G  | 1991 - 2000 | Bestand_bis_2010_MFH | 2,0 | 4,8  | 398,4    | 0,40              | 0,50 | 0,50        | 1,80    | 0,65    |
| 59_MFH<10_H  | 2001 - 2010 | Bestand_bis_2010_MFH | 2,0 | 4,9  | 436,1    | 0,30              | 0,35 | 0,40        | 1,50    | 0,65    |
| 66_MFH>10_A  | bis 1919    | Bed_sanierbar        | 3,0 | 11,0 | 847,0    | 1,80              | 1,60 | 1,10        | 2,60    | 0,75    |
| 67_MFH>10_B  | 1920 - 1945 | Bestand_bis_2010_MFH | 4,0 | 11,0 | 858,0    | 1,40              | 1,20 | 0,80        | 2,30    | 0,75    |
| 68_MFH>10_C  | 1946 - 1960 | Bestand_bis_2010_MFH | 3,0 | 11,0 | 880,0    | 1,20              | 1,20 | 1,00        | 2,30    | 0,75    |
| 69_MFH>10_D  | 1961 - 1970 | Bestand_bis_2010_MFH | 4,0 | 12,0 | 996,0    | 0,80              | 1,00 | 1,00        | 2,00    | 0,65    |
| 70_MFH>10_E  | 1971 - 1980 | Bestand_bis_2010_MFH | 4,0 | 12,0 | 1020,0   | 0,60              | 1,00 | 0,80        | 2,00    | 0,65    |
| 71_MFH>10_F  | 1981 - 1990 | Bestand_bis_2010_MFH | 5,0 | 12,0 | 1008,0   | 0,50              | 0,70 | 0,60        | 2,00    | 0,65    |
| 72_MFH>10_G  | 1991 - 2000 | Bestand_bis_2010_MFH | 5,0 | 13,0 | 1079,0   | 0,40              | 0,50 | 0,50        | 1,80    | 0,65    |
| 73_MFH>10_H  | 2001 - 2010 | Bestand_bis_2010_MFH | 4,0 | 12,0 | 1068,0   | 0,30              | 0,35 | 0,40        | 1,50    | 0,65    |

Table: Valeurs U types en fonction de l'année de construction jusqu'à 2010 issu de [32]

| <b>Valeurs maximales des coefficients de transmission thermique de chacun des éléments de construction</b> |                                     |  |  |
|--|-------------------------------------|--|--|
| <b><math>U_{max}</math> en <math>W/(m^2K)</math> <sup>1) 2) 6)</sup> valables jusqu'au 31.12.2022</b>      |                                     |  |  |
| Élément de construction  | En contact avec le climat extérieur | En contact avec des locaux très peu chauffés | Surfaces en contact avec le sol ou des locaux non chauffés |
| Mur et fermeture horizontale inférieure du bâtiment <sup>3)</sup>  | 0,32                                | 0,50   | 0,40   |
| Toit et fermeture horizontale supérieure du bâtiment <sup>3)</sup>   | 0,25                                | 0,35   | 0,30   |
| Fenêtre ou porte-fenêtre, y compris le cadre <sup>4) 5)</sup>  | 1,5                                 | 2,0  | 2,0  |
| Porte extérieure, y compris le cadre   | 2,0                                 | 2,5  | 2,5  |
| Coupole d'éclairage naturel  | 2,7                                 | 2,7  | 2,7  |
| <b>Valeurs maximales des coefficients de transmission thermique de chacun des éléments de construction</b> |                                     |  |  |
| <b><math>U_{max}</math> en <math>W/(m^2K)</math> <sup>1) 2) 6)</sup> valables à partir du 01.01.2023</b>   |                                     |  |  |
| Élément de construction  | Climat extérieur                    | Locaux très peu chauffés                     | Surfaces en contact avec le sol ou des locaux non chauffés |
| Mur et fermeture horizontale inférieure du bâtiment <sup>3)</sup>  | 0,28                                | 0,45   | 0,36   |
| Toit et fermeture horizontale supérieure du bâtiment <sup>3)</sup>   | 0,22                                | 0,31   | 0,27   |
| Fenêtre ou porte-fenêtre, y compris le cadre <sup>4) 5)</sup>  | 1,20                                | 1,80   | 1,80   |
| Porte, y compris le cadre  | 1,60                                | 2,20   | 2,20   |
| Coupole d'éclairage naturel  | 2,40                                | 2,40   | 2,40   |

Table: Valeurs maximales des coefficients de transmission thermique [ $W/(m^2 K)$ ] issu de [26]

## Annexe 2: Tables de CEA

|   | Description         | code             | Cm_Af  |
|---|---------------------|------------------|--------|
| 1 | Light construction  | CONSTRUCTION_AS1 | 110000 |
| 2 | Medium construction | CONSTRUCTION_AS2 | 165000 |
| 3 | Heavy construction  | CONSTRUCTION_AS3 | 300000 |

Table: Inertie de la construction

|   | Description     | code          | n50 |
|---|-----------------|---------------|-----|
| 1 | Highly tight    | TIGHTNESS_AS1 | 1   |
| 2 | Tight           | TIGHTNESS_AS2 | 2   |
| 3 | Medium          | TIGHTNESS_AS3 | 3   |
| 4 | Medium Leaky    | TIGHTNESS_AS4 | 4   |
| 5 | Leaky           | TIGHTNESS_AS5 | 5   |
| 6 | Very Leaky      | TIGHTNESS_AS6 | 6   |
| 7 | Extremely tight | TIGHTNESS_AS0 | 0.6 |

Table: Étanchéité à l'air

|    | Description   | code        | U_win | G_win | e_win | F_F | GHG_WIN_kgCO2m2 |
|----|---|-------------|-------|-------|-------|-----|-----------------|
| 1  | single glazing  | WINDOW_AS1  | 2.6   | 0.85  | 0.89  | 0.2 | 47              |
| 2  | double glazing  | WINDOW_AS2  | 2.3   | 0.75  | 0.89  | 0.2 | 62              |
| 3  | double glazing - with argon filling                       | WINDOW_AS3  | 2     | 0.75  | 0.89  | 0.2 | 69              |
| 4  | double glazing with low-emissivity coating                | WINDOW_AS4  | 1.8   | 0.67  | 0.02  | 0.2 | 123             |
| 5  | triple glazing  | WINDOW_AS5  | 1.5   | 0.7   | 0.89  | 0.2 | 123             |
| 6  | triple glazing with two selective low-emissivity coatings | WINDOW_AS6  | 1.2   | 0.5   | 0.02  | 0.2 | 123             |
| 7  | double window   | WINDOW_AS7  | 1.2   | 0.75  | 0.89  | 0.2 | 70              |
| 8  | single glazing - HDB                                      | WINDOW_AS8  | 5.4   | 0.85  | 0.89  | 0.2 | 47              |
| 9  | window - NTU  | WINDOW_AS9  | 1.8   | 0.29  | 0.89  | 0.2 | 62              |
| 10 | window - SinBERBest Office                                | WINDOW_AS10 | 2.2   | 0.2   | 0.89  | 0.2 | 62              |

Table: Fenêtres

|    | Description   | code      | U_roof | a_roof | e_roof | r_roof | GHG_ROOF_kgCO2m2 |
|----|---|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| 1  | concrete or rock pebbles finishing - new construction | ROOF_AS1  | 0.2    | 0.6    | 0.94   | 0.4    | 112              |
| 2  | clay tiles - old contruction                          | ROOF_AS2  | 0.3    | 0.55   | 0.91   | 0.45   | 112              |
| 3  | aluminum tiles - old construction                     | ROOF_AS3  | 0.3    | 0.3    | 0.09   | 0.7    | 112              |
| 4  | greenery - new roof                                   | ROOF_AS4  | 0.15   | 0.5    | 0.95   | 0.5    | 112              |
| 5  | white paint over plaster over concrete - new roof     | ROOF_AS5  | 0.15   | 0.3    | 0.84   | 0.7    | 113              |
| 6  | dark paint over plaster over concrete - new roof      | ROOF_AS6  | 0.15   | 0.85   | 0.94   | 0.15   | 113              |
| 7  | concrete or rock pebbles finishing - Singapore        | ROOF_AS7  | 0.6    | 0.6    | 0.94   | 0.4    | 112              |
| 8  | bis 1918  | ROOF_AS8  | 1.8    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 9  | 1919-1945   | ROOF_AS9  | 1.4    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 10 | 1946-1960   | ROOF_AS10 | 1.2    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 11 | 1961-1970   | ROOF_AS11 | 0.8    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 12 | 1971-1980   | ROOF_AS12 | 0.6    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 13 | 1981-1990   | ROOF_AS13 | 0.5    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 14 | 1991-2000   | ROOF_AS14 | 0.4    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 15 | 2001-2010   | ROOF_AS15 | 0.3    | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |
| 16 | 2011-2020   | ROOF_AS16 | 0.25   | 0.5    | 0.9    | 0.5    | 112              |

Table: Plafond

|    | Description  | code      | U_wall | a_wall | e_wall | r_wall | GHG_WALL_kgCO2m2 |
|----|--|-----------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| 2  | concrete block exposed- old building                   | WALL_AS2  | 0.75   | 0.6    | 0.95   | 0.4    | 112              |
| 3  | white paint over plaster over clay brick- old building | WALL_AS3  | 0.8    | 0.3    | 0.84   | 0.7    | 112              |
| 4  | dark blue over plaster over clay brick - new building  | WALL_AS4  | 0.15   | 0.65   | 0.9    | 0.35   | 112              |
| 5  | dark paint over plaster over clay brick - new building | WALL_AS5  | 0.15   | 0.85   | 0.94   | 0.15   | 112              |
| 6  | concrete block exposed- NTU                            | WALL_AS6  | 3.2    | 0.6    | 0.95   | 0.4    | 112              |
| 7  | Internal partition in brick                            | WALL_AS7  | 3.2    | 0.6    | 0.95   | 0.4    | 34               |
| 8  | Internal partition in drywall                          | WALL_AS8  | 3.2    | 0.6    | 0.95   | 0.4    | 73               |
| 9  | bis 1918   | WALL_AS9  | 1.6    | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 10 | 1919-1945  | WALL_AS10 | 1.2    | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 11 | 1946-1960  | WALL_AS11 | 1      | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 12 | 1961-1970  | WALL_AS12 | 1.1    | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 13 | 1971-1980  | WALL_AS13 | 0.6    | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 14 | 1981-1990  | WALL_AS14 | 0.6    | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 15 | 1991-2000  | WALL_AS15 | 0.45   | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 16 | 2001-2010  | WALL_AS16 | 0.35   | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |
| 17 | 2011-2020  | WALL_AS17 | 0.32   | 0.6    | 0.9    | 0.4    | 112              |

Table: Murs

|   | Description  | code      | U_base | GHG_FLOOR_kgCO2m2 |
|---|--|-----------|--------|-------------------|
| 1 | concrete floor, old  | FLOOR_AS1 | 2.9    | 113               |
| 2 | concrete floor, renovated                                  | FLOOR_AS2 | 0.28   | 157               |
| 3 | concrete floor, new  | FLOOR_AS3 | 0.25   | 180               |
| 4 | concrete floor, old - basement (includes excavation)       | FLOOR_AS4 | 2.9    | 248               |
| 5 | concrete floor, renovated - basement (includes excavation) | FLOOR_AS5 | 0.28   | 292               |
| 6 | concrete floor, new - basement (includes excavation)       | FLOOR_AS6 | 0.25   | 315               |

Table: Plancher

|   | Description     | code        | rf_sh |
|---|-----------------|-------------|-------|
| 1 | none            | SHADING_AS0 | 1     |
| 2 | rollo           | SHADING_AS1 | 0.08  |
| 3 | venetian blinds | SHADING_AS2 | 0.15  |

Table: Ombrage

|   | Description           | code             | class_hs      | convection_hs | Qhsmax_Wm2 | dThs_C | Tshs0_ahu_C | dThs0_ahu_C | Th_sup_air_ahu_C | Tshs0_aru_C | dThs0_aru_C | Th_sup_air_aru_C |
|---|-----------------------|------------------|---------------|---------------|------------|--------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|------------------|
| 1 | None                  | HVAC_HEATING_AS0 | NONE          | 0             | 0          | 0      | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          | NA               |
| 2 | Radiator (90/70)      | HVAC_HEATING_AS1 | RADIATOR      | 1             | 500        | 0.15   | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          | NA               |
| 3 | Radiator (70/55)      | HVAC_HEATING_AS2 | RADIATOR      | 1             | 500        | -0.1   | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          | NA               |
| 4 | central AC (40/20)    | HVAC_HEATING_AS3 | CENTRAL_AC    | 1             | 500        | -1.1   | 40          | 20          | 36               | 40          | 20          | 36               |
| 5 | Floor heating (40/35) | HVAC_HEATING_AS4 | FLOOR_HEATING | 0.5           | 150        | -0.9   | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          | NA               |

Table: Chauffage

|   | Description             | code             | class_cs         | convection_cs | Qcsmax_Wm2 | dTcs_C | Tscs0_ahu_C | dTcs0_ahu_C | Tc_sup_air_ahu_C | Tscs0_aru_C | dTcs0_aru_C |
|---|-------------------------|------------------|------------------|---------------|------------|--------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
| 1 | none                    | HVAC_COOLING_AS0 | NONE             | 0             | 0          | 0      | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          |
| 2 | ceiling cooling (18/21) | HVAC_COOLING_AS1 | CEILING_COOLING  | 0.5           | 500        | 0.5    | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          |
| 3 | mini-split AC (6/15)    | HVAC_COOLING_AS2 | DECENTRALIZED_AC | 1             | 150        | 0.7    | NA          | NA          | NA               | 7.5         | 7           |
| 4 | central AC (6/15)       | HVAC_COOLING_AS3 | CENTRAL_AC       | 1             | 500        | 0.5    | 7.5         | 7           | 16               | 7.5         | 7           |
| 5 | 3for2                   | HVAC_COOLING_AS4 | HYBRID_AC        | 1             | 500        | 0.5    | 7.5         | 7           | 18               | 7.5         | 4           |
| 6 | floor cooling (18/21)   | HVAC_COOLING_AS5 | FLOOR_COOLING    | 0.1           | 100        | 0.5    | NA          | NA          | NA               | NA          | NA          |

Table: Refroidissement

|   | Description                                | code              | Tsww0_C | Qwwmax_Wm2 |
|---|--|-------------------|---------|------------|
| 1 | None                                       | HVAC_HOTWATER_AS0 | 0       | 0          |
| 2 | High temperature water (60/10)             | HVAC_HOTWATER_AS1 | 60      | 500        |
| 3 | Medium temperature water (45/10)           | HVAC_HOTWATER_AS2 | 45      | 500        |
| 4 | Low temperature water + sanitation (35/10) | HVAC_HOTWATER_AS3 | 35      | 500        |
| 5 | High temperature in the tropics (60/25)    | HVAC_HOTWATER_AS4 | 60      | 500        |

Table: ECS

|   | Description   | code                 | MECH_VENT | WIN_VENT | HEAT_REC | NIGHT_FLSH | ECONOMIZER |
|---|---|----------------------|-----------|----------|----------|------------|------------|
| 1 | Window ventilation  | HVAC_VENTILATION_AS0 | false     | ✓        | true     | ✓          | false      |
| 2 | Mechanical ventilation with demand control                | HVAC_VENTILATION_AS1 | true      | ✓        | false    | ✓          | true       |
| 3 | Mechanical ventilation with demand control and economizer | HVAC_VENTILATION_AS2 | true      | ✓        | false    | ✓          | true       |
| 4 | Window ventilation - no night flushing                    | HVAC_VENTILATION_AS3 | false     | ✓        | true     | ✓          | false      |

Table: Ventilation

|   | Description  | code                | dT_Qhs | dT_Qcs |
|---|--|---------------------|--------|--------|
| 1 | None   | HVAC_CONTROLLER_AS0 | 2.5    | -2.5   |
| 2 | None   | HVAC_CONTROLLER_AS1 | 2.5    | -2.5   |
| 3 | PI controller  | HVAC_CONTROLLER_AS2 | 1.2    | -1.2   |
| 4 | PI controller with optimum tuning                              | HVAC_CONTROLLER_AS3 | 0.9    | -0.9   |
| 5 | room temperature control (electromagnetically/electronically). | HVAC_CONTROLLER_AS4 | 1.8    | 1.8    |

Table: Controller

|    | Description                                 | code                | feedstock  | scale    | efficiency | CAPEX_USD2015kW | LT_yr | O&M_% | IR_% |
|----|---|---------------------|------------|----------|------------|-----------------|-------|-------|------|
| 1  | none  | SUPPLY_HEATING_AS0  | NONE       | NONE     | 0          | 0               | 20    | 1     | 5    |
| 2  | oil-fired boiler                            | SUPPLY_HEATING_AS1  | OIL        | BUILDING | 0.8        | 493             | 20    | 1     | 5    |
| 3  | coal-fired furnace                          | SUPPLY_HEATING_AS2  | COAL       | BUILDING | 0.6        | 367             | 20    | 1     | 5    |
| 4  | natural gas-fired boiler                    | SUPPLY_HEATING_AS3  | NATURALGAS | BUILDING | 0.8        | 645             | 20    | 1     | 5    |
| 5  | electrical boiler                           | SUPPLY_HEATING_AS4  | GRID       | BUILDING | 0.9        | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 6  | wood-furnace                                | SUPPLY_HEATING_AS5  | WOOD       | BUILDING | 0.6        | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 7  | heatpump - soil/water                       | SUPPLY_HEATING_AS6  | GRID       | BUILDING | 4          | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 8  | heatpump - air/air                          | SUPPLY_HEATING_AS7  | GRID       | BUILDING | 2.7        | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 9  | heatpump - water/water                      | SUPPLY_HEATING_AS8  | GRID       | BUILDING | 3          | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 10 | district heating - natural gas-fired boiler | SUPPLY_HEATING_AS9  | NATURALGAS | DISTRICT | 0.6        | 100             | 20    | 1     | 5    |
| 11 | district heating - heatpump - soil/water    | SUPPLY_HEATING_AS10 | GRID       | DISTRICT | 0.6        | 100             | 20    | 1     | 5    |
| 12 | district heating - heat pump - water/water  | SUPPLY_HEATING_AS11 | GRID       | DISTRICT | 2.7        | 100             | 20    | 1     | 5    |

Table: Technologies de chauffage

|    | Description                                 | code                 | feedstock  | scale    | efficiency | CAPEX_USD2015kW | LT_yr | O&M_% | IR_% |
|----|---|----------------------|------------|----------|------------|-----------------|-------|-------|------|
| 1  | none  | SUPPLY_HOTWATER_AS0  | NONE       | NONE     | 0          | 0               | 20    | 1     | 5    |
| 2  | oil-fired boiler                            | SUPPLY_HOTWATER_AS1  | OIL        | BUILDING | 0.8        | 493             | 20    | 1     | 5    |
| 3  | coal-fired furnace                          | SUPPLY_HOTWATER_AS2  | COAL       | BUILDING | 0.6        | 367             | 20    | 1     | 5    |
| 4  | natural gas-fired boiler                    | SUPPLY_HOTWATER_AS3  | NATURALGAS | BUILDING | 0.8        | 645             | 20    | 1     | 5    |
| 5  | electrical boiler                           | SUPPLY_HOTWATER_AS4  | GRID       | BUILDING | 0.9        | 167             | 5     | 1     | 5    |
| 6  | wood-furnace                                | SUPPLY_HOTWATER_AS5  | WOOD       | BUILDING | 0.6        | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 7  | heatpump - soil/water                       | SUPPLY_HOTWATER_AS6  | GRID       | BUILDING | 4          | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 8  | heatpump - air/air                          | SUPPLY_HOTWATER_AS7  | GRID       | BUILDING | 2.7        | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 9  | heatpump - water/water                      | SUPPLY_HOTWATER_AS8  | GRID       | BUILDING | 3          | 200             | 20    | 1     | 5    |
| 10 | district heating - natural gas-fired boiler | SUPPLY_HOTWATER_AS9  | NATURALGAS | DISTRICT | 0.6        | 100             | 20    | 1     | 5    |
| 11 | district heating - heatpump - soil/water    | SUPPLY_HOTWATER_AS10 | GRID       | DISTRICT | 0.6        | 100             | 20    | 1     | 5    |
| 12 | district heating - heat pump - water/water  | SUPPLY_HOTWATER_AS11 | GRID       | DISTRICT | 2.7        | 100             | 20    | 1     | 5    |

Table: Technologies de chauffage d'ECS

|   | Description                        | code               | system  | feedstock | scale    | efficiency | CAPEX_USD2015kW | LT_yr | O&M_% | IR_% | reference      |
|---|------------------------------------|--------------------|---------|-----------|----------|------------|-----------------|-------|-------|------|----------------|
| 1 | none                               | SUPPLY_COOLING_AS0 | NONE    | NONE      | NONE     | 0          | 0               | 20    | 1     | 5    | educated guess |
| 2 | heatpump - air/air                 | SUPPLY_COOLING_AS1 | COOLING | GRID      | BUILDING | 2.7        | 200             | 20    | 1     | 5    | educated guess |
| 3 | heatpump - water/water             | SUPPLY_COOLING_AS2 | COOLING | GRID      | BUILDING | 3          | 200             | 20    | 1     | 5    | educated guess |
| 4 | district cooling - Lakewater/water | SUPPLY_COOLING_AS3 | COOLING | GRID      | DISTRICT | 3.2        | 200             | 20    | 1     | 5    | educated guess |
| 5 | district cooling - air/air         | SUPPLY_COOLING_AS4 | COOLING | GRID      | DISTRICT | 2.8        | 200             | 20    | 1     | 5    | educated guess |

Table: Technologies de refroidissement

|   | Description               | code                   | feedstock | scale | efficiency | CAPEX_USD2015kW | LT_yr | O&M_% | IR_% | reference      |
|---|---------------------------|------------------------|-----------|-------|------------|-----------------|-------|-------|------|----------------|
| 1 | none                      | SUPPLY_ELECTRICITY_AS0 | NONE      | NONE  | 0          | 0               | 20    | 1     | 5    | educated guess |
| 2 | Swiss consumer energy mix | SUPPLY_ELECTRICITY_AS1 | GRID      | CITY  | 0.99       | 1               | 20    | 1     | 5    | educated guess |

Table: Électricité

### Annexe 3: Table de consommation énergétique du scénario 1

| Name  | OIL_ww_MWWhr | OIL_hs_MWWhr | OIL_tot_MWWhr | NG_ww_MWWhr | NG_hs_MWWhr | NG_tot_MWWhr | GRID_ww_MWWhr | GRID_hs_MWWhr | GRID_tot_MWWhr | Qww_MWWhr | Qhs_MWWhr | Q_tot_MWWhr | E_sys_MWWhr |
|-------|--------------|--------------|---------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|----------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| B1000 | 8,28         | 63,23        | 71,51         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,44      | 43,04     | 45,48       | 14,064      |
| B1001 | 8,28         | 41,12        | 49,40         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,01      | 27,04     | 30,05       | 3,337       |
| B1002 | 15,82        | 83,50        | 99,32         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 5,49      | 55,14     | 60,63       | 9,378       |
| B1003 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 1,46          | 2,54          | 4,00           | 2,75      | 9,93      | 12,68       | 5,091       |
| B1004 | 13,27        | 72,23        | 85,49         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,81      | 47,77     | 52,58       | 7,75        |
| B1005 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 1,83          | 2,87          | 4,70           | 3,43      | 11,18     | 14,61       | 5,697       |
| B1006 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 1,14          | 2,29          | 3,43           | 2,06      | 8,98      | 11,04       | 4,105       |
| B1007 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 9,00        | 27,23       | 36,23        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,12      | 18,37     | 22,49       | 6,376       |
| B1008 | 34,61        | 152,67       | 187,28        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 20,43     | 102,73    | 123,16      | 22,5        |
| B1009 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 9,00        | 27,03       | 36,02        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,12      | 18,25     | 22,37       | 6,395       |
| B1010 | 9,20         | 52,46        | 61,66         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,43      | 34,98     | 38,42       | 5,701       |
| B1011 | 12,33        | 65,68        | 78,01         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,81      | 43,70     | 48,51       | 7,802       |
| B1012 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 19,95       | 37,43       | 57,39        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 11,68     | 27,20     | 38,87       | 18,064      |
| B1013 | 14,35        | 103,72       | 118,07        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 5,49      | 69,12     | 74,61       | 9,297       |
| B1014 | 44,21        | 268,64       | 312,84        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 27,64     | 181,49    | 209,13      | 29,964      |
| B1015 | 23,85        | 168,88       | 192,73        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 10,99     | 113,27    | 124,26      | 17,739      |
| B1016 | 49,31        | 328,00       | 377,31        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 30,90     | 223,02    | 253,92      | 49,173      |
| B1017 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 9,93        | 29,27       | 39,20        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,81      | 19,89     | 24,70       | 7,991       |
| B1018 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 13,73       | 39,36       | 53,09        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 26,74     | 33,61       | 11,41       |
| B1019 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 11,17       | 31,98       | 43,14        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 5,49      | 21,70     | 27,19       | 8,647       |
| B1020 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 13,19       | 41,44       | 54,63        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 28,24     | 35,11       | 11,199      |
| B1021 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 10,41       | 29,66       | 40,06        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,81      | 20,07     | 24,88       | 7,853       |
| B1022 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,22        | 23,34       | 30,56        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 15,74     | 18,49       | 5,235       |
| B1023 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 12,32       | 35,08       | 47,41        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,18      | 23,83     | 30,01       | 10,263      |
| B1024 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 9,07        | 25,74       | 34,80        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,12      | 17,40     | 21,52       | 6,354       |
| B1025 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 16,63       | 44,08       | 60,71        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 8,93      | 30,01     | 38,94       | 14,71       |
| B1026 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 12,45       | 34,17       | 46,62        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,18      | 23,17     | 29,35       | 9,769       |
| B1027 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 14,16       | 43,32       | 57,48        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 29,37     | 36,23       | 11,093      |
| B1028 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 11,51       | 34,70       | 46,21        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 5,49      | 23,52     | 29,02       | 9,119       |
| B1029 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 14,67       | 38,22       | 52,89        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 7,55      | 25,96     | 33,51       | 11,895      |
| B1030 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 13,62       | 36,35       | 49,97        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 24,66     | 31,53       | 11,222      |
| B1031 | 16,05        | 89,65        | 105,70        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 59,92     | 66,79       | 11,184      |
| B1032 | 57,61        | 276,95       | 334,56        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 37,26     | 187,52    | 224,78      | 40,516      |
| B1033 | 14,74        | 86,50        | 101,24        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,18      | 57,62     | 63,80       | 9,904       |
| B1034 | 23,04        | 124,59       | 147,63        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 9,62      | 82,91     | 92,53       | 15,64       |
| B1035 | 9,62         | 50,86        | 60,48         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 33,50     | 36,25       | 5,33        |
| B1036 | 43,81        | 174,73       | 218,54        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 25,84     | 117,18    | 143,02      | 28,246      |
| B1037 | 7,37         | 38,74        | 46,11         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,01      | 25,79     | 28,80       | 3,303       |
| B1038 | 17,80        | 106,13       | 123,93        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 8,24      | 71,27     | 79,51       | 13,279      |
| B1039 | 52,74        | 229,39       | 282,13        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 33,65     | 154,96    | 188,61      | 36,126      |
| B1040 | 20,00        | 120,24       | 140,24        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 9,62      | 80,77     | 90,39       | 15,52       |
| B1041 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 12,91       | 38,50       | 51,41        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 26,30     | 33,16       | 11,446      |
| B1042 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,95        | 18,54       | 26,49        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 13,05     | 15,80       | 4,752       |
| B1043 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,86        | 18,36       | 26,22        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 12,94     | 15,68       | 4,701       |
| B1044 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,81        | 18,02       | 25,83        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 12,68     | 15,42       | 4,461       |
| B1045 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,77        | 18,03       | 25,79        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 12,70     | 15,44       | 4,522       |
| B1046 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,75        | 18,01       | 25,76        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 12,69     | 15,43       | 4,521       |
| B1047 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,77        | 18,43       | 26,21        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 13,01     | 15,76       | 4,79        |
| B1048 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,61        | 17,67       | 25,28        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 12,44     | 15,19       | 4,262       |
| B1049 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,75        | 18,35       | 26,09        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 2,75      | 12,99     | 15,74       | 5,011       |
| B1050 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,90        | 24,92       | 32,82        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,43      | 16,86     | 20,30       | 5,91        |
| B1051 | 0,00         | 0,00         | 0,00          | 7,91        | 25,69       | 33,60        | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,43      | 17,34     | 20,77       | 5,914       |
| B1052 | 10,64        | 52,68        | 63,33         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,21      | 34,88     | 39,09       | 5,08        |
| B1053 | 17,76        | 98,06        | 115,82        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 6,87      | 65,17     | 72,04       | 11,796      |
| B1054 | 15,87        | 99,25        | 115,11        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 7,55      | 66,88     | 74,43       | 12,504      |
| B1055 | 118,30       | 501,01       | 619,30        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 82,33     | 340,45    | 422,78      | 88,339      |
| B1056 | 11,85        | 74,51        | 86,37         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 4,81      | 49,79     | 54,59       | 8,204       |
| B1057 | 26,68        | 120,07       | 146,75        | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 14,42     | 80,40     | 94,82       | 16,02       |
| B1058 | 10,19        | 62,54        | 72,73         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,43      | 41,56     | 44,99       | 6,335       |
| B1059 | 10,51        | 61,88        | 72,39         | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 0,00          | 0,00          | 0,00           | 3,43      | 40,91     | 44,35       | 6,098       |
| SUM   | 718,07       | 3.767,90     | 4.485,97      | 299,00      | 812,90      | 1.111,90     | 4,43          | 7,69          | 12,12          | 537,18    | 3.119,97  | 3.657,14    | 752,91      |

Table: Consommation énergétique du scénario 1

## Annexe 4: Analyse technico-économique du scénario 1

| Année                | 0            | 1          | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           | 11           | 12           | 13           | 14           | 15           | 16           | 17           | 18           | 19           | 20 |
|----------------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----|
| Recettes [€/an]      | 0,00         | 487.865,44 | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   |    |
| Dépenses [€/an]      | 0,00         | 487.865,44 | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   |    |
| i [%]                | 2,30         | 487.865,44 | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   |    |
| Dk - Rk [€/an]       | 0,00         | 487.865,44 | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   |    |
| V [€]                | 0,00         | 487.865,44 | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   | 487.865,44   |    |
| PWF(k)               | 1,00         | 0,98       | 0,96         | 0,93         | 0,91         | 0,89         | 0,87         | 0,85         | 0,83         | 0,81         | 0,80         | 0,78         | 0,76         | 0,74         | 0,73         | 0,71         | 0,70         | 0,68         | 0,66         | 0,63         |    |
| (Dk - Rk) * PWF(k)   | 476.896,81   | 465.174,79 | 455.693,83   | 445.485,52   | 435.433,74   | 425.433,55   | 415.074,04   | 405.179,49   | 397.575,26   | 388.356,62   | 379.398,94   | 371.357,71   | 365.008,52   | 354.847,04   | 345.889,05   | 339.070,43   | 331.147,14   | 323.995,5    | 316.103,90   | 309.590,32   |    |
| Coûts actualisés [€] | 476.896,81   | 943.071,61 | 1.398.705,44 | 1.844.213,96 | 2.273.647,51 | 2.705.291,25 | 3.121.365,29 | 3.328.084,78 | 3.923.560,04 | 4.314.296,65 | 4.694.195,59 | 5.063.553,31 | 5.428.361,83 | 5.783.348,34 | 6.130.277,91 | 6.469.348,34 | 6.800.753,48 | 7.124.790,74 | 7.441.501,64 | 7.751.091,66 |    |
| CCV [€]              | 7.751.091,96 |            |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |    |

|           |   |
|-----------|---|
| I [€]     | Coûts d'investissement                                  |
| i [%]     | Taux d'actualisation                                    |
| Rk - Dk   | Recettes en année k moins dépenses en année k           |
| PWF (i,k) | Present Worth Factor en fonction du taux i et d'année k |
|           | Formule: PWF(i,k) = $(1+i)^{-k}$                        |

Table: Analyse technico-économique du scénario 1

## Annexe 5: Production & consommation énergétique du scénario 2

| Name       | Aroof_m2         | Area_PV_m2      | PV_roofs_top_E_kWh | GRID_MWhyr      | wall_surface_m2  | Capex_total_sys_USD |
|------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| B1000      | 75,70            | 18,61           | 3.917,27           | 31,37           | 287,68           | 33.040,96           |
| B1001      | 65,63            | 16,14           | 3.395,74           | 13,58           | 227,06           | 8.714,68            |
| B1002      | 176,29           | 43,35           | 9.121,91           | 28,70           | 401,35           | 18.376,24           |
| B1003      | 95,56            | 23,50           | 4.945,29           | 12,05           | 299,24           | 0,00                |
| B1004      | 145,96           | 35,89           | 7.552,24           | 24,46           | 344,69           | 34.845,71           |
| B1005      | 106,45           | 26,18           | 5.515,78           | 13,87           | 332,83           | 0,00                |
| B1006      | 77,19            | 18,98           | 3.993,91           | 10,06           | 268,85           | 0,00                |
| B1007      | 122,67           | 30,16           | 6.347,86           | 16,53           | 343,94           | 61.378,88           |
| B1008      | 426,12           | 104,78          | 22.067,06          | 57,23           | 626,18           | 18.051,41           |
| B1009      | 123,04           | 30,25           | 6.373,84           | 16,48           | 344,39           | 27.578,63           |
| B1010      | 107,48           | 26,43           | 5.565,31           | 19,32           | 281,07           | 41.330,09           |
| B1011      | 147,24           | 36,20           | 7.625,41           | 24,86           | 334,08           | 8.326,71            |
| B1012      | 352,87           | 86,77           | 18.260,30          | 35,77           | 582,42           | 22.846,69           |
| B1013      | 168,12           | 41,34           | 8.696,29           | 28,26           | 460,02           | 52.617,65           |
| B1014      | 554,26           | 136,29          | 28.675,79          | 77,95           | 1.043,93         | 25.628,33           |
| B1015      | 316,05           | 77,71           | 16.366,35          | 47,51           | 703,17           | 11.525,46           |
| B1016      | 935,32           | 229,99          | 48.431,61          | 115,15          | 1.325,75         | 21.428,46           |
| B1017      | 153,92           | 37,85           | 7.982,81           | 18,86           | 380,99           | 21.139,37           |
| B1018      | 231,96           | 57,04           | 12.022,92          | 26,02           | 494,32           | 117.300,02          |
| B1019      | 162,67           | 40,00           | 8.407,52           | 20,65           | 412,84           | 15.408,41           |
| B1020      | 225,38           | 55,42           | 11.669,70          | 26,23           | 531,16           | 27.037,76           |
| B1021      | 151,19           | 37,18           | 7.832,26           | 19,01           | 384,64           | 13.077,80           |
| B1022      | 100,67           | 24,75           | 5.202,55           | 13,79           | 312,82           | 12.861,71           |
| B1023      | 193,21           | 47,51           | 10.009,67          | 23,37           | 440,55           | 8.353,00            |
| B1024      | 120,03           | 29,51           | 6.213,16           | 16,13           | 339,05           | 9.557,02            |
| B1025      | 282,67           | 69,51           | 14.631,78          | 31,36           | 534,59           | 7.022,92            |
| B1026      | 179,04           | 44,02           | 9.274,91           | 22,73           | 432,91           | 9.145,86            |
| B1027      | 214,51           | 52,75           | 11.127,68          | 27,08           | 565,36           | 9.156,35            |
| B1028      | 175,55           | 43,17           | 9.087,61           | 21,95           | 450,42           | 10.444,62           |
| B1029      | 225,60           | 55,47           | 11.705,11          | 26,54           | 479,07           | 14.319,32           |
| B1030      | 216,28           | 53,18           | 11.210,27          | 25,01           | 450,04           | 11.430,51           |
| B1031      | 212,62           | 52,28           | 11.028,58          | 31,04           | 411,04           | 14.489,09           |
| B1032      | 779,02           | 191,55          | 40.393,77          | 101,56          | 1.132,28         | 10.580,87           |
| B1033      | 186,76           | 45,92           | 9.682,46           | 29,19           | 389,36           | 7.861,98            |
| B1034      | 295,33           | 72,62           | 15.317,29          | 43,49           | 568,57           | 12.760,72           |
| B1035      | 99,16            | 24,38           | 5.137,69           | 18,94           | 272,80           | 9.036,80            |
| B1036      | 534,89           | 131,52          | 27.706,67          | 68,60           | 658,65           | 16.841,37           |
| B1037      | 61,88            | 15,22           | 3.209,29           | 12,72           | 228,27           | 12.466,93           |
| B1038      | 250,81           | 61,67           | 13.007,61          | 36,33           | 489,30           | 15.126,56           |
| B1039      | 680,70           | 167,38          | 35.264,57          | 87,78           | 888,97           | 12.208,72           |
| B1040      | 293,51           | 72,17           | 15.218,13          | 41,43           | 525,15           | 14.415,99           |
| B1041      | 205,42           | 50,51           | 10.647,96          | 25,63           | 503,47           | 13.555,91           |
| B1042      | 91,13            | 22,41           | 4.715,83           | 13,13           | 303,02           | 14.046,72           |
| B1043      | 90,47            | 22,24           | 4.681,25           | 13,00           | 301,06           | 8.468,31            |
| B1044      | 85,83            | 21,10           | 4.440,66           | 12,66           | 295,39           | 8.512,35            |
| B1045      | 86,59            | 21,29           | 4.480,66           | 12,70           | 295,50           | 12.565,87           |
| B1046      | 87,02            | 21,40           | 4.502,86           | 12,70           | 296,33           | 16.041,57           |
| B1047      | 92,17            | 22,66           | 4.769,01           | 13,08           | 303,24           | 12.385,37           |
| B1048      | 82,23            | 20,22           | 4.255,02           | 12,28           | 290,65           | 18.585,43           |
| B1049      | 96,47            | 23,72           | 4.999,57           | 13,23           | 308,58           | 7.364,78            |
| B1050      | 113,73           | 27,96           | 5.892,25           | 15,07           | 328,80           | 7.293,46            |
| B1051      | 113,78           | 27,98           | 5.895,86           | 15,29           | 328,86           | 7.119,30            |
| B1052      | 95,35            | 23,45           | 4.931,53           | 17,81           | 281,39           | 7.129,81            |
| B1053      | 224,18           | 55,12           | 11.598,94          | 33,84           | 453,35           | 7.136,10            |
| B1054      | 236,86           | 58,24           | 12.284,01          | 33,74           | 458,36           | 7.331,24            |
| B1055      | 1.674,23         | 411,68          | 86.708,83          | 198,79          | 1.786,71         | 6.924,19            |
| B1056      | 154,68           | 38,03           | 8.016,77           | 24,67           | 353,75           | 7.463,45            |
| B1057      | 304,45           | 74,86           | 15.726,85          | 43,75           | 528,50           | 17.422,02           |
| B1058      | 119,12           | 29,29           | 6.153,24           | 20,52           | 316,46           | 46.516,78           |
| B1059      | 114,54           | 28,16           | 5.930,32           | 20,39           | 304,87           | 29.353,58           |
| <b>SUM</b> | <b>14.091,56</b> | <b>3.464,96</b> | <b>729.827,39</b>  | <b>1.915,20</b> | <b>28.018,09</b> | <b>1.052.949,84</b> |

## Annexe 6: Analyse technico-économique du scénario 2

| Année                | 1            | 2            | 3            | 4            | 5            | 6             | 7             | 8             | 9            | 10           | 11           | 12           | 13           | 14           | 15           | 16           | 17           | 18           | 19           | 20           |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Recettes [€/an]      | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43     | 42.018,43     | 42.018,43     | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    | 42.018,43    |              |
| Dépenses [€/an]      | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42  | 1.189.928,42  | 1.189.928,42  | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 | 1.189.928,42 |
| i [%]                | 0,00         |              |              |              |              |               |               |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Dic. Rk [€/an]       | 2,30         |              |              |              |              |               |               |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| V [€]                | -288.000,00  |              |              |              |              |               |               |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| PWF(i,k)             | 1,00         | 0,98         | 0,96         | 0,93         | 0,91         | 0,89          | 0,87          | 0,85          | 0,83         | 0,81         | 0,80         | 0,78         | 0,76         | 0,74         | 0,73         | 0,71         | 0,70         | 0,68         | 0,66         | 0,63         |
| (Dk - Rk) PWF(i,k)   | 1.121.101,65 | 1.096.873,56 | 1.073.212,67 | 1.048.065,73 | 1.026.089,71 | 1.005.989,63  | 1.005.989,63  | 1.005.989,63  | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 | 1.005.989,63 |
| Coûts actualisés [€] | 1.403.626,58 | 2.494.170,64 | 3.560.196,12 | 5.722.454,26 | 8.602.254,26 | 11.616.699,87 | 16.106.699,87 | 22.292.378,84 | 6.473.983,20 | 6.741.941,20 | 6.915.373,82 | 7.084.911,44 | 7.412.632,53 | 7.720.654,81 | 7.806.677,79 | 7.861.189,79 | 7.957.592,05 | 8.105.905,06 | 8.250.492,55 | 8.404.029,21 |
| CCV [€]              | 8.464.029,21 |              |              |              |              |               |               |               |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |

|           |   |
|-----------|---|
| I [€]     | Coûts d'investissement                                  |
| i [%]     | Taux d'actualisation                                    |
| Rk - Dk   | Recettes en année k moins dépenses en année k           |
| PWF (i,k) | Present Worth Factor en fonction du taux i et d'année k |
|           | Formule: PWF(i,k) = $(1+i)^{-k}$                        |

Table : Analyse technico-économique du scénario 2

### Annexe 7: Consommations restantes du scénario 3

| Name       | OIL_hs_MWhr     | OIL_ww_MWhr   | OIL_MMWh        | NG_hs_MWhr    | NG_ww_MWhr    | NG_MMWh         | E_hs_MWhr   | E_ww_MWhr   | GRID_MMWh    | Oil_utile_MMWh | Oil_rest_MMWh   | NG_rest_MMWh  | GRID_rest_MMWh |
|------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| B1000      | 63,23           | 8,28          | 71,51           | 0,00          | 0,00          | 0,00            | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 3,86           | 67,65           | 0,00          | 0,00           |
| B1001      | 41,12           | 8,28          | 49,40           | 0,00          | 0,00          | 0,00            | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 3,77           | 45,64           | 0,00          | 0,00           |
| B1002      | 83,50           | 15,82         | 99,32           | 0,00          | 0,00          | 0,00            | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 8,22           | 91,10           | 0,00          | 0,00           |
| B1003      | 0,00            | 0,00          | 0,00            | 0,00          | 0,00          | 0,00            | 2,54        | 1,46        | 4,00         | 3,37           | 0,00            | 0,00          | 0,63           |
| B1058      | 62,54           | 10,19         | 72,73           | 0,00          | 0,00          | 0,00            | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 5,76           | 66,96           | 0,00          | 0,00           |
| B1059      | 61,88           | 10,51         | 72,39           | 0,00          | 0,00          | 0,00            | 0,00        | 0,00        | 0,00         | 5,84           | 66,55           | 0,00          | 0,00           |
| <b>SUM</b> | <b>3.767,90</b> | <b>718,07</b> | <b>4.485,97</b> | <b>812,90</b> | <b>299,00</b> | <b>1.111,90</b> | <b>7,69</b> | <b>4,43</b> | <b>12,12</b> | <b>636,17</b>  | <b>4.031,57</b> | <b>940,24</b> | <b>2,00</b>    |

Table: Consommations d'énergie qui restent à payer

### Annexe 8: Analyse technico-économique du scénario 3

| Année                | 0            | 1            | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           | 11           | 12           | 13           | 14           | 15           | 16           | 17           | 18           | 19           | 20           |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Recettes [€/an]      | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    | 71.643,71    |              |
| Dépenses [€/an]      | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 | 1.044.441,37 |
| i [€]                | 0,00         | 1,30         | 2,30         |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Dk - Rk [€/an]       | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   | 972.797,66   |              |
| V [€]                | 978.550,93   | 1.00         | 1.00         | 0,98         | 0,96         | 0,95         | 0,93         | 0,91         | 0,89         | 0,87         | 0,85         | 0,83         | 0,81         | 0,80         | 0,78         | 0,76         | 0,74         | 0,73         | 0,71         | 0,68         | 0,65         |
| PWFi(X)              | 953.341,71   | 933.885,75   | 904.701,82   | 885.245,87   | 867.050,24   | 294.807,26   | 288.030,37   | 281.233,19   | 274.476,00   | 362.107,92   | 264.310,22   | 257.533,04   | 280.355,85   | 247.367,26   | 321.370,78   | 237.291,48   | 230.422,30   | 233.647,11   | 220.238,52   | 285.153,99   | 0,63         |
| (Dk - Rk) * PWFi(X)  | 953.341,71   | 933.885,75   | 904.701,82   | 885.245,87   | 867.050,24   | 294.807,26   | 288.030,37   | 281.233,19   | 274.476,00   | 362.107,92   | 264.310,22   | 257.533,04   | 280.355,85   | 247.367,26   | 321.370,78   | 237.291,48   | 230.422,30   | 233.647,11   | 220.238,52   | 285.153,99   | 0,63         |
| Coûts actualisés [€] | 6.030,20     | 947.434,57   | 1.881.904,92 | 2.788.329,81 | 3.772.359,06 | 4.087.345,64 | 4.394.955,03 | 4.695.787,23 | 4.989.842,25 | 5.361.739,68 | 5.645.628,92 | 6.193.072,85 | 6.450.232,62 | 6.791.182,42 | 7.038.173,41 | 7.288.176,72 | 7.531.402,85 | 7.761.450,88 | 8.066.189,89 | 8.066.189,89 |              |
| CCV [€]              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |

|            |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| I [€]      | Coûts d'investissement                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| i [%]      | Taux d'actualisation                                    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Rk - Dk    | Recettes en année k moins dépenses en année k           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| PWFi (i,k) | Present Worth Factor en fonction du taux i et d'année k |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|            | Formule: $PWFi(i,k) = (1+i)^{-k}$                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Table : Analyse technico-économique du scénario 3