

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UNI.LU – Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication

Modélisation et optimisation de la consommation énergétique d'un ménage du bâti wallon en vue de l'implémentation d'un système de management de l'énergie

MAXENCE PIRON

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLOMES DE

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITE ENERGIES RENOUVELABLES ET BATIMENTS
DURABLES (ULIEGE)**

MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE KIKI GRATIEN JESUGO DIEUDONNE ET FADI FIKANI

**COMITE DE LECTURE :
ANNE WOUTERS
STEPHANE MONFILS
JONAS LAMBERT**

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 et de l'Université de Luxembourg.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège [et de l'institution partenaire s'il y a lieu].

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : PIRON Maxence, maxpiron10@gmail.com

« Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles »

(George Box)

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu et sans lesquelles ce travail n'aurait pas vu le jour. Ce projet a été long, complexe, et ponctué de nombreux rebondissements et le voici.

Je remercie chaleureusement Mme Anne Wouters, M. Stéphane Monfils, et Jonas Lambert pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à M. Fadi Fikani, qui m'a soutenu durant plus d'une année, traversant avec moi les hauts et les bas de ce projet.

Je remercie également grandement M. Kiki Gratien Jesugo Dieudonné, qui m'a guidé avec sagesse, redressant le cap de ce travail au fil du temps et m'aidant à l'affiner intelligemment.

Enfin, comment ne pas mentionner le soutien inestimable de mes amis et de ma famille ! Votre patience, compréhension, aide et motivation m'ont permis de franchir chaque étape de ce projet. Sans vous, ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

Je ne suis peut-être pas le plus grand des écrivains, mais chacun de ceux qui m'ont accompagné, de près ou de loin, durant ces longs mois de travail, m'a inspiré pour rédiger chaque mot de ce document.

Abstract

This thesis focuses on the development of an energy consumption model for a typical building in Wallonia, selected from those analyzed in the COZEB study, which referenced the Walloon building stock. Energy consumption is divided into three areas: heating, electricity, and domestic hot water. Heating demand is assessed using TRNSYS software, allowing the determination of energy requirements by considering all technical and usage parameters of the building. Electricity and domestic hot water consumption are derived from the analysis of data from white and grey literature, leading to the determination of a weekly consumption profile extended over the entire year. Photovoltaic production is also simulated using TRNSYS. These consumption and production figures are then analyzed and optimized to demonstrate the benefits of integrating an energy management system into households. The integration of photovoltaic panels makes it possible to shift the consumption of certain appliances to moments when it's most beneficial. Ultimately, these optimizations lead to greater self-consumption, which can bring real economic advantages. The starting assumption is that implementing an energy management system in households will offer significant benefits.

Résumé

Ce travail se concentre sur l'élaboration d'un modèle de consommation énergétique pour un bâtiment typique en Wallonie, sélectionné parmi ceux analysés par l'étude COZEB, qui a référencé le bâti wallon. La consommation énergétique est divisée en trois axes : le chauffage, l'électricité et l'eau chaude sanitaire. La demande en chauffage est évaluée à l'aide du logiciel TRNSYS, permettant de déterminer les besoins énergétiques en prenant en compte l'ensemble des paramètres technique et d'utilisation du bâtiment. Les consommations électriques et d'eau chaude sanitaire sont quant à elles issues de l'analyse de données provenant de la littérature blanche et grise, afin de déterminer un profil de consommation hebdomadaire étendu sur l'année entière. La production photovoltaïque est également simulée via TRNSYS. Ces consommations et cette production sont ensuite analysées et optimisées afin de démontrer l'intérêt de l'intégration d'un système de management de l'énergie au sein des foyers. L'intégration de panneaux photovoltaïques permettant permet notamment le déplacement de la consommation de certains appareils vers des moments opportuns. Les résultats finaux de ces optimisations se traduisent par une augmentation de l'autoconsommation. Le postulat de départ est qu'il y aura un réel intérêt de mettre un système de management de l'énergie au sein des ménages.

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	1
TABLE DES FIGURES	3
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES ABREVIATIONS	5
1. INTRODUCTION	6
2. DESCRIPTIF ET OBJECTIFS DU TRAVAIL	12
3. REVUE DE LITTÉRATURE	13
3.1 LES LOGICIELS DE MODELISATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS	13
3.2 LA TYPOLOGIE DE L’HABITAT WALLON	15
3.2.1 <i>Le parc de bâtiment en Wallonie</i>	15
3.3 LES POSTES DE CONSOMMATION D’ENERGIE DANS LES BATIMENTS	18
3.3.1 <i>La consommation de chauffage</i>	18
3.3.2 <i>L’eau chaude sanitaire</i>	19
3.3.3 <i>Les équipements électriques</i>	20
3.3.4 <i>Les consommations électriques</i>	27
3.4 PROFIL D’OCCUPATION DES BATIMENTS RESIDENTIELS	33
3.5 LE SYSTEME DE MANAGEMENT DE L’ENERGIE	36
3.5.1 <i>Les concepts</i>	36
3.5.2 <i>La production photovoltaïque</i>	39
4. METHODOLOGIE	41
4.1 CONSTRUCTION DU MODELE DE CONSOMMATION	41
4.1.1 <i>Caractéristiques du modèle</i>	41
4.1.2 <i>La consommation énergétique du chauffage</i>	43
4.1.3 <i>La consommation énergétique des équipements électriques</i>	51
4.1.4 <i>La consommation en eau chaude sanitaire</i>	56
4.2 L’OPTIMISATION DU MODELE DE CONSOMMATION	60
4.2.1 <i>La production photovoltaïque</i>	60
4.2.2 <i>Détermination des charges modulables</i>	60
4.2.3 <i>La modulation de la charge</i>	61
4.2.4 <i>Les simulations sous Excel</i>	65

5. RESULTATS	67
5.1 RESULTATS DE CONSOMMATION ENERGETIQUE DU BATIMENT	67
5.1.1 <i>La consommation en chauffage</i>	67
5.1.2 <i>La consommation des équipements électriques</i>	69
5.1.3 <i>La consommation d'eau chaude sanitaire</i>	73
5.1.4 <i>Consommation totale</i>	76
5.2 LES RESULTATS DE L'OPTIMISATION DE LA CHARGE	77
5.2.1 <i>Simulation sans optimisation</i>	77
5.2.2 <i>Simulation avec optimisation</i>	78
6. DISCUSSION ET LIMITES	80
7. CONCLUSION	82
BIBLIOGRAPHIE	83
ANNEXES.....	87
ANNEXE 1 TABLEAU DES DIFFERENTES TYPOLOGIES DE BATIMENT ETUDIEES DANS L'ETUDE CoZEB REPRESENTANT L'ENSEMBLE DU BATI WALLON	87
ANNEXE 2 RAPPORT PVGIS DES PERFORMANCES D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE BASE A ARLON AVEC 4,32 KWC ORIENTATION -45° ET 45° DE PENTE	89
ANNEXE 3 PLANS DE LA MAISON 4 FAÇADES K55 ETUDIEE.....	90
ANNEXE 4 GAINS INTERNES RADIATIFS ET CONVECTIF EN KJ/H DE CHAQUE EQUIPEMENT ELECTRIQUE	93
ANNEXE 5 SCHEDULES D'ACTIVATIONS ET D'ARRET DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES ET DE LA CONSOMMATION VOLUMIQUE DE L'EAU CHAUDE SANITAIRE	93
ANNEXE 6 FICHE PRODUIT DU BALLON D'EAU CHAUDE VAILLANT UTILISE POUR LA SIMULATION	97
ANNEXE 7 FICHE PRODUIT DU BALLON D'EAU CHAUDE VAILLANT UTILISE POUR LA SIMULATION	99
ANNEXE 8 GRAPHIQUE DES TEMPERATURES DES DEUX ZONES HABITABLES ANALYSEES (LE REZ-DE-CHAUSSEE EN ORANGE ET L'ETAGE EN VERT). EN COMPARAISON AVEC LA TEMPERATURE EXTERIEURE DU FICHIER EXTERNE D'ARLON 2021	

Table des figures

FIGURE 1 : CONSOMMATION ENERGETIQUE MONDIALE ANNUELLE EN TWH PAR SOURCE ENTRE 1990 ET 2021	..6
FIGURE 2 : ÉVOLUTION DU PRIX DE L'ELECTRICITE EN BELGIQUE	8
FIGURE 3 : REPARTITION DES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE CONSOMMEE PAR LA BELGIQUE EN 2022 (%)	9
FIGURE 4 : SCHEMA REPRESENTANT LES DEUX TYPES DE COMMUNAUTES D'ENERGIES RENOUVELABLES ET CITOYENNE	9
FIGURE 5 : REPARTITION DES LOGEMENTS WALLONS PAR CATEGORIE PEB (%) EN 2019	15
FIGURE 6 : NOMBRE DE DEGRE JOUR DE REFROIDISSEMENT ENTRE 2014 ET 2020	18
FIGURE 7 : PENETRATION DES APPAREILS ELECTROMENAGERS EN BELGIQUE, DE 2010 A 2020	22
FIGURE 8 : PENETRATION DES APPAREILS ELECTRONIQUES EN BELGIQUE, DE 2010 A 2020	22
FIGURE 9 : APPAREILS ELECTRONIQUES DOMESTIQUE SELON LEUR PUISSANCE DE CONSOMMATION EN W ET LEUR CONSOMMATION ENERGETIQUE ANNUELLE EN KWH	24
FIGURE 10 : CLASSIFICATION DES APPAREILS ELECTRIQUES SELON ONUR A. ET BELGIN T.	25
FIGURE 11 : REPARTITION DES DIFFERENTS MODES DE TRANSPORTS ENTRE LE DOMICILE ET LE TRAVAIL ET BELGIQUE ET SELON LES DIFFERENTES REGIONS EN 2021 – 2022	26
FIGURE 12 : NOMBRE TOTAL DE VOITURES PARTICULIERES (M1) A CARBURANT ALTERNATIF (VEB ET VRH)	27
FIGURE 13 : PROFIL DE CONSOMMATION JOURNALIER EN LITRE D'EAU CHAUDE SANITAIRE PAR HEURE EN FONCTION DE LA SAISON	28
FIGURE 14 : MODE DE DEPLACEMENT AU COURS DE LA JOURNEE EN MINUTES TOTALES DE DEPLACEMENT	31
FIGURE 15 : REPARTITION DU NOMBRE D'HEURE PAR ACTIVITE D'UN BELGE DURANT UNE JOURNEE	33
FIGURE 16 : PROFIL MOYEN DE LA PROBABILITE DE PRESENCE, ABSENCE OU DE SOMMEIL D'UN OCCUPANT BELGE AU SEIN D'UN HABITAT	34
FIGURE 17 : LES TROIS CAS AYANT UNE INFLUENCE DIRECTE OU NON SUR LA CONSOMMATION ENERGETIQUE	34
FIGURE 18 : PROFIL MOYEN DE PROBABILITE DES ACTIVITES AU COURS DE LA JOURNEE	35
FIGURE 19 : LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UN SYSTEME DE MANAGEMENT DE L'ENERGIE DOMESTIQUE	37
FIGURE 20 : SCHEMA MONTRANT LE PROBLEME ENTRE LES PERIODES DE PRODUCTION SOLAIRE EN JOURNEE ET DE CONSOMMATION MATINALE ET EN SOIREE	37
FIGURE 21 : DECOUPAGE DES ZONES DU REZ-DE-CHAUSSEE (EN HAUT A GAUCHE), DU SECOND ETAGE (EN BAS) ET D'UNE COUPE TRANSVERSALE DU BATIMENT (EN HAUT A DROITE)	44
FIGURE 22 : REPRESENTATION 3D SOUS SKETCHUP DE LA MODELISATION DU BATIMENT ANALYSE	45
FIGURE 23 : LES SCHEDULES D'OCCUPATION DES DEUX ZONES DU BATIMENT	47
FIGURE 24 : DEBIT DE VENTILATION SELON LA NORME NBN D50-001	48
FIGURE 25 : ENVIRONNEMENT DE SIMULATION SUR SIMULATION STUDIO	50
FIGURE 26 : NOMBRE D'HEURE D'UTILISATION DE L'ECLAIRAGE POUR LES HEBERGEMENTS	56
FIGURE 27 : PUISSANCE APPELEE POUR LE CHAUFFAGE EN KW DURANT UNE ANNEE AVEC LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE ILLIMITEE	67
FIGURE 28 : PUISSANCE APPELEE POUR LE CHAUFFAGE EN KW DURANT UNE ANNEE AVEC LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE LIMITEE	68
FIGURE 29 : COURBE DE PUISSANCE APPELEE EN W PAR LES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES DURANT UNE SEMAINE	70
FIGURE 30 : CONSOMMATION JOURNALIERE EN LITRE TOUT AU LONG D'UNE JOURNEE EN SEMAINE	73
FIGURE 31 : PUISSANCE APPELEE EN W POUR LA CONSOMMATION D'EAU CHAUDE SANITAIRE AU COURS D'UNE JOURNEE EN SEMAINE	73

FIGURE 32 : DEUX GRAPHIQUES REPRESENTANTS LE POURCENTAGE DE CHARGE DU BALLON DE STOCKAGE D'ECS (COURBE BLEUE, AU-DESSUS) ET DE LA PUISSANCE APPELEE EN W PAR LA RESISTANCE ELECTRIQUE DU BALLON DE STOCKAGE D'ECS DURANT LA PREMIERE JOURNEE DE SIMULATION.....	75
FIGURE 33 : PART DES DIFFERENTES CONSOMMATIONS EN kWh	76
FIGURE 34 : PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE ET CONSOMMATION DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES COMBINE A LA CONSOMMATION D'EAU CHAUDE SANITAIRE EN W DURANT UNE SEMAINE DU MOIS DE JUIN	77

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : LES DIFFERENTS TYPES DE MAISONS REPRESENTATIVES DU BATI WALLON DANS L'ETUDE COZEB	17
TABLEAU 2 : CATEGORIES ET APPAREILS ANALYSEES PAR L'ADEME DANS UN RAPPORT DE 2021 SUR LA CONSOMMATION DES EQUIPEMENTS ELECTRODOMESTIQUES DES FOYERS FRANÇAIS	23
TABLEAU 3 : ESTIMATION DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DES APPAREILS ELECTROMENAGERS SELON L'ICEDD EN 2020	29
TABLEAU 4 : VALEURS CARACTERISTIQUES MOYENNES D'UNE VOITURE ELECTRIQUE EUROPEENNE	31
TABLEAU 5 : CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS DE CONSTRUCTION UTILISES	45
TABLEAU 6 : LA COMPOSITION DES PAROIS	46
TABLEAU 7 : APPAREILS CONTINUS AVEC LEURS CARACTERISTIQUES	52
TABLEAU 8 : APPAREILS ELECTRONIQUES PAR CATEGORIES D'ACTIVITE.....	53
TABLEAU 9 : ACTIVITES DEFINISSABLES DURANT UNE JOURNEE, LEURS HORAIRES D'EXECUTION ET LES APPAREILS ELECTRIQUES ASSOCIES	55
TABLEAU 10 : CARACTERISTIQUE DU BALLON D'EAU CHAUDE SANITAIRE	57
TABLEAU 11 : ENERGIE TOTALE CONSOMMEE EN kWh ET LA CONSOMMATION SURFACIQUE EN kWh/m^2 POUR LE CHAUFFAGE DE L'HABITAT ANALYSE DURANT UN AN AVEC LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE ILLIMITEE	68
TABLEAU 12 : ENERGIE TOTALE CONSOMMEE EN kWh ET LA CONSOMMATION SURFACIQUE EN kWh/m^2 POUR LE CHAUFFAGE DE L'HABITAT ANALYSE DURANT UN AN AVEC LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE LIMITEE	69
TABLEAU 13 : CONSOMMATIONS ANNUELLES ATTENDUES ET SIMULEES EN kWh DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES	72
TABLEAU 14 : CONSOMMATION ANNUELLE TOTALE EN kWh AVEC ET SANS ELECTROMOBILITE.....	72
TABLEAU 15 : VOLUME EN LITRES ET CONSOMMATION D'ECS EN kWh SUR UNE SEMAINE ET UNE ANNEE	74
TABLEAU 16 : RESULTATS HEBDOMADAIRES ET ANNUELS DE LA CONSOMMATION DU BALLON DE STOCKAGE EN kWh COMPRENANT LES PERTES PAR DEPERDITION ET LA CONSOMMATION EN ECS	75
TABLEAU 17 : RESULTATS DE LA SIMULATION SANS OPTIMISATION	78
TABLEAU 18 : RESULTATS DE LA SIMULATION AVEC OPTIMISATION	79

Liste des abréviations

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CDA	Conditional Demand Analysis
COP	Conferences of the Partie
COZEB	Cost Optimum Zero Energy Building
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EDF	Électricité De France
EMS	Energy Management System
ENR	Energie renouvelable
GRD	Gestionnaire de Réseau de Distribution
GRT	Gestionnaire de Réseau de Transmission
HEMS	Home Energy Management System
HVDC	High Voltage Direct Current
IAE	International Energy Agency
ICEDD	Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable
ISE	Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
IWEPS	Institut wallon de l'évaluation de la prospective et de la statistique
kWc	Kilowatts crête
	Logiciel Open-source co-créé avec des COopératives citoyennes pour
LOCOMOTRICE	Maîtriser et Opérationnaliser les actions des citoyens en faveur de la TRansition énergétique Intégrant les Communautés d'Énergie
MATLAB	Matrix Laboratory
PEB	Performance Énergétique des Bâtiments
PIB	Produit Intérieur Brut
PV	Panneau Photovoltaïque
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
RC	Résistance - Conductance
SDB	Salle de bain
SME	Système de management de l'énergie
SPF	Service Public Finance
Statbel	Direction générale Statistique
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
UE	Union Européenne
VBA	Visual Basic for Applications

1. Introduction

Depuis plus d'un siècle, nous assistons à une montée alarmante de la température moyenne de la Terre. Le monde scientifique s'accorde à dire que la cause serait anthropique avec notamment des émissions massives de gaz à effet de serre [1]. Les effets de ce réchauffement global sont multiples, avec par exemple la fonte des glaces et l'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes. Ces changements ont un impact profond sur la stabilité de nos écosystèmes et sur l'économie mondiale, tout en représentant une menace pour l'humanité [2].

Selon l'Agence internationale de l'énergie (IAE), la consommation énergétique mondiale a augmenté de près de 70% de 1990 à 2021, passant de 101 000 TWh à 171 000 TWh (Figure 1), selon l'Agence internationale de l'énergie (IEA), soit une augmentation d'un peu moins de 70% [3]. Cette hausse peut être en partie attribuée à la croissance démographique fortement corrélée au développement économique. À mesure que les économies se développent, les besoins énergétiques pour soutenir l'industrie, les transports et les ménages augmentent également [4].

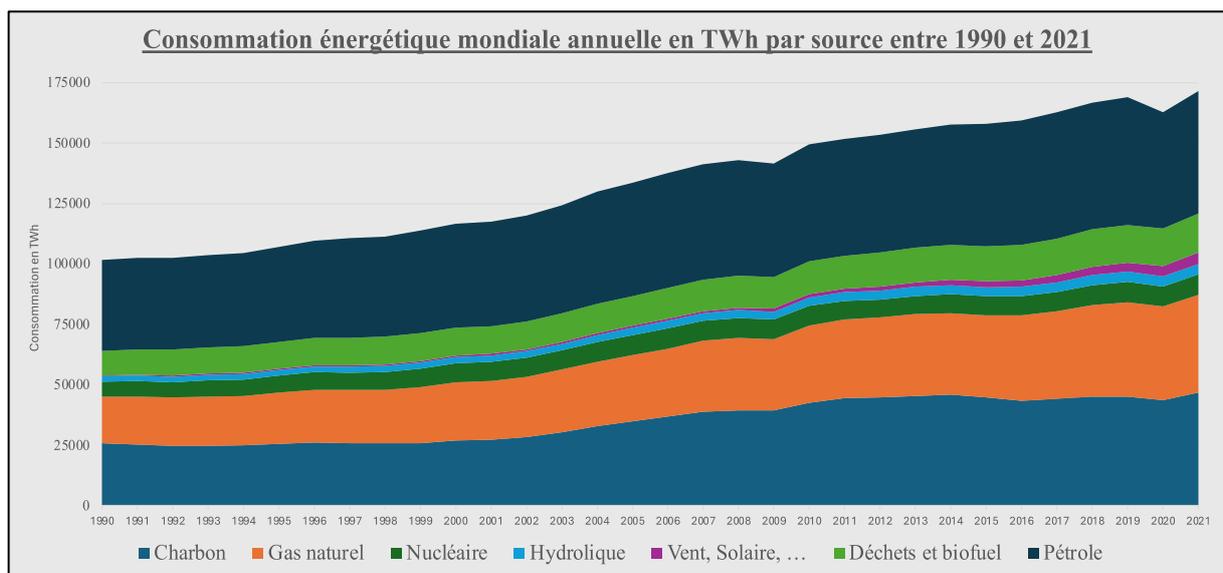


Figure 1 : Consommation énergétique mondiale annuelle en TWh par source entre 1990 et 2021 [3]

La majeure partie de cette énergie provient des combustibles fossiles, tels que le pétrole, le gaz et le charbon (Figure 1), qui sont non seulement des ressources limitées, mais aussi des sources principales d'émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au changement climatique. Par conséquent, un des enjeux fondamentaux de notre époque est de réussir à satisfaire les besoins énergétiques croissants tout en limitant les impacts environnementaux. Cela implique d'augmenter l'efficacité énergétique, de développer et d'adopter des technologies d'énergie propre, et de mettre en place des politiques qui encouragent la transition vers une économie à

faible émission de carbone. De plus, l'accès à l'énergie reste un défi majeur pour de nombreux pays en développement, où des milliards de personnes n'ont pas encore accès à l'électricité et à des combustibles propres pour la cuisson.

De nombreux accords internationaux et européens vont dans le sens de réduire les gaz à effet de serre. En Europe, le pacte vert dicte une ligne directrice commune entre tous les pays de l'Union européenne afin d'atteindre différents objectifs environnementaux [5]. Sur les émissions, la loi européenne sur le climat fixe également un objectif intermédiaire de diminuer d'au moins 55% des émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici à 2030, par rapport aux niveaux de 1990. La loi vise à garantir que toutes les politiques de l'UE contribuent à cet objectif et que tous les secteurs de l'économie et de la société jouent leur rôle [6]. Et de manière mondiale, la COP 21 a marqué un pas important définissant un plan d'action afin d'éviter le dérèglement en effectuant des actions dans le but de limiter l'augmentation des températures mondiales de 2°C [7]. Ou encore dernièrement, la COP 28 a pu mettre des accords mondiaux pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles en citant que c'est le "début de la fin". L'accent a été mis sur l'efficacité énergétique, le développement de technologies d'énergie propre et l'adoption de politiques favorisant une économie à faible émission de carbone [8].

Le secteur du bâtiment représente plus d'un tiers de la consommation d'énergie mondiale et des émissions de gaz à effet de serre, et environ 30 % de la consommation finale d'énergie à l'échelle mondiale en 2022 [9]. Le secteur du bâtiment peut être subdivisé, il comprend l'industrie du bâtiment et la consommation des immeubles. La Belgique a consommé 129,9 TWh durant l'année 2021 selon l'IWEPS¹ [10]. Le secteur du transport, de l'industrie et du logement sont majoritaires. Le secteur du logement, indépendamment du secteur du bâtiment, représente 25 % de la consommation énergétique annuelle du pays, soit 32,5 TWh d'énergie finale consommée.

Un logement est constitué de plusieurs points de consommation, la majorité est dû au chauffage des espaces [11]. Ensuite viennent les équipements électriques et l'eau chaude sanitaire. Au niveau de l'électricité la répartition des différentes consommations peut beaucoup varier. Si l'on possède une pompe à chaleur ou une voiture électrique, cela peut faire varier drastiquement la consommation d'électricité globale. Ainsi, la majorité de l'énergie consommée se répartit entre le chauffage, l'eau chaude sanitaire et les équipements électriques.

Ces différentes consommations sont produites par deux types d'énergie, à savoir l'électricité et les énergies fossiles. Elles ont d'ailleurs vu leur prix augmenter drastiquement avec les

¹ Donnée calculée par l'IWEPS sur base de données de janvier 2024 de l'ICEDD

différentes crises internationales successives comme le Covid 19 et la guerre en Ukraine [12]. Cela a eu un impact direct sur la population, le secteur de l'emploi et accentué la précarité énergétique. On peut directement voir cette explosion de prix sur la Figure 2 sur lequel on aperçoit deux pics bien distincts en 2022 correspondant notamment pour le premier à l'invasion de la Russie en Ukraine perpétrée en février de la même année. Le second pic des prix de l'électricité en juin 2022 est principalement dû à la réduction des flux de gaz russe, à la baisse de disponibilité du parc nucléaire français, le faible production hydraulique et à la hausse de la demande d'électricité causée par les vagues de chaleur [13]. Les prix du marché ont drastiquement augmenté dû à une certaine insécurité d'approvisionnement énergétique et un manque d'autonomie dans ce secteur. La Belgique et même l'Europe sont liées de près aux hydrocarbures russes [14].



Figure 2 : Évolution du prix de l'électricité en Belgique [15]

Les énergies renouvelables sont donc en plein essor en Belgique depuis plus d'une dizaine d'années. Cela a permis d'augmenter le parc de photovoltaïque ou encore d'éolien nationale mais surtout aux particuliers de produire leur propre énergie. Cependant, les énergies renouvelables ont un défaut et non des moindres, l'intermittence. L'intermittence est une caractéristique de certaines sources d'énergie renouvelable, comme le solaire et l'éolien, qui ne produisent pas d'énergie de manière constante, mais en fonction des conditions météorologiques. Cette irrégularité de production pose des défis en termes de gestion de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Cela peut créer de l'instabilité sur le réseau du point de vue local, national, voire international. Elle nécessite donc des solutions afin stocker l'énergie produite en excès lors des pics de production pour la redistribuer lors des périodes de

faible production. Mais le plus important est de consommer en temps réel l'électricité que l'on produit.

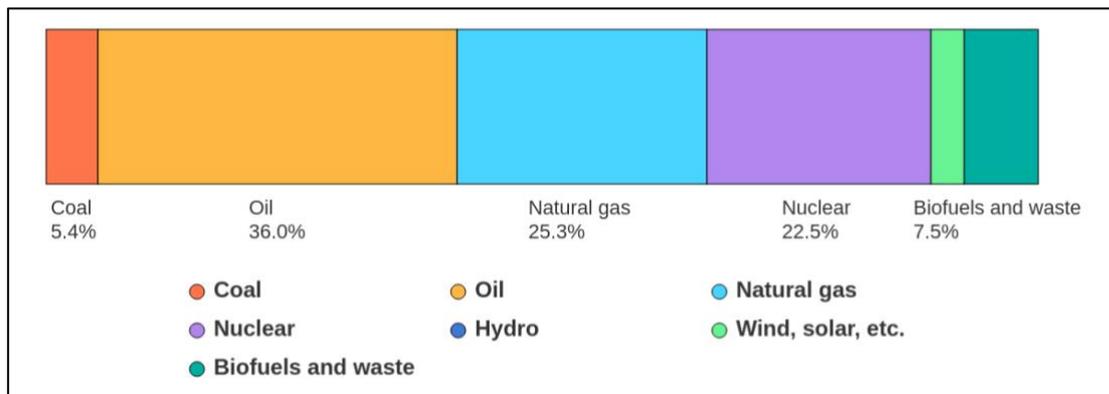


Figure 3 : Répartition des différents types d'énergie consommée par la Belgique en 2022 (%) [16]

Afin de répondre à cette problématique, des politiques de sensibilisation permettent une meilleure gestion de la consommation. La région wallonne [17], les communes² ou encore le site « energieplus »³ permettent de comprendre et de mieux consommer au quotidien. Mais la Wallonie a une réelle volonté de créer un environnement propice au développement de l'énergie, cela se fait par des changements plus structurels avec le développement des communautés d'énergies [18].

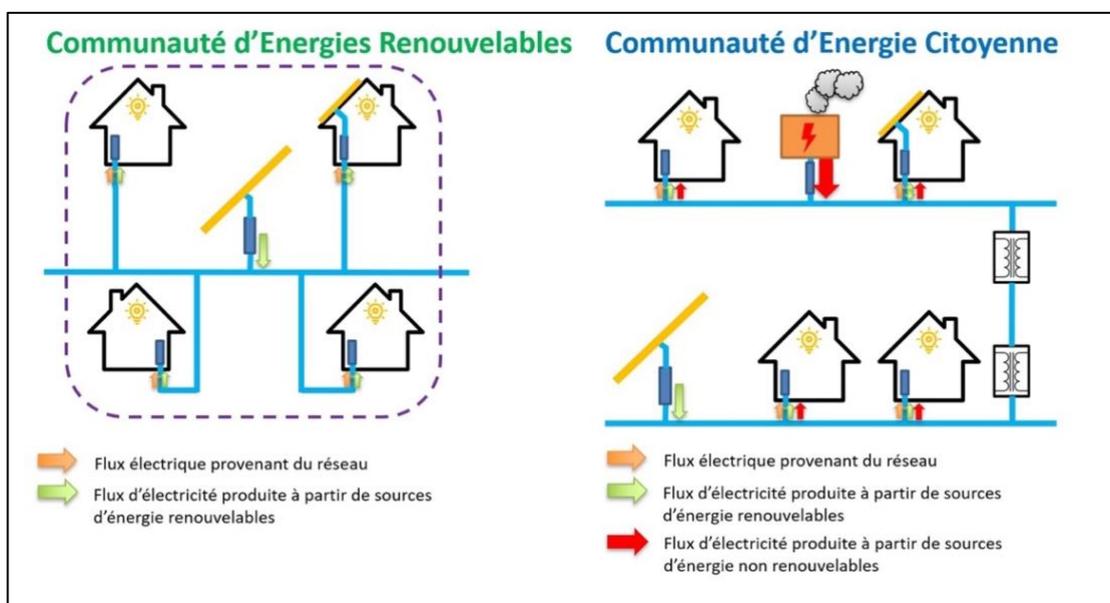


Figure 4 : Schéma représentant les deux types de communautés d'énergies renouvelables et citoyenne [19]

Une communauté d'énergie renouvelable est un regroupement de personnes, souvent dans une même zone géographique, qui s'associent pour produire et consommer de l'énergie provenant

² <https://www.uvcw.be/energie/tag-sensibilisation/liste>

³ <https://energieplus-lesite.be/>

de sources renouvelables, comme le solaire ou l'éolien (Figure 4). Ces communautés peuvent permettre à leurs membres de réaliser des économies, tout en favorisant une production d'énergie plus respectueuse de l'environnement. Il y a encore quelques mois, il n'était pas encore possible d'en créer, mais depuis le 17 mars 2023, la région wallonne a exécuté ce projet de loi [20]. Afin d'optimiser le partage de l'énergie, les systèmes de management de l'énergie (SME) sont des outils essentiels pour la réussite de tels projets. L'energy management system (EMS en anglais) est une technologie qui permet de surveiller, contrôler et optimiser la consommation et la production d'énergie dans un bâtiment. Il aide à utiliser l'énergie de manière plus efficace, par exemple en adaptant la consommation aux moments où l'énergie renouvelable est disponible, comme le solaire. En utilisant un EMS, on peut réduire les coûts énergétiques, diminuer l'impact environnemental et améliorer l'efficacité énergétique globale, en ajustant automatiquement l'utilisation des appareils en fonction de la production d'énergie et des prix du marché. Finalement, c'est un nouveau pan de la recherche qui s'ouvre en Wallonie et des appels à projets sont lancés par la région afin de développer cette activité.

C'est notamment le but du projet LOCOMOTRICE (Logiciel Open-source co-créé avec des COopératives citoyennes pour Maîtriser et Opérationnaliser les actions des citoyens en faveur de la TRansition énergétique Intégrant les Communautés d'Énergie). Ce projet vise le développement d'une plateforme de gestion des Communautés d'Énergie (CE) et la maximisation de l'autoconsommation d'énergie. Ce mémoire s'intègre dans la première phase de ce projet. Plusieurs scénarios sont étudiés, dont l'un consiste à créer un modèle de simulation énergétique pour une maison. Pour cela, il est nécessaire de concevoir un ou plusieurs canevas représentatifs des habitations en Wallonie. Ces canevas serviront à déterminer la demande énergétique d'un bâtiment type. Cette demande énergétique sera ensuite utilisée pour modéliser les Communautés d'Énergie en intégrant des systèmes de management de l'énergie.

Cette introduction a souligné l'importance de la question énergétique dans le contexte actuel de changement climatique et d'augmentation de la consommation énergétique mondiale. Elle a mis en évidence le rôle des combustibles fossiles et de l'efficacité énergétique dans cette dynamique, ainsi que l'impact de la hausse des prix de l'énergie sur la population et l'économie. L'accent a également été mis sur les efforts déployés en Belgique et en Europe pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir les énergies renouvelables, malgré les défis de l'intermittence. Enfin, l'importance du secteur du bâtiment dans la consommation d'énergie et les initiatives pour encourager l'autoconsommation et la gestion de l'énergie ont été discutées. La suite de ce document consistera en une définition des objectifs et de la question de recherche, une revue de la littérature existante du domaine et la définition théorique des typologies utilisées

pour la méthodologie. Nous passerons ensuite à la méthodologie utilisée avec une description d'un bâtiment type, l'établissement de la demande énergétique du bâtiment puis l'optimisation de cette dernière. Le travail se terminera par les résultats, la discussion du travail dont ses limites puis la conclusion.

2. Descriptif et objectifs du travail

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet LOCOMOTRICE et vise à établir un profil de consommation énergétique type pour une catégorie de bâtiments en Wallonie. Pour cela, il sera nécessaire de déterminer la consommation énergétique d'un bâtiment résidentiel en créant des courbes de consommation pour le chauffage, l'électricité et l'eau chaude sanitaire. L'analyse du bâti wallon permettra de définir le type de bâtiment le plus représentatif.

L'objectif de ce travail sera de répondre à cette problématique « En quoi l'optimisation de la courbe de consommation énergétique d'un ménage type du bâti wallon, à travers des concepts de système de management de l'énergie, peut-elle augmenter l'autoconsommation ? »

Ce travail est divisé en deux parties principales : théorique et méthodologique. La partie théorique inclut une revue des environnements de simulation, description des éléments théoriques utiles à l'élaboration des courbes de consommation et une explication des concepts des systèmes de gestion de l'énergie (EMS). La méthodologie s'appuie sur ces concepts pour créer un modèle de consommation énergétique, ensuite optimisé pour maximiser l'autoconsommation avec une production photovoltaïque. L'objectif final est d'augmenter l'efficacité énergétique en utilisant ces outils.

3. Revue de littérature

La revue littéraire s'articule autour de trois grands axes. Le premier axe explore la littérature scientifique relative aux environnements de simulation pour la modélisation énergétique des bâtiments. Le deuxième axe porte sur l'établissement théorique des données d'entrée nécessaires à la construction du modèle de consommation énergétique. Pour cela, différentes typologies ont été identifiées : l'habitat, les consommations et les occupants. Enfin, une description des concepts du système de management de l'énergie sera présentée, offrant ainsi les clés pour l'optimisation de la consommation énergétique.

3.1 Les logiciels de modélisation énergétique des bâtiments

Ces modèles plus ou moins complexes peuvent s'effectuer via des logiciels. On peut citer MatLab accompagné de son extension simulink. Comme cet article réalisé par Dongellini M. et al. en 2015 qui modélise un système de production d'eau chaude sanitaire avec des capteurs solaires avec le logiciel MatLab [21]. Un autre logiciel pour faire de la modélisation dynamique est EnergyPlus qui calcule de manière dynamique la consommation d'un bâtiment en fonction des facteurs météorologiques, géométriques, parois. Une étude réalisée en 2010 par Fumo et al. montre comment ils ont déterminé la consommation thermique et électrique d'un bâtiment en se basant sur des coefficients intégrés au logiciel et des facteurs comme des factures, matériaux du bâtiment et données météorologiques [22]. Il en existe d'autres comme IDA ICE (Indoor Climate and Energy) qui est plus focalisé sur le confort intérieur, mais qui peut tout autant effectuer une simulation de demande énergétique. Comme le montre l'étude réalisée par Salvalai en 2012 qui utilise ce logiciel afin de voir l'environnement énergétique d'un bâtiment avec une pompe à chaleur [23].

Un dernier logiciel permettant d'effectuer un modèle énergétique de bâtiment est TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation). C'est un logiciel développé par l'Université de Wisconsin en 1975 sous Fortran. Il permet d'effectuer un ensemble de modèle et simulation dynamique afin de comprendre les performances des bâtiments et aussi de créer des modèles de consommations. Il a des avantages par rapport à ces homologues, il est capable de modéliser précisément le rayonnement solaire direct passant par les fenêtres, en tenant compte des propriétés optiques variables selon l'angle d'incidence, et de traiter la distribution du rayonnement solaire direct et diffus dans une zone pour une représentation améliorée [24]. De plus, un ensemble d'éléments appelés « Types » pouvant être connectés entre eux peuvent créer des modèles uniques et se combiner à un modèle 3D de bâtiment.

Tous ces logiciels sont plus axés sur la modélisation énergétique des bâtiments afin de connaître majoritairement la consommation thermique des bâtiments. Le logiciel Simulink offre une grande flexibilité tout comme TRNSYS permettant de créer des systèmes divers et varier comme pour la demande électrique ou encore la demande en eau chaude sanitaire. D'autre part, les modèles peuvent être créés de toute pièce via des langages de programmation comme le python ou le VBA dans un certain type d'interface comme Excel.

Dans l'article publié en 2018 par Ringkjøb H et al. donne une vue d'ensemble des outils de modélisation utilisés pour analyser les systèmes énergétiques et électriques ([25]). En particulier ceux intégrant une part importante de sources d'énergie renouvelable variable . Excel est mentionné dans le contexte des outils de modélisation, notamment en tant qu'interface ou support pour certaines des analyses réalisées. Excel est utilisé dans des modèles comme DESSTinEE, un outil qui aide à planifier les besoins en flexibilité des systèmes énergétiques avec des énergies renouvelables variables. C'est un logiciel qui sert à structurer et visualiser des données tout en permettant d'exécuter des simulations simplement ou en y intégrant des macros avec un langage VBA.

3.2 La Typologie de l’habitat Wallon

3.2.1 Le parc de bâtiment en Wallonie

3.2.1.1 L’énergie consommée par le parc immobilier Wallon

La Wallonie dispose d'un parc résidentiel vieillissant, ce qui justifie l'application de la législation PEB (Performance Énergétique des Bâtiments). Cette législation, en vigueur depuis de nombreuses années, évolue avec les nouvelles exigences européennes et nationales. Actuellement, un logement unifamilial doit respecter une exigence de consommation spécifique de 85 kWh/m² par an. Cependant, la moyenne nationale se situe autour de 434 kWh/m² par an (Figure 5), selon une étude du CEHD (Centre d'Études en Habitat Durable de Wallonie) réalisée en 2019 [26].

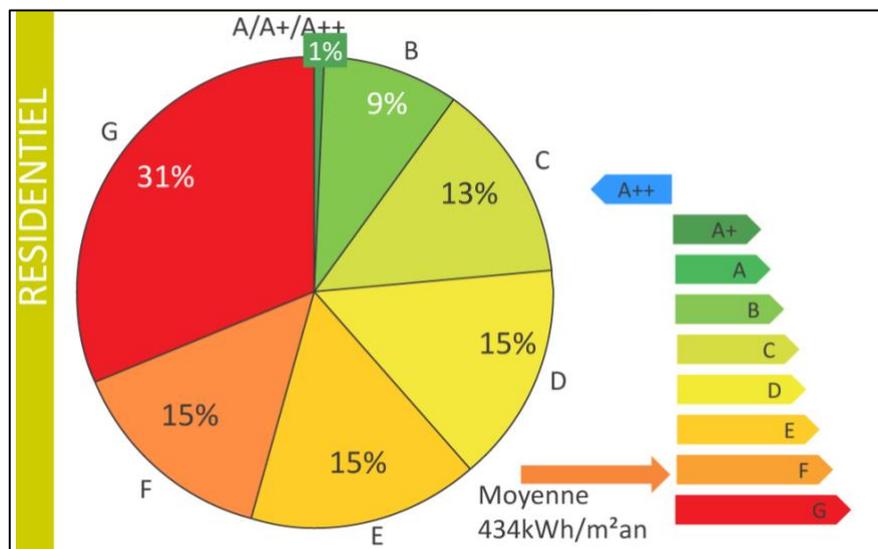


Figure 5 : Répartition des logements wallons par catégorie PEB (%) en 2019 [27]

3.2.1.2 Types de bâtiments

Les bâtiments résidentiels peuvent être catégorisés en fonction de leur structure globale. Une manière de les différencier est de compter le nombre de façades mitoyennes ou non. Une maison 4 façades est donc un immeuble qui n’a aucun homologue collé à lui. En revanche, une maison 2 façades aura deux autres bâtiments qui le touchent. On va aussi différencier les maisons unifamiliales qui vont avoir une famille par bâtiments, des immeubles pouvant accueillir un ensemble de logements en son sein.

En Wallonie, selon Statbel [28], la plupart des bâtiments d’habitations (33%) sont des maisons unifamiliales agrémentées d’une parcelle supplémentaire avec un jardin. En effet, le territoire est constitué de propriétés ayant un fort impact sur la surface habitée. Ces types de logements

consomment la majeure partie de l'énergie du secteur résidentiel [29], en raison de leur nombre et de leur taille. Les maisons 2 façades représentent 27% du parc, et les maisons 3 façades 24%. Le reste du parc est constitué d'immeubles d'appartements.

Le parc immobilier évolue d'année en année, selon Statbel [30], 16% des immeubles sont nouveaux et pourtant l'augmentation de nouveau logement est de 30% depuis 1995. Ce qui veut dire que beaucoup d'habitations avec plusieurs logements ou appartements sortent de terre. Ce qui change par rapport à la majorité précédente composée majoritairement de maison unifamiliale avec jardin. Le parc immobilier wallon va donc changer dans les années à venir.

3.2.1.3 Taille des ménages

Un ménage, selon Statbel, est un groupe de personnes vivant habituellement ensemble dans un même logement, qu'elles soient liées par des liens de parenté ou non [31]. La taille de ces ménages, ce qui correspond au nombre de personnes vivant au sein d'une habitation, diminue en Belgique. Entre 1994 et 2024, la taille des ménages est passée de 2,44 à 2,25 personnes. Cette différence, bien que modeste, est significative sur l'ensemble du parc immobilier. Ainsi, on peut estimer que la majorité des logements sont occupés par des couples seuls ou avec un enfant. Cela se reflète dans les données, car en 2024, plus de 36% des ménages étaient composés d'une seule personne, suivis des couples avec un enfant (18,7%), et des couples sans enfant (18,2%) [31].

3.2.1.4 Les bâtiments types en Wallonie

Une étude, appelée COZEB, réalisée en 2013 pour le compte de la Région Wallonne, porte sur vérification des exigences en matière de performance énergétique des bâtiments en Wallons [32]. Cette analyse, basée sur d'autres études comme TABULA[33], a permis de référencer l'ensemble du bâti régional. Le Tableau 1 présente les différents types de maisons représentatives du bâti wallon. On observe que les maisons construites avant 1945 constituent une part significative du parc immobilier, tandis que les constructions plus récentes, notamment celles de 1996 à 2008, représentent une proportion plus réduite mais tout de même significative. En outre, le parc wallon est vieillissant mais diversifié. Pour plus de détails, l'Annexe 1 contient un document issu de l'étude, montrant chaque type de maison, leur pourcentage dans le bâti, ainsi que des photos.

Période	Type de Maison	%
< 1945	Maison de type vernaculaire	6%
	Maison de type ouvrière, avec passage latéral	4%
	Maison de type ouvrière	15%
De 1946 à 1970	Maison villageoise, entre deux guerres	4%
	Maison urbaine moyenne	16%
	Villa des premières extensions urbaines	10%
	Villa de plain-pied, en périphérie de la ville	6%
	Maison de type bel-étage	4%
De 1971 à 1984	Villa 4 façades, de type lotissement	12%
	Maison « sociale », barre de logements	3%
De 1985 à 1995	Villa 4 façades, de type lotissement, K70	6%
	Maison 3 façades avec garage latéral, K70	2%
	Maison type bel-étage, K70	2%
De 1996 à 2008	Villa 4 façades, de type lotissement, K55	7%
	Maison ossature bois, type éco-quartier, K55	3%

Tableau 1 : Les différents types de maisons représentatives du bâti wallon dans l'étude COZEB [32]

3.3 Les postes de consommation d'énergie dans les bâtiments

3.3.1 La consommation de chauffage

Un système de chauffage se compose de trois éléments : production, émission, et régulation de la chaleur. Ce système vise à maintenir un confort thermique en compensant les pertes de chaleur du bâtiment, aussi bien en hiver qu'en été. En Belgique, l'utilisation d'un système de chauffage est essentielle pour contrer les basses températures hivernales, tandis que les systèmes de refroidissement restent rares, bien que leur adoption augmente avec le réchauffement climatique. En 2020, seuls 5 % des ménages wallons possédaient un système de refroidissement intégré [34]. Cependant, ce type d'installation devrait fleurir de plus en plus au sein de nos habitats car les températures augmentent petits à petits. Cela peut se démontrer avec la tendance d'accroissement du nombre de degré-jours de refroidissements en Belgique (Figure 6). Les systèmes de chauffage.

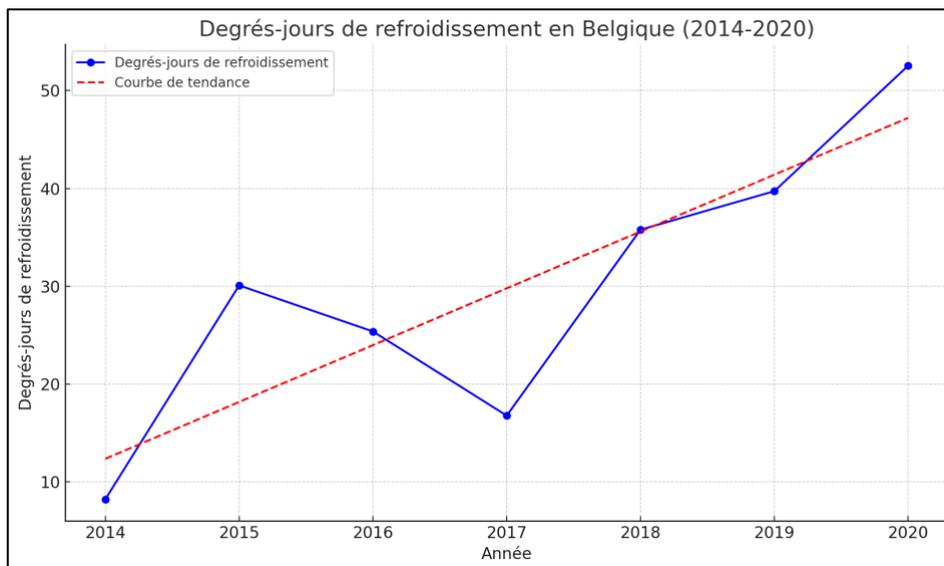


Figure 6 : Nombre de degré jour de refroidissement entre 2014 et 2020 [35]

Les maisons unifamiliales en Wallonie utilisent majoritairement des systèmes de chauffage central. Ce type de chauffage, qui représentait 7 logements sur 10 en 2005 selon l'ICEDD [36]. Les principales sources énergétiques pour le chauffage central dans les maisons unifamiliales incluent le gaz naturel et le mazout [34]. Le gaz naturel est la source la plus utilisée, avec une part de 53,4 %, suivi du mazout avec 38,2%. Le système privilégié par les bâtiments wallons est un chauffage central à énergie fossile, donc l'installation est avec une chaudière. D'autres sources, telles que les pompes à chaleur et le bois, représentent une part plus modeste, mais croissante, illustrant une tendance vers des solutions plus écologiques et durables. D'un point

de vu consommation énergétique, en 2019, 73,2 % de l'énergie des ménages belges était consacrée au chauffage, principalement via le gaz naturel et le mazout [37], ce qui en fait le vecteur de consommation principal.

3.3.2 L'eau chaude sanitaire

a) Les systèmes d'eau chaude sanitaire

Tout comme pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire peut être centralisée ou décentralisée. La production centralisée permet de réduire le nombre de systèmes de production tout en optimisant l'espace. Ce système puise l'eau dans un réservoir central situé à plusieurs mètres du point d'utilisation. Ce transport d'eau entraîne des pertes calorifiques, et ce type de système consomme jusqu'à 40 % d'énergie supplémentaire par rapport à un système décentralisé [38]. L'eau est ensuite mélangée à de l'eau froide pour atteindre la température souhaitée.

Ce système peut être combiné avec le chauffage centralisé, lequel peut être associé ou non à un système de stockage. Il est alors possible de produire de l'eau chaude sanitaire instantanément ou en différé. Ces systèmes sont principalement associés à des chaudières utilisant du mazout, du gaz, du bois, ou de l'électricité, mais peuvent également intégrer des pompes à chaleur [39].

Le système décentralisé, quant à lui, est indépendant du système de chauffage et produit l'eau chaude sanitaire directement sur le lieu d'utilisation. Il est souvent composé de plusieurs systèmes, par exemple un pour la cuisine et un autre pour la salle de bain. Bien que cela augmente le nombre de systèmes, cela réduit la distance de transport de l'eau chaude et, par conséquent, les pertes d'énergie. Ces systèmes utilisent principalement du gaz ou de l'électricité, mais peuvent également être combinés avec des systèmes solaires ou thermodynamiques avec appoint [39].

b) Le stockage d'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire, contrairement à d'autres consommations énergétiques, peut être stockée pour une utilisation différée. Dans certains foyers, un ballon de stockage permet d'avoir de l'eau chaude disponible à tout moment sans avoir à la produire instantanément, ou pour répondre à une demande accrue.

En usage domestique, les ballons d'eau chaude ont une capacité de 100 à 200 litres [79]. Ils peuvent être connectés directement à une chaudière via un échangeur de chaleur ou par une résistance électrique qui chauffe l'eau directement dans le ballon. On peut également y connecter une pompe à chaleur, un système photovoltaïque ou un système solaire thermique.

c) Les systèmes installés en Wallonie

En Wallonie, les bâtiments domestiques sont majoritairement équipés d'un système de chauffage centralisé, auquel est souvent associée la production d'eau chaude sanitaire. Selon le CEHD [36], en 2012/2013, la plupart des ménages wallons étaient équipés d'un boiler associé à une chaudière individuelle. Selon l'ICEDD [34], environ 70 % des logements utilisent des combustibles fossiles pour produire de l'eau chaude sanitaire. Le combustible le plus couramment utilisé est le gaz naturel (33,1 %), suivi du mazout (31,9 %) et de l'électricité (28 %). On peut donc conclure que le système le plus couramment utilisé est un boiler de stockage fonctionnant au gaz ou à l'électricité, qui peut être associé à des échanges thermiques avec le système de chauffage.

3.3.3 Les équipements électriques

3.3.3.1 Les équipements électriques

La consommation électrique d'un foyer peut varier considérablement, car elle couvre plusieurs usages. La consommation de chauffage peut être incluse dans la consommation électrique, notamment avec les radiateurs électriques. Cependant, comme la consommation de chauffage dans les foyers wallons n'est pas majoritairement électrique, cette étude se concentrera sur les équipements électroménagers. Ces équipements incluent les appareils utilisés pour accomplir des tâches domestiques, tels que les réfrigérateurs, les machines à laver, les fours à micro-ondes, les aspirateurs, et même les ampoules.

Pour évaluer la consommation des équipements électroménagers dans les foyers wallons, cette analyse s'appuie sur divers documents provenant de la littérature scientifique, de statistiques nationales, et de rapports d'instituts ou d'entreprises spécialisées.

a) Taux de pénétration

Une bonne méthode pour identifier les appareils électriques présents dans les foyers wallons est d'examiner le taux de pénétration, également appelé taux de possession. Ce taux représente le pourcentage de ménages possédant au moins un exemplaire d'un appareil spécifique. Il s'agit d'une mesure utilisée pour évaluer la diffusion d'un produit au sein d'une population donnée, montrant à quel point un appareil est couramment utilisé dans les foyers. Cet indicateur est utile pour des analyses économiques, sociologiques ou énergétiques des ménages.

Les deux articles L. Cabeza en 2018 démontre l'évolution de la possession des appareils avec fonction des périodes et des zones géographiques [40], [41]. Ils ont collecté des données auprès de diverses sources nationales de statistiques, incluant des enquêtes et des rapports

gouvernementaux. Ils ont classé les appareils en trois catégories « white goods », « brown goods » et « small appliance ». Les "white goods" incluent des appareils essentiels tels que les réfrigérateurs, les congélateurs et les lave-linge ; les "brown goods" englobent des appareils de divertissement et de communication comme les téléviseurs, les ordinateurs et les téléphones portables ; tandis que les petits appareils, ou "small appliances", comprennent des équipements tels que les micro-ondes, les cafetières et les sèche-cheveux, utilisés pour des tâches spécifiques et souvent de courte durée. Les tendances ont montré que certains appareils élémentaires comme le frigo et le lave-linge sont présents quasiment dans 100 % des foyers dans les pays développés depuis plusieurs décennies. Certains appareils comme les ordinateurs et les téléphones ont eu un taux de possession très rapide. Ce genre de changement avec de petits ou de plus gros appareils peut avoir de grosses influences sur les habitudes de consommations.

En Belgique, le taux de pénétration peut s'évaluer via des données Statbel sur le budget de ménages [42]. Aucun article scientifique ne fait état de la Belgique pour ce type d'analyse. Mais des documents réalisés par l'ICEDD [34] ou du SPF économie [43] font état du taux de pénétration comme le montre les Figure 7 et Figure 8. D'autres documents de la Région Wallone [44] ou la Politique scientifique fédérale font référence au taux de pénétration, mais il est mentionné que soit les données ne sont pas exhaustives ...

Les Figure 7 et Figure 8 montrent que, de 2010 à 2020 en Belgique, les réfrigérateurs et machines à laver ont atteint une pénétration presque complète comme mentionnée précédemment avec les pays développés. Tandis que les lave-vaisselles ont progressivement augmenté, reflétant une adoption croissante. Les micro-ondes restent stables autour de 90%. Pour les appareils électroniques, les télévisions montrent une pénétration stable, les ordinateurs portables augmentent régulièrement, tandis que les ordinateurs fixes diminuent, indiquant un changement de consommation de ce type d'appareil. La hausse des raccordements internet, atteignant environ 80%, souligne l'importance croissante de la connectivité numérique dans les foyers belges. Ces graphiques montrent l'implémentation de certains appareils dans les foyers belges. Cependant, afin d'effectuer une analyse exhaustive de la consommation électrique, il est important d'en prendre plus en compte.

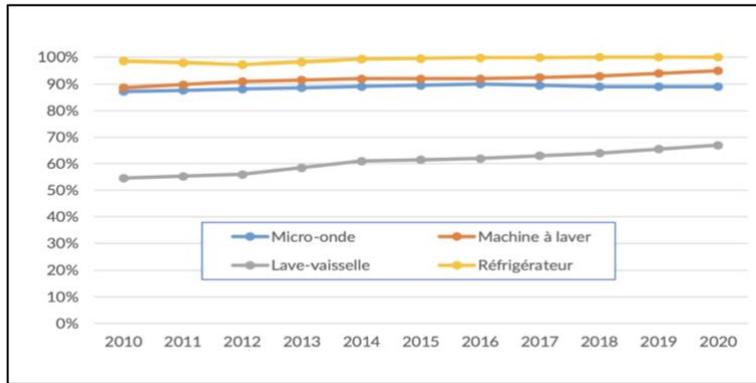


Figure 7 : Pénétration des appareils électroménagers en Belgique, de 2010 à 2020 [43]

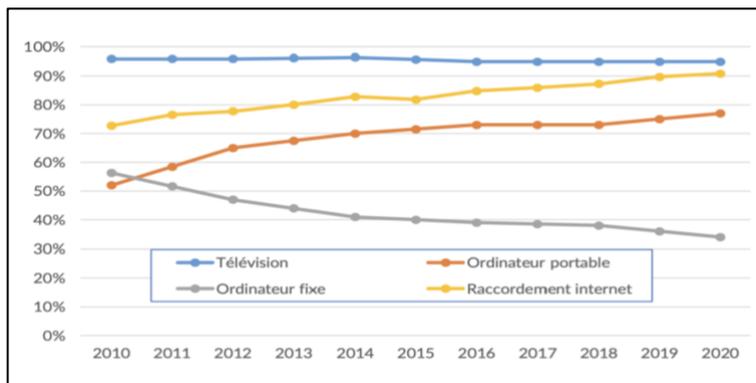


Figure 8 : Pénétration des appareils électroniques en Belgique, de 2010 à 2020 [43]

Un rapport de l'ADEME publié en 2021 montre une analyse sur la consommation électrodomestique des foyers français [45]. Ils ont analysé la consommation d'un ensemble d'appareils dans une centaine de foyers partout en France. Le Tableau 2 montre l'ensemble des appareils analysé dans le rapport, il montre un panel plus important que ceux proposés précédemment dans des rapports belges. Une majorité des appareils ont une valeur de taux de pénétration dans les foyers.

La liste est déjà plus complète et peut être représentative de l'ensemble des appareils électriques présents dans les foyers Wallons. Cependant, le taux de pénétration n'est pas le seul critère permettant de choisir les appareils à analyser.

Catégories	Appareils
Appareils de froid	Réfrigérateur, Congélateur, Cave à vin, Chambre froide, Poste froid
Appareils de lavage/séchage	Lave-vaisselle, Lave-linge, Sèche-linge
Audiovisuel	Téléviseur, Box TV, Console de jeux, Périphérique audio des téléviseurs, Chaîne Hifi, Enceinte, Poste audiovisuel
Informatique	Box internet, Ordinateur fixe, Ordinateur portable, Smartphone/tablette
Éclairage	/
Appareils de cuisine	Cuisinière électrique, Plaque de cuisson, Fours électriques, Minifours, Fours micro-onde, Hotte aspirante, Petit déjeuner, Préparation culinaire, Poste cuisine
Chauffage électrique	/
Eau chaude	/
Climatisation	Système fixe, Système mobile
Auxiliaire et ventilation	Ventilation, Chaudière
Appareils divers	Piscine, Pompes, Tondeuse électrique, Nettoyage de sol, Repassage, Mobilité électrique, Autres

Tableau 2 : Catégories et appareils analysés par l'ADEME dans un rapport de 2021 sur la consommation des équipements électrodomestiques des foyers français [60]

b) Catégorisation des équipements électriques

Les équipements électriques peuvent donc être définis par leur usage finale mais aussi par leurs caractéristiques techniques ou encore la manière dont on les utilise. Le but est d'analyser la consommation énergétique de ces derniers. Donc une première catégorie essentielle est de différencier les appareils par leur utilisation entre ceux qui sont utilisés en continu et ceux qui sont utilisés qu'à un ou plusieurs moments de la journée. Une autre catégorie pourrait être de différencier les appareils avec une forte puissance et faible puissance ou encore une forte consommation énergétique annuelle ou une faible. Mais le plus simple reste de les différencier par usage. Voici donc les catégories choisies avec entre parenthèse le nom final utilisé pour la suite du travail :

- Appareils fonctionnant en continu (Continus).
- Appareils de lavage et de nettoyage (Lavage).
- Appareils utilisés en cuisine (Cuisine).
- Appareils multimédias (Multimédia).
- Appareils d'hygiène (Hygiène).
- Appareils d'éclairage (Éclairage).

- Électromobilité (Électromobilité).
- Autres appareils (Autres).

On peut catégoriser les appareils par rapport aux caractéristiques de puissance et d'énergie consommée durant l'année. C'est ce que montre la Figure 9, un ensemble de points sont placé sur un graphique ou en abscisse est l'énergie consommée annuellement et en ordonné la puissance de consommation de l'appareil.

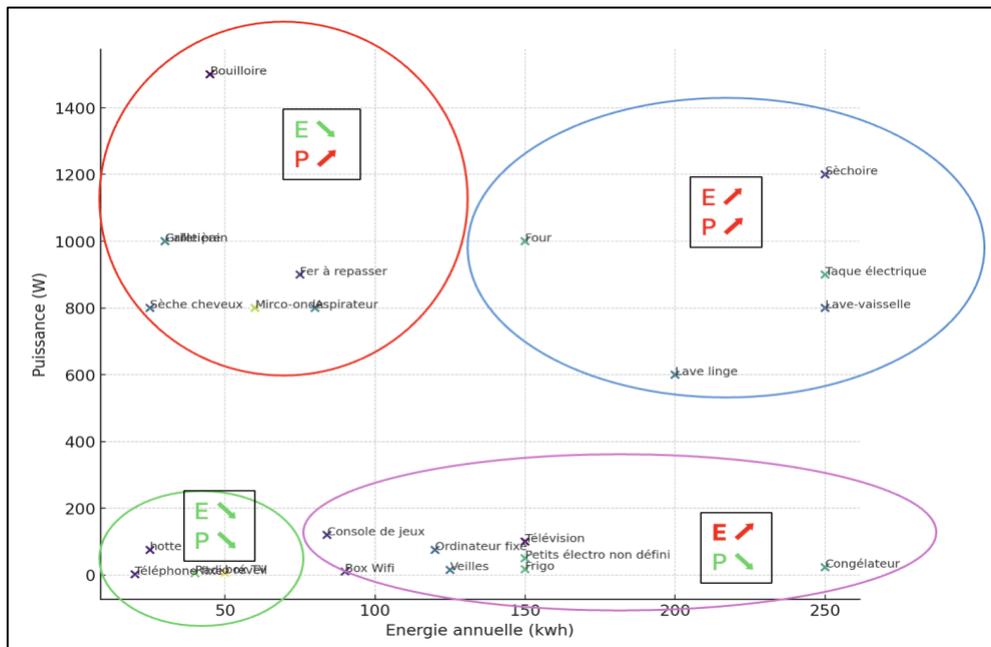


Figure 9 : Appareils électroniques domestique selon leur puissance de consommation en W et leur consommation énergétique annuelle en kWh [46]

On peut donc les différencier en 4 groupes comme le montre les 4 cercles :

- Grande puissance et grande consommation énergétique : influence significative sur la consommation finale et instantanée (cercle bleu, en haut à droite).
- Grande puissance et faible consommation énergétique : influence moindre sur la consommation finale mais importante sur la consommation instantanée (cercle rouge, en haut à gauche)..
- Petite puissance et grande consommation énergétique : influence élevée sur la consommation finale mais faible sur la consommation instantanée (cercle violet, en bas à droite).
- Petite puissance et faible consommation énergétique : influence négligeable sur la consommation finale et instantanée (cercle vert, en bas à gauche).

L'article publié par Onur A. et Belgin T. en 2018 définit plusieurs critères afin de caractériser la charge électrique au sein d'un smart grid [47]. Tout d'abord ils vont caractériser les appareils

selon leur puissance et leur nombre au sein d'un foyer puis pour l'énergie ils vont utiliser les notions de durée en mettant des heures d'allumage et des heures d'arrêt. Ce qui correspond aux heures d'utilisations journalières et donc à la consommation journalière. Les caractéristiques dictées dans leur étude s'étoffe un peu plus car ils prennent aussi en compte si l'appareil est modulable (Figure 10). Comme savoir si l'appareil est shiftable ou pas, s'ils peuvent l'interrompre ou pas et s'il y a moyen de réduire la consommation électrique à un moment donné.

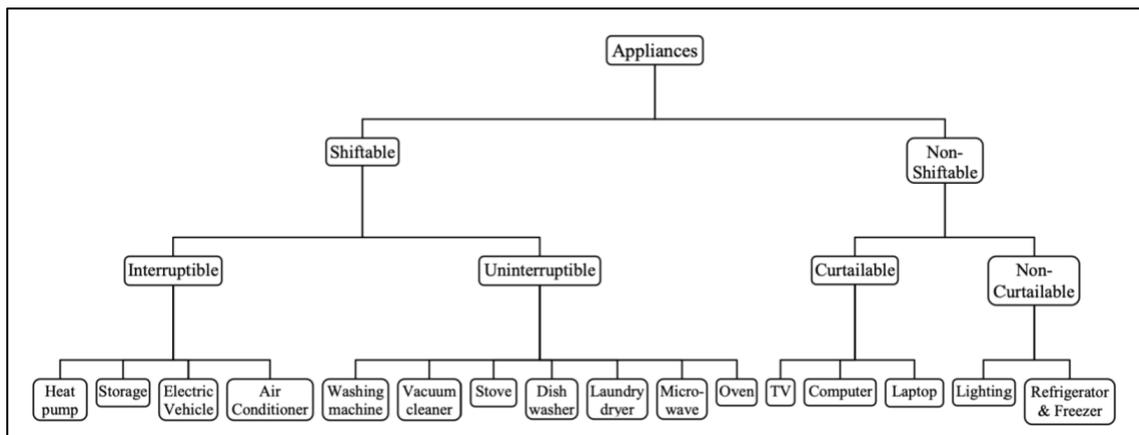


Figure 10 : Classification des appareils électriques selon Onur A. et Belgin T. [47]

Si l'on décortique ce qu'est une consommation électrique (E) c'est une puissance P durant une période donnée (t) (1).

$$E = P * t \quad (1)$$

On peut donc en faire ressortir trois notions, l'énergie, la puissance et le temps. La consommation énergétique est directement liée aux notions de temps. Il faut donc prendre en compte la durée d'utilisation et la fréquence d'utilisation à cela peut s'ajouter le moment de la journée.

Pour résumer, on peut donc caractériser un appareil en fonction de son utilisation, de sa puissance, consommation énergétique, sa durée d'utilisation, sa fréquence d'utilisation, s'il est shiftable, si il est continu, si il y a une possibilité d'avoir une influence dessus.

c) L'électromobilité

L'électromobilité désigne l'ensemble des modes de transport utilisant l'électricité comme source d'énergie pour la propulsion des véhicules. Cela inclut principalement les voitures électriques et hybrides, ainsi que les transports collectifs électriques, comme le train, et les véhicules de micromobilité, comme le vélo électrique. En Belgique, la voiture individuelle domine

largement les déplacements, notamment pour les trajets domicile-travail. En Wallonie, l'usage de la voiture individuelle pour ces déplacements est encore plus prononcé (Figure 11), représentant la majorité des trajets. La part des autres modes de transport, tels que le covoiturage, les transports en commun (train, bus, métro, tram), ou encore les déplacements actifs comme la marche et le vélo, est nettement plus réduite, soulignant une forte dépendance à la voiture dans la région.

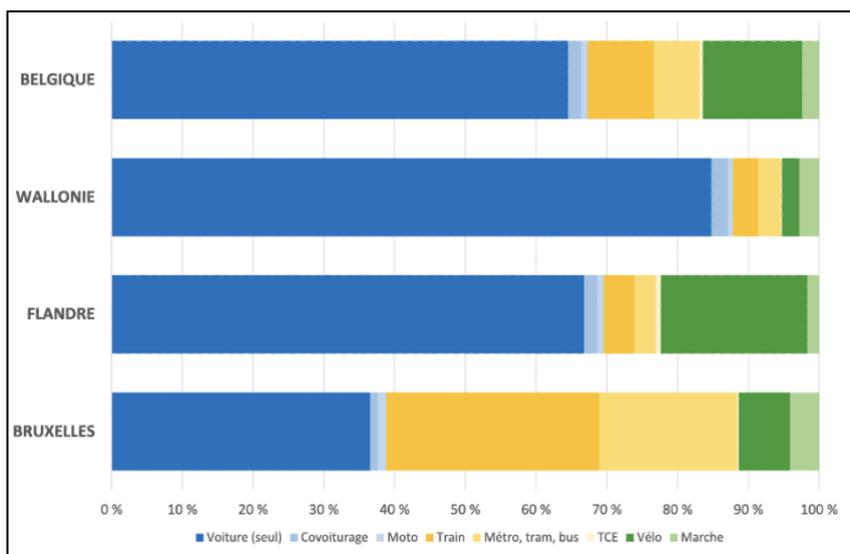


Figure 11 : Répartition des différents modes de transports entre le domicile et le travail en Belgique et selon les différentes régions en 2021 – 2022 [48]

La voiture reste donc le mode de transport le plus courant, surtout en Wallonie. Bien que les voitures thermiques restent majoritaires, les véhicules électriques augmentent chaque année, passant d'un parc quasi nul à plus de 400 000 véhicules électriques et hybrides en 2024 (Figure 12) [49]. De plus, les politiques européennes, comme le pacte visant une diminution de 90 % des émissions de gaz à effet de serre générées par les transports d'ici 2050 [70], encourageront cette tendance [50]. La voiture électrique est donc un type de transport en plein essor, mais qui va de plus en plus se développer. Étudier ce type de consommation est donc primordial pour comprendre les enjeux de demain.

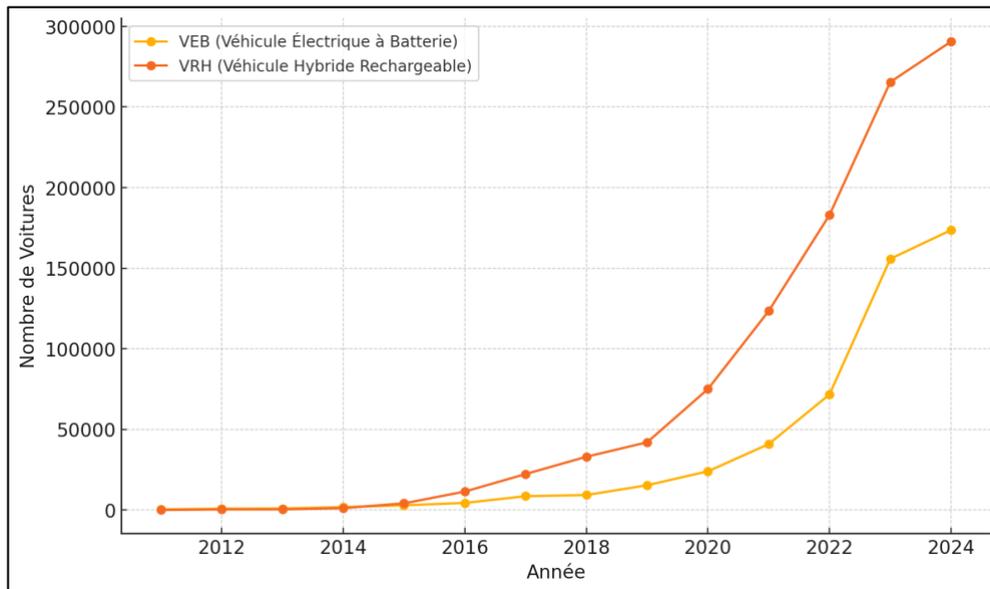


Figure 12 : Nombre total de voitures particulières (M1) à carburant alternatif (VEB et VRH) [49]

3.3.4 Les consommations électriques

3.3.4.1 L'eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire est une consommation plus stable. Tout d'abord, car, elle ne se caractérise pas dans un grand nombre d'activités. Les équipements utilisant de l'eau (comme un lave-vaisselle) ne sont pas comptabilisés, car leurs consommations internes comprennent déjà la chauffe de l'eau dans leur processus. L'eau va être utilisée pour une douche, un bain, un lavage de main, le nettoyage et pour la cuisine. Le plus gros apport dans une journée sera consacré pour une douche ou un bain.

La consommation d'eau chaude sanitaire est relativement stable, car elle n'est liée qu'à un nombre limité d'activités. Les appareils tels que les lave-vaisselle, qui chauffent eux-mêmes l'eau qu'ils utilisent, ne sont pas pris en compte. L'eau chaude est principalement utilisée pour les douches, les bains, le lavage des mains, le nettoyage et la cuisine. La consommation la plus importante est celle liée aux douches et aux bains.

a) Consommation moyenne en litre d'eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire peut être évaluée de deux manières. On peut par exemple estimer une consommation de 50 litres d'eau à 40°C par jour et par personne. Cependant, pour atteindre cette température, l'eau chaude est souvent mélangée à de l'eau plus froide. Ainsi, pour obtenir 50 litres à 40°C, il pourrait être nécessaire de chauffer 25 litres à 70°C et de les mélanger avec 25 litres à 10°C. En moyenne, la consommation d'eau chaude sanitaire par habitant se situe entre 40 et 80 litres par jour à 40°C [51] [52].

b) Profil de consommation en litre d'eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire varie au cours de la journée. Les principaux postes de consommation sont les douches, les bains, les robinets, les WC, les machines à laver, etc. [53] La consommation d'eau chaude pour les appareils comme les machines à laver n'est pas prise en compte ici, car elle est intégrée dans leur consommation électrique. De même, l'eau utilisée par les WC n'est pas comptée comme eau chaude sanitaire. Restent donc les robinets et les douches, dont la consommation est répartie tout au long de la journée, avec deux pics vers 8h et 19h, correspondant aux moments de présence dans les bâtiments. La consommation varie également selon la saison, étant plus faible en été en raison des températures extérieures plus élevées. Une étude réalisée par Ahmed et al. en 2016 montre que, quel que soit le type de ménage (de 1 à 5 personnes), la consommation d'eau chaude sanitaire est maximale vers 8h et 19h [53] (Figure 13).

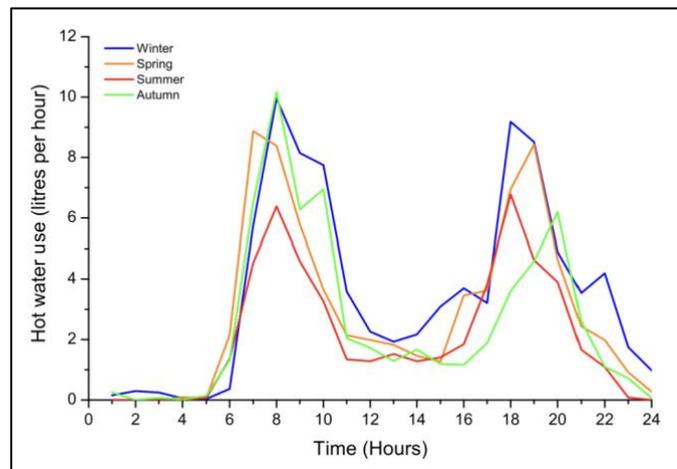


Figure 13 : Profil de consommation journalier en litre d'eau chaude sanitaire par heure en fonction de la saison [54]

c) La douche

La douche est le plus grand consommateur d'eau chaude sanitaire. Selon Bruxelles Environnement, une douche moyenne consomme 50 litres d'eau avec un débit de 10 litres par minute [55]. Cela correspond à une durée moyenne de 5 minutes par douche. On estime donc une consommation de 50 litres d'eau chaude par jour et par personne. Les bains ne sont pas pris en compte ici, car ils sont moins fréquents que les douches dans les logements [56].

d) Les robinets

La consommation des robinets peut être répartie à différents endroits d'un bâtiment et donc à des utilisations différentes. On peut différencier trois endroits où se situent des robinets, la salle de bain, la cuisine et à l'extérieur [56]. L'étude réalisée par Blokker et al. en 2010 relie les robinets à des actions comme se brosser les dents ou se laver les mains. La fréquence

d'utilisation varie du quotidien avec la salle de bain et la cuisine à occasionnellement pour le robinet extérieur. Le robinet extérieur peut donc être enlevé de l'analyse. Le robinet qui utilise le plus d'eau au quotidien est le robinet de la cuisine, car il monopolise plus d'actions différentes entre les lavages de main, d'aliments, nettoyage de la vaisselle.

Les robinets peuvent se trouver à différents endroits du bâtiment, chacun ayant des usages différents. On peut distinguer trois types de robinets : ceux de la salle de bain, de la cuisine, et les robinets extérieurs [56]. Une étude réalisée par Blokker et al. en 2010 associe les robinets à des actions spécifiques comme se brosser les dents ou se laver les mains. Parmi les robinets, celui de la cuisine consomme le plus d'eau au quotidien, notamment pour le lavage des mains, des aliments, et le nettoyage de la vaisselle [56].

3.3.4.2 Les équipements électroménagers

Avant d'analyser la consommation spécifique de chaque appareil, il est important de comprendre la consommation globale. Selon l'ICEDD, la consommation moyenne d'électricité des foyers wallons en 2020, hors chauffage et eau chaude sanitaire, était d'environ 2 500 kWh par an [34]. L'institut se base sur des données provenant de Statbel, d'enquêtes de Time Use Survey et du CEG. Si l'on additionne la consommation de tous les appareils, le total atteint 4354 kWh (Tableau 3).

Appareil	Consommation spécifique par logement équipé (kWh/an)
Réfrigérateurs	210
Congélateurs	330
Combiné R+C	350
Lave-Linge	190
Sèche-linge	230
Lave-Vaisselle	180
Micro-ondes	50
Télévisions	120
Ordinateurs	95
Eclairage	310
Appareil mobile de climatisation	315
Appareil intégré de climatisation	1050
Petit Electro	625
Circulateurs	179
Veille	120

Tableau 3 : Estimation de la consommation électrique des appareils électroménagers selon l'ICEDD en 2020 [34]

Cependant, cette estimation inclut des doublons comme la climatisation mobile et intégrée, ainsi que le réfrigérateur, le congélateur et le combiné. Comme mentionné précédemment, la

climatisation peut être exclue des calculs. Il faut également choisir entre un combiné réfrigérateur-congélateur et des appareils séparés. Étant donné que l'analyse concerne une maison avec suffisamment d'espace, un réfrigérateur et un congélateur séparés sont privilégiés. Une fois ces éléments ajustés, la consommation cumulée s'élève à 2 639 kWh par an, ce qui est plus proche des 2,5 MWh de consommation électrique annuelle.

Ces chiffres représentent une moyenne : certains foyers consomment plus, d'autres moins. L'analyse prend également en compte les appartements, qui n'ont pas toujours la place pour accueillir tous les équipements qu'une maison peut avoir, comme un congélateur ou un séchoir. Cela peut influencer la consommation moyenne. Selon une étude de l'ADEME publiée en 2021, les logements équipés d'un congélateur ou d'un séchoir sont moins nombreux que ceux équipés d'un réfrigérateur ou d'un sèche-linge [45]. Ces différences peuvent faire varier la consommation finale, dépassant parfois la moyenne de 2 500 kWh par an.

a) Les consommations électriques spécifiques des appareils

La consommation électrique spécifique de chaque appareil peut être analysée à partir de ses caractéristiques. L'objectif n'est pas d'obtenir une consommation annuelle globale, mais de pouvoir établir une courbe de consommation pour chaque appareil. Cela nécessite des informations plus précises que la puissance et l'énergie totale utilisée, comme la durée et la fréquence d'utilisation.

Ces données peuvent être analysées sur une base annuelle, mensuelle, hebdomadaire, journalière ou horaire. Certains appareils, comme les lave-linges ou sèche-linges, ont une consommation par cycle plutôt que par jour. Les informations nécessaires proviennent de l'ICEDD, de l'ADEME, d'autres instituts, d'une étude du professeur Monfils S., ainsi que de sites ou entreprises spécialisées dans l'énergie. Les données ont été croisées pour mieux refléter les caractéristiques des appareils.

3.3.4.3 La voiture électrique

a) Distance Moyenne parcouru par jour

La voiture électrique est un moyen de transport pour se déplacer d'un point A à un point B. Selon le Service public fédéral Mobilité et Transport, on peut distinguer différents types de trajets : travail, loisirs, courses/services, et école [57]. La voiture reste le mode de transport privilégié des Belges. La majorité des déplacements ont lieu pendant la journée, avec des pics le matin et le soir, comme le montre la Figure 14.. En moyenne, les Belges effectuent 2,2 déplacements par jour en voiture, pour des trajets d'une durée moyenne de 27 minutes et

couvrant environ 16 kilomètres. Le trajet quotidien moyen est d'environ 1 heure par jour, pour une distance de 35 km.

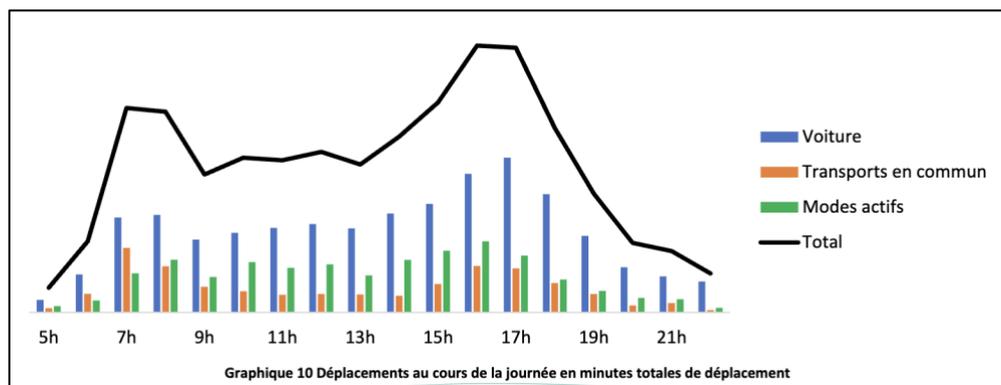


Figure 14 : Mode de déplacement au cours de la journée en minutes totales de déplacement [57]

b) Consommation moyenne d'une voiture électrique

Une voiture électrique se compose de moins de pièces que certaines voitures thermiques. Elle comprend principalement des éléments structurels, des composants de charge, la batterie, le moteur électrique, et des composants électroniques. Cependant, le poids des voitures électriques, dû aux batteries, influence fortement leur consommation d'énergie [58].

Paramètre [Unité]	Moyenne
Consommation d'énergie	-
Certifié [kWh/100 km]	19,4
Certifié - TEL [kWh/100 km]	18,5
Certifié - TEH [kWh/100 km]	20,7
Réel-mondeb [kWh/100 km]	20,7
Autonomie de conduite, basée sur	-
Consommation d'énergie certifiéea [km]	438
Consommation d'énergie certifiée - TEL [km]	449
Consommation d'énergie certifiée - TEH [km]	422
Consommation d'énergie réelleb [km]	383
Autonomie certifiée par 1000 EUR du prix du véhicule	7
Autonomie réelle par 1000 EUR du prix du véhicule	6,5
Capacité nominale de la batterie [kWh]	76
Capacité utilisable de la batterie [kWh]	71
Masse [kg]	2,102
Puissance [kW]	230
Surface frontale [m²]	2,59
Longueur [m]	4,71
Largeur [m]	1,89
Hauteur [m]	1,62
Prix [EUR]	70,135

Tableau 4 : Valeurs caractéristiques moyennes d'une voiture électrique européenne [59]

Une étude réalisée en 2024 par Weiss M. sur les véhicules électriques montre que leur consommation d'électricité varie en fonction des conditions et du type de véhicule. En moyenne, une voiture électrique consomme environ 19,4 kWh pour parcourir 100 kilomètres, selon une

revue de plusieurs études réalisées entre 1999 et 2009 (Tableau 4) [59]. Cependant, cette consommation peut atteindre 20 à 25 kWh/100 km pour des véhicules de taille moyenne équipés de batteries plus lourdes.

c) La puissance de charge

La recharge des véhicules électriques à domicile se divise principalement en deux types : la recharge lente et la recharge accélérée [60]. La recharge lente, utilise une prise domestique standard de 120 V avec une puissance de charge d'environ 1,9 kW. Ce type de recharge est le plus simple à installer, mais il est également le plus lent, nécessitant souvent toute une nuit pour recharger complètement un véhicule électrique. La recharge accélérée, utilise une alimentation à 240 V, généralement installée spécifiquement pour la recharge des voitures électriques à domicile. Avec une puissance de charge pouvant atteindre 7,7 kW, ce type de recharge est plus rapide, permettant de recharger un véhicule en quelques heures. L'étude réalisée par Apostolaki-Iosifidou E. et al. en 2017 a démontré que les pertes dues au processus de charge d'un véhicule électrique sont comprises entre 0,64 et 6,39 %.

La recharge des véhicules électriques à domicile se divise principalement en deux types : la recharge lente et la recharge accélérée [75]. La recharge lente utilise une prise domestique standard de 120 V avec une puissance de charge d'environ 1,9 kW. Ce type de recharge est simple à installer, mais lent, nécessitant souvent toute une nuit pour recharger complètement un véhicule. La recharge accélérée, utilisant une alimentation à 240 V, offre une puissance de charge pouvant atteindre 7,7 kW, permettant de recharger un véhicule en quelques heures. Selon une étude réalisée par Apostolaki-Iosifidou E. et al. en 2017, les pertes dues au processus de charge d'un véhicule électrique varient entre 0,64 % et 6,39 %[61].

3.4 Profil d'occupation des bâtiments résidentiels

3.4.1.1 Le time use survey

Le Time Use Survey (TUS) est une enquête statistique qui collecte des données sur la répartition du temps quotidien entre diverses activités. Utilisé pour analyser les comportements sociaux et économiques, il aide à comprendre l'organisation quotidienne des individus. Statbel, l'institut belge des statistiques, fournit des données sur des activités comme le sommeil, le travail, ou les soins. La Figure 15 illustre la répartition du temps en heures sur une journée pour un Belge moyen, avec le sommeil et le repos comme activité principale [62]. Les TUS peuvent être utilisées pour modéliser la demande en électricité résidentielle. Les auteurs, Torriti et al. (2014), ont analysé diverses études qui relient les habitudes quotidiennes des individus, telles que l'utilisation des appareils électroménagers et les pratiques de chauffage, aux profils de consommation d'électricité [63]. L'article souligne l'importance de ces modèles pour comprendre les pics de demande, en particulier dans les périodes où un grand nombre de ménages utilisent simultanément de l'électricité. En fonction de l'activité on peut prédire les appareils utilisés et établir une courbe de charge finale.

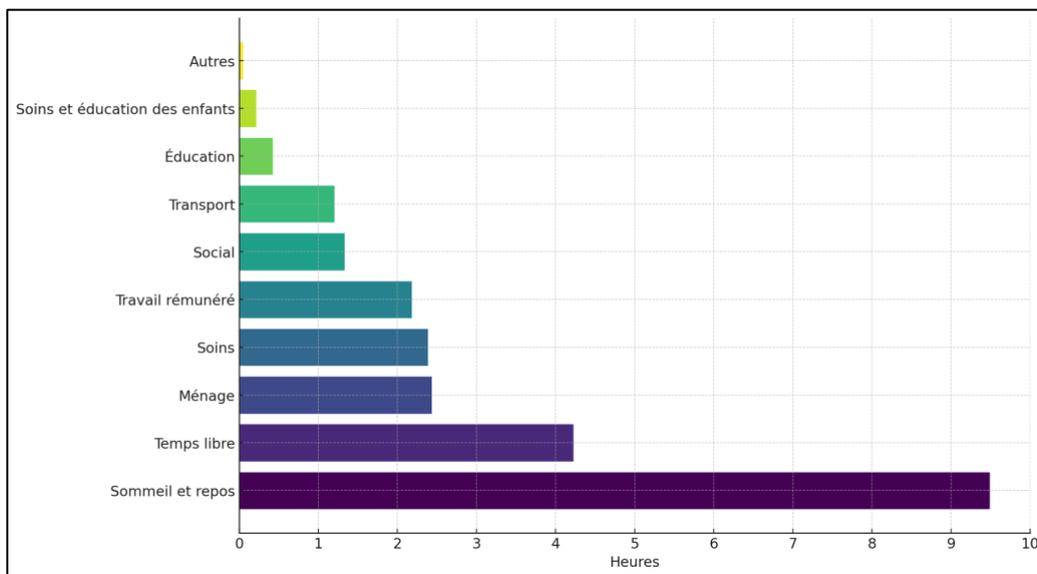


Figure 15 : Répartition du nombre d'heure par activité d'un belge durant une journée [64]

3.4.1.2 La présence dans un bâtiment domestique

La consommation énergétique d'un bâtiment varie selon la présence ou l'absence des occupants. Aerts D. et al. (2014) ont développé un modèle probabiliste montrant la présence dans les domiciles belges [65]. La Figure 16 présente le profil moyen d'occupation des domiciles, indiquant la probabilité qu'un individu soit chez lui, éveillé, en train de dormir, ou absent à différents moments de la journée. Les personnes sont généralement absentes durant les

heures de travail (8h00-18h00) et présentes à la maison le matin et en soirée. La majorité dort entre minuit et 7h00. L'étude propose aussi divers autres profils pour analyser différentes situations d'occupation.

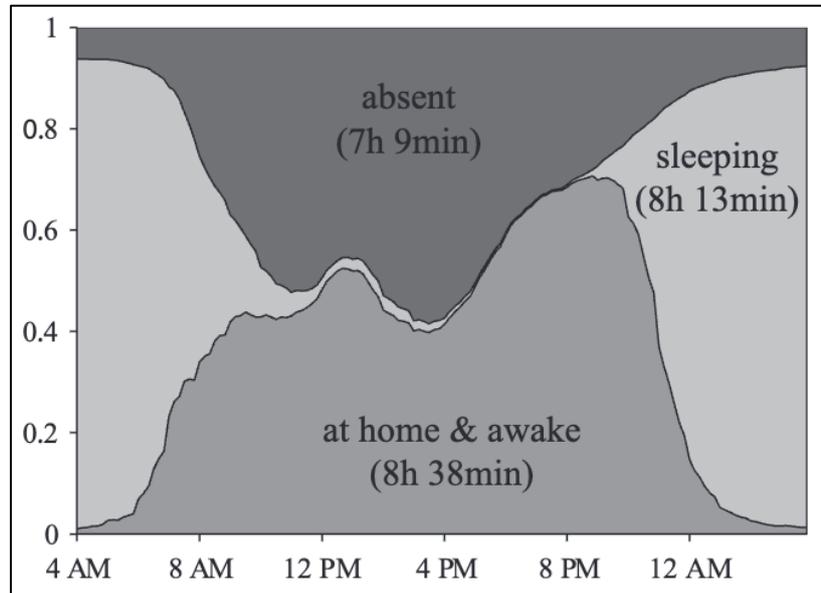


Figure 16 : Profil moyen de la probabilité de présence, absence ou de sommeil d'un occupant belge au sein d'un habitat [65]

Les articles de Torriti et al. (2014) et Aerts D. et al. (2014) soulignent qu'un occupant peut être présent sans générer de consommation énergétique directe [63], [65]. Par exemple, dormir n'entraîne pas l'utilisation d'équipements énergétiques, mais la présence peut influencer la régulation du chauffage. Il existe donc un effet indirect entre la présence, l'action, et la consommation énergétique.

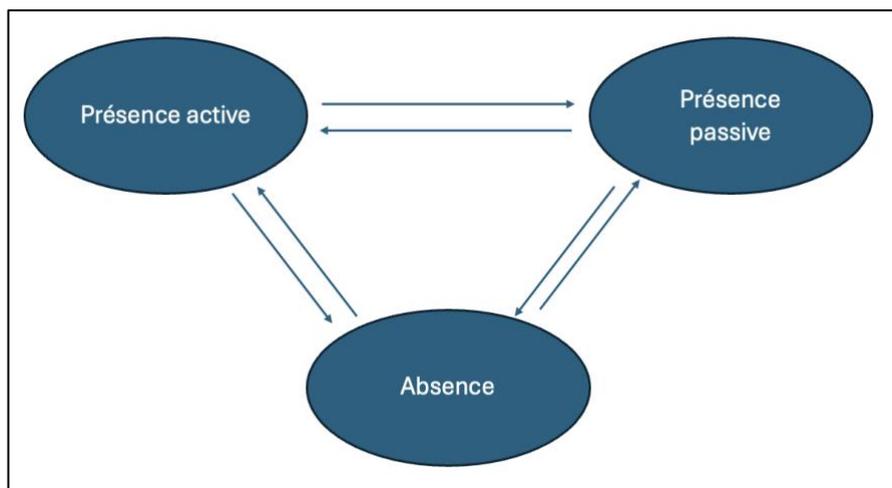


Figure 17 : Les trois cas ayant une influence directe ou non sur la consommation énergétique [63]

Trois scénarios principaux sont possibles, représentés par la Figure 17 :

- **Occupation active** : Une action directe engendre une consommation énergétique.
- **Occupation passive** : L'habitant est présent mais ses actions n'influencent pas directement la consommation, bien que sa présence puisse le faire.
- **Absence** : Personne n'est présent, entraînant une absence de consommation directe.

3.4.1.3 Lier les équipements aux activités

L'analyse des activités quotidiennes montre que certaines influencent la consommation énergétique. Wilke U. (2013) a développé un modèle probabiliste identifiant les activités spécifiques à chaque moment de la journée, illustré par la Figure 18 [66]. Il ne s'agit plus seulement de présence active ou non, mais de l'association de chaque activité à l'un des scénarios de la Figure 17. On observe sur la figure ci-dessous que le sommeil se situe principalement entre minuit et 7h, tandis que les repas et les soins personnels se concentrent le matin et le soir. Les activités multimédias, comme regarder la télévision ou écouter de la musique, se déroulent plutôt en soirée.

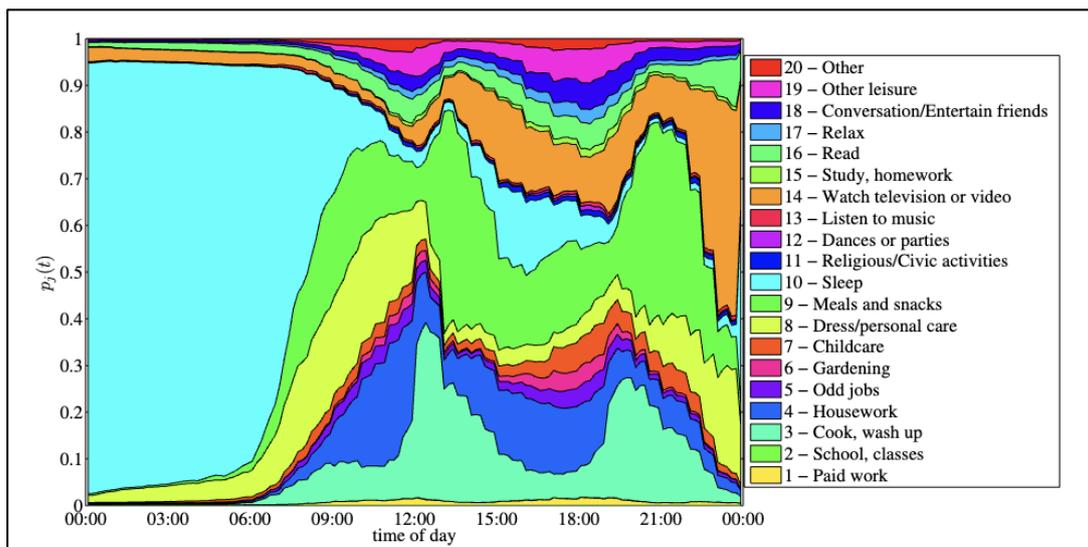


Figure 18 : Profil moyen de probabilité des activités au cours de la journée [66]

3.5 Le système de management de l'énergie

3.5.1 Les concepts

Un système de management de l'énergie est un ensemble de technologies et de processus conçus pour surveiller, contrôler et optimiser la consommation et la production d'énergie dans un environnement donnée. Il intègre des données en temps réel pour gérer efficacement les la production énergétiques, réduire les coûts, minimiser l'impact environnemental et améliorer l'efficacité énergétique. Un SME permet également une communication bidirectionnelle entre tous type d'appareil, permettant d'effectuer des conditions à distance et facilitant ainsi l'intégration des sources d'énergie renouvelable et la gestion des charges [67]. Ce type de système permet d'avoir une influence par rapport au réseau, d'un quartier ou même d'une seule habitation, dans ce cas-là on parlera de « home energy management system » (HEMS).

L'article publié par Balakrishnan R. et al. en 2021 fourni une revue des systèmes de management de l'énergie domestique [68]. Il met notamment l'accent sur les différents composants pouvant s'intégrer dans ce type de système (Figure 19). On peut citer les compteurs intelligents qui enregistrent et transmettent la consommation et production énergétique. Des dispositifs de détection pour identifier des paramètres comme la température ou le rayonnement solaire, des dispositifs de communication pour relier les capteurs et les compteurs ou d'autres systèmes externes. Des appareils ménagers qui peuvent être traditionnels ou intelligents. On trouve des techniques d'optimisation et des contrôleurs qui prennent des décisions en fonction conditions définies. Enfin, le système intègre souvent des sources d'énergie renouvelable, comme les panneaux solaires, et des systèmes de stockage par batterie pour maximiser l'efficacité énergétique.

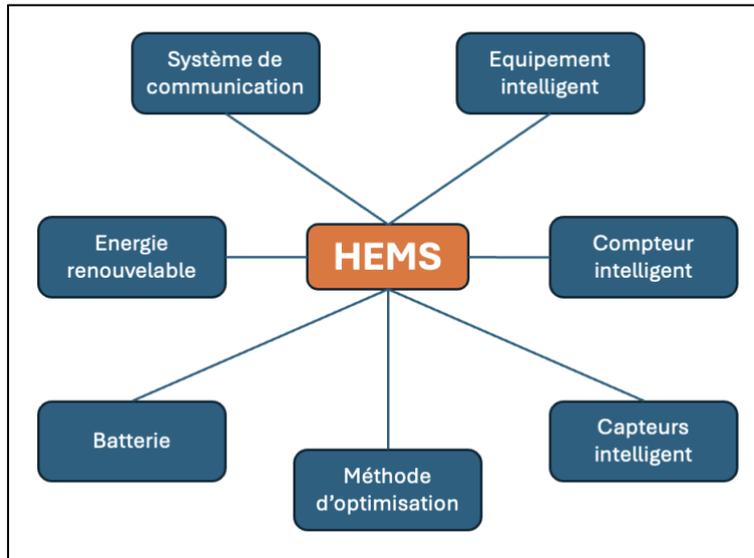


Figure 19 : Les différents composants d'un système de management de l'énergie domestique [68]

L'intégration d'énergie renouvelable à un habitat quand on parle d'EMS est inévitable. Cela permet une plus grande flexibilité. Mais cela ne suffit pas, car l'EMS se marie parfaitement avec des systèmes dits « hybride » (photovoltaïque + batterie). C'est notamment ce qu'analyse l'article de Xiangqiang W. et al. publié en 2022, il analyse les différentes stratégies de gestion de l'énergie pour les systèmes photovoltaïques résidentiels couplés à des batteries de stockage.

L'auteur souligne un problème déjà cité dans l'Introduction, l'intermittence. Le principal problème est la nature intermittente et imprévisible de la production solaire, ce qui entraîne des décalages entre la production d'énergie et la consommation comme on peut l'apercevoir sur la Figure 20. Par exemple, la production solaire est maximale pendant la journée alors que la demande énergétique domestique est souvent plus élevée le matin et le soir. Ce décalage peut provoquer des pénuries d'énergie ou des surcharges sur les réseaux de distribution, affectant ainsi la qualité de l'énergie fournie.

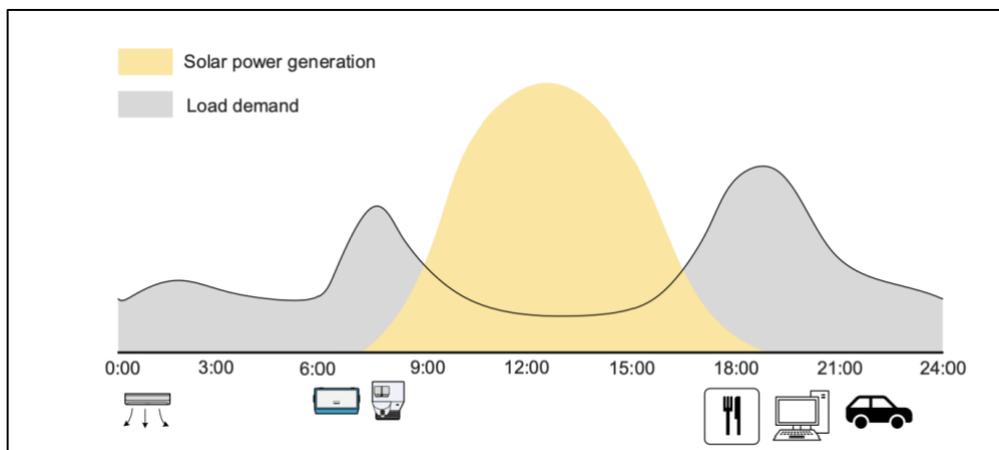


Figure 20 : Schéma montrant le problème entre les périodes de production solaire en journée et de consommation matinale et en soirée [67]

L'optimisation des systèmes de gestion de l'énergie domestique est cruciale pour maximiser l'efficacité énergétique tout en réduisant les coûts associés. Différentes approches existent, telles que l'ajustement en fonction des prix du marché à court et long terme, ou encore l'amélioration de la consommation énergétique par des stratégies intégrant l'autoconsommation et l'autoproduction. L'article publié en 2017 par Xin J. et al. montre un système de gestion de l'énergie domestique appelé "Foresee" pour optimiser la gestion de l'énergie. Ce système peut pré-refroidir une maison en utilisant l'énergie solaire durant les heures de forte production, réduisant ainsi la consommation d'énergie pendant les heures de pointe où les tarifs sont plus élevés. En réponse à une demande de réduction de la charge du réseau, le système peut également utiliser l'énergie stockée dans des batteries pour alimenter les appareils domestiques, diminuant la dépendance au réseau durant ces périodes critiques. [69]. Ce système prédit les charges interne de sa propre habitation tout en s'adaptant aux variations du réseau.

L'autoconsommation désigne l'utilisation directe par un consommateur de l'énergie qu'il produit localement, souvent à partir de sources renouvelables comme les panneaux solaires, réduisant ainsi la dépendance au réseau électrique. Essentielle pour diminuer les coûts énergétiques et renforcer l'indépendance énergétique, elle optimise également le retour sur investissement des systèmes de production tout en réduisant l'empreinte carbone. Le taux d'autoconsommation, calculé comme le rapport entre l'énergie autoconsommée et l'énergie totale produite, peut être optimisé par la gestion de la demande, l'utilisation de batteries, l'intégration de systèmes de gestion de l'énergie domestique, et l'adaptation des habitudes de consommation. Une optimisation efficace de l'autoconsommation maximise ainsi les bénéfices économiques et environnementaux de la production d'énergie renouvelable.

L'autoconsommation énergétique, définie comme l'utilisation directe de l'énergie produite localement par des sources renouvelables. Elle permet de réduire la dépendance au réseau électrique, diminuer les coûts de l'énergie, et optimiser les investissements en technologies renouvelables. Pour maximiser l'autoconsommation, des stratégies telles que la gestion intelligente de la demande, le déphasage de certaines demandes, l'intégration de systèmes de stockage d'énergie, et l'ajustement des habitudes de consommation peuvent être mises en œuvre. Calculée en pourcentage, elle représente le rapport entre l'énergie consommée sur place des ENR et la production totale des ENR (2). Cela souligne l'importance de synchroniser la consommation avec les périodes de production pour optimiser les bénéfices environnementaux et économiques. Un élément que l'on lie souvent est l'autoproduction qui représente le rapport entre l'énergie consommée sur place et la consommation totale (3).

$$\text{Autoconsommation \%} = \frac{\text{Consommation directe des ENR}}{\text{Production totale des ENR}} * 100 \quad (2)$$

$$\text{Autoproduction \%} = \frac{\text{Consommation sur place des ENR}}{\text{Consommation totale}} * 100 \quad (3)$$

L'ensemble de ces articles nous donnent un bref aperçu de ce qu'est le système de management de l'énergie. On peut en faire ressortir un certain nombre d'éléments caractéristique à ce type de système :

- Il se compose d'un ou plusieurs éléments vus à la Figure 19. Il est possible d'avoir ou non une production d'énergie renouvelable (ENR), avec ou sans système de stockage.
- Chaque système à un but prioritaire. Souvent il est économique afin de réduire la facture énergétique, de rentabiliser au mieux son installation photovoltaïque ou de batterie. Mais aussi le but peut être tout autre comme environnemental ou d'optimisation énergétique afin d'alléger le réseau d'électricité durant les heures de pointe mais aussi de consommer un maximum de sa production d'énergie renouvelables (l'autoconsommation).
- Il existe un tas de façon d'optimiser sa consommation avec modèles dynamiques, algorithmiques voir même prédictifs
- L'autoconsommation est un dès l'éléments qui permet d'associer les objectifs économiques et énergétiques et environnementaux. De plus le déplacement de charge est majoritairement utilisé en permettant d'associer consommation et production.

3.5.2 La production photovoltaïque

3.5.2.1 Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque est un dispositif utilisé pour convertir l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Cet effet est la base du fonctionnement des cellules photovoltaïques, qui sont utilisées dans les panneaux solaires pour convertir la lumière du soleil en électricité. Il est composé de cellules photovoltaïques, souvent fabriquées en silicium, qui captent la lumière du soleil et la transforment en courant électrique. Lorsque les photons de la lumière frappent les cellules, ils libèrent des électrons, ce qui génère un flux d'électricité. Les cellules sont connectées entre elles pour former un module capable de produire plus d'énergie. Il existe différentes technologies de panneaux photovoltaïques, comme le silicium

monocristallin, le silicium polycristallin, et le silicium amorphe et bien d'autres. Chacune a ses avantages en termes de coût et de rendement.

Selon le Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), en 2023, la technologie basée sur le silicium cristallin représentait environ 97 % de la production mondiale d'électricité photovoltaïque [70]. Parmi ces technologies, le silicium monocristallin se distingue par un meilleur rendement, atteignant en moyenne 20%. Bien que les modules polycristallins soient généralement moins efficaces que leurs homologues, ils restent populaires en raison de leur coût de production inférieure [71].

3.5.2.2 La production photovoltaïque annuelle

En 2023, la production solaire belge était de 7,2 TWh représentant 9,2 % du mix électrique belge total. De plus, cela marque une augmentation de plus de 12% par rapport à l'année précédente.

Selon le site Energieplus explique qu'en Belgique, « pour chaque kilowatt crête installé, non ombré, exposé plein sud et incliné à 35°, produit en moyenne 950 kWh/an » [72]. De plus ils considèrent qu'il faut environ 7 m² pour installer un kilowatt crête. En fonction de l'inclinaison, les valeurs de production d'électricité peuvent drastiquement changées.

Afin de connaître la production d'une installation photovoltaïque, le site PV-GIS propose des rapports très simple et permettent de voir le potentiel d'une installation juste en indiquant quelques paramètres comme le type de panneau, la puissance crête, la pente et l'orientation des panneaux et le lieu [73]. Cela donne un rapport comme déposé en Annexe 2.

4. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour cette étude s'est articulée autour de deux grandes étapes, chacune utilisant des environnements de simulation distincts pour répondre aux besoins spécifiques de l'analyse. Dans un premier temps, le logiciel TRNSYS a été employé pour modéliser de manière dynamique la demande énergétique en chauffage ainsi que la production d'énergie solaire. Cette étape a permis de simuler les conditions réelles de fonctionnement en tenant compte des caractéristiques techniques du bâtiment, des conditions climatiques et des spécificités du système de production solaire.

Ensuite, une seconde étape a été menée sous Excel, où la demande énergétique des équipements électriques et de l'eau chaude sanitaire a été calculée. La consommation a été déterminée de manière statique avec des schedules prédéterminées sur une semaine, puis itérée sur toute l'année. Excel a également servi d'outil d'optimisation, permettant d'affiner les modèles initiaux pour minimiser la consommation énergétique globale. Certaines consommations sont modulables et ne sont plus fonction de la consommation déterminée par le modèle, mais afin d'optimiser la production photovoltaïque et donc de maximiser l'autoconsommation.

4.1 Construction du modèle de consommation

4.1.1 Caractéristiques du modèle

La caractérisation du modèle présenté ici s'appuie sur les principes et caractéristiques identifiés lors de la revue de littérature.

- **La base et période étudiée**

La simulation s'étend sur une année complète, avec une base de temps de 5 minutes. Cela permet une simulation dynamique à court terme, capable de capturer des variations précises.

- **Les données utilisées**

Les données proviennent de plusieurs sources littéraires. Pour la partie technique du bâtiment, elles sont principalement issues des rapports COZEB, offrant une information détaillée. Les données manquantes ont été complétées par des rapports ou des exigences wallonnes comme la PEB. Les informations sur l'utilisation du bâtiment et ses occupants sont principalement tirées de la littérature scientifique et des rapports nationaux, tout comme celles concernant la

consommation d'eau chaude sanitaire. Concernant les équipements techniques comme les batteries, les panneaux photovoltaïques ou le ballon d'eau chaude sanitaire, les données proviennent des fiches techniques des fabricants spécialisés. La littérature utilisée pour la consommation des équipements électriques est plus diversifiée, incluant des données scientifiques, des articles spécialisés, des informations d'entreprises spécialisées, ainsi que des rapports internationaux, nationaux ou régionaux. Les données météorologiques utilisées sont celles d'Arlon en 2021, issues de la station météo du campus d'Arlon de l'Université de Liège. Cette diversité de sources garantit la pertinence des données utilisées, en vérifiant les concordances entre différentes sources pour choisir les valeurs les plus appropriées.

Finalement, la littérature utilisée pour ce travail est très vaste et ne prend pas seulement source dans la littérature scientifique. Les données utilisées ont souvent été comparées à d'autres sources afin de voir les concordances et différences pour prendre les valeurs qui semblent les plus pertinentes.

- **Le bâtiment analysé**

Le bâtiment analysé est un bâtiment issu de l'étude COZEB réalisée par la région Wallonne en 2013 [32]. Cette étude a effectué une analyse du parc immobilier wallon dont le parc résidentiel. Le bâtiment choisi est donc le bâtiment He14 selon le rapport ou autrement appelé Villa K55. Le bâtiment est choisi principalement pour son ossature et caractéristique physique comme les types de matériaux. L'emplacement du bâtiment est situé à Arlon. Il a été considéré que deux adultes actifs sans enfants composent le ménage.

- **Environnement de simulation**

Pour réaliser cette étude, plusieurs logiciels seront utilisés. Tout d'abord, le logiciel SketchUp permettra de modéliser en trois dimensions le bâtiment à analyser. Ce modèle sera ensuite intégré dans TRNSYS, en commençant par le logiciel TRNBuild, qui permet d'ajouter les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de l'enveloppe et les régimes spécifiques au bâtiment. La simulation dynamique sera ensuite réalisée avec le logiciel Simulation Studio. Le choix de TRNSYS repose sur sa capacité à offrir une grande précision en intégrant un ensemble de données techniques du bâtiment. De plus, des données météorologiques récentes d'Arlon seront utilisées pour simuler les performances du bâtiment.

Par ailleurs, le logiciel Excel sera utilisé pour effectuer diverses opérations mathématiques simples, ainsi que pour la gestion des bases de données, principalement en ce qui concerne les

équipements électriques, l'eau chaude sanitaire, et l'optimisation de la consommation énergétique. Excel a été choisi pour sa flexibilité et sa simplicité d'utilisation.

4.1.2 La consommation énergétique du chauffage

4.1.2.1 Description du bâtiment

Le bâtiment analysé est un bâtiment issu de l'étude COZEB réalisée par la région wallonne en 2013 [32]. Cette étude a effectué une analyse du parc immobilier wallon dont le parc résidentiel. Le bâtiment choisi est donc le bâtiment He14 selon le rapport ou autrement appelé Villa K55. Il s'agit d'une villa 4 façades construite en 1991.

Les données du rapport COZEB indiquent une surface habitable de 151 m², sans inclure l'espace du garage, qui ne fait pas partie du volume protégé. La maison est équipée d'une chaudière qui assure à la fois le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire, avec un ballon tampon. La ventilation est assurée de manière naturelle (TypeA). Les plans de la maison se trouvent en l'Annexe 3.

La maison comprend quatre niveaux, dont deux habitables. Le premier niveau est un vide sanitaire, créant un espace tampon entre le sol et la partie habitable. Au rez-de-chaussée, on trouve une zone chauffée comprenant le séjour, la cuisine et la buanderie, ainsi qu'une zone non chauffée (le garage). L'étage comprend trois chambres, une salle de bain, et un espace de rangement. Cet étage n'est pas entièrement habitable, car la toiture réduit une partie de la surface au sol. Deux zones tampons non habitables, séparées par une cloison, isolent les zones habitables de la toiture. Le grenier au quatrième niveau n'est pas habitable.

4.1.2.2 Modélisation 3D du bâtiment sous Sketchup

La modélisation sous SketchUp se déroule en deux étapes : le découpage des zones thermiques, puis la modélisation du bâtiment. Le découpage a été simplifié en suivant la méthode PEB, sans définir chaque zone thermique à l'intérieur du volume protégé. Un seul grand volume a été considéré pour calculer la demande énergétique globale, basé sur la distinction entre volumes chauffés et non chauffés.

Au total, sept zones ont été définies dans le bâtiment, comme représenté sur la Figure 24 :

- Zone 1 : Zone chauffée comprenant le salon, l'entrée et la cuisine.
- Zone 2 : Cette zone non chauffée habitable qui prend en compte le garage et la buanderie.
- Zone 3 : La seconde zone chauffée à l'étage qui prend en compte les chambres et la salle de bain.
- Zone 4 et 5 : Deux zones non chauffées non habitables qui sont des zones tampons.
- Zone 6 : C'est une zone non chauffée non habitable qui est le grenier.
- Zone 7 : C'est une zone non chauffée non habitable qui est le vide sanitaire.

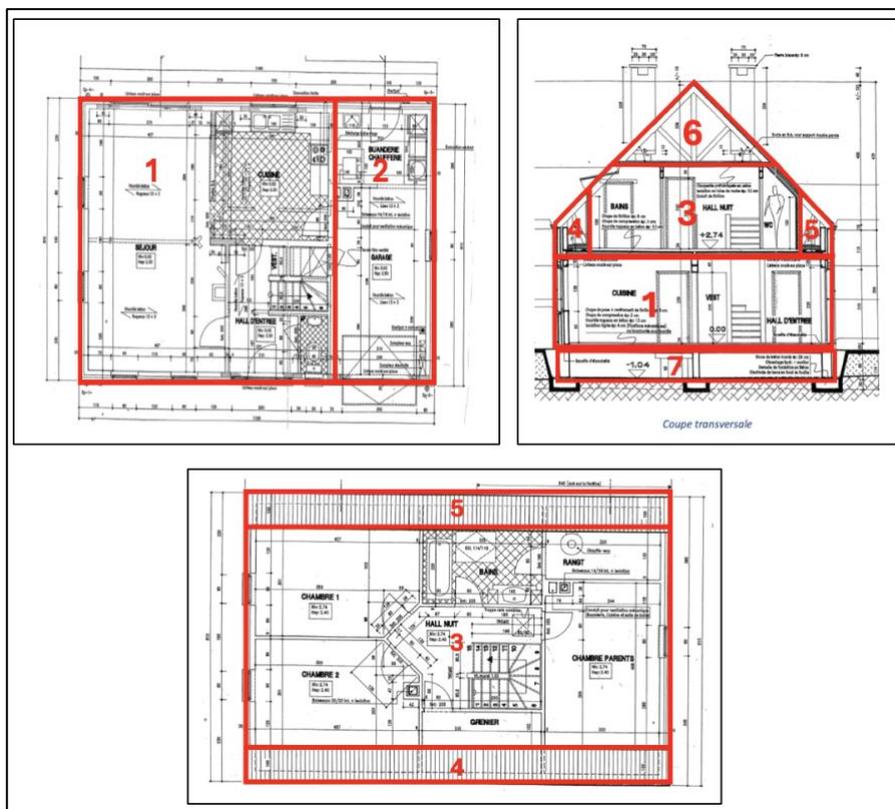


Figure 21 : Découpage des zones du rez-de-chaussée (en haut à gauche), du second étage (en bas) et d'une coupe transversale du bâtiment (en haut à droite)

Après la définition des zones, la modélisation 3D a été réalisée sous SketchUp. Le rendu de la simulation est visible sur la Figure 22.

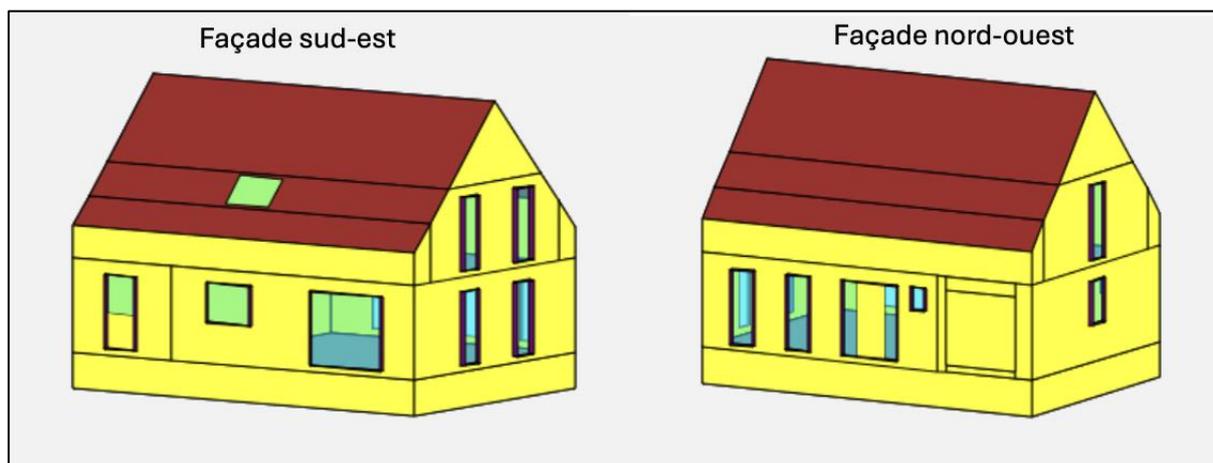


Figure 22 : Représentation 3D sous Sketchup de la modélisation du bâtiment analysé

4.1.2.3 L'encodage TRNBuild

a) Les parois

Les éléments de paroi utilisés sont décrits dans le rapport COZEB. Cependant, toutes les données relatives aux parois n'étaient pas mentionnées. Le rapport COZEB, basé principalement sur la méthode PEB, ne détaille pas les murs qui ne font pas partie du volume protégé. Il a donc été nécessaire d'extrapoler certaines données, comme celles relatives au sol et aux murs du vide sanitaire.

Les matériaux utilisés ont été définis, et leurs caractéristiques, telles que la conductivité, la capacité et la masse volumique, ont été extraites de la base de données du logiciel PEB ou de l'annexe du rapport de la Région wallonne intitulé "Choix des matériaux - Ecobilan des parois" [74], [75]. Les éléments de construction ont été caractérisés dans le Tableau 5 et assemblés pour former des parois Tableau 6.

Nom de l'élément de paroi	λ (KJ/hmK)	λ (W/mK)	C (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
Hourdis	4,140	1,15	1,00	1800
PUR	0,086	0,024	1,40	40
Chape	3,060	0,85	1,00	1600
Enduit en plâtre	1,872	0,52	1,00	1200
Bloc béton lourd	6,840	1,9	1,00	2400
Isolation Laine minérale	0,126	0,035	1,03	135
Air ventilé	0,968	0,269	0,177	67
Brique terre cuite	3,024	0,84	1,00	1600
Ossature bois + isolation mineral isover 12%/88%	0,166	0,046	1,09	100
Ardoise	7,920	2,2	1,00	2700
Carrelage	4,320	1,2	1,00	2000
Laine minérale	7,920	2,2	1,00	2700
OSB	0,468	0,13	1,700	300
Gravier	7,200	2	1,00	2000

Tableau 5 : Caractéristiques des éléments de construction utilisés [75]

Nom de la paroi	Nom de l'élément de paroi	Epaisseur (m)	U (W/m ² K)
Sol_RDC	Hourdis	0,13	0,494
	PUR	0,04	
	Chape	0,05	
	Carrelage	0,02	
Mur_Ext	Enduit au plâtre	0,005	0,463
	Bloc béton lourd	0,14	
	Isolation Laine minérale	0,04	
	Air ventilé	0,025	
	Brique terre cuite	0,09	
Toiture	Ossature bois + isolation mineral isover 12%/88%	0,13	0,334
	Ardoise	0,01	
Mur_Adj_Etage	OSB	0,01	0,277
	Laine minérale	0,11	
	OSB	0,01	
Mur_Adj_Garage	OSB	0,01	0,468
	Laine minérale	0,05	
	OSB	0,01	
Sol_Adj_Etage	Hourdis	0,13	4,32
	Chape	0,05	
	Carrelage	0,02	
Sol_Combles_Etage	Hourdis	0,13	0,572
	Chape	0,05	
	Laine minérale	0,05	
Sol_Grenier	OSB	0,01	0,166
	Ossature bois + isolation mineral isover 12%/88%	0,15	
Sol Vide Sanitaire	Gravier	0,3	7,2
Mur Vide Sanitaire	Bloc béton lourd	0,14	4,1
Fenêtres	GU Solar Neutral 70 A90	6/16/4 U-Value = 2,82 W/m ² K g-Value = 0,64	

Tableau 6 : La composition des parois

Ainsi, avec les caractéristiques des éléments, les parois ont pu être assemblées et encodées dans TRNBuild. À noter que les fenêtres ont été définies avec le matériau "3416" de la base de données de TRNBuild. Certains éléments de construction, composés de plusieurs matériaux, ont vu leurs valeurs caractéristiques définies avec le logiciel PEB.

b) Les schedules occupation

Le bâtiment étudié est occupé par deux adultes, un choix basé sur la moyenne nationale de 2,2 personnes par ménage en Belgique [31]. Ces adultes étant actifs et travaillant, leur présence au domicile est réduite durant la semaine. Deux zones habitables ont été définies : la zone de sommeil et soins (chambres et salle de bain) et la zone de vie (cuisine et salon). Chaque zone est associée à des activités spécifiques selon l'heure de la journée. Les schedules d'occupation pour le rez-de-chaussée et l'étage, en semaine et le weekend, sont illustrés dans la Figure 23.

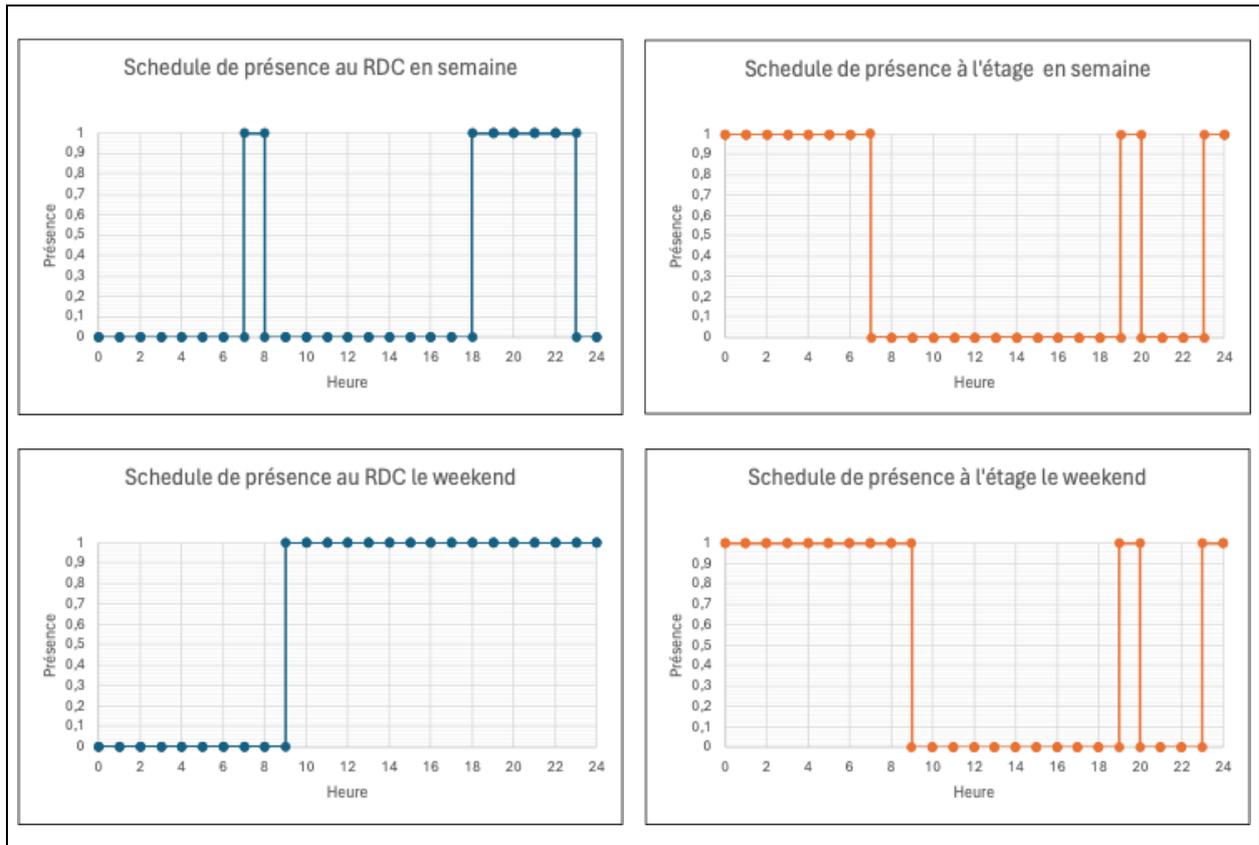


Figure 23 : Les schedules d'occupation des deux zones du bâtiment

c) L'infiltration

Selon la région wallonne, les constructions récentes présentent des taux d'infiltration d'air compris entre 6 et 12 m³/h.m² [76]. Pour cette étude, le taux d'infiltration a été fixé à 9 m³/h.m², correspondant au v_{50} , qui représente le volume d'air échangé avec l'extérieur par heure, par surface de déperdition, sous une pression de 50 pascals. Cependant, TRNSYS utilise le taux de renouvellement d'air n_2 à 2 pascals.

La région Wallonie estime que les constructions actuelles se trouvent entre 6 et 12 m³/h.m² [76]. Le taux d'infiltration de l'air dans le bâtiment est défini à 9 m³/h.m². Cette valeur correspond au v_{50} qui correspond au volume d'air échangé avec l'extérieur par heure et par surface de déperdition à 50 Pascal. Cependant, le logiciel TRNSYS ne prend pas en compte la valeur de v_{50} mais plutôt de n_2 qui correspond au taux de renouvellement d'un espace en une heure à 2 pascal.

Il faut donc convertir la valeur v_{50} en n_2 , à commencer par trouver le débit de déperdition total V_{50} . La surface totale de déperdition ($S_{D\acute{e}p}$) est égale à 459 m² (4).

$$V_{50} = v_{50} * S_{Dép.} = 9 * 459 = 4132 \text{ m}^3/h \quad (4)$$

Ensuite il faut le passer d'un débit à un taux de renouvellement en divisant par le volume total ayant les déperditions. Le volume intérieur de la maison (V_{int}) est égal à 383 m^3 (5).

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V_{int}} = \frac{4132}{383} = 10,79 \text{ 1/h} \quad (5)$$

Ce taux de renouvellement est à 50 Pascal mais c'est une mesure en surpression. Dans le milieu naturel, on se trouve plutôt autour des 4 pascals. Pour arriver à cette valeur, n_4 , on divise par un coefficient a qui équivaut à 25 (6).

$$n_4 = \frac{n_{50}}{a} = \frac{n_{50}}{25} = 0,432 \text{ 1/h} \quad (6)$$

L'infiltration à pression réelle est 0,432 de taux de renouvellement d'air par heure (1/h). La valeur n_4 , est encodée dans le logiciel TRNBuild.

d) La ventilation

La ventilation dans ce bâtiment est assurée naturellement, avec des débits calculés selon la norme NBN D50-001 (Figure 24). Les débits sont basés sur les surfaces des pièces sèches et humides, avec un débit nominal de $3,6 \text{ m}^3/h.m^2$ pour les pièces sèches. Pour le salon (37 m^2), le débit de ventilation est de $133 \text{ m}^3/h$, et pour l'étage (43 m^2 avec trois chambres), il est de $153 \text{ m}^3/h$. La température de l'air entrant est égale à celle de l'air extérieur.

	ALIMENTATION EN AIR NEUF		TRANSFERT	ÉVACUATION DE L'AIR VICIÉ		
	Locaux secs		Ouvertures de transfert	Locaux humides		
	Séjour	Chambre, bureau, salle de jeux	Hall, espace de passage	Cuisine ouverte	Cuisine fermée, salle de bains, buanderie	W.-C.
Débit minimum	75 m ³ /h	25 m ³ /h	Débit minimum ou section libre (2): 25 m ³ /h ou 70 cm ² (3)	75 m ³ /h	50 m ³ /h	25 m ³ /h
le débit peut être limité à	150 m ³ /h	72 m ³ /h (1)		-	75 m ³ /h	-
Débit maximum (exigence en ventilation naturelle)	≤ 2 q	≤ 2 q	Exception pour cuisine équipée: 50 m ³ /h ou 140 cm ² (4)	-	-	-

Figure 24 : Débit de ventilation selon la norme NBN D50-001 [77]

Ensuite, en fonction des zones sèches ou humides, on effectue un couplage pour déterminer les débits de ventilation qui seront transférés entre les pièces. Dans le cas de cette étude, les zones

définies ne différencient pas les zones sèches et humides dans le découpage. Cependant, nous pouvons quand même calculer les débits entrants par rapport aux surfaces des locaux secs. Au rez-de-chaussée se trouve le salon, qui fait approximativement 37 m². Multipliée par le débit nominal, la demande en ventilation naturelle est de 133 m³/h pour le rez-de-chaussée. Pour l'étage, les trois chambres représentent à elles seules 43 m². Le débit de ventilation pour l'étage se situe donc à 153 m³/h. À savoir que la température de l'air entrant correspond à la température de l'air extérieur. Les zones humides au rez-de-chaussée incluent la cuisine, la toilette et la buanderie. Cela peut amplement suffire pour évacuer l'air vicié à ce niveau. À l'étage, la seule zone humide est la salle de bain. Cela crée un déséquilibre de ventilation, avec un débit de transfert de 78 m³/h de l'étage vers le rez-de-chaussée. Cependant, le couplage n'a pas été pris en compte dans la simulation, car les simplifications de modélisation 3D ont fait qu'il n'y a pas de zones de transfert comme une cage d'escalier.

e) Le chauffage

Le système de chauffage pour l'habitat est un chauffage central. Dans les spécificités du rapport COZEB, il est mentionné un chauffage central avec une chaudière à gaz à condensation. Le moyen d'émission de chaleur à l'intérieur du bâtiment est le radiateur, avec un indice radiatif de 0,8. La puissance de chauffage est définie comme illimitée dans les simulations TRNSYS, ce qui permet de calculer les besoins réels du bâtiment sans qu'ils soient potentiellement bridés par une puissance maximale.

Les températures de consigne ont été déterminées à 20 °C en présence d'occupants et 17 °C lorsque le bâtiment est inoccupé. La simplification du zonage fait que plusieurs types de pièces se verront imposer les mêmes conditions thermiques. Cependant, leurs besoins ne sont pas toujours les mêmes, comme une salle de bain qui, par moments, va nécessiter une température plus élevée que 20 °C, ou une chambre, un peu moins élevée. La température de 17 °C quand les occupants ne sont pas dans le bâtiment a été choisie de manière arbitraire, sans que cela soit trop bas pour les relances, mais ni trop haut pour éviter une surconsommation inutile.

f) Le confort

La notion de confort n'est pas prise en compte dans ce travail.

g) Les gains

Les gains internes se répartissent en deux catégories :

- **Gains humains :** Les valeurs sont issues de la base de données TRNSYS et basées sur la norme EN13779 pour un niveau d'activité sédentaire dans un environnement à 20 °C. Ces gains sont fonction des schedules d'occupation des différentes zones.
- **Gains des équipements électriques :** Les valeurs de puissance sont détaillées dans la section suivante. Les apports radiatifs et convectifs sont issus des bases de données TRNSYS, avec un rapport constant de 80 % d'énergie convective et 20 % radiative. Chaque équipement dispose d'un schedule spécifique, et leur emplacement a été déterminé selon leur utilisation. Les données des apports radiatifs et convectifs sont disponibles en Annexe 4.

4.1.2.4 La simulation via Simulation Studio

a) Environnement de simulation

Pour simuler la consommation de chauffage, le logiciel Simulation Studio de TRNSYS a été utilisé afin de réaliser une simulation dynamique. Le type principal utilisé est le Type 56, appelé "Building" (Figure 25).

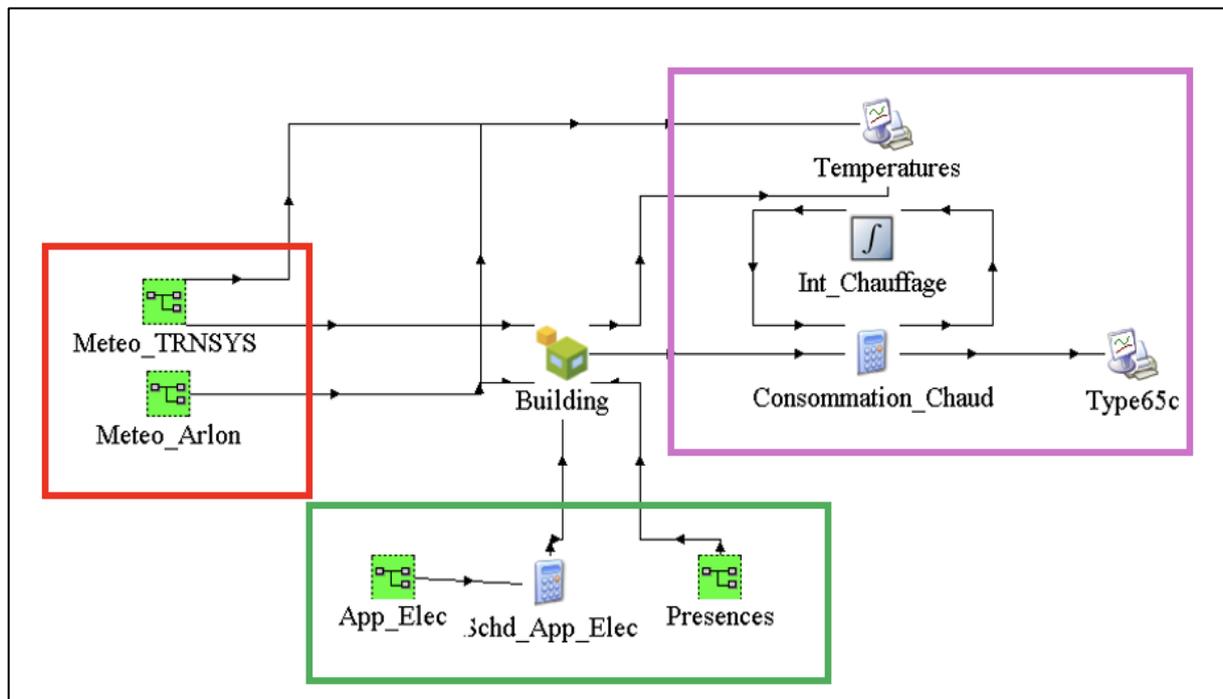


Figure 25 : Environnement de simulation sur Simulation Studio

On peut distinguer 3 sections sur la Figure 25ci-dessus. Une première en rouge (à gauche) qui représente les types météo. Une donnée de météonormes a été utilisée pour la réflectance du

sol, cette donnée vient de l'ensemble « Meteo_TRNSYS ». Le reste des données météo viennent d'un autre ensemble « Meteo_Arlon » qui prend en compte des données météo externes via le Type 9e. Les Types 33e, 69b et 16c y sont associés afin d'extraire des données de température du ciel ou d'angle solaire par rapport au zénith. La deuxième section, en vert (au milieu), est la partie des schedules. Elle envoie toutes les données de schedules de présences ou de gain des appareils électriques. Des calculateurs et les Types 14h et 41a ont été utilisés. Pour finir la section rose (à droite) est la partie d'agrégations, calculs et visualisation des résultats. Un calculateur, un intégrateur (Type 24) et le Type 65c pour visualiser et extraire les résultats ont été utilisés.

Pour finir les paramètres de simulations utilisés sont :

- Durée de la simulation : 8760 h (année complète).
- Pas de temps : 5 minutes.

4.1.3 La consommation énergétique des équipements électriques

La consommation électrique des équipements des bâtiments est l'une des consommations avec le plus de paramètres à prendre en compte. Chaque équipement électrique a ses spécificités comme mentionnée dans la revue littéraire. Cette étude ne va pas analyser tous les appareils électroniques présents dans un ménage Wallon. La consommation type va se faire sur une semaine qui sera répétée 52 fois pour atteindre une année complète. Puisque le modèle est déterministe, en fonction des caractéristiques données, on peut facilement calculer la consommation annuelle de chaque équipement.

L'énergie d'un appareil i_1 sur une semaine ($E_{i_1 sem}$) est la puissance de l'appareil (P_{i_1}) multiplié par la fréquence d'utilisation durant la semaine ($F_{i_1 sem}$) et de la durée d'utilisation pour chaque cycle ($D_{i_1 cycle}$) (7). La fréquence et la durée représentent le temps de la formule ($E = P*t$ où $t = F*D$).

$$E_{i_1 sem.} = P_{i_1} * F_{i_1 sem.} * D_{i_1 cycle} \quad (7)$$

L'énergie annuelle d'un appareil i_1 ($E_{i_1 an}$) est l'énergie consommée en une semaine multipliée par les 52 semaines d'une année (8).

$$E_{i_1 an.} = E_{i_1 sem.} * 52 \quad (8)$$

L'énergie totale de la consommation énergétique des appareils $i_{1,x}$ ($E_{tot an.}$) est donc l'addition de la consommation énergétique annuelle de chaque appareil (9).

$$E_{tot an.} = E_{i1 an.} + E_{i2 an.} + E_{i3 an.} + \dots + E_{ix an.} \quad (9)$$

4.1.3.1 Les équipements choisis pour l'études

a) Les appareils continus

Les appareils continus sont des appareils qui fonctionnent de manière constante toute l'année à la même puissance. Cette catégorie inclut des petits appareils ayant peu d'influence sur la consommation finale en raison de leur faible puissance, comme un téléphone fixe. Ces appareils ont été exclus des autres catégories en raison de leur faible impact. Étant donné qu'ils fonctionnent en continu, ils sont simples à analyser dans ce cas de figure. Tableau 7 présente les appareils continus analysés, avec leurs caractéristiques de puissance et l'énergie théorique annuelle. La puissance de veille est estimée à une consommation continue de 15 W pour des appareils non définis.

Nom	Puissance (W)	Energie annuelle théorique (kwh)
Frigo	17	150
Congélateur	23	250
Box Wifi	10	90
box TV	6	50
Téléphone fixe	2	20
Radio réveil	5	40
Veilles	15	125

Tableau 7 : Appareils continus avec leurs caractéristiques

b) Les appareils par catégories

Les catégories sont celles mentionnées dans la section 3.3.3.1b) « Catégorisation des équipements électriques ». Les catégories incluent le Lavage, la Cuisine, le Multimédia, et l'Hygiène. Ces catégories regroupent des appareils qui ont des cycles définis avec un début et une fin. Certains sont utilisables uniquement en présence des occupants, tandis que d'autres, comme certains appareils de lavage (lave-vaisselle, lave-linge, et sèche-linge), sont programmables. Certains appareils, comme le grille-pain, sont associés à des moments précis de la journée, comme le petit déjeuner. D'autres peuvent être programmés et n'ont pas de moment spécifique pour leur utilisation. Certains appareils sont utilisés quotidiennement, tandis que d'autres ne le sont pas. Le Tableau 8 montre les différents équipements choisis pour la simulation par catégorie avec leur puissance, énergie théorique annuelle, fréquence et durée de cycle.

Catégorie	Nom	Puissance (W)	Energie annuelle théorique (kwh)	Fréquence	Durée d'un cycle
Lavage	Lave-vaisselle	800	250	4/sem.	1h30
	Lave linge	600	200	4/sem.	1h30
	Sèche	1200	250	2/sem.	2h
	Aspirateur	800	80	4/sem.	30min
	Fer à repasser	900	75	2/sem.	45min
Cuisine	Cafetière	1000	30	365 j.	5min
	Bouilloire	1500	45	365 j.	5min
	Grille pain	1000	30	365 j.	5min
	Mirco-onde	800	60	9/sem.	10
	Taque électrique	900	250	365 j.	45min
	hotte	75	25	365 j.	45min
	Four	1000	150	3/sem.	1h
Multimédia	Télévision	100	150	365 j.	4h
	Ordinateur fixe	75	120	365 j.	4h
	Console de jeux	120	84	365 j.	2h
Hygiène	Sèche cheveux	800	25	365 j.	5min

Tableau 8 : Appareils électroniques par catégories d'activité

c) Les luminaires

L'utilisation des luminaires dépend de la surface et de la présence des occupants. Ce ne sont donc pas des équipements continus, ni des appareils avec des cycles bien distincts. La présence des occupants dans les différents étages a été définie précédemment dans la section section 4.1.2.3b), « Les schedules occupation ». La puissance surfacique d'éclairage a été définie à 6 W/m², en fonction d'un rapport de Bruxelles Environnement de 2010, qui estime qu'une valeur d'environ 10 W/m² est suffisante pour un bureau, et que les logements ont des besoins moindres [78]. De plus, un rapport publié en 2011 par le Centre scientifique et technique de la construction (CSTC), maintenant appelé Buildwise, indique qu'une puissance d'éclairage comprise entre 4 et 6 W/m² est acceptable pour des immeubles résidentiels [79].

En multipliant les surfaces des deux zones habitables par la puissance surfacique déterminée on tombe sur les valeurs de puissance installée. Comme dit plus tôt, les luminaires sont fonction de l'occupation. Cependant, cette occupation n'est jamais complète. Une valeur de 30% (x) de l'espace constamment quand la zone est occupée. Donc pour la puissance d'éclairage du rez-de-chaussée (P_{lumRDC}), elle est la multiplication de la puissance surfacique (P_{surf}), de la surface de la zone (S_{RDC}) et du facteur de réduction d'occupation réelle (x) (10).

$$P_{lum. rdc} = P_{surf.} * S_{rdc} * x = 6 * 68,85 * 0,3 = 137,7 W \quad (10)$$

La puissance d'éclairage du rez-de-chaussée est de 137,7 W et pour l'étage il se trouve à 154,7W.

d) Les autres appareils

Les autres appareils continus sont des petits appareils non mentionnés dans cette étude, qui peuvent être placés dans la catégorie « faible puissance et faible consommation énergétique ». Par exemple, une chaîne hi-fi, un lecteur DVD, un chargeur de rasoir électrique, un chargeur de brosse à dents électrique, une imprimante, un chargeur de téléphone, etc. Il a été déterminé que l'ensemble de ces appareils correspond à 50 W et qu'ils fonctionnent en fonction de la présence. Ces appareils ne sont pas spécifiquement définis, mais il est supposé qu'un ensemble de petits appareils électroniques consomme 50 W lorsque le bâtiment est occupé.

e) La voiture électrique

La consommation énergétique d'une voiture électrique est attribuée lors de la recharge, et non en fonction de l'utilisation du véhicule. Le nombre de kilomètres quotidiens a été estimé à 35 km, soit 12 775 km annuels. La consommation moyenne d'une voiture électrique est de 19,4 kWh/100 km, ce qui correspond à une énergie consommée de 6,79 kWh par jour. Il est supposé que les occupants rechargent leur voiture juste assez chaque jour. De plus, la recharge se fait la nuit pour bénéficier de coûts plus faibles et éviter l'engorgement du réseau électrique en soirée. Avec une puissance de charge moyenne de 1,9 kW, le temps de charge est estimé à environ 3h35.

4.1.3.2 Les équipements tout au long de la journée

Certains équipements sont associés à un moment précis de la journée. Une journée peut être découpée en plusieurs activités, comme le montre la Figure 18. Le Tableau 9 présente un ensemble d'activités avec leurs heures de début et de fin durant la semaine et le week-end. Pour chaque activité, une heure est associée. Cependant, certaines activités, comme l'activité «Autre», regroupent les petits appareils électroménagers non définis, tandis que d'autres, comme les équipements de nettoyage du linge ou de la vaisselle, n'ont pas de période spécifique. La consommation de ces équipements a été définie de manière empirique. En bas du tableau, deux catégories supplémentaires sont incluses : l'éclairage et l'électromobilité. Ces catégories ne sont pas des activités à proprement parler, mais sont incluses pour regrouper l'ensemble des éléments. L'éclairage est fonction de la présence, tandis que l'électromobilité se fait durant la nuit pour la recharge de la voiture.

Activités	Semaine	Weekend	Appareils associés
Sommeil	23h00 - 07h00	00h00 - 08h00	-
Petit déjeuner	07h15 - 07h45	08h15 - 08h45	Cafetière, Bouilloire, Grille pain
Diner	-	12h00 - 13h00	Micro-onde, Four
Souper	19h00 - 20h00	19h00 - 20h00	Micro-onde, Taque, Hotte, Four
Douche/soins	07h00 - 07h15 et 18h00 - 18h15	08h00 - 08h15 et 18h00 - 18h15	Sèche cheveux
Multimédia	18h00 - 23h00	18h00 - 23h00	Télévision, Ordinateur, Console
Nettoyage maison	18h30 - 19h00	11h00 - 11h30	Aspirateur
Nettoyage linge	non défini	non défini	Lave linge, Sèche linge
Nettoyage vaisselle	non défini	non défini	Lave vaisselle
Autres	Présence	Présence	Petits électro non def.
Eclairage	Présence	Présence	Luminaire
Electromobilité	00h00 - 3h30	00h00 - 3h35	Voiture électrique

Tableau 9 : Activités définissables durant une journée, leurs horaires d'exécution et les appareils électriques associés

4.1.3.3 Les simplifications

La saisonnalité n'est pas prise en compte pour chaque équipement, par exemple, l'utilisation des luminaires en fonction de la luminosité extérieure. La Figure 26 montre le nombre d'heures d'utilisation de l'éclairage pour les hébergements montre le nombre d'heures d'utilisation de l'éclairage pour les logements tout au long de l'année. On observe une variation saisonnière marquée, avec une utilisation plus élevée en hiver et plus faible en été. Cette variation est due à la variabilité de la durée de la lumière naturelle au cours de l'année : en hiver, les jours sont plus courts, nécessitant un recours accru à l'éclairage artificiel, tandis qu'en été, la lumière naturelle plus abondante réduit ce besoin. Finalement, une valeur moyenne a été déterminée : à certains moments de l'année, l'éclairage consommera plus et à d'autres moins, mais la consommation restera relativement similaire. De plus, la saisonnalité affecte non seulement les équipements, mais aussi le comportement des occupants. Aucune variation entre les semaines n'a été prise en compte, une semaine type a été déterminée et multipliée 52 fois pour représenter une année complète. Un autre point de simplification concerne la variation de charge. Comme pour l'éclairage, ce sont des valeurs moyennes et constantes qui ont été prises en compte. D'autres simplifications incluent la non prise en compte des pertes du réseau, des pertes de la batterie de la voiture électrique, une analyse peu détaillée des appareils non définis ou des appareils en veille, etc

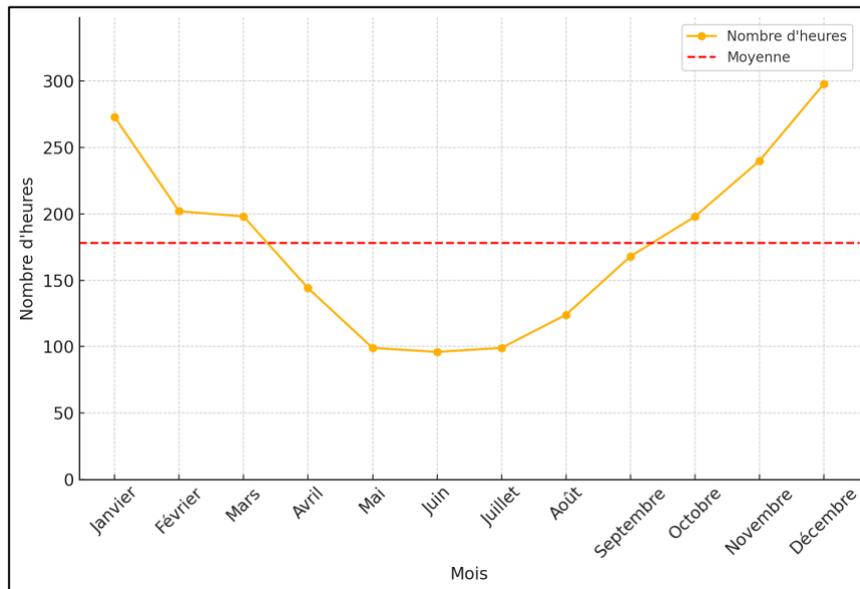


Figure 26 : Nombre d'heure d'utilisation de l'éclairage pour les hébergements [77]

4.1.3.4 La simulation sous Excel

La simulation sous Excel s'est déroulée en deux étapes : d'abord, l'établissement des schedules d'activation des différents équipements, puis la détermination d'une courbe de charge sur une période d'une semaine, avec un pas de temps de 5 minutes. Les schedules complets sont disponibles en Annexe 5. La semaine compte ainsi 2016 pas de temps. Les horaires ont été déterminés manuellement en hh:mm puis convertis en pas de temps correspondant dans la semaine. Ensuite, la puissance appelée est mise pour chaque pas de temps activé ce qui donne une courbe de consommation hebdomadaire qui est itérée 52 fois pour en faire une année.

4.1.4 La consommation en eau chaude sanitaire

4.1.4.1 L'installation choisie

L'installation d'eau chaude sanitaire se compose d'un chauffe-eau électrique séparé du système de chauffage central, permettant de différencier les deux systèmes et d'intégrer plus facilement la demande énergétique de l'ECS. La simulation est réalisée sous TRNSYS pour une plus grande flexibilité. Les données relatives à l'eau froide provenant de l'extérieur et aux températures de la pièce où se trouve le ballon de stockage sont issues de TRNSYS et de la simulation de la consommation de chauffage effectuée précédemment.

4.1.4.2 La consommation d'ECS en litres

La consommation volumique est issue de deux types de sorties d'ECS. Tout d'abord, les douches, au nombre de deux par jour (une pour chaque personne), qui consomment 50 litres par douche, avec une durée d'un pas de temps de 5 minutes chacune. Ensuite, les robinets, au

nombre de deux (cuisine et salle de bain), utilisés chacun deux fois par jour. Le robinet de la salle de bain est utilisé lors des douches du matin et du soir, tandis que le robinet de la cuisine est utilisé lors des repas (petit déjeuner et souper). Chaque utilisation consomme 5 litres d'eau et dure un pas de temps de 5 minutes. Au final, la consommation volumique annuelle d'eau chaude sanitaire équivaut à 43,6 m³.

4.1.4.3 Le ballon de stockage

Le ballon de stockage est un élément assez simple car c'est une cuve se composant d'un résistance électrique. Il aurait pu être modélisé sur TRNSYS mais pour les raisons expliqués juste avant, il a été défini sur Excel. Le ballon choisi est un équipement de la marque allemande Vaillant. Ils sont spécialisés dans les systèmes de chauffage et ce type d'appareil se vend en Belgique comme le montre la fiche technique utilisée [80]. Le modèle spécifique est VIH R 150 B avec une capacité de 144 litres. La fiche produit est disponible en Annexe 7. Le Tableau 10 montre les caractéristiques choisies pour le ballon de stockage d'eau chaude sanitaire.

Caractéristique	Valeur
Capacité utile (l)	144
Hauteur (mm)	1.206
Diamètre (mm)	590
épaisseur isolant PUR (m)	0,11
Surface totale sans isolant(m2)	1,849
Coef convection thermique int (m2K/W)	0,003
Coef convection thermique ext (m2K/W)	0,125
Facteur de correction déperdition (IEASHC2007)	1,91
Coefficient transfert thermique corrigé (W/m2K)	0,552
Tmin ballon (°C)	55
Tmax ballon (°C)	80
Puissance résistance (W)	2000
Rendement résistance	100%

Tableau 10 : Caractéristique du ballon d'eau chaude sanitaire

Le coefficient de transfert thermique, U_{ball} , a été calculé selon les dimensions du ballon, l'épaisseur et le type d'isolant, e_{PUR} et λ_{PUR} , des coefficient de convection thermiques intérieur h_{int} et extérieur h_{ext} et un facteur de correction (x) issu de la norme IEA SHC2007 (11). Le coefficient de transfert thermique corrigé est de 0,552 W/m²K.

$$U_{Ball} = \left(\frac{1}{\left(\frac{\lambda_{PUR}}{e_{PUR}} \right) + h_{int} + h_{ext}} \right) * x = \left(\frac{1}{\left(\frac{0,03}{0,11} \right) + 0,003 + 0,125} \right) * 1,91 = 0,552 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11)$$

Quelques caractéristiques à prendre en compte ont été déterminées :

- Température initiale de l'eau dans le ballon pour la simulation : 55°C.
- Température minimale du ballon : 55°C ; Température maximale : 80°C.
- Puissance de la résistance électrique : 2000 W.
- Possibilité de décharge complète du ballon.
- Emplacement : zone "Étage".

4.1.4.4 La simulation sous Excel

La simulation de la consommation énergétique de l'eau chaude sanitaire a été effectuée sous Excel. Il est important de distinguer la consommation énergétique de la consommation d'ECS proprement dite, car l'énergie est fournie au ballon de stockage, et c'est cet élément qui consomme l'électricité. Bien que la consommation du ballon soit corrélée à celle de l'eau chaude, le ballon peut fonctionner à tout moment de la journée. On peut faire une analogie avec la voiture électrique, où la consommation énergétique se produit lors de la recharge. Cependant, contrairement à la voiture, le ballon reste constamment dans le bâtiment, il n'y a donc pas de facteur de présence à prendre en compte.

a) L'énergie stockée et consommée

Pour ce faire, le ballon doit être vu comme une « batterie d'eau », à l'image de la batterie de la voiture électrique. L'eau ayant une certaine chaleur calorifique (C_{eau}) (définie à 4186 J/kgK), il est possible de calculer une quantité d'énergie pour un volume donnée. Un certain volume d'eau (V_{Ball}) à une température chaude (t_c) par rapport à une température froide (t_f) contient une certaine quantité d'énergie (E_{Ball}). Tout comme la consommation en litre d'ECS (V_{ECS}) à une certaine température (t_{ECS}) par rapport à une température froide (t_f) équivaut à une quantité d'énergie. La différence entre l'énergie stockée et l'énergie consommée détermine l'énergie restante dans le ballon au pas de temps suivant (12)(13).

$$E_{Ball} = V_{Ball} * C_{p\ eau} * (t_c - t_f) \quad (12)$$

$$E_{ECS} = V_{ECS} * C_{p\ eau} * (t_{Ball} - t_f) \quad (13)$$

La température froide (t_f) est issue des données Météonorme de Uccle extraite avec le logiciel TRNSYS et plus particulièrement le Type 15-6. La température équivaut à la moyenne de la température de l'eau tout au long de l'année. La température d'entrée dans le ballon d'eau de stockage vaut 10,3 °C.

Avec cette donnée et les équations ci-dessus (12)(13), on peut calculer la quantité d'énergie maximale à 80°C ($E_{\max \text{ Ball}}$) et minimale à 55°C du ballon ($E_{\min \text{ Ball}}$). La quantité d'énergie maximale vaut 11,67 kWh et minimale 7,484 kWh.

b) Les pertes par déperditions

A la consommation d'ECS, il faut ajouter la consommation du au pertes du ballon de stockage. Dans la partie précédente, la valeur du coefficient de transfert a été calculée (U_{Ball}) . Cette dernière multipliée par la surface de déperdition (S_{Ball}) et la différence de température de l'eau à l'intérieur du ballon (t_{Ball}) et la température de l'environnement (t_{Etage}) donne la quantité d'énergie perdue. La température de l'environnement de la zone de l'étage a été récupérée de la simulation de chauffage sous TRNSYS avec Simulation Studio. La température de l'étage correspond à la température moyenne de la zone durant l'année, elle correspond à 20,8 °C. L'équation suivante détermine la perte énergétique durant un pas de temps de 5 minutes avec la température de l'eau du ballon de départ qui équivaut à 55°C (14).

$$E_{\text{Pertes ball 55}} = \frac{U_{\text{Ball}} * S_{\text{Ball}} * (t_{\text{Ball}} - t_{\text{Etage}})}{12} = \frac{0,552 * 1,849 * (55 - 20,8)}{12} = 2,9 \text{ W/h} \quad (14)$$

La consommation énergétique de l'eau chaude sanitaire additionnée aux pertes de déperditions thermiques du ballon, on trouve la consommation totale d'eau chaude sanitaire.

c) La recharge du ballon de stockage

La recharge du ballon de stockage est la réelle consommation énergétique finale. Dans ce cas de figure plusieurs conditions sont à prendre en compte :

- La température minimale est de 55°C. Ce qui veut dire que si la quantité d'énergie descend en dessous de 7,484 kWh, la résistance s'active jusque quand l'énergie remonte au-dessus de ce seuil limite.
- Lors de l'activation de la résistance, elle fonctionne à 100% soit 2000 W et avec un rendement de 100%.
- Un déséquilibre (E_{Des}) est créé additionnant toutes les pertes mais aussi les apports énergétiques de la résistance (E_{Res}). Un déséquilibre positif correspond à une perte et négatif à un apport énergétique dans le ballon de stockage (15).

$$E_{\text{Des}} = E_{\text{ECS}} + E_{\text{Pertes Ball}} - E_{\text{Res}} \quad (15)$$

- L'énergie au pas de temps ($E_{Ball t}$) dans le ballon correspond à l'énergie au pas de temps précédent ($E_{Ball t-1}$) moins le déséquilibre (E_{Des}) (16).

$$E_{Ball t} = E_{Ball t-1} - E_{Des t} \quad (16)$$

4.2 L'optimisation du modèle de consommation

4.2.1 La production photovoltaïque

Une production solaire a été déterminée pour confronter la consommation énergétique estimée. Le panneau photovoltaïque choisi est un modèle polycristallin SunModule, d'une puissance de 240 W par panneau. Après avoir testé différentes configurations sur la toiture (via SketchUp), il a été conclu que l'installation optimale est de 18 panneaux (2 séries de 9), soit un total de 4,32 kilowatts-crête (kWc).

Les données de production TRNSYS ont été préférées à celles de PVGIS en raison de leur proximité avec la valeur théorique de 950 kWh/kWc. Théoriquement, cela équivaut à 4 100 kWh de production annuelle, tandis que PVGIS estime un potentiel de 4 200 kWh, proche de la valeur théorique. Cependant, les données horaires de PVGIS indiquent 4 500 kWh, ce qui, bien que plus élevé, peut-être moins stable sur du pas de temps horaire utilisé. Étant donné le pas de temps utilisé, les données TRNSYS, qui montrent une production annuelle de 3 900 kWh avec un pas de 5 minutes, ont été retenues.

4.2.2 Détermination des charges modulables

Afin de pouvoir optimiser la charge en la déplaçant, il faut connaître les consommations pouvant être influencées. Étant donné que les occupants ne changent pas leurs habitudes, un certain nombre d'appareils ne vont pas pouvoir être modulables. D'autre part, certains appareils peuvent être modulés comme des appareils potentiellement programmables ou contrôlés par un système externe sans exercer une grande influence sur les habitudes de consommation des occupants. L'électromobilité et la consommation d'ECS ont une particularité. Ces deux consommations ne sont pas forcément corrélées avec une action d'un occupant, la consommation est la recharge d'une batterie électrique et d'une « batterie d'eau ».

- **Les équipements**

Parmi les équipements électriques, on peut les différencier en 2 catégories. Les équipements dits « statiques ». Leur consommation ne varie pas par rapport à la modélisation de la charge. Cela concerne tout un tas d'équipements qui sont relatifs aux activités ou confort des occupants.

On peut citer les luminaires, les appareils continus, les appareils multimédias, le sèche-cheveux, les appareils de cuisine, les petits appareils non définis.

Les appareils dits « modulables ». Leur consommation finale ne varie pas, cependant, il peut y avoir une variation du moment de la consommation. Cette variation est appelée « déplacement de charge ». Ces types d'appareils concernent uniquement des appareils de la catégorie « lavage » tels que la machine à laver, le lave-linge et le sèche-linge. Il faut donc imaginer qu'à la normale l'occupant active la machine à laver à une certaine heure. L'action d'activation de la machine reste le même, mais le déclenchement réel se fait par le système de management de l'énergie en fonction des conditions météo futures, du stockage de la batterie, ...

Les équipements statiques représentent 2227 kWh d'énergie qui ne sont pas déplaçables. Et les équipements modulables représentent 686 kWh⁴.

- **La voiture électrique**

La voiture électrique représente à elle pratiquement 50 % de la consommation électrique des équipements soit 2478 kWh. La batterie de la voiture électrique se recharge uniquement quand il y a une présence dans la maison ce qui la différencie de la « batterie d'eau ». Contrairement à la courbe de charge du modèle de consommation, la charge de la voiture électrique peut s'effectuer sans qu'elle soit à pleine puissance.

- **L'eau chaude sanitaire**

La consommation de l'eau chaude sanitaire représente environ 1850 kWh par an. Contrairement à la voiture, le ballon peut se recharger à n'importe quel moment de la journée. Mais comme point de similarité, la puissance entrante n'est pas obligée d'être à 100%.

4.2.3 La modulation de la charge

Cette partie explique les conditions mises en place afin d'arriver à maximiser l'autoconsommation. Le modèle fonctionne principalement avec ce que l'on peut appeler le « Déséquilibre énergétique » (D). Il consiste à calculer ce qui reste de la production PV ou du manque d'énergie par rapport à la consommation pour un pas de temps. Le déséquilibre est négatif s'il y a un surplus de production PV et à l'inverse positif si il manque de l'énergie. Ainsi la modulation de charge est un grand tableau de + et - calculant l'énergie en trop ou manquante.

⁴ Ces résultats tout comme ceux qui viendront à la page suivante sont issus de la simulation du modèle de consommation visibles dans la partie «Résultats »

4.2.3.1 Sans modulation

Une première simulation est effectuée sans modulation. Aucune modification n'a été apportée aux différentes courbes de consommation des équipements électriques, voiture électrique ni d'ECS. Il y a donc uniquement une comparaison entre la production photovoltaïque ($P_{PV t}$) et la consommation électrique ($P_{tot t}$) pour un pas de temps t . A la fin de cette simulation, un déséquilibre ($D_{tot t}$) est calculé, il permet directement de savoir ce qui est pris ou donné au réseau (17).

$$D_{tot t} = P_{tot t} - P_{PV t} \quad (17)$$

4.2.3.2 Les conditions

Les premières modulations sont faites sans batteries de stockage intégrées aux systèmes. Dans cette partie, les différentes consommations vont être séparées en plusieurs catégories de consommation :

- Les équipements électriques : statique + modulable + voiture électrique (P_{eq}).
- L'eau chaude sanitaire ($P_{ECS mod}$).
- Les équipements statiques ($P_{Stat mod}$).
- Les équipements modulables ($P_{Mod mod}$).
- La voiture électrique ($P_{VE mod}$).

Ces catégories vont avoir chacune leurs propres conditions tout en ayant la même base qui est le « déséquilibre ». Chaque catégorie peut être mise en simulation avec une autre. Il est possible de faire varier la priorité des catégories.

a) Les équipements statiques et électriques

Sur cette catégorie, il n'y a pas de modulation, car on y intègre les équipements statiques. La consommation sera comparée soit directement à la production photovoltaïque, tout comme dans la section « Sans modulation ». Soit avec le déséquilibre précédent et la production PV restante suite à consommation précédente.

b) L'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire offre des possibilités de modulation. Lors de l'élaboration de la courbe de consommation énergétique, cette dernière était relativement autonome par rapport aux autres types de consommation. Cela s'explique par le fait qu'elle n'est pas totalement fixe : elle n'est pas contrainte par une consommation directe et répond à des conditions spécifiques, telles que

le maintien d'une température minimale de 55°C. De plus, elle peut varier en fonction des pertes thermiques du ballon de stockage.

Pour simplifier le modèle d'optimisation, ces pertes ont été considérées comme constantes, en se basant sur une estimation moyenne de 34,92 W. Cette valeur représente les pertes thermiques quotidiennes du ballon observées dans la courbe de consommation établie précédemment.

Par ailleurs, la consommation volumique d'eau chaude sanitaire à 40°C reste inchangée. Elle est fixée à 60 litres par personne et par jour, ce qui en fait un paramètre constant dans le calcul. Connaissant cette donnée et les pertes de déperditions, il est alors possible de déterminer précisément les besoins journaliers en eau chaude sanitaire pour le ballon.

Le but de l'apport énergétique photovoltaïque n'est pas de consommer un maximum d'énergie jusqu'à arriver à la température maximale du ballon à savoir 80°C. Cela pourrait faire augmenter les résultats d'autoconsommation, mais l'énergie serait mal utilisée et donc ne serait pas dans la lignée des principes des systèmes de management de l'énergie. Connaissant les apports journaliers, on peut donc restreindre l'apport dès que l'objectif journalier est rempli. De plus l'apport énergétique peut venir du réseau, cela va servir à conserver la première condition, à savoir rester au minimum à 55°C.

Pour résumer, les conditions mises en place sont :

- Check des besoins journaliers (120 L à 40°C + les pertes équivaut \pm à 5 kWh).
- Check de l'apport journalier des PV par rapport aux besoins.
- Apport des PV sans dépasser l'apport journalier ni la puissance maximale de résistance de 2000 W.
- L'énergie manquante vient du réseau en plus de vérifier que la température ne descend pas en dessous de 55°C.

c) La voiture électrique

La voiture électrique fonctionne de manière relativement similaire à l'eau chaude sanitaire. Cependant la batterie n'a pas forcément d'importance dans ce cas-là. Contrairement au ballon d'eau chaude sanitaire qui peut aller sous son seuil limite de 55°C, la batterie d'une voiture électrique à un seuil zéro. De plus, la valeur de la batterie moyenne vue dans la revue de littérature à la section « Consommation moyenne d'une voiture électrique » qui équivaut à 76 kWh semble très grand par rapport à l'usage que l'on fait dans ce modèle. C'est pourquoi il a été décidé que la « batterie » ne serait pas prise en compte mais qu'il faut s'imaginer les besoins

qu'elle a quotidiennement. Les besoins quotidien équivalent à 6,79 kWh par jour. De plus la charge de la batterie reste à 1,9 kW ce qui pourrait correspondre à une prise réseau.

Un autre point à prendre en compte dans la modulation de charge de la voiture électrique est que la charge ne peut se faire uniquement quand il y a une présence dans l'habitat. Pourtant, la production photovoltaïque est principalement en journée. Il faut donc mettre des conditions pour prioriser la production solaire avant d'avoir un apport énergétique venant du réseau d'électricité.

Maintenant que cette valeur de besoin est établie, on peut évaluer le potentiel quotidien de la production solaire en fonction de la présence et sans dépasser la puissance maximale de charge de la batterie. Pour l'apport du réseau, un manque énergétique est calculé à partir du potentiel de quotidien des PV, cela donne une énergie quotidienne à amener. L'apport énergétique du réseau afin de recharger le véhicule électrique se fait durant la nuit comme durant l'établissement de la courbe énergétique.

Pour résumer, les conditions mises en place sont :

- Check de la présence dans le bâtiment.
- Check des besoins journaliers (6,79 kWh).
- Check de l'apport journalier des PV par rapport aux besoins.
- Apport des PV sans dépasser l'apport journalier ni la puissance maximale de charge, 1900 W.
- Check de l'apport journalier du réseau par rapport au manque de l'apport journalier des PV.
- Apport du réseau sans dépasser l'apport journalier.

d) Les équipements modulables

Les équipements modulables ont certaines particularités par rapport à la consommation d'eau chaude sanitaire et de la voiture électrique. Ces équipements fonctionnent en cycle, ce qui veut dire que quand on lance un cycle il ne s'arrête plus. Cela demande donc des conditions supplémentaires afin d'assouvir une certaine puissance durant la durée du cycle de l'équipement modulable. Le lave-vaisselle, lave-linge et le séchoir, ont des cycles qui durent respectivement, 1h30, 1h30 et 2h. De plus, ils ne fonctionnent pas tous les jours et par rapport à la courbe de consommation déterminée, ils ont un seul cycle par jour.

Afin de permettre l'activation d'un équipement modulable, il faut passer plusieurs conditions. Tout d'abords, si l'équipement fonctionne ce jour-là. Cela donnera un schedule des jours

d'activation. Dans la réalité, cette condition reviendrait à dire que les occupants appuient sur la machine pour lancer un cycle mais c'est le système EMS qui ordonne le démarrage en fonction du potentiel de production photovoltaïque. Le système peut décider de la rigueur de l'apport des PV. Il peut actionner l'apport photovoltaïque s'il remplit un certain pourcentage par rapport à la consommation totale d'un cycle. Le reste sera apporté par le réseau électrique. Si les conditions ne sont pas remplies, l'apport externe peut s'exercer à une heure déterminée.

Pour résumer, les conditions mises en place sont :

- Check si l'équipement s'active durant la journée
- Check de l'apport journalier à fournir (à savoir l'équivalent d'un cycle)
- Check d'activation durant la durée d'un cycle

4.2.4 Les simulations sous Excel

a) Sans modulation

Ces simulations ont donc été effectuées sans condition particulière. Il y a donc juste une comparaison entre la production photovoltaïque et la consommation électrique. Plusieurs simulations ont été effectuées afin d'avoir des valeurs de référence pour l'optimisation de la charge. Ces simulations sont numérotées et sont faites sur les catégories suivantes :

1. Tous les équipements + l'eau chaude sanitaire + Voiture électrique
2. Tous les équipements
3. Les équipements statiques
4. Les équipements modulables
5. L'eau chaude sanitaire
6. Voiture électrique

b) Avec modulation

La modulation s'est donc faite à partir des conditions énoncées précédemment. Il y aura plusieurs catégories qui vont se succéder et prendre une part de l'énergie potentielle journalière des PV. Cependant, en fonction de l'ordre de priorité des catégories par rapport à l'apport photovoltaïque, il est probable qu'il y a des résultats différents. Les simulations sont citées ci-dessous en citant les catégories de gauche à droite en fonction de leur l'ordre de priorité choisi :

7. Tous les équipements + VE → ECS

8. Tous les équipements → l'eau chaude sanitaire → Voiture électrique

9. Tous les équipements → Voiture électrique → ECS

10. Les équipements statiques → Les équipements modulables → ECS → Voiture électrique

5. Résultats

5.1 Résultats de consommation énergétique du bâtiment

5.1.1 La consommation en chauffage

a) Avec une puissance illimitée

La consommation de chauffage est l'addition de la demande énergétique des deux zones analysées durant la simulation (zone RDC et zone Étage). La Figure 27 montre la puissance appelée par le chauffage en kW durant une année soit 8760h. On peut voir distinctement les périodes chaudes où la puissance est quasi nulle et périodes froides avec des puissances élevées.

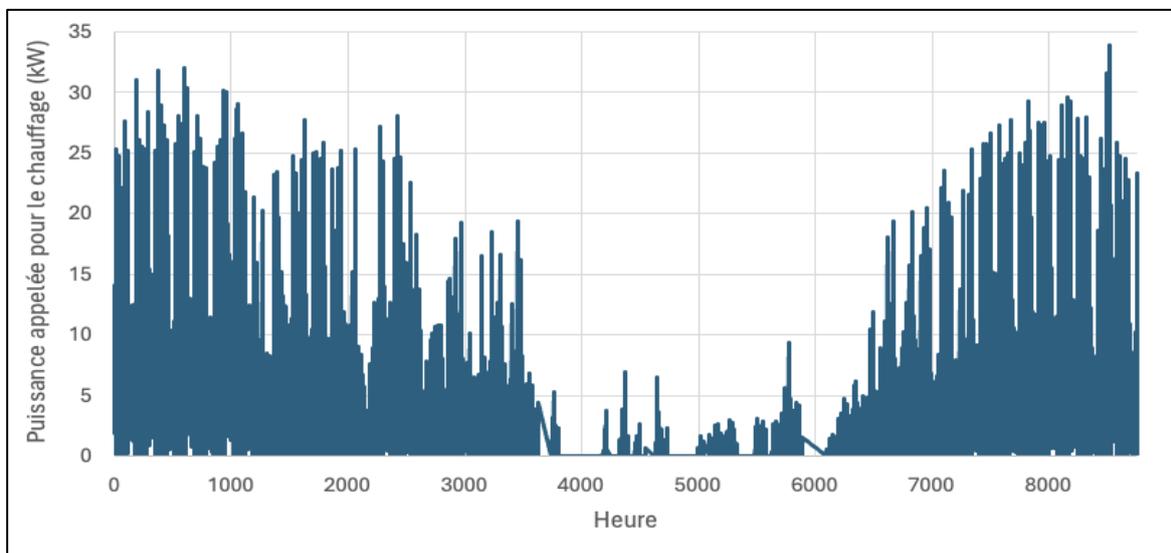


Figure 27 : Puissance appelée pour le chauffage en kW durant une année avec la puissance de chauffage illimitée

La puissance appelée est très élevée pour un immeuble résidentiel, plus de 30 kW. Cette anomalie est due à la puissance illimitée de chauffe permise dans les pièces habitables. Le but du modèle TRNSYS est d'atteindre la température de consigne le plus rapidement possible. Donc, dès qu'il y a une demande, la puissance s'active fortement et rapidement.

Cependant, la consommation annuelle et surfacique pour le chauffage semble tout à fait cohérente. La consommation surfacique du logement qui correspond le nombre de kWh par m² de surface équivaut à 178,22 m². Dans les données du COZEB [81], il est mentionné que la valeur calculée lors de leur étude est de 171 kWh/m². Il y a donc une différence d'environ 4%. On peut donc dire que la consommation énergétique finale correspond au bâtiment analysé. Mais, la courbe de consommation ne représente pas un usage réel d'un bâtiment résidentiel Wallon.

Energie totale consommée pour le chauffage (kWh)	Consommation surfacique annuelle de la maison (kWh/m ²)
26055,86	178,22

Tableau 11 : Energie totale consommée en kWh et la consommation surfacique en kWh/m² pour le chauffage de l'habitat analysé durant un an avec la puissance de chauffage illimitée

b) Avec une puissance limitée

Afin d'obtenir des données plus réalistes en termes de puissance appelée, la puissance de chauffage dans chaque pièce ont été fixé à 40W/m³. Cette valeur est déterminée par rapport à plusieurs types de littérature comme de la littérature non scientifique avec des documents d'entreprises ou sites spécialisés comme l'entreprise « confort sauter » [82] . Ce qui donne une puissance de 27 000 kJ/h pour le rez-de-chaussée et 28 000 kJ/h pour l'étage.

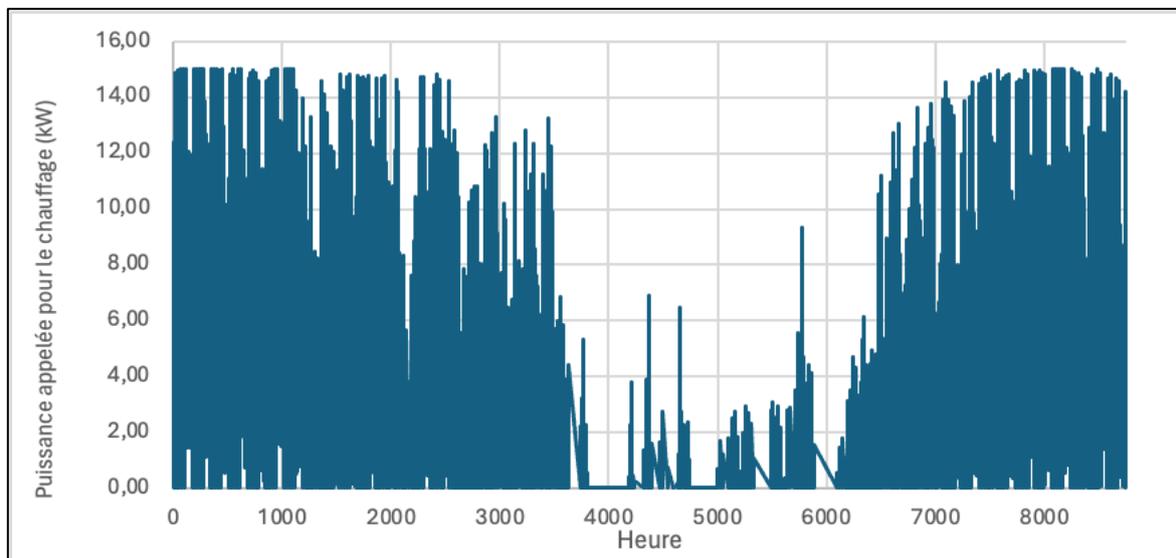


Figure 28 : Puissance appelée pour le chauffage en kW durant une année avec la puissance de chauffage limitée

La Figure 28 montre la puissance appelée pour le chauffage en kW tout au long de l'année avec le bridage de la puissance d'émission. Le graphique est relativement similaire à la Figure 27 avec les périodes chaudes et froides distinctes. Le Tableau 12 montre les résultats de cette nouvelle simulation. Ils sont aussi très similaires à ceux rencontrés dans le Tableau 11.

On peut donc conclure que cette courbe de consommation de chauffage est plus représentative du comportement de la demande. Pourtant, les puissances sont plus faibles et la consommation reste la même. Cela s'explique toujours par le comportement du modèle TRNSYS. Il va toujours vouloir tendre le plus rapidement possible vers les conditions de températures demandées. Avec une puissance plus faible, le chauffage va fonctionner plus longtemps. Une valeur permettant de démontrer ce phénomène est la puissance moyenne utilisée dans les 2 cas.

Pour la simulation avec puissance illimitée, elle est de 2,3 kWh durant tandis qu’avec le bridage, elle est de 6 kWh. Cela démontre que même si les pics de puissances sont plus élevés, le chauffage va fonctionner moins longtemps dans ce cas de figure.

Energie totale consommée pour le chauffage (kWh)	Consommation surfacique annuelle de la maison (kWh/m ²)
25948,63	177,49

Tableau 12 : Energie totale consommée en kWh et la consommation surfacique en kWh/m² pour le chauffage de l'habitat analysé durant un an avec la puissance de chauffage limitée

c) Les températures dans les pièces habitables

Même si les variables de confort ne sont pas analysées dans ce travail, la température dans les zones analysées permet d’avoir une idée globale du comportement du modèle. Ainsi, les températures des deux zones analysées tout au long de l’année sont mises en Annexe 8.

d) L’énergie consommée par la chaudière

L’énergie consommée par la chaudière n’est pas l’énergie apportée au système. En effet, une chaudière n’a pas une efficacité de 100 %, à part de manière théorique pour la chaudière à condensation. Le but de ce travail est d’établir une courbe de consommation de demande énergétique. L’énergie finale consommée ne sera pas la même si la source du chauffage est une pompe à chaleur ou une chaudière. Selon le site Energieplus, une bonne chaudière aurait un rendement d’environ 90% [83]. La consommation totale pour le chauffage passerait de 25 948 kWh à 28 831 kWh soit une augmentation de 11 %.

5.1.2 La consommation des équipements électriques

La consommation énergétique des équipements électriques correspond à la consommation finale en électricité consommée. Elle est aussi l’addition de toutes les consommations individuelles de chaque élément. La Figure 29 montre la puissance appelée en W par les équipements électriques durant toute une semaine. Cette courbe de charge est itérée 52 fois correspondant aux 52 semaines d’une année. Même si à certains moments, la courbe semble erratique, on peut apercevoir des patterns répétitifs. Ils sont représentés par des ovales sur le graphique. Voici l’explication de ces derniers de gauche à droite :

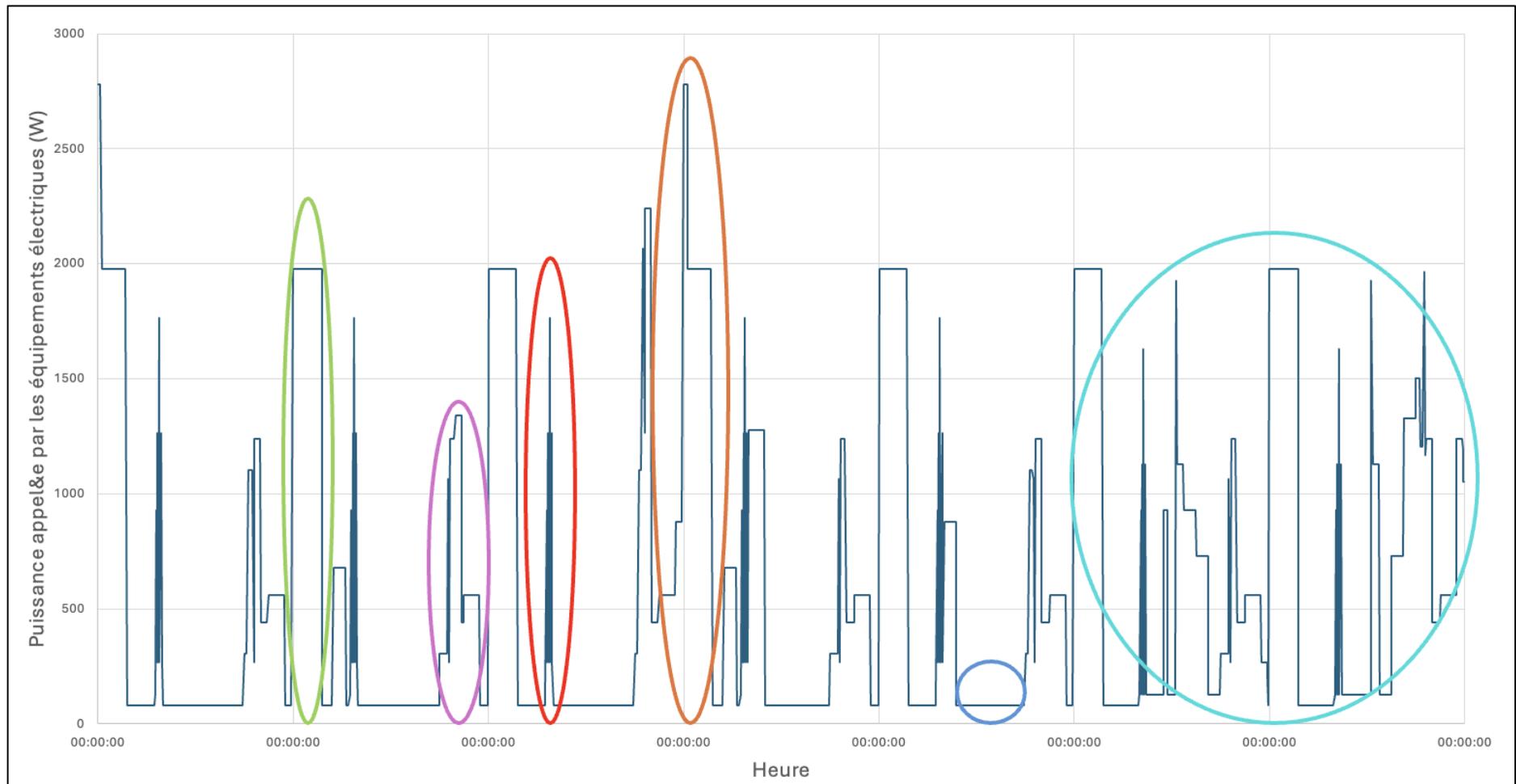


Figure 29 : Courbe de puissance appelée en W par les équipements électriques durant une semaine

- Le premier pattern (en vert) correspond à la charge de la voiture électrique qui se manifeste entre 00h00 et 3h35 du matin. Avec une puissance de 1900 W, c'est l'appareil le plus puissant et consommateur de tous ses homologues.
- Le second pattern (en violet) correspond à l'ensemble des appareils utilisés le soir après 18h. On ne distingue pas forcément les différents appareils utilisés.
- Le troisième pattern (en rouge) est l'ensemble des appareils utilisés durant le matin et plus particulièrement le déjeuner. On peut donc voir des pics succincts qui correspondent aux cycles très courts du grille-pain ou de la cafetière.
- Le quatrième pattern (en orange) est le pic le plus élevé de la semaine, il se manifeste deux fois et est l'addition de la consommation de la charge de la voiture électrique et du lave-vaisselle. Cela donne un pic de puissance appelée à 2700 kW.
- Le cinquième pattern (en bleu) est le plus faible car il correspond au moment où la maison est vide durant la journée. Les occupants sont partis au travail entre 8h00 et 18h00 ce qui donne une longue période sans consommation.
- Le dernier cercle (en turquoise) n'est pas un pattern, mais plutôt une constatation. Il correspond au weekend. Le fait d'avoir une présence constante au sein de l'habitat augmente le nombre de pics de puissance appelée.

Le Tableau 13 montre la consommation annuelle attendue et simulée en kWh de chaque équipement. Certaines valeurs finales sont au-dessus des prévisions et d'autres en-dessous. Ce qui donne une certaine homogénéité totale. On peut apercevoir les équipements les plus énergivores. Sans surprises, la voiture électrique arrive loin devant en tête avec pratiquement 2500 kWh d'électricité consommée sur une année. Ensuite les luminaires du rez-de chaussée et de l'étage qui consomment 266 kWh annuels à eux deux. Le RDC consomme beaucoup plus car il est plus utilisé. Ensuite ce sont le lave-vaisselle, le séchoir et la taque électriques qui se rapprochent de 250 kWh. Leurs utilisations quasi quotidiennes et leur forte puissance font que ce sont des postes importants de dépenses. Le congélateur et le frigo consomment quasi 350 kWh à eux deux. Toutes les consommations correspondent à ce qui était attendu.

Catégorie	Appareil électronique	P (W)	Consommation annuelle attendue (kWh)	Consommation annuelle simulée (kWh)	Consommation annuelle simulée par catégorie (kWh)
Appareils en continus	Frigo	17	150	148,51	681,41
	Congélateur	23	250	200,93	
	Box Wifi	10	90	87,36	
	box TV	6	50	52,42	
	Téléphone fixe	2	20	17,47	
	Radio réveil	5	40	43,68	
	Veilles	15	125	131,04	
Lavage	Lave-vaisselle	800	250	249,60	839,80
	Lave linge	600	200	187,20	
	Sècheiro	1200	250	249,60	
	Aspirateur	800	80	83,20	
	Fer à repasser	900	75	70,20	
Cuisine	Cafetière	1000	30	30,33	590,74
	Bouilloire	1500	45	45,50	
	Grille pain	1000	30	30,33	
	Mirco-onde	800	60	62,40	
	Taque électrique	900	250	245,70	
	hotte	75	25	20,48	
	Four	1000	150	156,00	
Multimédia	Télévision	100	150	150,80	351,26
	Ordinateur fixe	75	120	113,10	
	Console de jeux	120	84	87,36	
Hygiène	Sèche cheveux	800	25	24,27	24,27
Autre	Petits électro non définis	50	150	159,90	159,90
Eclairage	Eclairage RDC	137,7	-	239,28	266,09
	Eclairage SDB	154,7	-	26,81	
Electromobilité	Voiture électrique	1900	-	2478,23	2478,23

Tableau 13 : Consommations annuelles attendues et simulées en kWh des équipements électriques

L'addition des consommations de chaque équipement équivaut à 5391,7 kWh annuel (Tableau 14). Étant donné que la voiture électrique n'est pas l'équipement le plus présent au sein de tous les foyers Wallon, la consommation des équipements électriques sans celle de l'électromobilité a été calculé et représente 2913,47kWh. Cette dernière valeur est au-dessus de celle répertoriée dans la revue littéraire. Cependant il a eu été notifié que la consommation pouvait fortement varier en fonction des appareils choisis pour l'analyse.

Consommation annuelle simulée avec l'électromobilité (kWh)	5391,70
Consommation annuelle simulée sans l'électromobilité (kWh)	2913,47

Tableau 14 : Consommation annuelle totale en kWh avec et sans électromobilité

Il y a donc une certaine disparité entre les valeurs de consommation globale électrique moyenne et celles calculée. Cela est dû aux équipements choisis par rapport au taux de pénétration des informations venant de plusieurs rapports et diverses littératures. Pour autant, la courbe de consommation hebdomadaire réalisée est tout à fait réaliste tout comme la consommation annuelle calculée.

5.1.3 La consommation d'eau chaude sanitaire

a) La consommation de la demande en ECS

La Figure 30 montre la consommation journalière en semaine en nombre de litres en fonction du temps. On peut voir deux grands pics et trois autres petits, un quatrième petit est caché dans le premier grand pic. Les pics allant jusqu'à 50 litres de consommation d'eau chaude sanitaire correspondent aux douches. Les petits pics correspondent aux robinets de la cuisine et de la salle de bain.

Le profil énergétique est directement proportionnel à la quantité d'eau chaude demandée car elle est fournie à la même température. On peut donc apercevoir sur la Figure 31, la courbe de puissance appelée par la demande en ECS est exactement la même que celle de la Figure 30.

Les jours de semaines sont exactement les mêmes. Durant le weekend, le profil est même, juste que la consommation matinale est déplacée d'une heure, la consommation du soir reste inchangée.

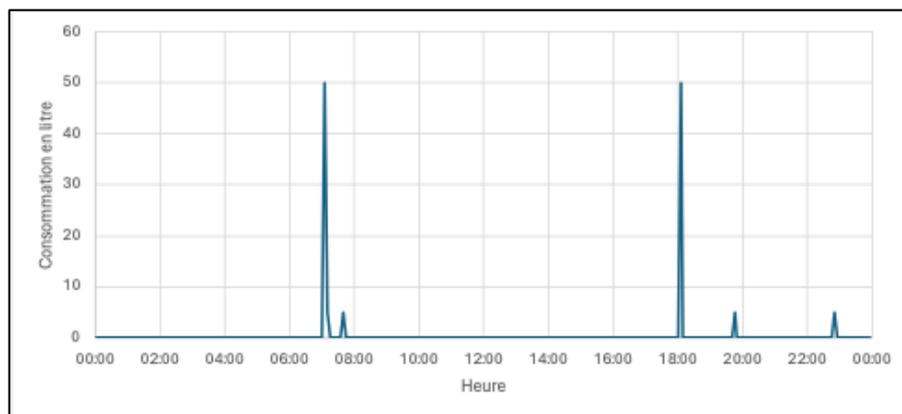


Figure 30 : Consommation journalière en litre tout au long d'une journée en semaine

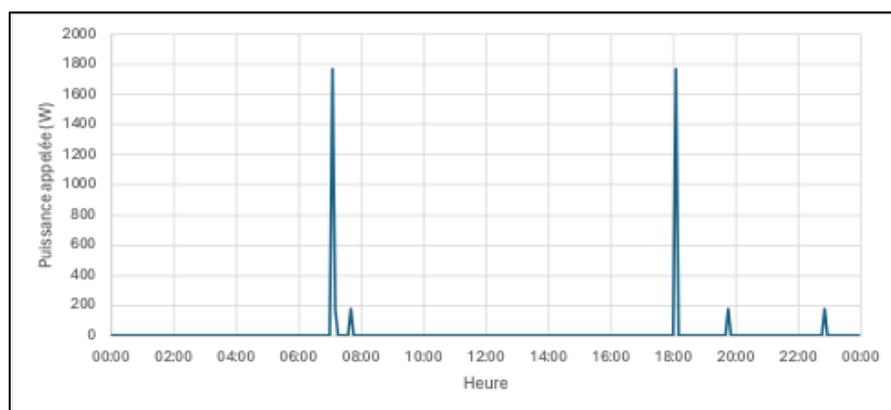


Figure 31 : Puissance appelée en W pour la consommation d'eau chaude sanitaire au cours d'une journée en semaine

Le Tableau 15 montre la consommation hebdomadaire et annuelle du volume et de la consommation d'eau chaude sanitaire. La consommation prend uniquement en compte les

besoins énergétiques afin d'avoir de l'eau à 40°C. Elle ne prend pas en compte la consommation du ballon ni de ses pertes.

	Volume d'ECS consommé à 40°C (L)	Energie consommée pour l'ECS (kWh)
Hebdomadaire	840	30
Annuel	43 680	1 553

Tableau 15 : Volume en litres et consommation d'ECS en kWh sur une semaine et une année

b) La consommation énergétique du ballon de stockage

La consommation énergétique du ballon de stockage est la consommation réelle prise en compte car c'est l'énergie consommée sur le réseau. La Figure 32 montre le comportement du ballon de stockage et de sa puissance appelée par la résistance durant les 24h premières de simulation. Le premier graphique (en bleu, au-dessus) représente le pourcentage de charge du ballon de stockage. En sachant que 0% représente l'énergie minimale du ballon avec une température interne de 55°C et 100% l'énergie maximale avec une température de l'eau de 80°C. Le ballon ne dépasse jamais plus de 1% car selon les conditions, il n'a pas besoin d'aller au delà de 55°C. Dans le cas contraire, l'énergie apportée augmenterait la température interne et augmenterait par ailleurs les pertes de déperdition du ballon de stockage.

La Figure 32 montrent deux graphiques avec d'une part (en bleu, au-dessus), la courbe de pourcentage de charge du ballon de stockage d'ECS et de l'autre (en orange, en-dessous), la courbe de puissance appelée par la résistance électrique du ballon de stockage. Toutes ces données sont sur la même échelle de temps et représentent les valeurs des 24 premières heures de simulation. On peut y voir deux cas de figures :

- Premièrement, les pertes de déperditions visibles sur la courbe de pourcentage de charge du ballon. Sur les quatre premières heures et demie, on peut apercevoir une courbe légèrement descendante jusqu'à arriver au palier des 0 % de charge. La courbe de descend pas en dessous de ce seuil selon les conditions. Arrivée vers 4h30 du matin, la résistance s'active pour une impulsion à 2000W de 5 minutes. On peut aussi en déduire que le ballon d'eau chaude s'active environ toutes les 4h30 si aucunes consommations n'est à déplorer durant cette période.

- Deuxièmement, les pertes dues à la consommation énergétique d'eau chaude sanitaire. La courbe de pourcentage de charge correspond, de manière inversée à la Figure 31. Elles dessinent des pentes raides plus ou moins grandes en fonction du type de consommation. Les grands pics bleus (graphique du haut), correspondent aux douches. Cela entraîne une plus longue activation de la résistance. Par ailleurs, les petits pics correspondent aux consommations des éviers, ils entraînent de petites impulsions comme le premier cas vu juste avant.

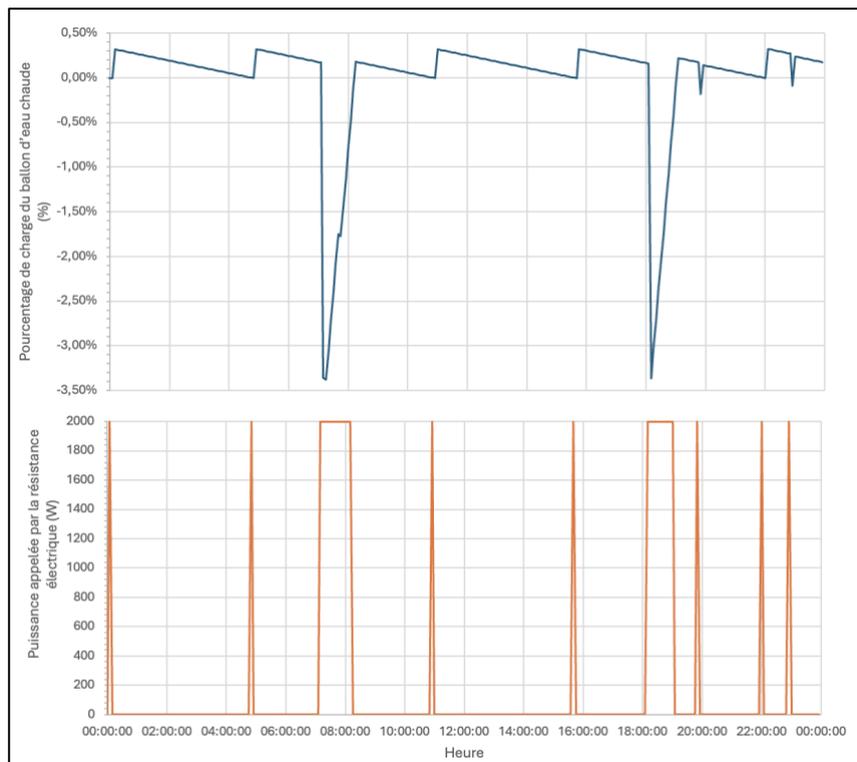


Figure 32 : Deux graphiques représentant le pourcentage de charge du ballon de stockage d'ECS (courbe bleue, au-dessus) et de la puissance appelée en W par la résistance électrique du ballon de stockage d'ECS durant la première journée de simulation

La consommation finale du ballon de stockage est de 1860 kWh avec d'une part 307 kWh uniquement dues aux pertes par déperdition et 1553 kWh de consommation d'ECS (Tableau 16). Les pertes représentent environ 16,5 % de la consommation totale du système.

	Energie consommée pour les pertes du ballon de stockage (kWh)	Energie consommée pour l'ECS (kWh)	Energie totale consommée par le ballon de stockage (kWh)
Hebdomadaire	6	30	36
Annuel	307	1 553	1 860

Tableau 16 : Résultats hebdomadaires et annuels de la consommation du ballon de stockage en kWh comprenant les pertes par déperdition et la consommation en ECS

5.1.4 Consommation totale

Chaque consommation a été prise séparément. La Figure 33 montre les parts des différentes consommations selon les différentes catégories. Le premier graphique (en haut à gauche) montre 78,2 % de l'énergie consommée vient du chauffage. Selon le SPF économie et l'ICEDD, environ 75% de l'énergie totale consommée viendrait uniquement du chauffage [34], [43]. Le second graphique (en haut à droite) ajoute une nouvelle catégorie afin de différencier la consommation des équipements électriques. Dans le premier graphique la consommation totale représente 16,2 % et dans le second 8,8 % et la voiture électrique 7,5 %. Le troisième graphique enlève la part de la consommation de la voiture électrique faisant passer la consommation de chauffage de 78,2 % à 84,5%.

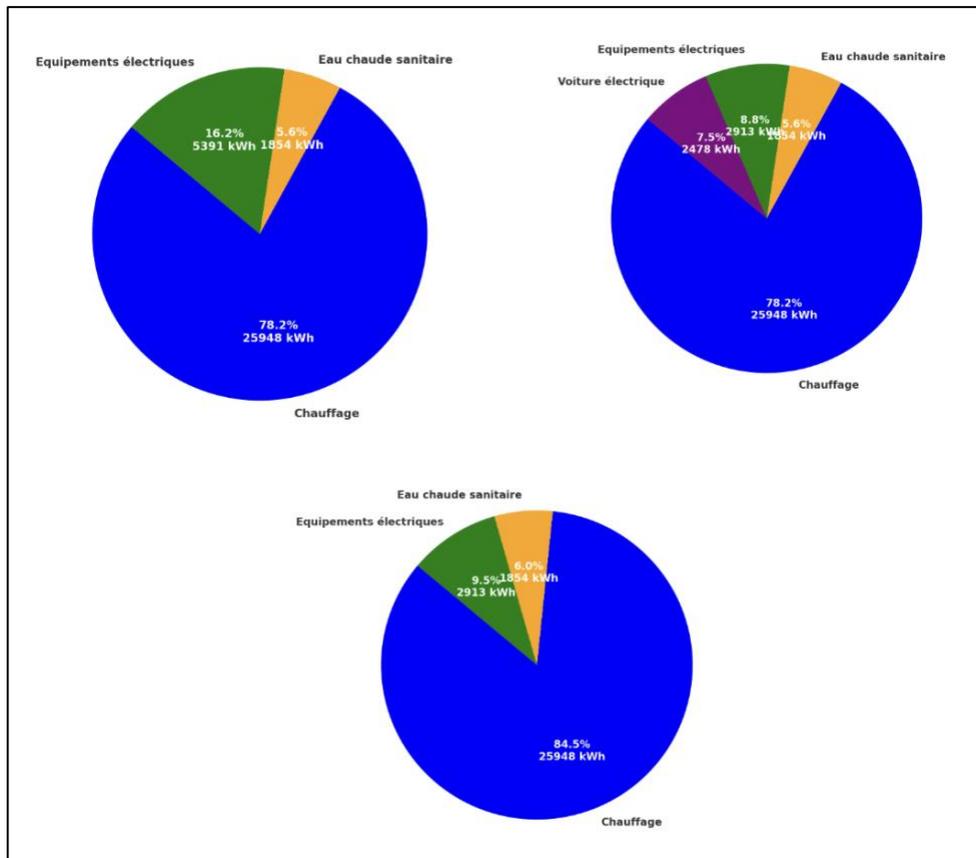


Figure 33 : Part des différentes consommations en kWh

Ce graphique montre que la part du système de chauffage est très importante par rapport aux restes de autres consommations. Cela peut s'expliquer par le nombre de personne habitant dans le bâtiment analysé. Ce bâtiment avec trois chambres, pourrait accueillir plus de personnes et faire augmenter la part de l'électricité consommée tout comme celle de l'eau chaude sanitaire.

5.2 Les résultats de l'optimisation de la charge

5.2.1 Simulation sans optimisation

La Figure 34 montre deux courbes de puissance durant une semaine du mois de juin. La courbe bleue (avec les pics les plus importants), représente la production solaire et la courbe orange (avec les pics les moins importants), montre la consommation électrique de tous les équipements et de l'eau chaude sanitaire combinée. On peut remarquer une similitude entre le graphique ci-dessous et la Figure 20, le déphasage entre le moment de production et le moment de consommation. L'autoconsommation et autoproduction sans modulation de charge ne seront pas très concluant aux vues de ce postulat.

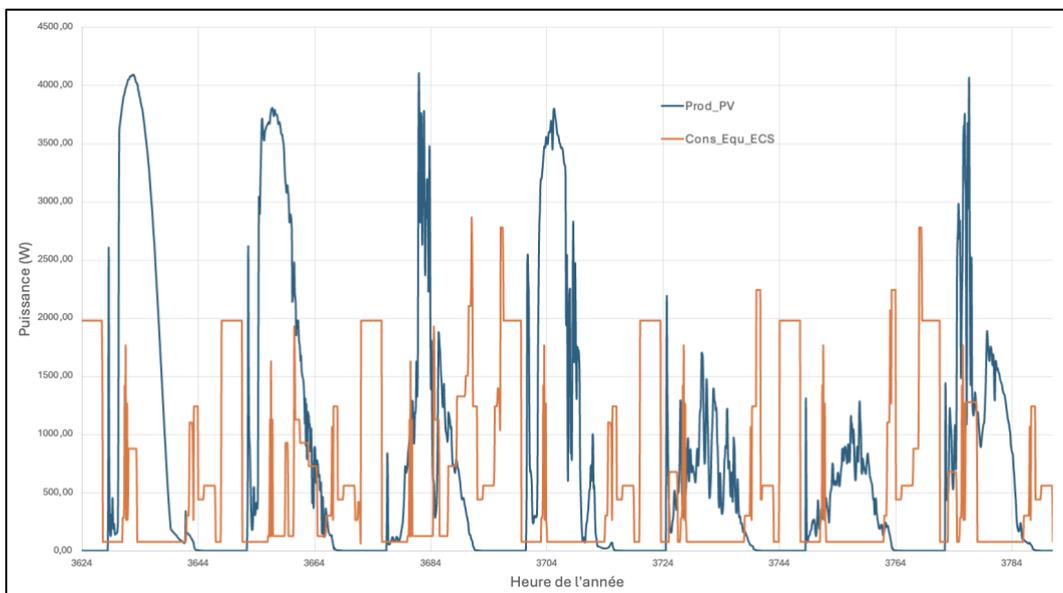


Figure 34 : Production photovoltaïque et consommation des équipements électriques combiné à la consommation d'eau chaude sanitaire en W durant une semaine du mois de juin

On peut d'ailleurs apercevoir les résultats sur le Tableau 17. Il présente les résultats d'une simulation sans optimisation, détaillant les différentes consommations annuelles pour chaque catégorie, ainsi que l'apport des panneaux photovoltaïques et du réseau pour satisfaire ces consommations. On y observe également les résultats d'autoproduction et d'autoconsommation.

L'autoconsommation, qui représente la part de l'énergie produite par les panneaux solaires utilisée directement sur place, montre déjà des résultats intéressants sans optimisation. Toutefois, l'autoproduction totale est impactée par la recharge de la voiture électrique, qui se fait principalement la nuit, une période où il n'y a pas de production d'électricité solaire.

Pour des catégories spécifiques comme les équipements statiques, modulables, et l'eau chaude sanitaire, la production photovoltaïque permet de couvrir entre 20 % et 34 % de leur

consommation totale. Cette simulation montre qu'une gestion énergétique sans modulation apporte une quantité significative d'énergie au système. Cependant, en prenant en compte toutes les consommations globalement, on constate que l'autoconsommation de toutes les consommations électriques, initialement de 25,9 %, pourrait être considérablement augmentée grâce à des stratégies d'optimisation.

N° simulation	Catégorie	Production solaire (kWh)	Consommation totale (kWh)	Apport PV (kWh)	Apport Réseau (kWh)	Surplus PV (kWh)	Autoconsommation	Autoproduction
1	Tous les équipements / ECS	3910,56	7305,38	1012,66	6292,72	2897,89	25,90%	13,86%
2	Tous les équipements	3910,56	5450,72	728,89	4721,83	3181,67	18,64%	13,37%
3	Les équipements statiques	3910,56	2278,88	531,45	1747,43	3379,11	13,59%	23,32%
4	Les équipements modulables	3910,56	686,80	234,13	452,67	3676,42	5,99%	34,09%
5	L'eau chaude sanitaire	3910,56	1854,67	375,64	1479,03	3534,92	9,61%	20,25%
6	La voiture électrique	3910,56	2485,04	0,00	2485,04	3910,56	0,00%	0,00%

Tableau 17 : Résultats de la simulation sans optimisation

5.2.2 Simulation avec optimisation

Les résultats de la simulation avec modulation sont présentés dans le Tableau 18. Ce tableau montre les quatre simulations effectuées, les résultats d'autoconsommation ainsi que les étapes intermédiaires. Pour chaque étape de la simulation, l'apport des panneaux photovoltaïques (PV), l'apport du réseau et l'énergie PV restante ont été calculés. Cela permet d'établir une comparaison avec la simulation sans optimisation pour chaque simulation.

Les résultats sont clairs : il y a une augmentation significative de l'autoconsommation de la production photovoltaïque avec les conditions simples de modulation. Par exemple, les valeurs d'autoconsommation du Tableau 18 doivent être comparées à la première simulation, qui prend en compte toutes les consommations électriques déterminées lors du modèle. L'autoconsommation passe de 25,9 % à 53,01 % pour le résultat le plus faible, soit un doublement. Les simulations 8 et 9 sont identiques à l'exception de l'inversion de l'ordre de priorité entre l'eau chaude sanitaire et la voiture électrique. Les résultats montrent qu'en fonction de la priorité donnée à un élément, il peut y avoir une variation significative, ici d'environ 5 %, ce qui est conséquent.

N° simulation	Catégorie	Production solaire (kWh)	Consommation totale (kWh)	Apport PV (kWh)	Apport Réseau (kWh)	Surplus PV (kWh)	Autoconsommation	Autoproduction
7	Tous les équipements Stat + Mod + VE	3910,56	5450,72	728,89	4721,83	3181,67	53,01%	28,51%
	L'eau chaude sanitaire		1818,49	1343,91	474,66	1837,76		
	Total		7269,20	2072,80	5196,48	1837,76		
8	Tous les équipements stat + mod	3910,56	2965,68	728,89	2236,78	3181,67	61,91%	33,34%
	L'eau chaude sanitaire		1818,49	1343,91	474,66	1837,76		
	La voiture électrique		2478,35	348,30	2130,05	1489,46		
	Total		7262,51	2421,10	4841,49	1489,46		
9	Tous les équipements stat + mod	3910,56	2965,68	728,89	2236,78	3181,67	66,40%	35,75%
	La voiture électrique		2478,35	751,98	1726,37	2429,68		
	L'eau chaude sanitaire		1818,49	1115,64	702,94	1314,04		
	Total		7262,51	2596,52	4666,09	1314,04		
10	Tous les équipements stat	3910,56	2278,88	531,45	1747,43	3379,11	64,11%	34,60%
	Sèche linge (Equ mod)		246,40	117,72	128,68	3261,39		
	Lave Linge (Equ mod)		179,65	115,35	64,30	3146,05		
	Lave vaisselle (Equ mod)		243,33	136,50	106,83	3009,54		
	L'eau chaude sanitaire		1818,49	1313,10	505,45	1696,44		
	La voiture électrique		2478,35	292,76	2185,59	1403,68		
	Total		7245,10	2506,88	4738,29	1403,68		

Tableau 18 : Résultats de la simulation avec optimisation

Une autre variable intéressante à noter est que l'élément ayant la plus grande variabilité est l'eau chaude sanitaire. Cela s'explique par ses caractéristiques uniques par rapport aux autres éléments, notamment le fait qu'elle est liée à une batterie. La batterie offre une grande variabilité en fonction des conditions appliquées. Dans cette simulation, l'objectif n'était pas de surestimer la consommation par la résistance électrique du ballon de stockage. Ce dernier pourrait se charger jusqu'à sa température maximale, ce qui aurait pour conséquence de ne pas recharger en fonction des besoins, limitant ainsi l'utilisation de concepts de gestion de l'énergie. Les résultats montrent que l'apport des PV pour l'eau chaude sanitaire varie selon la simulation mais reste nettement supérieur à la simulation sans optimisation, passant de 375,64 kWh à 1111,64 kWh dans le pire des cas, soit un triplement de l'apport grâce à l'optimisation. Une autre particularité du ballon de stockage est sa capacité à se recharger à n'importe quel moment, offrant ainsi une fenêtre d'apport photovoltaïque supérieure à celle des autres équipements.

Enfin, il est important de souligner que les conditions d'optimisation mises en place ont eu un effet positif sur l'autoconsommation.

6. Discussion et limites

Dans cette étude, nous avons développé un modèle de consommation énergétique pour un bâtiment résidentiel typique en Wallonie, en mettant l'accent sur l'optimisation de l'autoconsommation grâce à l'intégration de concepts de systèmes de management de l'énergie. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de cette approche, avec une augmentation notable de l'autoconsommation d'énergie par rapport à une production photovoltaïque.

La revue de la littérature montre que la majorité des modèles énergétiques de bâtiments se concentrent souvent sur un seul aspect, comme la demande de chauffage ou la consommation d'électricité des équipements électroménagers. Rarement, une approche globale intégrant ces différents éléments est adoptée. Cette segmentation limite la compréhension des interactions complexes entre les différents types de consommation énergétique dans un bâtiment. En combinant ces divers aspects dans un seul modèle cohérent, notre étude comble partiellement cette lacune et propose une gestion plus holistique de l'énergie dans les bâtiments résidentiels.

Le modèle de consommation développé est divisé en trois branches principales : le chauffage, les équipements électriques, et l'eau chaude sanitaire. Chaque branche a été traitée de manière indépendante, avec ses propres caractéristiques. La courbe de consommation de chauffage, modélisée de manière dynamique sous TRNSYS, montre des résultats plausibles, avec une consommation surfacique cohérente par rapport à des études existantes. Cependant, la modélisation a révélé certaines limites, notamment un comportement on/off constant du système de chauffage, même en hiver, ce qui suggère une possible sous-représentation des fluctuations réelles de la demande énergétique.

En revanche, les courbes de consommation pour l'électricité et l'eau chaude sanitaire ont été construites de manière déterministe, ce qui a permis d'établir des schedules hebdomadaires prédéfinies. Ces courbes se montrent cohérentes selon les paramètres intégrés, bien que l'approche déterministe limite la variabilité du modèle et ne reflète pas pleinement les potentielles fluctuations.

L'optimisation du modèle, par l'intégration de panneaux photovoltaïques et la modulation de la charge, a démontré des bénéfices clairs pour l'autoconsommation. En déplaçant l'utilisation de certains appareils vers les moments de production solaire maximale, le modèle a réussi à réduire la dépendance au réseau et à améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment. Bien que notre modèle ne se revendique pas comme un EMS complet, il en incorpore plusieurs éléments

fondamentaux, tels que la modélisation intégrée des différents flux énergétiques et l'utilisation de stratégies de modulation de la charge. Des éléments prédictifs de consommation ont été déterminés. Cela montre la faisabilité et les avantages potentiels d'une telle approche dans le contexte des bâtiments résidentiels en Wallonie. Pour l'implémentation du modèle dans la vie réelle, on pourrait utiliser une API météo permettant d'obtenir des données météorologiques fiables et en continu. La courbe de consommation pourrait se baser sur les heures, jours, semaines précédentes afin d'établir la courbe de charge potentielle.

Cependant, le modèle présente certaines limites. La séparation des environnements de simulation des différentes courbes de consommation amène à des discordances en termes de résolution de modèle. En outre, l'utilisation de différents environnements de simulation sans interconnexion claire complique la compréhension et la réplique du modèle. De plus, le modèle a été appliqué à un seul bâtiment, ce qui limite la généralisation des résultats. L'absence de comparaison avec des données réelles restreint également la validation du modèle.

7. Conclusion

A travers l'ensemble des processus de ce travail, il a été démontré que l'optimisation de la courbe de consommation via des concepts de système de management de l'énergie augmente l'autoconsommation du système. Il en découle qu'optimiser sa consommation permet de mieux consommer son énergie et donc par la suite de mieux la partager. Les communautés d'énergies renouvelables sont l'avenir des échanges d'électricité entre voisins. Il est ressorti de tout cela que le modèle établi est cohérent et pourrait être implémenté ou en prenant en compte ses défauts.

La suite du travail serait d'implémenter les courbes de consommation dans un réseau de partage d'énergie entre plusieurs bâtiments. Par après, avoir un seul environnement de simulation qu'il soit sous TRNSYS, Excel ou un autre langage de programmation.

Bibliographie

- [1] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1^{re} éd. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009325844.
- [2] O. Brown, « Migrations et changements climatiques », *Organisation internationale pour les migrations*, 31, 2008.
- [3] IEA, « Energy Statistics Data Browser ». 2023. Consulté le: 15 mars 2024. [CSV]. Disponible sur: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- [4] M. D. P. Pablo-Romero, A. Sánchez-Braza, et G. Anna, « Relationship between economic growth and residential energy use in transition economies », *Clim. Dev.*, vol. 11, n° 4, p. 338-354, avr. 2019, doi: 10.1080/17565529.2018.1442789.
- [5] C. Fetting, « THE EUROPEAN GREEN DEAL », ESDN Office, Vienne, ESDN Report, 2020.
- [6] *Règlement (UE) 2023/857 du parlement européen et du conseil du 19 avril 2023 - Réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les États membres de 2021 à 2030 contribuant à l'action pour le climat afin de respecter les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris et le règlement(UE) 2018/1999*. 2023, p. 2.
- [7] Nations Unies, « Adoption de l'accord de Paris - COP21 Paris : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ». 2015.
- [8] ONU, « L'accord de la COP28 marque le “début de la fin” de l'ère des combustibles fossiles | CCNUCC », L'accord de la COP28 marque le « début de la fin » de l'ère des combustibles fossiles. Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://unfccc.int/fr/news/l-accord-de-la-cop28-marque-le-debut-de-la-fin-de-l-ere-des-combustibles-fossiles>
- [9] IEA, « Building - Tracking Buildings ». 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/energy-system/buildings#tracking>
- [10] IWEPS, « Consommation d'énergie par secteur/vecteur », IWEPS, 2024.
- [11] IEA, « Energy Technology Perspectives 2023 », *Energy Technol. Perspect.*, 2023.
- [12] View Brussels, « L'impact de la crise énergétique et inflationniste sur le marché de l'emploi Bruxellois », 2023.
- [13] RTE, « Bilan électrique 2022 », Le Réseau de Transport d'électricité, 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-prix#Juillet%E2%80%93ao%C3%BBt2022>
- [14] R. Bloj, « La fin de la dépendance européenne aux hydrocarbures russes », *Fond. Robert Schuman*, n° 639, 2022.
- [15] CREG, « Analyse semestrielle de l'évolution des prix de l'énergie », CREG, 2024.
- [16] IEA, « World energy balance ». 2023.
- [17] SPW, « FAQ Sensibilisation énergie ». nd.
- [18] SPW, « Déclaration de politique régionale pour la Wallonie 2019 - 2024 ». 2019.
- [19] energie.wallonie.be, « Communautés d'énergie et partage d'énergie au sein d'un même bâtiment (Electricité) ». nd. Consulté le: 12 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/communautes-d-energie-et-partage-d-energie.html?IDC=10295>
- [20] clusters.wallonie.be, « Communautés d'Énergie : Cadre légal du Partage ». 25 avril 2023. Consulté le: 12 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://clusters.wallonie.be/tweed/fr/news/communautes-d-energie-cadre-legal-du-partage#:~:text=Ce%2017%20mars%202023%20c.nos%20acteurs%20et%20experts%20wallons.>
- [21] M. Dongellini, S. Falcioni, et G. L. Morini, « Dynamic Simulation of Solar Thermal Collectors for Domestic Hot Water Production », *Energy Procedia*, vol. 82, p. 630-636, déc. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.012.
- [22] N. Fumo, P. Mago, et R. Luck, « Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models », *Energy Build.*, vol. 42, n° 12, p. 2331-2337, déc. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.027.
- [23] G. Salvalai, « Implementation and validation of simplified heat pump model in IDA-ICE energy simulation environment », *Energy Build.*, vol. 49, p. 132-141, juin 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.038.
- [24] D. Mazzeo, N. Matera, C. Cornaro, G. Oliveti, P. Romagnoni, et L. De Santoli, « EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module », *Energy Build.*, vol. 212, p. 109812, avr. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109812.
- [25] H.-K. Ringkjøb, P. M. Haugan, et I. M. Solbrekke, « A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, p. 440-459, nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.002.

- [26] J. Hubert, M.-N. Anfrue, M. Kryvobokov, et S. Pradella, « Performance énergétique du parc de bâtiments résidentiels en Wallonie – Édition 2019 », Centre d'Études en Habitat Durable de Wallonie, 2019.
- [27] C. HAVEAUX et F. PRAILLET, « En Wallonie, des plateformes locales aident les ménages à rénover leur logement », *renouvelle.be*, 2019.
- [28] Stabel, « Parc des bâtiments ». 2023. Consulté le: 6 juin 2024. [Xls]. Disponible sur: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/parc-des-batiments#figures>
- [29] « Stratégie Wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment », SPW, 2020.
- [30] Stabel, « Parc des bâtiments ». 16 octobre 2023. Consulté le: 2 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/parc-des-batiments>
- [31] Stabel, « Ménages ». 2024. [Xls]. Disponible sur: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population/menages#news>
- [32] SPW, UMONS, ULG, et 3E, « COZEB - Rapport final du projet », Département de l'Énergie et du Bâtiment durable, 2013.
- [33] W. Cyx, N. Renders, et M. Van Holm en S. Verbeke, « IEE TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment ». 2011. [En ligne]. Disponible sur: https://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/scientific/BE_TABULA_ScientificReport_VITO.pdf
- [34] ICEDD, « Bilan énergétique de la Wallonie de l'année 2020 : Bilan du secteur domestique et équivalents », 2023.
- [35] Eurostat, « Degrés-jours de chauffage et de refroidissement par pays - données annuelles ». 2024. doi: https://doi.org/10.2908/NRG_CHDD_A.
- [36] CEHD (Centre d'Études en Habitat Durable), « Enquête sur la Qualité de l'Habitat 2012-2013. », 2014.
- [37] S. Waterbley, « Energy Key Data - Édition février 2022 », SPF Économie, 2022.
- [38] Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft et Munich Technical University, « BMU Leitszenario 2009 », Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, Rapport final, 2011.
- [39] ADEME, « Rénovation, Changer de chauffage ». 2023.
- [40] L. F. Cabeza, D. Ürge-Vorsatz, A. Palacios, D. Ürge, S. Serrano, et C. Barreneche, « Trends in penetration and ownership of household appliances », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, p. 4044-4059, févr. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.068.
- [41] L. F. Cabeza, D. Ürge-Vorsatz, D. Ürge, A. Palacios, et C. Barreneche, « Household appliances penetration and ownership trends in residential buildings », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, p. 1-8, déc. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.006.
- [42] Stabel, « Budget des ménages ». 2023. [Xls]. Disponible sur: https://statbel.fgov.be/sites/default/files/files/documents/Huishoudens/10.1%20Huishoudbudget/Plus/FR/EBM_0113_2020_FR_07SEP21.XLSX
- [43] SPF Économie, « Analyse de la consommation énergétique des ménages en Belgique en 2021 », SPF Économie, 2023. Consulté le: 5 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://economie.fgov.be/fr/publications/analyse-de-la-consommation-1>
- [44] Région Wallonne, « Rapport Analytique 2006-2007 », Ministère l'environnement, 2006. Consulté le: 12 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/publications/rapport-analytique-2006-1.html>
- [45] ADEME, ENERTECH, et RTE, « Consommations électrodomestiques françaises basées sur des mesures collectées en continu dans 100 logements », ADEME, 2021. Consulté le: 2 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6254-panel-usages-electrodomestiques-annee-2.html>
- [46] T. Barbier, « Modélisation de la consommation électrique à partir de grandes masses de données pour la simulation des alternatives énergétiques du futur ».
- [47] O. Ayan et B. Turkyay, « Domestic electrical load management in smart grids and classification of residential loads », in *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, Istanbul: IEEE, mai 2018, p. 279-283. doi: 10.1109/ICEEE2.2018.8391346.
- [48] SPF Mobilité et transport, Direction générale Politique de Mobilité durable et ferroviaire, et Direction Mobilité – Service Etudes et Enquêtes, « Enquête fédérale sur les déplacements domicile-travail 2021-2022 », Enquête, 2023.
- [49] European Commission, « European Alternative Fuels Observatory - Belgium - Vehicles and fleet ». 2024. Consulté le: 19 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/belgium/vehicles-and-fleet>
- [50] European Commission. Directorate General for Communication., *The transport and mobility sector*. LU: Publications Office, 2020. Consulté le: 11 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2775/82355>

- [51] Site Énergie du Service Public de Wallonie, « L'eau Chaude Sanitaire, une Gourmande Qui S'ignore ». s.d. Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/1-eau-chaude-sanitaire.html?IDC=8604#:~:text=Nous%20consommons%20chacun%20en%20moyenne,chauffage%20des%20habitations%20en%20Wallonie>.
- [52] SPW, « Rénover pour consommer moins d'énergie - Produire son eau chaude sanitaire ». 2022. Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/15-produire-son-eau-chaude-sanitaire.pdf?ID=61587>
- [53] K. Ahmed, P. Pylsy, et J. Kurnitski, « Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings », *Sol. Energy*, vol. 137, p. 516-530, nov. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.033.
- [54] E. Fuentes, L. Arce, et J. Salom, « A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, p. 1530-1547, janv. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.229.
- [55] Bruxelles Environnement, « La production d'eau chaude sanitaire ». Info-fiches Énergie, 2008.
- [56] E. J. M. Blokker, J. H. G. Vreeburg, et J. C. Van Dijk, « Simulating Residential Water Demand with a Stochastic End-Use Model », *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 136, n° 1, p. 19-26, janv. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000002.
- [57] SPF Mobilité et transport, Direction générale Politique de Mobilité durable et ferroviaire, et Direction Mobilité - Service Études et Enquêtes, « Enquête monitor sur la mobilité des belges », SPF, Enquête, 2019. Consulté le: 27 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://mobilit.belgium.be/sites/default/files/documents/publications/2022/ENQU%C3%8ATE%20MONITOR.pdf>
- [58] M. Mruzek, I. Gajdác, E. Kučera, et D. Barta, « Analysis of Parameters Influencing Electric Vehicle Range », *Procedia Eng.*, vol. 134, p. 165-174, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.056.
- [59] M. Weiss, T. Winbush, A. Newman, et E. Helmers, « Energy Consumption of Electric Vehicles in Europe », 28 juin 2024. doi: 10.20944/preprints202406.1974.v1.
- [60] M. N. Tasnim, S. Akter, M. Shahjalal, T. Shams, P. Davari, et A. Iqbal, « A critical review of the effect of light duty electric vehicle charging on the power grid », *Energy Rep.*, vol. 10, p. 4126-4147, nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.10.075.
- [61] E. Apostolaki-Iosifidou, P. Codani, et W. Kempton, « Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging », *Energy*, vol. 127, p. 730-742, mai 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.015.
- [62] Stabel, « Time Use Survey (TUS) - Enquête sur l'emploi du temps 2013 ». 2013. Consulté le: 8 mars 2024. [Excel]. Disponible sur: https://statbel.fgov.be/sites/default/files/files/documents/Huishoudens/10.10%20Tijdsbudgetonderzoek/TUS_publ_FR.xlsx
- [63] J. Torriti, « A review of time use models of residential electricity demand », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, p. 265-272, sept. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.034.
- [64] Stabel, « Time use survey ». 2015. Consulté le: 10 mars 2024. [Xls]. Disponible sur: <https://statbel.fgov.be/en/themes/households/time-use-survey#news>
- [65] « Aerts, D., Minnen, J., Glorieux, I., Wouters, I., & Descamps, F. (2014). A probabilistic activity model to include realistic occupant behaviour in building simulations. IBPSA-Canada eSim. »
- [66] U. Wilke, F. Haldi, J.-L. Scartezzini, et D. Robinson, « A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities », *Build. Environ.*, vol. 60, p. 254-264, févr. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.10.021.
- [67] X. Wu, Z. Tang, D.-I. Stroe, et T. Kerekes, « Overview and Comparative Study of Energy Management Strategies for Residential PV Systems with Battery Storage », *Batteries*, vol. 8, n° 12, p. 279, déc. 2022, doi: 10.3390/batteries8120279.
- [68] R. Balakrishnan et V. Geetha, « Review on home energy management system », *Mater. Today Proc.*, vol. 47, p. 144-150, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.029.
- [69] J. Xin et al., « Foresee: A User-Centric Home Energy Management System for Energy Efficiency and Demand Response ». 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917311856>
- [70] ISE, « Photovoltaics Report », Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2024. Consulté le: 1 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>
- [71] S. Sugianto, « Comparative Analysis of Solar Cell Efficiency between Monocrystalline and Polycrystalline », *INTEK J. Penelit.*, vol. 7, n° 2, p. 92-100, déc. 2020, doi: 10.31963/intek.v7i2.2625.
- [72] Energieplus, « Prédimensionner l'installation [photovoltaïque] ». 2010. Consulté le: 3 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaique/predimensionner-l-installation/#:~:text=En%20Belgique%2C%201%20kWc%2C%20non,faut%20environ%207%20m%2C%20B%20FkWc>.
- [73] Centre et Energy Efficiency and Renewables Unit, « PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM ». European Commission, n.d. [En ligne]. Disponible sur: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

- [74] SPW, « Le Logiciel PEB (Version 14.0) ». 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/logiciel-peb.html?IDC=9596>
- [75] SPW, « Choix des matériaux - Ecobilan des parois - Annexe ». 2010. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/choix-des-materiaux-ecobilan-de-parois-annexe.html?IDC=8661&IDD=44704>
- [76] SPV, « L'étanchéité à l'air ». 2017. Consulté le: 13 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/l-etancheite-a-l-air.html?IDD=97700&IDC=9475#:~:text=La%20norme%20EN%2013779%20peut,b%C3%A2timent%20est%20haut%20ou%20bas.>
- [77] SPW, « Le guide PEB 2021 ». 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/guide-peb.html?IDC=8824&IDD=97858>
- [78] Bruxelles Environnement, « Rapport technique - Bâtiments exemplaires - Fiche 2.2 : La conception de l'éclairage artificiel dans les logements et les bureaux ». 2010. [En ligne]. Disponible sur: https://document.environnement.brussels/opac_css/doc_num.php?explnum_id=4386#page=5.38
- [79] CSTC - Buildwise, « Guide pratique et technique de l'éclairage résidentiel ». 2011. [En ligne]. Disponible sur: https://www.buildwise.be/umbraco/surface/publicationitem/downloadfile?file=31400/fr/unprotected/guide_pratique_et_technique_de_l_eclairage_residentiel.pdf#page=4.98
- [80] Vaillant, « Fiche technique: uniSTOR VIH R 120 - 150 - 200/6 B ». n.d. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vaillant.be/telechargements/documents/fiche-technique/vai-89-ft-unistor-vihr120-200b-00-1218887.pdf>
- [81] Hemmis et BEMS - ULG, « DÉTERMINATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE OPTIMAL EN FONCTION DES COÛTS, ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES RÉSULTATS ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL INFORMATIQUE - Tache 2.1 ». n.d.
- [82] Confort Sauter, « Radiateur à fluide caloporteur ». 2007. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.confort-sauter.com/gaerp/download/notice-installation-utilisation-radiateur-madison-sauterpdf?srsId=AfmBOopc-24ZhAppNz9b9zReZocjXMBEraV7jMS07sz0A6ATujcTZIEk>
- [83] Energieplus, « Évaluer l'efficacité énergétique des chaudières ». 2007. [En ligne]. Disponible sur: https://energieplus-lesite.be/evaluer/chauffage4/evaluer-efficacite-energetique-production-chaleur/evaluer-l-efficacite-energetique-des-chaudieres/#Rendement_de_combustion

Annexes

Annexe 1 Tableau des différentes typologies de bâtiment étudiées dans l'étude CoZeb représentant l'ensemble du bâti wallon

	Maison 4 façades	Maison 3 façades	Maison mitoyenne
< 1945	Maison de type vernaculaire (1) 	Maison de type ouvrière, avec passage latéral (2) 	Maison de type ouvrière (3) 
	6%	4%	15%
45%	Maison villageoise, entre deux guerres (4) 		Maison urbaine moyenne (5) 
	4%		16%
De 1946 à 1970	Villa des premières extensions urbaines (6) 		Maison de type bel-étage (8) 
	10%		4%
20%	Villa de plain-pied, en périphérie de la ville (7) 		
	6%		

De 1971 à 1984	Villa 4 façades, de type lotissement (9) 		Maison «sociale», barre de logements (10) 
	15%	12%	3%
De 1985 à 1995	Villa 4 façades, de type lotissement, K70 (11) 	Maison 3 façades avec garage latéral, K70 (12) 	Maison type bel-étage, K70 (13) 
	10%	6%	2%
De 1996 à 2008	Villa 4 façades, de type lotissement, K55 (14) 		Maison ossature bois, type éco-quartier, K55
	10%	7%	3%

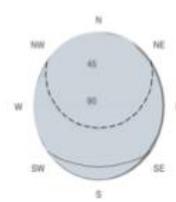
Annexe 2 Rapport PVGIS des performances d'un système photovoltaïque basé à Arlon avec 4,32 kWc orientation -45° et 45° de pente



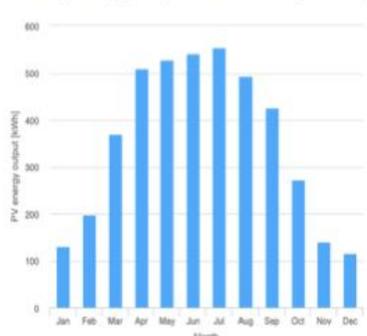
European Commission

Performance of grid-connected PV

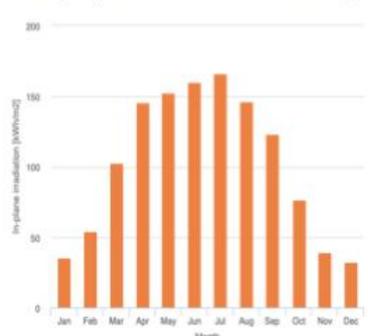
PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

<p>Provided inputs:</p> <p>Latitude/Longitude: 49.691,5.800 Horizon: Calculated Database used: PVGIS-SARAH2 PV technology: Crystalline silicon PV installed: 4.32 kWp System loss: 14 %</p>	<p>Simulation outputs</p> <p>Slope angle: 45 ° Azimuth angle: -45 ° Yearly PV energy production: 4283.86 kWh Yearly in-plane irradiation: 1235.99 kWh/m² Year-to-year variability: 212.83 kWh Changes in output due to: Angle of incidence: -3.04 % Spectral effects: 1.77 % Temperature and low irradiance: -5.46 % Total loss: -19.77 %</p>	<p>Outline of horizon at chosen location:</p>  <p>■ Horizon height — Sun height, June — Sun height, December</p>
---	--	---

Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



Month	E_m	H(i)_m	SD_m
January	130.9	35.7	26.9
February	197.3	53.9	54.8
March	370.0	102.9	71.0
April	511.1	145.7	84.3
May	529.9	152.7	81.6
June	541.5	160.1	64.3
July	555.0	166.1	58.5
August	493.5	146.6	53.6
September	426.6	123.6	31.9
October	272.0	76.9	46.6
November	139.7	39.4	30.0
December	116.5	32.6	35.3

The European Commission maintains this website to enhance public access to information about its initiatives and European Union policies in general. Our goal is to keep this information timely and accurate. If errors are brought to our attention, we will try to correct them. However, the Commission accepts no responsibility or liability whatsoever with regard to the information on this site.

It is our goal to minimise disruption caused by technical errors. However, some data or information on this site may have been created or structured in files or formats that are not error-free and we cannot guarantee that our service will not be interrupted or otherwise affected by such problems. The Commission accepts no responsibility with regard to such problems incurred as a result of using this site or any linked external sites.

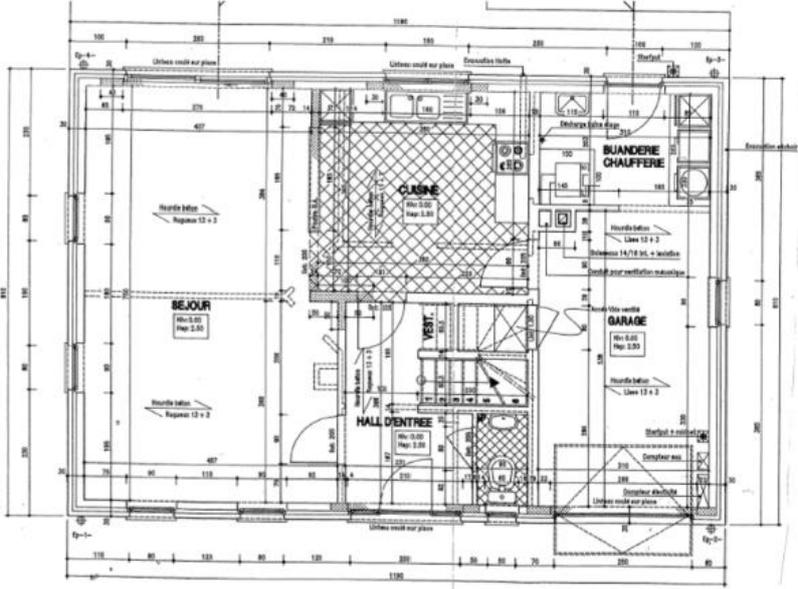
For more information, please visit https://ec.europa.eu/info/legal-notice_en

PVGIS ©European Union, 2001-2024.
Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged, save where otherwise stated.

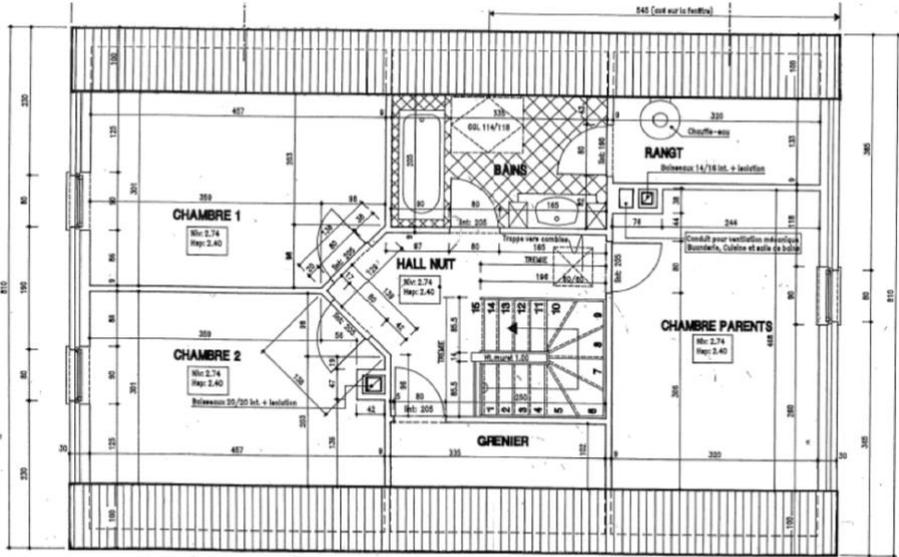
Report generated on 2024/08/16



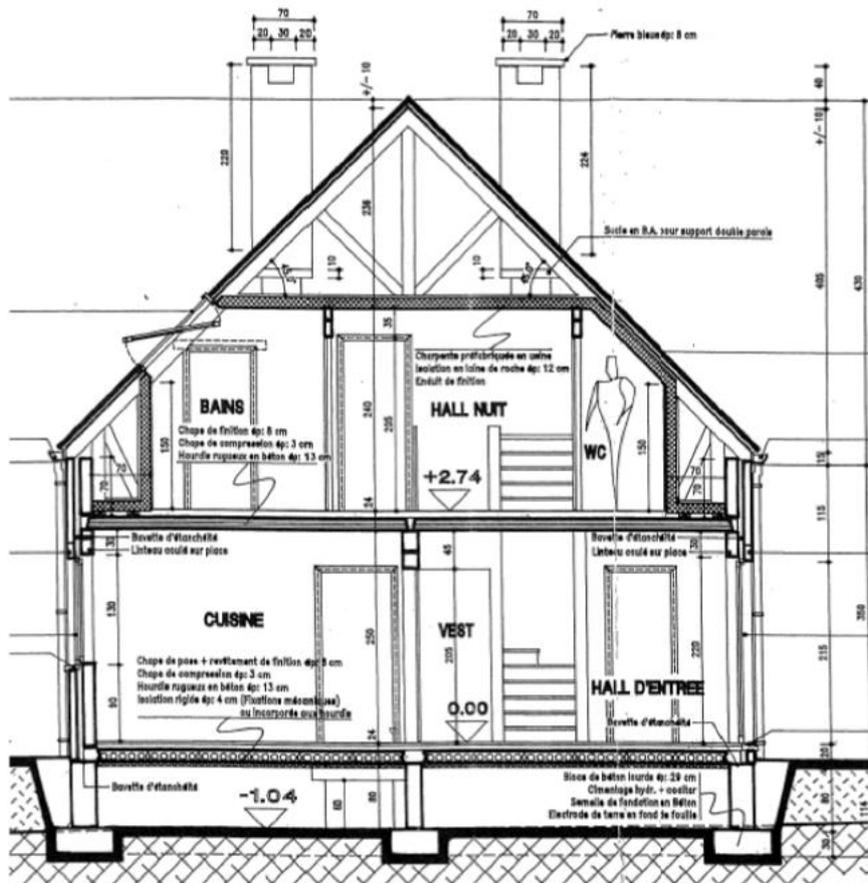
Annexe 3 Plans de la maison 4 façades k55 étudiée



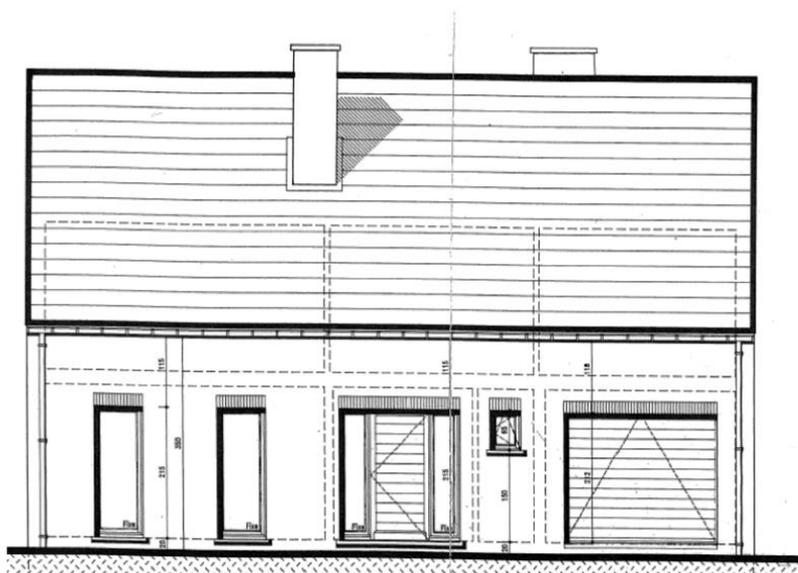
Plan du rez-de-chaussée



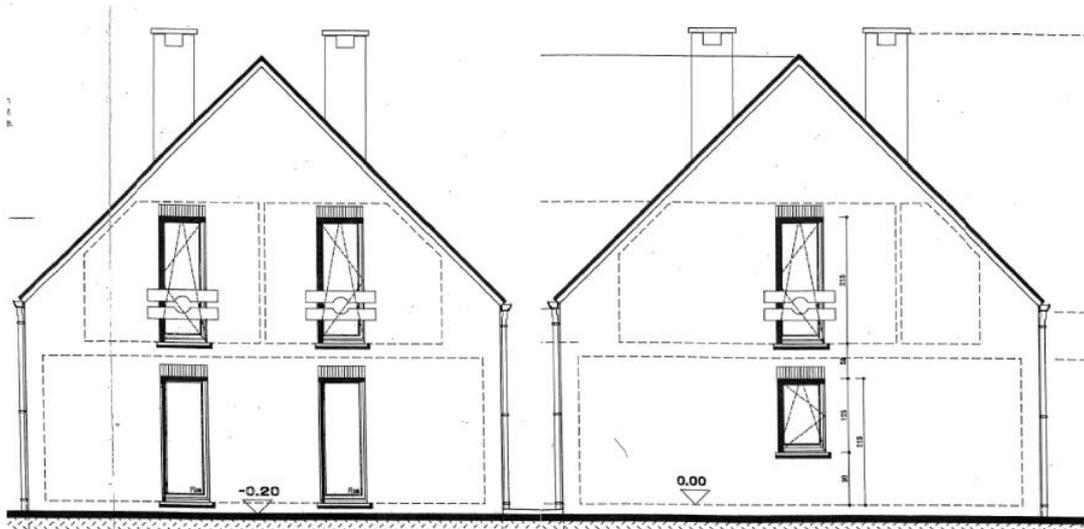
Plan du premier étage



Coupe transversale



Façade avant Nord-Est



Façade latérale Sud-est

Façade latérale Nord-Ouest

Façade arrière Sud-Ouest

Annexe 4 Gains internes radiatifs et convectif en Kj/h de chaque équipement électrique

Nom du gain	Apport Radiatif (Kj/h)	Apport Convectif (Kj/h)	Nom du gain	Apport Radiatif (Kj/h)	Apport Convectif (Kj/h)
Frigo	12,24	48,86	Cafetière	720	2880
Congélateur	16,56	66,24	Bouilloire	1080	4320
Box Wifi	7,2	28,8	Grille pain	720	2880
box TV	4,32	17,28	Mirco-onde	576	2304
Téléphone fixe	1,44	5,76	Taque électrique	648	2592
Radio réveil	3,6	14	hotte	54	216
Lave-vaisselle	576	2304	Four	720	2880
Lave linge	432	1728	Télévision	72	288
Séchoire	864	3456	Ordinateur fixe	54	216
Aspirateur	576	2304	Console de jeux	86	345
Fer à repasser	648	2592	Sèche cheveux	720	2880
Eclairage RDC	278	185	Petits électro non définis	18	72
Eclairafe SDB	165	247	Humain	162	162

Annexe 5 Schedules d'activations et d'arrêt des équipements électriques et de la consommation volumique de l'eau chaude sanitaire

		Frigo	Congélateur	Box Wifi	box TV	Téléphone fixe	Radio réveil	Veilles
Lundi	Debut	0 h 00	0 h 00	0 h 00	0 h 00	0 h 00	0 h 00	0 h 00
	Fin							
Mardi	Debut							
	Fin							
Mercredi	Debut							
	Fin							
Jeudi	Debut							
	Fin							
Vendredi	Debut							
	Fin							
Samedi	Debut							
	Fin							
Dimanche	Debut							
	Fin							

		Lave-vaisselle	Lave linge	Séchoire	Aspirateur	Fer à repasser
Lundi	Debut	0 h 00			18 h 30	
	Fin	0 h 30			19 h 00	
	Debut					
	Fin					
Mardi	Debut		5 h 00			20 h 00
	Fin		6 h 30			20 h 45
	Debut					
	Fin					
Mercredi	Debut				18 h 30	
	Fin				19 h 00	
	Debut	23 h 00				
	Fin					
Jeudi	Debut		5 h 00	8 h 00		
	Fin	0 h 30	6 h 30	10 h 00		
	Debut					
	Fin					
Vendredi	Debut	8 h 00			18 h 30	
	Fin	9 h 30			19 h 00	
	Debut					
	Fin					
Samedi	Debut	13 h 30	15 h 00		11 h 00	
	Fin	15 h 00	16 h 30		11 h 30	
	Debut					
	Fin					
Dimanche	Debut		15 h 00	16 h 30		18 h 30
	Fin		16 h 30	18 h 30		19 h 15
	Debut	23 h 00				
	Fin					

		Cafetière	Bouilloire	Grille pain	Mirco-onde	Taque électrique	hotte	Four
Lundi	Debut	7 h 20	7 h 30	7 h 45	19 h 00	19 h 15	19 h 15	
	Fin	7 h 25	7 h 35	7 h 50	19 h 10	20 h 00	20 h 00	
	Debut							
	Fin							
Mardi	Debut	7 h 20	7 h 30	7 h 45	19 h 00	19 h 15	19 h 15	
	Fin	7 h 25	7 h 35	7 h 50	19 h 10	20 h 00	20 h 00	
	Debut							
	Fin							
Mercredi	Debut	7 h 20	7 h 30	7 h 45	19 h 00	19 h 15	19 h 15	19 h 00
	Fin	7 h 25	7 h 35	7 h 50	19 h 10	20 h 00	20 h 00	20 h 00
	Debut							
	Fin							
Jeudi	Debut	7 h 20	7 h 30	7 h 45	19 h 00	19 h 15	19 h 15	
	Fin	7 h 25	7 h 35	7 h 50	19 h 10	20 h 00	20 h 00	
	Debut							
	Fin							
Vendredi	Debut	7 h 20	7 h 30	7 h 45	19 h 00	19 h 15	19 h 15	
	Fin	7 h 25	7 h 35	7 h 50	19 h 10	20 h 00	20 h 00	
	Debut							
	Fin							
Samedi	Debut	8 h 20	8 h 30	8 h 45	12 h 30	19 h 15	19 h 15	12 h 30
	Fin	8 h 25	8 h 35	8 h 50	12 h 40	20 h 00	20 h 00	13 h 30
	Debut				19 h 00			
	Fin				19 h 10			
Dimanche	Debut	8 h 20	8 h 30	8 h 45	12 h 30	19 h 15	19 h 15	12 h 30
	Fin	8 h 25	8 h 35	8 h 50	12 h 40	20 h 00	20 h 00	13 h 30
	Debut				19 h 00			
	Fin				19 h 10			

		Télévision	Ordinateur fixe	Console de jeux		Sèche cheveux
Lundi	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	7 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	7 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	23 h 00		Fin	
Mardi	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	7 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	7 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	23 h 00		Fin	
Mercredi	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	7 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	7 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	23 h 00		Fin	
Jeudi	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	7 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	7 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	23 h 00		Fin	
Vendredi	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	7 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	7 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	23 h 00		Fin	
Samedi	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	8 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	8 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	23 h 00		Fin	
Dimanche	Debut	18 h 00	18 h 00	21 h 00	Debut	8 h 10
	Fin	19 h 00	19 h 00	23 h 00	Fin	8 h 15
	Debut	20 h 00	20 h 00		Debut	
	Fin				Fin	

		Petits électro non définis		Eclairage RDC	Eclairafe SDB		Voiture électrique
Lundi	Debut	7 h 00	Debut	7 h 15	7 h 00	Debut	00h00
	Fin	8 h 00	Fin	8 h 00	7 h 30	Fin	03h35
	Debut	18 h 00	Debut	19 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	Fin	23 h 00		Fin	
Mardi	Debut	7 h 00	Debut	7 h 15	7 h 00	Debut	00h00
	Fin	8 h 00	Fin	8 h 00	7 h 30	Fin	03h35
	Debut	18 h 00	Debut	19 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	Fin	23 h 00		Fin	
Mercredi	Debut	7 h 00	Debut	7 h 15	7 h 00	Debut	00h00
	Fin	8 h 00	Fin	8 h 00	7 h 30	Fin	03h35
	Debut	18 h 00	Debut	19 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	Fin	23 h 00		Fin	
Jeudi	Debut	7 h 00	Debut	7 h 15	7 h 00	Debut	00h00
	Fin	8 h 00	Fin	8 h 00	7 h 30	Fin	03h35
	Debut	18 h 00	Debut	19 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	Fin	23 h 00		Fin	
Vendredi	Debut	7 h 00	Debut	7 h 15	7 h 00	Debut	00h00
	Fin	8 h 00	Fin	8 h 00	7 h 30	Fin	03h35
	Debut	18 h 00	Debut	19 h 00		Debut	
	Fin	23 h 00	Fin	23 h 00		Fin	
Samedi	Debut	8 h 00	Debut	19 h 00	23 h 30	Debut	00h00
	Fin	23 h 45	Fin	23 h 50	23 h 55	Fin	03h35
	Debut		Debut			Debut	
	Fin		Fin			Fin	
Dimanche	Debut	8 h 00	Debut	19 h 00	23 h 30	Debut	00h00
	Fin	23 h 45	Fin	23 h 50	23 h 55	Fin	03h35
	Debut		Debut			Debut	
	Fin		Fin			Fin	

		Douche 1	Douche 2	Evier SDB	Evier Cuisine
Lundi	Debut	07:05	18:05	07:10	07:40
	Fin	07:10	18:10	07:15	07:45
	Debut			22:50	19:45
	Fin			22:55	19:50
Mardi	Debut	07:05	18:05	07:10	07:40
	Fin	07:10	18:10	07:15	07:45
	Debut			22:50	19:45
	Fin			22:55	19:50
Mercredi	Debut	07:05	18:05	07:10	07:40
	Fin	07:10	18:10	07:15	07:45
	Debut			22:50	19:45
	Fin			22:55	19:50
Jeudi	Debut	07:05	18:05	07:10	07:40
	Fin	07:10	18:10	07:15	07:45
	Debut			22:50	19:45
	Fin			22:55	19:50
Vendredi	Debut	07:05	18:05	07:10	07:40
	Fin	07:10	18:10	07:15	07:45
	Debut			22:50	19:45
	Fin			22:55	19:50
Samedi	Debut	08:05	18:05	08:10	08:40
	Fin	08:10	18:10	08:15	08:45
	Debut			23:50	19:45
	Fin			23:55	19:50
Dimanche	Debut	08:05	18:05	08:10	08:40
	Fin	08:10	18:10	08:15	08:45
	Debut			23:50	19:45
	Fin			23:55	19:50

Annexe 6 Fiche produit du ballon d'eau chaude Vaillant utilisé pour la simulation



Fiche technique: uniSTOR VIH R 120 - 150 - 200/6 B

spécifications

- préparateur indirect sol avec cuve en acier
- protection par anode en magnésium
- modèle cylindrique
- optimisé pour les chaudières murales et les chaudières sol Vaillant

applications

- les préparateurs d'eau chaude sanitaire uniSTOR sont destinés exclusivement à l'alimentation en eau potable chauffée jusqu'à max. 85 °C (température d'eau sanitaire) pour usage domestique
- une solution appropriée pour tout les types d'habitations, de l'appartement à la maison uni-familiale

équipements

- cuve en acier émaillée
- serpentin en acier émaillée
- protection par anode en magnésium
- temps de chauffe très court grâce à l'échangeur à serpentin
- isolation en mousse de polyuréthane (PUR)
- vanne de vidange
- sur le départ chauffage un clapet anti-retour
- raccord boucle sanitaire
- couleur blanc

régulation

- en combinaison avec les séries des chaudières 'chauffage uniquement' la production d'eau chaude sanitaire peut être gérée à partir de la chaudière (priorité sanitaire incorporée)
 - chaudière murale < 40 kW équipée d'une vanne diviseuse pour la priorité sanitaire
 - chaudière murale > 40 kW équipée d'une commande d'une pompe de charge (circulateur externe à prévoir)
- en combinaison avec un régulateur climatique de Vaillant les plages horaires de la production d'eau chaude sanitaire peuvent être programmées à partir des régulateurs correspondants:
 - régulations à sonde extérieure: multiMATIC VRC 700, calorMATIC VRC 450, calorMATIC VRC 450f, calorMATIC VRC 630, auroMATIC VRS 620
 - thermostat d'ambiance modulant eBUS: calorMATIC VRT 370, calorMATIC VRT 370f, calorMATIC VRT 350 et calorMATIC VRT 350f

contenu de la livraison

- 1x préparateur complètement monté
- 1x coude 90° avec clapet anti-retour
- 1x pochette avec les manuels

combinaison chaudière-préparateur conseillée

- la puissance de la chaudière (kW) se trouve entre 30 et 110% de la puissance du serpentin du préparateur sanitaire (kW)
- une combinaison est à déconseillée si la puissance de la chaudière est inférieure de 25% ou supérieure de 135% à la puissance du serpentin du préparateur sanitaire (kW)

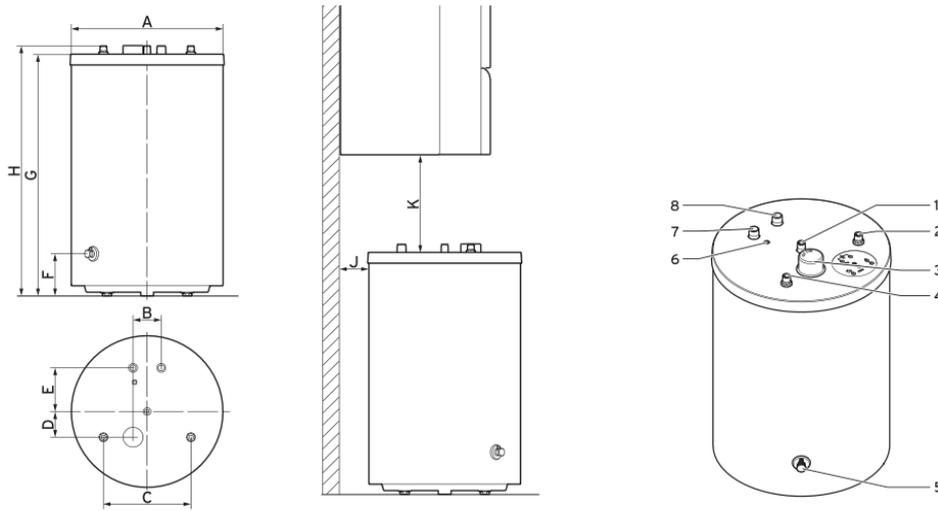
accessoires

- sonde sanitaire (code 306257)
- allonge câble pour sonde sanitaire (code 306269)
- groupe de sécurité sanitaire 7 bar (code 2328246)
- réducteur de pression sanitaire 4 bars (code 2328247)

Modèles	Description	Capacité	Numéro d'article
uniSTOR	VIH R 120/6 B	117 l	0010015943
uniSTOR	VIH R 150/6 B	144 l	0010015944
uniSTOR	VIH R 200/6 B	184 l	0010015945



Dimensions et points de raccordement



modèle	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K*
VIH R 120							820	853		338
VIH R 150	590	110	340	100	169	161	955	988	110	203
VIH R 200							1.173	1.206		-

en mm * en combinaison avec une ecoTEC plus/pro VC .../5

légende:

- 1 raccord boucle sanitaire
- 2 raccord eau froide
- 3 anode de protection
- 4 raccord eau chaude
- 5 vanne de vidange
- 6 doigt de gant pour sonde
- 7 raccord départ préparateur
- 8 raccord retour préparateur

Caractéristiques techniques uniSTOR .../6		VIH R 120 B	VIH R 150 B	VIH R 200 B
capacité utile	l	114	144	184
consommation d'entretien stand-by (selon Erp)	W (kWh/24h)	40 (0,96)	47 (1,1)	55,8 (1,3)
classe énergétique sanitaire		B	B	B
pression d'eau sanitaire max.	bar	10,0		
pression d'eau primaire max.	bar	10,0		
température sanitaire max.	°C	85		
puissance chaudière min. et max.	kW	11,1 - 30,9	12,9 - 35,9	14,8 - 41,4
surface serpentin	m ²	0,7	0,9	1,0
capacité serpentin	l	4,8	5,7	6,8
débit de pointe à température de puisage 45°C, t. préparateur 50°C	l/10 min	137,0	166,0	220,0
débit de pointe à température de puisage 45°C, t. préparateur 55°C	l/10 min	155,0	186,0	244,0
débit de pointe à température de puisage 45°C, t. préparateur 60°C	l/10 min	163,0	199,0	261,0
débit de puisage en continu à une t. d'alimentation de 80° ¹⁾	l/h (kW)	527 (22)	674 (26)	829 (30)
pertes de charge serpentin (débit nominal 1.400 l/h et ΔT 20)	mbar	17,0	20,0	22,0
temps d'échauffement de 10 à 50 °C	min	15,8	18,8	20,8
temps d'échauffement de 10 à 60 °C	min	23,3	27,5	30,8
raccord départ/retour	R	1"		
raccord eau chaude/froide et boucle sanitaire	R	¾"		
hauteur (raccords compris)	mm	853	988	1.206
diamètre	mm	590	590	590
pois à vide	mm	68	79	97
pois à rempli	kg	185	223	281

R = filetage extérieur (mâle) / Rp = filetage intérieur (femelle) / G = filetage extérieur à bride
 1) température de puisage 45°C, température préparateur 60°C et température eau froide 10°C

Vaillant SA rue Golden Hope 15 B-1620 Drogenbos T +32-2-334.93.00 www.vaillant.be info@vaillant.be (Vai_89_FT_uniSTOR_VIHR120-200B_00)

VERSION 04/2018 - SOUS RÉSERVE DE MODIFICATIONS

Annexe 7 Fiche produit du ballon d'eau chaude Vaillant utilisé pour la simulation

Sunmodule⁺™

SW 240 poly

Version 2.0 and 2.5 Frame



WORLD CLASS QUALITY

Fully-automated production lines and seamless monitoring of the process and material supply ensure high standards worldwide.



SOLARWORLD PLUS SORTING

Plus-sorting guarantees the highest system efficiency. Only modules that achieve the designated nominal performance or greater in performance tests are dispatched.

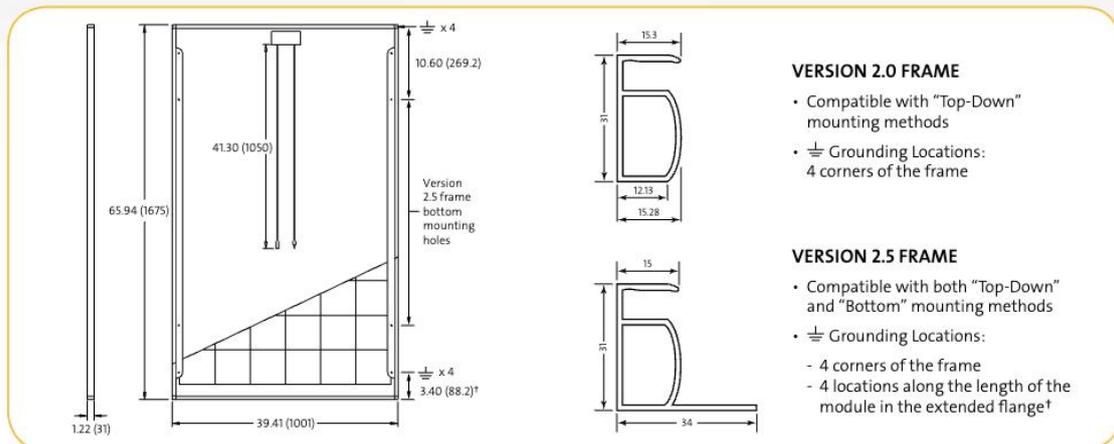


25-YEAR LINEAR PERFORMANCE GUARANTEE*

SolarWorld guarantees a maximum degeneration in performance of 0.7% per year for more than 25 years – a clear additional benefit compared with the conventional two-step industry guarantees. In addition there is a product workmanship warranty that covers 5 years.

PHYSICAL CHARACTERISTICS

Cells per module	60	Frame	Clear anodized aluminum
Cell type	Poly crystalline	Weight	46.7 lbs (21.2 kg)
Cell dimensions	6.14 in x 6.14 in (156 mm x 156 mm)	UL Maximum Test Load**	50 psf (2.4kN/m ²)
Front	Tempered glass (EN 12150)	IEC Maximum Snow Test Load**	113 psf (5.4kN/m ²)



* In accordance with the applicable SolarWorld Limited Warranty at purchase. www.solarworld.com

** Please apply the appropriate factors of safety according to the test standard and local building code requirements when designing a PV system.

www.solarworld.com

SOLARWORLD
We turn sunlight into power.

Sunmodule⁺™

SW 240 poly

Version 2.0 and 2.5 Frame

SW-01-5010US 03-2011

PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*

		SW 240
Maximum power	P_{max}	240 Wp
Open circuit voltage	V_{OC}	37.2 V
Maximum power point voltage	V_{MPP}	30.2 V
Short circuit current	I_{SC}	8.44 A
Maximum power point current	I_{MPP}	7.96 A

*STC: 1000W/m², 25°C, AM 1.5

PERFORMANCE AT 800 W/m², NOCT, AM 1.5

		SW 240
Maximum power	P_{max}	174.2 Wp
Open circuit voltage	V_{OC}	33.7 V
Maximum power point voltage	V_{MPP}	27.4 V
Short circuit current	I_{SC}	6.80 A
Maximum power point current	I_{MPP}	6.37 A

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25° C: at 200 W/m², 95% (+/-3%) of the STC efficiency (1000 W/m²) is achieved.

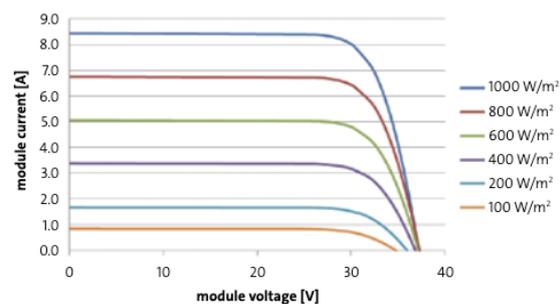
THERMAL CHARACTERISTICS

NOCT	46° C
TC I_{SC}	0.034 %/K
TC V_{OC}	-0.34 %
TC P_{MPP}	-0.48 %
Operating range	-40°C to 90°C

SYSTEM INTEGRATION PARAMETERS

Maximum system voltage SC II	1000 V
Maximum system voltage USA NEC	600 V
Maximum series fuse rating	16 A
Number of bypass diodes	3

I-V CURVE AT 25°C CELL TEMPERATURE



ADDITIONAL DATA

Measuring tolerance ³⁾	+/- 3%
SolarWorld Plus-Sorting ³⁾	$P_{Flash} \geq P_{max}$
Junction box	IP65
Connector	MC4
Module efficiency	14.61%
Fire rating (UL 790)	Class C

GROUNDING

We recommend using the following components:

FRAME 2.0/2.5 (CORNERS)

Item	Manufacturer/Description	Tightening torque
Grounding lug	ILsco GBL-4DBT	35 lbf-in, 4-6 AWG str 25 lbf-in, 8 AWG str 20 lbf-in, 10-14 AWG sol/str
Socket head cap screw	#10-24, 5/8", SS 18-8	62 lbf-in (7.0 Nm)

FRAME 2.5 (FLANGE)

Item	Manufacturer/Description
Grounding lug	ILsco GBL-4DBT
Bolt	#10-32, SS
Serrated Washer	#10, SS
Washer	ID 13/64", OD 7/16"
Nut	#10-32, SS

Any PV grounding method and components listed to meet NEC grounding requirements are also acceptable.



1) The output identified by SolarWorld (P_{Flash}) is always higher than the nominal output (P_{max}) of the module. P_{Flash} is the power rating flashed at a SolarWorld manufacturing facility.

2) Depending on the market.

3) Measuring tolerance is used in conjunction with the SolarWorld Limited Warranty. SolarWorld AG reserves the right to make specification changes without notice.

Annexe 8 Graphique des températures des deux zones habitables analysées (le rez-de-chaussée en orange et l'étage en vert). En comparaison avec la température extérieure du fichier externe d'Arlon 2021

