

Etude des solutions techniques et des coûts financiers des logements zéro-énergie : Benchmarking de cas d'étude et analyse des coûts de cycle de vie d'un immeuble à appartements

Auteur : Bruyns, Brice

Promoteur(s) : Reiter, Sigrid

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13298>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées



ÉTUDE DES SOLUTIONS TECHNIQUES ET DES COÛTS FINANCIERS DES LOGEMENTS ZÉRO ÉNERGIE :

Benchmarking de cas d'étude et analyse des coûts du
cycle de vie d'un immeuble à appartements

BRUYNS Brice

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil Architecte

Année académique 2020-2021

Promotrice :

Prof. REITER Sigrid

Jury :

Prof. ATTIA Shady - Prof. COURARD Luc - PhD. REUTER Iris

ABSTRACT

In order to respond to the climate challenges that are increasingly felt across the world, the Energy Performance Building Directive (EPBD) has continued, since its creation in 2002, to publish a series of directives and recommendations aimed at improving the building energy efficiency. With the translation by the Walloon authorities of the latest revisions of the Directive, any new dwelling must meet NZEB (Nearly Zero Energy Building) standards since 2021 to give Europe a chance to reach its 40% greenhouse gas emissions reduction targeted by 2030 compared to the 1990 level.

This new regulation raises some questions about the design of buildings, both technically, economically and environmentally. This work focuses on the technical aspects and the short- and long-term financial costs for construction in the residential sector. Thus, the first intention of the thesis is to explore the techniques most commonly encountered to achieve almost zero energy consumption. Then, the second objective seeks to determine an average construction price required to build according to these new standards. Finally, a third question examines whether zero energy requirements are economically favourable for the short- and long-term budget of the individual.

The first two questions are studied through the establishment of a benchmark completed with nearly zero energy residential buildings and selected according to specific criteria that allow a comparison. All of the analysed case studies come from the Construction21 collaborative platform. Several data relative to the characteristics of the building envelope and technical equipment were extracted and compared in order to identify trends in the construction of NZEB dwellings. As construction costs are also available on the Construction21 tool, these have been compiled in order to derive a median value for single-family houses and multi-family dwellings.

The second part of the thesis draw links between technical and financial considerations. A case study was selected according to the same criteria as those used in the benchmark. Different scenarios gradually tending towards zero energy were modelled in order to observe the impacts of ZEB requirements on construction costs, but also on long-term expenditure. A life cycle cost (LCC) analysis over a period of 40 years was carried out for each of the scenarios in order to determine which strategies can improve the energy consumption of buildings while limiting the impact on financial costs. The energy consumption was determined using DesignBuilder software and its EnergyPlus calculation engine. Finally, the modelled zero energy scenario is compared to the benchmarking results in order to see if this fits in with the conclusions drawn in the first part of the thesis.

The work ends with a discussion summarising the various results, indicating the limits of the study, and by suggesting aspects that could be considered to carry further research on the theme.

RÉSUMÉ

Afin de répondre aux enjeux climatiques qui se font de plus en plus ressentir à travers le monde, la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) n'a cessé, depuis sa création en 2002, de publier toute une série de directives et recommandations visant à renforcer l'efficacité énergétique des bâtiments. Avec la traduction par les autorités wallonnes des dernières révisions de la Directive, toute nouvelle habitation doit répondre depuis 2021 aux normes QZEN (Quasi Zéro Énergie) afin de donner une chance à l'Europe d'atteindre d'ici 2030 ses objectifs de 40% de réduction des gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990.

Cette nouvelle réglementation soulève toute une série de questionnements sur la conception des bâtiments, tant au niveau technique, économique et environnemental. Ce travail se concentre sur les aspects techniques et les coûts financiers à court et long terme pour la construction dans le secteur résidentiel. Ainsi, la première intention du mémoire consiste à explorer les techniques les plus couramment rencontrées pour atteindre des consommations énergétiques quasi nulles. Ensuite, le second objectif cherche à déterminer un prix de construction moyen nécessaire pour bâtir selon ces nouvelles normes. Enfin, une dernière question examine si les exigences zéro énergie sont économiquement favorables sur le budget à court et long terme du particulier.

Les deux premières questions sont étudiées à travers la réalisation d'un benchmarking de bâtiments résidentiels considérés comme très performants et sélectionnés selon une série de critères qui permettent une comparaison. Tous les cas d'étude analysés sont issus de la plateforme collaborative Construction21. Plusieurs données propres aux caractéristiques de l'enveloppe des bâtiments et aux équipements techniques ont été extraites et comparées afin de dégager des tendances sur les mises en œuvre qui permettent d'atteindre les niveaux QZEN. Les coûts de construction étant également disponibles sur l'outil Construction21, ceux-ci ont été compilés afin d'en retirer une valeur médiane pour les maisons individuelles et les logements collectifs.

La seconde partie du mémoire permet de tirer des liens entre considérations techniques et financières. Un cas d'étude a été sélectionné selon les mêmes critères que ceux qui ont servi à établir le benchmarking. Différents scénarios tendant progressivement vers le zéro énergie ont été modélisés afin d'évaluer les impacts de cette exigence sur les coûts de construction, mais également sur les dépenses à long terme. Pour ce faire, une analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) sur une période de 40 ans a été réalisée pour chacun des scénarios afin de déterminer quelles sont les stratégies qui permettent d'améliorer la consommation des bâtiments tout en limitant l'impact sur les coûts. Les consommations énergétiques ont quant à elles été déterminées à l'aide du logiciel DesignBuilder et son moteur de calcul EnergyPlus. Enfin, le scénario zéro énergie modélisé est comparé aux résultats du benchmarking afin de voir si celui-ci s'inscrit dans les conclusions tirées dans la première partie du mémoire.

Le travail se conclut sur une discussion synthétisant les différents résultats, pointant notamment les limites de l'étude, et en annonçant les perspectives qui pourraient être envisagées afin de poursuivre la recherche sur la thématique.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements sont adressés à l'égard de Madame Sigrid Reiter, ma promotrice, autant pour ses précieux conseils que pour la confiance accordée dans le balisage de ce travail.

Je remercie aussi Monsieur Damien Franzen pour l'accès donné à ses documents et Charline Malmedy pour le partage et les explications de son travail.

Je tiens également à remercier Monsieur Shady Attia, Monsieur Luc Courard et Madame Iris Reuter, tous trois membres de mon jury, pour le temps consacré à la lecture de ce travail.

Merci également à mes proches pour l'attention et les encouragements adressés.

Enfin, j'adresse mes remerciements à Helena Sadzot pour ses longues relectures et son soutien indéfectible pendant ces années d'étude.

TABLE DES ABRÉVIATIONS

ACCV	Analyse des Coûts du Cycle de Vie
Ach	Surface de plancher chauffée
EnR	Énergie Renouvelable
EP	Énergie Primaire
GES	Gaz à Effet de Serre
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
PAC	Pompe à chaleur
PEB	Performance Énergétique des Bâtiments
PT	Panneau solaire thermique
PV	Panneau photovoltaïque
SDP	Surface De Plancher
SHAB	Surface habitable
SHON	Surface Hors Œuvre Nette
TFA	Treated Floor Area
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : CONCENTRATION DE CO ₂ DANS L'ATMOSPHÈRE MESURÉ À L'OBSERVATOIRE DE MAUNA LOA (GML, 2021)	10
FIGURE 2 : ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO ₂ EN BELGIQUE (GLOBAL CARBON ATLAS, 2021)	11
FIGURE 3: ÉVOLUTION DU PRIX DE L'IMMOBILIER EN BELGIQUE ENTRE 2010 ET 2020 DONNÉES EXTRAITES DE « PRIX DE L'IMMOBILIER » PAR STATBEL (2021).....	13
FIGURE 4: COMPARAISON DES NIVEAUX D'EXIGENCES FIXÉES POUR LE QZEN AVEC LES VALEURS RECOMMANDÉES PAR LA COMMISSION GRAPHIQUE ISSU DE « ÉVALUATION EN 2020 DES PROGRÈS ACCOMPLIS PAR LES ÉTATS MEMBRES DANS LA MISE EN ŒUVRE DE LA DIRECTIVE 2012/27/UE » PAR LA COMMISSION (2020, P.11)	16
FIGURE 5: STRATÉGIE DE RÉNOVATION DU PARC DE BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS D'ICI 2050 EXTRAIT DE « RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE 2050 : VOICI LE PASSEPORT BÂTIMENT » PAR RENOUVELLE (2017)	17
FIGURE 6: ÉVOLUTION DU COEFFICIENT K ET DU NIVEAU EW AU COURS DU TEMPS GRAPHIQUE EXTRAIT DE « EXIGENCES QZEN 2021 (2019 POUR LES BÂTIMENTS PUBLICS) » PAR ENERGIEPLUS (2018)	19
FIGURE 7: SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT DU MUR TROMBE ET DE LA CHEMINÉE SOLAIRE FIGURE EXTRAITE DE « A REVIEW OF PERFORMANCE OF ZERO ENERGY BUILDINGS AND ENERGY EFFICIENCY SOLUTIONS » PAR BELUSSI ET AL. (2019)	21
FIGURE 8: ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE MONDIALE ENTRE 2000 ET 2019 DONNÉES EXTRAITES DE « SOLAR PV POWER GENERATION IN THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT SCENARIO, 2000-2030 » PAR L'AIE (2020).....	22
FIGURE 9: PLAN DE TRAVAIL DU MÉMOIRE	28
FIGURE 10 : CAS D'ÉTUDES SITUÉS EN EUROPE CENTRALE ET OUEST. EXTRAIT DE « CASE STUDIES », PAR CONSTRUCTION21 INTERNATIONAL.	31
FIGURE 11 : CLASSIFICATION KÖPPEN-GEIGER DE L'EUROPE DE L'OUEST EXTRAIT DE « PRESENT AND FUTURE KÖPPEN-GEIGER CLIMATE CLASSIFICATION MAPS AT 1-KM RESOLUTION » PAR H. BECK ET AL. (2018)	35
FIGURE 12: ÉVOLUTION DE L'EFFECTIF DU BENCHMARKING EN FONCTION DES CRITÈRES D'ÉCHANTILLONNAGE.....	37
FIGURE 13: OCCURRENCES DE PV ET PT EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP.....	39
FIGURE 14: OCCURRENCES DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP.....	41
FIGURE 15: OCCURRENCES DES SYSTÈMES DE PRODUCTION DE L'ECS EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP	42
FIGURE 16: COEFFICIENT DE DÉPERDITION MOYEN EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP HORS ENR.....	43
FIGURE 17: TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP HORS ENR.....	44
FIGURE 18: COÛTS DE CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS ZEN ET QZEN EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP	45
FIGURE 19: COÛTS DE CONSTRUCTION DES BÂTIMENTS ZEN ET QZEN EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP (ÉCHANTILLON CERTIFIÉ)	46
FIGURE 20: EFFET GROUPÉ DES VARIABLES SUR LE NIVEAU DE CONSOMMATION D'EP.....	49
FIGURE 21: MASTERPLAN ÉCOQUARTIER DU SART-TILMAN EXTRAIT DE « SART-TILMAN » PAR &SENS (2017)	51
FIGURE 22: PLAN DU RDC DE LA RÉSIDENCE AROLA - DOCUMENT FOURNI PAR L'ARCHITECTE DAMIEN FRANZEN	53
FIGURE 23: PLAN DU R+1 DE LA RÉSIDENCE AROLA - DOCUMENT FOURNI PAR L'ARCHITECTE DAMIEN FRANZEN.....	54
FIGURE 24: PLAN DU R+2 DE LA RÉSIDENCE AROLA - DOCUMENT FOURNI PAR L'ARCHITECTE DAMIEN FRANZEN.....	54
FIGURE 25: PLAN DES COMBLES DE LA RÉSIDENCE AROLA - DOCUMENT FOURNI PAR L'ARCHITECTE DAMIEN FRANZEN	55
FIGURE 26: VUE DES FAÇADES SUD ET EST DE LA RÉSIDENCE AROLA EXTRAIT DE « SART-TILMAN » PAR &SENS (2017)	55
FIGURE 27: VUE 3D DES FAÇADES NORD ET EST DU MODÈLE GÉNÉRÉ AVEC DESIGNBUILDER	56
FIGURE 28: SCHÉMA HVAC DE CHAQUE APPARTEMENT DE LA RÉSIDENCE AROLA FIGURE RÉALISÉE SUR LE LOGICIEL DESIGNBUILDER	65
FIGURE 29: VUE 3D DES PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES MODÉLISÉE AVEC DESIGNBUILDER.....	83
FIGURE 30: VUE 3D DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE DE 6kWc MODÉLISÉE AVEC DESIGNBUILDER	84
FIGURE 31: VUE 3D DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE DE 12kWc MODÉLISÉE AVEC DESIGNBUILDER	85
FIGURE 32: CONSOMMATIONS DES DIFFÉRENTS POSTES DE LA SITUATION EXISTANTE DE LA RÉSIDENCE AROLA.....	86
FIGURE 33: DÉCOMPOSITION DES COÛTS DE LA SITUATION EXISTANTE DE LA RÉSIDENCE AROLA.....	87
FIGURE 34: COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO E.1	88
FIGURE 35: COMPARAISON DES COÛTS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO E.1.....	89
FIGURE 36: COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO E.2	90
FIGURE 37: COMPARAISON DES COÛTS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO E.2.....	91
FIGURE 38: COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO S.1	92
FIGURE 39: COMPARAISON DES COÛTS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO S.1	93

FIGURE 40: COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO S.2	94
FIGURE 41: COMPARAISON DES COÛTS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO S.2	95
FIGURE 42: COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO S.3	96
FIGURE 43: COMPARAISON DES COÛTS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO S.3	97
FIGURE 44: COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO NETZEN	98
FIGURE 45: COMPARAISON DES COÛTS ENTRE LA SITUATION EXISTANTE ET LE SCÉNARIO NETZEN	99
FIGURE 46: COÛTS DE CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP	101
FIGURE 47: COÛTS DE CONSTRUCTION DE BÂTIMENTS ISSUS DU BENCHMARKING EN FONCTION DE LA CONSOMMATION EN EP	102
FIGURE 48: COMPARAISON DES SCÉNARIOS SUR LEUR RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE AU NIVEAU DES COÛTS DE CONSTRUCTION	103
FIGURE 49: COMPARAISON DES SCÉNARIOS SUR LEUR RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE AU NIVEAU DES COÛTS DE CYCLE DE VIE	104

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: CRITÈRES DE RÉFÉRENCE RECOMMANDÉS PAR LA COMMISSION POUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE DONNÉES EXTRAITES DE « RECOMMANDATION (UE) 2016/1318 » PAR LA COMMISSION	15
TABLEAU 2: DONNÉES DISPONIBLES CONSTRUCTION21	32
TABLEAU 3 : CRITÈRES DE SÉLECTION DU BENCHMARKING	33
TABLEAU 4: PRÉSENTATION DES CAS D'ÉTUDE DU BENCHMARKING ZEN.....	39
TABLEAU 5: SCORE DES VARIABLES DE 7 PROJETS ISSUS DU BENCHMARKING	48
TABLEAU 6: VÉRIFICATIONS DES CRITÈRES DE SÉLECTION POUR LA RÉSIDENCE AROLA	52
TABLEAU 7: DIFFÉRENTES SUPERFICIES MESURÉES DE LA RÉSIDENCE AROLA	57
TABLEAU 8: COMPOSITION DES PAROIS ET PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX	58
TABLEAU 9: PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES MATÉRIAUX SOUMIS AU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	59
TABLEAU 10: PONTS THERMIQUES LINÉIQUES DE LA RÉSIDENCE AROLA	60
TABLEAU 11: CALCUL DU DÉBIT D'AIR NEUF POUR TOUT LE BÂTIMENT	64
TABLEAU 12: COMPARAISON DES RÉSULTATS AVEC LE MÉMOIRE DE C. MALMEDY	66
TABLEAU 13: ACTUALISATION DES VALEURS DES PONTS THERMIQUES LINÉIQUES DE LA RÉSIDENCE AROLA VALEURS EXTRAITES DE « CATALOGUE DES PONTS THERMIQUES » PAR SUISSEÉNERGIE (2003).....	68
TABLEAU 14: ACTUALISATION DES VALEURS DES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES MATÉRIAUX DONNÉES EXTRAITES DE « DONNÉES PRODUITS PEB RECONNUES » PAR EPBD (2021)	69
TABLEAU 15: COMPARAISON DES DIFFÉRENTS CALIBRAGES DE MODÉLISATION	70
TABLEAU 16: COÛTS INTÉGRÉS DANS L'ACCV DE LA RÉSIDENCE AROLA	73
TABLEAU 17: ÉVOLUTION ANNUELLE DE L'INDICE ABEX DONNÉES EXTRAITES DE « ABEX – INDICE » PAR ABEX (2021)	75
TABLEAU 18: ÉVOLUTION ANNUELLE DU PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ EN WALLONIE DONNÉES EXTRAITES DE « ÉVOLUTION DES PRIX » PAR APERE.....	75
TABLEAU 19: ÉVOLUTION ANNUELLE DU PRIX DU GAZ EN WALLONIE DONNÉES EXTRAITES DE « ÉVOLUTION DES PRIX » PAR APERE	76
TABLEAU 20: ÉVOLUTION ANNUELLE DU TAUX D'INTÉRÊT À LONG TERME EN BELGIQUE DONNÉES EXTRAITES DE « PRÉVISIONS DES TAUX D'INTÉRÊT À LONG TERME » PAR L'OCDE (2021).....	76
TABLEAU 21: PRIX DES ÉQUIPEMENTS HVAC DE LA RÉSIDENCE AROLA - CAS INITIAL	78
TABLEAU 22: ÉPAISSEUR D'ISOLANT ET VALEUR U PROJETÉE POUR LE SCÉNARIO E.1 VALEURS U_{MAX} EXTRAITES DE « EXIGENCES PEB DU 1 ^{ER} JANVIER 2014 AU 30 AVRIL 2015 » PAR WALLONIE ÉNERGIE.....	80
TABLEAU 23: PROPRIÉTÉS DU TRIPLE VITRAGE DU SCÉNARIO E.2 VALEURS DE LA SITUATION PROJETÉE EXTRAITES DE « E-GREEN » PAR SPRIMOGLASS.....	81
TABLEAU 24: RÉCAPITULATIF DES SYSTÈMES ET DES INDICATEURS CARACTÉRISTIQUES D'UNE ENVELOPPE.....	101
TABLEAU 25: ÉVALUATION FINALE DES SCÉNARIOS DE LA RÉSIDENCE AROLA	105
TABLEAU 26: BENCHMARKING LOGEMENTS ZEN - CAS D'ÉTUDE 1 À 19 (PARTIE1). DONNÉES ISSUES DE « CASE STUDIES » PAR CONSTRUCTION21.	6
TABLEAU 27: : BENCHMARKING ZEN - CAS D'ÉTUDE 1 À 19 (PARTIE2). DONNÉES ISSUES DE « CASE STUDIES » PAR CONSTRUCTION21.	7
TABLEAU 28: BENCHMARKING ZEN - CAS D'ÉTUDE 20 À 35 (PARTIE1). DONNÉES ISSUES DE « CASE STUDIES » PAR CONSTRUCTION21.	8
TABLEAU 29: BENCHMARKING ZEN - CAS D'ÉTUDE 20 À 35 (PARTIE2). DONNÉES ISSUES DE « CASE STUDIES » PAR CONSTRUCTION21.	9
TABLEAU 30: DURÉE DE VIE ET COÛT DE MAINTENANCE DES ÉQUIPEMENTS HVAC DONNÉES ISSUES DE LA NORME EN 15459:2018	19
TABLEAU 31: RÉSULTATS DE LA SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE ET DE L'ACCV : SITUATION EXISTANTE ET SCÉNARIOS.....	20

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ABRÉVIATIONS	4
LISTE DES FIGURES	5
LISTE DES TABLEAUX	7
1. INTRODUCTION.....	10
1.1 ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO ₂ DANS LE MONDE	10
1.2 ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO ₂ EN BELIGQUE ET RÉPARTITION SELON LES SECTEURS.....	11
1.3 L'ENGAGEMENT EUROPÉEN DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE	12
1.4 COÛTS DU BÂTIMENT POUR LES MÉNAGES BELGES	12
2. ÉTAT DE L'ART.....	14
2.1 DÉFINITION DES BÂTIMENTS ZÉRO ÉNERGIE	14
2.2 ÉVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION PEB EN WALLONIE.....	17
2.3 SURVOL DE TECHNIQUES UTILISÉES POUR ATTEINDRE LE ZÉRO ÉNERGIE	20
2.3.1 <i>Stratégies visant à réduire la demande énergétique.....</i>	<i>20</i>
2.3.2 <i>Stratégies visant la production à partir des énergies renouvelables.....</i>	<i>22</i>
2.3.3 <i>Stratégies d'optimisation de la consommation d'énergie.....</i>	<i>24</i>
2.4 ÉVALUATION DU COÛT ÉCONOMIQUE DES BÂTIMENTS.....	25
3. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DU MÉMOIRE	27
3.1 QUESTIONS DE RECHERCHE :	27
3.2 PLAN DE TRAVAIL	27
3.3 CHOIX DU LOGICIEL POUR LA MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE	29
4. MÉTHODOLOGIE DU BENCHMARKING.....	30
4.1 PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES.....	30
4.2 DONNÉES ACCESSIBLES DES FICHES DESCRIPTIVES.....	31
4.3 CHOIX DES CRITÈRES DE SÉLECTION.....	33
5. RÉSULTATS DU BENCHMARKING	37
5.1 TAILLE ET DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON	37
5.2 ANALYSE DES DONNÉES RÉCOLTÉES	39
5.2.1 <i>Système HVAC et EnR</i>	<i>39</i>
5.2.2 <i>Performance de l'enveloppe</i>	<i>43</i>
5.2.3 <i>Coûts de construction</i>	<i>44</i>
5.2.4 <i>Effet combiné des variables.....</i>	<i>47</i>
6. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE	50
6.1 LIEN ENTRE LE BENCHMARKING ET L'ACCV DU CAS D'ÉTUDE.....	50
6.2 CRITÈRES ET CHOIX DU CAS D'ÉTUDE.....	50
6.3 DESCRIPTION DU SITE ET DU BÂTIMENT	51
7. MÉTHODOLOGIE DE LA MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE.....	56
7.1 ENCODAGE DES DONNÉES	56

7.1.1	Données géométriques	56
7.1.2	Paramétrage des éléments de construction	58
7.1.3	Paramétrage des ouvertures	60
7.1.4	Conditions climatiques et confort thermique intérieur	60
7.1.5	Paramétrage des données sur l'activité du bâtiment.....	61
7.1.6	Paramétrage du système d'éclairage.....	62
7.1.7	Paramétrage des systèmes HVAC.....	63
7.2	VALIDATION DU CAS DE BASE ET CALIBRATION	65
7.2.1	Vérification des premiers résultats.....	65
7.2.2	Ajustement des paramètres	68
8.	MÉTHODOLOGIE DE L'ACCV	71
8.1	PRÉSENTATION DE L'OUTIL CRAVEZERO	71
8.2	COÛTS COMPRIS DANS L'ACCV DE L'ÉTUDE	71
8.3	HYPOTHÈSES ÉCONOMIQUES.....	74
8.4	HYPOTHÈSES DES COÛTS DE CONSTRUCTION ET DES ÉQUIPEMENTS	77
8.5	HYPOTHÈSE DES COÛTS DE MAINTENANCE	78
9.	CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS.....	79
9.1	SCÉNARIOS VISANT À RÉDUIRE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE.....	79
9.2	SCÉNARIOS VISANT À RÉDUIRE LES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES.....	81
10.	RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS ÉNERGÉTIQUES ET DE L'ACCV	86
10.1	SITUATION EXISTANTE	86
10.2	SCÉNARIO E.1 : PAROIS PEB 2014.....	88
10.3	SCÉNARIO E.2 : FENÊTRES TRIPLE VITRAGE	90
10.4	SCÉNARIO S.1 : POMPE À CHALEUR.....	92
10.5	SCÉNARIO S.2 : COUPLAGE AVEC PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES	94
10.6	SCÉNARIO S.3 : INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE	96
10.7	SCÉNARIO NETZEN : COMBINAISON DE PLUSIEURS STRATÉGIES	98
11.	DISCUSSIONS DES RÉSULTATS DU BENCHMARKING ET DE L'ACCV	100
11.1	LES SYSTÈMES DU ZÉRO ÉNERGIE	100
11.2	PRIX DE CONSTRUCTION DU ZEN	101
11.3	LES COÛTS DE LA CONVERSION AU ZEN.....	103
11.3.1	Impacts sur l'investissement initial.....	103
11.3.2	Impact sur le coût de cycle de vie	104
11.4	LIMITES DE L'ÉTUDE	106
12.	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE	108
13.	BIBLIOGRAPHIE	
14.	ANNEXES	

1. INTRODUCTION

1.1 ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ DANS LE MONDE

Depuis 1995, la lutte contre le réchauffement climatique est rythmée par les COP (Conference of the Parties). Sur base des diagnostics posés par les experts du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) toujours plus alarmistes, les COP sont apparus plus ou moins ambitieuses au fil des années. La plus prometteuse reste la COP21 qui s'est tenue en 2015 à Paris, où les États engagés se sont mis d'accord pour contenir le réchauffement climatique en dessous des 2°C par rapport à l'ère préindustrielle (Lepercq, 2021).

Les effets de ces COP sont difficilement perceptibles sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre tant celle-ci croît inexorablement, d'année en année. Ainsi à l'échelle du globe, les émissions sont passées de 23,3 GTCO₂ en 1995 (année de la première COP) à 36,4 GTCO₂ en 2019, soit une augmentation de 56% en seulement 24 ans (Friedlingstein et al., 2020).

L'évolution de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère suit quant à elle une trajectoire exponentielle (et donc plus inquiétante encore) depuis des décennies.

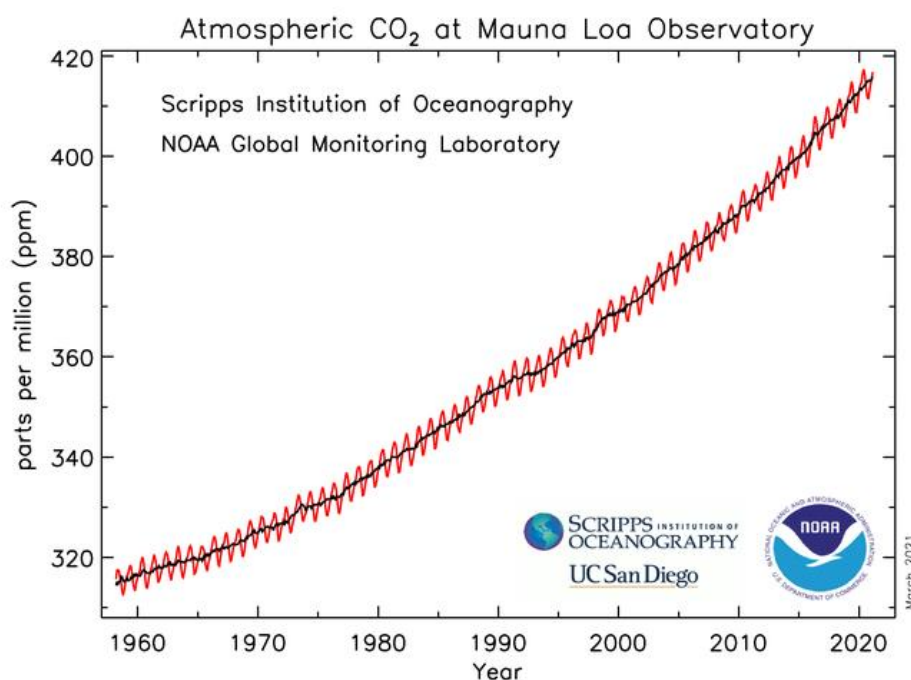


Figure 1 : Concentration de CO₂ dans l'atmosphère mesurée à l'observatoire de Mauna Loa (GML, 2021)

1.2 ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ EN BELIGUE ET RÉPARTITION SELON LES SECTEURS

Les émissions en Belgique montrent une tendance à la baisse depuis l'année 1998, mais stagnent sur un plateau depuis, paradoxalement, la signature des Accords de Paris en 2015 avec le rejet de 100 MTCO₂/an¹ (Global Carbon Atlas, 2021).

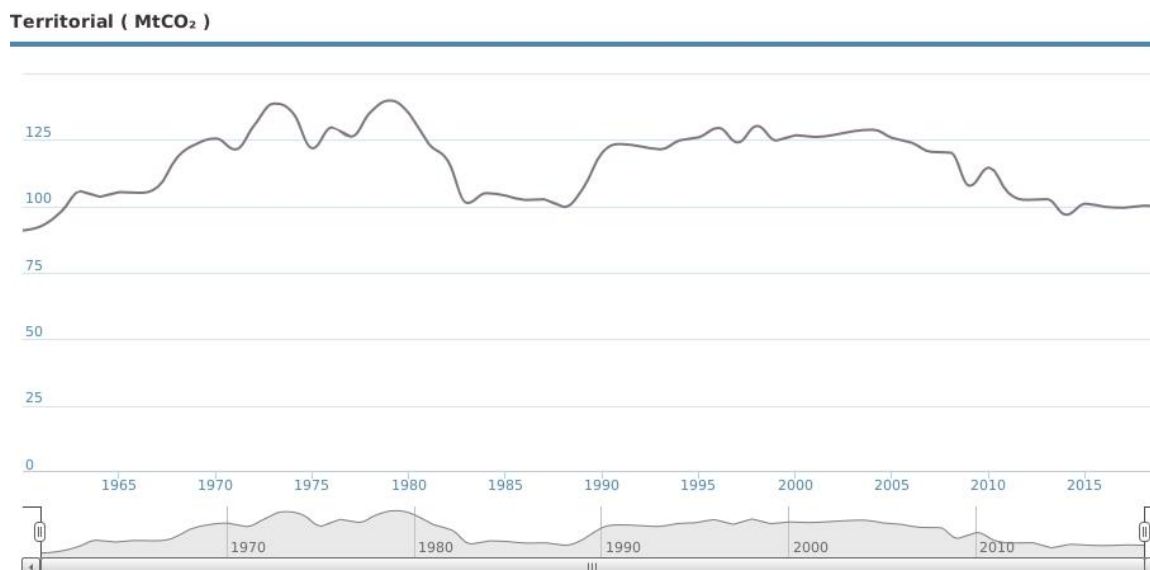


Figure 2 : Évolution des émissions de CO₂ en Belgique (Global Carbon Atlas, 2021)

La répartition des émissions des GES selon les secteurs d'activité principaux est évidemment marquée par une grande hétérogénéité. Il s'agit des augmentations et diminutions respectives de certains secteurs qui amènent la situation de stagnation que connaît la Belgique depuis 5 ans. Cela nous amène à nous poser la question de ce qu'il en est pour le secteur du bâtiment.

En 2019, le chauffage des bâtiments résidentiels et tertiaires était responsable de respectivement 13,8% et 4,9% des parts d'émissions des GES en Belgique (Climat.be, 2021). Ce score place le secteur résidentiel à la quatrième place des plus gros émetteurs de dioxyde de carbone et lui octroie donc une responsabilité importante dans la lutte contre le réchauffement climatique.

L'augmentation du prix de l'énergie et la politique d'amélioration énergétique des bâtiments ont notamment fait chuter de 22,6% les émissions liées au secteur résidentiel. Ces deux causes sont en revanche atténuées par l'augmentation du nombre de ménages et sont donc beaucoup moins apparentes au regard de la consommation finale d'énergie. On observe en revanche, une nette augmentation dans le secteur tertiaire (GES et consommation finale) principalement à cause de l'augmentation continue du nombre d'employés (Climat.be, 2021).

¹ Ce nombre correspond aux émissions de dioxyde de carbone seules et ne comprend pas les émissions des autres gaz à effet de serre (méthane, protoxyde d'azote, gaz fluorés). Le total de ces émissions en Belgique atteint 116,6 MT éq. CO₂ pour l'année 2019 (Climat.be, 2021).

1.3 L'ENGAGEMENT EUROPÉEN DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments dans l'Union européenne (UE) devient un réel objectif avec la refonte la Directive 2010/31/UE. Celle-ci exige notamment que les pays de l'UE fixent des quotas minimaux sur la performance énergétique et que ceux-ci soient revisités tous les 5 ans. Ces exigences s'appliquent ainsi au chauffage et refroidissement des locaux, la production d'eau chaude sanitaire, l'éclairage, la ventilation et tout autre auxiliaire technique (EUR-Lex, 2021).

Ce document prévoit également des engagements sur le long terme et demande à ce chaque pays élabore des plans nationaux visant à introduire des bâtiments dont la consommation d'énergie serait quasi nulle. Ainsi en 2010, une première définition législative de ce que serait un bâtiment à consommation d'énergie quasi nulle est donnée : « un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées [...]. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité » (Parlement européen et du Conseil, 2010, p.18 art.2). L'article 9 de la directive indique également les échéances pour l'implémentation de cette nouvelle génération de bâtiment. Il est ainsi prévu que pour le 1^{er} janvier 2019, tout nouveau bâtiment public réponde à ce niveau d'exigence et que celui-ci soit étendu à l'ensemble des nouvelles constructions au plus tard pour 2021.

Finalement, en 2018 cette directive est revisitée par le parlement afin d'y ajouter de nouveaux objectifs, principalement en matière de rénovation du stock existant avec pour but de le transformer peu à peu vers le niveau zéro énergie. L'ambition semble ainsi sans précédente dans l'Union européenne. En effet, les objectifs fixés sont de réduire de 40% les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport au niveau de l'année 1990. À terme, il est prévu d'arriver à un parc immobilier, résidentiel et non résidentiel, décarboné d'ici 2050 (Parlement européen et du Conseil, 2018).

1.4 COÛTS DU BÂTIMENT POUR LES MÉNAGES BELGES

À ce jour, les exigences de la Directive ont, pour la majorité des pays européens, été traduites dans les réglementations nationales (ou régionales) selon une série de critères propres à la typologie du bâtiment, la zone climatique, le système de chauffage, la compacité ou encore d'autres facteurs. Le niveau d'exigence demandé par la plupart des réglementations des pays membres amène à devoir repenser la manière dont sont conçus les bâtiments, tant au niveau technique, économique et environnemental (Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2021).

En Belgique, le coût économique nécessaire pour arriver à suivre l'augmentation constante des exigences énergétiques à commencer à faire émerger quelques inquiétudes. En 2014, la Confédération de Construction Wallonne tirait la sonnette d'alarme en publiant un communiqué de presse titré « Les bâtiments à haute performance énergétiques sont impayables pour les citoyens ». Le document appelait à une plus grande maîtrise sur les coûts administratifs et environnementaux et regrettait « l'évolution trop rapide de la réglementation sur la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) » (Confédération Construction Wallonne (CCW), 2014, p.1). La CCW estime d'ailleurs que les exigences PEB de 2014 ont occasionné une augmentation de 10% des coûts de construction entre 2008 et 2013.

Il est également avancé qu'une augmentation de 20% des coûts passerait de 68 à 20% la proportion des ménages en capacité d'entreprendre un projet de construction de logement selon une base de budget moyen. La CCW avance que les niveaux de la PEB 2014 ont déjà atteint l'optimum économique, défini comme « l'équilibre entre les investissements à consentir et dépenses énergétiques économisées » (Confédération Construction Wallone (CCW), 2014, p.2). La perspective de l'introduction des bâtiments zéro énergie risquerait d'alourdir davantage les frais à hauteur d'une augmentation de 15%.

Sur le marché belge, une envolée des prix de l'immobilier s'observe également. À titre d'exemple, une maison 4 façades est passé d'un prix médian de 227.500€ en 2010 à 295.000€ en 2020, soit une hausse de près de 30% en seulement 11 années. La figure 3 illustre l'augmentation des prix pour les appartements, maisons 2 ou 3 façades et maisons 4 façades.

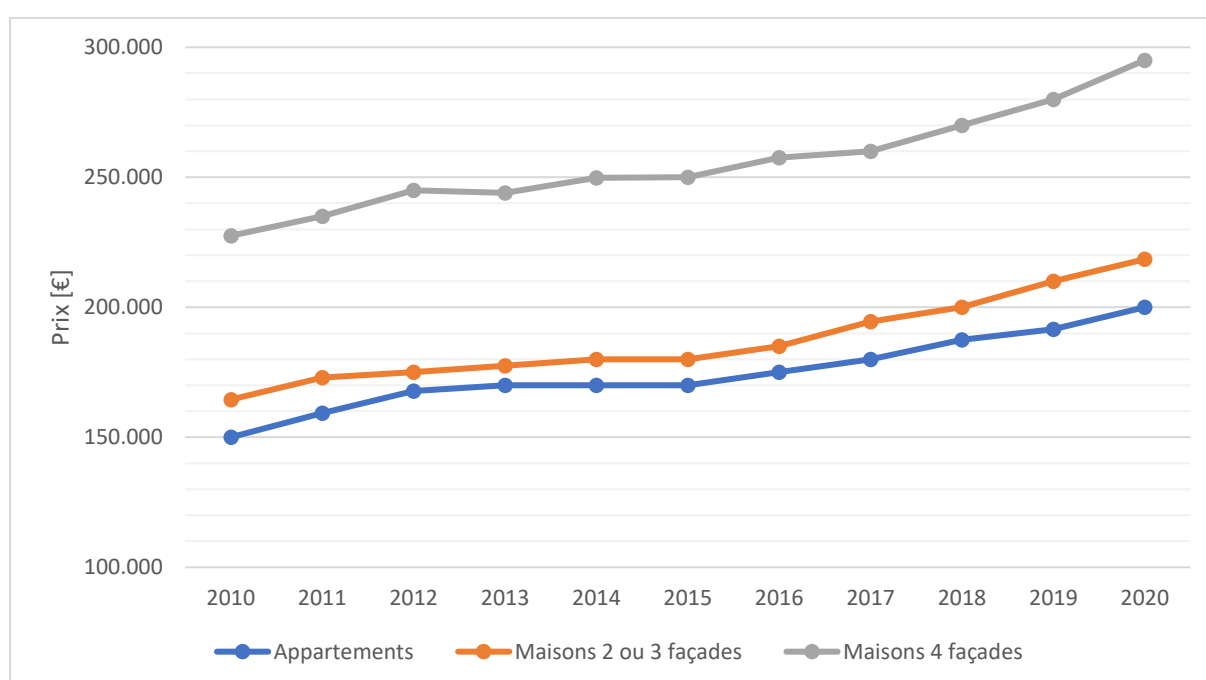


Figure 3: Évolution du prix de l'immobilier en Belgique entre 2010 et 2020
Données extraites de « Prix de l'immobilier » par STATBEL (2021)

En Belgique, on observe également que les ménages belges consacrent davantage de leur budget au logement qu'auparavant. En effet, entre 1999 et 2018, les dépenses consacrées au loyer, aux charges ainsi qu'aux frais d'entretien sont passées de 26,1% à 30,3% du budget total (STATBEL, 2019).

Si les loyers et charges ou l'immobilier en général ont effectivement subi une augmentation significative, la hausse des normes énergétiques n'est évidemment pas le seul paramètre responsable. Néanmoins, il serait dommageable pour les ménages de devoir subir une hausse supplémentaire des coûts liés à la standardisation du zéro énergie comme nouvelle référence.

Dès lors, qu'en est-il vraiment ? Si la hausse des prix de construction semble être une évidence, est-ce que l'introduction du zéro énergie est économiquement défavorable sur le long terme ?

2. ÉTAT DE L'ART

2.1 DÉFINITION DES BÂTIMENTS ZÉRO ÉNERGIE

Avant toute chose, il convient d'éclaircir quant aux nombreux acronymes utilisés pour désigner un bâtiment zéro énergie afin d'éviter toute confusion. La littérature fait le plus couramment usage de l'adjectif « ZEN » pour « Zéro ENergie ». Dans la littérature anglophone, ce terme est couramment employé comme un nom commun sous l'appellation « ZEB » pour « Zero Energy Building ». Au sens strict de la définition donnée par la Directive 2010/31/UE, il est question d'une consommation quasi nulle et non égale à zéro. Au sens littéral, les acronymes du ZEN ou ZEB devraient donc faire référence à des bâtiments encore plus performants que le niveau de performance demandé par l'UE et inscrit depuis 2021 dans les réglementations des pays européens. Ainsi, certains auteurs préfèrent employer les acronymes QZEN ou nZEB pour respectivement « Quasi Zéro Énergie » et « nearly Zero Energy Building ». Bien qu'il soit techniquement compliqué de faire en sorte qu'un bâtiment atteigne un bilan énergétique de précisément zéro kilowattheure, il est généralement convenu d'utiliser le préfixe « net » devant l'acronyme pour désigner un bâtiment dont la consommation est environ égale à sa production. Dans ce travail, nous utiliserons l'acronyme QZEN pour faire référence au bâtiment répondant à la définition de la Directive et ayant une consommation en énergie primaire inférieure à 85 kWh/m².an². Les bâtiments netZEN désigneront des bâtiments dont la consommation est inférieure à 15kWh/m².an³. Finalement, l'acronyme ZEN sera utilisé pour parler du concept de manière générale.

Le bâtiment quasi zéro énergie reste à ce jour un concept vague et sans définition stricte. La définition donnée dans l'introduction, émanant de la Directive 2010/31/UE, est celle qui est la plus couramment rencontrée. Par zéro énergie il faut entendre que le bâtiment doit être capable de produire autant d'énergie qu'ils n'en consomment sur une période donnée. Cela ne signifie pas pour autant qu'il doit être autonome à tout moment de l'année, le bâtiment zéro énergie est toujours bien dépendant du réseau.

Ces dernières années, de nombreuses études ont travaillé sur l'identification et la comparaison de définitions, certifications ou encore méthodologies de calcul de bâtiments ZEN. Hermelink et al. (2013) ont analysé un grand nombre de ces travaux et ont défini 4 éléments qui devraient figurer dans toutes définitions du ZEN :

1) Un indicateur numérique pour la demande et la consommation énergétique :

Les besoins devraient être représentés par l'énergie nécessaire pour le chauffage, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire (ECS). La consommation englobe l'éclairage et les auxiliaires. Les besoins et consommations sont définis selon des conditions de confort thermique et visuel. La consommation liée à l'ECS étant dépendante de la densité d'occupation, celle-ci devrait être pondérée d'une densité nationale normalisée, tout comme le volume d'eau utilisé. Cet indicateur doit être idéalement accompagné de valeurs caractéristiques de l'enveloppe thermique (coefficients de déperditions des éléments, facteur solaire des vitrages, taux de renouvellement d'air de l'enveloppe ...).

² Le choix de la valeur de 85 kWh/m².an comme borne supérieure du critère QZEN est justifié par le fait qu'il s'agit de la valeur adoptée par la réglementation QZEN wallonne, comme expliqué plus loin dans le texte.

³ Le choix de la valeur de 15 kWh/m².an comme borne supérieure du critère netZEN est justifié par le fait qu'il s'agit de la valeur recommandée comme borne inférieure du « bâtiment à consommation d'énergie quasi nulle » défini par la Commission européenne, comme expliqué plus loin dans le texte.

- 2) Un bilan d'énergie primaire annuel :
Idéalement, ce bilan devrait permettre également d'afficher des résultats sur des échelles de temps plus courtes, de manière mensuelle par exemple. La méthodologie de calcul doit également être transparente sur la manière dont le coefficient de conversion en énergie primaire est calculé. Une remise en question des facteurs utilisés actuellement est également nécessaire en fonction de critères tels que l'impact d'injection d'électricité sur le réseau, la pollution générée et autres. Le bilan devrait également être secondé par l'émission des gaz à effet de serre, acidification de l'air, l'eutrophisation des eaux douces et autres indicateurs d'impact environnemental.

- 3) La part d'énergie renouvelable du bilan énergétique :
Il est nécessaire de préciser la part réellement consommée par l'autoproduction et ce qui est injecté sur le réseau. Les approches ZEN ne doivent pas considérer le réseau comme un puits de stockage infini. Avec le développement des bâtiments ZEN, l'utilisation de système intelligent est nécessaire afin d'améliorer l'interaction entre le réseau et les pics de demande des bâtiments.

- 4) Des indices de confort des ambiances intérieures :
Des mesures de réduction énergétique sans l'établissement d'un niveau de confort n'ont pas de sens. La norme EN 15251 ou toute autre source pertinente issue de la littérature pourrait être utilisée. Un exemple récurrent est celui de l'indicateur PMV-PPD (Predicted Mean Vote – Percentage of People Dissatisfied) issu de la théorie de Fanger.

Finalement, en 2016, la Commission européenne a publié quelques recommandations visant à accélérer le développement de l'inscription des bâtiments ZEN dans les plans nationaux des États membres. La recommandation apporte notamment les chiffres de référence sous la forme d'un écart dans lequel devrait se trouver le niveau de consommation en énergie primaire. Ceux-ci sont précisés en fonction de la typologie (bureau ou résidentiel), de la zone climatique et de la prise en compte ou non d'une fraction assurée par des énergies renouvelables (EnR) sur site. Les valeurs pour le résidentiel sont reprises dans le tableau qui suit (Commission européenne, 2016) :

Zone climatique	Énergie primaire nette [kWh/m ² .an]	Énergie consommé provenant des EnR [kWh/m ² .an]	Énergie primaire, incluant la part d'EnR [kWh/m ² .an]
Zone méditerranéenne	0 - 15	50	50 -65
Zone océanique	15 - 30	35	50 - 65
Zone continentale	20 - 40	30	50 - 70
Zone nordique	40 - 65	25	65 -90

Tableau 1: Critères de référence recommandés par la Commission pour la consommation d'énergie primaire
Données extraites de « RECOMMANDATION (UE) 2016/1318 » par la Commission

Ces valeurs ont été calculées en supposant que les besoins dans les pays chauds étaient plus faibles, mais disposaient d'un plus gros potentiel pour la production d'énergie renouvelable. À l'inverse, les pays nordiques ont davantage de marge de manœuvre dans le niveau d'énergie primaire nette, mais moins d'opportunité pour produire de l'énergie sur site. Ainsi, l'écart entre les pays de la zone méditerranéenne et de la zone nordique est réduit si l'on considère l'énergie primaire incluant la part d'énergie renouvelable (Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2021).

Sur base des rapports rendus par les États membres dans la mise en œuvre de la Directive, la Commission a rédigé une évaluation en 2020 sur les progrès accomplis, notamment en termes de baisse de consommation globale de l'Union européenne. Néanmoins, le niveau d'ambition entrevue dans les rapports respectifs s'est relevé être en deçà des niveaux d'exigences recommandés par la Commission. En effet, la figure 4 montre que la quasi-totalité des pays ont fixé une valeur d'énergie primaire supérieure à la valeur recommandée, à l'exception de la Lituanie et de la Région flamande. Les Pays-Bas quant à eux se sont alignés sur la valeur recommandée.

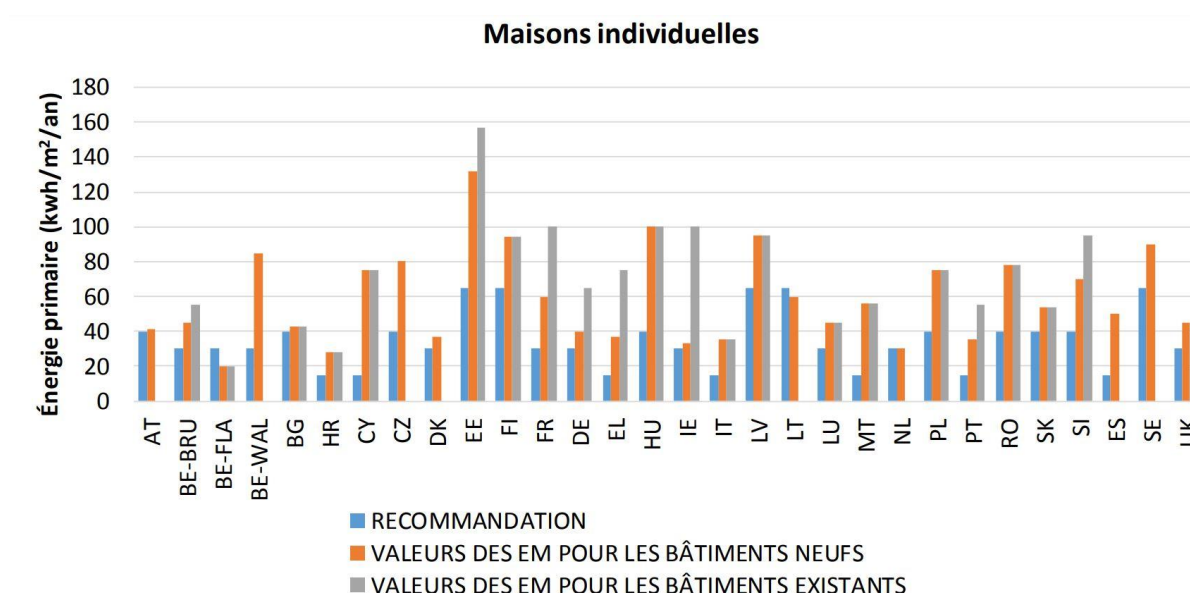


Figure 4: Comparaison des niveaux d'exigences fixées pour le QZEN avec les valeurs recommandées par la Commission
Graphique issu de « Évaluation en 2020 des progrès accomplis par les États membres dans la mise en œuvre de la directive 2012/27/UE » par la Commission (2020, p.11)

Une comparaison directe entre Pays membres n'est pas chose aisée en raison des conditions climatiques et méthodologies de calcul différentes. Néanmoins, il est intéressant de remarquer que parmi tous les pays considérés comme étant dans la zone océanique, selon la Recommandation⁴, la valeur définie par la Région wallonne est la plus grande de toutes.

⁴ Les pays considérés dans la zone océanique sont la Belgique, la France, l'Allemagne, les Pays-Bas, le Danemark, l'Irlande, le Royaume-Uni, la République tchèque et la Pologne (Commission européenne, 2016).

2.2 EVOLUTION DE LA RÉGLEMENTATION PEB EN WALLONIE

Avec l'approbation du Plan Wallon Énergie Climat (contenu dans le plan national 2021-2030), la Wallonie a traduit la notion de bâtiment zéro énergie dans sa propre législation et en a fait une norme pour tous les bâtiments depuis début 2021. Ainsi la PEB 2017 a été remplacée par la norme « QZEN ». Le plan ambitionne également une mise à jour d'ici 2025 pour instaurer l'étape suivante de la réglementation énergétique qui portera le nom « ZEN ». Des objectifs à long terme ont également été fixés sur la rénovation du stock belge où il est prévu pour 2050 que la moyenne de celui-ci passe de 434 kWh/m².an, soit son niveau actuel d'énergie primaire, à 85 kWh/m².an, soit le label A (Plan National Energie-Climat (PNEC), 2019).



Figure 5: Stratégie de rénovation du parc de bâtiments résidentiels d'ici 2050
Extrait de « Rénovation énergétique 2050 : voici le passeport bâtiment » par Renouvelles (2017)

L'introduction du QZEN wallon a induit un renforcement des anciennes exigences définies par la PEB 2017. L'accent est mis principalement sur le niveau d'énergie primaire et l'utilisation d'énergies renouvelables, qui toutefois n'est pas rendue obligatoire. Les 6 conditions pour pouvoir construire QZEN sont détaillées ci-dessous (Wallonie énergie SPW, 2021):

- 1) L'énergie spécifique E_{spec} doit être inférieure ou égale à 85 kWh/m².an tandis que le niveau E_w ne doit pas dépasser la valeur de 45. Le premier de ces deux indicateurs représente le rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire⁵ du bâtiment et la surface de plancher chauffée A_{ch} du bâtiment. Le niveau E_w est calculé comme le rapport d'énergie primaire du bâtiment rapporté à une consommation d'énergie primaire de référence d'un bâtiment présentant la même surface de plancher. Le résultat est ensuite multiplié par 100.
- 2) Le niveau K représente la performance de l'enveloppe thermique du bâtiment. Son calcul est basé sur les coefficients de déperdition des éléments constitutifs de l'enveloppe, des ponts thermiques et de la compacité du bâtiment. Sa valeur maximale est de 35.

⁵ En Wallonie, le calcul de l'énergie primaire pour les unités résidentielles comprend l'énergie nécessaire pour le chauffage, le refroidissement, la production d'ECS, les auxiliaires ainsi que la déduction de l'autoproduction éventuelle d'électricité. L'éclairage n'est inclus que pour le calcul des unités non résidentielles (Service public de Wallonie (SPW), 2018).

- 3) Le coefficient de déperdition thermique des parties constitutives de l'enveloppe (U) du bâtiment ne doit pas dépasser une valeur maximale fonction de la nature de cet élément. Ainsi, le U_{\max} d'éléments tels que la toiture, la dalle de sol, les murs extérieurs est de $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Les fenêtres doivent respecter une valeur maximale de $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le vitrage utilisé⁶.
- 4) L'énergie nécessaire pour le chauffage, avec déduction des EnR, ne doit pas dépasser $85 \text{ kWh/m}^2\text{.an}$.
- 5) L'indicateur de surchauffe doit être inférieur à 6500. Il a pour but de limiter les risques de surchauffe estivale et est exprimé en Kelvin heure [Kh].
- 6) À l'instar des anciennes réglementations, une installation de ventilation est obligatoire dans les logements QZEN. Celle-ci doit être en conformité avec la norme NBN D50-001.

En comparaison avec la définition du ZEN par Hermelink et al. (2013), la réglementation wallonne est relativement complète sur la question de la consommation d'énergie primaire à l'exception de la non-prise en compte de l'énergie consommée par le système d'éclairage artificiel des locaux. L'intervalle de calcul considéré est également uniquement annuel. De plus, la représentation de la notion de confort thermique n'est reprise qu'à travers l'indice de surchauffe. Aucun indicateur n'est donné pour l'éclairage artificiel des unités résidentielles⁷ et la conversion en énergie primaire se fait via des facteurs standardisés.

Aucune exigence n'apparaît non plus sur la part de consommation issue de l'énergie autoproduite par les énergies renouvelables. Néanmoins, la consommation nette d'énergie non renouvelable est imposée par la valeur limite demandée pour le chauffage du bâtiment, bien qu'aucune limitation ne soit inscrite pour les autres postes de consommation. De plus, la valeur maximale imposée pour le coefficient K permet indirectement d'éviter des situations de bâtiments qualifiés comme « passoires thermiques », où le respect de la norme QZEN est uniquement assuré grâce au raccord à un nombre déraisonnable de panneaux photovoltaïques (EnergiePlus, 2018).

L'équipe de recherche Architecture et Climat de l'Université de Louvain a en 2018 réalisé une étude afin de percevoir si le règlement QZEN constituait une révolution dans la manière de concevoir les bâtiments ou si celle-ci relevait davantage d'une inscription dans la continuité des mesures précédentes. Pour ce faire, 162 scénarios ont été modélisés à partir de six cas d'étude, en faisant varier des paramètres tels que l'épaisseur d'isolant et les installations techniques.

Tout d'abord, l'évolution du niveau E_w et du coefficient K est donnée à la figure 6. Le premier constat est qu'uniquement le niveau E_w a évolué depuis la PEB 2017 avec une réduction de 30%. Le coefficient K et la majorité des valeurs U_{\max} sont restés inchangés depuis la PEB 2014. L'étude a montré qu'un strict respect des valeurs U_{\max} implique bien l'obtention d'un niveau K inférieur à 35 dans une grande majorité de situations. En revanche, un strict respect du niveau K ⁸ ne permet pas d'atteindre un niveau E_w inférieur ou égal à 45 si le bâtiment est équipé d'une installation HVAC standard. L'étude précise que l'installation standard était constituée d'une « simple » chaudière à combustion, une machine frigorifique à compression électrique pour le refroidissement et ne présente aucun système d'énergie renouvelable (Architecture et Climat UCL, 2018).

⁶ Il existe davantage de valeurs U_{\max} à respecter en fonction de spécificités telles que la présence d'un mur rideau, d'une porte de garage ou encore une paroi adjacente à deux volumes protégés.

⁷ Des guides pratiques sont néanmoins mis à disposition par le Service Public de Wallonie (SPW)

⁸ En effet, uniquement les situations où la surface vitrée était supérieure à 40-45% ne permettaient pas l'obtention d'une valeur minimale de 35 pour le coefficient K .

Les chercheurs ont ainsi synthétisé 3 situations permettant d'atteindre la norme QZEN :

- 1) Le bâtiment présente une amélioration modérée de l'isolation et des équipements plus performants (pompe à chaleur dans le cas de l'étude).
- 2) Le bâtiment présente une importante amélioration de l'isolation ou est équipé avec un ensemble de systèmes performants (pompe à chaleur et géo-cooling dans le cas de l'étude).
- 3) Le bâtiment est équipé de panneaux de photovoltaïques.

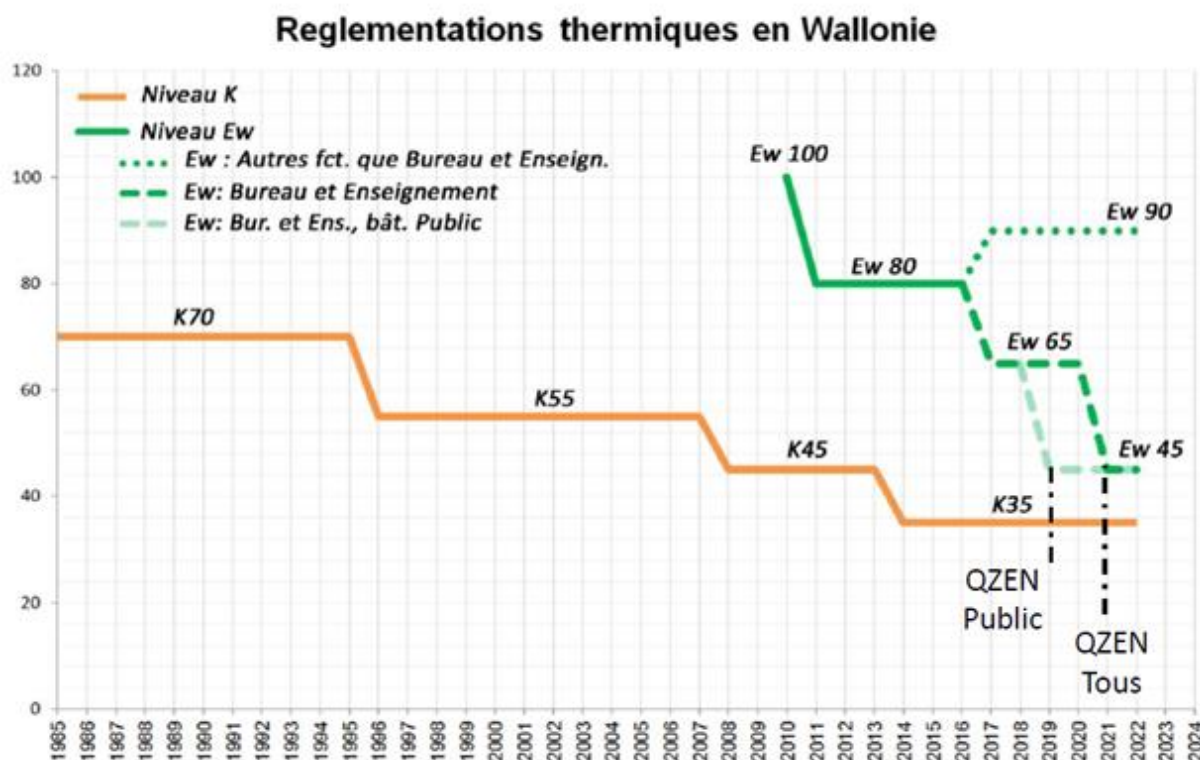


Figure 6: Évolution du coefficient K et du niveau Ew au cours du temps
Graphique extrait de « Exigences QZEN 2021 (2019 pour les bâtiments publics) » par EnergiePlus (2018)

L'étude décrite ici présente néanmoins la limite que seul un nombre limité de scénarios sont envisagés. Dès lors, il serait intéressant de prendre connaissance d'autres techniques permettant d'atteindre le niveau d'exigence ZEN.

2.3 SURVOL DE TECHNIQUES UTILISÉES POUR ATTEINDRE LE ZÉRO ÉNERGIE

Belussi et al. (2019) distinguent trois catégories d'interventions visant à atteindre les niveaux zéro énergie. La première stratégie traite des mesures permettant une diminution de la demande énergétique à travers des solutions actives ou passives. La seconde concerne l'utilisation des énergies renouvelables afin de réduire la consommation énergétique notamment à travers la production d'énergie sur site. Enfin, la dernière catégorie concerne l'implémentation de systèmes de contrôle et de régulation performants.

2.3.1 Stratégies visant à réduire la demande énergétique

Les stratégies utilisant des systèmes passives concernent l'exploitation des caractéristiques géométriques du bâtiment ou encore les propriétés hygrothermiques des matériaux telles que l'inertie, des effets d'évaporations et de poussée des fluides.

Avant même de discuter du choix des systèmes ou des matériaux mis en œuvre, les premières phases de conception d'un projet sont déterminantes pour la définition de sa performance thermique. L'impact de la morphologie d'un bâtiment est souvent mesuré à l'aide de sa compacité, mesure indiquant le rapport entre la somme des surfaces de déperditions et le volume protégé. Pour des bureaux situés dans le sud de l'Italie, il a été calculé que la compacité devait se limiter à $0,47\text{m}^{-1}$ pour permettre d'atteindre un niveau ZEN (Congedo et al., 2015). Arumägi & Kalamees (2016) ont déterminé que le premier bâtiment netZEN d'Estonie avait une compacité de $0,5\text{m}^{-1}$ bien que celui-ci soit donc dans une zone nordique où la compacité est un paramètre plus sensible que pour les pays chauds. Le ratio entre la surface vitrée et la surface opaque d'un bâtiment est également déterminant et souvent fixé en phase d'esquisse d'un projet. L'étude de Yong et al. (2017) montre que la réduction de ce facteur jusqu'à environ 10% constitue un bon optimum entre réduction des déperditions thermiques et apport suffisant de lumière naturelle.

L'approche la plus courante pour réduire les déperditions des parois consiste à mettre en œuvre des grandes épaisseurs d'isolation, souvent bien au-delà des exigences nationales en vigueur si le but est d'atteindre le niveau ZEN. En ce sens, Belussi et al. (2019) pointent l'émergence de matériaux de nouvelle génération tels que l'aérogel, les panneaux d'isolation sous vide ou encore les matériaux à changement de phase. Leur conductivité thermique étant moindre que les isolants couramment employés sur le marché, leur utilisation permet d'éviter les inconvénients causés par les grandes épaisseurs de murs nécessaires pour arriver au niveau ZEN. Cette remarque est particulièrement d'application dans le cadre d'un bâtiment avec une valeur patrimoniale. Les aérogels sont des matériaux caractérisés par une structure nanométrique utilisés à des fins d'isolation thermique. Pour des produits commerciaux à destination du marché de la construction, sa conductivité thermique varie de $0,0131$ à $0,0136\text{ W/mK}$ soit environ deux fois moins que du polyuréthane. Néanmoins, le prix de production et les risques respiratoires lors de sa production et mis en œuvre freinent à l'heure actuelle son développement. Les panneaux d'isolation sous vide sont des produits composites constitués d'un cœur à base d'un matériau très poreux et soumis à un presque vide d'air, tandis que l'extérieur est constitué de différentes membranes rendant le produit imperméable à l'eau et à l'air. La conductivité thermique de ces panneaux est généralement de $0,008\text{ W/mK}$ (Moga & Bucur, 2018).

L'utilisation de matériau à changement de phase permet un stockage d'énergie sous forme de chaleur latente, très utile dans l'objectif d'une réduction des besoins de refroidissement. Leur utilisation implique en revanche une complexité de régulation fine de la température intérieure afin que les cycles d'évaporation et condensation du matériau utilisé se fassent correctement (Souayfane et al., 2016).

Certains systèmes low-tech exploitant la ventilation naturelle sont également appréciés dans la conception de bâtiment ZEN de par l'absence de consommation énergétique. Le mur trombe en est un bon exemple. Il est généralement composé de 20 à 40cm de maçonnerie lourde ou pierres naturelles disposées à quelques centimètres d'une paroi vitrée. La chaleur captée par la masse thermique ainsi qu'une circulation d'air dans la coulisse permet de réaliser des économies de chauffage jusqu'à 20% dans les pays à climat tempéré. Le système peut encore être amélioré en le combinant par exemple avec un matériau à changement de phase afin de renforcer le stockage thermique. Enfin, une variante du mur trombe mais utilisée pour le refroidissement, est la cheminée solaire, dont un schéma est représenté à la figure 7 (Saadatian et al., 2012).

D'autres systèmes comme le puits provençal (échangeur air-sol) ou les toitures végétalisées sont également cités comme solution pour refroidir un bâtiment de manière passive.

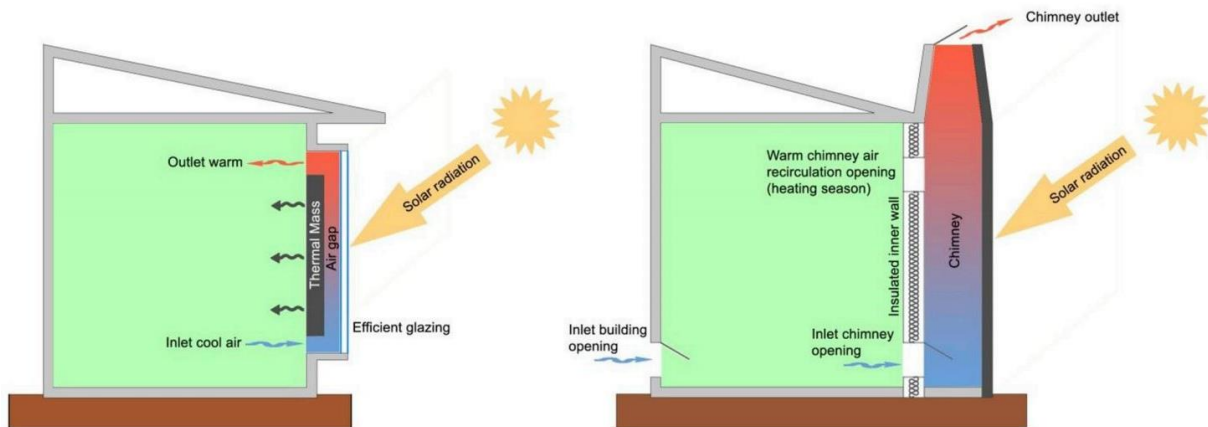


Figure 7: Schéma de fonctionnement du mur trombe et de la cheminée solaire
Figure extraite de « A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions » par Belussi et al. (2019)

La seconde catégorie de mesures visant à réduire la demande énergétique, consiste à rendre les équipements « actifs » du bâtiment plus performants. Le stockage d'énergie est une mesure souvent évoquée dans la littérature, autant pour le chauffage et refroidissement des locaux que pour la production d'ECS. Le stockage d'énergie frigorifique se fait régulièrement via de grands réservoirs d'eau glacée, des réservoirs de glace ou encore via l'utilisation des matériaux à changement de phase (Sarbu & Dorca, 2019).

Les systèmes de récupération de chaleur utilisés dans les installations de ventilation mécanique permettent d'éviter le gaspillage de chaleur ou de froid causé par le rejet de l'air vicié vers l'extérieur. Ils ont néanmoins l'inconvénient d'induire une consommation d'électricité supplémentaire par les ventilateurs et également une perte de charge à cause de l'échangeur de chaleur. Belmonte et al. (2016) ont étudié de tels systèmes de récupération de chaleur dans plusieurs villes d'Europe du Sud et conclu que ceux-ci pouvaient réduire la demande en énergie de 20 à 40%.

Les systèmes radiatifs (plancher ou plafond) pour chauffer ou refroidir ont également beaucoup gagné en popularité, car ils permettent un gain d'espace, un haut confort thermique et surtout des économies. La littérature montre que les nombreuses études réalisées sur le sujet ont mené à des résultats très variés allant de 10 à 80% d'économie d'énergie avec l'utilisation d'un fluide plus froid pour chauffer et plus chaud pour refroidir (Rhee & Kim, 2015).

Enfin l'évolution technologique dans l'éclairage artificiel a permis de grosses réductions d'énergie avec l'implantation des lampes LED qui développent un flux lumineux jusqu'à six fois supérieur aux anciennes lampes à incandescence par watt d'électricité consommé. La diminution du rayonnement infrarouge des LED permet également un meilleur contrôle des gains internes dans des espaces nécessitant beaucoup de luminaires comme les bureaux (Narukawa et al., 2006).

2.3.2 Stratégies visant la production à partir des énergies renouvelables

Le système photovoltaïque constitue la stratégie la plus répandue mondialement pour la production d'énergie renouvelable sur site et en dehors. Selon Lepercq (2021) le développement du photovoltaïque et la rapidité de réduction de ses coûts sont sans précédent dans le monde de l'énergie. En effet, l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques couplé à une production industrielle de plus en plus efficace a fait passer son coût de 74\$/W en 1977, à 2\$/W en 2008 et jusqu'à 0,12\$/W en 2019. Une tendance depuis 1970 montre que la croissance de la puissance solaire cumulée installée tourne autour d'une constante de 25% par an. La production solaire mondiale annuelle suit la même augmentation exponentielle et observée au graphique 8.

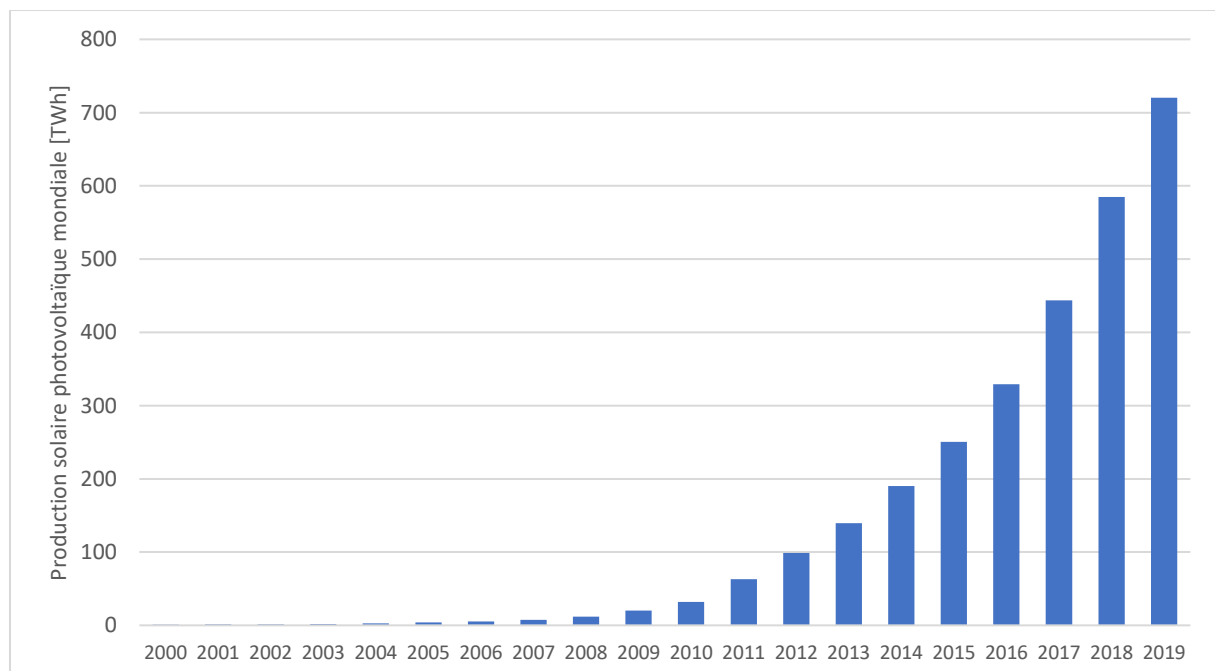


Figure 8: Évolution de la production solaire photovoltaïque mondiale entre 2000 et 2019
Données extraites de « Solar PV power generation in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030 » par l'AIE (2020)

Les récentes technologies ont permis la création de nouvelles générations d'installation photovoltaïque, par exemple, les panneaux photovoltaïques thermiques (également appelés panneaux hybrides). En plus de produire de l'électricité, ces panneaux utilisent un système de refroidissement afin d'abaisser la température des cellules, celle-ci étant un paramètre sensible dans la rentabilité de l'installation. La chaleur récupérée peut alors être utilisée pour chauffer ou préchauffer l'eau chaude sanitaire (Rachoutis & Koubogiannis, 2016).

On peut également mentionner les tentatives d'inclusion du photovoltaïque dans l'architecture avec le développement de panneaux intégrés dans des éléments de construction. Néanmoins, cette dernière application ne rencontre pas un franc succès en raison des coûts de production et un rendement moindre que l'application classique (Belussi et al., 2015).

Le déphasage entre les moments de production d'électricité et de demande ainsi que l'incertitude liée à la météo ont amené à concevoir des batteries de stockage pour les bâtiments. Celles-ci permettraient des réductions de 76 à 78,3% de l'énergie prélevée sur le réseau. Cependant, elles ne constituent pas encore à ce jour une solution économiquement rentable (Shukla et al., 2016).

Une autre utilisation répandue de l'énergie solaire est le collecteur solaire thermique. Son application dans le secteur résidentiel est principalement dédiée à la production d'eau chaude sanitaire. On le retrouve le plus couramment sous la forme d'un capteur plat ou d'un capteur à tubes sous vide. Le couplage du système avec un ballon de stockage permet de maximiser les gains d'énergie et de ne pas imposer le puisage de l'eau chaude au moment où celle-ci est produite. L'énergie dédiée à ce poste ayant une part importante dans le bilan des bâtiments ZEN, l'utilisation d'un système solaire se relève très utile pour faire diminuer la consommation d'énergie primaire. Les systèmes solaires thermiques sont également rentables pour des applications de refroidissement étant donné qu'ils produisent le plus durant les pics de rayonnement solaire (Ge et al., 2018).

Classées comme source d'énergie renouvelable par la Commission européenne, les pompes à chaleur (PAC) sont considérées comme une solution d'avenir dans la mesure où 90% de la population mondiale vit dans ces zones où cet équipement pourrait être utilisé. On distingue les pompes à chaleur de par la nature de la source froide que celle-ci utilise, à savoir, l'air, l'eau ou le sol. Les PAC aérothermiques sont les plus répandues grâce à leur facilité d'installation et des coûts moins onéreux. En revanche, celles-ci sont sensibles aux températures hivernales tandis que les PAC géothermiques profitent de la température constante du sol (Song et al., 2018). Bayer et al. (2012) ont mené une étude en Europe sur leur potentiel d'économie d'énergie qui s'est relevé être en 20 et 40%.

Dans la PEB wallonne, les chaudières biomasse sont considérées au même titre que les chaudières fonctionnant sur les combustibles fossiles. En conséquence, le facteur de conversion en énergie primaire est le même que pour les chaudières « classiques ». Des considérations similaires sont faites au Danemark ou encore en Suisse. Sa prise en compte comme énergie par certaines études tient du fait que leur utilisation permettrait une réduction des émissions de dioxyde de carbone (Carpio et al., 2013).

À échelle urbaine, on pourra encore citer les réseaux de chaleur dont le rendement est généralement supérieur aux installations individuelles. Un exemple est la cogénération qui permet de produire simultanément de l'énergie thermique et de l'électricité (Lake et al., 2017).

2.3.3 Stratégies d'optimisation de la consommation d'énergie

Kolokotsa et al. (2011) ont défini 3 conditions requises permettant une bonne gestion de la phase opérationnelle d'un bâtiment, facilitant ainsi l'atteinte des exigences ZEN. Premièrement, il est nécessaire d'avoir une simulation thermique dynamique qui représente aussi fidèlement que possible le bâtiment physique. L'aspect dynamique de la modélisation permet au système de répondre face à des gains internes inhabituels, une météo exceptionnelle ou autres perturbations internes ou extérieures. C'est pourquoi le second ingrédient est la présence de capteurs mesurant les conditions en temps réel ainsi qu'une interface permettant une communication entre le bâtiment et son système de gestion. Enfin, la troisième composante est un outil d'optimisation et de contrôle du bâtiment qui utilise en entrée les données récoltées par les capteurs et les implémente dans la modélisation thermique afin de calculer différents scénarios. Cela donne la capacité au système de prendre des décisions sur la régulation à apporter au bâtiment dans l'optique de minimiser la consommation d'énergie.

L'occupant conserve néanmoins un rôle essentiel d'interaction avec le système, mais également de définition des niveaux de confort. En retour, le système peut également émettre des recommandations de gestion qui nécessite une décision par l'occupant (la fermeture d'un store, l'ouverture d'une fenêtre, etc.). Enfin, cette technologie est particulièrement efficace pour la gestion de l'énergie produite par les systèmes photovoltaïques (Belussi et. al, 2019).

2.4 ÉVALUATION DU COÛT ÉCONOMIQUE DES BÂTIMENTS

Afin d'évaluer l'impact de l'implémentation des technologies entrevues dans le chapitre précédent sur les coûts de construction et les dépenses sur le long terme, il convient de trouver un outil permettant ce calcul. L'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) se relève être adapté pour cet usage. En effet, les ACCV sont couramment employées pour déterminer l'aspect économiquement favorable ou défavorable d'une stratégie visant à réduire la consommation d'énergie. Elles sont également utilisées dans d'autres cadres tels que la présentation de différents scénarios à une clientèle ou encore pour optimiser la phase d'esquisse et les décisions prises en amont d'un projet (Islam, 2015).

Le calcul d'une ACCV se réalise sur toute la durée de vie de l'objet considéré. Ainsi, au-delà de l'unique estimation des coûts de construction, il est possible de déterminer la somme d'argent nécessaire pour construire et faire fonctionner le bâtiment pendant une période donnée. La prise en compte des coûts futurs se fait à travers le calcul de la valeur actualisée de ceux-ci et dépend d'une série de facteurs économiques⁹. La réalisation d'une analyse du coût de cycle de vie est un processus normé et donné par l'ISO 15686-5.

Quand l'ACCV est portée sur un bâtiment, l'ensemble des coûts usuellement rencontrés dans la littérature et dans la norme ISO 15686-5 peuvent se répartir en trois catégories :

L'investissement initial ou coûts d'acquisition

Il s'agit des coûts payés au début de la période considérée. Il comprend les coûts nécessaires pour la construction, incluant les matériaux, la main d'œuvre et les équipements du bâtiment. Des coûts d'acquisition supplémentaires pour considérer l'achat du terrain peuvent également être pris en compte. Tous les frais dédiés au design de l'objet sont aussi comptés dans cette catégorie.

Les coûts périodiques :

Les coûts liés à la maintenance et à l'exploitation du bien constituent des dépenses qui sont calculées à des intervalles réguliers tout au long du cycle de vie du bâtiment. La maintenance comprend les frais nécessaires « en vue de maintenir un bâtiment ou ses parties dans un état lui permettant de remplir ses fonctions requises » (ISO 15686-5, 2017, 3.1.9). Si les frais liés à l'énergie consommée constituent la dépense d'exploitation la plus souvent rencontrée dans la littérature, d'autres frais de gestion peuvent s'ajouter comme les taxes, assurances et redevances. À l'inverse, le bâtiment peut également bénéficier de gains périodiques tels qu'un loyer si l'ACCV est réalisée depuis la perspective d'un gestionnaire immobilier.

Coûts de fin de vie :

Une fois que le bien arrive en fin de vie, différentes options sont envisageables. Celui-ci peut être démolé, déconstruit, recyclé ou encore maintenu en l'état. À l'issue de cette phase, il peut subsister une valeur résiduelle du bien qui peut être intégrée dans le calcul de l'ACCV. Des frais de cession

⁹ Afin d'éviter des passages redondants, les hypothèses économiques sont détaillées dans le chapitre 8 dédié à l'utilisation de la méthodologie ACCV.

peuvent aussi être considérés dans le cas où la personne n'a plus de responsabilités sur le bien à l'issue de sa durée de vie. Quand de longues durées de vie sont considérées et que tous éléments du bâtiment sont traités à leur fin de vie, il est acceptable de considérer la valeur résiduelle comme étant égale à zéro (Allacker, 2010).

Finalement Allacker (2010) présente une formule permette le calcul du coût global sur le cycle de vie et prenant en compte tous les coûts listés précédemment :

$$CG = CI + VAN(SCP) + VAN(SCFV) + R_0$$

Où

CG = coût global sur l'ensemble du cycle de vie

CI = coût d'investissement initial

VAN(SCP) = la valeur actualisée nette de la somme des coûts périodiques

VAN(SCFV) = la valeur actualisée nette de la somme des coûts de fin de vie

R_0 = Valeur résiduelle

Un ensemble d'études réalisées sur l'ACCV, compilées par Islam et al. (2015), a montré que les coûts de construction représentaient la plus grande part dans le coût global avec une valeur allant de 58 à 88% sur le coût total. La phase d'exploitation représenterait 11 à 34%, 2 à 20% pour la maintenance et enfin, 0 à 2% pour les coûts de fin de vie.

Étant donné qu'une ACCV ne permet pas de calculer les impacts environnementaux, celle-ci est couplée dans certaines études avec une analyse du cycle de vie et ses indicateurs environnementaux associés afin de permettre de considérer l'intérêt financier et environnemental de manière simultanée. L'utilisation croisée de ces méthodologies est de plus en plus encouragée, car elle renforce la prise en considération des cycles de vie et les décisions basées sur des stratégies à long terme (Ristimäki et al., 2013).

3. PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE DU MÉMOIRE

3.1 QUESTIONS DE RECHERCHE :

En lien avec la mise à jour toute récente des exigences du niveau PEB en Belgique, l'objectif premier de ce mémoire est de renforcer le niveau de préhension des exigences ZEN relatives à ses implications techniques et économiques. Autrement dit, il est question de « démystifier » et de comprendre les conséquences de cette nouvelle norme dans la conception des bâtiments résidentiels.

Ainsi, ce travail s'articule autour de trois questions de recherche :

- 1) Quelles sont les solutions techniques les plus couramment rencontrées pour atteindre les exigences ZEN ?
- 2) Quel est le prix moyen qu'il faut déboursier pour faire construire selon les exigences ZEN ?
- 3) Les nouvelles exigences QZEN sont-elles économiquement favorables pour les particuliers ?
 - a. Quels sont les paramètres qui améliorent le plus la performance énergétique tout en limitant l'impact sur le budget à court et/ou long terme ?
 - b. Quel niveau énergétique est-il possible d'atteindre sans trop impacter les coûts de construction ?

Ainsi, il a été projeté que les deux premières questions se devaient d'être répondues en étudiant un échantillon de bâtiments résidentiels considérés au minimum comme quasi zéro énergie. La troisième question sera quant à elle abordée au travers d'un cas d'étude représentatif, même si les deux parties du mémoire seront utilisées de manière complémentaire pour répondre aux questions de recherche.

Ce mémoire a pour but de faire la jonction entre les travaux qui traitent de considérations uniquement techniques sur un ensemble de bâtiments et ceux qui étudient les aspects économiques relatifs à différents scénarios sur un même cas d'étude.

Il est à noter que dans le cadre limité de ce mémoire, les aspects environnementaux que l'on retrouve souvent dans la littérature sous forme d'analyse de cycle de vie (ACV) ne seront pas abordés.

3.2 PLAN DE TRAVAIL

Le déroulement du travail ainsi que la méthodologie générale est décrite dans cette section. Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire se répartit deux parties.

La première partie consiste en un benchmarking de bâtiments considérés comme quasi zéro énergie, sans pour autant rejeter les bâtiments netZEN ou à énergie positive de l'étude. Le choix de la base de données pour effectuer ce benchmarking s'est porté sur la plateforme collaborative « Construction 21 » qui compile de nombreux cas d'étude et décerne notamment des prix appelés « Green Solutions Awards » pour récompenser des projets innovants et durables. Une présentation plus détaillée des informations qui sont exploitées depuis ce site est donnée dans la section 4.2. Toute une série de critères sont également développés afin de mettre en évidence un échantillon de bâtiments résidentiels passifs et caractérisés par des conditions climatiques similaires au contexte belge. Un deuxième échantillonnage plus sélectif a été effectué afin de renforcer la fiabilité de certaines données qui sont exploitées.

En lien avec les deux premières questions de recherche énoncées au point précédent, l'objectif de ce benchmarking est double. D'une part, il s'agit d'identifier d'éventuelles corrélations entre l'utilisation d'énergies renouvelables, les systèmes HVAC et la performance de l'enveloppe thermique avec le niveau de performance énergétique des bâtiments étudiés. D'autre part, le benchmarking permet également de se faire une idée des coûts de construction des bâtiments zéro énergie.

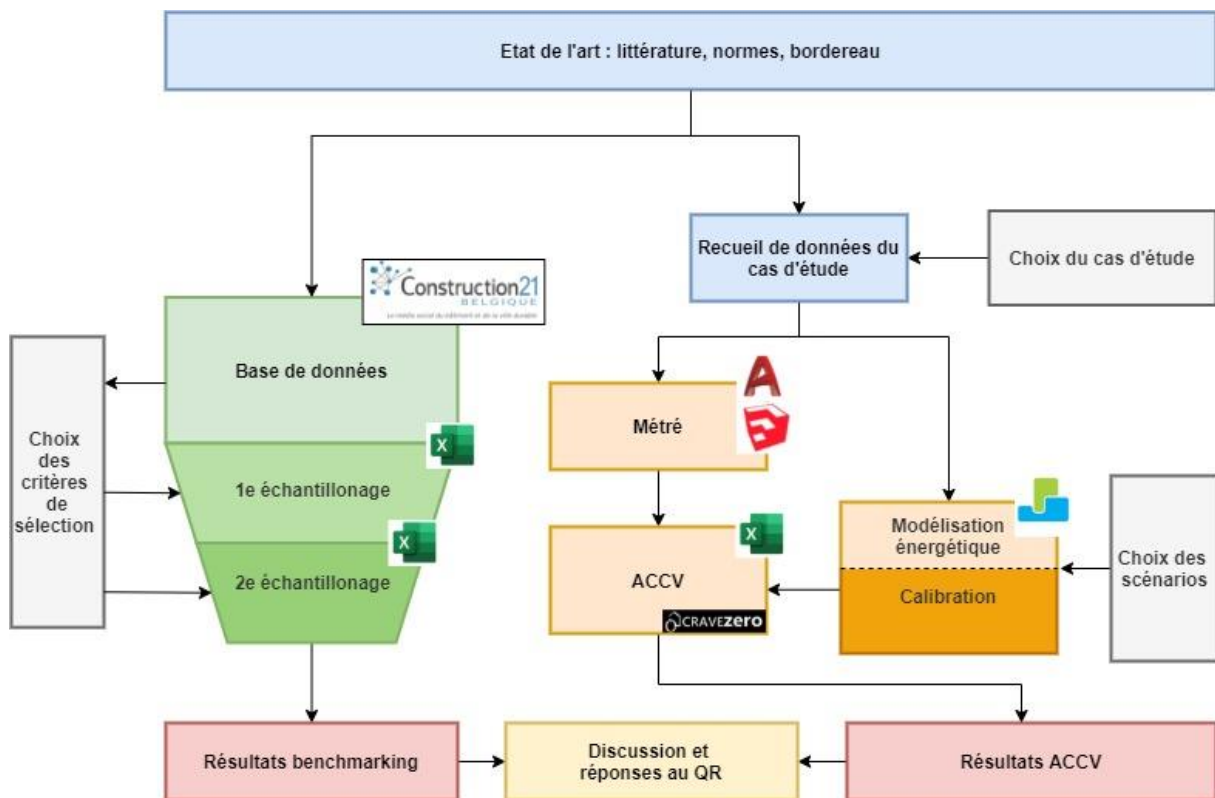


Figure 9: Plan de travail du mémoire

La seconde partie du mémoire permet de répondre à la troisième question de recherche énoncée et porte sur l'analyse d'un cas d'étude récemment construit et respectant les niveaux de consommation énergétique propre à la nouvelle réglementation PEB, entrée en vigueur en janvier 2021. Le recueil des données de ce cas d'étude a permis de générer un modèle énergétique via le logiciel DesignBuilder (7.0.0.095) et son moteur de simulation thermique dynamique EnergyPlus. Les plans fournis par D. Franzen, l'architecte du projet, sur le logiciel de dessin Autocad (2020), ont servi à établir un métré des matériaux mis en œuvre. La consommation du bâtiment ainsi que les données des systèmes HVAC sont venues compléter les informations pour permettre d'établir l'analyse du coût de cycle de vie (ACCv). Celle-ci est réalisée sur base d'une feuille Excel (Microsoft) fournie par le consortium d'experts européens CRAVEzero financé par la Commission européenne dans le but d'accélérer le déploiement des bâtiments zéro énergie dans les États membres. Les hypothèses et méthodes de calcul de cet outil sont expliquées dans la méthodologie relative et détaillée au chapitre 8.1.

Après une étape de calibration de l'ACCv et du modèle énergétique, les premiers résultats ont permis de faire un lien avec le benchmarking. L'objectif était et de confronter la relation entre consommation d'énergie primaire et coût de construction avec les autres bâtiments identifiés et ainsi de le situer ou non dans la définition des bâtiments ZEN.

Enfin, différents scénarios ont été établis afin d'appréhender l'impact des mesures visant à réduire la consommation énergétique sur les coûts financiers à la construction et sur le long terme. L'un de ces scénarios illustre le cas d'un bâtiment se rapprochant autant que possible du zéro énergie et est comparé aux résultats obtenus dans le benchmarking.

3.3 CHOIX DU LOGICIEL POUR LA MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE

La réalisation d'un modèle énergétique aussi fidèle que possible aux consommations réelles du bâtiment étudié est une condition indispensable pour obtenir un travail de qualité. Dès lors, le logiciel PEB couramment employé en Belgique pour vérifier la conformité des exigences énergétiques d'un projet n'est pas recommandé pour ce type de travail. En effet, son fonctionnement repose sur un modèle en régime semi-statique, en prenant uniquement en compte des variations mensuelles des conditions extérieures. De plus, les effets liés à l'inertie thermique ne sont que sommairement pris en compte à travers une caractérisation uniquement qualitative. Pour ce faire, le secteur énergétique étudié est catégorisé comme lourd, mi-lourd, peu lourd ou léger (SPW, 2018).

En revanche, le programme de simulation dynamique EnergyPlus applique une méthode de calcul plus détaillée avec notamment un pas de calcul horaire, voire subhoraire. Cela est possible via l'implémentation de données météorologiques de type « Typical Meteorological Year » (TMY). Ces données dites « reconstruites » consistent en la création, pour un lieu donné, d'une année fictive composée des données des mois de l'année considérée comme la plus typique pour le mois en question (European Energy Efficiency Platform (E3P), 2021). Le logiciel permet aussi une prise en compte plus précise des effets liés à l'inertie thermique et également un encodage détaillé des équipements techniques du bâtiment.

Le choix s'est porté sur ce logiciel plutôt que ses concurrents notamment pour sa bonne réputation en termes de fiabilité des résultats et de par sa facilité personnelle d'utilisation.

Il est à noter que les éventuelles erreurs d'encodage ou hypothèses trop laxistes qui ont pu potentiellement mener à des résultats différents par rapport à la consommation réelle du cas d'étude ne sont dommageables uniquement pour la comparaison du cas d'étude avec les bâtiments issus du benchmarking. En effet, étant donné que ces erreurs se retrouvent dans tous les scénarios modélisés, l'analyse des différences de consommations et de coûts entre ces scénarios permet d'annuler les approximations induites en amont du travail.

4. MÉTHODOLOGIE DU BENCHMARKING

Ce chapitre-ci, ainsi que le suivant, est consacré au benchmarking de bâtiments considérés comme zéro énergie. Cette section présente la méthodologie qui a été déployée pour réaliser le benchmarking, dont notamment le choix et l'utilisation faite de la base de données, ainsi que la détermination des critères qui ont permis la sélection d'un échantillon de projets. Pour rappel, le but de ce benchmarking est de comprendre les implications au niveau des équipements techniques induits par les exigences ZEN et donner une idée du prix de construction au mètre carré.

4.1 PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES

Construction21 est une plateforme collaborative en libre accès qui permet d'échanger, de promouvoir et de s'informer sur des thématiques autour de la ville durable. Les contenus publiés sur le site sont modérés par des experts reconnus issus de divers pays. En effet, ce groupe n'est pas belge, mais international, avec notamment 10 portails en Europe et ailleurs dans le monde. Par exemple, le portail belge est géré par un cluster de professionnels de la construction (architectes, bureaux d'étude, acteurs immobiliers, producteurs de matériaux et fabricants de systèmes) (Construction21 Belgique, 2013).

Depuis 2015, la plateforme organise des concours dans le but de promouvoir des solutions pour construire de manière plus durable, et ce pour différents types de bâtiments (écoles, bureaux, logements...) et à différentes échelles (bâtiments, quartiers ...). Ces concours appelés « Green Solutions Awards » ont ainsi incité de nombreux auteurs de projets à publier du contenu sur le site, enrichissant ainsi ce qui est devenu peu à peu une base de données de bâtiments, quartiers ou infrastructures considérés comme performants sur le plan de l'énergie.

L'intérêt de cette plateforme pour ce travail est qu'en plus de réunir de nombreux bâtiments très performants, les coûts de construction sont souvent donnés dans la fiche descriptive qui accompagne le projet. De nombreux filtres permettent également d'effectuer des recherches ciblées en se concentrant par exemple sur une certaine fonction de bâtiment, une zone climatique, une superficie, l'année de construction et bien d'autres.

La figure 10 illustre la densité de cas d'études répertoriés par pays en Europe de l'Ouest et centrale¹⁰. On peut observer qu'il y a un nombre bien supérieur de projets référencés en France par rapport aux autres pays d'Europe. Cela est notamment dû au fait que la plateforme y est installée depuis plus longtemps que dans les autres pays européens.

¹⁰ La figure 10 semble montrer qu'il n'y a pas de projets référencés en Belgique ou au Luxembourg. En réalité, en zoomant davantage sur cette carte, celle-ci finit par afficher les 34 et 29 cas d'études localisés respectivement en Belgique et au Luxembourg.

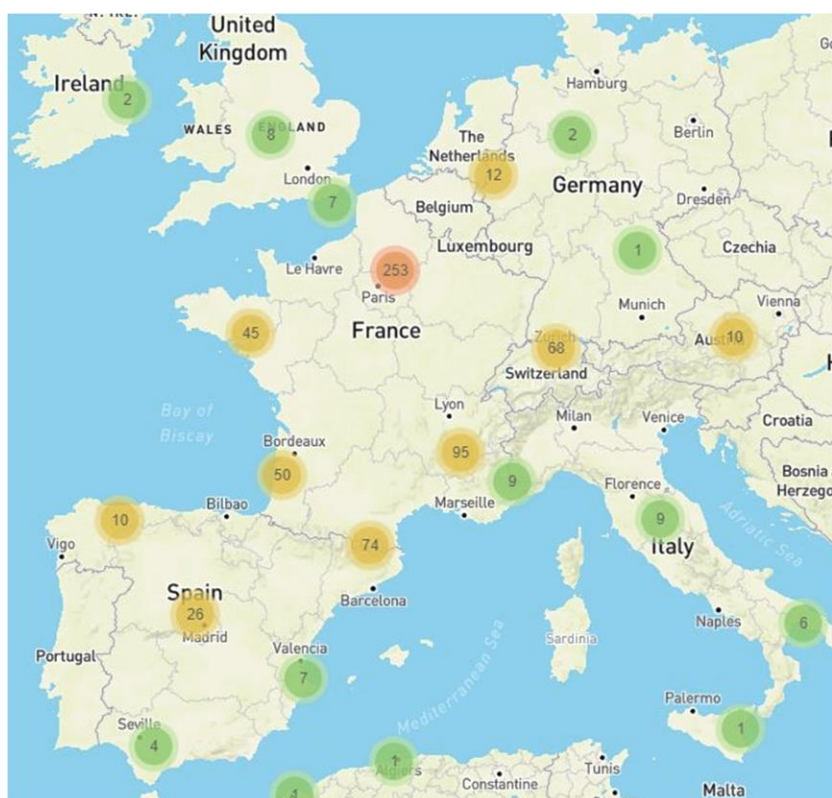


Figure 10 : Cas d'études situés en Europe centrale et Ouest.
Extrait de « Case Studies », par Construction21 International.

4.2 DONNÉES ACCESSIBLES DES FICHES DESCRIPTIVES

Chaque projet est présenté via une fiche descriptive sur laquelle on peut obtenir de nombreuses informations. Celles-ci sont divisées en plusieurs sections que l'on retrouve systématiquement dans chacun des cas d'étude. Ces dernières sont alors complétées avec le niveau de détails que l'auteur de projet juge nécessaire. Le tableau 2 recense ces différentes sections ainsi que les informations que l'on peut couramment rencontrer dans les cas d'étude. Néanmoins, il est relativement rare de retrouver l'entièreté de ces informations complétées sur un projet. Certains projets se révèlent ainsi être assez lacunaire et manque d'informations, autant du point de vue qualitatif que quantitatif, tandis que d'autres présentent une bonne majorité des informations du tableau 2. Certains auteurs de projet vont parfois encore plus loin en joignant des documents justificatifs tels qu'un certificat de performance énergétique, les résultats d'un test d'infiltrométrie ou encore une note de calcul pour la production d'énergie in situ.

Sections	Données couramment disponibles
Récapitulatif	Construction neuve/rénovation, type de bâtiments, année de construction, année de livraison, adresse, zone climatique, surface nette, consommation énergie primaire, coût de construction, coût/m ²
Description	Description du projet architectural, les démarches/intentions, nombre de bâtiments
Intervenants	Maître d'ouvrage, maître d'œuvre, liste des intervenants sur chantier
Énergie	Consommation énergie primaire, méthode de calcul, répartition de la consommation énergétique, performance énergétique de l'enveloppe (coefficient de déperdition moyen de l'enveloppe, étanchéité à l'air)
EnR ¹¹ & systèmes	Systèmes HVAC et EnR mis en œuvre
Solutions	Particularité du projet ou solution originale mise en œuvre
Coûts	Coûts des systèmes d'énergies renouvelables, coûts des études, coût total
Environnement urbain	Description des alentours et de l'aménagement extérieur
Qualité environne. bâti	Résumé des démarches durables du projet (ex. biodiversité, efficacité énergétique, énergies renouvelables...)
Concours	Inscriptions à d'éventuels concours, éventuelle labellisation

Tableau 2: Données disponibles Construction21

Finalement, seule une partie parmi toutes ces données ont été utilisées pour répondre aux problématiques posées, à savoir la description des équipements HVAC et de production éventuelle d'énergie, la caractérisation de l'enveloppe, les coûts de construction et consommations énergétiques. Plus précisément, parmi les cas d'étude sélectionnés selon les critères détaillés au chapitre 4.3, les 9 données suivantes ont été systématiquement extraites :

1. Présence de panneaux photovoltaïques (PV) ou non
2. Présence de panneaux solaires thermiques (PT) ou non
3. Type d'appareil de production principal pour le chauffage
4. Type d'appareil de production principal pour l'eau chaude sanitaire (ECS)
5. Coefficient de déperdition moyen du bâtiment
6. Étanchéité à l'air du bâtiment (débit d'air mesuré à 50 Pa)
7. Consommation totale en énergie primaire, sans compter la production éventuelle de PV
8. Consommation totale en énergie primaire, y compris la production éventuelle de PV
9. Coûts de construction du bâtiment

Les consommations d'énergie données concernent le chauffage, le refroidissement, la production de l'ECS, les auxiliaires ainsi que l'éclairage artificiel des locaux. Concernant les coûts de construction, il faut noter que les valeurs indiquées dans les fiches descriptives sont des prix HTVA, hors honoraires et hors fonciers.

¹¹ Abréviation pour « énergies renouvelables »

4.3 CHOIX DES CRITÈRES DE SÉLECTION

Comme expliqué précédemment, l'onglet concernant les cas d'étude du site Construction21 est équipé d'une option de recherche avec filtres qui s'est relevée être très pratique pour pré-cibler un échantillon de bâtiments. Une sélection « manuelle » a néanmoins dû être effectuée bâtiment par bâtiment afin de finaliser l'échantillonnage du benchmarking, comme cela sera expliqué dans ce chapitre.

Le tableau ci-dessous résume les différents critères appliqués pour effectuer la sélection des cas d'étude. Le choix de ceux-ci est justifié dans les paragraphes qui suivent.

Critères de sélection	
Type de construction	Construction neuve
Type de bâtiment	Maisons individuelles et immeubles à appartements
Superficie de bâtiment	Longueur bâtiment < 50m
Année de construction	>= 2010
Zone climatique	Climat tempéré et humide avec étés tempérés
Consommation d'énergie primaire	< 85 kWh/m².an
Fiabilité des données	Niveaux 2, 3a, 3b et 3c

Tableau 3 : Critères de sélection du benchmarking

Type de construction

Ce mémoire se concentre sur la construction de bâtiments neufs. Tout ce qui relève de la rénovation amène des spécificités tout à fait différentes que pour les constructions neuves, autant pour les solutions techniques répondant aux exigences ZEN que pour l'analyse du coût de cycle de vie et les résultats qui en découlent. Ainsi, tout projet de type rénovation ou extension est exclu de l'échantillon.

Type de bâtiment

Au-delà de l'aspect neuf des constructions, ce travail se concentre sur les exigences ZEN dans le secteur résidentiel. Le cas d'étude analyse dans la seconde partie de ce mémoire est un immeuble à appartements, dès lors, seul ce type de bâtiment a été dans un premier temps retenu. En effet, cela permet de donner du sens à la comparaison qui sera effectuée entre le cas d'étude et les résultats du benchmarking. Cependant, afin d'enrichir le travail de recherche, les bâtiments de type « maison individuelle isolée ou jumelée »¹² sont également incorporés dans l'échantillon. La distinction entre les résultats propres aux logements collectifs et logements individuels sera faite quand jugée nécessaire.

¹² Il s'agit du nom attribué aux logements individuels dans les filtres de recherche du site Construction21.

Superficie de bâtiment

Pour les logements individuels, aucune restriction concernant la superficie du bâtiment n'a été appliquée dans la mesure où aucun d'entre eux ne possède des grandeurs jugées hors-normes. Toujours en lien avec le bâtiment sélectionné dans la seconde partie du mémoire, il a été décidé de restreindre l'étude des logements collectifs à des bâtiments de dimensions réduites. En ce sens, les filtres permettent de distinguer les immeubles à appartements dont la longueur est inférieure ou supérieure à 50 mètres. Tous les immeubles à appartements de plus de 50 mètres de longueur sont donc exclus de l'échantillon.

Année de construction

Seul critère défini de manière subjective, il a été décidé que tous les bâtiments construits antérieurement à l'année 2010 soient exclus du benchmarking. En effet, l'objectif est de rassembler des bâtiments qui possèdent des équipements HVAC usuels que l'on peut rencontrer couramment de nos jours. Limiter l'échantillon aux bâtiments construits dans un laps de temps relativement proche de notre époque permet également d'exclure tous les bâtiments plus anciens qui ont servi comme expérimentations au ZEN et qui viendraient donc fausser l'éventuelle tendance générale des résultats.

Zone climatique

La consommation en énergie pour le chauffage étant proportionnelle à l'écart de température entre l'ambiance extérieure et intérieure, il va de soi qu'un bâtiment situé dans une zone climatique plus froide consommera davantage en chauffage qu'un bâtiment situé dans un climat plus doux. Deux options sont alors envisageables pour déterminer un critère propre aux zones climatiques.

La première consiste à effectuer une normalisation du climat afin de neutraliser l'impact de la localisation géographique des cas d'étude. Makhmalbaf et al. (2013) ont défini la normalisation du climat comme « la procédure entreprise pour ajuster la consommation d'énergie modélisée ou mesurée d'un bâtiment à une hypothétique échelle commune ». Plusieurs approches pour ce faire ont été développées dont la méthode des degrés-jours qui reste la plus connue et répandue. Cette première option n'a pas été retenue en raison qu'elle nécessite la connaissance de la répartition de consommation énergétique de chaque cas d'étude afin de pouvoir isoler et pondérer la consommation liée uniquement au chauffage, alors que de nombreux auteurs de projet de la base de données présentent la consommation en énergie de manière agrégée.

La seconde approche, et donc celle choisie, consiste à comparer des cas d'étude faisant partie de la même zone climatique afin d'obtenir un échantillon avec des climats extérieurs relativement similaires. La classification climatique Köppen-Geiger très répandue dans divers domaines tels que la géographie, l'hydrologie, l'agriculture ou encore la biologie a été mise à jour en 2006 par Kottek et al. Celle-ci a permis de filtrer les bâtiments de la base de données en sélectionnant uniquement ceux caractérisés par un climat tempéré et humide avec des étés tempérés (codé Cfb¹³). La figure 11 montre

¹³ La lettre C signifie que la température moyenne du mois le plus froid est comprise entre -3 °C et 18 °C et que la température moyenne du mois le plus chaud dépasse les 10°C. La lettre f signifie qu'il y a des précipitations tous les mois de l'année. Enfin, la lettre b est caractéristique d'une température moyenne inférieure à 22°C pour le mois le plus chaud et que les 4 mois les plus chauds ont une température moyenne qui dépasse les 10°C (Kottek et al., 2006).

que ce type de climat est caractéristique de la totalité des Pays-Bas, d'une majeure partie de la France, de la Belgique et du Luxembourg et d'un morceau de l'Allemagne. Non visibles sur la figure 11, le Royaume-Uni ainsi que l'Irlande sont également majoritairement conditionnés par ce type de climat.

Si cette approche réduit le nombre de bâtiments retenus, l'effet reste mineur dans le cas de la base de données Construction21 en raison qu'une majorité des bâtiments répertoriés sont situés en France, en Belgique et au Luxembourg.

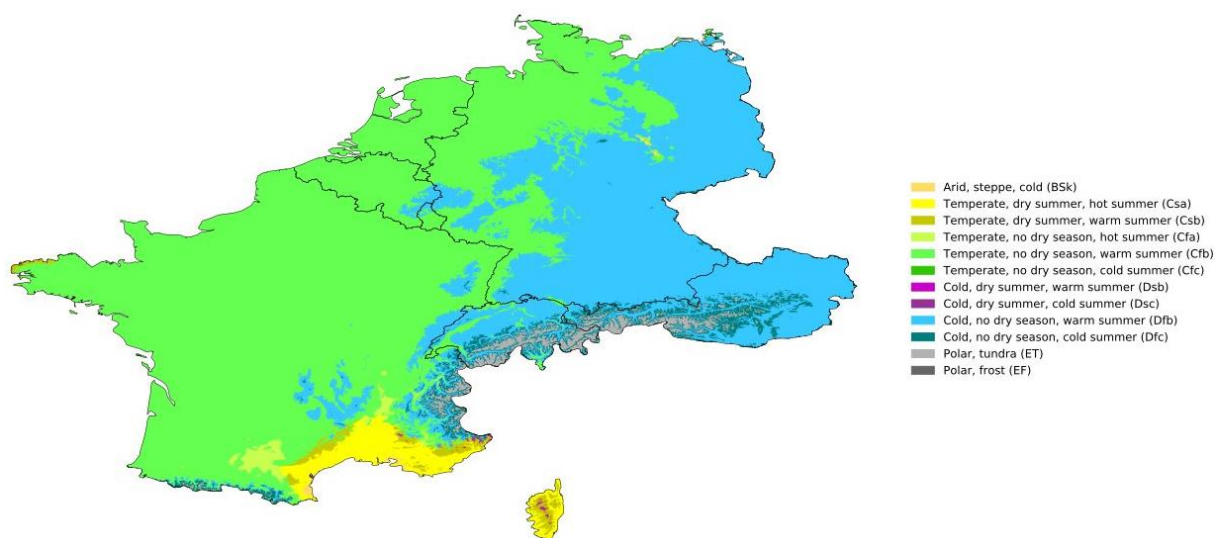


Figure 11 : Classification Köppen-Geiger de l'Europe de l'Ouest
Extrait de « Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution » par H. Beck et al. (2018)

Consommation d'énergie primaire

Les cas d'études recensés sur Construction21 ne sont pas tous ZEN ou QZEN. Certains auteurs de projet ont pu par exemple inscrire leur bâtiment uniquement pour une particularité technique qui s'inscrit dans une démarche durable de construction, mais qui ne fait pas du bâtiment un exemple de consommation énergétique. Afin de récolter des données propres aux bâtiments ZEN, il était donc nécessaire de fixer un seuil de consommation énergétique, qui comme vu dans l'état de l'art, n'existe pas dans la définition courante des exigences ZEN. Il a donc été décidé de se rattacher à la récente législation belge QZEN afin de fixer une valeur. Pour rappel, les exigences QZEN wallonnes fixent le critère d'une consommation spécifique d'énergie primaire inférieure à 85 kWh/m².an. Celle-ci ne comprend pas l'énergie nécessaire pour l'éclairage artificiel (SPW, 2018), contrairement aux consommations présentées dans la base de données. Ainsi en prenant cette valeur comme seuil, ce critère fictif se relève être légèrement plus ambitieux que les exigences QZEN, qui comme vu dans l'état de l'art, s'inscrivent davantage dans la continuité de la politique énergétique wallonne que comme une véritable révolution vers le ZEN. En d'autres termes, ce nouveau label est plus performant que le label A de la réglementation PEB.

Pour renforcer encore davantage ce critère, il a été décidé que celui-ci doit atteindre sa valeur cible sans déduction de l'énergie produite par d'éventuels panneaux photovoltaïques. Cela permet d'éviter d'incorporer au benchmarking tout bâtiment avec une grande demande énergétique, mais qui serait compensée par une forêt de panneaux solaires.

Fiabilité des données

Si les six premiers critères déterminés ont permis d'effectuer une recherche ciblée sur les bâtiments ZEN, rien à ce stade-ci hormis la présence de modérateurs sur le site internet, ne permet d'assurer la qualité des données exploitées ou que celles-ci sont en nombre suffisant. En ce sens, cinq niveaux fictifs de fiabilité des données sont définis afin de sélectionner uniquement les bâtiments encodés de manière relativement rigoureuse et complète :

- **Niveau 1** : Les fiches descriptives sont trop incomplètes que pour être exploitables et/ou certaines valeurs sont données sans la moindre explication.
- **Niveau 2** : Les 9 données cibles définies au chapitre 4.2 sont disponibles (excepté le coefficient de déperdition moyen et le débit d'étanchéité à l'air). Celles-ci sont accompagnées d'un texte justifiant et décrivant les systèmes mis en place.
- **Niveau 3a** : Les 9 données cibles définies au chapitre 4.2 sont disponibles (excepté éventuellement le débit d'étanchéité à l'air). Celles-ci sont accompagnées d'un texte justifiant et décrivant les systèmes mis en place.
- **Niveau 3b** : Les 9 données cibles définies au chapitre 4.2 sont disponibles (excepté éventuellement le coefficient de déperdition moyen). Celles-ci sont accompagnées d'un texte justifiant et décrivant les systèmes mis en place et d'un document provenant d'un organe agréé justifiant la valeur obtenue pour le débit d'étanchéité à l'air.
- **Niveau 3c** : Les 9 données cibles définies au chapitre 4.2 sont disponibles (excepté éventuellement le coefficient de déperdition moyen et le débit d'étanchéité à l'air). Celles-ci sont accompagnées d'un texte justifiant et décrivant les systèmes mis en place et d'un document provenant d'un organe agréé justifiant la valeur obtenue pour la consommation d'énergie primaire, avec et sans déduction de l'énergie produite par d'éventuels panneaux photovoltaïques.

Ainsi, tous les bâtiments avec un niveau 1 de fiabilité sont sortis de l'échantillon, tandis que les niveaux 3b et 3c représentent les cas d'études les plus fiables, car ils sont accompagnés d'au moins une pièce jointe attestant des performances du bâtiment. Comme cela sera expliqué dans le prochain chapitre, un filtrage des cas d'étude jusqu'au niveau 2 permet d'obtenir des résultats sur les équipements HVAC et systèmes d'énergies renouvelables. La sélection jusqu'au niveau 3a et 3b donne des résultats sur respectivement le coefficient de déperdition moyen et le débit d'étanchéité à l'air. Enfin, l'échantillonnage jusqu'au niveau 3c permet d'obtenir et de comparer la consommation en énergie primaire avec le coût de construction du cas d'étude considéré.

Cette liste de 7 critères est bien entendu exhaustive. L'implémentation de filtres différents et/ou supplémentaires aurait impliqué des résultats différents. Par exemple, le critère sur le besoin en énergie pour le chauffage inférieur à 15 kWh/m².an pour obtenir le certificat « bâtiment passif » (Passivhaus Institute, 2015) aurait pu être appliqué, mais aurait sérieusement réduit la taille de l'échantillon, car de nombreux cas d'étude ne proposent pas le détail de la répartition énergétique entre les différents secteurs. Le choix de ces 7 critères ainsi définis vise à trouver l'équilibre en pertinence d'échantillonnage et sélection d'une base de bâtiments suffisamment représentative.

5. RÉSULTATS DU BENCHMARKING

5.1 TAILLE ET DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON

La base de données Construction21 recensait au mois de juillet 2021 pas moins de 846 cas d'étude, répartis sur tous les continents et constitués de tous types de bâtiments publics ou privés. L'échantillonnage effectué à partir des 6 premiers critères a permis d'égrainer la sélection et d'obtenir une première sélection de 77 bâtiments, composés de 39 immeubles à appartements et 38 logements individuels. À ce stade, l'échantillon est toujours composé de bâtiments issus du niveau 1 de fiabilité. En excluant ces derniers, l'effectif se réduit finalement à 35 unités, soit 19 immeubles à appartements et 16 logements individuels. Le critère de fiabilité des données réduit ainsi l'effectif d'environ 50%. Comme vu au chapitre précédent, ces 35 bâtiments ne contiennent pas forcément tous les 9 variables recherchées.

La figure 12 résume ainsi l'évolution de l'effectif en partant de la population initiale de la base de données.

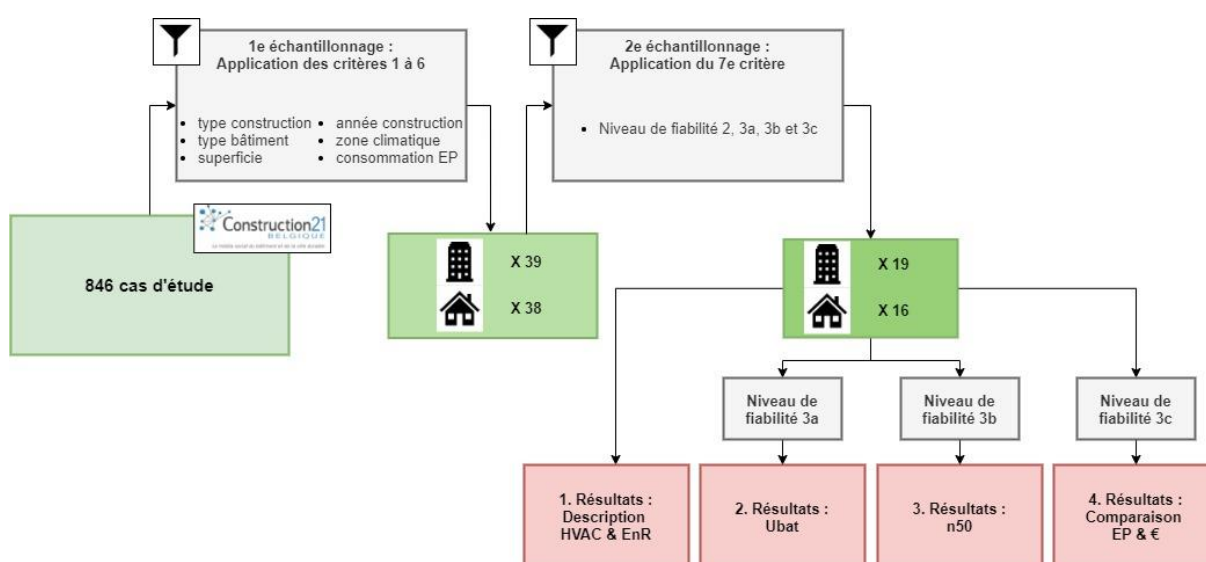


Figure 12: Évolution de l'effectif du benchmarking en fonction des critères d'échantillonnage

En termes de répartition géographique, on constate que 24 des 35 bâtiments de la sélection sont situés en France, 4 au Luxembourg, 3 en Belgique, 2 en Angleterre et 2 en Irlande. En revanche, il ne subsiste aucun cas d'étude aux Pays-Bas et en Allemagne en raison respectivement du peu de bâtiments initialement référencés et d'une zone climatique différente majoritaire.

Le tableau 4 présente brièvement les 35 bâtiments à travers quelques données descriptives telles que la localisation du projet, le type de logement, le nom du projet, la surface utile du projet et l'année de construction. Le tableau complet compilant l'ensemble des données récoltées peut être consulté dans les annexes.

PAYS, PROVINCE/DEPARTEMENT	TYPE DE LOGEMENT	NOM DU PROJET	SURFACE UTILE [m²]	ANNEE DE CONSTRUCTION
Angleterre, Canterbury	Individuel	Steel Farm	84	2013
Angleterre, Birmingham	Individuel	Old Holloway straw passivhaus	95	2016
Belgique, Bruxelles	Collectif < 50m	HAREN 02	3377	2011
Belgique, Bruxelles	Collectif < 50m	Projet "Perle"	1950	2017
Belgique, Hainaut	Collectif < 50m	Cité du Centenaire	939	2016
France, Marne	Individuel	Maison MOASTEEL	145	2016
France, Oise	Individuel	Maison BEPOS en bois ALISTAIR	80	2014
France, Essonne	Collectif < 50m	Immeuble collectif biosourcé bas carbone	2180	2020
France, Seine-et-Marne	Collectif < 50m	Opération Zéro Carbone sur logements semi-collectifs	3693	2019
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Botanica - La Chapelle sur Erdre	3450	2017
France, Indre-et-Loire	Collectif < 50m	Résidence Myosotis	952	2018
France, Paris	Collectif < 50m	Logement collectif « la campagne à Paris »	649	2016
France, Charente-Maritime	Collectif < 50m	Logements sociaux du Vallon	1427	2013
France, Seine-et-Marne	Individuel	Les Lodges - bâtiment démonstrateur	136	2015
France, Puy-de-Dôme	Individuel	Petite maison contemporaine écologique de niveau passif	112	2013
France, Bas-Rhin	Individuel	Maison HQE BBC-Effinergie à Gertwiller (67)	157	2011
France, Pas-de-Calais	Individuel	Maison HQE BBC-Effinergie à Fresnes	178	2011
France, Maine-et-Loire	Individuel	Maison Saint-Gobain Multi-confort	167	2011
France, Moselle	Individuel	Maison NF démarche HQE BBC- effinergie à Saint Avold	118	2011
France, Indre-et-Loire	Individuel	Longère HQE BBC-Effinergie à Rochechouart	134	2011
France, Paris	Collectif < 50m	37, rue Myrha	570	2013
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Osmoz / 44 logements certifiés 'passiv'haus'	3106	2015
France, Seine-Saint-Denis	Collectif < 50m	Bois Debout	1323	2015
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Be Positive	2554	2014
France, Paris	Collectif < 50m	12 rue de l'Ermitage - 75020 - Elogie-Siemp	565	2014
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Le Grand Carcouët	3276	2013
France, Vosges	Collectif < 50m	Résidence passive bois/paille Jules Ferry	2707	2013
France, Paris	Collectif < 50m	Immeuble bioclimatique de logements sociaux à Paris	1785	2012
France, Haut-Rhin	Collectif < 50m	Quartier Markstein à Wittenheim	2649	2011
Irlande, Bunclody	Individuel	Passive House Drumderry	227	2016
Irlande, Dublin	Individuel	House at Carrickmines	198	2018
Luxembourg	Individuel	Living Lab Ncube	121	2014
Luxembourg	Individuel	Maison Témoin passive CLK	179	2016

Luxembourg	Individuel	Maison auto suffisante en énergie à Rédange	237	2015
Luxembourg	Collectif < 50m	Wooden apartment building in Steinfort	1034	2017

Tableau 4: Présentation des cas d'étude du benchmarking ZEN

5.2 ANALYSE DES DONNÉES RÉCOLTÉES

Les résultats concernant la description des équipements, la performance des enveloppes thermiques et les coûts de construction sont présentés sous forme de corrélations graphiques avec le niveau de consommation d'énergie primaire.

5.2.1 Système HVAC et EnR

Dans cette section consacrée aux résultats propres aux équipements HVAC et d'EnR, et afin d'observer (ou non) d'éventuelles disparités en fonction de la consommation énergétique, l'effectif du benchmarking est subdivisé en 5 classes énergétiques fictives. Ces catégories vont des bâtiments à énergie positive¹⁴, jusqu'aux bâtiments dont la consommation en EP est comprise entre 60 et 85 kWh/m².an. Cette subdivision a pour inconvénient de donner lieu à des effectifs très faibles par classe énergétique. Si certains résultats sont donnés en pourcentage [%], les petites tailles de ces sous-échantillons seront systématiquement indiquées pour bien garder à l'esprit que les résultats ne peuvent s'interpréter comme des généralités.

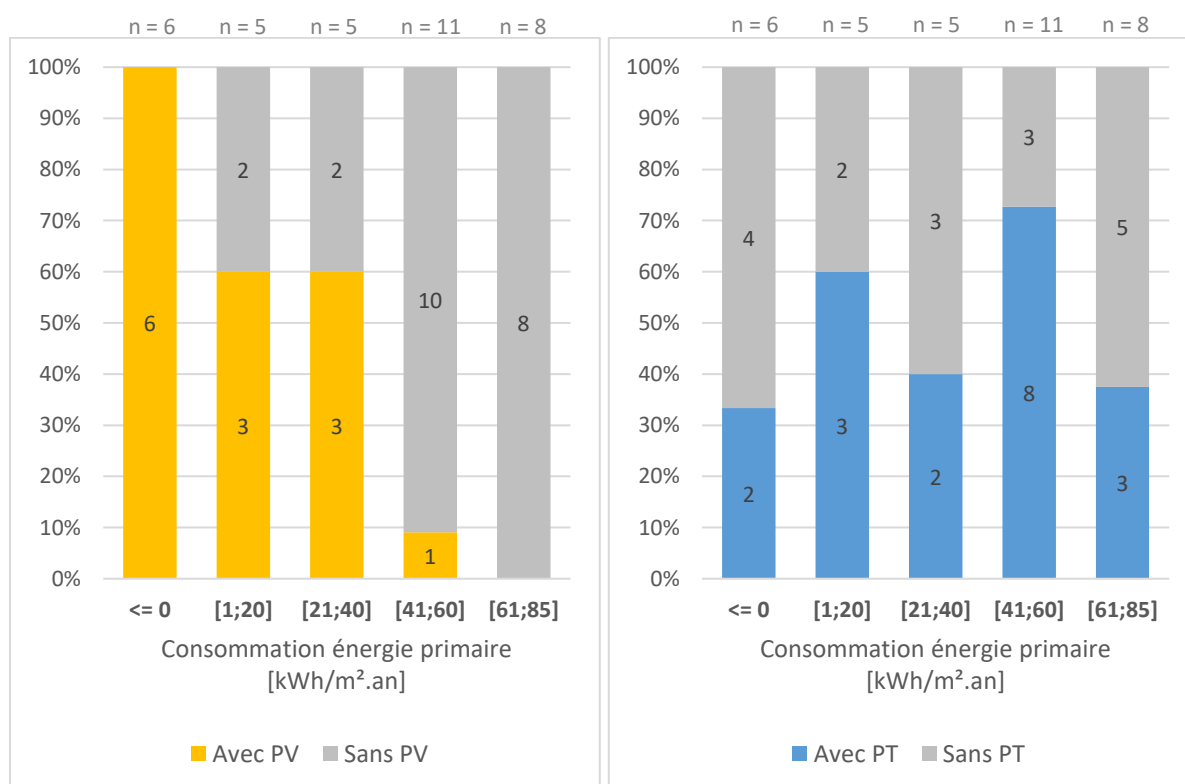


Figure 13: Occurrences de PV et PT en fonction de la consommation en EP

¹⁴ La corrélation est donc effectuée avec la consommation en énergie primaire incluant la production par les panneaux photovoltaïques.

Les différentes définitions rencontrées sur l'exigence ZEN ont notamment comme point commun de solliciter l'usage de systèmes d'énergies renouvelables. La figure 13 illustre le pourcentage de projets équipés de panneaux photovoltaïques et panneaux solaires thermiques en fonction de la consommation en énergie primaire du bâtiment.

Le premier constat pour les systèmes PV est que son pourcentage augmente au plus les bâtiments sont performants. La constante augmentation des réglementations énergétiques, notamment en Belgique, incite le consommateur à opter pour ce genre d'installations qui permettent de réduire considérablement le bilan énergétique. Pour les bâtiments ZEN et QZEN, les résultats nous apprennent que la fréquence de système PV (37% ici, toutes classes énergétiques confondues) est plus élevée que la moyenne de l'ensemble des ménages belge qui est de 15% (Agence Internationale de l'Energie (AIE), 2020a). De plus, la forte réduction des coûts du photovoltaïque entraînant un temps de retour sur investissement de plus en plus court, ainsi que l'amélioration du rendement des cellules PV est notamment responsable de l'augmentation exponentielle de son utilisation à travers le monde. Enfin, en toute logique, le graphique montre également que les bâtiments à énergie positive en sont tous équipés.

Le constat est tout à fait différent pour les capteurs solaires thermiques où leur taux d'occurrence ne semble suivre aucune tendance. La part souvent majoritaire de l'ECS sur la facture énergétique des bâtiments ZEN, par rapport aux constructions ordinaires, motive davantage les architectes à utiliser ces systèmes pour atteindre de bonnes performances. Le temps de retour sur investissement plus long par rapport au PV n'a pas semblé avoir découragé les auteurs de projet, car 51% des bâtiments du benchmarking en sont équipés contre 37% pour le PV.

Le recours à des solutions d'EnR utilisant une autre source que le soleil est quasiment inexistant dans le benchmarking effectué. En effet, à l'heure actuelle des solutions utilisant le vent ou la cogénération semblent toujours très marginales comme cela a été pointé dans l'état de l'art (Belussi, 2019). La seule exception se trouve dans le projet de logements collectifs « Botanica – La Chapelle sur Erdre » situé en Loire-Atlantique (France), où la société Qarnot Computing a installé trois serveurs informatiques. Ceux-ci permettent simultanément de subvenir à l'activité informatique d'un client extérieur nécessitant un besoin important en calculs et à couvrir environ 30% des besoins en ECS des logements. Ces trois chaudières numériques d'une puissance totale de 6kW génèrent ainsi 9,9 kWh/m².an, en plus des 8,2 kWh/m².an produits par les 60 m² de panneaux photovoltaïques (Sellier, 2020).

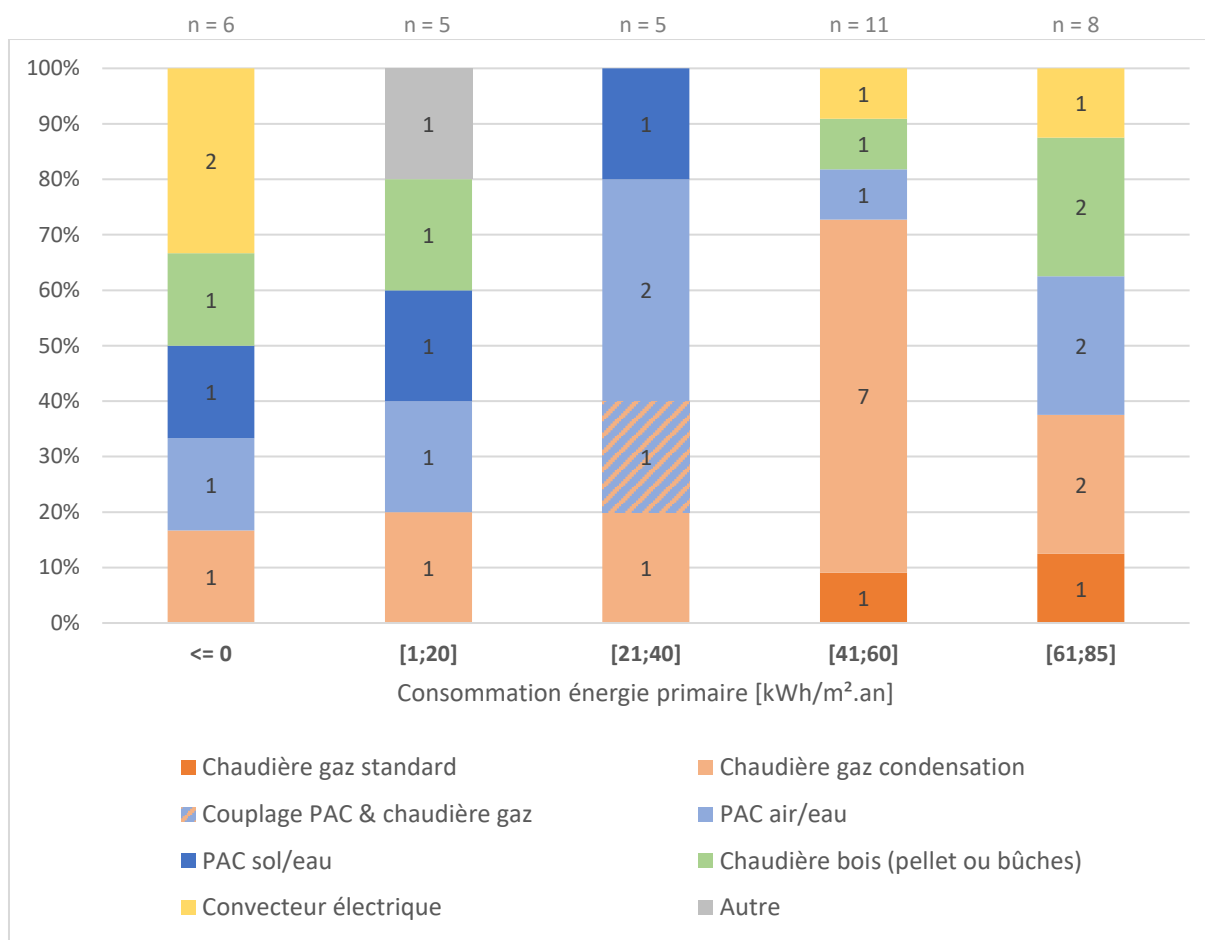


Figure 14: Occurrences des systèmes de chauffage en fonction de la consommation en EP

Belussi et al. (2019) ont démontré que le secteur résidentiel constitue la catégorie où la diversité de solutions pour atteindre le niveau ZEN est la plus grande. Cela se confirme avec la figure 14 qui montre le peu d'occurrences de chaque système par classe énergétique, y compris pour les niveaux les plus hauts. Un autre constat similaire à cette étude est que les pompes à chaleur (PAC) sont davantage utilisées dans les bâtiments les plus performants. Par ailleurs, la solution la plus couramment rencontrée dans le ZEN, toujours selon Belussi et al. (2019), à savoir le couplage PAC et PV, reste l'option la plus populaire parmi les cas d'étude faisant partie des deux meilleures classes énergétiques.

En revanche, les 2 dernières classes énergétiques sont majoritairement représentées par l'option des chaudières à gaz, qui reste la principale solution employée à l'échelle globale du benchmarking avec un taux d'occurrence de 40%. Les PAC (aérothermie et géothermie) se placent en seconde position avec 29%.

Plus atypique, une maison française en Maine-et-Loire (Maison Saint-Gobain Multi-confort), affirme se passer de système de chauffage principal et n'a recourt qu'aux gains solaires et à un puits provençal pour atteindre une ambiance intérieure confortable. Cela a pour effet de réduire drastiquement la consommation énergétique de la maison.

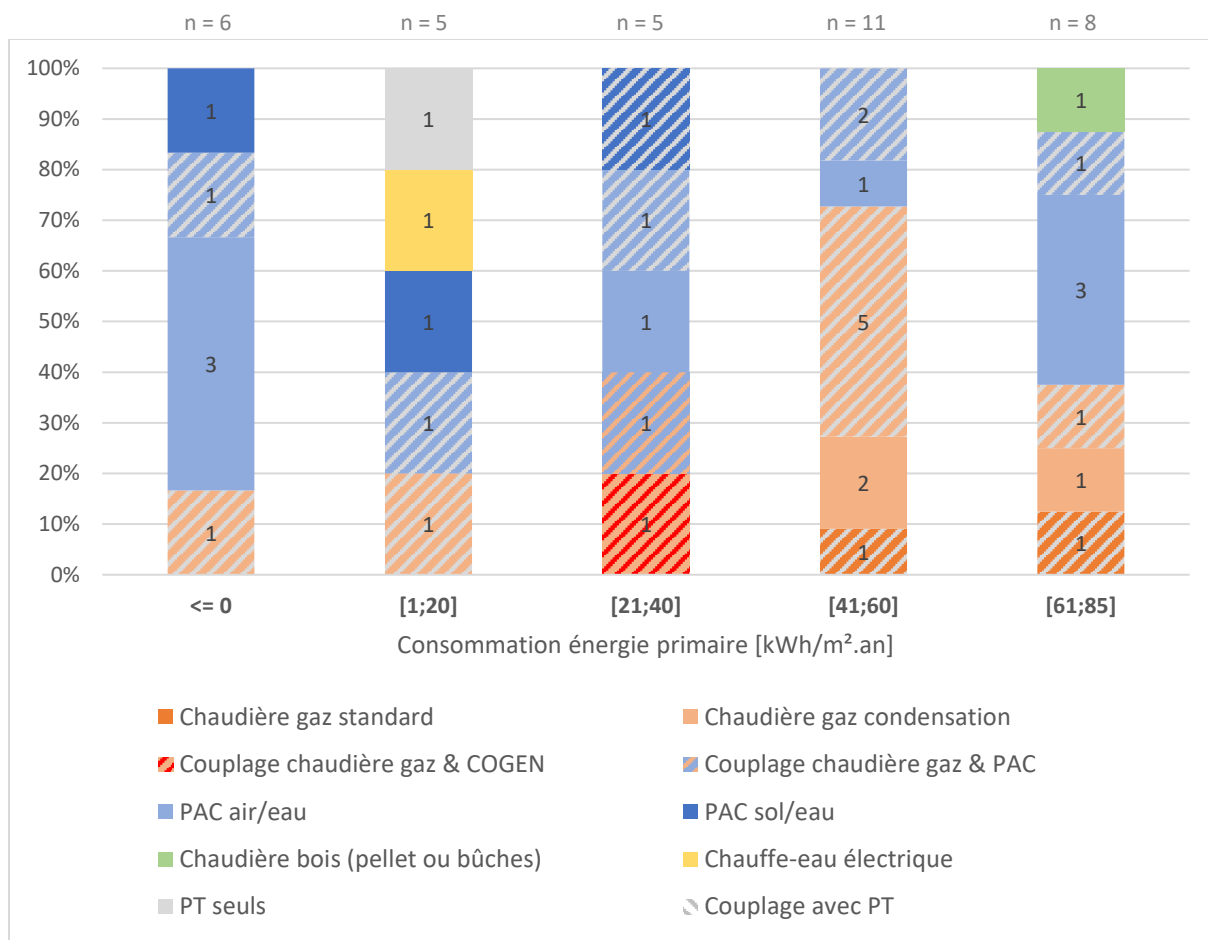


Figure 15: Occurrences des systèmes de production de l'ECS en fonction de la consommation en EP

L'occurrence des systèmes dédiés à la production d'ECS présenté à la figure 15 a évidemment de nombreuses similitudes avec la figure 14, étant donné que de nombreux projets utilisent un même appareil pour chauffer et produire l'ECS. L'exception principale concerne les chaudières à biomasse où seule l'une des cinq présente dans l'échantillon est utilisée pour les deux usages. Celles-ci sont systématiquement remplacées par des PAC, ce qui renforce le monopole chaudière à gaz – pompe à chaleur. Sur l'ensemble de l'échantillon, cette dernière est par ailleurs le premier système utilisé pour l'ECS avec une fréquence de 49%, contre 40% pour les chaudières à gaz.

Comme expliqué dans les paragraphes précédents sur les EnR, il est intéressant de noter l'important taux de couplage de ces systèmes avec des capteurs solaires thermiques (représenté dans le graphique par des hachures grises).

Enfin, l'utilisation de chauffe-eaux électriques, assez gourmands en énergie primaire, est une solution utilisée dans seulement un des cas d'étude.

5.2.2 Performance de l'enveloppe

Si certaines études ont démontré que le niveau ZEN ne peut être atteint sans avoir recours à des techniques HVAC performantes présentant de bons rendements, un bâtiment ZEN ne peut non plus se passer de mesures visant à réduire la demande en énergie. De nombreuses variables peuvent influencer autant la demande en chauffage, que celle pour le refroidissement, l'ECS ou encore l'éclairage artificiel. Les résultats concernant le coefficient de déperdition moyen et la mesure de l'étanchéité à l'air sont détaillés dans ce sous-chapitre.

Pour rappel, les 35 projets de l'échantillon ne disposaient pas tous de ces 2 informations, impliquant donc une variation de l'effectif étudié. Comme pour la description des équipements, les résultats sont de nouveau présentés sous forme de corrélations graphiques en fonction de la consommation en énergie primaire. L'énergie primaire considérée ici est celle donnée sans prise en compte de la production d'énergie in situ, car celle-ci est plus proche de la notion de « besoin énergétique ». La fourchette des consommations en EP hors EnR était plus étroite et l'effectif étant réduit, les résultats sont donnés en fonction de seulement 3 classes énergétiques.

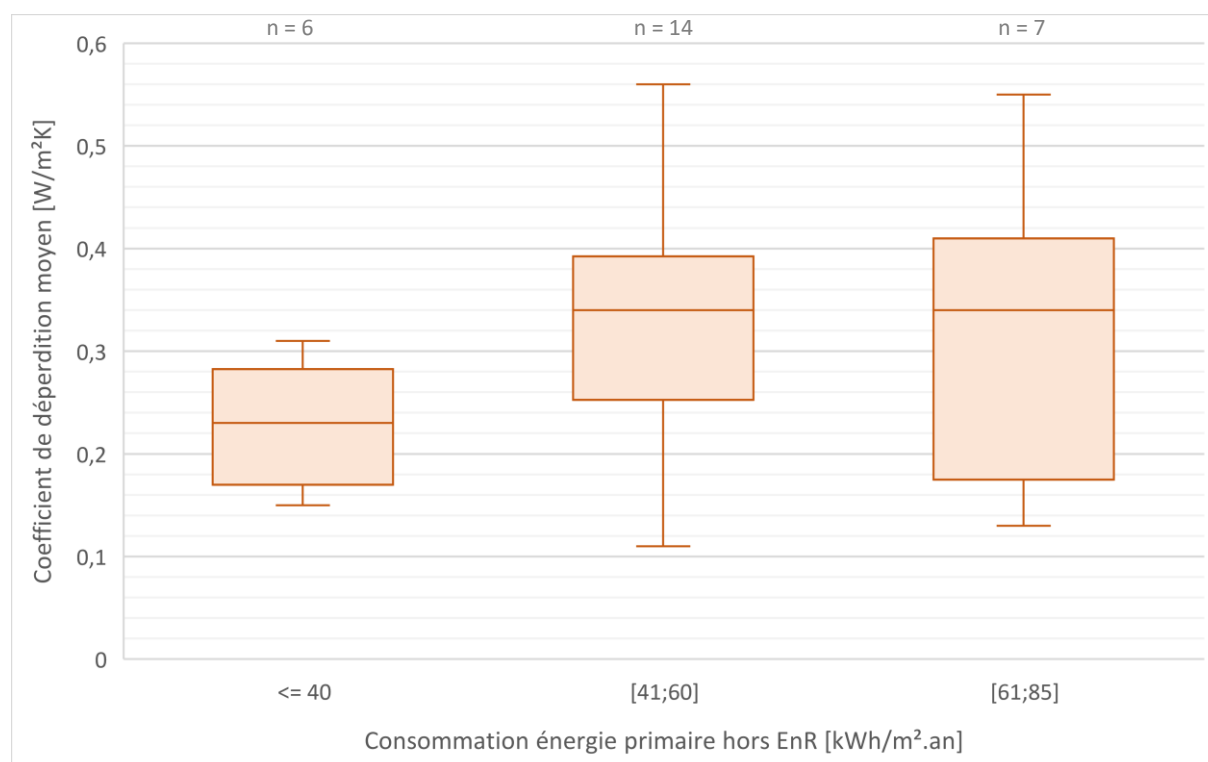


Figure 16: Coefficient de déperdition moyen en fonction de la consommation en EP hors EnR

La figure 16 illustre que le choix de mettre en œuvre une enveloppe isolante très performante, autant pour les éléments opaques que transparents, est une piste couramment suivie afin d'atteindre de très bonnes performances énergétiques. La valeur médiane est de 0,23 pour les bâtiments dont la consommation en EP est inférieure à $40 kWh/m^2.an$, 0,34 entre 41 et $60 kWh/m^2.an$, et également 0,34 pour la dernière catégorie énergétique. La condition d'une isolation très poussée semble donc être plus souple pour atteindre les niveaux de performance QZEN.

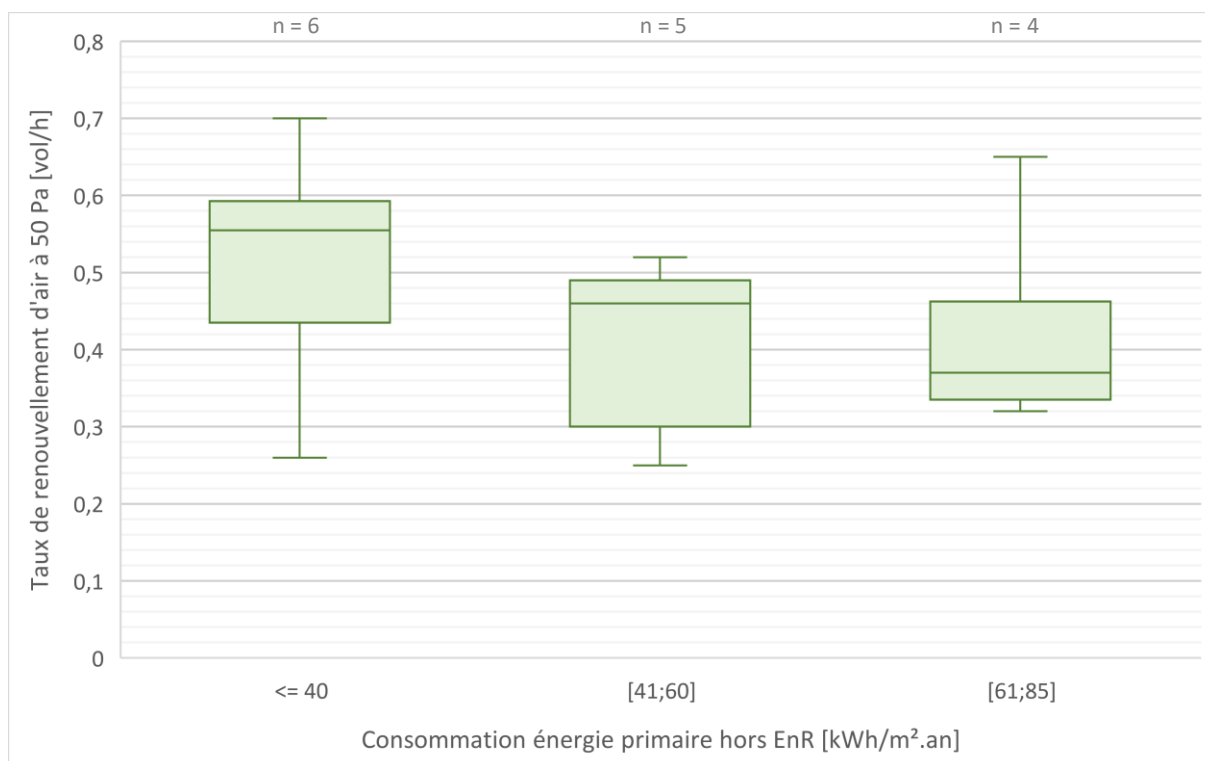


Figure 17: Taux de renouvellement d'air en fonction de la consommation en EP hors EnR

L'étanchéité à l'air d'un bâtiment demeure un paramètre plus difficilement contrôlable que le degré d'isolation de l'enveloppe thermique. Ce paramètre est également plus difficilement mesurable, c'est pourquoi uniquement les projets sur lesquels figurait le résultat d'un test d'infiltrométrie, comme le « blowerdoor test », ont été retenus, entraînant une réduction de la taille de l'échantillon. La grande variabilité des résultats montrée au graphique 17 semble indiquer que le taux de renouvellement d'air a été moins déterminant pour les auteurs de projet dans la quête d'atteindre des niveaux énergétiques très bas. Par exemple, le projet de logements collectifs « Botanica – La Chapelle sur Erdre » atteint une consommation en EP hors EnR de 27 kWh/m².an avec cependant un taux de renouvellement d'air assez moyen de 0,7 vol/h. La valeur médiane, toutes classes énergétiques confondues, est de 0,43 vol/h.

5.2.3 Coûts de construction

Dans ce sous-chapitre, les coûts de construction sont présentés en fonction de la consommation en énergie primaire, avec production des EnR. Pour rappel, ces coûts sont calculés sans compter la valeur foncière du terrain, hors TVA, hors honoraires et hors aménagements des abords. La distinction entre logements collectifs et individuels est ici réalisée afin de pouvoir observer (ou non) d'éventuelles différences. Les bâtiments équipés de panneaux photovoltaïques ou non sont également dissociés afin de permettre d'apprécier l'impact de ceux-ci sur la consommation. Un premier graphique rassemblera tous les projets du benchmarking, le second se concentrera uniquement sur les projets qui présentaient dans leur fiche descriptive un certificat de performance énergétique¹⁵.

¹⁵ À savoir, les bâtiments dont le niveau de fiabilité a été défini comme 3c.

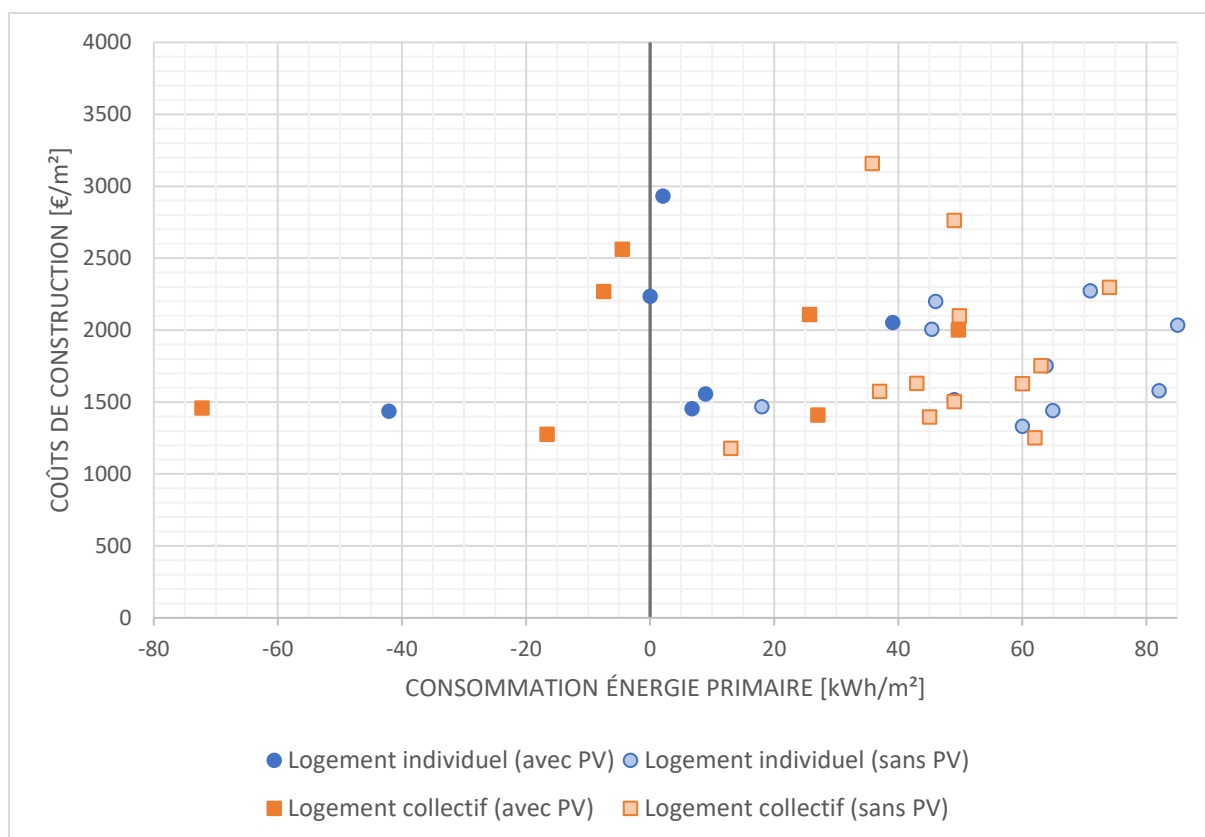


Figure 18: Coûts de construction des bâtiments ZEN et QZEN en fonction de la consommation en EP¹⁶

Le nuage de points des 35 projets de la figure 18 apporte comme premier constat que la quasi-totalité des cas d'étude équipés d'un système PV présente une meilleure consommation énergétique que ceux qui n'en sont pas équipés. La grande disparité du nuage montre qu'il est compliqué d'émettre une quelconque hypothèse de corrélation tant le nombre de variables pouvant influencer autant le prix que la consommation est grand. Il est également difficile d'observer une différence entre logements individuels et collectifs tant les deux couleurs qui leur sont associées dans le graphique semblent se mélanger.

Le prix de construction médian pour tous les logements collectifs est de 1631€/m² et de 1666€/m² pour tous les logements individuels.

Le graphique 19 est tiré des 15 bâtiments dont les performances sont justifiées par un certificat énergétique. Il est donc possible ici de poser des constats en s'intéressant à certains bâtiments en particulier.

¹⁶ Le formalisme de ce graphique est inspiré de l'étude CO-ZEB (coût optimum) de Mouton et al. (2013)

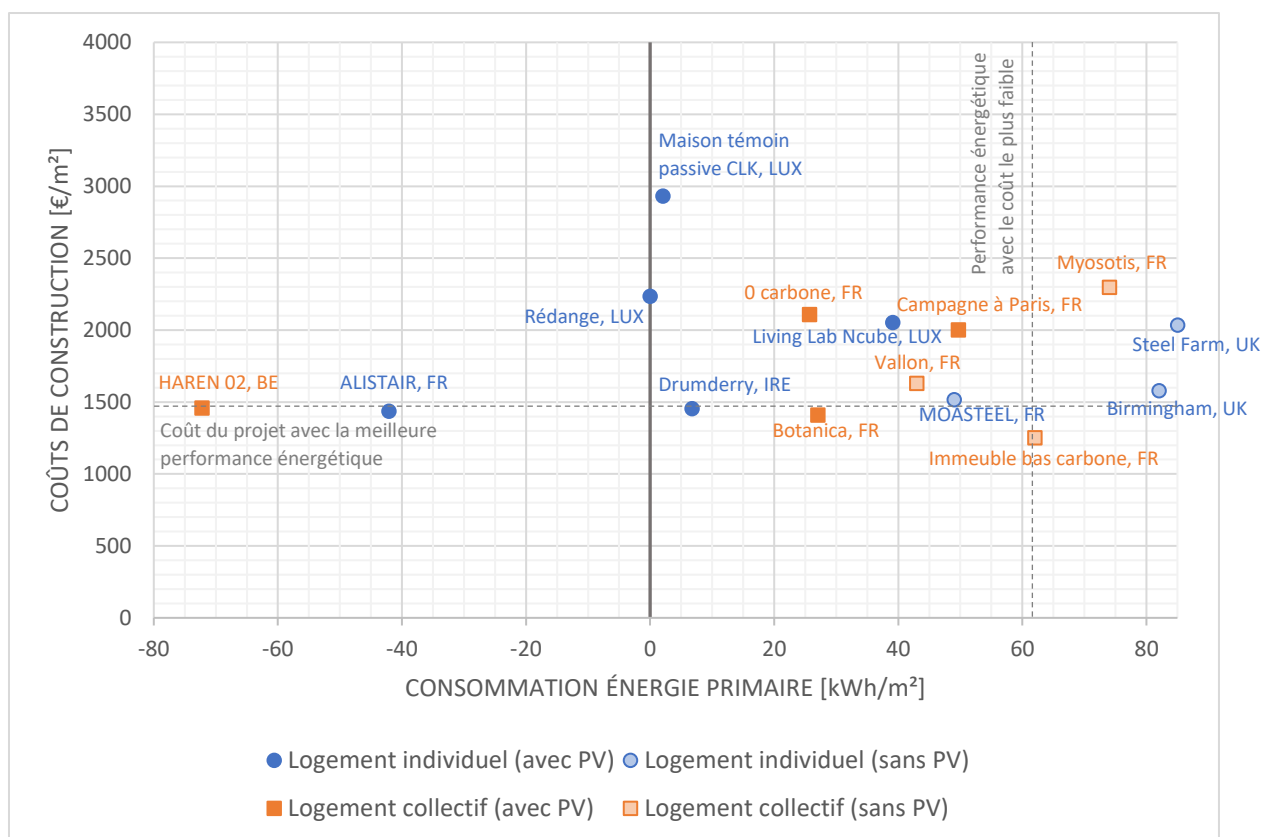


Figure 19: Coûts de construction des bâtiments ZEN et QZEN en fonction de la consommation en EP (échantillon certifié)

Si la sélection uniquement de cas d'étude avec certificat énergétique ne change pas l'aspect hétérogène du graphique, celle-ci permet néanmoins de mettre en évidence les projets présentant les meilleurs résultats et donc de se rendre compte de ce qu'il est possible d'accomplir en termes de coûts et de performance énergétique.

Les logements collectifs affichent des coûts de construction compris entre 1253 et 2299€/m². La performance énergétique relative au coût de construction le plus petit est atteinte par le projet « Immeuble collectif biosourcé bas carbone », situé dans le département de l'Essonne en France, avec 60 kWh/m².an. Toutefois, le coût de ce bâtiment reste assez proche de celui atteint par le projet présentant la meilleure performance énergétique. En effet, le projet belge à énergie positive « HAREN 02 », affiche un coût de 1460€/m² pour une consommation négative de 72,25kWh/m².an¹⁷. Le prix de ce projet a été rendu aussi bas grâce à un système de standardisation et de préfabrication. La consommation, de son côté, s'explique par le soin accordé aux 3 piliers du ZEN. Tout d'abord, une importante réduction de la demande énergétique et l'intégration d'équipements performants, permettent une consommation de chauffage de seulement 3,6kWh/m².an, 5,2 pour l'ECS et 2,1 pour les auxiliaires. En effet, le système installé est un système dit « compact » qui combine les besoins de ventilation, de chauffage et d'ECS, notamment en exploitant les calories de l'air vicié pour l'ensemble de ses fonctions. De plus, l'installation massive de panneaux photovoltaïques assure la production de 39,8 kWh/m².an en énergie finale, c'est-à-dire largement de quoi compenser et dépasser la consommation de ce projet fonctionnant entièrement à l'électricité (Lheureux, 2015).

Côté maison, c'est le projet « Maison BEPOS en bois ALISTAIR » qui possède le meilleur rendement consommation-prix, avec -42,1 kWh/m².an pour 1438€/m². Cette petite maison à ossature bois (80m²

¹⁷ Pour rappel, tout comme la consommation, la production d'électricité finale est également multipliée par 2,5 pour obtenir son équivalent d'énergie primaire.

nette) située en France, utilise également la même recette que le projet précédent pour arriver à ces résultats. La préfabrication est poussée encore plus loin, car cette maison a été conçue pour pouvoir être produite en série à grande échelle. Le coefficient de déperdition moyen de 0,11 W/m².K obtenu grâce aux 40cm de laine minérale dans les parois et le triple vitrage permettent de réduire fortement la demande en énergie. De plus, un équipement similaire à celui utilisé dans le projet « HAREN 02 » permet de diminuer la consommation finale¹⁸. Enfin, la faible consommation du bâtiment est compensée par les 20m² de panneaux PV produisant 34,32 kWh/m².an en énergie finale (Brard, 2015).

5.2.4 Effet combiné des variables

Comme il a pu être observé, toutes les variables n'ont pas un effet évident sur la consommation en énergie primaire quand elles sont considérées de manière isolée. C'est par exemple le cas pour le taux de renouvellement d'air qui selon la figure 17 varie de manière aléatoire avec une consommation décroissante. Le but de cette section est donc de considérer de manière couplée les variables ciblées des cas d'étude afin d'observer leur impact sur le niveau de consommation. En particulier, on s'intéresse ici au coefficient de déperdition moyen, au taux de renouvellement d'air, à la production d'énergie via les panneaux solaires et aux équipements HVAC. Chacune des valeurs récoltées pour ces variables est normalisée et convertie en un score allant de 0 à 10. La valeur 0 représente la valeur la plus faible atteinte dans tous les cas d'étude du benchmarking et 10 la valeur la plus performante. La normalisation se fait avec la formule suivante :

$$score_i = (1 - \frac{x_i - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}}) \times 10$$

Avec,

$score_i$: score de la variable i

x_i : valeur de la variable i

x_{min} : valeur minimale de la variable i sur tout le benchmarking

x_{max} : valeur maximale de la variable i sur tout le benchmarking

La production d'énergie par les panneaux photovoltaïques étant une valeur d'autant plus intéressante que celle-ci est grande, le terme « 1 » de la formule est supprimé pour la normalisation de cette variable.

Pour les équipements HVAC qui ne sont pas des variables chiffrées, des points sont attribués et cumulés en fonction de la présence d'équipements considérés performants ou produisant de l'énergie :

Équipement	PAC pour chauffage	PAC pour ECS	Chaudière gaz condensation	Chaudière classique	PT ou COGEN	Système ¹⁹ compact
Score	+4	+4	+1	0	+2	+1

La meilleure combinaison présentée dans les cas d'étude est l'utilisation d'une PAC pour le chauffage et la préparation de l'ECS, couplée à des capteurs solaires, et est ainsi bien égale à 10. À l'opposé, les projets équipés d'une chaudière classique pour le chauffage et l'ECS, sans production via les EnR, aura un score égal à zéro.

¹⁸ La maison est néanmoins également équipée d'un poêle à bois en complément de la PAC.

¹⁹ Par « système compact », on entend le système similaire à celui utilisé dans projet HAREN 02 où la récupération de chaleur de l'air vicié est récupérée autant pour l'air neuf que pour le préchauffage de l'ECS.

Le score de 0 pour la consommation en EP n'est en rien mauvais. Il correspond à la consommation la plus haute du benchmarking, soit les 85 kWh/m².an définis comme étant le niveau QZEN. Le score de 10 correspond quant à lui à la consommation du projet HAREN02, soit -72,25kWh/m².an.

Enfin, il faut bien noter, que ce procédé n'a pas la rigueur scientifique d'une analyse multicritères, notamment en raison que le poids respectif de chaque variable n'est pas étudié ici et n'est donc pas pondéré. Le but est uniquement d'obtenir une impression qualitative de l'effet groupé des variables.

Le tableau et graphique qui suivent présentent les résultats pour les 7 projets où toutes les variables recherchées sont accessibles.

	U _{moyen} [W/m ² .K]		n50 [vol/h]		Production PV [kWh/m ² .an]		HVAC		Conso. EP [kWh/m ² .an]	
Valeur min	0,11		0,25		0		/		-72,25	
Valeur max	0,56		0,7		99,5		/		85	
Δ	0,45		0,45		99,5		/		157,25	
Projet	Valeur	Score	Valeur	Score	Valeur	Score	Valeur	Score	Valeur	Score
HAREN 02	0,15	9,1	0,4	6,7	99,5	10	/	9	-72,5	10
Alistair	0,11	10	0,25	10	85,9	8,6	/	8	-42,1	8,1
Rédange	0,23	7,3	0,54	3,6	35,1	3,5	/	8	0	5,4
CLK	0,15	9,1	0,26	9,8	25,76	2,6	/	10	2,04	5,3
Botanica	0,23	7,3	0,7	0	8,2	0,8	/	5	27	3,7
Ncube	0,16	8,9	0,49	4,7	20,14	2,0	/	8	39,1	2,9
Paris	0,4	3,6	0,65	1,1	11,5	1,2	/	2	49,66	2,2

Tableau 5: Score des variables de 7 projets issus du benchmarking

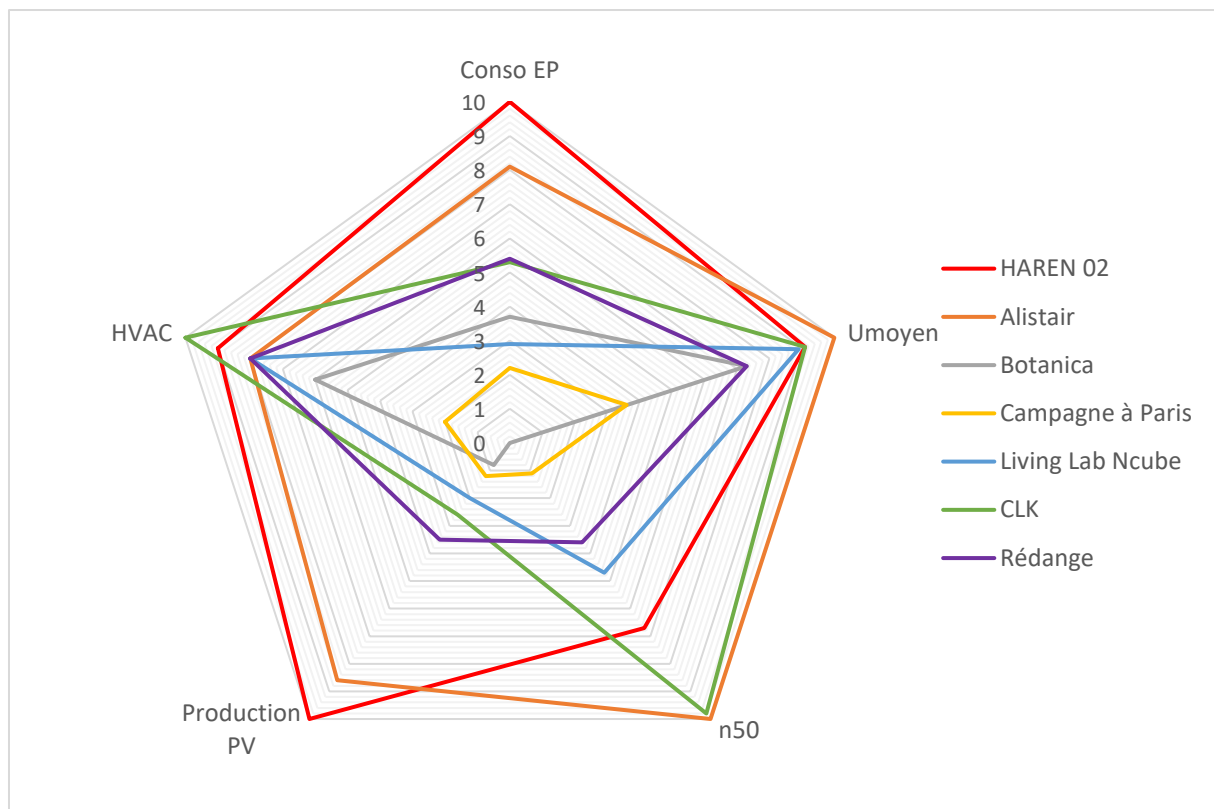


Figure 20: Effet groupé des variables sur le niveau de consommation d'EP

Les projets « HAREN 02 » et « Alistair » (tracé rouge et orange) semblent indiquer que leur bilan énergétique positif est dû à d'excellents scores dans les quatre variables. Le projet « HAREN 02 » présente néanmoins l'exception d'avoir un score de (seulement) 6,7 pour l'étanchéité à l'air, mais compense avec le score maximal pour la production d'énergie. Dans le même ordre d'idée, le niveau netZEN représenté par un score d'environ 5 est atteint par le projet « Rédange » (tracé mauve) alors que ses variables oscillent également autour de valeurs moyennes. Enfin, le projet « Campagne à Paris » (tracé jaune) a une consommation QZEN représentée par un score faible, tout comme ses variables.

Les tracés des projets « CLK » et « Living Lab Ncube » méritent également qu'on y prête attention. Le premier (vert) montre que bien que trois des quatre variables atteignent les scores les plus hauts. Cependant, sa consommation en EP est pénalisée par une faible production des panneaux PV, ce qui l'empêche d'atteindre un bilan énergétique positif à l'instar des projets « HAREN 02 » et « Alistair ». De manière similaire, le projet « Living Lab Ncube » (tracé bleu) atteint seulement le niveau QZEN alors qu'il est caractérisé par un même score que le projet « Rédange » pour les équipements HVAC et même des scores légèrement supérieurs pour le U_{moyen} et le taux de renouvellement d'air. La raison semble de nouveau s'expliquer par une plus faible production d'énergie que pour le projet « Rédange ».

Ainsi, on peut donc conclure que les niveaux de performance les plus hauts impliquent un maximum de rigueur quant au design et l'étude de l'ensemble des variables influençant le niveau de performance. L'installation d'un système de panneaux photovoltaïques permettra néanmoins de combler l'une ou l'autre faiblesse du projet.

6. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

6.1 LIEN ENTRE LE BENCHMARKING ET L'ACCV DU CAS D'ÉTUDE

Le benchmarking a permis d'observer des corrélations entre différentes variables, propres au design technique de bâtiments, avec le niveau de performance énergétique de ceux-ci. Si la dissociation de ces variables durant l'analyse n'a parfois pas mené à des observations évidentes sur la consommation en énergie primaire, l'étude des effets groupés de ces dernières a en revanche montré l'importance et l'exigence que demande un bâtiment ZEN dans chacun de ces domaines.

Le benchmarking n'a pas fait apparaître des liens entre la consommation énergétique et le coût de construction d'un bâtiment ZEN. En effet, il est compliqué de comparer différents projets entre eux au niveau du prix tellement les paramètres propres aux options de construction sont nombreux.

Ainsi, la variation des paramètres utilisés dans le benchmarking devrait se faire au sein d'un même cas d'étude afin de pouvoir observer l'influence de celle-ci sur le coût de construction. Pour ce faire, une analyse des coûts de cycle de vie est réalisée sur un bâtiment qui répond aux mêmes critères que ceux définis dans le benchmarking. À travers différents scénarios définis plus loin dans ce travail, l'ACCV permettra de non seulement observer les conséquences sur les coûts de construction, mais également sur le long terme. En effet, toute modification sur les équipements HVAC et/ou la performance de l'enveloppe entraîne également des impacts sur les coûts de fonctionnement et de maintenance du bâtiment sur son cycle de vie..

6.2 CRITÈRES ET CHOIX DU CAS D'ÉTUDE

Tout d'abord, il a été convenu dès le début de ce travail que le choix du cas d'étude se devait d'être conditionné par les mêmes critères que ceux qui ont permis de réaliser l'échantillonnage du benchmarking de la première partie de ce mémoire. Ainsi les critères de recherches étaient :

- 1) Construction neuve
- 2) Maison individuelle ou immeuble à appartements
- 3) Bâtiment d'une longueur inférieure à 50m
- 4) Construction ultérieure à l'année 2010 (année 2010 comprise)
- 5) Climat tempéré et humide avec été tempéré (codé Cfb selon la classification climatique Köppen-Geiger)
- 6) Consommation en énergie primaire inférieure à 85kWh/m².an

En effet, cela permettra par la suite de comparer les résultats de consommations énergétiques et de coûts de construction, respectivement obtenus via la modélisation énergétique et l'ACCV, avec les valeurs extraites lors de l'analyse du benchmarking.

Le mémoire d'une ancienne étudiante de l'Université de Liège, Charline Malmedy, diplômée d'un master ingénieur civil des constructions, s'est relevé très utile pour trouver le cas d'étude. Son travail réalisé durant l'année académique 2019-2020, s'intitule « Analyse des impacts environnementaux et calcul du coût environnemental d'un immeuble à appartements sur l'ensemble de son cycle de vie pour atteindre les objectifs quasi zéro énergie et net zéro énergie » (Malmedy, 2020). Les similitudes entre son travail et celui-ci pourraient donc être exploitées.

Premièrement, C. Malmedy a réalisé une analyse en cycle de vie sur un bâtiment résidentiel répondant aux normes wallonnes QZEN. De plus, bien que l'étude concerne davantage sur les impacts environnementaux plutôt qu'économiques, une modélisation énergétique a été réalisée afin de prendre connaissance des émissions de dioxyde de carbone liées aux consommations énergétiques. Ainsi, si ce cas d'étude se relève conforme aux critères de sélection de ce mémoire, les résultats obtenus par C. Malmedy pourraient servir comme étalon pour calibrer la modélisation énergétique dont la méthodologie est décrite au chapitre suivant.

C. Malmedy a également défini différents scénarios afin de tendre ce bâtiment vers l'exigence ZEN nette. Nous verrons donc par la suite si ces scénarios pourront être exploités.

6.3 DESCRIPTION DU SITE ET DU BÂTIMENT

Le bâtiment étudié par C. Malmedy se situe dans le récent écoquartier du Sart-Tilman, à la jonction entre le campus universitaire et le centre du village du Sart-Tilman. Le projet est conforme à la majorité des exigences du référentiel quartier durable. En ce sens, un soin tout particulier a été donné aux cheminements piétons, aux recueils et à l'infiltration sur site des eaux pluviales et à la taille des bâtiments afin de créer une ambiance chaleureuse (&SENS, 2017).

L'aménagement qui s'étend sur près de 2,85 ha comprend 92 logements, 4 bureaux et 5 petites surfaces commerciales. Le chantier qui s'est déroulé entre 2014 et 2017 a été divisé en 3 phases au vu de la taille de l'intervention. Le maître d'ouvrage du projet est l'entreprise Thomas & Piron.



Figure 21: Masterplan écoquartier du Sart-Tilman
Extrait de « Sart-Tilman » par &SENS (2017)

Le bâtiment étudié dans le mémoire de C. Malmedy est la résidence Arola, mise en évidence dans le masterplan à la figure 21 et construite durant la deuxième phase du projet. Celle-ci consiste en un immeuble compact de six appartements répartis sur trois niveaux, sans compter les combles qui sont aménagés pour l'un des appartements.

Les trois appartements du rez-de-chaussée et le premier étage sont des duplex directement accessibles depuis la rue. Ils sont tous les trois équipés de trois chambres et de deux petites salles de bain. Le troisième étage est atteint via une coursive extérieure reliée à une cage d'escalier comprise dans le volume protégé du bâtiment. Ce niveau dessert deux appartements comprenant chacun une seule chambre, ainsi qu'un troisième logement avec deux chambres dont l'une d'entre elles se situe dans les combles. Les combles des deux autres appartements sont compris dans le volume protégé, mais ne sont pas aménagés, la hauteur sous plafond y étant trop faible. La surface brute²⁰ des appartements, annoncée par le constructeur, varie de 69,2m² à 132m².

Le compteur électrique de la résidence se situe sous la cage d'escalier au premier niveau tandis que le compteur gaz est accessible depuis une armoire placée en extérieur contre l'une des façades du bâtiment. La superficie dédiée aux communs est ainsi réduite au maximum, d'autant plus que la résidence ne possède pas de cave.

De manière générale, le bâtiment possède des dimensions modestes avec une longueur de 21,77m et 8,71m de largeur pour une emprise au sol de 206m². L'axe longitudinal du bâtiment est parfaitement aligné avec l'orientation est-ouest, rendant ainsi la façade arrière totalement exposée plein sud. Au niveau de l'esthétique, l'architecte a opté pour l'utilisation conjointe du crépi et d'un bardage fibre ciment pour habiller les façades.

Coté énergie, l'ensemble des logements construits dans l'écoquartier respecte au minimum les exigences très basse énergie selon le bureau d'architecture en charge du projet (&SENS, 2017). En particulier, les logements de la résidence Arola sont tous certifiés label A pour la PEB. En d'autres termes, leur énergie spécifique est comprise entre 45 et 85 kWh/m².an.

Ainsi, la résidence Arola répond bien aux six critères définis pour le benchmarking et est donc choisie comme cas d'étude pour la simulation énergétique et l'analyse du coût de cycle de vie.

Catégorie	Critères	Résidence Arola
Type de construction	Construction neuve	OK
Type de bâtiment	Maisons individuelles et immeubles à appartements	Immeuble à appartements
Superficie de bâtiment	Longueur bâtiment < 50m	L = 21,77m
Année de construction	>= 2010	2017
Zone climatique	Climat tempéré et humide avec étés tempérés	OK
Consommation d'énergie primaire	< 85 kWh/m ² .an	E _{spec} = [45;85]

Tableau 6: Vérifications des critères de sélection pour la résidence Arola

²⁰ Il s'agit des surfaces brutes annoncées par le promoteur immobilier. Ne disposant pas d'informations quant à la manière donc celles-ci ont été calculées, elles ne seront pas utilisées dans l'analyse énergétique et l'ACCV.

Il faut noter toutefois qu'en prenant l'énergie spécifique définie par la PEB comme critère de référence, on procède à un léger relâchement du critère de sélection propre à la consommation d'énergie primaire. En effet, contrairement aux cas d'étude référencés dans le benchmarking, la consommation d'énergie spécifique ne prend pas en compte la consommation liée à l'éclairage artificiel des locaux pour les bâtiments résidentiels. De plus, la surface de référence utilisée par la PEB pour exprimer la consommation énergétique en kWh/m².an, mesurée depuis les faces externes du bâtiment, est plus grande que la mesure du TFA.

Les plans d'exécution de la résidence Arola ont été fournis par l'architecte Damien Franzen qui a accepté de partager ces documents. Les plans des quatre niveaux sont donnés au figures 22, 23, 24 et 25 tandis que les coupes et façades sont accessibles dans les annexes.

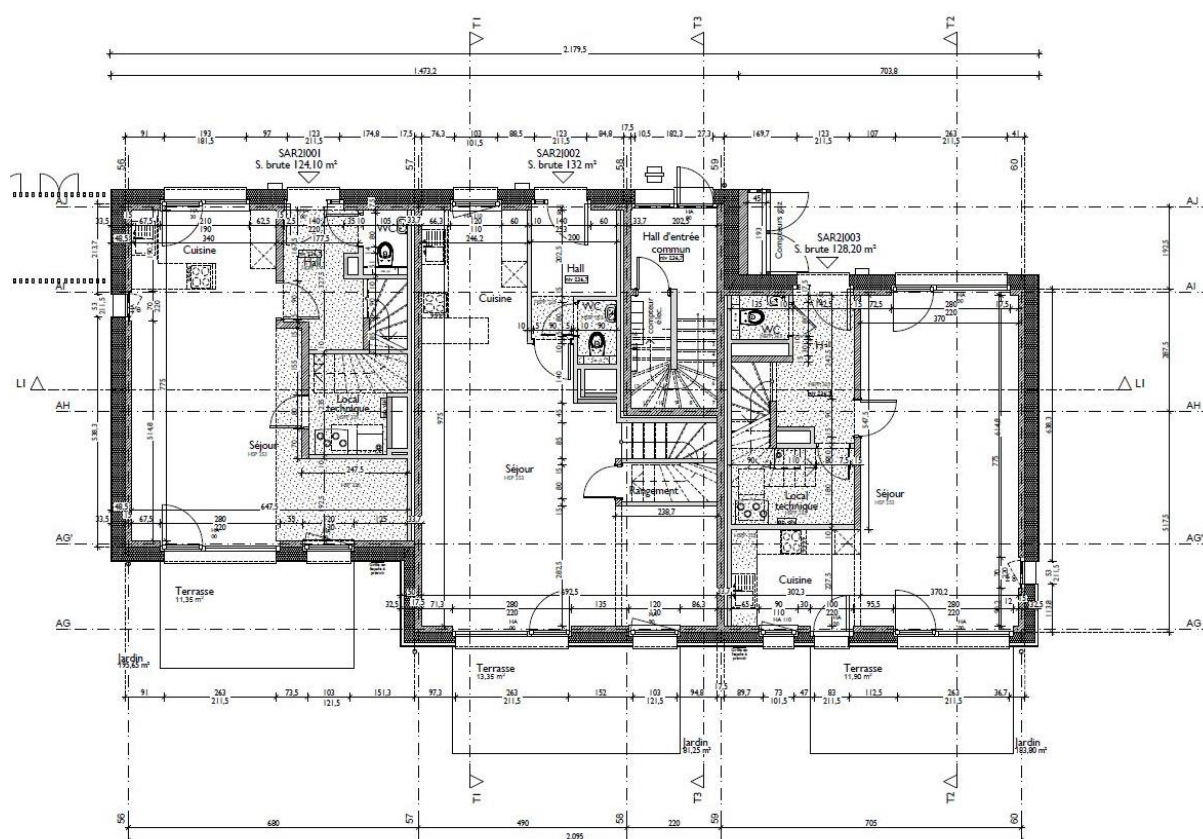


Figure 22: Plan du RDC de la résidence Arola - document fourni par l'architecte Damien Franzen

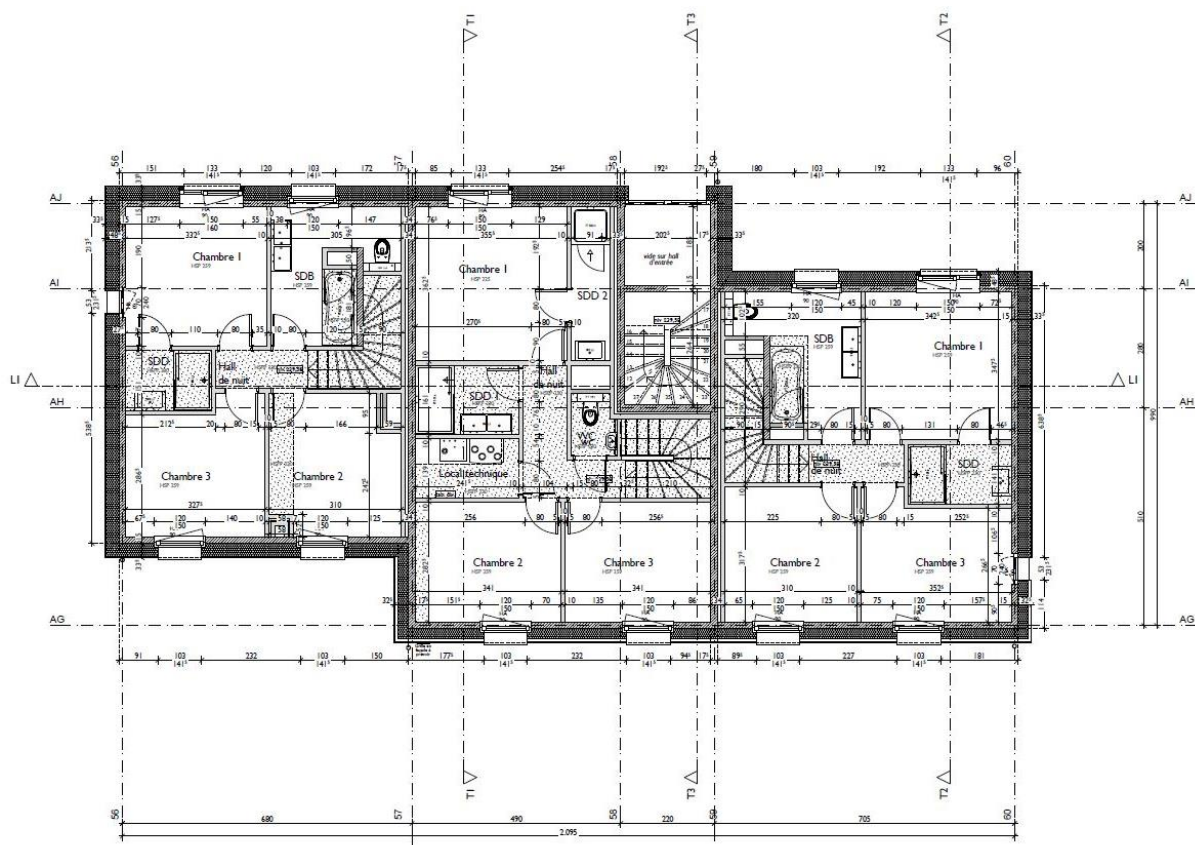


Figure 23: Plan du R+1 de la résidence Arola - document fourni par l'architecte Damien Franzen

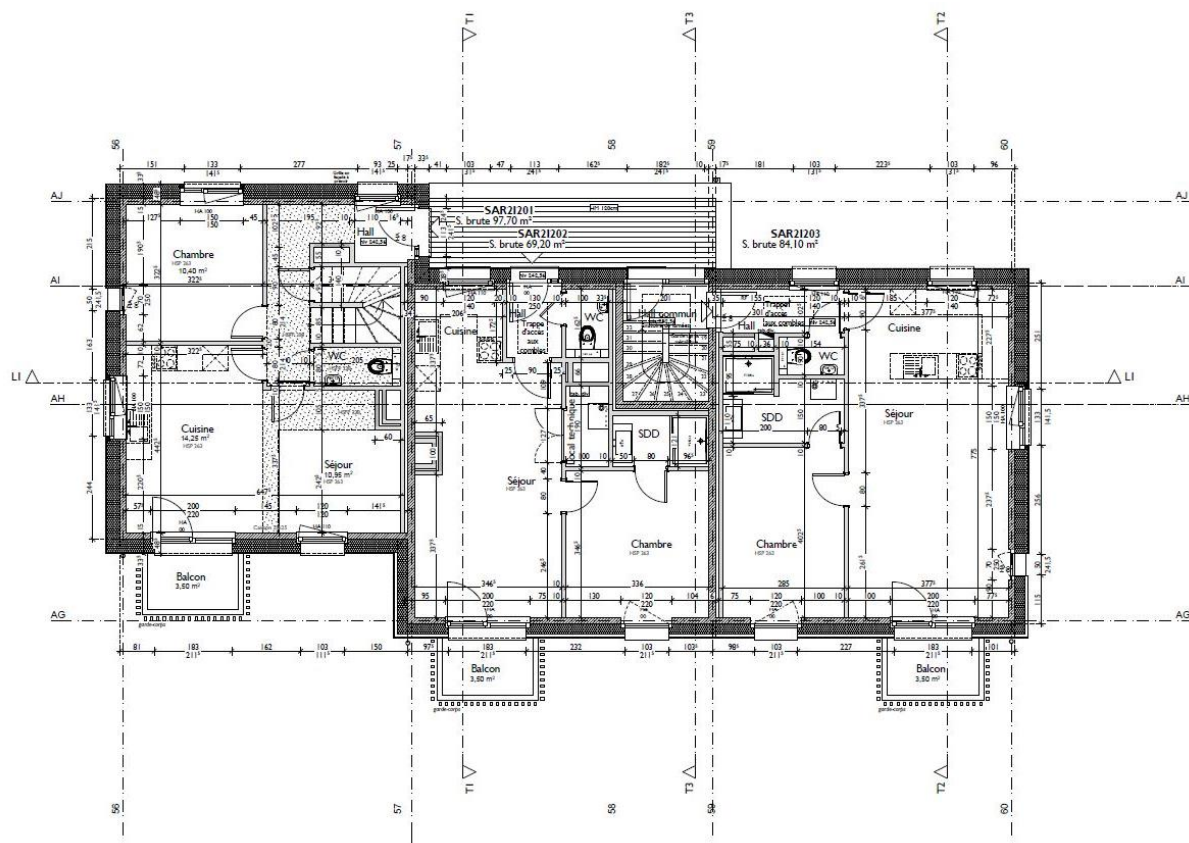


Figure 24: Plan du R+2 de la résidence Arola - document fourni par l'architecte Damien Franzen

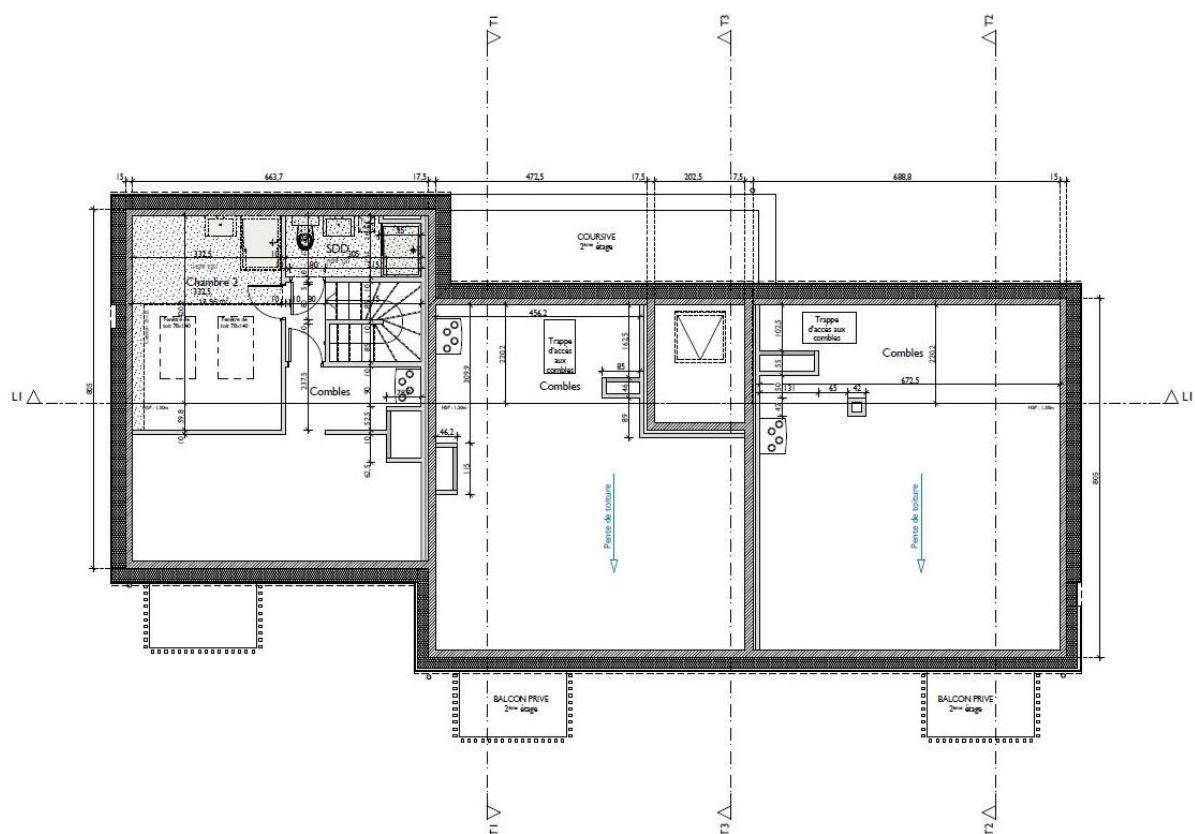


Figure 25: Plan des combles de la résidence Arola - document fourni par l'architecte Damien Franzen



Figure 26: Vue des façades sud et est de la résidence Arola
Extrait de « Sart-Tilman » par &SENS (2017)

7. MÉTHODOLOGIE DE LA MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE

Ce chapitre a pour but de détailler la manière dont la simulation thermique de la résidence Arola a été effectuée. Pour rappel, cette simulation a été réalisée sur le logiciel DesignBuilder. L'explication sur l'encodage des données est décomposée en 6 sections, reprenant les intitulés des onglets du logiciel.

Afin de pouvoir vérifier la qualité de la modélisation, les données sont encodées aussi fidèlement que possible à celles fournies dans la méthodologie du mémoire de C. Malmedy. Bien que sa simulation ait été réalisée avec le logiciel Pleiades ACV et non DesignBuilder, les résultats obtenus sont comparés afin de tirer une conclusion sur leur validité. Une deuxième simulation sera alors effectuée en modifiant quelques paramètres jugés plus cohérents par rapport à la condition réelle du bâtiment.

7.1 ENCODAGE DES DONNÉES

7.1.1 Données géométriques

Le logiciel DesignBuilder comprend un outil de visualisation et de modélisation 3D. À partir des plans Autocad du projet, la résidence Arola a pu être modélisée avec une précision allant jusqu'au millimètre. Le modèle obtenu est composé de l'enveloppe, des ouvertures, des planchers (y compris avec les trémies d'escalier), des murs intérieurs pour tenir compte de l'inertie thermique et enfin d'éléments extérieurs pouvant avoir un impact sur le niveau de l'ombrage tels que le garde-corps de la coursive ou les balcons situés sur la façade sud.

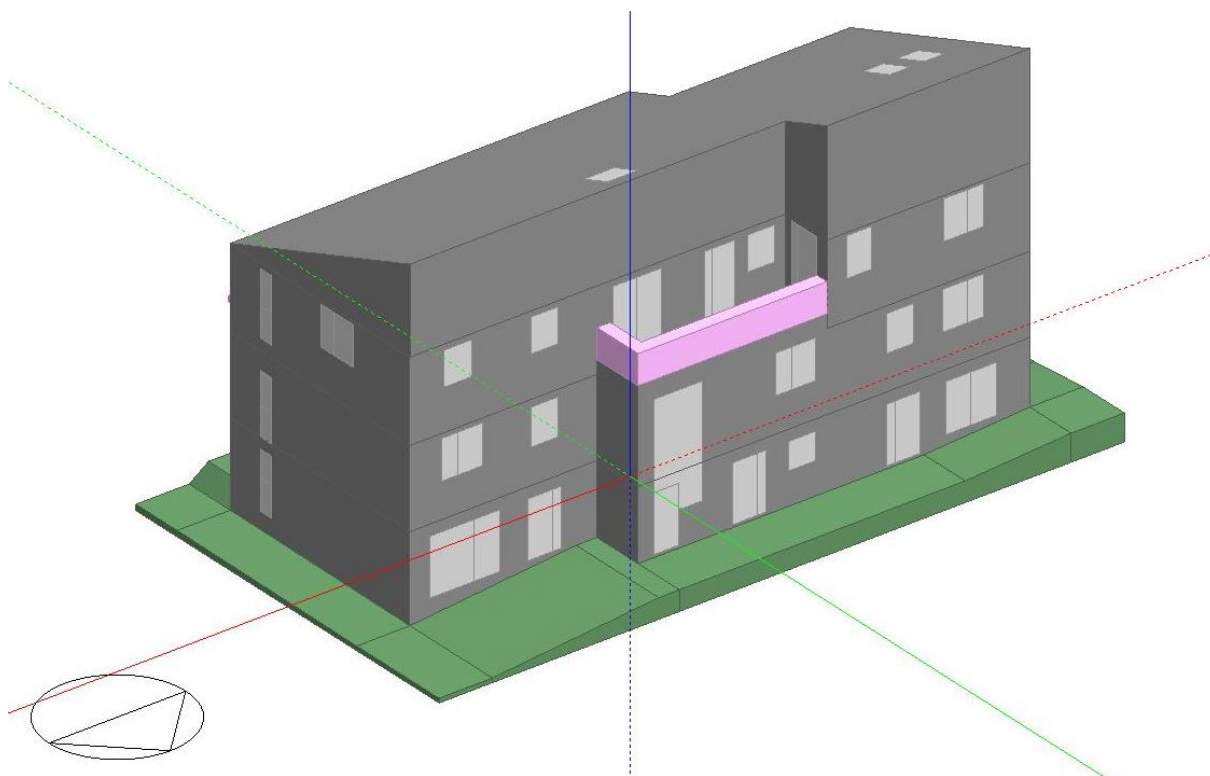


Figure 27: Vue 3D des façades nord et est du modèle généré avec DesignBuilder

Le profil du terrain a également été dessiné sur base des coupes et façades fournies par l'architecte afin de pouvoir inclure son impact dans les calculs thermiques. Sans vis-à-vis côté sud, le bâtiment ne subit aucun ombrage de son environnement. La végétation aux alentours ne crée pas non plus de masque solaire sur le bâtiment en raison que celle-ci est davantage située du côté nord. L'hypothèse d'un terrain sans construction voisine est donc prise.

Ce premier stade de modélisation offre déjà la précieuse information de la superficie de la résidence. C. Malmedy avait mesuré une « surface habitable » de 468m² référencée sous le nom de « SHAB ». En effet, le logiciel Pleiades ACV utilise les superficies sous les anciennes dénominations SHON (Surface Hors Œuvre Nette) et SHAB (Surface Habitable), issues de la législation énergétique française antérieure à la RT2012 (sénova, 2012).

Dans le cadre de ce travail, les résultats de consommation simulés avec DesignBuilder sont rapportés à deux autres mesures de surface. Premièrement, la « surface de plancher chauffée » (Ach) sera utilisée pour calculer l'énergie spécifique de la résidence Arola et ainsi voir si celle-ci respecte la norme QZEN wallonne. Dans un second temps, les résultats seront rapportés à la « Treated Floor Area », mesure utilisée de manière plus internationale et notamment dans l'outil CRAVEzero et le site Construction21. Les consommations pourront alors être comparées aux résultats du benchmarking réalisé dans la première partie de ce mémoire.

Le Passive House Institute (2020) donne les règles suivantes pour mesurer la TFA (liste non exhaustive) :

- Seules les superficies des pièces contenues dans l'enveloppe thermique sont incluses dans la TFA.
- Les buanderies, locaux techniques situés dans les logements sont comptés avec 100% de leur superficie.
- Les pièces auxiliaires et zones de circulation en dehors des logements, mais contenus dans l'enveloppe thermique sont comptées avec 60% de leur superficie.
- Les volées d'escalier de plus de 3 marches, ascenseurs, trémies, vides des gaines techniques, aires sous linteau de moins de 15cm d'épaisseur, combles non aménagés et non chauffés et locaux en dehors de l'enveloppe thermique ne sont pas pris en compte.
- Les aires avec une hauteur sous plafond comprise entre 1 et 2m ne sont prises en compte qu'à 50%, tandis que celles avec moins de 1m sous le plafond ne sont pas prises en compte.

Finalement, le tableau 7 synthétise et rassemble les différentes valeurs des superficies mentionnées :

Type de superficie	SHAB (C. Malmedy)	Ach	TFA
Résidence Arola	467,84 m ²	607,13 m ²	447,5 m ²

Tableau 7: Différentes superficies mesurées de la résidence Arola

La principale raison qui explique l'importante différence entre l'Ach et la TFA réside dans le fait que l'Ach est mesurée depuis la face externe des murs. L'utilisation de cette superficie dans la PEB donne donc des résultats évidemment plus avantageux qu'avec l'utilisation de la TFA.

7.1.2 Paramétrage des éléments de construction

Tous les matériaux encodés dans le cadre de la simulation thermique sont caractérisés par leur conductivité thermique (λ), masse volumique (ρ) et chaleur spécifique (C). En effet, ces 3 propriétés thermophysiques sont responsables de l'effusivité d'un matériau, c'est-à-dire de « sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement » (EnergiePlus, 2007e). Afin d'avoir un modèle aussi fidèle que possible à celui créé par C. Malmedy, les valeurs encodées sont réutilisées dans la simulation DesignBuilder. Celles-ci proviennent donc de la bibliothèque de matériaux incluse avec le logiciel Pleiades ACV. L'épaisseur mise en œuvre pour chaque matériau est donnée dans les coupes et détails techniques de la résidence Arola.

Le tableau 8 reprend toutes les compositions et propriétés des parois faisant partie de l'enveloppe thermique, à l'exception des membranes (pare-vapeur) dont l'influence est négligeable sur le bilan thermique. Concernant les parois intérieures, celles-ci sont qualifiées de plutôt classiques. Les planchers entre niveaux sont composés de hourdis, d'une isolation de 1cm de polyuréthane pour l'acoustique, d'une chape de pose de 7cm et d'un revêtement carrelage grès cérame pour les pièces de vie ou d'un parquet stratifié pour les chambres. Les murs porteurs intérieurs sont réalisés en bloc silico-calcaire de 15cm tandis que les cloisons légères de 10cm d'épaisseur sont revêtues de plaques de plâtre et constituées d'une âme en laine de roche pour l'intimité acoustique des pièces.

	Élément	Matériaux	Épaisseur [cm]	Conductivité thermique [W/m.k]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Masse volumique [kg/m³]
Murs extérieurs	Mur crépi	Enduit synthétique	1,5	1,15	1000	1700
		Polystyrène expansé (PS)	32	0,032	1450	25
		Bloc silico-calcaire	15	0,136	1000	1800
		Enduit plâtre	1,3	0,325	1000	845
	Mur bardage fibre ciment	Bardage fibre-ciment	2	0,65	1050	1600
		Lame d'air ventilée	7,5	0,08	1000	1,18
		Polyuréthane (PUR)	24	0,025	1400	29
		Bloc silico-calcaire	15	0,136	1000	1800
		Enduit plâtre	1,3	0,325	1000	845
	Dalle RDC	Dalle B.A.	25	2,3	1000	2352
		Polyuréthane (PUR)	25	0,025	1400	29
		Chape de pose	7	1,4	1000	1700
		Carrelage grès cérame	1	1,2	1000	2000
Toitures	Toiture inclinée PVC	Couverture PVC	1	0,14	837	1200
		Polyisocyanurate (PIR)	24	0,025	1400	29
		Panneau OSB	2,5	0,13	1700	650
		Laine cellulose (87%)	18	0,039	1900	28
		Chevron (13%)		0,14	1600	600
		Lame d'air Contre-gîte	8	0,08	1000	1,18
				0,14	1600	600
		Plaque plâtre	2	0,33	1000	450
	Toiture terrasse	Lame terrasse composite	2	0,29	2070	850
		Lame d'air ventilée (plots)	10	0,08	1000	1,18
		Polyisocyanurate (PIR)	20	0,025	1400	29
		Hourdis	18	1,29	1000	1300
		Enduit plâtre	1,3	0,325	1000	845

Tableau 8: Composition des parois et propriétés thermophysiques des matériaux

Dans la phase de calibrage, nous verrons que certaines de ces valeurs semblent peu crédibles et une autre base de données sera utilisée afin d'assurer la fiabilité du modèle.

Les propriétés optiques des matériaux opaques soumis au rayonnement solaire sont également détaillées. En effet, par exemple, la teinte rouge utilisée pour une partie du crépi mis en œuvre absorbera davantage de rayonnement que la teinte grise choisie par l'architecte.

Matériau	Émissivité ϵ	Absorption α	Réflexion ρ
Crépi teinte rouge	0,92	0,68	0,2
Crépi teinte grise	0,92	0,52	0,33
Bardage fibre ciment	0,88	0,6	0,27
Couverture PVC	0,9	0,7	0,3

Tableau 9: Propriétés optiques des matériaux soumis au rayonnement solaire

Généralement, l'état de surface des matériaux a un impact non négligeable sur le bilan énergétique d'un bâtiment. La mise en œuvre de la couverture en PVC pour la toiture inclinée implique davantage de gains solaires que si celle-ci avait été réalisée avec un revêtement métallique. Par exemple, avec une toiture en zinc, les valeurs d'absorption et de réflexion s'inversent selon la base de données des matériaux de DesignBuilder. Néanmoins, ces gains solaires à travers les surfaces opaques diminuent au plus le bâtiment est bien isolé, comme cela est le cas pour la résidence Arola.

Débit d'infiltration d'air

Aucune recommandation n'existe en Wallonie concernant l'étanchéité à l'air des bâtiments. À l'échelle nationale, la norme NBN D 50-001 (1991) recommande toutefois un taux de renouvellement d'air inférieur à 1 vol/h si la ventilation mécanique est équipée d'un récupérateur de chaleur. Plus récemment, la Région de Bruxelles-Capitale impose depuis 2018 une valeur de 0,6 vol/h pour toute construction neuve (EnergiePlus, 2007d).

Le travail de C. Malmedy indique que le débit d'infiltration a été encodé avec 0,25 vol/h. Il s'agit d'une valeur ambitieuse, mais techniquement réalisable. En effet, le benchmarking a montré que la valeur médiane des cas d'étude était de 0,43 vol/h, mais présentait un projet avec également une valeur de 0,25 vol/h.

Ponts thermiques

La part de déperdition de chaleur à travers les ponts thermiques est d'autant plus importante dans les bâtiments très bien isolés. En ce sens, il a été observé via les détails techniques que les nœuds constructifs ont été traités avec beaucoup de soin dans la réalisation de la résidence Arola. Néanmoins, C. Malmedy a utilisé des valeurs standards du logiciel Pleiades ACV pour l'encodage des ponts

thermiques linéiques. Ces valeurs sont reprises dans le tableau 9, mais celles-ci seront mises à jour et complétées dans la phase de calibration.

Ponts thermiques linéiques	Ψ [W/m.K]
Allège fenêtre	0,15
Raccord pied de façade	0,2
Angle sortant	0,08
Angle rentrant	0,03

Tableau 10: Ponts thermiques linéiques de la Résidence Arola

7.1.3 Paramétrage des ouvertures

L'ensemble des fenêtres sont caractérisées par du double vitrage peu émissif avec emploi d'argon en remplacement de l'air afin de réduire l'effet de conduction. Les châssis en PVC, dont l'épaisseur de l'ouvrant et du dormant est de 8cm, sont placés à 25cm de la surface externe des murs, conformément aux plans. Les châssis sont également posés en applique et de sorte que le dormant ne soit visible depuis l'extérieur uniquement au niveau de l'allège. Les fenêtres sont encodées avec :

- un coefficient de transmission thermique $U_w = 1,7 \text{ W/m}^2.\text{K}$
- un coefficient de transmission thermique $U_g = 1,24 \text{ W/m}^2.\text{K}$ pour le vitrage
- un coefficient de transmission thermique $U_f = 2,1 \text{ W/m}^2.\text{K}$ pour les châssis
- un coefficient de transmission lumineuse $TL = 0,68$
- un facteur solaire $FS = 0,549$

Il est important de souligner que si la valeur U_w des fenêtres respectait la législation PEB de 2014, soit au moment de l'octroi du permis, celle-ci n'est plus en phase avec la valeur maximale actuelle qui est de $1,5 \text{ W/m}^2.\text{K}$. À ce stade-ci, il est donc déjà possible d'affirmer que le renforcement de l'isolation des fenêtres est une piste intéressante dans l'établissement futur des scénarios.

Au niveau des portes extérieures, celles-ci sont posées de manière identique aux fenêtres et sont constituées de bois. Elles sont encodées avec un coefficient de transmission thermique égal à $1 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ce qui est plutôt considéré comme performant au regard des normes de PEB qui fixent la valeur de $2 \text{ W/m}^2.\text{K}$ pour les portes et portes de garage.

7.1.4 Conditions climatiques et confort thermique intérieur

Les conditions de confort thermique et les données climatiques constituent les deux conditions limites dans le dimensionnement d'un système de climatisation. Celles-ci ne constituent pas des caractéristiques intrinsèques de la performance du bâtiment et doivent donc être encodées de manière la plus arbitraire possible afin de pouvoir comparer les consommations de la résidence Arola avec les bâtiments du benchmarking.

Comme expliqué précédemment, la sélection de cas d'étude issus d'une même zone climatique, selon la classification climatique Köppen-Geiger, permet d'assurer le caractère arbitraire des conditions

extérieures. Côté fiabilité, l'implémentation des données se réalise via un fichier TMY (Typical Meteorological Year) dont la création suit la norme ISO 15927 (2005) qui se base sur une période de relevés d'au minimum 10 ans. Pour la Belgique, DesignBuilder propose des jeux de données mesurées à Ostende, Uccle et Saint-Hubert à partir des stations automatiques de l'Institut Royal Météorologique (IRM).

Il a été décidé d'utiliser les données d'Uccle puisque sa station météorologique se situe à une altitude de 100m, soit plus proche du site du Sart Tilman (237m) par rapport aux stations de Saint-Hubert (557m) et Ostende (5m). Par ailleurs, le même choix a été effectué dans le mémoire de C. Malmedy.

Au niveau du confort thermique intérieur, la simulation thermique dynamique a été zonée afin de pouvoir appliquer différentes consignes de chauffage. Les combles non aménagés et la cage d'escalier commune ne sont pas chauffés. En raison de la taille restreinte des appartements, il serait peu réaliste de réaliser des consignes de température différentes en fonction de la nature des locaux au sein d'un même appartement. Dès lors, il a été décidé qu'en période de chauffe et pour tous les logements, la température de consigne soit de 20°C pendant les périodes d'occupation et que la température soit maintenue à un minimum de 17°C quand le logement est inoccupé. Le planning d'occupation est détaillé dans la sous-section qui suit.

7.1.5 Paramétrage des données sur l'activité du bâtiment

L'onglet « Activité » de DesignBuilder rassemble différents paramètres propres à l'occupation du bâtiment et des personnes qui l'occupent.

Planning d'occupation

Le planning d'occupation du bâtiment correspond à la période durant laquelle le bâtiment est occupé par ses habitants. Il est utilisé pour définir les gains internes provenant du dégagement calorifique des occupants. Durant les jours de semaine, le planning est défini selon un horaire « classique » pour un travailleur ou une personne scolarisée, à savoir un départ pour le travail ou l'école à 08h30 et un retour à 18h00. Durant les weekends, il est décidé que les occupants sont absents entre 10h00 et 17h00 le samedi et présents toute la journée le dimanche. La cage d'escalier étant en une zone de passage, l'hypothèse d'un planning avec une absence continue est faite, de même que pour les combles non aménagés.

Aucune période de vacances n'est encodée afin que la consommation annuelle reflète autant que possible la performance réelle du bâtiment et ne soit pas influencée par le mode de vie des résidents.

Densité d'occupation et puissance métabolique

Dans son travail, C. Malmedy a comptabilisé 20 occupants pour l'entièreté de la résidence soit 0,043 occupant/m² si l'on se base sur sa mesure de 468m² de SHAB. Nous verrons dans la partie dédiée à la calibration qu'il semble y avoir eu une petite erreur de comptage.

Puissance métabolique dissipée

La chaleur dissipée par le corps humain est fonction de l'activité qui est pratiquée. En faisant l'hypothèse qu'un occupant passe la moitié de son temps à dormir (environ 75W) quand il est à son domicile et l'autre moitié à effectuer une activité légère (120W), il est acceptable d'arrondir et d'encoder une valeur de 100W pour la valeur des gains internes fournis par le métabolisme des habitants. Cette valeur est par ailleurs souvent employée dans les simulations thermiques dynamiques (EnergiePlus, 2007).

Consommation électrique domestique

L'apport interne dû à l'ensemble des équipements de type électroménagers ou de bureautique a un impact non négligeable non seulement sur la consommation électrique, mais également sur le bilan thermique. La méthode de calcul Th-BCE 2012 développée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a calculé une moyenne de puissance calorifique dégagée par les appareils électriques domestiques valable pour les logements individuels et collectifs. Celle-ci s'élève à 5,7W/m² en période d'activité et à 1,1W/m² en période d'inoccupation. Ces valeurs comptabilisent la présence d'une taque de cuisson, d'équipements audiovisuels et informatiques, d'une machine à laver et lave-vaisselle, d'un réfrigérateur et d'autres appareils ménagers (CSTB, 2012).

La période d'activité est définie comme étant la période d'occupation avec soustraction des heures de sommeil. Ainsi celle-ci s'étend de 07h00 du matin à 08h30 et de 18h00 à 23h00. Pour rappel, la consommation électrique domestique n'est ni prise en compte dans le benchmarking, ni dans le calcul PEB. Seuls ses effets sur le bilan thermique seront conservés.

Consommation en ECS

La consommation d'eau chaude sanitaire dans les foyers a fait l'objet de nombreuses campagnes de mesures donnant divers résultats. En effet, cette consommation peut varier en fonction du type de logement et de sa taille, du pouvoir d'achat des occupants ou simplement en raison d'une habitude d'usage.

Des outils d'aide à la conception tels que EnergiePlus (2007) ou des institutions comme SuisseEnergie mettent néanmoins en avant le chiffre de 50L d'eau chaude à 40°C comme quantité d'eau utilisée quotidiennement par une personne. En multipliant cette valeur par les 20 habitants de la résidence et par les 365 jours de l'année, on obtient une consommation annuelle pour l'ensemble du bâtiment de 365m³ d'ECS à 40°C.

7.1.6 Paramétrage du système d'éclairage

Tout d'abord, il faut bien distinguer la puissance d'installation de la puissance utilisée en conditions réelles. Par exemple, le « Guide pratique à destination du particulier » sur l'éclairage efficace des logements rédigé par Architecture et Climat (UCL) et le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) recommande des valeurs d'installation de flux lumineux par mètre carré pour assurer un éclairage efficace en fonction de la nature des locaux. Ainsi, il est notamment conseillé d'installer 150 à 300lm/m² pour une cuisine, 100 à 250lm/m² pour un séjour ou une chambre ou encore

200 à 300lm/m² pour une salle de bain (SPW, 2017). Il est ensuite possible de calculer la puissance d'installation totale en cumulant ces valeurs et en les rapportant aux mètres carrés de la résidence Arola et à un rendement de luminaire, de type LED de préférence.

Néanmoins, il est peu probable que tous les points lumineux soient utilisés simultanément en pratique. À l'instar de C. Malmedy, la méthode de calcul Th-BCE 2012 est de nouveau utilisée pour calculer la puissance d'utilisation. Il y est indiqué que la puissance d'installation conventionnellement prise est égale à 14W/m². Cette valeur est ensuite multipliée par un facteur de non-simultanéité d'utilisation de 0,1 pour obtenir une puissance d'utilisation de 1,4W/m² qui est encodée dans DesignBuilder.

Le planning d'utilisation pour l'éclairage est le même que celui utilisé pour la consommation électrique domestique.

7.1.7 Paramétrage des systèmes HVAC

Chaudière gaz

Les besoins en chauffage et en ECS de chaque logement sont assurés par une chaudière gaz à condensation présentant un rendement de pouvoir calorifique supérieur (PCS) de 92%. L'utilisation d'une chaudière à condensation implique le besoin d'une température de retour plus basse qu'avec une chaudière classique pour qu'il y ait bien condensation des fumées (EnergiePlus, 2007a). Les radiateurs sont donc dimensionnés en régime 70°/50 °C.

Les chaudières sont compactes et intègrent un ballon de 100L pour pouvoir disposer d'eau chaude sanitaire sur demande. L'ECS est produite à 55°C afin de limiter le risque de prolifération éventuelle de bactéries, bien que celle-ci sera majoritairement utilisée aux alentours des 40°C comme expliqué précédemment. L'arrivée d'eau étant souterraine, l'hypothèse d'une alimentation d'eau à 10°C est prise, car il s'agit de la température moyenne du sol en Belgique (Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), 2013).

La demande de chauffage suit les consignes de température abordées dans les aspects propres au confort intérieur. Pour rappel, celles-ci imposent que la température de 20°C soit atteinte lorsque le logement est occupé et que la chaudière se remette en route dès que la température passe en dessous des 17°C lorsque les occupants sont absents. De plus, le chauffage est totalement coupé de juin à août. Enfin, DesignBuilder prend en charge le calcul du dimensionnement de la chaudière, du débit d'eau dans les conduites ainsi que la consommation électrique des circulateurs.

VMC double flux

Chaque logement est également assorti d'un système de ventilation mécanique double flux afin de fournir les besoins en air neuf. Ceux-ci sont équipés d'un échangeur de chaleur par accumulation avec un rendement de 90%, afin de préchauffer l'air neuf et d'ainsi éviter d'introduire de l'air trop froid en hiver. Cela permet d'effectuer de grosses économies sur le chauffage.

Concernant les débits de ventilation, C. Malmedy a utilisé la norme NBN D50-001 où le débit de chaque local est calculé selon une valeur normalisée de 3,6m³/h par mètre carré de plancher. Il faut ensuite s'assurer que le débit calculé dans chacun des locaux soit bien compris entre la valeur minimale et maximale propre à la nature du local considéré.

Afin de calculer la consommation des ventilateurs, DesignBuilder a besoin du débit d'air neuf et non de la somme de tous les débits d'air frais et vicié. Celui est calculé dans le tableau 11, où tous les locaux nécessitant de l'air frais sont rassemblés. Chaque débit d'air est également confronté aux valeurs extrêmes données par la norme NBN D50-001 (SPW, 2016) et ajusté si besoin.

	Type de local	SHAB [m²]	Débit calculé : SHAB x 3,6m³/h.m²	Si séjour, débit € [75;150] m³/h Si chambre, débit € [25;72] m³/h
Appart 1	Séjour	34,1	122,76	OK
	Chambre 1	10,89	39,2	OK
	Chambre 2	9,96	25,86	OK
	Chambre 3	9,97	35,89	OK
Appart 2	Séjour	43,26	155,74 → corr. :150	NON OK
	Chambre 1	12,88	46,37	OK
	Chambre 2	9,64	34,7	OK
	Chambre 3	9,64	34,7	OK
Appart 3	Séjour	35,56	128,02	OK
	Chambre 1	11,9	42,84	OK
	Chambre 2	9,84	35,42	OK
	Chambre 3	9,9	35,64	OK
Appart 4	Séjour	24,67	88,81	OK
	Chambre 1	10,4	37,44	OK
	Chambre 2	11,65	50,4	OK
Appart 5	Séjour	24,42	87,91	OK
	Chambre 1	11,65	41,94	OK
Appart 6	Séjour	29,26	105,34	OK
	Chambre 1	11,47	41,29	OK
Cage escalier	Cage escalier	9,39	33,8	OK
TOT			1228,38 m³/h	

Tableau 11: Calcul du débit d'air neuf pour tout le bâtiment

Les ventilateurs sur DesignBuilder travaillent par défaut avec une différence de pression égale à 1200Pa, à laquelle il faut rajouter 150Pa en raison des pertes de charge induites par l'échangeur de chaleur par accumulation. Ainsi, le gain en énergie de chauffage se fait au détriment d'une pénalité (moindre) sur la consommation électrique des ventilateurs (EnergiePlus, 2007f).

Au niveau des plannings, il est considéré que la ventilation tourne 24h/24 afin d'éviter tout problème d'humidité. Nous verrons par la suite qu'il est acceptable dans des conditions réelles de ne pas laisser tourner les ventilateurs en permanence. Ensuite, le récupérateur de chaleur est by-passé entre les mois de juin et août afin d'éviter d'introduire de l'air chaud durant les mois d'été et plus particulièrement durant les nuits où il est espéré que le bâtiment puisse se refroidir. En ce sens, une ventilation naturelle est implémentée durant les nuits de ces mêmes mois.

La figure 28 illustre le schéma HVAC mis en place pour chaque appartement dans la résidence Arola.

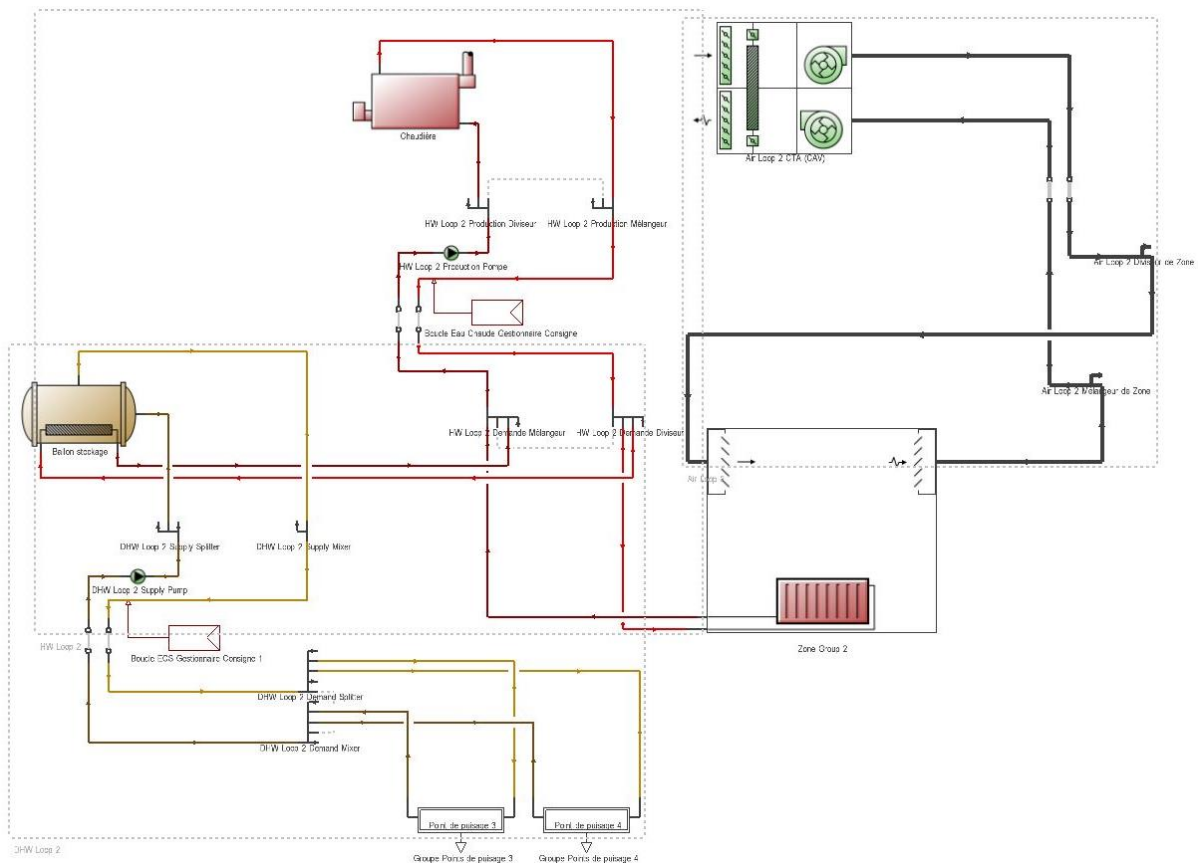


Figure 28: Schéma HVAC de chaque appartement de la résidence Arola
Figure réalisée sur le logiciel DesignBuilder

Finalement, la simulation est réalisée durant une année entière, avec un pas de calcul horaire de 4.

7.2 VALIDATION DU CAS DE BASE ET CALIBRATION

7.2.1 Vérification des premiers résultats

Il est jugé opportun de rappeler que tous les résultats obtenus via les simulations sont conditionnés par un certain nombre d'hypothèses. Dans des circonstances idéales, les résultats de simulation de la situation existante de la résidence Arola devraient être comparés aux consommations réelles. Hélas, aucun document attestant des dépenses énergétiques réelles n'a pu être obtenu.

Néanmoins, la qualité de la modélisation est démontrée de 3 manières différentes. Premièrement, nous disposons de l'information selon laquelle la résidence Arola est issue du label A de la PEB, c'est-à-dire que son énergie spécifique se situe entre 45 et 85 kWh/m².an. Cet indicateur est bien évidemment large, mais permet tout de même de vérifier que la simulation ne rate pas sa cible. De plus, le bâtiment a été encodé de la manière la plus fidèle possible à la modélisation réalisée dans le mémoire de C. Malmedy afin de pouvoir vérifier si les résultats tendent vers les mêmes valeurs. Enfin, des outils d'aide à la conception tels que EnergiePlus montrent que les consommations de l'ECS ou des ventilateurs peuvent être approchées avec des équations de prédimensionnement relativement simples.

Vérification avec le label PEB

Il est question ici de calculer la consommation en énergie primaire selon la définition de la PEB, c'est-à-dire, dans le cas de la résidence Arola, en ne prenant en compte uniquement que les consommations liées au chauffage, à l'ECS et aux auxiliaires. Celle-ci s'élève à 35.363 kWh, soit en la rapportant à la surface de plancher chauffée²¹, 58,25 kWh/m².an. Cette valeur est donc bien comprise entre les bornes de 45 et 85kWh/m².an qui encadrent le label A.

Vérification avec le mémoire de C. Malmedy

Se concentrant davantage sur les aspects environnementaux, le travail de C. Malmedy ne livre que 3 données propres aux consommations : l'énergie spécifique, les besoins en chauffage et la consommation électrique. La puissance de chauffage est également donnée.

	Superficie de référence [m ²]	E _{spec} [kWh/m ² .an]	« Besoins en chauffage » [kWh/m ² .an]	Puissance de chauffage [KW]
C. Malmedy	467,84	82,5	22,13	24,98
C. Malmedy ajusté	607,13	63,57	17,05	24,98
B. Bruyns	607,13	61,42	-	21,28

Tableau 12: Comparaison des résultats avec le mémoire de C. Malmedy

Le premier fait important à rappeler est que C. Malmedy a utilisé la superficie « SHAB » dans ses calculs, y compris pour le calcul de l'énergie spécifique. Néanmoins, selon la réglementation PEB, celle-ci doit se rapporter à la surface de plancher chauffée. Ainsi ses résultats sont ajustés afin que la comparaison soit pertinente.

Le premier indicateur est que la première simulation réalisée donne une énergie spécifique de l'ordre de 3% inférieure à celle calculée par C. Malmedy. La différence monte à près de 15% entre les puissances de chauffage. En revanche, aucun résultat n'est donné au niveau de la consommation pour le chauffage. Celle-ci s'exprime en termes de « besoins ». Or, aucune information n'est donnée pour savoir si ces besoins prennent en compte le récupérateur de chaleur ou les gains internes. La comparaison avec la consommation électrique est également difficile de nouveau par manque d'information. Rien n'indique si celle-ci est définie au sens des consommations électriques incluses dans la PEB ou si elle comprend par exemple l'éclairage artificiel ou encore l'usage domestique des appareils de la résidence.

Bien que la comparaison reste limitée par le nombre de données disponibles et par l'utilisation de deux logiciels non identiques, le parallèle fait entre les deux énergies spécifiques permet de renforcer la légitimité de la modélisation.

²¹ Selon la définition de la PEB

Vérification avec EnergiePlus

La consommation des ventilateurs d'une VMC double flux constitue généralement la plus grande part de consommation des auxiliaires. Le calcul de la consommation électrique d'une VMC est donné par l'outil d'aide à la conception EnergiePlus :

$$Cons_{él} = \frac{q_v}{3600} \cdot \Delta p \cdot \frac{t}{\eta_{vent}}$$

Où

$Cons_{él}$ = consommation énergétique du transport de l'air [Wh/an]

q_v = débit d'air neuf [m^3/h]

Δp = perte de charge (pulsion + extraction) [pa]

t = durée de fonctionnement [h/an]

η_{vent} = rendement total du système de ventilation

Les données encodées dans la simulation pour ces variables sont 1228,38 m^3/h pour le débit d'air neuf, 1350 Pa pour les pertes de charge, 8760 heures pour la durée de fonctionnement (soit une année entière) et un rendement de 0,7. Avec ces valeurs, une consommation de 5764,42 kWh est obtenue tandis que la valeur obtenue dans la simulation est de 5775,85 kWh. Le rendement du ventilateur et les pertes de charge étant tout à fait pertinents (EnergiePlus, 2007f), la consommation d'énergie pour les ventilateurs est jugée fiable.

Une estimation peut également être faite pour le calcul de l'énergie nécessaire pour la production de l'eau chaude sanitaire. En négligeant dans un premier temps les pertes, la consommation pour l'ECS sans prise en compte des pertes du système peut être facilement calculée grâce à :

$$Cons_{ECS} = 1,163 \cdot V_{40} \cdot \Delta T$$

Où

V_{40} = volume d'ECS à 40°C consommé par an [m^3/h]

ΔT = différence entre température ambiante de l'eau et température de puisage définie à 40°C [K]

Le terme 1,163 correspond à la capacité thermique volumique de l'eau [kWh/ m^3K]

Les données encodées pour le volume d'eau et la différence de température sont de respectivement de 365 m^3/h et 30°C. Une consommation de 12734,9 kWh est ainsi calculée, tandis que la valeur obtenue dans la simulation est de 14707,11 kWh. Cela montre que l'ECS est produite et acheminée jusqu'à son point de puisage avec un rendement total de 86%. Ce rendement est plausible, car il est relativement proche du rendement total donné par EnergiePlus, égale à 83%, pour un système similaire à celui de la résidence Arola (EnergiePlus, 2007c).

Bien que tous les résultats fournis par DesignBuilder ne puissent être vérifiés, l'essentiel est néanmoins acquis. En effet, il est important de rappeler que l'établissement des scénarios a pour but de comparer les différences entre les consommations et non de chiffrer les consommations en soi. En ce sens, les éventuelles erreurs d'encodage ou issues d'hypothèses contestables n'ont qu'un effet moindre sur l'interprétation comparative des résultats étant donné que celles-ci se retrouvent dans chacun des scénarios. De plus, la consommation en énergie primaire s'est avérée être assez fidèle que pour être comparée avec les bâtiments du benchmarking.

7.2.2 Ajustement des paramètres

Si la section précédente a permis de vérifier la qualité de la modélisation, une minorité de paramètres encodés ne reflètent pas encore les conditions réelles du bâtiment et méritent un ajustement.

Nombre de résidents

Les données encodées par C. Malmedy indiquent que la résidence est occupée par 20 personnes. Ce nombre semble légèrement surestimé. En effet, la résidence compte au total 19 chambres sur les 6 logements. Considérer 20 résidents impliquerait qu'au moins un des logements comporte 2 chambres de 2 personnes ou une chambre de 3 personnes. Au vu de la taille restreinte des chambres (tableau 11), cette hypothèse est peu probable. En considérant une chambre double par logement et les 13 autres comme des chambres simples, le nombre d'occupants est abaissé à 19. Cette réduction aura des effets sur les gains internes, mais également sur la consommation d'ECS dont le volume d'eau à 40°C consommé annuellement passe à 346,75m³.

Ponts thermiques

Bien que la résidence dans son ensemble ait été mise en œuvre de manière à limiter autant que possible les ponts thermiques, il semble néanmoins que certains d'entre eux n'ont pas été pris en compte dans la modélisation faite par C. Malmedy. En effet, on retrouve des ponts thermiques supplémentaires à la jonction entre les balcons et la façade et au niveau des linteaux des différentes baies.

Le catalogue des ponts thermiques conçu par l'instance SuisseEnergie (2003) est remarquable par le grand nombre de cas de figure illustrés. Les valeurs par défaut de Pleiades ACV sont donc également mises à jour et complétées dans le tableau ci-dessous :

Ponts thermiques linéiques	Pleiades ACV Ψ [W/m.K]	SuisseEnergie Ψ [W/m.K]
Allège fenêtre	0,15	0,09
Raccord pied de façade	0,2	0,75
Angle sortant	0,08	0,15
Angle rentrant	0,03	0,1
Balcon	-	0,26
Linteau baies	-	0,09

Tableau 13: Actualisation des valeurs des ponts thermiques linéiques de la résidence Arola
Valeurs extraites de « Catalogue des ponts thermiques » par SuisseEnergie (2003)

Propriétés thermophysiques des éléments de constructions

Certaines valeurs provenant de la base de données des matériaux utilisée par le logiciel Pleiade ACV semblent peu plausibles. En effet, par exemple, celle-ci indique une conductivité thermique de 0,136 W/m.K pour un bloc de silico-calcaire, ce qui impliquerait un pouvoir isolant supérieur à celui du bois. Le manque de transparence sur l'origine de ces valeurs nous pousse donc à opter pour l'utilisation des valeurs reconnues par l'EPBD et validées par les trois Régions. Le tableau 14 présente l'actualisation des valeurs des propriétés thermophysiques des matériaux mis en œuvre dans la résidence Arola.

	Élément	Matériaux	Épaisseur [cm]	Conductivité thermique [W/m.k]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Masse volumique [kg/m³]
Murs extérieurs	Mur crépi	Enduit synthétique	1,5	1,2	1000	1200
		Polystyrène expansé (PS)	32	0,035	1450	30
		Bloc silico-calcaire	15	1,07	1000	1800
		Enduit plâtre	1,3	0,57	1000	1200
	Mur bardage fibre ciment	Bardage fibre-ciment	2	0,58	1050	1800
		Lame d'air ventilée	7,5	0,026	1000	1,2
		Polyuréthane (PUR)	24	0,025	1400	40
		Bloc silico-calcaire	15	1,07	1000	1800
		Enduit plâtre	1,3	0,57	1000	1200
	Dalle RDC	Dalle B.A.	25	2,3	1000	2400
		Polyuréthane (PUR)	25	0,025	1400	29
Chape de pose		7	1,4	1000	1700	
Carrelage grès cérame		1	1,2	1000	2000	
Toitures	Toiture inclinée PVC	Couverture PVC	1	0,85	837	2000
		Polyisocyanuarate (PIR)	24	0,025	1400	40
		Panneau OSB	2,5	0,13	1700	650
		Laine cellulose (87%)	18	0,04	1900	70
		Chevron (13%)		0,14	1600	600
		Lame d'air Contre-gîte	8	0,026	1000	1,2
				0,14	1600	600
		Plaque plâtre	2	0,25	1000	900
	Toiture terrasse	Lame terrasse composite	2	0,29	2070	850
		Lame d'air ventilée (plots)	10	0,026	1000	1,2
		Polyisocyanuarate (PIR)	20	0,025	1400	40
Hourdis		18	1,29	1000	1300	
Enduit plâtre		1,3	0,57	1000	1200	

Tableau 14: Actualisation des valeurs des propriétés thermophysiques des matériaux
Données extraites de « Données produits PEB reconnues » par EPBD (2021)

Planning d'utilisation de la VMC

Le fonctionnement de la VMC 24h sur 24 implique une consommation annuelle de 5775,85 kW par les ventilateurs. Cela représente 71% de la consommation électrique (hors appareils domestiques), ce qui est évidemment très conséquent. Étant donné que le but premier d'une ventilation mécanique est d'assurer de l'air neuf pour les occupants, il est jugé acceptable en pratique de la couper en l'absence de ces derniers. De plus, celle-ci sera également éteinte durant les nuits de juin à août, c'est-à-dire quand la ventilation naturelle est réalisée. En d'autres termes, le planning de ventilation correspond

au planning d'occupation avec déduction des nuits d'été. Le temps de fonctionnement annuel de la VMC passe donc de 8760 heures à 5270 heures²².

Tous ces ajustements ont été simulés un à un afin de mesurer leur impact sur le niveau d'énergie spécifique. La consommation du modèle calibré, c'est-à-dire présentant l'ensemble des ajustements, est également proposé dans le tableau 15.

Ajustement	Consommation Espec [kWh/m ² .an]	ΔEspec avec le modèle non calibré [%]
Modèle non calibré	61,42	-
Diminution du nombre de résidents	60,43	-1,61%
Modification des valeurs de ponts thermiques linéiques	62,09	+1,1%
Modification des propriétés des matériaux	62,23	+1,31%
Réduction du temps d'utilisation de la VMC	52,28	-14,88%
Modèle totalement calibré	52,82	-14%

Tableau 15: Comparaison des différents calibrages de modélisation

Concernant le passage du nombre d'occupants de 19 à 20, les effets les plus notables se situent au niveau de la consommation en ECS. La légère baisse des gains internes induite est presque sans conséquence sur la demande en chauffage.

Les modifications touchant à l'enveloppe (ponts thermiques et propriétés des matériaux) ont pour effet de légèrement augmenter la consommation de chauffage étant donné que d'une part tous les ponts thermiques n'avaient pas été comptabilisés et que d'autre part la conductivité de certains matériaux a dû être revue à la baisse.

Les effets les plus notables sont induits par la modification du planning de ventilation. En effet, la consommation des ventilateurs passe de 5776 kWh à 3884 kWh d'énergie finale, et la conversion en énergie primaire accentue davantage ce gain. La contrepartie est que cette modification entraîne une légère augmentation de la consommation de chauffage, principalement au moment où le by-pass servant à préchauffer l'air est utile.

Finalement, le modèle totalement calibré affiche une consommation d'énergie spécifique de 52,82 kWh/m².an, soit 14% de moins que le modèle non calibré. Cette consommation en énergie primaire est toujours bien contenue dans l'intervalle 45-85 qui définit le label PEB de niveau A.

²² Le nombre d'heures est calculé pour l'année 2020.

8. MÉTHODOLOGIE DE L'ACCV

Ce chapitre a pour but de donner les détails de la méthodologie utilisée pour réaliser l'analyse des coûts de cycle de vie du cas d'étude. Cette méthodologie est appliquée autant à la situation existante du bâtiment étudié qu'aux scénarios imaginés. L'ACCV a été réalisée à partir d'une feuille Excel élaborée dans le cadre du projet CRAVEzero. Celle-ci a été complétée sur base d'un métré réalisé à partir des plans de la résidence Arola ainsi qu'avec une série de données économiques issues de la littérature.

8.1 PRÉSENTATION DE L'OUTIL CRAVEZERO

L'outil CRAVEzero a été financé par l'Union européenne via son programme Horizon 2020 visant à accélérer la mise en œuvre de la directive 2010/31/EU sur la performance énergétique des bâtiments. Celle-ci est notamment à la base de la législation imposant que toute nouvelle construction dès 2021 soit quasi zéro énergie dans l'UE (Cravezero, 2018).

Afin de faciliter la mise sur marché des bâtiments ZEN, le projet CRAVEzero a pour ambition de développer de nouvelles approches permettant de réduire les coûts à chaque niveau du cycle de vie des bâtiments. Pour ce faire, le consortium qui compose le projet a notamment développé une feuille Excel customisable permettant de réaliser une analyse des coûts de cycle de vie.

L'outil a été modélisé selon les approches détaillées dans les 2 sources suivantes :

- 1) Norme ISO 15686-5:2008 : Bâtiments et biens immobiliers construits — Prévission de la durée de vie — Partie 5: Approche en coût global.
Cette norme fournit les fondements qui permettent de réaliser une ACCV.
- 2) European Code of Measurement, élaboré par le « European Committee of the Construction Economists » (CEEC).
Ce code donne une méthode permettant une subdivision cohérente des éléments de construction et coûts associés, facilitant la réalisation d'une ACCV.

Ces 2 références européennes sont indispensables afin de proposer une méthodologie qui soit transposable dans chacun des États membres.

8.2 COÛTS COMPRIS DANS L'ACCV DE L'ÉTUDE

L'encodage des données avec l'outil CRAVEzero est structuré autour de catégories que l'on retrouve couramment dans la littérature bien que la dénomination de celles-ci soit légèrement différente de celles introduites dans l'état de l'art. Cette section a pour but d'indiquer quels sont les coûts liés à chacune de ces phases et de justifier leur implémentation ou non à l'ACCV.

Phase des décisions politiques et de gestion du territoire

Cette phase regroupe toute une série de coûts non associés à la construction en tant que telle. Ceux-ci concernent principalement le prix d'achat du terrain et les taxes associées (ex. : les droits d'enregistrement). Pour rappel, les résultats financiers extraits du benchmarking ne prenaient pas en compte les dépenses liées au terrain. De plus, les variables impactant sur le prix du foncier sont d'un tout autre ordre que celles étudiées dans ce travail. Comparer des projets en prenant en compte le prix des terrains enlèverait l'universalité de l'étude. Dès lors, il a été décidé que l'ACCV n'intégrera pas ces coûts afin que la résidence Arola puisse par la suite être comparée avec les cas d'étude du benchmarking. Les subsides créés par exemple pour inciter à passer au EnR ne sont pas non plus pris en compte pour les mêmes raisons et, car jugés comme des mesures trop peu pérennes.

Phase de design

Tous les frais liés à l'étude et au design du bâtiment sont également inclus dans la catégorie des dépenses indirectes à la construction. Ceux-ci peuvent dans certains cas représenter une proportion importante du montant final tant la diversité d'études préalables impliquant l'intervention d'experts est vaste. Des essais mécaniques des sols, une mesure du taux de radon, une étude acoustique, un plan de prévention en cas d'incident et bien entendu les honoraires de l'architecte sont quelques exemples courants. À l'instar des coûts associés au foncier, les honoraires et autres coûts d'étude n'ont pas été comptabilisés dans le benchmarking et sont dès lors exclus de l'étude. En d'autres termes, les coûts d'investissement se limiteront aux coûts de construction.

Phase de construction

La phase de construction englobe autant les dépenses liées aux matériaux et leur mise en œuvre, que les coûts liés aux équipements qui assurent le fonctionnement du bâtiment. Cette phase nécessite la réalisation d'un métré des matériaux afin de pouvoir calculer le prix d'achat de ceux-ci ainsi que le prix de la main d'œuvre nécessaire. L'origine des coûts implémentés propres à cette phase est détaillée dans la section 8.4.

Phase d'opération

Cette phase concerne la totalité de la durée de vie du bâtiment et son encodage est donc très sensible. Elle reprend les charges permettant de maintenir le bâtiment dans les conditions d'ambiance souhaitées, ainsi que les coûts de maintenance du bâtiment. Sachant que le prix de l'électricité, le gaz et autres vecteurs énergétiques sont sujets à des variations d'année en année, certaines hypothèses économiques doivent être prises afin de modéliser ces coûts durant toute la durée de la phase. Les consommations liées au bâtiment seront directement tirées des modélisations énergétiques réalisées en amont. Les coûts de maintenance, également susceptibles de varier à cause de l'inflation, sont également associés à cette phase. L'ensemble des données économiques permettant de modéliser les coûts présents et futurs sont décrits à la section 8.3 « Hypothèses économiques ».

Phase de rénovation

Si un élément possède une durée de vie inférieure à la durée de l'ACCV, celui-ci devra être remplacé et son coût de remplacement s'ajoutera aux autres dépenses. Cependant, l'outil CRAVEzero utilise une méthodologie, basée sur la norme EN15459 (2018), qui agrège les coûts de maintenance et de réparation/remplacement des éléments passifs du bâtiment, en une valeur calculée comme un pourcentage de l'investissement initial de l'élément. Une valeur annuelle de 1,5% commune pour tous les éléments de construction est recommandée par le consortium CRAVEzero. En revanche, pour les équipements techniques, la distinction est bien opérée en raison du prix d'achat plus conséquent par unité. Des informations concernant la durée de vie des équipements sont également données au sous-chapitre 8.3.

Phase de démantèlement ou de recyclage

De nombreuses études ne prennent pas en considération la phase de fin de vie du bâtiment, car celles-ci suggèrent que cela devient la responsabilité du prochain propriétaire (Allacker, 2010). Le manque d'études traitant de la démolition et du recyclage des déchets, ainsi que la non-prise en compte de cette phase dans le benchmarking, incite ainsi à ne pas prendre en compte ces coûts.

Finalement, le tableau suivant résume les coûts intégrés ou non intégrés à l'ACCV de la résidence Arola.

	Types de coûts	Résidence Arola
Coûts en amont	Coûts liés au foncier	Non
Investissement initial	Coûts de design	Non
	Coûts de construction	Oui
Coûts sur toute la durée de vie	Coûts de fonctionnement	Oui
	Coûts de maintenance	Oui
	Coûts de rénovation	Oui, agrégé dans les coûts de maintenance
Coûts de fin de vie	Coûts de démantèlement ou recyclage	Non

Tableau 16: Coûts intégrés dans l'ACCV de la résidence Arola

Bien qu'ils ne rencontrent pas les objectifs primaires de ce travail, les coûts environnementaux liés à la consommation d'énergie seront indirectement pris en compte dans les résultats. En effet, le coût total sur le cycle de vie sera toujours présenté par rapport au niveau de consommation en énergie primaire du scénario afin de pouvoir évaluer simultanément ces deux indicateurs.

8.3 HYPOTHÈSES ÉCONOMIQUES

Avec la déduction de certains des coûts de l'ACCV, la formule d'Allacker (2010) est adaptée et simplifiée par :

$$CG = CI + VAN(SCP)$$

Où

CG = coût global sur l'ensemble du cycle de vie

CI = coût d'investissement initial

VAN(SCP) = la valeur actualisée nette de la somme des dépenses périodiques

Les dépenses périodiques comprennent dans ce cas-ci :

- La somme des coûts de maintenance
- La somme des coûts de remplacement (agréé dans les coûts de maintenance)
- La somme des coûts des coûts de consommation de gaz
- La somme des coûts de consommation d'électricité

L'actualisation des coûts selon l'équation 3 demande la connaissance du taux d'intérêt nominal et du taux d'inflation. Pour rappel la valeur actualisée nette est définie comme « la quantité d'argent nécessaire aujourd'hui, afin d'avoir fin de disposer de la somme d'argent nécessaire pour répondre aux coûts futurs à la date donnée à laquelle ils sont censés se produire » (Allacker, 2010).

$$VAN = \sum_{t=0}^n C_t \cdot q = \sum_{t=0}^n \frac{C_0(1+i)^t}{(1+d)^t}$$

Où

VAN = valeur actualisée nette

d = taux d'intérêt nominal

i = taux d'inflation annuel

n = nombre d'années considérées

C₀ = Coût non actualisé à l'année t

C_t = Coût actualisé à l'année t

Taux d'inflation dans la construction

L'utilisation d'un taux d'inflation général des prix pour modéliser les coûts de construction et d'énergie peut mener à quelques imprécisions. Effectivement, l'évolution des prix de ceux-ci ne suit pas forcément l'évolution générale. Ainsi, il est décidé de considérer de manière séparée le taux d'inflation sur les prix des matériaux et de main-d'œuvre, sur le gaz ainsi que sur l'électricité. Afin de consolider les hypothèses, les taux utilisés sont calculés à partir de la moyenne géométrique des taux des 10 dernières années.

Tous ces taux d'évolution n'ont pas été impactés de la même manière par la crise de sanitaire de la Covid-19. En effet, aucune variation frappante n'est observée pour le taux d'inflation dans la construction, tandis que des diminutions notables ont été constatées dans le prix des combustibles et de l'électricité. Cette baisse s'explique par le ralentissement économique de nombreuses grandes entreprises durant la première vague de la Covid-19, qui a entraîné une diminution de la demande

énergétique (Engie, 2020). Ainsi, les 10 années considérées pour calculer la moyenne sont décalées afin d'exclure du calcul les années 2020 et 2021.

L'indice ABEX est utilisé pour représenter l'évolution des prix dans le domaine de la construction. Cet indice est d'autant plus approprié pour ce travail, car il concerne les coûts dans le secteur résidentiel (ABEX, 2021).

Le tableau 17 recense cet indice durant les années 2011 à 2021 ainsi que l'évolution annuelle de ce dernier :

ABEX	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Valeur indice	694	711	730	744	744	750	767	789	819	847	878
Évolution annuelle	/	1,024	1,0267	1,0192	1	1,0081	1,0227	1,0287	1,0380	1,0342	1,0366
Moyenne géométrique	1,0238										

*Tableau 17: Évolution annuelle de l'indice ABEX
Données extraites de « ABEX – Indice » par ABEX (2021)*

Le taux d'inflation dans la construction est donc évalué à +2,38%.

Taux d'inflation de l'électricité

L'une des missions de l'Association pour la Promotion des Energies Renouvelables (APERe) est d'effectuer une compilation mensuelle des prix de l'énergie. Les données sont collectées depuis l'année 2003 et distinguées région par région. La résidence Arola étant située en Wallonie, les prix indiqués pour cette région sont utilisés. La moyenne géométrique de chaque année est calculée et compilée dans le tableau 18. Comme annoncé, la période utilisée pour le calcul de la moyenne géométrique est décalée d'une année en raison de l'impact de la crise sanitaire. Le prix de l'électricité est donné en c€/kWh.

Électricité	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Prix annuel [c€/kWh]	20,71	22,74	24,77	24,56	23,72	21,65	22,55	24,18	25,45	26,71	28,57
Évolution annuelle	/	1,0977	1,0892	0,9915	0,9661	0,9127	1,0416	1,0723	1,0525	1,0495	1,0693
Moyenne géométrique	1,0327										

*Tableau 18: Évolution annuelle du prix de l'électricité en Wallonie
Données extraites de « Évolution des prix » par APERe*

Le taux d'inflation pour l'électricité est donc estimé à +3,27%.

Taux d'inflation du gaz

L'évolution moyenne du prix du gaz est déterminée de la même manière que pour l'électricité. Les prix indiqués sont également sous l'unité c€/kWh.

Gaz	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Prix annuel [c€/kWh]	5,43	5,50	6,62	7,48	6,88	6,55	6,52	5,95	6,17	6,70	5,81
Évolution annuelle	/	1,0123	1,2045	1,1294	0,9200	0,9519	0,9944	0,9130	1,0380	1,0850	0,8671
Moyenne géométrique	1,0067										

Tableau 19: Évolution annuelle du prix du gaz en Wallonie
Données extraites de « Évolution des prix » par APERe

Le taux d'inflation pour le gaz est donc estimé à +0,67%. Soit nettement moins que l'inflation calculée pour l'électricité.

Taux d'intérêt nominal

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), rassemble annuellement les taux d'intérêt à court et long terme des pays membres. L'utilisation des taux à long terme est recommandée par Allacker (2010), car ils garantissent une prise de risque moindre dans les investissements. Les prévisions de ces taux sont également disponibles pour les années 2021 et 2022. La période de calcul pour la moyenne géométrique est donc décalée afin de prendre en compte les données les plus récentes.

Taux d'intérêt	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Valeur taux	3	2,41	1,71	0,84	0,48	0,72	0,8	0,19	-0,148	-0,125	-0,08
Évolution annuelle	/	1,0241	1,0171	1,0084	1,0048	1,0072	1,0080	1,0019	0,9985	0,9988	0,9992
Moyenne géométrique	1,0068										

Tableau 20: Évolution annuelle du taux d'intérêt à long terme en Belgique
Données extraites de « Prévisions des taux d'intérêt à long terme » par l'OCDE (2021)

Le taux d'inflation dans la construction est donc évalué à +0,68%.

Coûts de l'énergie

Toujours dans l'idée de gommer les effets de la Covid-19 sur l'étude, les prix de l'électricité et du gaz pour la première année du cycle de vie sont pris égaux aux moyennes arithmétiques de l'année 2019, soit respectivement 28,57c€/kWh et 5,81c€/kWh.

A ce stade, il est déjà intéressant de prendre conscience de l'importante différence de prix et d'évolution annuelle entre ces deux vecteurs énergétiques afin de donner les premières pistes de réflexion sur le choix des futurs scénarios pour l'ACCV. En effet, à l'heure actuelle, en Wallonie, les chiffres donnés par l'APERe (2021) montrent que 1kWh d'électricité est presque 5 fois plus cher que 1 kWh de gaz.

Avec leur taux d'inflation respectif, cet écart risque de sensiblement augmenter durant la période de temps utilisée dans l'ACCV. À titre d'exemple, la valeur actualisée nette de ces énergies est calculée pour la 40^e année tel que :

$$\text{Électricité : } 28,57 \cdot \frac{(1+0,0327)^{40}}{(1+0,0068)^{40}} = 78,91 \text{ c€/kWh}$$

$$\text{Gaz : } 5,81 \cdot \frac{(1+0,0067)^{40}}{(1+0,0068)^{40}} = 5,79 \text{ c€/kWh}$$

On constate ainsi que le prix au kWh de l'électricité augmenterait de 176% sur la période de 40 ans tandis que le prix du gaz resterait quasiment similaire à son prix considéré lors de la première année. Plus marquant encore, l'électricité deviendrait 13 fois plus chère que le gaz par unité d'énergie. Si tous ces chiffres ne restent que des estimations, sensibles au contexte politico-économique des 40 prochaines années, ils permettent néanmoins d'exclure tout scénario de l'ACCV qui viendrait opter pour une solution fonctionnant entièrement à l'électricité à moins que la consommation en soit fortement réduite ou que la résidence soit équipée de panneaux PV pour assurer une part conséquente de ses besoins.

8.4 HYPOTHÈSES DES COÛTS DE CONSTRUCTION ET DES ÉQUIPEMENTS

Prix des matériaux

Les différents coûts pour les matériaux, pour les mises en œuvre de ceux-ci et pour les équipements utilisés dans la résidence Arola sont extraits du bordereau des prix unitaires réalisé en 2020 par l'Union Professionnelle d'Architectes (UPA). Celui-ci a pour but de servir comme guide pour les architectes dans l'établissement d'un budget. Ce bordereau est d'autant plus utile dans le cadre de ce travail que celui-ci est spécifique « aux travaux de bâtiments neufs à usage d'habitation de taille moyenne » en Belgique (UPA, 2020, p.9).

Les prix sont indiqués dans le bordereau sous la forme d'une valeur minimale et d'une valeur maximale. Ainsi, la moyenne arithmétique de ces deux valeurs est utilisée et implémentée dans l'outil CRAVEzero. Il faut également noter que les prix des matériaux incluent également le prix courant de la main d'œuvre qui l'accompagne. Enfin, les valeurs indiquées dans le bordereau reflètent les prix hors TVA (UPA, 2020), ce qui permettra de comparer le prix de construction de la résidence Arola avec les bâtiments du benchmarking.

Afin d'encoder les quantités de chaque matériau utilisé dans le projet, un métré a été réalisé sur base des documents de la résidence fournis par l'architecte D. Franzen. Les quantités respectives de chaque matériau sont bien évidemment mesurées dans l'unité correspondante à celle utilisée dans le bordereau.

Prix des équipements

Afin de renforcer la fiabilité des données encodées, les prix des équipements HVAC indiqués dans le bordereau ont été croisés avec des devis de fabricants du marché belge. Comme vu au chapitre 7, les besoins en ECS et chauffage sont assurés par 6 chaudières gaz à condensation et les besoins d'air neuf sont rencontrés par 6 dispositifs de VMC double flux avec échangeur de chaleur. Le tableau 21 indique le prix de ces équipements ainsi que le prix de l'installation par unité.

Équipements HVAC	Prix de l'équipement à l'unité	Prix de la pose par unité
Chaudière gaz à condensation modulable (1,9 à 32kW)	3000€/u	350€/u
VMC double flux avec récupérateur de chaleur	4500€/u	1500€/u

Tableau 21: Prix des équipements HVAC de la résidence Arola - cas initial

8.5 HYPOTHÈSE DES COÛTS DE MAINTENANCE

Pour les matériaux

Comme annoncé précédemment, avec l'outil CRAVEzero, les coûts de maintenance pour les matériaux sont définis de sorte à englober les notions de frais d'entretien et frais de remplacement. Toutes les valeurs utilisées dans ces calculs proviennent de la norme EN 15459:2018. Ainsi, CRAVEzero calcule les coûts annuels de maintenance des éléments de construction comme un pourcentage de l'investissement initial de ces éléments. Après un croisement des données de la norme avec l'expérience des partenaires industriels, le consortium a pris l'hypothèse de considérer une valeur de 1,5% pour tous les éléments de construction (CRAVEzero, 2020).

Pour les équipements

La particularité pour les équipements HVAC est que leur durée de vie doit être encodée, car les coûts annuels de maintenance ne prennent pas en compte les frais liés au remplacement des appareils HVAC. Un coût supplémentaire de remplacement à la fin de vie de l'appareil vient donc s'ajouter au bilan financier du bâtiment.

Ainsi, les chaudières gaz et VMC double flux sont encodées avec une durée de vie moyenne de respectivement 20 et 15 ans et un pourcentage de maintenance moyen de respectivement 1,5% et 4%. Un tableau reprenant ces données pour un grand nombre d'équipements HVAC est repris à l'annexe 3.

9. CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Une analyse de sensibilité sur la modélisation énergétique permettrait d'identifier les variables ayant le plus haut niveau d'influence sur les consommations du bâtiment. Néanmoins, dans le cas traité ici, le recours à ce type de méthodologie n'est pas nécessaire en raison que les forces et faiblesses du bâtiment peuvent être identifiées en le confrontant aux résultats du benchmarking et via la littérature. Il aurait aussi été envisageable de réutiliser les scénarios établis par C. Malmedy, mais ceux-ci réalisés dans le contexte d'une analyse sur le cycle de vie, ne ciblent pas forcément les objectifs économiques et ne sont donc que peu souvent pertinents pour être utilisés dans ce mémoire.

La définition des scénarios est répartie selon les trois catégories de Belussi et al. (2019) introduites dans l'état de l'art. Pour rappel, la première traite des mesures permettant une diminution de la demande énergétique, la seconde aborde l'utilisation d'équipements HVAC adaptés dont notamment l'utilisation des énergies renouvelables afin de réduire les consommations, tandis que la dernière recommande l'implémentation de bons systèmes de contrôle et régulation. Dans ce chapitre, six scénarios sont définis à travers ces différentes stratégies.

9.1 SCÉNARIOS VISANT À RÉDUIRE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE

Cette catégorie de mesures peut se scinder en deux parties. D'une part, on retrouve les solutions dites « passives », c'est-à-dire exploitant les propriétés thermiques des matériaux via des mécanismes tels que l'inertie ou l'évaporation. Elles ont comme but commun de réaliser une enveloppe thermique performante afin de réduire les besoins. D'autre part, les solutions « actives » examinent la possibilité de renforcer l'efficacité des équipements HVAC ou d'autres postes de consommations (Belussi et al., 2019).

Dans la situation existante de la résidence Arola, les besoins en énergie étant déjà relativement bas, les pistes pour renforcer la performance de l'enveloppe sont peu nombreuses. En effet, de gros efforts ont été investis dans l'enveloppe. Par exemple, le débit d'étanchéité à l'air de 0,25 vol/h de la résidence Arola est égal à la meilleure valeur observée dans le benchmarking. De plus, le ratio vitre-mur est de seulement 12,98% selon DesignBuilder, or une valeur proche de 10% constitue la meilleure solution pour les consommations de chauffage et de refroidissement (Sadineni et al., 2011). Créer un scénario qui réduirait les surfaces vitrées ne serait pas très utile. Le bâtiment, avec notamment ses 32cm de polystyrène ou 24cm de polyuréthane dans les murs, est également très bien isolé de manière générale. Un coefficient de déperdition moyen de 0,26 W/m²K a été calculé. Cette valeur est proche de la valeur médiane de 0,23, issue de la meilleure catégorie de bâtiments du benchmarking au niveau de la consommation. Néanmoins, la maison Alistair avec son coefficient de 0,15 W/m²K montre qu'il est possible d'améliorer l'enveloppe de la résidence Arola.

Des systèmes « actifs » tels qu'un récupérateur de chaleur, un ballon d'eau chaude ou l'utilisation de lampes LED sont déjà des options présentes dans le cas d'étude et qui permettent d'améliorer la performance des équipements. L'utilisation d'un chauffage par le sol via une baisse du régime de température du système est une option envisageable, mais abordée dans un scénario ultérieur.

Finalement, deux scénarios propres à l'enveloppe, nommés « Scénario E.1 » et « Scénario E.2 » sont définis dans les paragraphes suivants.

Scénario E.1 : Parois PEB 2014

Le tout premier scénario défini n'est pas un scénario visant à réduire la consommation totale du bâtiment, mais cherche à comparer les performances actuelles avec celles d'un cas fictif où le bâtiment aurait été construit avec les réglementations PEB relatives à l'année 2014. L'idée est donc de réduire les épaisseurs d'isolation des parois afin d'obtenir des coefficients de déperditions thermiques égales aux valeurs U_{\max} de l'époque. De plus, les valeurs U_w seraient également conformes²³. Le tableau 21 montre notamment les épaisseurs déterminées afin d'atteindre les U_{\max} respectifs. Il est attendu de voir si la réduction des coûts de consommation énergétique induite par la « surisolation » du cas actuel compense le surinvestissement qui permet d'obtenir un si bon niveau d'isolation.

Type de parois	Epaisseur actuelle de l'isolant	U actuel de la paroi [W/m²K]	Epaisseur projetée de l'isolant	U projeté de la paroi [W/m²K]	U_{\max} 2014 [W/m²K]
Murs crépis	32cm PES	0,105	14cm PES	0,23	0,24
Murs bardage	24cm PUR	0,099	10cm PUR	0,22	0,24
Toiture inclinée	24cm PIR + 18cm laine cellulose ²⁴	0,072	18cm laine cellulose	0,24	0,24
Toiture terrasse	20cm PIR	0,117	10cm PIR	0,22	0,24
Dalle de sol	25cm PUR	0,095	10cm PUR	0,22	0,3

Tableau 22: Epaisseur d'isolant et valeur U projetée pour le scénario E.1
Valeurs U_{\max} extraites de « Exigences PEB du 1^{er} janvier 2014 au 30 avril 2015 » par Wallonie Energie

Aux vues des épaisseurs d'isolant déjà très importantes dans les parois, il n'aurait pas de sens autant techniquement que pour l'intérêt du mémoire de considérer un scénario avec une augmentation des épaisseurs d'isolation.

Scénario E.2 : Fenêtres triple vitrage

Actuellement, les fenêtres mises en œuvre dans la résidence Arola constituent le point faible de l'enveloppe thermique. En effet, celles-ci sont supérieures à l' U_{\max} en vigueur actuellement pour les ensembles châssis et vitrage. En particulier, il s'agit du U_g , propre au vitrage, qui présente des performances moyennes avec une valeur de 1,24 W/m²K, là où la PEB impose une valeur de 1,1 au minimum.

Il est donc envisagé d'utiliser du triple vitrage afin de renforcer l'enveloppe thermique. Les caractéristiques encodées correspondent aux propriétés du produit E-Green de Sprimoglass et sont référencées au tableau 23.

²³ Pour rappel, celles-ci sont égales 1,738 W/m²K alors que le U_{\max} en vigueur pour les fenêtres est de 1,5 W/m²K

²⁴ La couche de laine de cellulose est posée entre les chevrons, tandis que ces derniers représentent 13% de la couche.

	Ug [W/m²K]	Transmission lumineuse TL	Facteur solaire FS	Uw [W/m²K]
Situation existante	1,24	0,68	0,549	1,7
Situation projetée	0,6	0,73	0,61	0,975

Tableau 23: Propriétés du triple vitrage du scénario E.2
Valeurs de la situation projetée extraites de « E-Green » par Sprimoglass

Les bonnes performances de ce vitrage s'expliquent par la présence de 3 couches de verre, un revêtement basse émissivité présent sur 2 faces et le fait que les intercalaires soient remplis à 90% par de l'argon (Sprimoglass, n.d.).

Le bordereau de l'UPA, utilisé pour calculer les coûts des matériaux dans l'ACCV, indique un surcoût moyen de 77,5€/m² pour un triple vitrage ($U_g=0,6\text{W/m}^2\text{K}$) par rapport au prix des vitrages standards. Jugés comme suffisamment performants, les châssis sont conservés.

9.2 SCÉNARIOS VISANT À RÉDUIRE LES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES

Les chaudières gaz à condensation utilisées dans la résidence Arola constituent déjà en une bonne stratégie pour diminuer la consommation liée au chauffage. Bien que les chaudières à condensation actuelles permettent d'atteindre des rendements supérieurs à 100%, les 92% d'efficacité des chaudières encodées dans la résidence Arola constitue un bon rendement pour un générateur à combustion.

Scénario S.1 : Pompe à chaleur

Au niveau des systèmes utilisés dans les bâtiments ZEN, l'alternative couramment citée dans la littérature et identifiée dans le benchmarking est la pompe à chaleur. En effet, celle-ci était utilisée dans près de 30% des cas d'études, avec un taux d'occurrence au plus fort dans les catégories de consommations d'énergie les plus faibles.

Bien que cet équipement affiche son meilleur rendement avec des systèmes d'émission basse température, les radiateurs dimensionnés pour fonctionner à « moyenne température » (70-50°C) sont conservés afin d'éviter les coûts liés à l'installation d'un chauffage par le sol qui se relèverait être 13.000€ plus cher que les radiateurs actuels selon le bordereau. Il est décidé de conserver ces derniers et de faire tourner la PAC à un régime 60°/40°C.

La PAC implémentée est de type air-eau et présente un coefficient de performance (COP) de 3, c'est-à-dire que dans des conditions bien définies celle-ci peut produire jusqu'à 3kWh thermique à partir de 1kWh électrique. Il est attendu que son rendement soit meilleur pour la production d'ECS étant donné que celle-ci est produite à une température de 55°C. Bien que les PAC air-eau souffrent lors de la chute des températures en hiver, celle-ci demeure la seule option envisageable pour la résidence Arola car le terrain s'avère être trop petit que pour permettre une installation géothermique. Cette option aurait

eu comme avantage de fournir via le terrain, une température constante d'environ 10°C durant toute l'année.

La PAC est également encodée de sorte que le compresseur se coupe dès que le ballon de stockage atteint la température de 60°C et se relance dès que celle-ci chute en dessous de 55°C. Par temps de grands froids, si le compresseur n'arrive pas à assurer un maintien du ballon à une température minimale de 50°C, une résistance électrique s'enclenche pour ramener le ballon à la température désirée.

Au niveau des coûts financiers, l'investissement est plus conséquent que pour les chaudières gaz condensation. Le prix indiqué dans le bordereau ne fait aucune distinction entre la puissance installée ou le COP. Finalement, après croisement des données de plusieurs fabricants, il s'avère que l'estimation donnée par l'Institut de Conseils et d'Études en Développement Durable (ICEDD) semble la plus juste et pertinente au cas d'étude. Il y est estimé qu'une PAC air-eau avec un COP de 2,9 et d'une puissance de 10 à 12kW varie entre 9400 à 10.500€ (pose comprise et HTVA). Les PAC sont encodées avec une durée de vie de 20 ans et un coût de maintenance annuelle correspondant à 3% de l'investissement.

Avec la mise en place de cet équipement performant, il est attendu que le bâtiment consomme effectivement moins en énergie finale, mais le facteur de conversion en énergie primaire ainsi que le prix de l'électricité devraient fortement pénaliser l'ACCV de ce scénario.

Scénario S.2 : Couplage avec des panneaux solaires thermiques

Les systèmes à capteurs solaires thermiques sont très répandus dans les cas d'étude du benchmarking avec une occurrence à 40%. À l'instar de ces exemples, Belussi et. al (2019) explique que la diffusion importante des systèmes solaires thermique dans le résidentiel vise principalement la production de l'ECS. Cela devient particulièrement intéressant dans les bâtiments passifs, où les besoins en ECS dépassent souvent les besoins en chauffage.

L'installation modélisée dans DesignBuilder comprend six panneaux de 2,5m² chacun, soit un panneau par logement. Chaque panneau est relié à son propre ballon de stockage afin de réduire l'impact du caractère discontinu de l'énergie solaire et du déphasage entre la production et les besoins. L'eau est puisée du collecteur uniquement quand la sonde mesure une différence de 10°C avec le ballon de stockage, ce qui permet d'éviter de faire tourner en continu la pompe du système.

Les panneaux sont disposés sur l'unique pan de toiture de la résidence, orienté plein sud et avec une inclinaison de 20° ce qui devrait permettre un rendement maximal. Les propriétés de la gamme de panneaux Vitosol 100-FM du fabricant Viessmann sont disponibles dans la base de données de DesignBuilder et sont utilisées pour caractériser les six panneaux.

Côté investissement, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) donnait en 2017 une estimation de 3800€ à 5500€ (HT et pose comprise) pour une installation de 3 à 5m² de panneaux avec un ballon d'eau chaude de 200L. Étant donné que le prix augmente proportionnellement avec les petites installations, l'installation de 3m² à 3800€ est convertie pour 2,5m². Un coût de 3167€ est ainsi obtenu par logement. Les systèmes sont implémentés avec une durée de vie de 25 ans et un coût de maintenance annuelle correspondant à 0,5% de l'investissement.

Il est attendu une couverture des besoins en ECS de 40 à 70% comme l'indique le comparateur de devis Bobex.

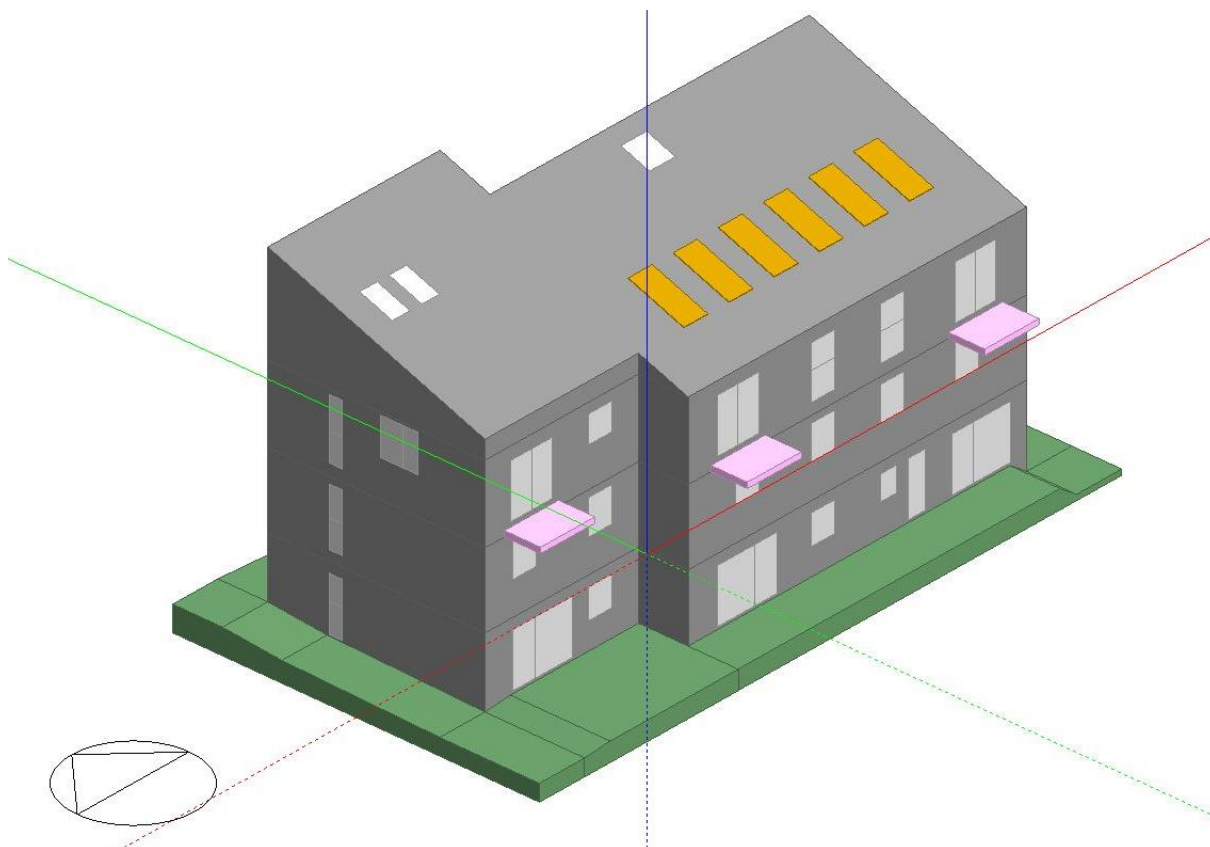


Figure 29: Vue 3D des panneaux solaires thermiques modélisée avec DesignBuilder

Scénario S.3 : Installation photovoltaïque

Avec 261.166 foyers équipés en Wallonie en août 2021, le système photovoltaïque demeure la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. L'amélioration des rendements et la chute des prix ces derniers ont permis à cette technologie d'atteindre une grande maturité financière.

Ce scénario a pour but d'autoproduire les besoins en électricité dédiés aux auxiliaires et à l'éclairage. Si l'intervention semble limitée à première vue, la somme de ces deux postes constitue pas moins de 37% de la consommation totale en énergie primaire du bâtiment²⁵.

Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques modélisés dans DesignBuilder correspondent à celles de la gamme Vitovolt300 type P250 PSEB du fabricant Viessmann. Ces panneaux polycristallins ont une puissance nominale de 250 watt-crête, un rendement de 15,36% et une superficie de 1,63m². L'onduleur occasionne quant à lui une perte de 5% sur le système. Comme pour les capteurs solaires, l'installation est posée sur le pan de toiture orienté plein sud, comme indiqué sur la figure 30.

L'installation a été prédimensionnée à l'aide du simulateur photovoltaïque développé par l'APERe afin de déterminer la puissance d'installation nécessaire pour répondre aux 5310 kWh nécessaires pour faire fonctionner les auxiliaires et l'éclairage. Après arrondissement du résultat à un multiple de 250 Wc, la puissance d'installation s'élève à 6 kWc soit 24 panneaux (39,12m²) avec les caractéristiques décrites précédemment.

²⁵ En effet, le facteur de conversion en énergie primaire de l'électricité explique cette grande proportion, d'autant plus dans les bâtiments très bien isolés.

Depuis janvier 2020, le régulateur bruxellois a mis fin au système de compensation qui permettait de faire tourner le compteur à l'envers. Les foyers sont équipés d'un compteur double-flux qui permet d'observer les quantités réelles d'énergie prélevées sur le réseau. Il est donc primordial de faire fonctionner les appareils quand l'installation produit, car la tarification dite « prosumer » ne se calcule plus au prorata de l'équilibre entre production et prélèvement, mais sur ce qui est réellement prélevé au réseau. En revanche, le cas d'étude s'aligne avec la réglementation wallonne qui autorise toujours les compteurs à tourner à l'envers et l'électricité produite est financièrement valorisée au même tarif que celle consommée depuis le réseau. Ainsi, les gains financiers liés à la production sont simplement déduits des coûts de consommation dans l'ACCV (Test Achats, 2021).

À l'instar des collecteurs thermiques, le coût rapporté à la puissance installée est dégressif au plus cette puissance est grande. Le bordereau affiche un prix moyen de 9000€ pour une puissance de 4 kWc et de 19.850€ pour 10 kWc installés. Le coût pour les 6 kWc ciblés est obtenu par une simple interpolation linéaire et s'élève à 12.617€, soit 2103€ le kWc. Or, ce prix supposé moyen semble surestimé, car il surpasse tous les coûts au kWc des sites de devis consultés. Le prix est finalement rapporté à 1800€/kWc et s'élève donc à 10.800€ pour toute l'installation. La durée de vie des panneaux est estimée à 30 ans et le coût de maintenance annuelle correspond à 0,5% de l'investissement.

Finalement, il est attendu que l'installation, certes de taille modeste, réduise néanmoins fortement la consommation en énergie primaire étant donné que l'éclairage et les auxiliaires constituent les 2 postes utilisant l'électricité.

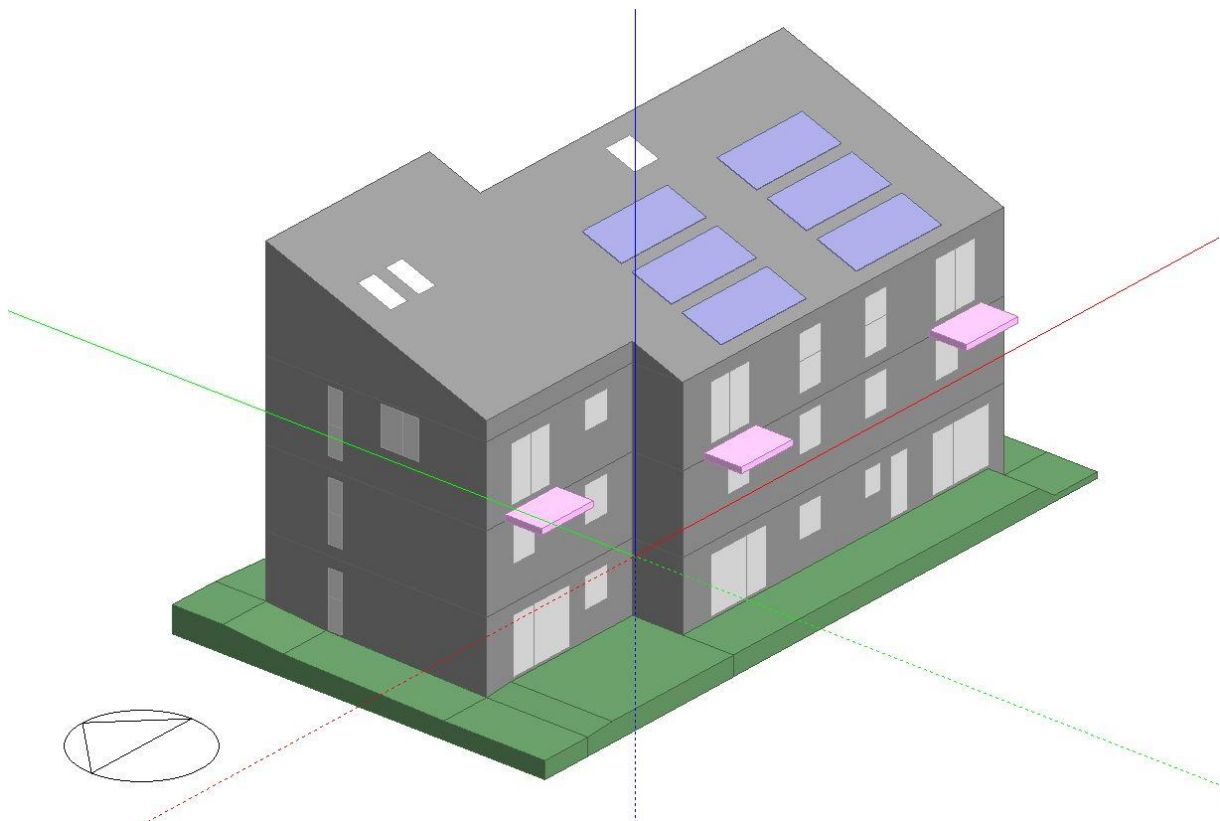


Figure 30: Vue 3D de l'installation photovoltaïque de 6kWc modélisée avec DesignBuilder

Scénario netZEN : Combinaison de plusieurs stratégies

Finalement, ce dernier scénario sert à illustrer l'ACCV de la résidence Arola présentant une consommation en énergie primaire quasi nulle. Cette neutralité de consommation ne peut cependant que s'atteindre via une installation photovoltaïque plus puissante que celle modélisée dans le scénario S.3. La stratégie développée ici ne consiste pas à simplement adjoindre une grande quantité de panneaux PV au bâtiment afin d'obtenir un bilan énergétique annuel nul, mais de réduire au maximum les besoins et de compenser le reste par les PV.

Ainsi, afin de réduire les besoins, ce scénario intègre les triples vitrages prévus dans le scénario E.2. De plus, les systèmes de chauffage sont remplacés par les PAC modélisées dans le scénario S.1 afin d'électrifier tous les postes de consommations du bâtiment. Enfin, une installation PV de 12 kWc a été prédimensionnée pour que celle-ci produise autant d'énergie que le bâtiment n'en consomme sur une année. Cette installation occupe 78,5m² du pan toiture. La figure 31 montre que la toiture pourrait encore accueillir davantage de panneaux, mais le but recherché est de limiter conjointement les consommations et les coûts jusqu'à l'autonomie²⁶ énergétique, et non au-delà.

Le prix moyen au kWc repris par le bordereau pour une installation de 10 kWc a dans ce cas-ci été retenu, car il correspond aux valeurs rencontrées dans les différentes sources consultées. Le prix de l'installation pour les 12 kWc s'élève ainsi à 23.820€.

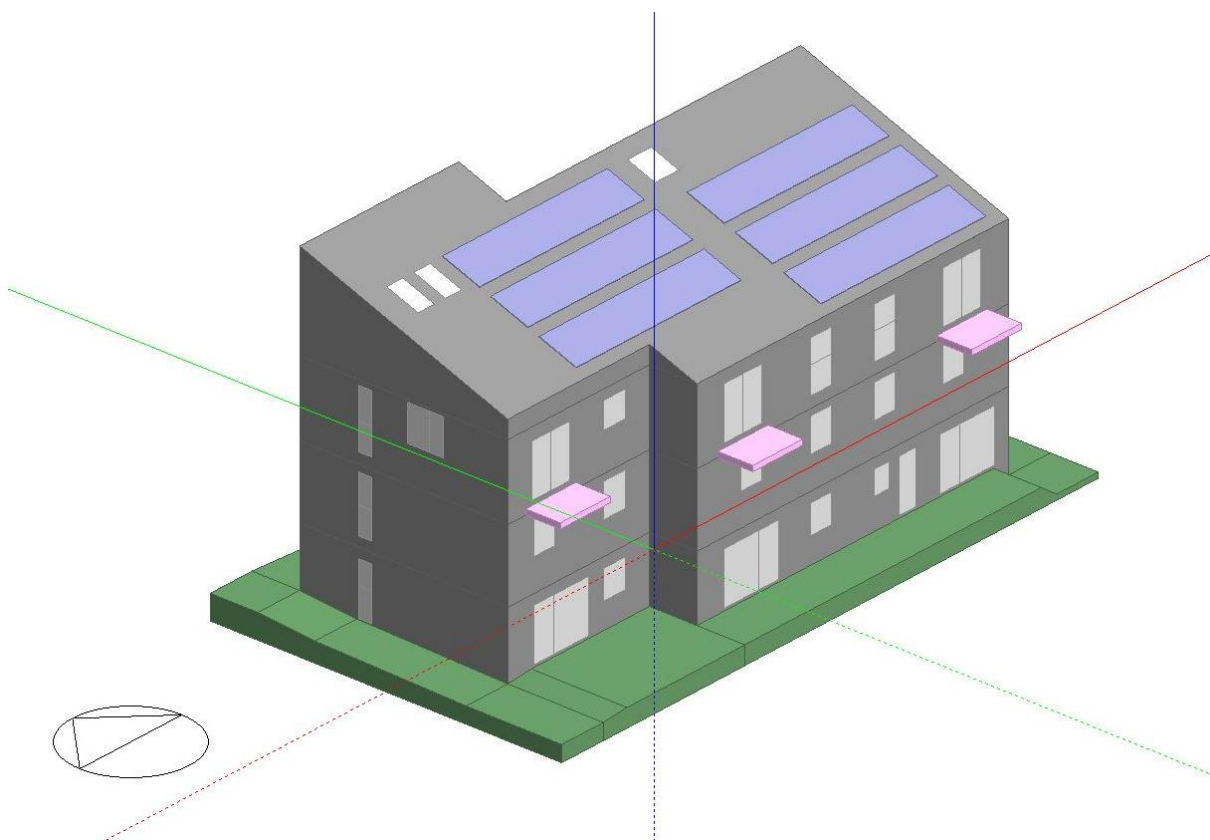


Figure 31: Vue 3D de l'installation photovoltaïque de 12kWc modélisée avec DesignBuilder

²⁶ Il n'est pas question d'une autonomie énergétique à tout moment de l'année, mais bien sur un bilan annuel.

10. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS ÉNERGÉTIQUES ET DE L'ACCV

Les résultats des simulations thermiques ainsi que l'ACCV du cas initial et des six scénarios sont présentés dans ce chapitre. Afin de permettre la comparaison avec les bâtiments du benchmarking, les consommations d'énergie primaire sont exprimées en fonction de la TFA et comprennent l'éclairage artificiel des locaux contrairement à la réglementation PEB résidentielle. Néanmoins, les consommations en énergie spécifique seront également indiquées afin de permettre d'évaluer le bâtiment via cet indicateur. Chaque scénario est présenté à travers une comparaison avec la situation existante. Tous les résultats chiffrés peuvent être consultés dans l'annexe 4.

Conformément aux pratiques courantes de la littérature, l'ACCV est réalisée sur une période de 40 ans (Islam et al., 2015).

10.1 SITUATION EXISTANTE

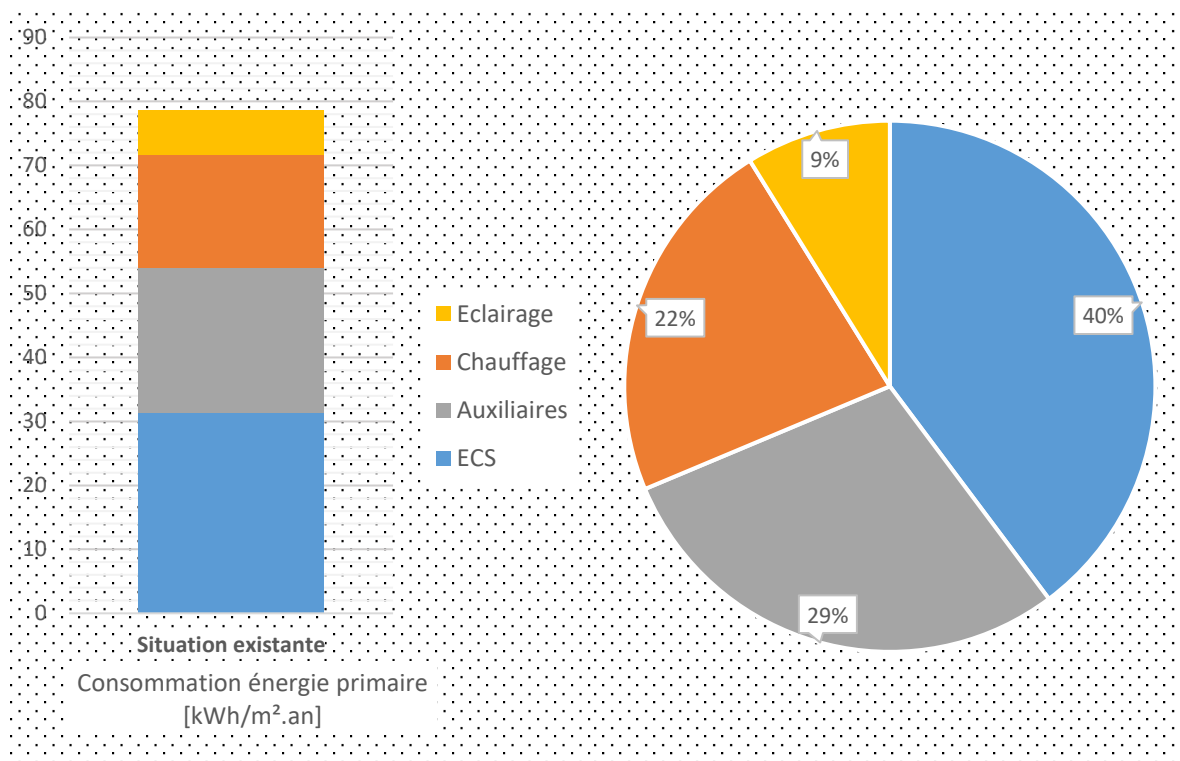


Figure 32: Consommations des différents postes de la situation existante de la résidence Arola

Pour la situation existante de la résidence Arola, DesignBuilder a calculé une consommation totale en énergie primaire de 78,61 kWh/m².an. Ce niveau étant inférieur au 85 kWh/m².an, ce bâtiment serait ainsi éligible pour figurer dans le benchmarking réalisé dans la première partie de l'étude. La conversion en énergie spécifique donne une valeur de 52,82 kWh/m².an, ce qui montre l'importante différence existant entre ces deux indicateurs censés représenter la performance du bâtiment.

Avec 40%, la part de consommation de l'ECS devance celle de chauffage comme cela est caractéristique des bâtiments très bien isolés. La dépense d'énergie liée au chauffage étant plus grande que les 15 kWh/m².an demandé par le Passive House Institute, le bâtiment ne peut être actuellement être considéré comme passif. La consommation des auxiliaires incluant les ventilateurs, pompes et électroniques des systèmes ont un poids conséquent avec 29% sur consommation totale. Bien que leur durée d'utilisation ait été revue à la baisse, les ventilateurs sont responsables de 66% de la consommation électrique du bâtiment.

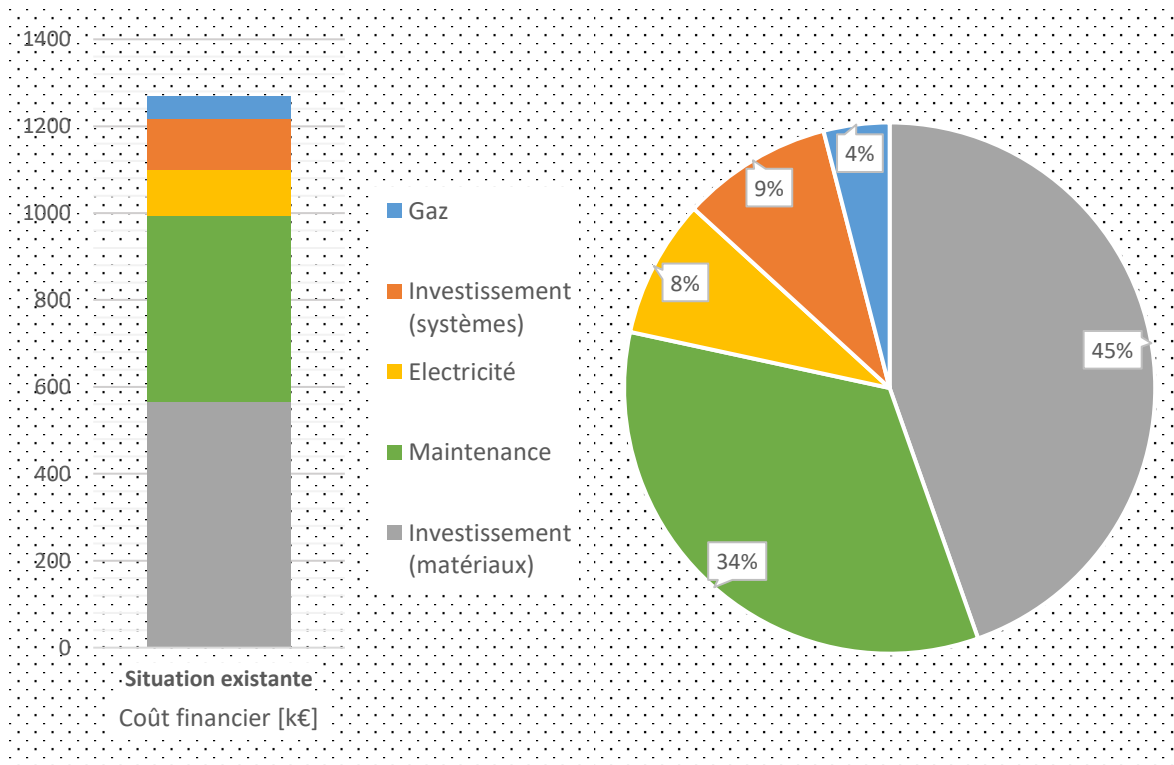


Figure 33: Décomposition des coûts de la situation existante de la résidence Arola

La figure 33 illustre le montant et la décomposition des coûts obtenus via l'ACCV. L'investissement initial, composé des coûts des matériaux et des systèmes, a été estimé à 681.860€. Il s'agit de la somme HTVA à déboursier pour faire construire la résidence Arola (hors fonciers, honoraires et études). La maintenance sur les 40 années du cycle de vie constitue le second coût le plus important avec 428.368€. Celui-ci pour rappel comprend l'entretien des matériaux et systèmes ainsi que leur coût de remplacement.

Bien que le bâtiment fonctionne avec 38% d'énergie primaire issue de l'électricité et 62% au gaz, il faudra déboursier environ deux fois plus d'argent pour payer sa facture d'électricité que celle de gaz. En effet, les hypothèses de modélisation prises sur l'évolution du coût de l'électricité vont pénaliser assez fortement chaque kWh d'électricité consommé dans tous les scénarios. Durant la première année, les charges annuelles relatives à l'électricité et le gaz sont de respectivement 1518€ et 1273€.

Enfin, tous les systèmes de la résidence Arola ont été estimés à 116.512 €. Les coûts relatifs aux chaudières à gaz, systèmes de ventilation mécanique double flux, radiateurs, thermostats et installation électrique sont compris dans ce poste.

10.2 SCÉNARIO E.1 : PAROIS PEB 2014

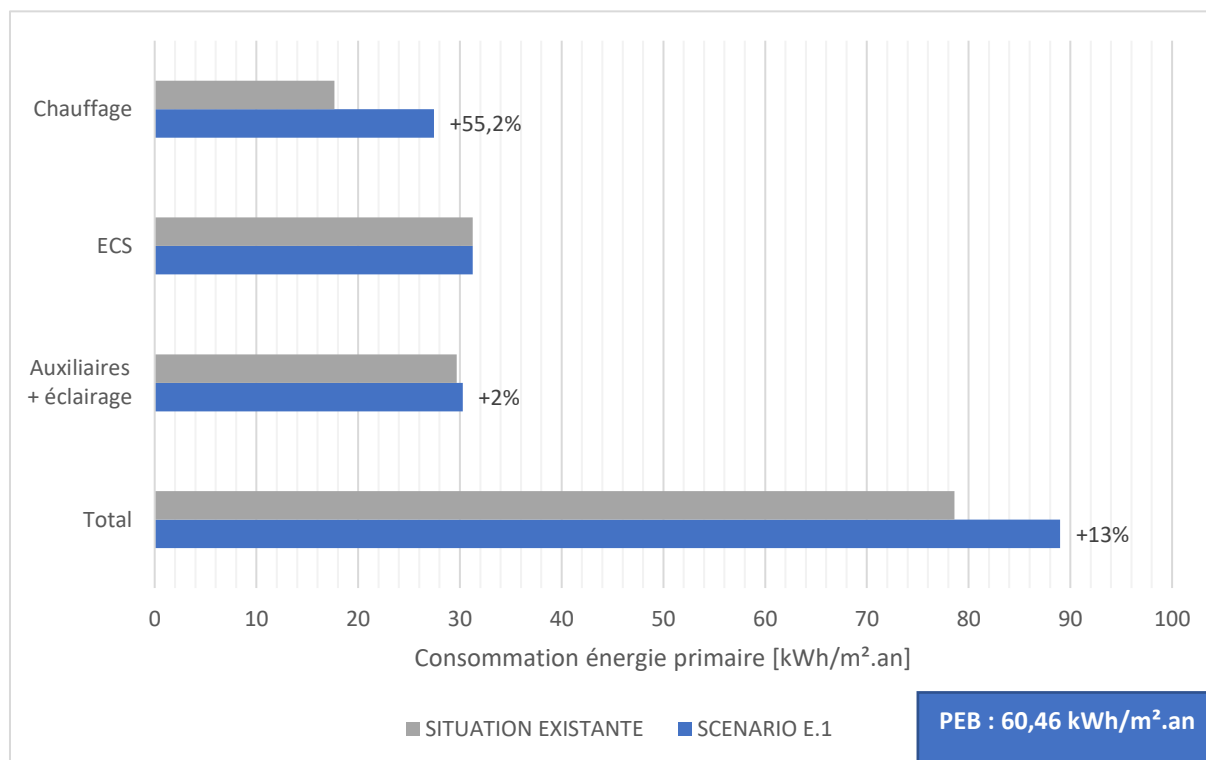


Figure 34: Comparaison des consommations entre la situation existante et le scénario E.1

La réduction des coefficients de déperdition des parois aux valeurs maximums demandées par la réglementation PEB de 2014 entraîne une augmentation de 55,2% sur la consommation de chauffage. Cela permet de se rendre compte des gains générés par la mise en œuvre des grandes épaisseurs d'isolation dans la résidence Arola. Cette augmentation de la demande de chauffage n'entraîne que très légèrement la consommation des auxiliaires, car uniquement les circulateurs d'eau chaude fonctionneront davantage pour assurer le confort dans le bâtiment. De manière globale, la consommation en énergie primaire passe de 78,61 à 88,98 kWh/m².an.

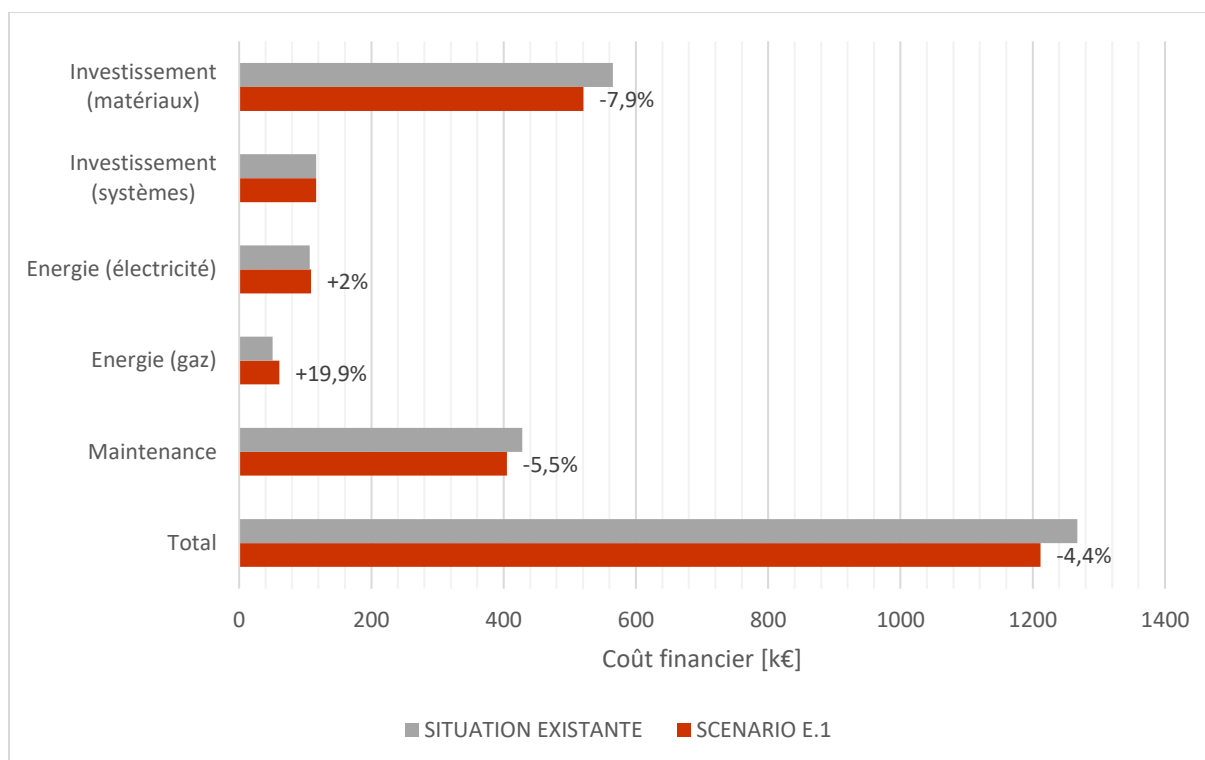


Figure 35: Comparaison des coûts entre la situation existante et le scénario E.1

Néanmoins, le graphique 35 montre que le coût total sur le cycle de vie ne suit pas du tout la hausse de consommation de chauffage. À l'inverse, celui-ci diminue de 3,7%. En effet, les 44.816€ économisés sur les éléments d'isolation ainsi que les coûts de maintenance associés compensent et dépassent le surcoût de 19,9% de consommation de gaz sur les 40 années. Ce résultat montre que l'isolation à des niveaux passifs constitue certainement davantage un geste environnemental qu'une réelle économie d'argent²⁷. Indépendamment des autres coûts, les économies annuelles de la situation existante par rapport au scénario E.1 sur la consommation de chauffage s'élèvent en moyenne à 253€/an.

²⁷ Pour pouvoir faire une telle affirmation, il faudrait réaliser une analyse de cycle de vie (ACV) afin de déterminer si les gains environnementaux sur l'économie de chauffage dépassent bien les coûts environnementaux liés aux épaisseurs d'isolation supplémentaires.

10.3 SCÉNARIO E.2 : FENÊTRES TRIPLE VITRAGE

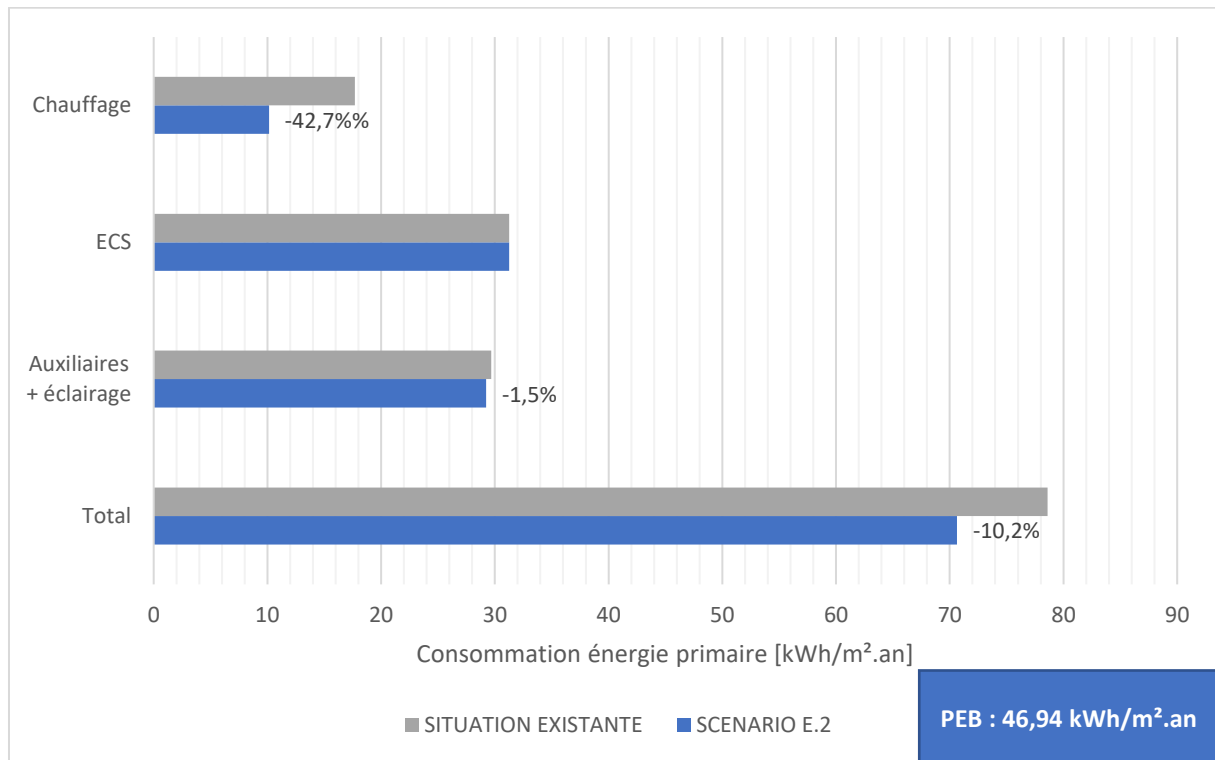


Figure 36: Comparaison des consommations entre la situation existante et le scénario E.2

Identifiés comme les points faibles de l'enveloppe thermique, le remplacement des châssis existants par du triple vitrage permet de faire diminuer la consommation de chauffage de 17,68 à 10,13 kWh/m².an, rendant ainsi le bâtiment passif. Le coefficient de déperdition moyen calculé pour la situation existante passe quant à lui de 0,26 à 0,19 W/m²K. L'amélioration de la gestion des ponts thermiques pourrait être une piste pour encore diminuer cette valeur, bien que celle-ci soit déjà à un excellent niveau.

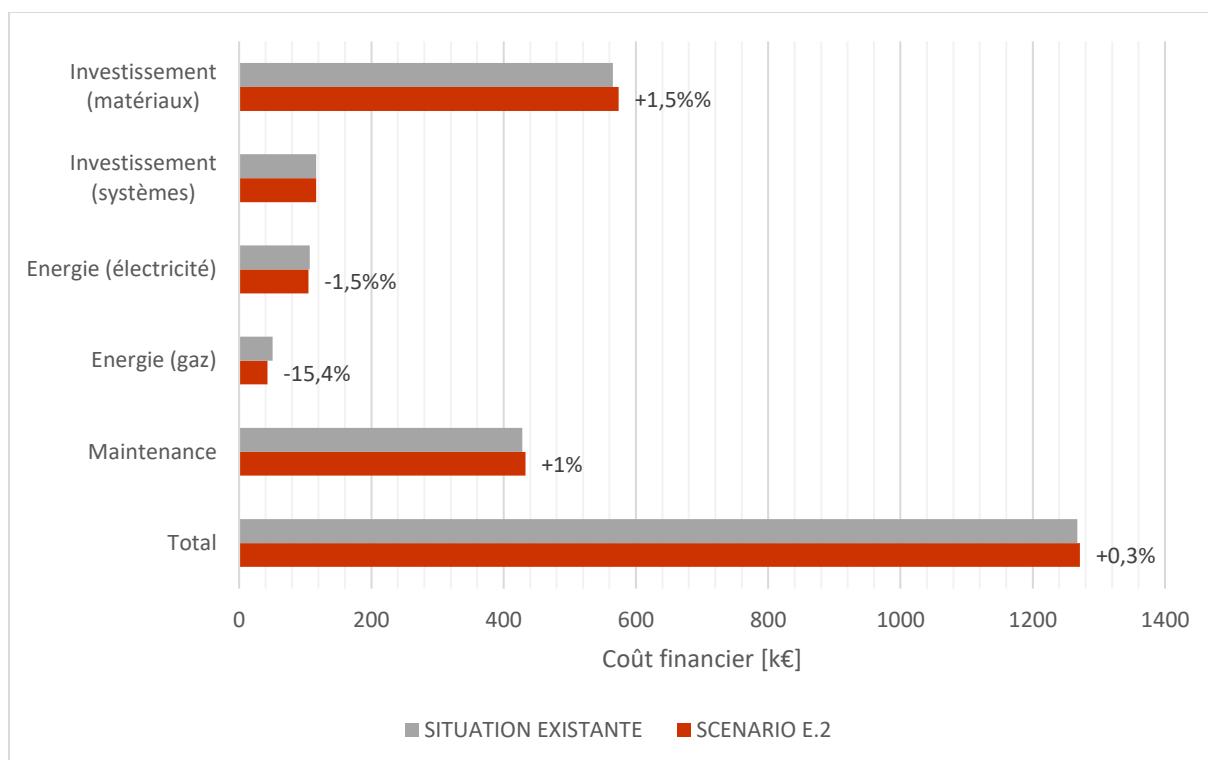


Figure 37: Comparaison des coûts entre la situation existante et le scénario E.2

Le triple vitrage implique un surcoût de 1,5% sur l'investissement initial des matériaux utilisés pour la construction de la résidence. À l'inverse, il permet une économie annuelle de 196€ en chauffage. La figure 37 montre que les gains réalisés par la diminution de la consommation de chauffage permettent tout juste de compenser l'augmentation du budget consacré aux châssis ainsi que la maintenance associée. En effet, les 8543€ supplémentaires pour l'installation du triple vitrage sur les 102m² de fenêtre de la résidence ne pourront être récupérés au-delà de ce montant par les économies en chauffage.

10.4 SCÉNARIO S.1 : POMPE À CHALEUR

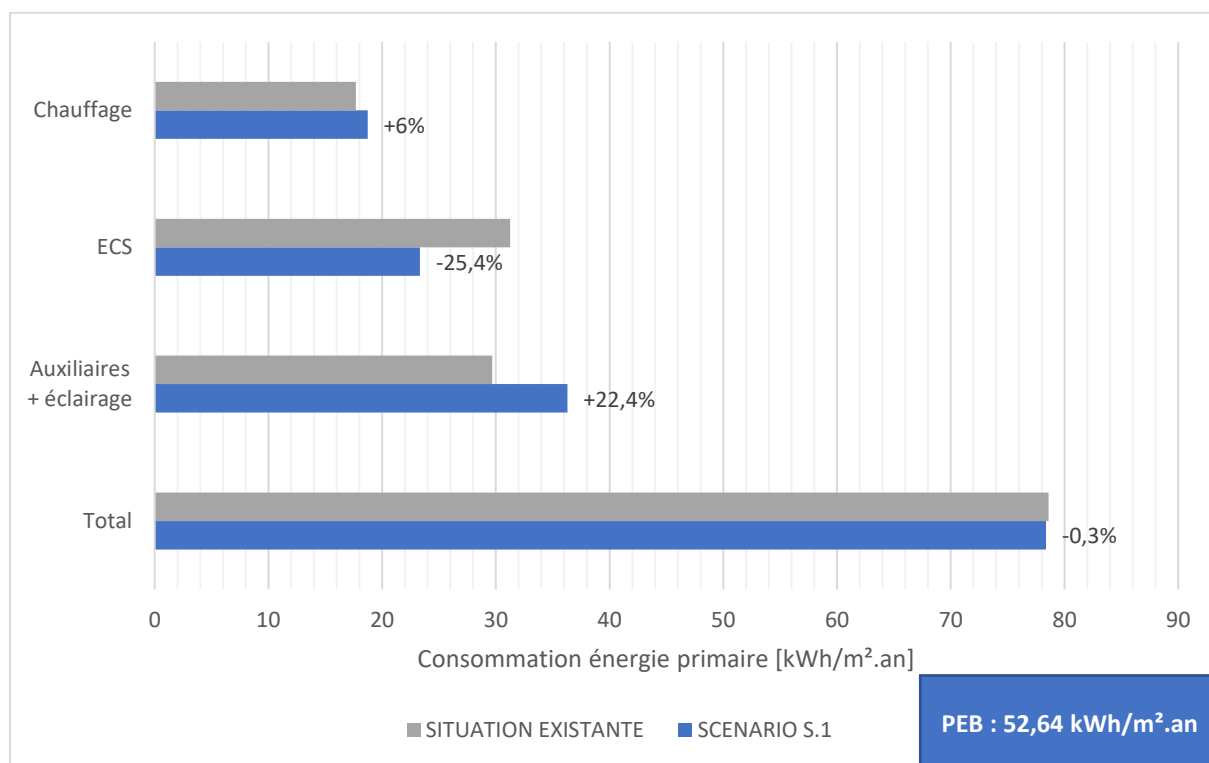


Figure 38: Comparaison des consommations entre la situation existante et le scénario S.1

Les effets du remplacement des chaudières à gaz par des pompes à chaleur air-eau sont variables en fonction du poste considéré. De manière globale, les consommations d'énergie finale liées au chauffage et à la production de l'ECS ont diminué. En revanche, la conversion en énergie primaire amoindrit fortement ces gains en raison de l'électrification de ces systèmes.

Le rendement de la PAC pour l'ECS semble meilleur en raison que la température demandée est inférieure à celle prévue pour le système de chauffage, et permet une économie de 25,4%. En revanche, la consommation pour le chauffage tend à légèrement augmenter par rapport aux systèmes à gaz. Pour permettre des économies avec le chauffage, il faudrait certainement implémenter des PAC présentant un COP supérieur à 3. L'autre option envisagée serait d'installer un chauffage par le sol ce qui permettrait de passer à un système de distribution à basse température.

Les ventilateurs et compresseurs des PAC amènent une augmentation de 22,4% sur la consommation électrique des auxiliaires. Au niveau du bilan total, les pompes à chaleur semblent induire un effet neutre avec une diminution de seulement 0,3%.

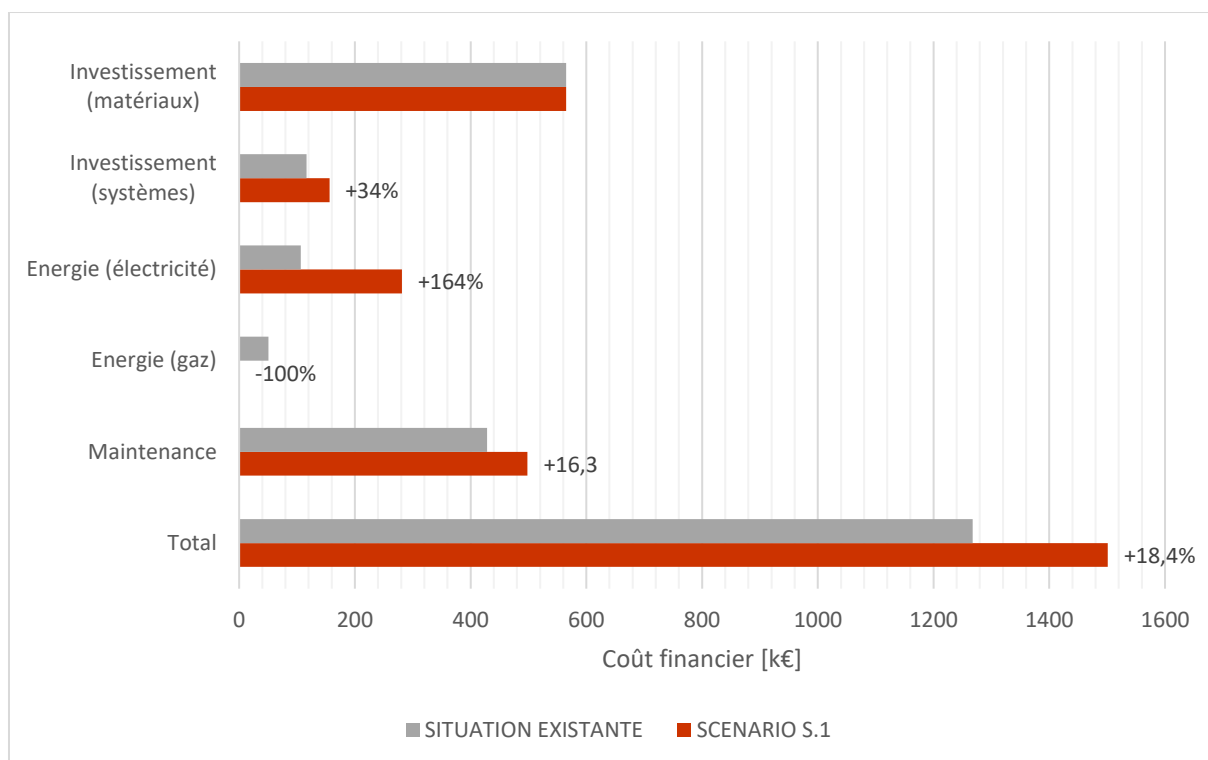


Figure 39: Comparaison des coûts entre la situation existante et le scénario S.1

La figure 39 présente les conséquences financières résultant de l'électrification des systèmes de la résidence Arola liés à l'installation des pompes à chaleur. Sans surprise, le gaz n'étant plus utilisé comme vecteur énergétique, son coût associé devient nul. À l'inverse, le coût dédié à consommation d'électricité est multiplié par 2,64. Cette nette augmentation est imputable d'une part, au fait que tous les postes de consommation d'énergie y sont maintenant regroupés, et d'autre part à cause du coût au kWh plus important que celui de gaz. Ainsi, dans ce scénario, les usagers devraient déboursier environ trois fois plus d'argent pour se chauffer et bénéficier de leur usage quotidien d'ECS.

Les six pompes à chaleur impliquent également un surcoût à l'investissement initial de 39.618€, soit 6600€ par PAC. Si les PAC sont plus chères que les chaudières gaz à condensation, les coûts de maintenance associés le sont également.

Finalement, cette option présente le plus mauvais bilan financier de l'ensemble des scénarios. Pour un effet neutre sur la consommation en énergie primaire, il faudra déboursier sur les 40 années 233.614€ supplémentaires par rapport à la situation initiale.

10.5 SCÉNARIO S.2 : COUPLAGE AVEC PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES

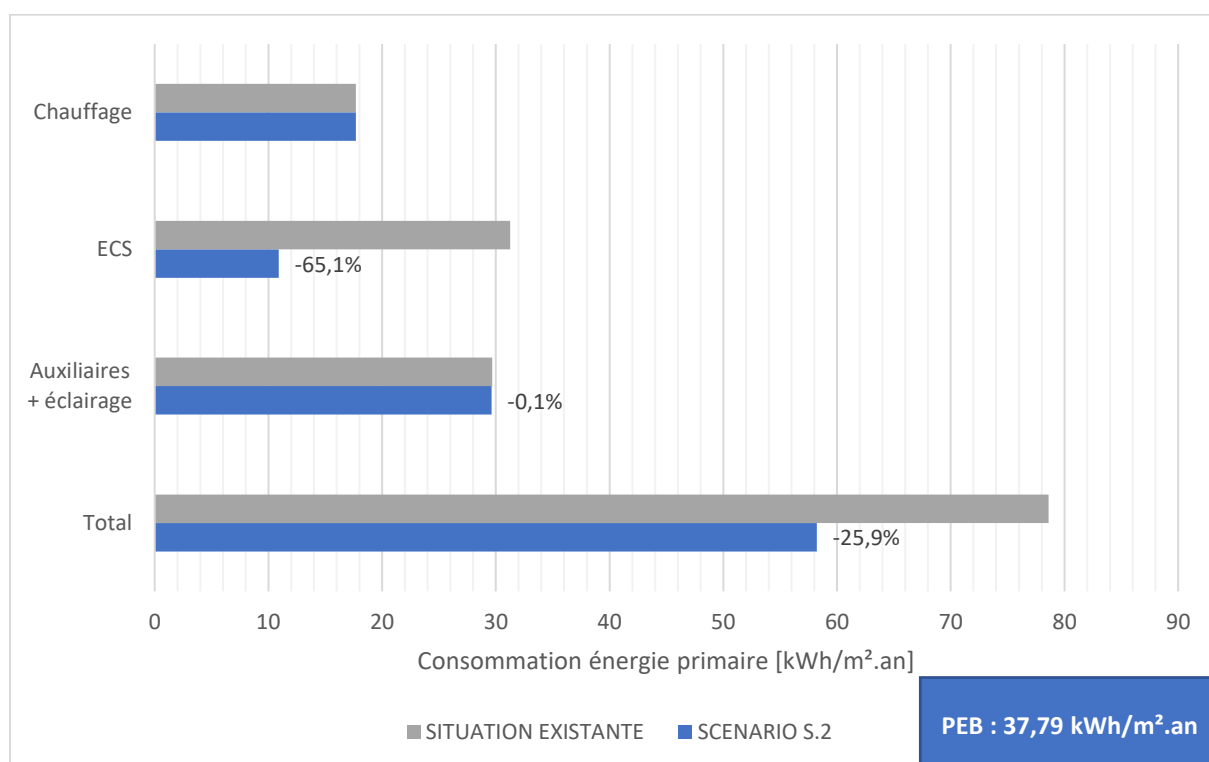


Figure 40: Comparaison des consommations entre la situation existante et le scénario S.2

Pour rappel, l'installation des panneaux solaires thermiques a seulement pour but de produire de l'ECS en appoint des chaudières à gaz, et n'entraîne donc aucun effet sur la consommation de chauffage. L'exposition idéale de l'installation permet de diminuer de 65,1% la demande d'énergie pour l'ECS, et 25,9% sur la consommation totale. Autrement dit, le système permet à chaque logement de produire environ 1500 kWh/an. Il est également intéressant de remarquer que la production d'eau chaude sanitaire devient moins énergivore que le poste chauffage. Le niveau PEB passe quant à lui sous la barre des 45 kWh/m².an d'énergie spécifique, ce qui permet au bâtiment d'être certifié du label A+.

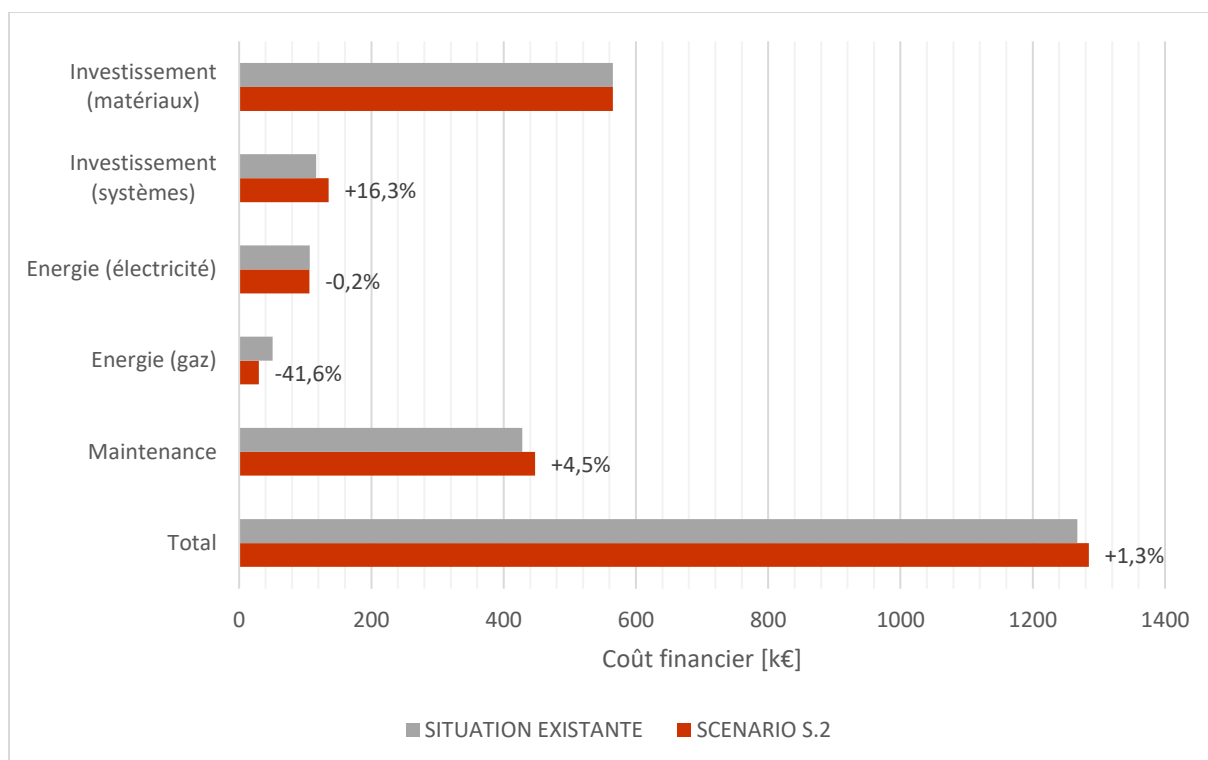


Figure 41: Comparaison des coûts entre la situation existante et le scénario S.2

L'économie sur les coûts liés au gaz est conséquente. La facture annuelle moyenne de gaz passe de 1270 à 742€. Néanmoins, cela ne permet de rembourser l'investissement de 19.000€ de l'installation solaire thermique qu'à partir de la 36^e année. Si l'on rajoute la hausse de 4,5% des coûts de maintenance, ce scénario s'avère, dans sa totalité, finalement légèrement plus coûteux que la situation de départ. La rentabilité de ce type d'installation dépend donc de l'existence ou non de prime qui permettrait de réduire l'investissement initial.

10.6 SCÉNARIO S.3 : INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

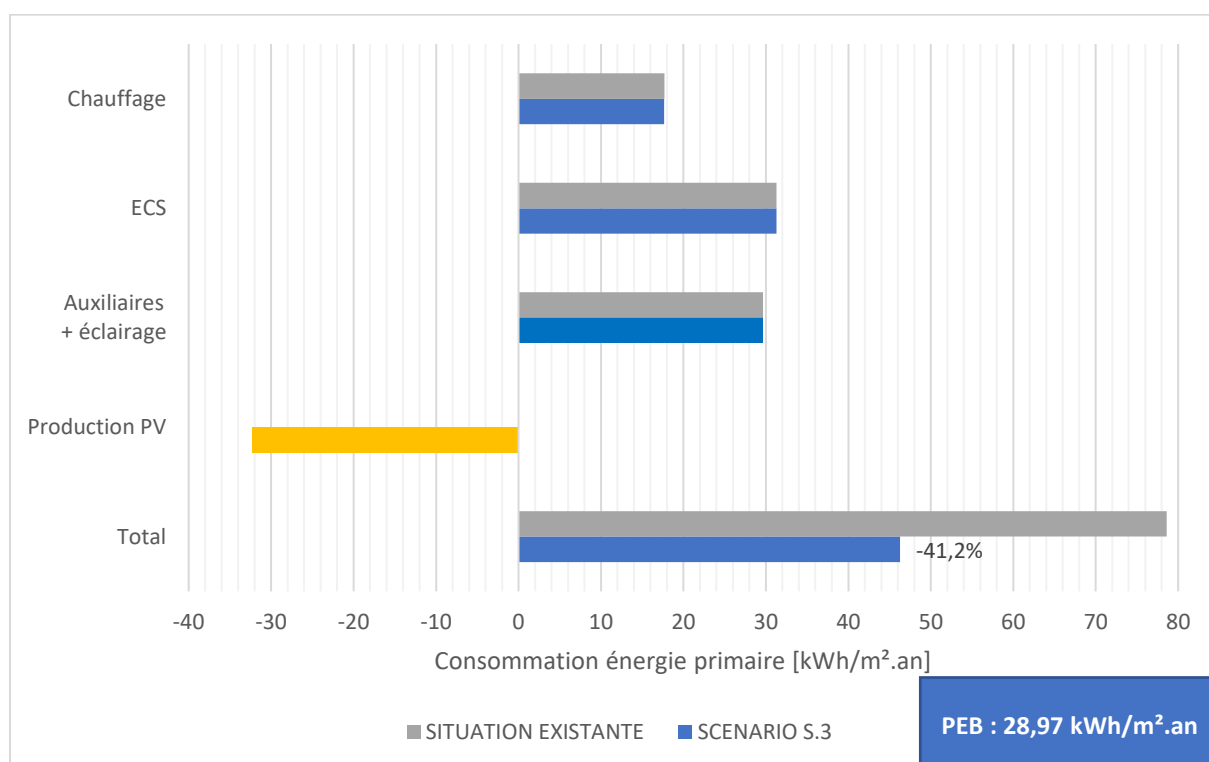


Figure 42: Comparaison des consommations entre la situation existante et le scénario S.3

Le scénario S.3 impliquant l'installation de 6kWc de panneaux photovoltaïques ne modifie en rien les différents postes de consommation. Pour rappel, le système a été dimensionné pour répondre à la demande des appareils auxiliaires et de l'éclairage. Autrement dit, une quantité d'énergie équivalente à la consommation électrique du bâtiment est autoproduite par les panneaux²⁸. Chaque kilowatt-crête installé, soit l'équivalent de 4 panneaux, permet de produire 965 kWh annuellement. L'effet résultant sur la consommation totale est conséquent en raison du facteur de conversion en énergie primaire qui s'applique également à la production d'électricité. La consommation totale chute ainsi à 46,25 kWh/m².an tandis que la valeur PEB est de 28,97 kWh/m².an.

²⁸ A l'exception de la consommation électrique domestique, qui n'est pas prise en compte dans le bilan énergétique.

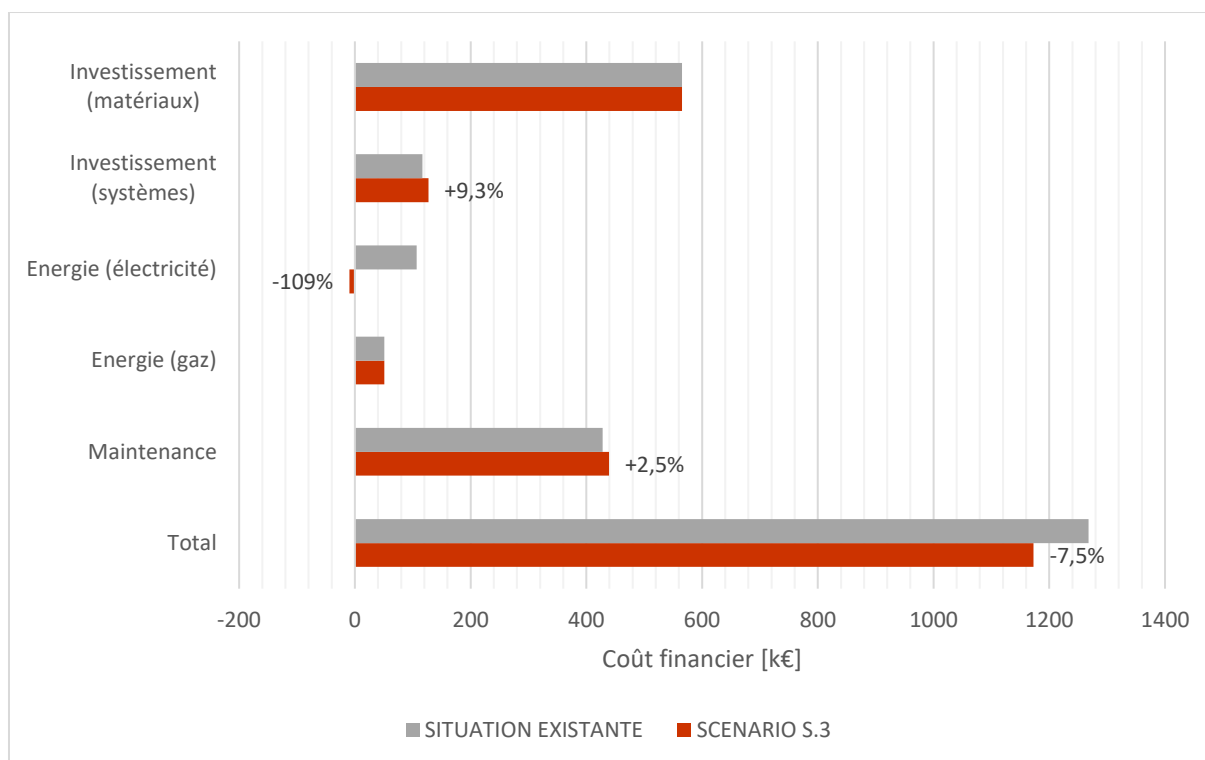


Figure 43: Comparaison des coûts entre la situation existante et le scénario S.3

Du point de vue financier, le rapport investissement par rapport aux gains sur les coûts de l'énergie est bien plus intéressant que dans l'exemple des collecteurs solaires thermiques. En effet, l'installation photovoltaïque de 6kWc coûte 10.800€ contre 19.000€ pour les panneaux thermiques et permet une économie de 116.268€ sur les années 40 années, là où le solaire thermique permettait de dégager « seulement » 21.121€. Sans prise en compte des frais de maintenance, le retour sur investissement est de 6 années.

Avec prise en compte des frais de maintenance, le coût total s'avère finalement 7,5% moins cher que le coût de la situation initiale, soit une économie de 94.814€ sur le cycle de vie. En d'autres termes, le système photovoltaïque génère un bénéfice de 15.800€²⁹ par kilowatt-crête installé et par période de 40 ans. Ces chiffres sont tout à fait sensibles aux hypothèses prises sur le coût du kWh de l'électricité ainsi que son taux d'évolution. La modélisation sera ainsi d'autant plus fiable que la durée de l'étude est réduite.

²⁹ Il s'agit du montant dégagé brut, sans déduction d'éventuelles taxes et/ou redevances sur l'utilisation du réseau électrique.

10.7 SCÉNARIO netZEN : COMBINAISON DE PLUSIEURS STRATÉGIES

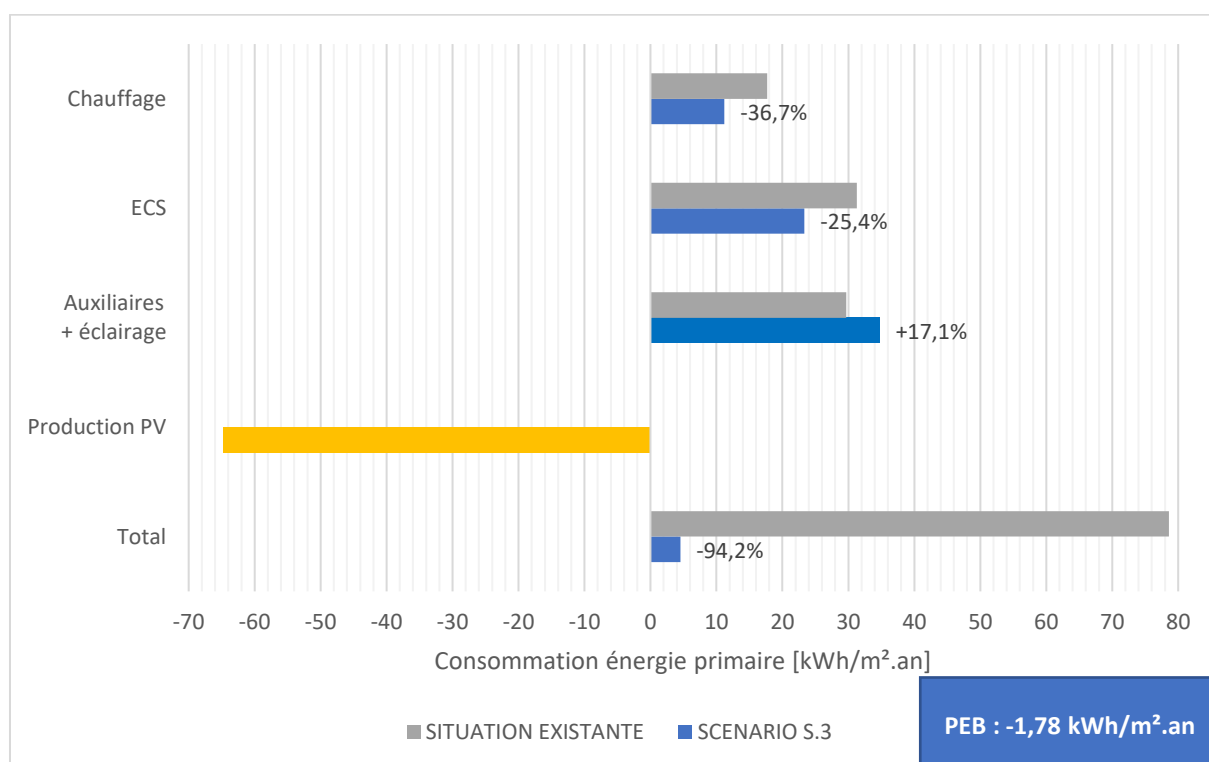


Figure 44: Comparaison des consommations entre la situation existante et le scénario netZEN

Le scénario netZEN rassemble toutes les solutions envisagées dans ce travail qui permettent de limiter autant les besoins que les consommations. Ainsi, l'installation du triple vitrage dans toutes les fenêtres est responsable de la diminution de la consommation de chauffage. Ensuite, le bénéfice de la pompe à chaleur est double. D'une part, comme pour le scénario S.1 il permet la réduction de 25,4% de la consommation dédié à l'ECS mais il permet également d'électrifier tous les systèmes afin que l'installation d'une plus grande puissance photovoltaïque soit justifiée. En effet, les 78,5m² permettent de compenser 94,2% des consommations du bâtiment. Les 2029 kWh d'énergie primaire non couverts par l'installation s'expliquent par le fait que l'intention était de prévoir un nombre de panneaux multiple de 6 afin que chaque logement en ait le même nombre.

Si la consommation totale de cette version zéro énergie de la résidence Arola est de 4,53 kWh/m².an, son homologue PEB devient négatif en raison que l'éclairage n'est pas pris en compte dans son calcul. Le bâtiment obtiendrait ainsi le label de performance A++, c'est-à-dire un bâtiment à énergie positive selon la réglementation wallonne.

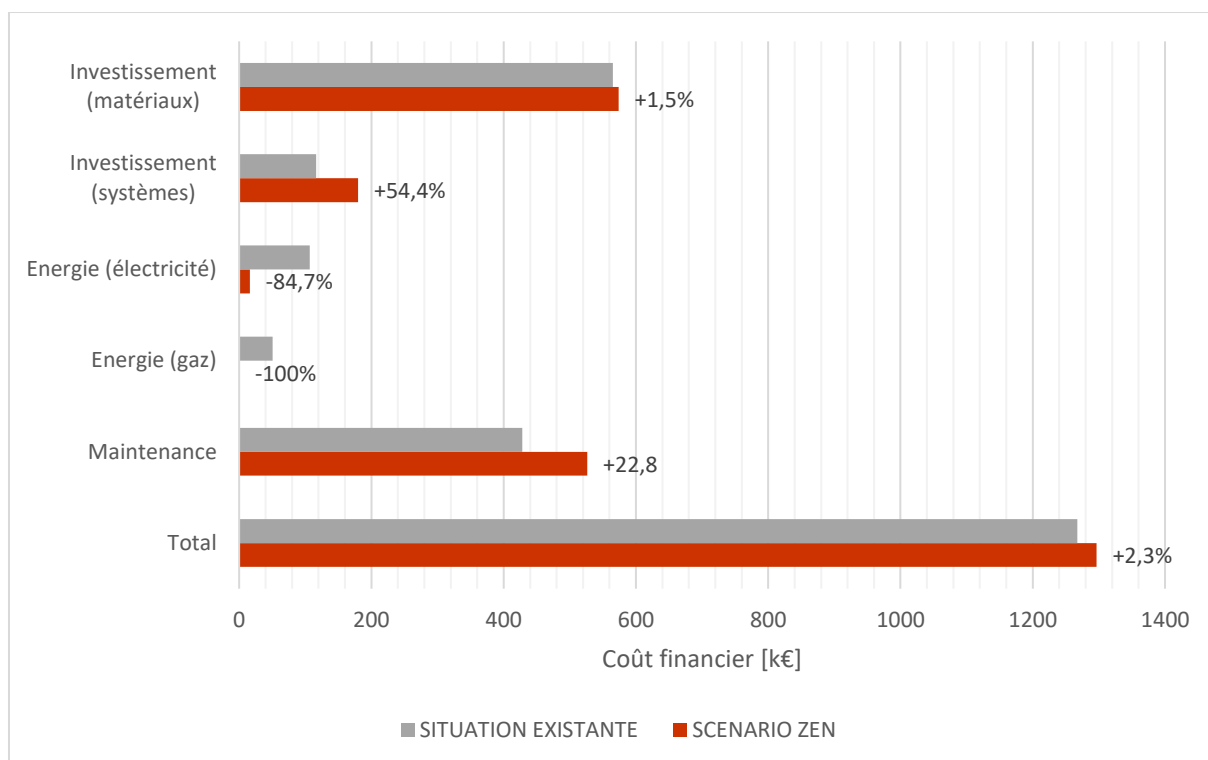


Figure 45: Comparaison des coûts entre la situation existante et le scénario netZEN

Ce scénario présente l'inconvénient d'un surinvestissement initial de 71.981€ (comprenant les PACS, systèmes PV et triple vitrage) qui pourrait effrayer le particulier. Les frais dédiés à la maintenance et au remplacement des systèmes ont également un poids considérable avec une augmentation de 22,8%. Néanmoins, l'absence de charge pour le gaz et un montant annuel moyen de 408€ pour l'électricité permettent de rentabiliser au fur et à mesure les frais initiaux et de compenser les coûts de maintenance.

Finalement, malgré une réduction des consommations jusqu'à un niveau zéro énergie nette, le coût de cycle de vie de cette version du bâtiment ne coûterait que 2,3% de plus que la version de la situation existante, soit un surplus de 28.718€ sur les 40 années. Ce bilan relativement neutre est dû principalement au 78,5m² de panneaux photovoltaïques. Par ailleurs, il serait hypothétiquement possible d'arriver à un bilan tout juste inférieur au coût total du cas initial avec l'ajout de 8 panneaux supplémentaires qui produiraient alors davantage que ce que le bâtiment consomme (hors usage des appareils domestiques).

11. DISCUSSIONS DES RÉSULTATS DU BENCHMARKING ET DE L'ACCV

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser les résultats permettant de répondre aux différentes questions de recherches abordées dans ce mémoire. Il permet également de mettre en lumière la complémentarité entre les résultats issus du benchmarking et de l'analyse des coûts du cycle de vie. Pour rappel, la thématique générale traitant des implications techniques et financières induites par le niveau d'exigence ZEN, avait pour objectif d'être explorée à travers trois questions qui sont rappelées ci-dessous :

- 1) Quelles sont les solutions techniques les plus couramment rencontrées pour atteindre les exigences ZEN ?
- 2) Quel est le prix moyen qu'il faut déboursier pour faire construire selon les exigences ZEN ?
- 3) Les nouvelles exigences énergétiques QZEN sont-elles économiquement favorables pour les particuliers :
 - 3a) Quels sont les paramètres qui améliorent le plus la performance énergétique tout en limitant l'impact sur le budget à court et/ou long terme ?
 - 3b) Quel niveau énergétique est-il possible d'atteindre sans trop impacter les coûts de construction ?

11.1 LES SYSTÈMES DU ZÉRO ÉNERGIE

Tous les résultats obtenus à travers ce mémoire nécessitaient d'être différenciés en fonction de leur niveau de consommation d'énergie primaire. À l'instar du manque de consensus entre les pays européens ou au sein même de la Commission européenne, il est compliqué d'établir un indicateur chiffré permettant de définir si un bâtiment relève du ZEN ou non. Ainsi, il a été préféré dans les résultats de considérer un large éventail de performance afin d'être certain de bien englober le concept.

Concernant les systèmes de chauffage et d'ECS répertoriés dans le benchmarking, deux tendances principales sont observées. D'une part les bâtiments les plus performants (inférieur à 40 kWh/m².an) sont majoritairement représentés par le couplage PAC-PV, tandis que les bâtiments dont la consommation varie entre 40 et 85 kWh/m².an présentent davantage l'association chaudière gaz à condensation-PT. En ce sens, l'étude effectuée sur la résidence Arola a montré que l'implémentation du système PT avec les chaudières à gaz performantes existantes permettaient d'atteindre « seulement » une consommation de 58,22 kWh/m².an, malgré que le bâtiment présente une enveloppe thermique dont les performances sont supérieures à la moyenne des bâtiments de l'échantillon.

Ensuite, le recours à un système photovoltaïque est quasiment systématique pour les bâtiments affichant un bilan inférieur à 40 kWh/m².an. Néanmoins, l'utilisation de collecteurs thermiques est plus récurrente sur l'ensemble de l'échantillon, où 51% de ceux-ci en sont équipés.

Enfin, au-delà des équipements qui permettent une consommation efficace de l'énergie, l'ensemble des bâtiments du benchmarking sont caractérisés par des besoins de chauffage réduits. Ainsi, le coefficient de déperdition médian varie de 0,23 W/m²K pour les bâtiments les plus performants à 0,34 W/m²K pour ceux dont la consommation est supérieure à la barre des 40 kWh/m².an. La valeur de 0,19 calculée pour le scénario netZEN de la résidence Arola s'aligne notamment avec ces résultats.

Le taux de renouvellement d'air des cas d'étude semble plus aléatoire avec la consommation énergétique et affiche une valeur médiane de 0,43 vol/h. Finalement, toutes ces observations sur les systèmes et caractéristiques de l'enveloppe sont synthétisées au tableau 24 :

Consommation EP	< 40 kWh/m².an	[40 ; 85] kWh/m².an	Scénario netZEN Arola
Systèmes	Pompe à chaleur (air-eau)	Chaudière gaz à condensation	Pompe à chaleur (air-eau)
EnR	Photovoltaïque	Panneaux thermiques	Photovoltaïque
U _{moyen} (valeur médiane) [W/m²K]	0,23	0,34	0,19
n (valeur médiane) [vol/h]	0,43		0,25

Tableau 24: Récapitulatif des systèmes et des indicateurs caractéristiques d'une enveloppe

11.2 PRIX DE CONSTRUCTION DU ZEN

Le benchmarking a montré qu'il est compliqué d'établir une corrélation entre les coûts de construction et la consommation en énergie primaire entre différents bâtiments. En effet, esthétique, systèmes constructifs, qualité des matériaux sont une partie des nombreux paramètres qui varient de projet en projet. La comparaison des coûts de construction et de consommation énergétique entre les différents scénarios de la résidence Arola (graphique 46) montre bien en revanche cette tendance finalement « logique » que les coûts augmentent au plus le bâtiment est performant.

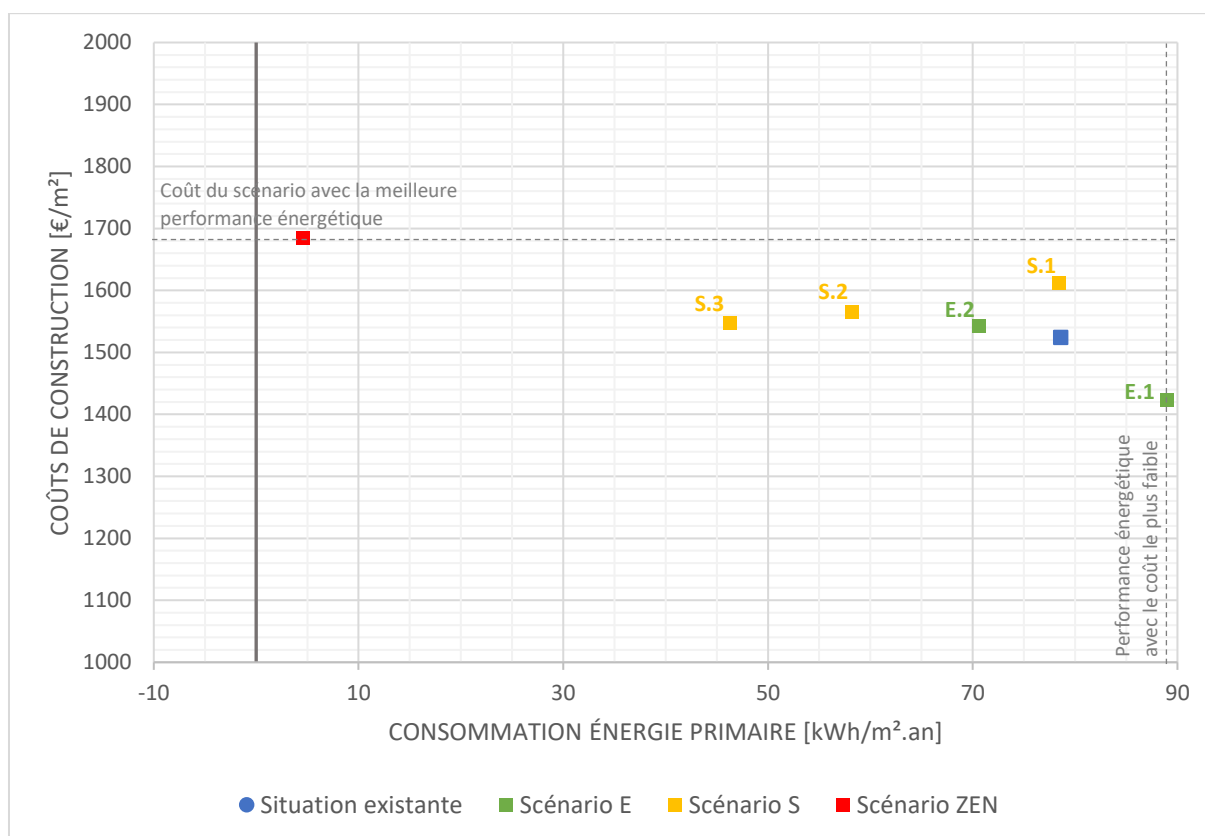


Figure 46: Coûts de construction des scénarios en fonction de la consommation en EP

Ainsi contrairement au benchmarking, le scénario avec la plus faible consommation correspond bien au bâtiment avec le plus faible coût tandis que le scénario netZEN possède le coût de construction le plus grand.

Pour fixer des valeurs, la situation initiale de la résidence Arola est caractérisée par un coût de construction de 1524€/m² tandis que le scénario netZEN atteint 1685€/m². En comparaison avec les cas d'étude du benchmarking, il s'avère que le scénario netZEN de la résidence Arola se positionne plutôt bien par rapport aux autres bâtiments. Sur les 8 logements collectifs répertoriés dans le graphique 47, le scénario netZEN apparaît comme ayant la seconde meilleure performance pour le 5^e coût de construction.

Finalement, le prix de construction médian pour l'ensemble des 19 logements collectifs du benchmarking est de 1631€/m² et de 1666€/m² pour les 16 maisons individuelles. Pour effectuer une comparaison avec des habitations standards qui respectent les normes actuelles, le Ministère de la Transition Ecologique (2020) a déterminé que le prix médian des maisons sur tout le territoire français et dont le permis a été délivré en 2019, était de 1306€ (hors foncier et TVA³⁰). De plus, J.F. Puissant Baeyens (2021), administrateur chez Building Management, affirme que le coût moyen de construction pour un appartement à Bruxelles est d'environ 1300 à 1400€/m² (hors honoraires, foncier et TVA). Ainsi, selon ces chiffres, le prix d'un logement au minimum QZEN, serait de l'ordre de 230 à 360€/m² plus cher qu'une construction standard répondant aux normes actuelles.

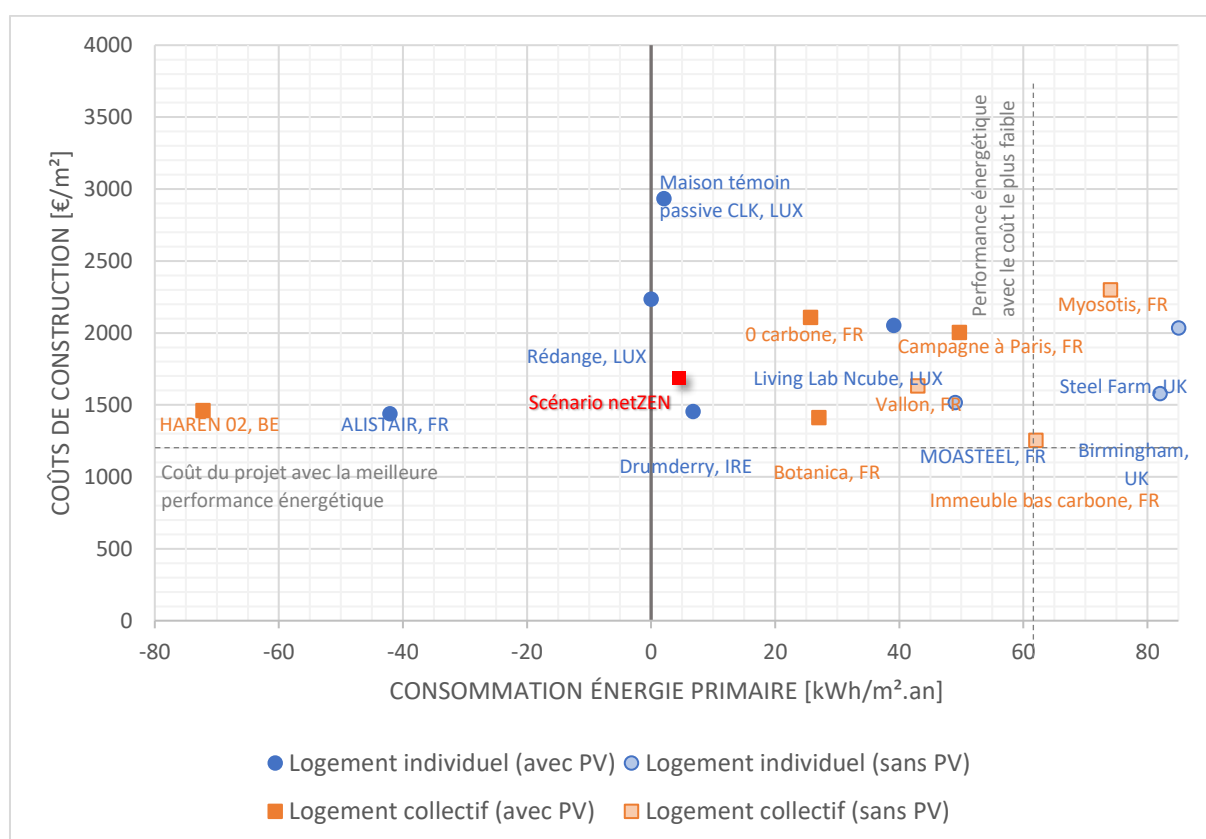


Figure 47: Coûts de construction de bâtiments issus du benchmarking en fonction de la consommation en EP

³⁰ Ce prix concerne les maisons où le maître d'œuvre est le particulier lui-même. Cela revient ainsi à dire que les honoraires sont déduits des coûts de construction comme c'est le cas pour les bâtiments du benchmarking. La superficie utilisée est la SDP (Surface De Plancher) qui de manière analogue à la TFA, est mesurée depuis les faces intérieures des murs.

11.3 LES COÛTS DE LA CONVERSION AU ZEN

Le dernier objectif de ce mémoire était d'examiner les impacts sur le budget engendré par une conversion d'un bâtiment aux exigences zéro énergie. De nouveau, la réponse mérite d'être nuancée en fonction du niveau de performance atteint, mais également en fonction de si l'on considère le budget de l'investissement initial (court terme) le coût sur le cycle de vie (long terme).

11.3.1 Impacts sur l'investissement initial

La figure 48 est réutilisée en ajoutant des droites qui relient chaque point caractéristique des scénarios à la situation existante (excepté le scénario S.1), afin d'examiner les conséquences du ZEN sur le budget à court terme.

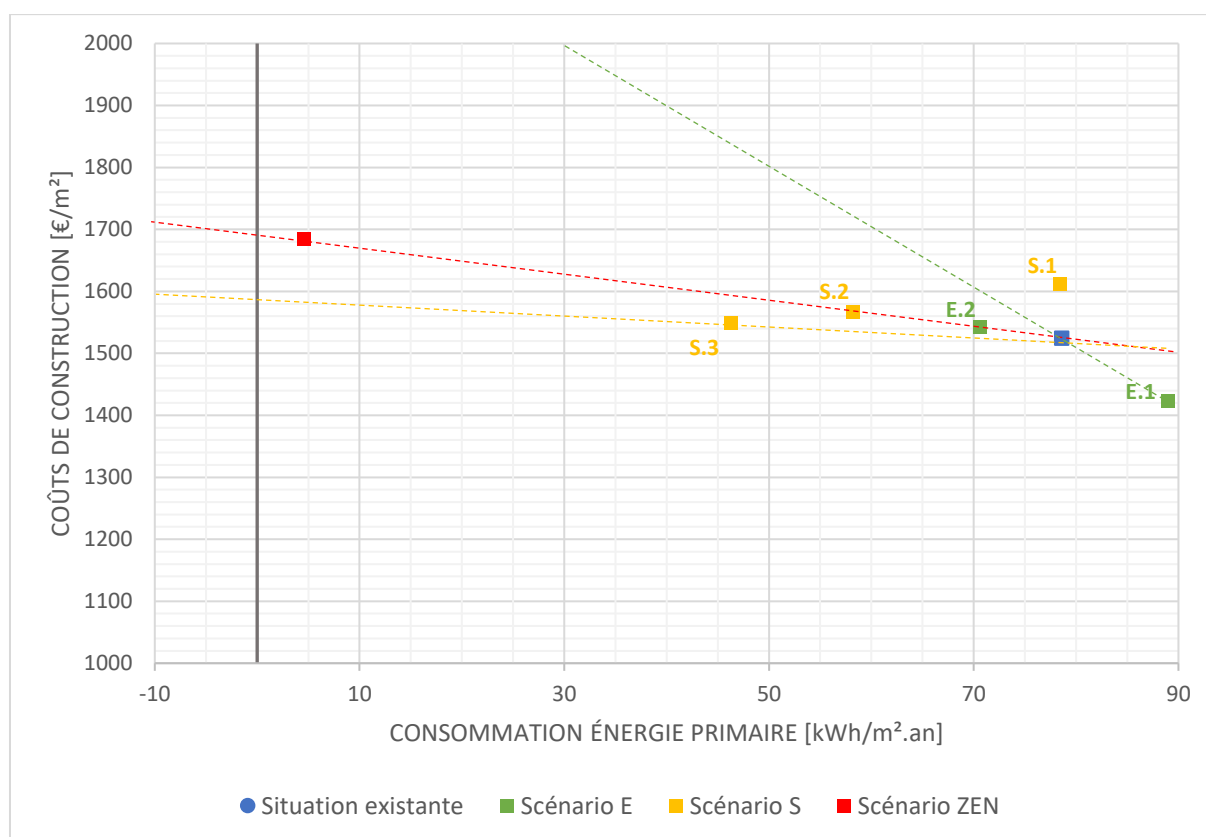


Figure 48: Comparaison des scénarios sur leur rentabilité économique au niveau des coûts de construction

On peut observer que les stratégies mises en œuvre dans les scénarios ne permettent pas de réduire les consommations en énergie primaire avec la même efficacité économique. Par exemple, la droite jaune reliant la situation existante avec le scénario S.3 présente la pente la plus faible des 3 droites dessinées sur le graphique. Cela signifie que ce scénario est caractérisé par la plus faible augmentation du prix d'investissement initial par kilowattheure économisé annuellement. L'installation de panneaux photovoltaïques constitue ainsi une meilleure option économique au niveau des coûts de construction que, par exemple, le renforcement de l'isolation des parois extérieures (droite verte). En effet, dans ce cas-ci, bien que le scénario E.1 ait permis une réduction des besoins, celui-ci entraîne une forte

augmentation du budget initial. Finalement, tous les autres scénarios (à l'exception du scénario E.3) se situent à un niveau intermédiaire de rentabilité économique. En effet, la droite rouge reliant le scénario netZEN au cas initial passe également par les points S.2 et E.2. Cela signifie que les stratégies mises en place dans ces 3 scénarios permettent une réduction par kilowattheure pour un surinvestissement initial environ équivalent.

Finalement, la conversion électrique avec l'installation d'une pompe à chaleur dans la résidence Arola a fait augmenter les coûts de construction de 16,3% sans pour autant amener une réduction de l'énergie primaire consommée. Ce scénario constitue ainsi une mauvaise stratégie si aucune source d'énergie renouvelable n'est couplée à la PAC.

11.3.2 Impact sur le coût de cycle de vie

Le même raisonnement que précédemment est utilisé pour analyser les impacts des différents niveaux de performance atteints par les scénarios sur le coût total de cycle de vie.

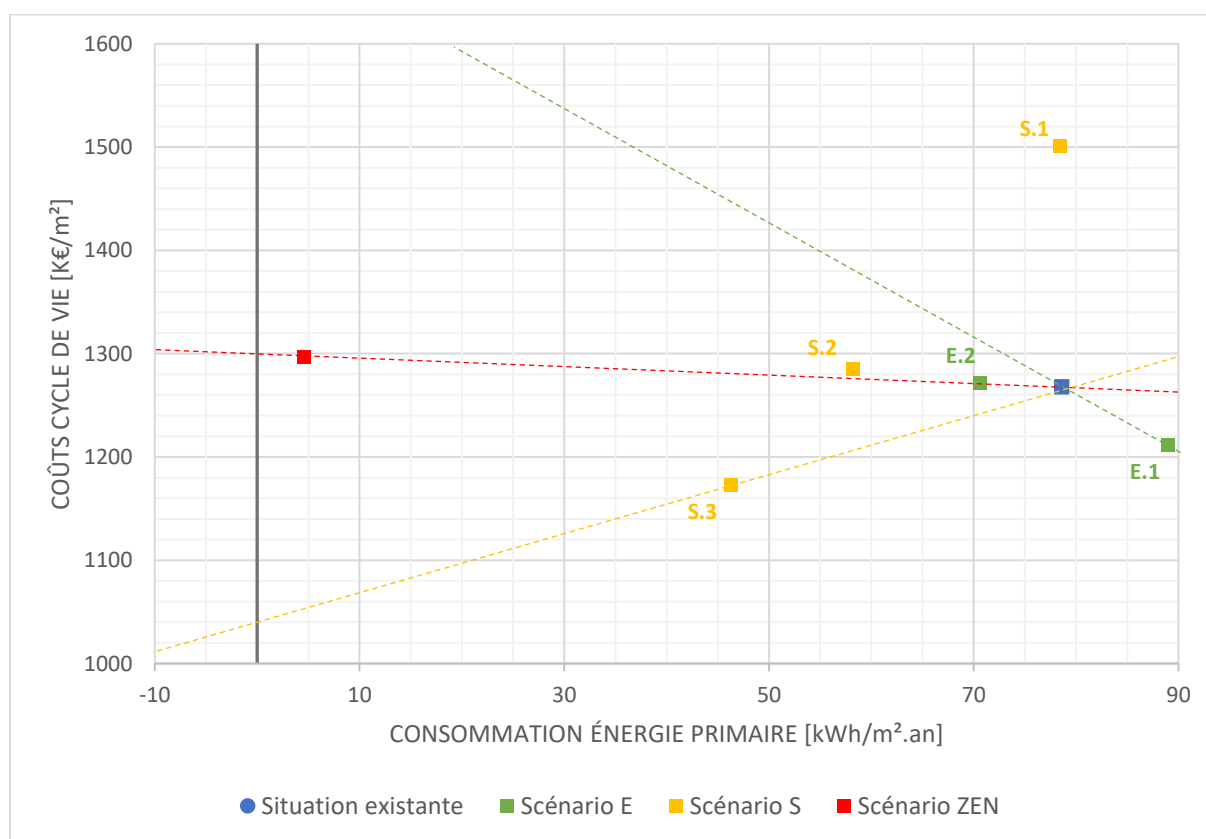


Figure 49: Comparaison des scénarios sur leur rentabilité économique au niveau des coûts de cycle de vie

On constate en premier lieu que contrairement au graphique 43, la droite en jaune est à pente négative. En effet, il a été estimé qu'avec une réduction de 32 kWh/m².an, le scénario S.3 permettait d'atteindre un coût total sur le cycle de vie inférieure de 7,5% par rapport à la situation existante. Ainsi, l'installation de panneaux photovoltaïques est la seule option modélisée qui permet de générer des

gains sur la période étudiée. Il a notamment été estimé que chaque kilowatt-crête installé, soit 4 panneaux, permettait de réaliser un bénéfice brut de 15.800€ sur les 40 années.

Le scénario E.2 qui envisage le remplacement des châssis, ainsi que le scénario S.2 où une installation solaire thermique est prévue s'aligne avec le scénario netZEN. En effet, pour ces trois scénarios, il a été démontré que le coût de cycle de vie restait relativement similaire à celui du cas de base. En effet, la variation pour ces 3 scénarios est contenue entre 0,3 et 3%. En revanche, le scénario E.1 implique une dépense financière plus importante pour une économie d'énergie modérée bien qu'il s'agisse d'une stratégie efficace pour faire diminuer les besoins de chauffage (-55%).

Enfin, le scénario S.1 est encore plus défavorable quand il est considéré sur son cycle de vie par rapport à l'unique considération des coûts de construction. En effet, le coût important de l'électricité pénalise énormément ce scénario.

En conclusion, l'usage de collecteurs solaires thermiques ou un renforcement du pouvoir isolant de l'enveloppe permet, pour des coûts de construction modérés et un bilan relativement neutre sur le coût de cycle de vie, de réduire modérément la consommation, soit dans le cas de la résidence Arola, jusqu'à une consommation en énergie primaire de 58,22 kWh/m².an. Il faut tout de même nuancer que l'isolation renforcée de l'enveloppe sera plus coûteuse que le changement des châssis par du triple vitrage, proportionnellement à l'économie d'énergie réalisée. Pour pouvoir atteindre, un niveau ZEN, des coûts d'investissement plus conséquents seront nécessaires, mais n'impacteront que très légèrement le coût total de cycle de vie. Enfin, l'utilisation d'un système photovoltaïque seul est un cas particulier. D'une part, il permet de faire des économies sur le cycle de vie et d'autre part, la réduction de la consommation en énergie primaire peut être modulée en fonction du nombre de panneaux installés. Cette conclusion est traduite de manière chiffrée dans le tableau ci-dessous :

Stratégies résidence Arola	Impact sur le niveau de consommation EP	Impact sur le coût de construction	Impact sur le coût de cycle de vie
Situation existante	78,61 kWh/m ² .an	681.860€	1.267.660€
Isolation PEB 2014	+ 13,2%	-6,57%	-4,4%
Triple vitrage	-10,2%	+1,25%	+0,3%
PAC (seule)	-0,3%	+5,81%	+18,4%
Installation PT	-25,9%	+2,79%	+1,3%
Installation PV	-41,2%	+1,58%	-7,5%
Triple vitrage + PAC + PV	-94,2%	+10,56%	+2,3%

Tableau 25: Evaluation finale des scénarios de la résidence Arola

11.4 LIMITES DE L'ÉTUDE

Tout au long de ce travail, la prise d'hypothèses était majoritairement guidée par la rigueur de la littérature scientifique et de normes nationales ou européennes. Quand aucune donnée n'était disponible via l'un de ces deux canaux, la webographie en lien avec la thématique était consultée et toujours croisée afin de retirer les informations les plus correctes qui soient.

La méthodologie développée pour la sélection des cas d'étude du benchmarking ne relevant pas d'une norme, a été décrite avec détails afin d'assurer sa reproductibilité ou encore son éventuelle remise en question. Le bref sous-chapitre traitant de l'observation des effets couplés des variables identifiées dans le benchmarking a été construit avec une méthodologie beaucoup moins rigoureuse. C'est pourquoi il a bien été précisé que ces résultats se devaient d'être interprétés avec recul et uniquement de manière qualitative.

Globalement, de nombreuses hypothèses misent sur une constante dans le temps des paramètres, alors qu'il s'avère être compliqué de prédire comment ceux-ci risquent d'évoluer. Premièrement, le coût de l'électricité a été modélisé avec une constante inflation de 3,27% faisant passer son prix de 0,286€ en 2019 à 1,035€ en 2059 (en valeur non actualisée). Avec la fermeture de la centrale nucléaire de Tihange et la demande toujours plus importante sur le territoire belge (voitures électriques, PAC, ...), le prix de l'électricité a de fortes chances de continuer d'augmenter dans les prochaines années. Néanmoins, il est impossible de prédire exactement quel sera son coût dans 40 ans. De la même manière, le fichier TMY utilisé pour modéliser les conditions extérieures de la résidence Arola est implémenté sans prise en compte du changement climatique.

Il est également possible de regretter l'absence de calibrage de la consommation de la résidence Arola avec une valeur attestant de ses performances en conditions réelles. Néanmoins, il est jugé bon de rappeler que le but du mémoire n'est pas de déterminer sa consommation, mais de comparer différents scénarios entre eux.

Une autre limitation est l'hypothèse prise par le consortium CRAVEzero sur les coûts de maintenance et de remplacement des matériaux de construction dans l'ACCV. En effet, en faisant une agrégation de ces coûts sous une valeur annuelle de 1,5% de l'investissement initial, cette hypothèse ne prend pas en compte la variabilité de durée de vie des matériaux. En particulier pour des éléments de façade, cette durée de vie ou encore les coûts d'entretien seront très variés en fonction de si l'on considère par exemple un bardage bois ou un mur en brique. Néanmoins, étant donné que les scénarios de l'ACCV n'interviennent que de manière limitée sur les matériaux mis en œuvre, l'effet de cette hypothèse est faible dans le cadre de cette étude.

Enfin, si la non-prise en compte des primes et taxes est justifiée, car jugées trop souvent comme volatiles dans le temps, les redevances annuelles ont en revanche un caractère plus permanent. En ce sens, l'hypothèse du compteur électrique tournant à l'envers est également un paramètre sujet à évoluer dans le temps (Test Achats, 2021). En effet, les installations situées en Flandres et à Bruxelles sont progressivement équipées de compteur double flux qui mesure séparément le prélèvement et l'injection. Dans cette situation, le particulier paye la partie d'électricité réellement prélevée sur le réseau tandis que l'injection se facture à un coût moindre que le prélèvement. La Commission wallonne pour l'Energie (CWaPE) a estimé qu'en pratique 37,76% de l'énergie produite est autoconsommée, tandis que le restant est injecté sur le réseau.

Pour les foyers ne disposant pas de compteur double-flux, un tarif dit de « capacité » s'applique. La redevance est calculée en fonction de la puissance électrique de l'installation photovoltaïque et selon

des tarifs définis par les gestionnaires du réseau. Par exemple, en prenant la moyenne des tarifs validés par la CWaPE pour l'année 2022, le scénario E.3 caractérisé par une installation de 6kWc impliquerait une redevance annuelle de 516€ tandis que celle-ci serait 1032€ pour le scénario netZEN et ses 12kWc.

Enfin, le nombre restreint de scénarios n'a pas permis d'explorer d'autres stratégies de réduction des consommations d'énergies passées en revue dans l'état de l'art. De plus, il aurait également été intéressant de faire varier les paramètres encodés au sein d'un même équipement, le coefficient de performance de la pompe à chaleur par exemple.

12. CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE

Avec l'approbation en 2018 du Plan National intégré Energie Climat Belge 2021-2030 (PNEC), la Wallonie a finalement adopté sa propre réglementation fixant que toute nouvelle construction devra désormais répondre aux critères quasi zéro énergie. Bien que ceux-ci soient actuellement moins ambitieux que les recommandations émises par la Commission européenne, la neutralité carbone visée par l'Europe pour 2050 implique une évolution progressive des normes QZEN vers le netZEN à l'horizon de 2025.

Par ailleurs, le bâtiment zéro énergie reste un concept vague et sans définition reconnue. En effet, la Directive a laissé le soin aux États membres de fixer leurs propres exigences minimales afin que celles-ci soient en accord avec les conditions climatiques de chaque pays. Finalement, le ZEN vise deux objectifs ; « des performances énergétiques très élevées » et une couverture des faibles besoins par l'énergie produite « à partir de sources d'énergie renouvelable sur place ou à proximité ». De nombreuses solutions permettent aujourd'hui de consommer de l'énergie avec un haut rendement tandis que les progrès technologiques et industriels ont généré une forte baisse des coûts des énergies renouvelables, en particulier dans le photovoltaïque. Si la littérature aborde largement l'aspect technique des bâtiments zéro énergie, l'aspect économique sur le cycle de vie n'est à ce jour que très peu exploré. Des outils complets tels que l'ACCV permettent de calculer le coût financier réel d'un bâtiment sur une longue période de temps, mais son application dans le domaine des bâtiments ZEN semble actuellement très restreinte.

Le premier objectif visé dans ce mémoire était de survoler les techniques les plus couramment rencontrées permettant d'atteindre des consommations énergétiques quasi nulles. Le travail s'est ensuite concentré sur la détermination d'un prix de construction moyen nécessaire pour bâtir selon ces nouvelles normes. De manière à observer les corrélations entre les aspects économiques et énergétiques, le troisième but poursuivi était d'examiner si les exigences zéro énergie sont économiquement favorables sur le budget à court et long terme du particulier.

Le travail s'est alors structuré en deux parties. La première consistait à réaliser un benchmarking de bâtiments jugés performants et échantillonnés selon une série de critères qui ont permis d'effectuer une analyse comparative. Tous les cas d'étude ont été tirés de la plateforme collaborative Construction21 qui œuvre à promouvoir la transition écologique dans le domaine de la construction. Un échantillon composé de 35 bâtiments résidentiels a ainsi pu être déterminé. À partir de celui-ci, de nombreux résultats ont pu être extraits concernant les équipements techniques les plus couramment utilisés, ainsi que sur les coûts de construction.

La seconde partie du mémoire avait pour ambition de tirer des liens entre considérations techniques et financières. Un immeuble à appartement situé en région liégeoise a été sélectionné selon les mêmes critères que ceux qui ont permis l'établissement du benchmarking, et ce afin qu'un croisement entre les deux parties du mémoire puisse se faire ultérieurement. Différents scénarios issus de cet immeuble ont été modélisés de manière à réduire progressivement la consommation énergétique afin d'observer les impacts du ZEN sur les coûts de construction, mais également sur les dépenses à long terme.

Les consommations de la situation existante du bâtiment ainsi que les scénarios ont fait l'objet d'une simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel DesignBuilder. La méthodologie de modélisation, notamment l'encodage, a été soigneusement détaillée afin de couvrir l'ensemble des hypothèses qui ont été prises. Ces résultats sur les demandes énergétiques ont ensuite pu être implémentés dans

l'ACCV. Celle-ci a été préalablement complétée par l'encodage de tous les éléments de construction mis en œuvre, ainsi que par une série d'hypothèses économiques. La méthodologie de calcul des coûts sur le cycle de vie s'est basée sur la norme ISO 15686-5:2008, via l'utilisation de l'outil CRAVEzero.

Les découvertes principales du mémoire concernent l'usage privilégié des systèmes de pompe à chaleur couplé à des panneaux photovoltaïques pour les bâtiments dont la consommation en énergie primaire est proche de zéro, voire positive. Les bâtiments qualifiés comme QZEN, sont en revanche majoritairement représentés par le couplage de panneaux solaires thermiques avec une chaudière gaz à condensation. L'utilisation du photovoltaïque est systématique pour atteindre des performances inférieures à 40 kWh/m².an, mais les collecteurs thermiques sont de manière générale plus représentés avec une occurrence de 51% sur l'ensemble du benchmarking. Au sein de l'échantillon étudié, l'enveloppe thermique des bâtiments ZEN est caractérisée par un coefficient de déperdition médian de 0,23 W/m²K et un débit d'étanchéité à l'air de 0,43 vol/h.

Ensuite, l'analyse des coûts de construction a fait apparaître des montants médians de 1631 et 1666€/m² pour respectivement les logements collectifs et maisons individuelles. Le cas d'étude s'est relevé être en phase avec ces coûts. Une valeur de 1685€/m² a été calculée pour le scénario déterminé comme zéro énergie nette. De manière générale, il a été estimé que le prix d'un logement au minimum QZEN, était de l'ordre de 230 à 360€/m² plus cher qu'une construction standard répondant aux normes actuelles.

Enfin, l'ACCV a démontré que l'utilisation de collecteurs solaires thermiques ou qu'un coefficient de déperdition moyen des parois très faible permet un gain énergétique moyen, pour un surinvestissement initial modéré, et un coût de cycle de vie inchangé. Un niveau de performance ZEN implique en revanche un surinvestissement initial conséquent, mais induit également peu d'effet sur le coût de cycle de vie de départ. Enfin, l'installation d'un système photovoltaïque permet à partir d'un investissement faible de réaliser des gains sur le cycle de vie et de réduire l'énergie primaire à un niveau modulé sur base de la puissance installée.

Si l'objectif premier du développement des bâtiments ZEN est de tendre vers une Europe neutre en carbone, cette étude passe à côté des impacts environnementaux issus de la construction même de ces bâtiments. Une analyse du cycle de vie et ses indicateurs environnementaux pourraient accompagner l'ACCV afin de déterminer l'optimum sur ces deux aspects. Une autre perspective intéressante consisterait à étudier les paramètres sensibles de cette étude que sont la durée de cycle de vie ou bien encore l'évolution du prix de l'électricité. Enfin la réduction des pics de demande sur le réseau est une question qui mériterait également d'être examinée, notamment via les technologies de stockage de l'énergie ou avec des stratégies permettant une optimisation de l'énergie autoproduit.

13. BIBLIOGRAPHIE

- &SENS. (2017). *Sart-Tilman - Références - Bureau d'Architectes à Verviers & Evere - &sens architectes by FHW Architectes*. <http://www.etsens.be/fr/references/projet/sart-tilman/eco-quartier>
- ABEX. (2021). *Indice - ABEX*. <https://www.abex.be/fr/indice-abex/>
- Agence Internationale de l'Energie (AIE). (2020a). *Annual Report 2020*.
- Agence Internationale de l'Energie (AIE). (2020b). *Solar PV power generation in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-power-generation-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>
- Allacker, K. (2010). SUSTAINABLE BUILDING THE DEVELOPMENT OF AN EVALUATION METHOD. In *Technology Guide: Principles - Applications - Trends* (Issue September 2010). https://doi.org/10.1007/978-3-540-88546-7_81
- Architecture et Climat UCL. (2018). *Étude de 162 fichiers .PEB « Comprendre l'exigence QZEN et son impact sur la conception des bâtiments »*. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/qzen-seminairepeb-public.pdf?ID=52397>
- Arumägi, E., & Kalamees, T. (2016). Design of the first net-zero energy buildings in Estonia. *Science and Technology for the Built Environment*, 22(7), 1039–1049. <https://doi.org/10.1080/23744731.2016.1206793>
- Baeyens, J.-F. P. (2021). *Nouvelles constructions: coûts, conseils et techniques*. <https://www.logic-immo.be/fr/blog/autre/nouvelles-constructions-couts-conseils-et-techniques-2870>
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., & Blum, P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1256–1267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>
- Belmonte, J. F., Eguía, P., Molina, A. E., Almendros-Ibáñez, J. A., & Salgado, R. (2016). A simplified method for modeling the thermal performance of storage tanks containing PCMs. *Applied Thermal Engineering*, 95, 394–410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.111>
- Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., Salamone, F., Scamoni, F., & Scrosati, C. (2019). A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, 25(April), 100772. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100772>
- Belussi, L., Mariotto, M., Meroni, I., Zevi, C., & Svaldi, S. D. (2015). LCA study and testing of a photovoltaic ceramic tile prototype. *Renewable Energy*, 74, 263–270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.053>
- Brard, M. (2015). *Construction21 - Case Studies - Maison BEPOS en bois ALISTAIR*. <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/maison-bepos-en-bois-alistair.html>
- Buildings Performance Institute Europe (BPiE). (2021). *Nearly Zero: A review of EU member state implementation of new build requirements*. https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2021/06/Nearly-zero_EU-Member-State-Review-062021_Final.pdf.pdf

- Carpio, M., Zamorano, M., & Costa, M. (2013). Impact of using biomass boilers on the energy rating and CO2 emissions of Iberian Peninsula residential buildings. *Energy and Buildings*, 66, 732–744. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.079>
- Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). (2013). CSTC-Contact n° 39 (3-2013). *CSTC-Contact*, 3, 1–24.
- Climat.be. (2021). *Les émissions de gaz à effet de serre en Belgique*. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre>
- Commission européenne. (2016). Recommandation (UE) 2016/1218. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 46–57.
- Commission européenne. (2020). *Évaluation en 2020 des progrès accomplis par les États membres dans la mise en œuvre de la directive 2012/27/UE*.
- Confédération Construction Wallone (CCW). (2014). *Les bâtiments à haute performance énergétique sont impayables pour les citoyens*.
- Congedo, P. M., Baglivo, C., Zacà, I., & D'Agostino, D. (2015). High performance solutions and data for nZEBs offices located in warm climates. *Data in Brief*, 5(2015), 502–505. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.09.041>
- Construction21 Belgique. (2013). *A propos de Construction21*. <https://www.construction21.org/belgique/static/a-propos-de-construction21.html>
- Cravezero. (2018). *Cost Reduction and market Acceleration for Viable nearly zero-Energy buildings - About the project*. <https://cravezero.eu/2020/07/31/about-the-project/>
- CRAVEzero. (2020). *Cost reduction and market acceleration for viable nearly zero-energy buildings*. 741223.
- CSTB. (2012). *Méthode de calcul Th-BCE 2012*.
- EN 15459-1:2018. (2018). *Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings - Part 1: Calculation procedured, Module M1 - 14*.
- EnergiePlus. (2007a). *Chaudières à condensation [Chauffage]*. https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-a-eau-chaude/chaudieres-a-condensation/#Evacuation_des_condensats
- EnergiePlus. (2007b). *Confort thermique : généralité*. <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>
- EnergiePlus. (2007c). *Évaluer l'efficacité énergétique de la production d'eau chaude sanitaire*. <https://energieplus-lesite.be/evaluer/climatisation5/evaluer-l-efficacite-de-la-production-frigorifique/>
- EnergiePlus. (2007d). *Évaluer l'étanchéité à l'air*. <https://energieplus-lesite.be/evaluer/etancheite-a-l-air3/evaluer-l-etancheite-a-l-air/>
- EnergiePlus. (2007e). *Inertie thermique*. <https://energieplus-lesite.be/techniques/cuisine-collective6/materiel-de-cuisson55/bruleur-sequentiel/>
- EnergiePlus. (2007f). *Principes de base de la ventilation*. <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygienique/principes-de-base-de-la-ventilation/>
- EnergiePlus. (2018). *NetZEB : bâtiments Nets Zéro-Énergie*. <https://energieplus-lesite.be/theories/bilan-thermique44/nzeb-batiments-nets-zero-energie/>

- Engie. (2020). *Pourquoi les prix de l'énergie sont-ils en baisse ?*
<https://www.engie.be/fr/blog/autres/baisse-prix-energie-covid-impact-facture/>
- EUR-Lex. (2021). *Summaries of EU Legislation : La performance énergétique des bâtiments*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=uriserv%3Aen0021>
- European Energy Efficiency Platform (E3P). (2021). *Typical Meteorological Year (TMY)*.
<https://e3p.jrc.ec.europa.eu/articles/typical-meteorological-year-tmy>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... Zaehle, S. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Ge, T. S., Wang, R. Z., Xu, Z. Y., Pan, Q. W., Du, S., Chen, X. M., Ma, T., Wu, X. N., Sun, X. L., & Chen, J. F. (2018). Solar heating and cooling: Present and future development. *Renewable Energy*, 126, 1126–1140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.081>
- Global Carbon Atlas. (2021). *Country CO2 Emissions*. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- Global Monitoring Laboratory (GML). (2021). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*.
<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Hermelink, A., Schimschar, S., Boermans, T., Pagliano, L., Zangheri, P., Armani, R., Voss, K., & Musall, E. (2013). Towards nearly zero- energy buildings: Definition of common principles under the EPBD. *Ecofys for the European Union*, 467.
- Islam, H., Jollands, M., & Setunge, S. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 129–140.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006>
- ISO 15686-5:2017. (2017). *Bâtiments et biens immobiliers construits — Prévision de la durée de vie — Partie 5: Approche en coût global*.
- Kolokotsa, D., Rovas, D., Kosmatopoulos, E., & Kalaitzakis, K. (2011). A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings. *Solar Energy*, 85(12), 3067–3084.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.09.001>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lake, A., Rezaie, B., & Beyerlein, S. (2017). Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 417–425.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.061>
- Lepercq, T. (2021). *Méga vagues, scénario pour un monde post-carbone* (Dunod).
- Lheureux, C. (2015). *Construction21 - Case Studies - HAREN 02*.
<https://www.construction21.org/belgique/case-studies/h/haren-02.html>
- Malmedy, C. (2020). *Analyse des impacts environnementaux et calcul du coût environnemental d'un immeuble à appartements sur l'ensemble de son cycle de vie pour atteindre les objectifs quasi zéro énergie et net zéro énergie*.
- Ministère de la Transition écologique. (2020). *Le prix des terrains à bâtir en 2019*.
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/le-prix-des-terrains-batir-en-2019-0>

- Moga, L., & Bucur, A. (2018). Nano insulation materials for application in nZEB. *Procedia Manufacturing*, 22, 309–316. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.047>
- Narukawa, Y., Narita, J., Sakamoto, T., Deguchi, K., Yamada, T., & Mukai, T. (2006). Ultra-High Efficiency White Light Emitting Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(No. 41), L1084–L1086. <https://doi.org/10.1143/jjap.45.l1084>
- NBN D 50-001:1991. (1991). *Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation*.
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2021). *Taux d'intérêt*. <https://data.oecd.org/fr/interest/taux-d-interet-a-long-terme.htm>
- Parlement européen et du Conseil. (2010). Directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments (refonte). *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 13–35.
- Parlement européen et du Conseil. (2018). DIRECTIVE (UE) 2018/844 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 30 mai 2018 modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique. *Journal Officiel de l'Union Européenne*, 75–91. <https://eur-lex.europa.eu/homepage.html>
- Passivhaus Institute. (2015). Passive House requirements. In *Passiv.De*. http://www.passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm
- Plan National Energie-Climat (PNEC). (2019). *Plan national énergie-climat 2021-2030*.
- Rachoutis, E., & Koubogiannis, D. (2016). Energy Payback Time of a Rooftop Photovoltaic System in Greece. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012092>
- Rhee, K.-N., & Kim, K.-W. (2015). A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment. *Building and Environment*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.040>
- Ristimäki, M., Säynäjoki, A., Heinonen, J., & Junnila, S. (2013). Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. *Energy*, 63(2013), 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.030>
- Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340–6351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.032>
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Madala, S. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.014>
- Sarbu, I., & Dorca, A. (2019). Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. *International Journal of Energy Research*, 43, 29–64. <https://doi.org/10.1002/er.4196>
- Sellier, A. (2020). *Les serveurs informatiques chauffent l'eau*. <https://www.construction21.org/france/articles/h/les-serveurs-informatiques-chauffent-l-eau.html>
- sénova. (2012). *SHOB et SHON c'est fini ! Tout sur la nouvelle surface de plancher*. <http://construction.senova.fr/conseils-techniques/shob-et-shon-cest-fini-tout-sur-la-nouvelle-surface-de-plancher/>

- Service public de Wallonie (SPW). (2017). *L'éclairage efficace des logements*.
- Service public de Wallonie (SPW). (2018). *Guide PEB 2018*.
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings*, 128, 99–110.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.077>
- Song, M., Deng, S., Dang, C., Mao, N., & Wang, Z. (2018). Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting. *Applied Energy*, 211, 1150–1170.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.022>
- Souayfane, F., Fardoun, F., & Biwolé, P.-H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and Buildings*, 129, 396–431.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.006>
- Sprimoglass. (n.d.). *E-Green*. <https://www.sprimoglass.be/fr/produits/triple-vitrage/e-green>
- STATBEL. (2019). *Budget des ménages*. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/menages/budget-des-menages#figures>
- STATBEL. (2021). *Prix de l'immobilier*. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/prix-de-limmobilier#news>
- SuisseEnergie. (2003). *Catalogue des ponts thermiques*.
- Test Achats. (2021). *Panneaux photovoltaïques : La rentabilité au rendez-vous si... 665 Juillet/Août 2021*, 32–35.
- Union Professionnelle d'architectes (UPA). (2020). *Bordereau des prix unitaires, 60e édition*.
- Wallonie énergie SPW. (2021). *Exigences PEB du 1er janvier 2021 au 10 mars 2021*.
<https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-du-1er-janvier-2017-au-31-decembre-2017.html?IDD=127140&IDC=7224>
- Yong, S.-G., Kim, J.-H., Gim, Y., Kim, J.-H., Cho, J., Hong, H., Baik, Y.-J., & Koo, J. (2017). Impacts of building envelope design factors upon energy loads and their optimization in US standard climate zones using experimental design. *Energy and Buildings*, 141.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.032>

14. ANNEXES

Annexe 1.1 à 1.4 :

- Collecte des données des logements zéro énergie pour le benchmarking

Annexe 2.1 à 2.8 :

- Coupes et façades de la résidence Arola (documents fournis par Damien Franzen)

Annexe 3 :

- Durée de vie et coût de maintenance des équipements HVAC selon la norme EN 15459:2018

Annexe 4 :

- Résultats chiffrés de la simulation thermique dynamique et de l'ACCV : situation existante et scénarios

Annexe 5 (fichier Excel joint) :

- ACCV de la situation existante

PAYS, PROVINCE/DEPARTEMENT	TYPE DE LOGEMENT	NOM DU PROJET	NIVEAU DE FIABILITÉ				SURFACE UTILE [m²]	ANNEE DE CONSTRUCTION	METHODE DE CALCUL
			2	3a	3b	3c			
Angleterre, Canterbury	Individuel	Steel Farm	x		x	x	84	2013	?
Angleterre, Birmingham	Individuel	Old Holloway straw passivhaus	x	x	x	x	95	2016	?
Belgique, Bruxelles	Collectif < 50m	HAREN 02	x	x	x	x	3377	2011	RT 2005
Belgique, Bruxelles	Collectif < 50m	Projet "Perle"	x		x		1950	2017	?
Belgique, Hainaut	Collectif < 50m	Cité du Centenaire	x	x			939	2016	RT 2012
France, Marne	Individuel	Maison MOASTEEL	x	x		x	145	2016	RT 2012
France, Oise	Individuel	Maison BEPOS en bois ALISTAIR	x	x	x	x	80	2014	RT 2012
France, Essonne	Collectif < 50m	Immeuble collectif biosourcé bas carbone	x	x		x	2180	2020	RT 2012
France, Seine-et-Marne	Collectif < 50m	Opération Zéro Carbone sur logements semi-collectifs	x	x		x	3693	2019	RT 2012
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Botanica - La Chapelle sur Erdre	x	x	x	x	3450	2017	RT 2012
France, Indre-et-Loire	Collectif < 50m	Résidence Myosotis	x			x	952	2018	RT 2012
France, Paris	Collectif < 50m	Logement collectif « la campagne à Paris »	x	x	x	x	649	2016	RT 2005
France, Charente-Maritime	Collectif < 50m	Logements sociaux du Vallon	x	x	x	x	1427	2013	RT 2005
France, Seine-et-Marne	Individuel	Les Lodges - bâtiment démonstrateur	x	x			136	2015	RT 2012
France, Puy-de-Dôme	Individuel	Petite maison contemporaine écologique de niveau passif	x				112	2013	?
France, Bas-Rhin	Individuel	Maison HQE BBC-Effinergie à Gertwiller (67)	x	x			157	2011	RT 2005
France, Pas-de-Calais	Individuel	Maison HQE BBC-Effinergie à Fresnes	x	x			178	2011	RT 2005
France, Maine-et-Loire	Individuel	Maison Saint-Gobain Multi-confort	x	x			167	2011	RT 2012
France, Moselle	Individuel	Maison NF démarche HQE BBC-effinergie à Saint Avold	x	x			118	2011	RT 2005

Tableau 26: Benchmarking logements ZEN - Cas d'étude 1 à 19 (partie1). Données issues de « Case Studies » par Construction21.

Annexe 1.1

NOM DU PROJET	PV?	PT ?	SYSTÈME DE CHAUFFAGE	SYSTÈME ECS	NIVEAU D'ISOLATION Umoyen [W/m²K]	ETANCHEITE AIR n50	CONSO EP SANS PROD. PV [kWh/m²]	CONSO EP AVEC PROD. PV [kWh/m²]	COÛT CONSTRUCTION [€/m²]
Steel Farm		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	?	0,32	85	85	2035
Old Holloway straw passivhaus			CH BOIS/PEL	PAC	0,13	0,4	82	82	1579
HAREN 02	x		PAC, VAV	PAC	0,15	0,4	27,25	-72,25	1460
Projet "Perle"		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	?	0,6	13	13	1179
Cité du Centenaire			CH GAZ C	CH GAZ C	0,26	?	60	60	1628
Maison MOASTEEL			CH BOIS/PEL	PAC	0,35	?	49	49	1517
Maison BEPOS en bois ALISTAIR	x		CH BOIS/PEL	PAC	0,11	0,25	43,8	-42,1	1438
Immeuble collectif biosourcé bas carbone			R ELEC	PAC	0,2	?	62	62	1253
Opération Zéro Carbone sur logements semi-collectifs	x		CH GAZ C, PAC	CH GAZ C, PAC	0,25	?	58,9	25,7	2109
Botanica - La Chapelle sur Erdre	x		CH GAZ C	CH GAZ C, COGEN	0,23	0,7	35,2	27	1411
Résidence Myosotis			CH BOIS/PEL	CH BOIS/PEL	?	?	74	74	2299
Logement collectif « la campagne à Paris »	x	x	CH GAZ	CH GAZ, PT	0,4	0,65	61,16	49,66	2003
Logements sociaux du Vallon		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	0,37	0,46	42,98	42,98	1631
Les Lodges - bâtiment démonstrateur		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	0,16	?	46	46	2200
Petite maison contemporaine écologique de niveau passif			CH BOIS/PEL	CH EAU ELEC	?	?	18	18	1469
Maison HQE BBC-Effinergie à Gertwiller (67)		x	PAC	PAC, PT	0,42	?	63,8	63,8	1752
Maison HQE BBC-Effinergie à Fresnes		x	PAC	PAC, PT	0,41	?	60	60	1333
Maison Saint-Gobain Multi-confort	x	x	GS, PUIT CAN	PT	0,3	?	39	8,9	1557
Maison NF démarche HQE BBC- effinergie à Saint Avoild		x	CH GAZ	CH GAZ, PT	0,34	?	64,9	64,9	1441

Tableau 27: : Benchmarking ZEN - Cas d'étude 1 à 19 (partie2). Données issues de « Case Studies » par Construction21.

Annexe 1.2

PAYS, PROVINCE/DEPARTEMENT	TYPE DE LOGEMENT	NOM DU PROJET	NIVEAU DE FIABILITÉ				SURFACE UTILE [m²]	ANNEE DE CONSTRUCTION	METHODE DE CALCUL
			2	3a	3b	3c			
France, Indre-et-Loire	Individuel	Longère HQE BBC-Effinergie à Rochecorbon	x	x			134	2011	RT 2012
France, Paris	Collectif < 50m	37, rue Myrha	x	x			570	2013	RT 2005
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Osmoz / 44 logements certifiés 'passiv'haus'	x	x			3106	2015	RT 2012
France, Seine-Saint-Denis	Collectif < 50m	Bois Debout	x	x	x		1323	2015	RT 2012
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Be Positive	x	x	x		2554	2014	RT 2012
France, Paris	Collectif < 50m	12 rue de l'Ermitage - 75020 - Elogie-Siemp	x	x			565	2014	RT 2005
France, Loire-Atlantique	Collectif < 50m	Le Grand Carcouët	x				3276	2013	RT 2005
France, Vosges	Collectif < 50m	Résidence passive bois/paille Jules Ferry	x				2707	2013	RT 2012
France, Paris	Collectif < 50m	Immeuble bioclimatique de logements sociaux à Paris	x	x			1785	2012	RT 2005
France, Haut-Rhin	Collectif < 50m	Quartier Markstein à Wittenheim	x	x			2649	2011	RT 2005
Irlande, Bunclody	Individuel	Passive House Drumderry	x		x	x	227	2016	?
Irlande, Dublin	Individuel	House at Carrickmines	x	x	x		198	2018	?
Luxembourg	Individuel	Living Lab Ncube	x	x	x	x	121	2014	?
Luxembourg	Individuel	Maison Témoin passive CLK	x	x	x	x	179	2016	RGD 2007
Luxembourg	Individuel	Maison auto suffisante en énergie à Rédange	x	x	x	x	237	2015	RGD 2007
Luxembourg	Collectif < 50m	Wooden apartment building in Steinfort	x				1034	2017	RGD 2007

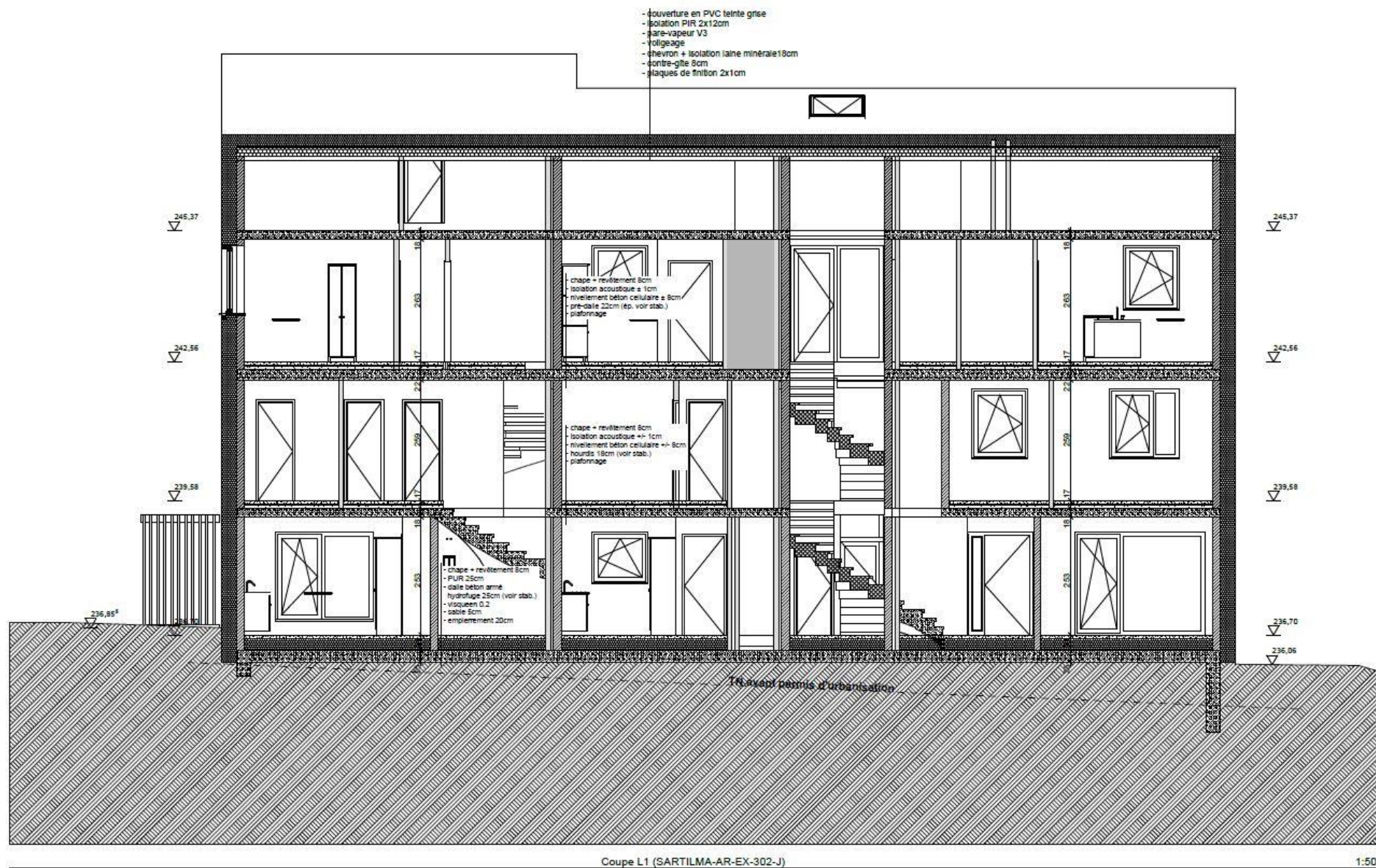
Tableau 28: Benchmarking ZEN - Cas d'étude 20 à 35 (partie1). Données issues de « Case Studies » par Construction21.

Annexe 1.3

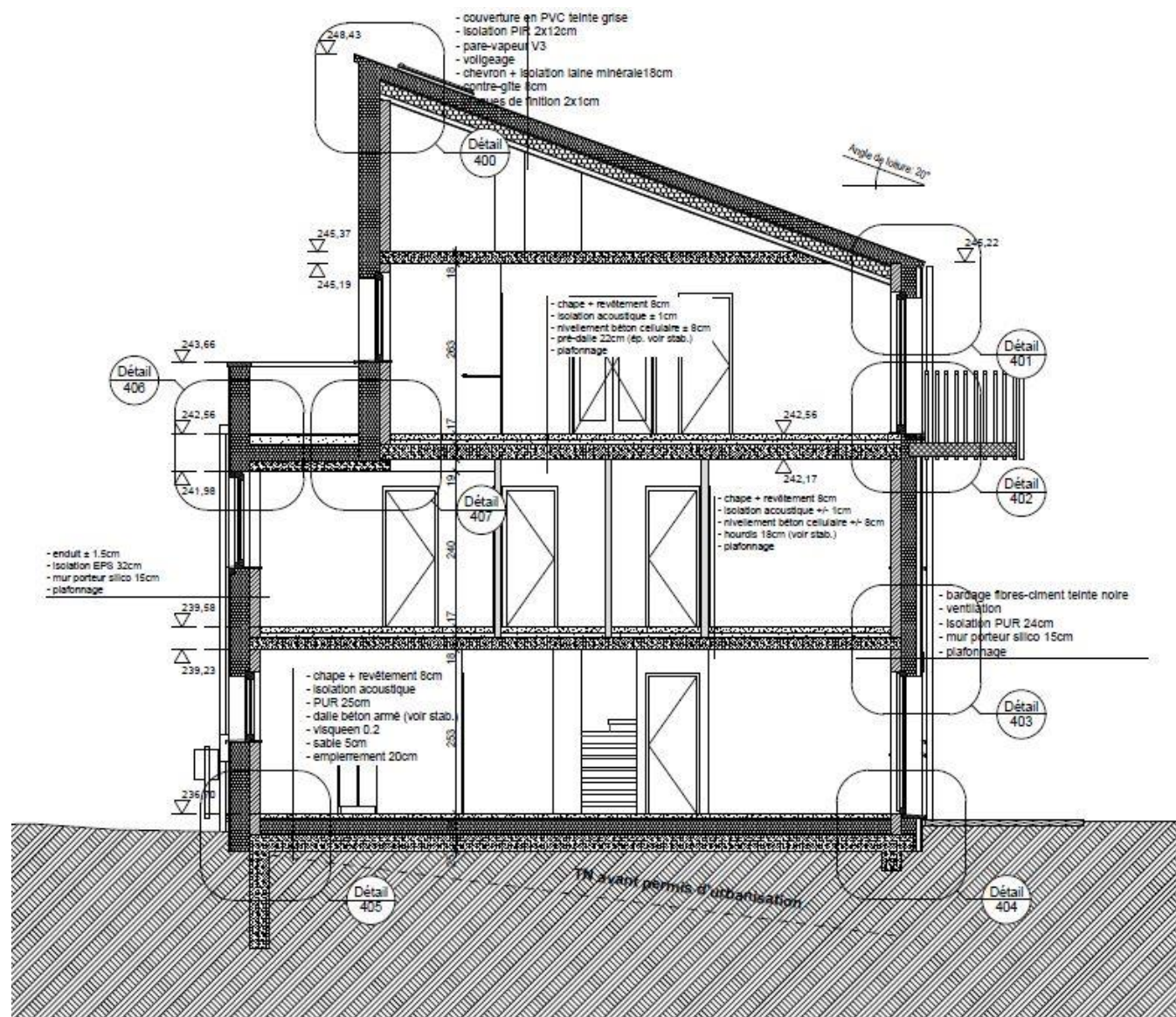
NOM DU PROJET	PV?	PT ?	SYSTÈME DE CHAUFFAGE	SYSTÈME ECS	NIVEAU D'ISOLATION U _{moyen} [W/m²K]	ETANCHEITE AIR n50	CONSO EP SANS PROD. PV [kWh/m²]	CONSO EP AVEC PROD. PV [kWh/m²]	COÛT CONSTRUCTION [€/m²]
Longère HQE BBC-Effinergie à Rochecorbon		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	0,33	?	45,4	45,4	2007
37, rue Myrha		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	0,46	?	49	49	2763
Osmoz / 44 logements certifiés 'passiv'haus'		x	R ELEC	PAC, PT	0,4	?	45	45	1397
Bois Debout			CH GAZ C	CH GAZ C	0,28	0,3	49	49	1504
Be Positive	x		R ELEC	PAC	0,36	0,52	46,89	-16,61	1277
12 rue de l'Ermitage - 75020 - Elogie-Siemp	x	x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	0,31	?	39,29	-4,5	2563
Le Grand Carcouët	x	x	R ELEC	PAC, PT	?	?	33,5	-7,5	2270
Résidence passive bois/paille Jules Ferry		x	PAC GEO	PAC GEO, PT	?	?	37	37	1576
Immeuble bioclimatique de logements sociaux à Paris		x	CH GAZ C	CH GAZ C, PT	0,56	?	49,8	49,8	2101
Quartier Markstein à Wittenheim			CH GAZ C	CH GAZ C	0,55	?	63	63	1754
Passive House Drumderry	x		PAC GEO	PAC GEO	?	0,57	40	6,73	1454
House at Carrickmines			PAC	PAC	0,15	0,34	70,94	70,94	2273
Living Lab Ncube	x		PAC	PAC	0,16	0,49	59,24	39,1	2053
Maison Témoin passive CLK	x	x	PAC	PAC, PT	0,15	0,26	27,8	2,04	2933
Maison auto suffisante en énergie à Rédange	x		PAC GEO	PAC GEO	0,23	0,54	35,1	0	2236
Wooden apartment building in Steinfort		x	PAC	PAC, PT	?	?	35,8	35,8	3160

Tableau 29: Benchmarking ZEN - Cas d'étude 20 à 35 (partie2). Données issues de « Case Studies » par Construction21.

Annexe 1.4

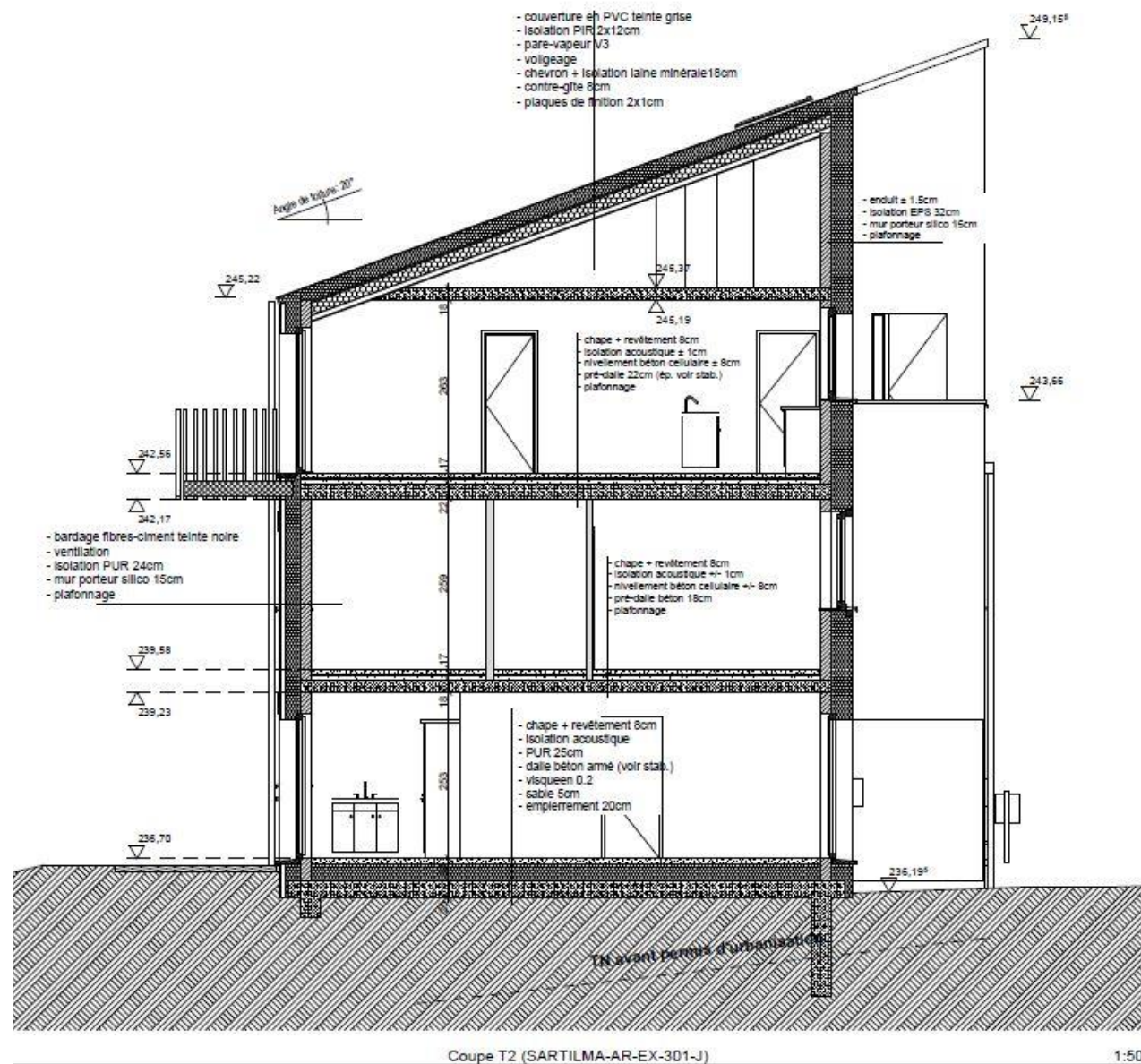


Annexe 2.1 : Coupe L1 (ce document est la propriété de l'architecte Damien Franzen)

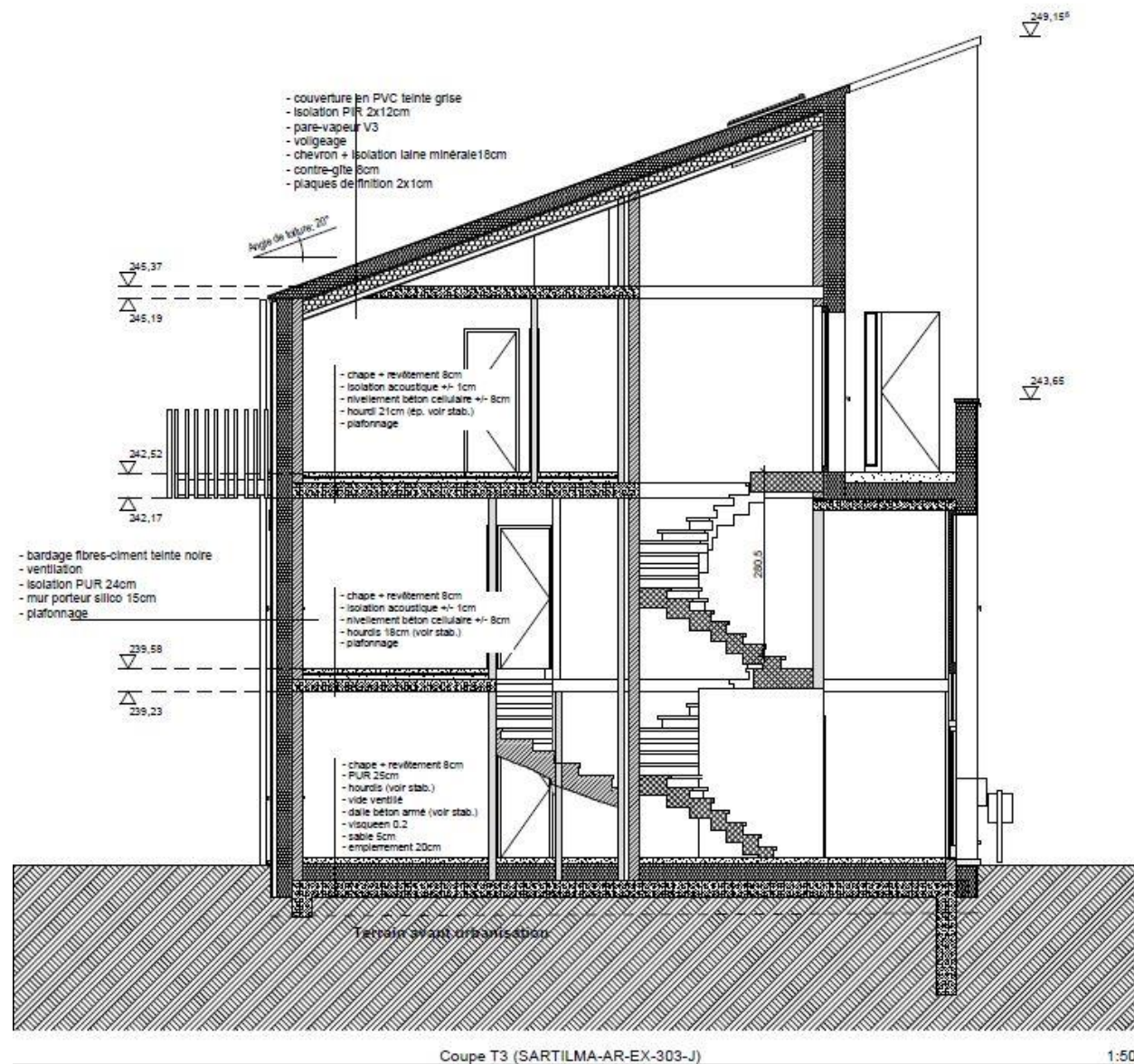


Coupe T1 (SARTILMA-AR-EX-300-J)

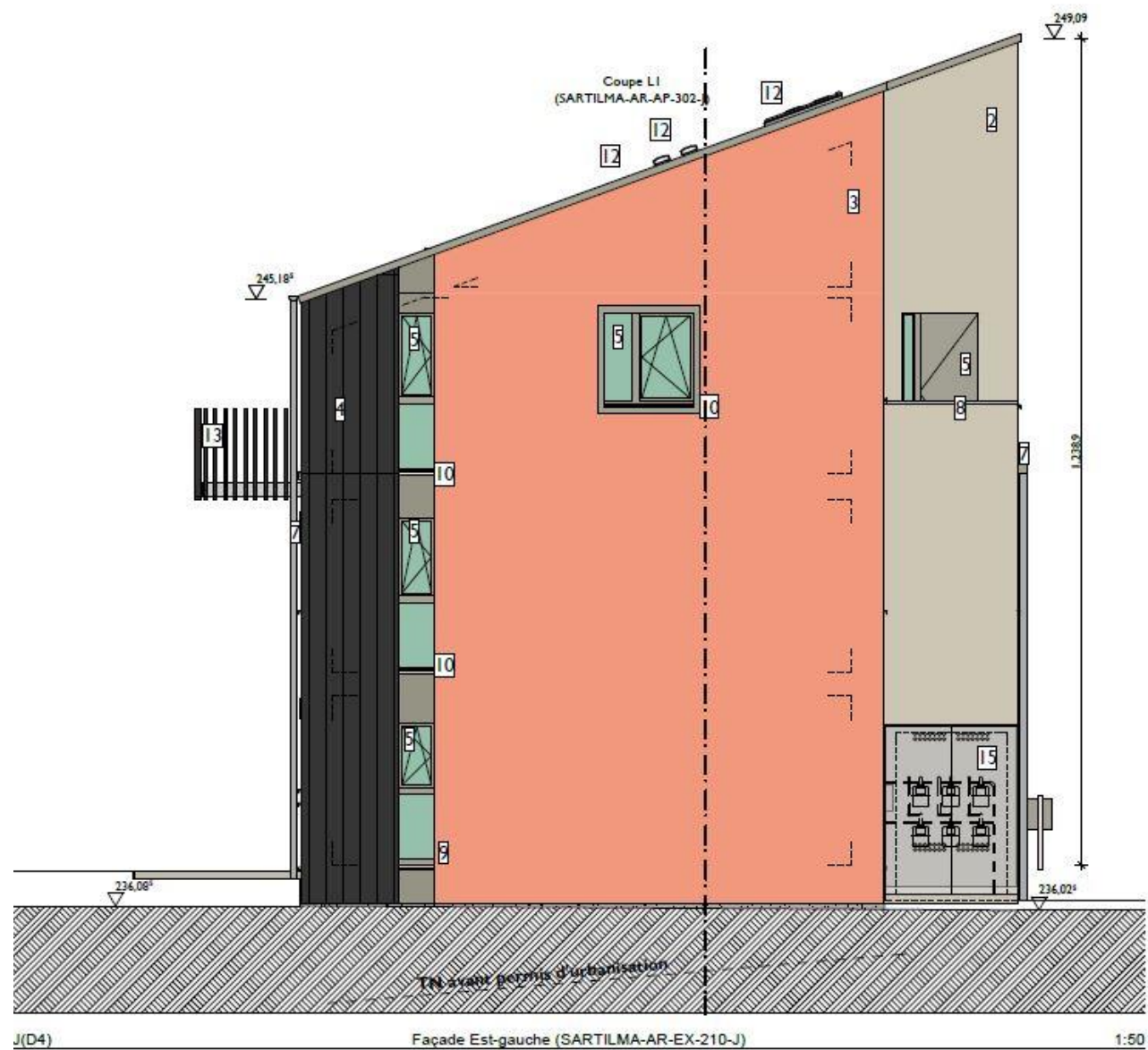
1:50



Annexe 2.3 : Coupe T2 (ce document est la propriété de l'architecte Damien Franzen)



Annexe 2.4 : Coupe T3 (ce document est la propriété de l'architecte Damien Franzen)



Annexe 2.5 : Façade est (ce document est la propriété de l'architecte Damien Franzen)



Annexe 2.6 : Façade nord (ce document est la propriété de l'architecte Damien Franzen)



Annexe 2.8 : Façade sud (ce document est la propriété de l'architecte Damien Franzen)

Component	Lifespan			Annual preventive maintenance including operation, repair and servicing costs in % of the initial investment		
	min	max	average	min	max	average
				0	0	0
Air conditioning units	15	15	15	4%	4%	4,0%
Air coolers	15	20	18	2%	2%	2,0%
Air heaters, electric	15	20	18	2%	2%	2,0%
Air heaters, steam	15	20	18	2%	2%	2,0%
Air heaters, water	15	20	18	2%	4%	3,0%
Boiler condensing	20	20	20	1%	2%	1,5%
Boiler- direct evacuation	20	20	20	1%	2%	1,5%
Boiler - Flue evacuation	20	20	20	1%	2%	1,5%
Burners, oil and gas	10	10	10	4%	6%	5,0%
Chimney	15	20	18			
Condensers	20	20	20	2%	2%	2,0%
Control equipment	15	20	18	2%	4%	3,0%
Control system - Central	15	25	20	4%	4%	4,0%
Control system- room control	15	25	20	4%	4%	4,0%
Control valves, automatic	15	15	15	6%	6%	6,0%
Control valves, manual	30	30	30	4%	4%	4,0%
Convectors	20	20	20	1%	1%	1,0%
Cooling compressors	15	15	15	4%	4%	4,0%
Cooling panels and ceilings	30	30	30	2%	2%	2,0%
Dampers	20	20	20	1%	1%	1,0%
Dampers with control motors	15	15	15	4%	4%	4,0%
Diffusers	20	20	20	4%	4%	4,0%
Dual duct boxes	15	15	15	4%	4%	4,0%
Duct system for filtered air	30	30	30	2%	2%	2,0%
Duct system for non filtered air	30	30	30	6%	6%	6,0%
Electric board	30	30	30	0,5%	1%	0,8%
Electric heater - thermal storage heater	20	25	23	1%	1%	1,0%
Electric heating - convector	20	25	23	1%	1%	1,0%
Electric floor heating	25	50	38	2%	2%	2,0%
Electric wiring	25	50	38	0,5%	1%	0,8%
Water floor heating	50	50	50	2%	2%	2,0%
Evaporators	15	20	18	2%	2%	2,0%
Expansion vessels - membrane	15	15	15	0,5%	0,5%	0,5%
Expansion vessels with pad	15	25	20	2%	2%	2,0%
Expansion vessels, stainless	30	30	30	1%	1%	1,0%
Expansion vessels, steel	15	15	15	2%	2%	2,0%
Extract air grills	20	20	20	10%	10%	10,0%
Fan coil units	15	15	15	4%	4%	4,0%
Fans	15	20	18	4%	4%	4,0%
Fans with variable flow	15	15	15	6%	6%	6,0%
Filter frames	15	15	15	2%	2%	2,0%

Annexe 3

Filter material to be exchanged	1	1	1	0%	0%	0,0%
Filter material, to be cleaned	10	10	10	10%	10%	10,0%
Fire dampers, easy accessible	15	15	15	8%	8%	8,0%
Fire dampers, hidden	15	15	15	15%	15%	15,0%
Fuel tank	30	30	30	0,5%	0,5%	0,5%
Gas tank	30	30	30	0,5%	0,5%	0,5%
Grills in general	30	30	30	4%	4%	4,0%
Heat pumps	15	20	18	2%	4%	3,0%
Heat recovery units, cyclic	15	15	15	4%	4%	4,0%
Heat recovery units, static	20	20	20	4%	4%	2,0%
Humidifiers, steam	4	10	7	4%	4%	4,0%
Humidifiers, water	10	10	10	6%	6%	6,0%
Meters	10	10	10	1%	1%	1,0%
Valve	10	10	10	1%	1%	1,0%
Motors, diesel	10	10	10	4%	4%	4,0%
Motors, electric	20	20	20	1%	1%	1,0%
Pipes, Cu	30	30	30	1%	1%	1,0%
Pipes, composite or (look at Water floor heating)	50	50	50	1%	1%	1,0%
Pipes, stainless	30	30	30	1%	1%	1,0%
Pipes, steel in closed system	30	30	30	1%	1%	1,0%
Pipes, steel in open system	15	15	15	1%	1%	1,0%
Piping systems	30	30	30	0,5%	0,5%	0,5%
Pumps-circulation	10	20	15	2%	2%	2,0%
Pumps - regulated	10	15	13	1,5%	2%	1,8%
Radiators paint	20	30	25	0%	0%	0,0%
Radiators, water	30	40	35	1%	2%	1,5%
Shut off valves, automatic	15	15	15	4%	4%	4,0%
Shut off valves, manual	30	30	30	2%	2%	2,0%
Solar collector (Vacuum collector or plate collector)	15	25	20	0,5%	0,5%	0,5%
Sound traps	30	30	30	1%	1%	1,0%
Tank storage for DHW	20	20	20	1%	1%	1,0%
Tank storage with internal heat exchanger for DHW	20	20	20	1%	1%	1,0%
Thermostats for radiators	15	15	15	4%	4%	4,0%
Valve with auxiliary power	10	10	10	1%	1%	1,0%
Valve-Thermostatic	20	20	20	1,5%	1,5%	1,5%
Variable flow units	15	15	15	6%	6%	6,0%
V-belt drive	10	10	10	6%	6%	6,0%
Wiring	30	30	30	1%	1%	1,0%

Tableau 30: Durée de vie et coût de maintenance des équipements HVAC
Données issues de la norme EN 15459:2018

		Situation existante	Scénario E.1	Scénario E.2	Scénario S.1	Scénario S.2	Scénario S.3	Scénario netZEN
Superficie	Ach [m²]	607,13						
	TFA [m²]	447,5						
Consommation énergie primaire	Chauffage [kWh/m².an]	17,68	27,44	10,13	18,74	17,68	17,68	11,19
	ECS [kWh/m².an]	31,27	31,27	31,27	23,33	10,92	31,27	23,33
	Eclairage + auxiliaires [kWh/m².an]	29,67	30,27	29,23	36,30	29,63	29,67	34,73
	Production PV [kWh/m².an]	0	0	0	0	0	32,36	64,72
	Total [kWh/m².an]	78,61	88,98	70,63	78,37	58,22	46,25	4,53
	E _{spec} PEB	52,82	60,46	46,94	52,64	37,79	28,97	-1,78
Coûts du cycle de vie	Investissement matériaux [€]	565348	520532	573891	565348	565348	565348	573891
	Investissement système [€]	116512	116512	116512	156130	135514	127312	179950
	Electricité [€]	106625	108781	105008	281538	106445	-9643	16305
	Gaz [€]	50807	60936	42971	0	29686	50807	0
	Maintenance [€]	428368	404894	432843	498258	447646	439023	526232
	Total [€]	1267660	1211655	1271224	1501275	1284639	1172846	1296378

Tableau 31: Résultats de la simulation thermique dynamique et de l'ACCV : situation existante et scénarios