

Mémoire

Auteur : Menendez-Alvarez, Liza

Promoteur(s) : Andre, Philippe; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23790>

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.

ULiège – Faculté des Sciences – Département des Sciences et Gestion de l’Environnement

UNI.LU – Faculty of Science, Technology and Medicine

Analyse du cas pratique des blocs D et E de la Caserne Léopold pour l’étude d’un réseau de chaleur à Arlon : aspects de production et de consommation avec amélioration énergétique pour l’année 2022 et les horizons 2050 et 2100

Liza Menendez-Alvarez

Mémoire présenté en vue de l’obtention des diplômes de
Master en sciences et gestion de l’environnement, à finalité spécialisée (ULiège)
Master en développement durable – Filière Energie-Environnement (UNI.LU)

Année académique 2024-2025

Rédigé sous la direction d’Elisabeth Davin, Franck Scholzen et Philippe André

Comité de lecture :
Philippe André
Frank Scholzen
Elisabeth Davin

Copyright

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

*L'autorité académique est représentée par le(s) (co-)promoteur(s), membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : MENENDEZ-ALVAREZ Liza
[liza.menendez.alvarez@gmail.com].

Remerciements

Dans un premier temps, je tiens à remercier la Haute Ecole Libre de Bruxelles Ilya Prigogine qui m'a offert une chance de pouvoir reprendre des études supérieures. A travers mon bachelier, j'ai compris l'importance de la multidisciplinarité autour des questions environnementales et cette expérience m'a permis d'entreprendre un diplôme de Master. Pensées particulières à Pierre d'Ans et Alain Soquet pour leur soutien et sans qui je n'aurais probablement jamais pu arriver jusqu'ici; du fond du cœur, merci.

Pour les encouragements sans faille, les longues heures de discussions sur le mémoire, le réconfort apporté, je remercie mes amies, mon compagnon et plus particulièrement ma sœur qui a été d'une aide immense pour un sujet si inconnu à ses yeux. Je remercie également mes parents qui m'ont permis de continuer mes études.

Je tiens à remercier également mes camarades, le corps administratif et le corps enseignant des Master en Sciences et gestion de l'environnement de l'Université de Liège ainsi qu'en Développement durable de l'Université du Luxembourg. Les deux années passées au Campus d'Arlon ainsi qu'au Kirchberg ont été riches en apprentissage et en découvertes, tant humaines que scientifiques.

Pour ces deux années de Master, je tiens à chaleureusement remercier Gratien Kiki pour ses encouragements perpétuels, sa bonne humeur et sa passion pour le chocolat ; Pauline Abrahams pour tous les conseils et les Twix, marshmallow et Dinosaurus proposés ; ainsi que le Professeur Philippe André pour sa pertinence et toute la rigueur scientifique qu'il nous a apporté.

Mes remerciements également à la commune d'Arlon, la Province du Luxembourg, RESOLIA et IDELUX et Jonas Lambert, sans qui ce projet n'aurait pas vu le jour.

Je tiens à remercier également Frank Scholzen pour ses conseils avisés lors de la rédaction et tout particulièrement Elisabeth Davin, promotrice principale de ce mémoire, pour sa dévotion, les nombreuses heures de visioconférence, les conseils, les discussions et tout le temps qu'elle a consacré à ce travail de recherche. Sans son soutien, sa disponibilité et la qualité de son encadrement et de ses retours, ce mémoire n'aurait pas été ce qu'il est.

A toutes et tous, ce mémoire est pour vous ; merci.

Résumé

Dans le cadre des ambitions mondiales de transition énergétique, ce mémoire s'intéresse aux réseaux de chaleur en Wallonie, en articulant une réflexion théorique et une étude de cas pratique. Dans un premier temps, il présente les principes de fonctionnement d'un réseau thermique, les sources de production de chaleur ainsi que le cadre légal qui régit les réseaux. Une attention particulière est portée sur les différentes sources de production de chaleur, qu'elles soient d'origine fatale ou renouvelable qu'il est possible de mettre en place en Wallonie, étudiées sous l'angle des potentiels et des contraintes. La seconde partie du travail adopte une approche pratique à travers l'analyse du projet Réseau de chaleur de la ville d'Arlon, réalisé en collaboration, entre autres, avec l'Université de Liège. L'étude se concentre sur la consommation énergétique d'un bloc spécifique de la Caserne Léopold, sur base des données pour l'année de référence 2022. Plusieurs pistes d'améliorations énergétiques y sont explorées : le renforcement de l'isolation, la régulation des consignes de températures ainsi qu'une combinaison de ces deux mesures. Les résultats obtenus permettent d'évaluer la réduction du besoin en chaud du cas pratique et d'identifier les leviers les plus pertinents pour réduire la consommation d'énergie à destination du chauffage. En outre, l'évaluation du comportement du cas pratique et de ces mesures est étudiée dans le cadre de projections climatiques futures aux horizons 2050 et 2100, afin d'anticiper les performances et la pertinence des mesures envisagées à plus long terme. Ce mémoire souligne l'importance de l'analyse des performances énergétiques et des pistes envisagées pour la rénovation d'un bâtiment en vue d'un raccordement à un réseau urbain et met en évidence la nécessité d'adapter ces mesures afin de permettre une source de production renouvelable pour la mise en place d'un réseau de chaleur.

Abstract

Within the framework of global ambitions regarding the energy transition, this master thesis focuses on district heating networks in Wallonia, combining a theoretical reflection and a practical case study. The first part presents the principles of operation of a thermal network, the sources of heat production, as well as the Belgian legal framework governing such systems. A particular attention is given to the various sources of heat generation, whether waste heat or renewable, that can be implemented in Wallonia, examined in terms of their potential and their constraints. The second part of the thesis adopts a practical approach through the analysis of Arlon's District heating project, carried out in collaboration, among others, with Université de Liège. The study focuses on the energy consumption of two specific blocks of the Caserne Léopold, based on data from the reference year 2022. Several energy improvement strategies are explored such as the strengthening of envelope insulation, the regulation of temperatures setpoints and a combination of these two measures. The results obtained make it possible to assess the reduction in heat demand for the case study and to identify the most relevant levers to decrease energy consumption for heating purposes. In addition, the performance of the case study and the behaviour of these measures are assessed within the framework of future climate projections for 2050 and 2100, in order to anticipate their effectiveness and relevance for the future. This thesis underlines the importance of analysing energy performance and potential renovation strategies with a view to connecting buildings to an urban heating network. It also highlights the necessity of adapting these measures to enable the integration of renewable energy sources for the development of district heating.

Table des matières

Table des matières.....	6
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	12
Tableau des abréviations.....	14
Tableau des unités.....	15
CHAPITRE I : Introduction.....	16
1. Un regard sur les ambitions environnementales.....	16
2. Problématique.....	18
3. Approche méthodologique.....	19
3.1. Méthodologie et objectifs.....	19
3.2. Hypothèses de départ.....	20
CHAPITRE II : Réseau de chaleur.....	22
1. Définition et principes fondamentaux.....	22
1.1. Concept d'un réseau de chaleur.....	22
1.2. Structure d'un réseau de chaleur.....	23
2. Aspects de production : sources potentielles de chaleur.....	26
2.1. Sources d'origine fossile.....	26
2.2. Sources de récupération de chaleur fatale.....	26
2.3. Sources renouvelables.....	28
3. Cadre légal concernant les réseaux de chaleur.....	44
Règlementations européennes.....	44
3.1.....	44
3.2. Règlementations en Wallonie.....	45
3.3. Subsides.....	47
CHAPITRE III : Présentation du réseau de chaleur à Arlon.....	48
1. Mise en contexte du projet Réseau de chaleur à Arlon : étude de préféabilité réalisée par IDELUX.....	48
1.1. Périmètre du projet.....	48

1.2.	Contraintes potentielles à l'implantation du réseau de chaleur	50
1.3.	Analyses thermiques	51
1.4.	Sources de production de chaleur envisagées	52
2.	Etude de cas : les blocs D et E de la Caserne Léopold	53
2.1.	La Caserne Léopold.....	53
2.2.	Usage et occupation des blocs D et E.....	54
2.3.	Typologie de consommation des blocs D et E	55
CHAPITRE IV : Méthodologie des simulations par TRNSYS 18 pour l'année 2022		58
1.	Simulation A : situation initiale des blocs D et E	58
1.1.	SimulationStudio	59
1.2.	TRNBuild	60
1.3.	Corrections et paramétrage dans TRNBuild	65
1.4.	Résultats de la simulation A.....	67
2.	Simulation B : amélioration de l'enveloppe.....	71
2.1.	Méthodologie pour l'isolation.....	71
2.2.	Résultats de la simulation B	74
3.	Simulation C : optimisation des systèmes avec simulation d'un thermostat	76
3.1.	Composante comportementale.....	76
3.2.	Méthodologie pour la simulation d'un thermostat	77
3.3.	Résultats de la simulation C.....	78
4.	Simulation D : combinaison de l'isolation et de la régulation.....	80
4.1.	Méthodologie pour la combinaison	80
4.2.	Résultats de la simulation D	80
CHAPITRE V : Méthodologie des simulations par TRNSYS 18 pour les horizons 2050 et 2100.....		82
1.	Données météorologiques futures.....	82
2.	Projections des simulations pour l'horizon 2050 : SSP 2-4.5	86
2.1.	Simulation A.....	86
2.2.	Simulation B.....	87
2.3.	Simulation C.....	87

2.4.	Simulation D.....	88
3.	Projections des simulations pour l’horizon 2050 : SSP 5-8.5	89
3.1.	Simulation A.....	89
3.2.	Simulation B.....	89
3.3.	Simulation C.....	90
3.4.	Simulation D.....	91
4.	Projections des simulations pour l’horizon 2100 : SSP 2-4.5	92
4.1.	Simulation A.....	92
4.2.	Simulation B.....	92
4.3.	Simulation C.....	93
4.4.	Simulation D.....	94
5.	Projections des simulations pour l’horizon 2100 : SSP 5-8.5	95
5.1.	Simulation A.....	95
5.2.	Simulation B.....	95
5.3.	Simulation C.....	96
5.4.	Simulation D.....	96
CHAPITRE VI : Discussion des résultats de consommation théorique d’énergie pour les simulations A, B, C et D à l’année 2022 ainsi qu’aux horizons 2050 et 2100		
1.	Observation de la simulation initiale comparée aux pistes d’amélioration énergétique proposées pour l’année 2022.....	97
1.1.	Comparaison des résultats	97
1.2.	Discussion des résultats.....	99
1.3.	Discussion générale sur les pistes d’amélioration énergétique	103
2.	Observation de chaque simulation en fonction des trajectoires climatiques étudiées	104
2.1.	Comparaison des résultats	104
2.2.	Discussion des résultats.....	108
2.3.	Discussion générale autour des projections climatiques	117
CHAPITRE VII : Discussion sur la mise en place d’un réseau de chaleur à Arlon.....		
1.	Aspects de production : sources renouvelables potentielles pour Arlon	119
1.1.	Géothermie peu profonde en systèmes ouverts ou fermés.....	119

1.2.	Solaire thermique	121
1.3.	Biomasse plaquette	122
1.4.	Discussion générale autour des sources de production renouvelables	124
2.	Aspects de consommation : évolution des résultats pour l'année 2022 avec amélioration énergétique et perspectives d'avenir du réseau	125
2.1.	Réduction du besoin de production	126
2.2.	Extension du réseau de chaleur.....	127
3.	Prévisions climatiques : réflexion sur la surchauffe et perspectives de mise en place d'un réseau de froid	128
3.1.	Contexte de surchauffe.....	128
3.2.	Méthodologie de calcul de la surchauffe.....	129
3.3.	Résultats pour la zone thermique test : Maison des Jeunes	130
3.4.	Discussion des résultats et des perspectives.....	130
CHAPITRE VIII : Conclusions.....		136
1.	Limites méthodologiques.....	136
1.1.	Données et ressources utilisées dans le cadre du mémoire	136
1.2.	Modélisation trois dimensions par l'outil SketchUp	136
1.3.	Modélisation des blocs D et E dans l'interface TRNBuild	137
1.4.	Utilisation de l'outil TRNSYS 18.....	138
2.	Conclusion finale	139
Bibliographie.....		142
Annexes		152

Liste des figures

FIG. 1 SCHÉMA D'UN RÉSEAU DE CHALEUR. SOURCE : VALBIOM (2018).	23
FIG. 2 CONSTITUTION D'UN RÉSEAU DE CHALEUR URBAIN. SOURCE : CONSEILS.XPAIR.COM (2025). ..	25
FIG. 3 POTENTIEL EN CHALEUR FATALE PAR SECTEUR INDUSTRIEL [GWH/AN]. SOURCE : PIROTECH (2024).	27
FIG. 4 TYPES D'ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES : PIEUX, SONDÉS ET NAPPES HORIZONTALES. SOURCE : ENERGIE PLUS LE SITE (2019).	30
FIG. 5 CYCLE THERMODYNAMIQUE D'UNE PAC. SOURCE : ADEME, AFIG (2017).	31
FIG. 6 POTENTIEL DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES PEU PROFONDS. SOURCE : GÉOPORTAIL DE LA WALLONIE - WALONMAP (2023).	33
FIG. 7 CARTE GÉNÉRALE DU BASSIN HOUILLER WALLON. SOURCE : REVUE "GÉOLOGIE N°221 - DOSSIER LES EAUX SOUTERRAINES ET LA GÉOTHERMIE" (2021).	36
FIG. 8 PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA BIOMÉTHANISATION. SOURCE : FERME DU FAASCHT (S.D.).	40
FIG. 9 AQUATHERMIE DES EAUX DE SURFACE. SOURCE : IDELUX (2024).	41
FIG. 10 CHAUFFAGE AÉROTHERMIQUE. SOURCE : SOFATH / CLAUDE FAUGEIROL SUR IDÉESMAISONS.COM (S.D.).	43
FIG. 11 VUE GÉNÉRALE DU PROJET AVEC BÂTIMENTS PRESSENTIS POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR À ARLON. SOURCE : IDELUX (2024), MODIFIÉE PAR L'AUTEURE (2025).	49
FIG. 12 TRACÉ POTENTIEL DU RÉSEAU DE CHALEUR À ARLON. SOURCE : ÉTUDE DE PRÉFAISABILITÉ IDELUX (2024).	50
FIG. 13 CONSOMMATION THÉORIQUE DES SITES PRESSENTIS POUR LE RÉSEAU DE CHALEUR À ARLON. SOURCE : ÉTUDE DE PRÉFAISABILITÉ IDELUX (2024).	52
FIG. 14 BLOCS DE LA CASERNE LÉOPOLD À ARLON. SOURCE : AUTEURE (2025).	54
FIG. 15 COURBE DE CHARGE DU COMPTEUR GAZ POUR LES BLOCS D ET E [KWH/MOIS] POUR L'ANNÉE 2022. SOURCE : IDELUX (2024).	56
FIG. 16 COURBE DE CHARGE POUR LE COMPTEUR ÉLECTRIQUE DES BLOCS D, E ET B [KWH/MOIS] POUR L'ANNÉE 2022. SOURCE : IDELUX (2024).	57
FIG. 17 SUR SKETCHUP : BLOCS D (À GAUCHE) ET E (À DROITE) DE LA CASERNE LÉOPOLD AVEC BÂTIMENTS AUTOURS (EN MAUVE) MODÉLISÉS POUR OMBRAGE. SOURCE : JONAS LAMBERT ET ELISABETH DAVIN (2025).	58
FIG. 18 INTERFACE SUR SIMULATIONSTUDIO DE LA SIMULATION INITIALE POUR LA CASERNE LÉOPOLD. SOURCE : AUTEURE (2025).	59
FIG. 19 EXEMPLE D'UN INPUT CRÉÉ DANS TRNBUILD. SOURCE : AUTEURE (2025).	62
FIG. 20 LECTURE DE L'INPUT DANS TRNBUILD. SOURCE : AUTEURE (2025).	62
FIG. 21 CONSIGNE DE TEMPÉRATURE DANS TRNBUILD. SOURCE : AUTEURE (2025).	62
FIG. 22 CONSOMMATION [KWH/AN] EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT LAINE MINÉRALE ET LAINE DE BOIS [CM]. SOURCE : AUTEURE (2025).	72
FIG. 23 COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE DE LA PAROI "MUE EXTÉRIEUR" [W/M ² K] EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE L'ISOLANT [CM]. SOURCE : AUTEURE (2025).	73

FIG. 24 CONSOMMATION ANNUELLE THÉORIQUE DES BLOCS D ET E [KWH/AN] POUR L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025).	75
FIG. 25 TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES À LA STATION MÉTÉO D'ARLON. SOURCE : BEMS ULIÈGE (2025).	76
FIG. 26 CONSOMMATION THÉORIQUE POUR LA SIMULATION C À L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025).	79
FIG. 27 CONSOMMATION ANNUELLE THÉORIQUE POUR LA SIMULATION D [KWH/AN]. SOURCE : AUTEURE (2025).	81
FIG. 28 COMPARAISON DES RÉSULTATS [KWH/AN] POUR CHAQUE AMÉLIORATION ÉNERGÉTIQUE PROPOSÉE POUR L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025).	98
FIG. 29 SIMULATION A : ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION THÉORIQUE D'ÉNERGIE À DESTINATION DU CHAUFFAGE POUR LES SCÉNARII CLIMATIQUES ÉTUDIÉS. SOURCE : AUTEURE (2025).	104
FIG. 30 EVOLUTION DE LA CONSOMMATION THÉORIQUE POUR LES DIFFÉRENTS SCÉNARII POUR LA SIMULATION B.2 AVEC LAINE MINÉRALE. SOURCE : AUTEURE (2025).	105
FIG. 31 EVOLUTION DE LA CONSOMMATION THÉORIQUE À DESTINATION DU CHAUFFAGE POUR LES BLOCS D ET E DE LA CASERNE LÉOPOLD POUR LA SIMULATION C EN FONCTION DES DIFFÉRENTS SCÉNARII ÉTUDIÉS. SOURCE : AUTEURE (2025).	106
FIG. 32 EVOLUTION DE LA CONSOMMATION THÉORIQUE À DESTINATION DU CHAUFFAGE POUR LA SIMULATION D.2 AVEC LAINE MINÉRALE SELON LES SCÉNARII ÉTUDIÉS. SOURCE : AUTEURE (2025).	107
FIG. 33 COMPARAISON DES TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES DE L'ANNÉE DE RÉFÉRENCE 2022 PAR RAPPORT AUX TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES DES SCÉNARII ÉTUDIÉS. SOURCE : AUTEURE (2025) & DOUTRELOUP ET AL. (2022).	109
FIG. 34 COMPARAISONS DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE DES DIFFÉRENTS SCÉNARII OBSERVÉE PAR RAPPORT À L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025) & DOUTRELOUP ET AL. (2022).	128
FIG. 35 SURCHAUFFE [KH/AN] POUR LA MAISON DES JEUNES DANS CHAQUE SIMULATION ET CHAQUE SCÉNARII CLIMATIQUE ÉTUDIÉ. SOURCE : AUTEURE (2025).	130

Liste des tableaux

TAB. 1 DIFFÉRENTS TYPES D'UTILISATION DE LA GÉOTHERMIE PEU PROFONDE. SOURCE : DÉTERMINATION DU POTENTIEL DE LA GÉOTHERMIE PEU PROFONDE (MOINS DE 500 MÈTRES) POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR ET DE FROID EN WALLONIE, SPWALLONIE (2023).	32
TAB. 2 SÉPARATION DES DIFFÉRENTS BLOCS DE LA CASERNE LÉOPOLD À ARLON. SOURCE : AUTEURE (2025).	53
TAB. 3 SÉPARATION DES LIEUX OCCUPÉS DANS LES BLOCS D ET E DE LA CASERNE LÉOPOLD. SOURCE : AUTEURE (2025).	55
TAB. 4 ZONES THERMIQUES DÉFINIES ET SURFACES. SOURCE : AUTEURE (2025).	60
TAB. 5 GAINS CONVECTIFS ET RADIATIFS POUR UN ADULTE, UN ENFANT ET UN BÉBÉ. SOURCE : FAO (S.D.).	63
TAB. 6 PROPRIÉTÉS DE LA LAINE MINÉRALE ET DE LA LAINE DE BOIS. SOURCE : LIBRAIRIE TRNSYS 18, SPWALLONIE (S.D.).	71
TAB. 7 PROPRIÉTÉS D'UN FREINE VAPEUR TYPE. SOURCE : KNEIP (S.D.).	73
TAB. 8 RÉSULTATS DES SIMULATIONS B.1, B.2 ET B.3 À L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025).	75
TAB. 9 RÉSULTATS DES SIMULATIONS C À L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025).	78
TAB. 10 RÉSULTATS DES SIMULATION D.2 ET D.3 EN 2022 [KWH/AN]. SOURCE : AUTEURE (2025).	80
TAB. 11 DESCRIPTION DES TYPES DE FICHIERS PROPOSÉS PAR DOUTRELOUP ET AL. (2022). SOURCE : AUTEURE, OPEN AI (2025) & DOUTRELOUP ET AL. (2022).	82
TAB. 12 DESCRIPTION DU MODÈLE RÉGIONAL ET DES MODÈLES GLOBAUX UTILISÉS PAR DOUTRELOUP ET AL. (2022). SOURCE : AUTEURE, OPEN AI (2025) & DOUTRELOUP ET AL. (2022).	83
TAB. 13 DESCRIPTION DES SCÉNARII GIEC TRAVAILLÉS PAR DOUTRELOUP ET AL. (2022). SOURCE : AUTEURE (2025), GIEC (2021) & DOUTRELOUP ET AL. (2022).	84
TAB. 14 RÉSULTATS DE LA SIMULATION A POUR LE SSP 2-4.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	86
TAB. 15 RÉSULTATS DE LA SIMULATION B.2 ET B.3 POUR LE SSP 2-4.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	87
TAB. 16 RÉSULTATS DE LA SIMULATION C POUR LE SSP 2-4.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	87
TAB. 17 RÉSULTATS DE LA SIMULATION D.2 ET D.3 POUR LE SSP 2-4.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	88
TAB. 18 RÉSULTATS DE LA SIMULATION A POUR LE SSP 5-8.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	89
TAB. 19 RÉSULTATS DE LA SIMULATION B.2 ET B.3 POUR LE SSP 5-8.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	90
TAB. 20 RÉSULTATS DE LA SIMULATION C POUR LE SSP 5-8.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	90
TAB. 21 RÉSULTATS DE LA SIMULATION D.2 ET D.3 POUR LE SSP 5-8.5 EN 2050. SOURCE : AUTEURE (2025).	91
TAB. 22 RÉSULTATS DE LA SIMULATION A POUR LE SSP 2-4.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	92
TAB. 23 RÉSULTATS DE LA SIMULATION B.2 ET B.3 POUR LE SSP 2-4.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	92
TAB. 24 RÉSULTATS DE LA SIMULATION C POUR LE SSP 2-4.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	93

TAB. 25 RÉSULTATS DE LA SIMULATION D.2 ET D.3 POUR LE SSP 2-4.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	94
TAB. 26 RÉSULTATS DE LA SIMULATION A POUR LE SSP 5-8.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	95
TAB. 27 RÉSULTATS DE LA SIMULATION B.2 ET B.3 POUR LE SSP 5-8.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	95
TAB. 28 RÉSULTATS DE LA SIMULATION C POUR LE SSP 5-8.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	96
TAB. 29 RÉSULTATS DE LA SIMULATION D.2 ET D.3 POUR LE SSP 5-8.5 EN 2100. SOURCE : AUTEURE (2025).	96
TAB. 30 RÉCAPITULATIF DES SIMULATIONS EFFECTUÉES POUR LES AMÉLIORATIONS ÉNERGÉTIQUES. SOURCE : AUTEURE (2025).	97
TAB. 31 POURCENTAGE DE DIMINUTION DE LA CONSOMMATION POUR CHAQUE SIMULATION D'AMÉLIORATION ÉNERGÉTIQUE PAR RAPPORT À LA CONSOMMATION INITIALE DE L'ANNÉE 2022. SOURCE : AUTEURE (2025).	103
TAB. 32 TABLEAU DE L'HEURE À LAQUELLE LE SYSTÈME DE CHAUFFAGE S'ARRÊTE ET REPREND, AVEC LE NOMBRE D'HEURES DE CHAUFFAGE POUR CHAQUE SIMULATION ET DANS TOUTES LES TRAJECTOIRES SOCIO-ÉCONOMIQUES PARTAGÉES OBSERVÉES. SOURCE : AUTEURE (2025).	113

Tableau des abréviations

ULiège	Université de Liège
UNI.LU	Université du Luxembourg
BEMS	Building Energy Monitoring and Simulation
COP21	21 ^e Conférence des Parties
PACE	Plan Air Climat Energie
TRNSYS 18	18 ^e version du logiciel TRaNsient System Simulation
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
SPF	Service Public Fédéral belge
SPW	Service Public de Wallonie
CO ₂	Dioxyde de carbone
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
PAC	Pompe à chaleur
ASBL	Association sans but lucratif
H ₂	Dihydrogène
CH ₃ COOH	Acide acétique
CH ₄	Méthane
ARTE	Association relative à la télévision européenne
RED	Renewable Energy Directive
PEB	Performance Energétique des Bâtiments
UE	Union Européenne
CE	Communauté européenne
EAN	European Article Numbering
txt	Format 'texte' d'un fichier numérique
ONE	Office de la naissance et de l'enfance
CPAS	Centre public d'action sociale
MdJ	Maison des Jeunes
ST	cage d'escalier
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning (Chauffage, ventilation et refroidissement)
rdc	rez de chaussée
ISO	International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)
MIWO	laine minérale
LdB	laine de bois
HWE	Hot Weather Events (Evenements de temps chauds)
TMY	Typical Meteorological Year (année météorologique typique)
XMY	Extreme Meteorological Year (année météorologique extrême)
HI	High Irradiance (éclairage élevé)
HT	High Temperature (température élevée)
LD	Long Duragtion (période longue)
SDW	Similarity with dry years (similitude avec les années sèches)
TT	Temperature threshold (seuil de température)
MAR	modèle atmosphérique régional
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate
BCC	Beijing Climate Center
MPI	Max Planck Institute
ERA	European Reanalysis (ré-analyse européenne des données climatiques du passé)
SSP	Shared Socio-economic Pathways (trajectoires socio-économiques partagées)

S	surface [m ²]
V	volume [m ³]
U	coefficient de transmission thermique d'une paroi [W/m ² K]
H _T	coefficient de déperdition par transmission [W/K]
T _{in}	température intérieure [°C ou K]
T _{out}	température extérieure [°C ou K]
t	durée [s]
Q	quantité d'énergie thermique transférée pendant une certaine durée [J]
Φ	flux de chaleur ou puissance instantannée[W]
n _{sb}	taux de ventilation saisonnier moyen [vol/h]
n ₅₀	taux de renouvellement d'air à 50 Pa

Tableau des unités

°C	degré Celsius
m	mètre
m ²	mètre carré
m ³	mètre cube
h	heure
s	Seconde
kW	kilowatt
kWh	kilowattheure
W	watt
mbar	millibar
Pa	Pascal
vol	volume d'air
kJ	kilojoule
J	Joule
kg	kilogramme
K	Kelvin
cm	centimètre
km	kilomètre

CHAPITRE I : Introduction

1. Un regard sur les ambitions environnementales

La Conférence des Parties, organisée à Paris pour sa vingt-et-unième édition, a marqué un tournant dans les luttes concernant les questions relatives à l'environnement et au climat. Cet Accord constitue le premier engagement international avec pour objectif de « *limiter le réchauffement planétaire et de faire face à ses effets* » (Conseil de l'Union européenne, 2025).

L'objectif est clair : maintenir le réchauffement à un maximum de 2°C, avec pour but premier de le fixer à moins d'1.5°C d'ici à 2100. Pour atteindre cet objectif, les Etats membres et signataires de la COP21 s'engagent à mettre en œuvre des plans stratégiques et à poser des mesures et règlements afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour arriver à décarboner l'économie européenne d'ici 2050. Le premier pilier à atteindre est de réduire de 55% les émissions de gaz à effet de serre pour 2030, avec comme base de référence les niveaux de 1990 (Habran, 2023).

Au niveau européen, le paquet « Fit for 55 » qui vise cet objectif, comprends des mesures relatives à la décarbonation de l'économie, au transport et à la mobilité, des mesures relatives aux bâtiments existants et à la rénovation énergétique du bâti mais aussi à des objectifs réduits de consommation des nouvelles constructions, ainsi que des mesures pour le secteur agro-alimentaire. Le tout visant une transition écologique et économique juste ainsi qu'un renforcement de l'innovation et de la compétitivité, afin de faire de l'Union Européenne un exemple en matière de résilience face au changement climatique (Conseil de l'Union européenne, 2025).

En Belgique, ces objectifs sont traduits dans le Plan National Energie et Climat pour l'horizon 2021-2030. Les principaux points d'attention ciblent la décarbonation du système économique belge, notamment à travers l'industrie ; l'implémentation d'énergies renouvelables ; des travaux sur les infrastructures de transport d'énergie ; le tout avec comme encre l'efficacité énergétique, la sécurité énergétique et d'approvisionnement, ainsi que des dimensions relatives à la recherche, l'innovation et la compétitivité notamment au sein du marché (Gouvernement fédéral belge, 2023).

En région wallonne, c'est le Plan Air-Climat-Energie, communément appelé PACE, qui transpose la manière dont ces objectifs nationaux peuvent être atteints. En mars 2023 est sortie la version finale du PACE 2030 avec les cinq points d'intérêts suivants (Gouvernement wallon, 2023) : «

- *Consommer de manière rationnelle l'énergie et les ressources et accroître l'efficacité énergétique ;*
- *Mettre fin à notre dépendance aux énergies fossiles et déployer massivement les énergies renouvelables ;*

- *Créer un contexte favorable au large développement et au soutien des alternatives durables dans tous les domaines de la société ;*
- *Assurer une transition juste et inclusive ;*
- *Renforcer la participation citoyenne dans les décisions et la mise en œuvre des politiques climatiques. ».*

Les objectifs de la Région wallonne visent à réduire la consommation d'énergie d'origine fossile en privilégiant les sources renouvelables, l'efficacité énergétique ainsi que l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Dans le domaine de la construction et du bâtiment, il semble dès lors nécessaire, pour atteindre ces objectifs, de parvenir à diminuer la consommation d'énergie fossile des bâtiments existants, de prendre conscience des besoins en chaud ou en froid, de comprendre les bénéfices et inconvénients potentiels de l'isolation du bâti, le tout appuyé par des politiques de subsides afin d'encourager la rénovation du bâti existant.

En ce qui concerne les nouvelles constructions, une série de mesures sont également adoptées afin d'atteindre des niveaux davantage proches d'une consommation passive pour les besoins en chaud et en froid. Celles-ci ne seront toutefois pas étudiées dans ce travail.

Quelles sont donc les options que la Wallonie peut prendre afin de rénover son bâti vieillissant ? Comment intégrer les énergies renouvelables dans des constructions existantes ? De quelles façons intégrer les citoyens dans ces démarches ? Comment utiliser les incitants financiers du Gouvernement afin de parvenir à réduire les consommations énergétiques des bâtiments, que ce soit pour le chauffage, l'électricité, l'eau chaude sanitaire ?

Bien que les ambitions environnementales européennes soient claires, il n'est pas inscrit les manières de procéder afin d'y parvenir. Chaque Etat membre est donc libre de ses choix, de ses décisions, de ses méthodes. Dès lors, l'innovation, la recherche et les subsides constituent les clés pour parvenir à cet objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi que la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment.

Au XXI^e siècle, et notamment en Belgique et particulièrement en Wallonie, les réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables apparaissent. Ceux-ci sont inscrits dans les directives européennes et les ambitions énergétiques belges. Comment les réseaux de chaleur peuvent-ils parvenir à réduire la consommation d'énergie d'origine fossile en Wallonie ? Comment le tissu urbain wallon vieillissant pourrait constituer un frein ou un appui pour l'implémentation des énergies renouvelables ? Quelles sont les pistes à explorer ?

2. Problématique

Dans le cadre du Master en Sciences et Gestion de l'environnement à finalité spécialisée Energies renouvelables et bâtiments durables, en co-diplomation avec l'Université du Luxembourg pour le Master en Développement Durable, nous avons effectué un stage de trois mois au sein du laboratoire de recherche sur l'énergétique du bâtiment à Arlon : le BEMS ou Building Energy Monitoring and Simulation, plus particulièrement auprès d' Elisabeth Davin, pour le projet d'implémentation d'un réseau de chaleur au sein de la ville d'Arlon, chef-lieu de la Province du Luxembourg.

Dans le cadre de ce stage, nous avons pu lire l'étude de pré faisabilité, participer à des réunions, parcourir des données de consommations électriques et thermiques récoltées par la commune, participer à des visites de terrains...

En rassemblant toutes ces données, plusieurs interrogations se sont posées au fil du stage, se distinguant finalement sur deux aspects. Le premier aspect concernant l'intégration des énergies renouvelables comme source de production de chaleur pour un réseau thermique urbain ; le deuxième concernant la consommation d'énergie dans un bâti vieillissant et les stratégies pour la réduire par diverses pistes. Ces deux points ont été évoqués tout au long des discussions autour du dimensionnement du projet arlonais, ceci ayant marqué leur pertinence dans l'étude de la mise en place d'un réseau urbain.

Ces deux aspects ont mené à une problématique double visant à étudier de manière théorique les aspects de production d'un réseau de chaleur et de manière pratique, les aspects de consommation à l'aide d'un cas d'étude, les blocs D et E de la Caserne Léopold située dans le centre-ville d'Arlon.

Dans un contexte de transition énergétique, les réseaux de chaleur représentent une solution prometteuse pour atteindre les objectifs environnementaux et décarboner le chauffage des bâtiments. Leur conception et leur dimensionnement nécessite néanmoins une connaissance des besoins thermiques des bâtiments pressentis pour rejoindre le réseau. De plus, il devient important de considérer les besoins actuels mais aussi les besoins futurs, assurant ainsi un dimensionnement optimal tout au long de la durée de vie du réseau de chaleur.

Or, si les consommations issues du chauffage sont généralement connues par les gestionnaires des infrastructures, l'évolution de la consommation dans un cadre d'amélioration des performances énergétiques et la résilience de ces mesures face au changement climatique restent encore inconnues et pourraient ne pas être prises en compte dans la conception d'un réseau thermique.

La problématique de ce mémoire s'intéresse donc à la fois aux moyens de produire de la chaleur de manière renouvelable ainsi qu'à la modélisation de la consommation d'un bâtiment existant en tenant compte à la fois de mesures d'amélioration énergétique et de projections climatiques à long terme ; afin d'alimenter la réflexion sur le dimensionnement et la conception d'un réseau de chaleur durable.

3. Approche méthodologique

3.1. Méthodologie et objectifs

Dans le cadre de ce mémoire, une double approche méthodologique a été adoptée afin d'observer les enjeux liés à la conception d'un réseau de chaleur : d'une part l'étude théorique des aspects de production et d'autre part, une analyse pratique de la consommation, appliquée à une étude de cas pratique avec amélioration énergétique et observation du comportement dans des trajectoires futures.

Dans un premier temps, l'état de l'art, décrit au Chapitre II, constitue une revue théorique présentant la structure et le fonctionnement d'un réseau de chaleur ainsi que les sources de production de chaleur fatale et renouvelable ; les sources fossiles n'ayant pas été étudiées. Cette partie a pour objectif de passer en revue les différentes sources de production de chaleur pour un réseau thermique implémentables en Belgique et plus particulièrement en Wallonie. Ce volet étudie les aspects techniques de la chaleur fatale ; la géothermie peu profonde, profonde et minière ; la biomasse solide, liquide ou gazeuse ; ainsi que quelques autres sources d'énergies renouvelables. Ce cadre permet de situer les potentiels et contraintes liées aux sources de production de chaleur dans un réseau urbain.

Le Chapitre III tient lieu d'intermède et présente le cas pratique étudié dans le cadre de ce mémoire, soit la Caserne Léopold et plus précisément les blocs D et E.

Dans un deuxième temps, une analyse pratique est effectuée sur les deux bâtiments spécifiques susmentionnés du projet de réseau de chaleur étudié lors du stage, afin d'observer leur comportement face à des mesures d'amélioration énergétique pour l'année de référence. A l'aide de l'outil TRNSYS 18, une première simulation est réalisée pour obtenir une calibration du bâtiment au plus proche de son état actuel ; une deuxième simulation est axée sur l'enveloppe du bâti et l'ajout d'isolant dans les parois extérieures verticales et les toitures ; une troisième simulation simule un thermostat réglé en fonction des horaires d'utilisation des espaces ainsi que les réglementations et recommandations belges de consignes de température sur un lieu de travail. Cette analyse est décrite au Chapitre IV et permet d'observer les pistes d'améliorations énergétiques envisageables pour les bâtiments étudiés à l'année de référence 2022.

A travers l'écriture de ce travail, une dimension nouvelle s'est ajoutée pour confronter l'étude de cas aux scénarii météorologiques projetés par le GIEC ou Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Le Chapitre V a pour objectif d'observer le comportement du cas pratique et des stratégies d'amélioration énergétique aux horizons 2050 et 2100 pour deux trajectoires socio-économiques partagées.

Le Chapitre VI compare les résultats entre eux, à la fois pour les améliorations énergétiques de l'année de référence mais aussi pour les trajectoires climatiques et discute des résultats et de la méthodologie utilisée pour les obtenir.

Les perspectives du réseau de chaleur arlonais, à travers les aspects de production mais aussi pour les aspects de consommation des pistes d'améliorations énergétiques et des projections climatiques, sont discutées dans le Chapitre VII.

Un point d'attention est à prendre en compte lors de la lecture de ce travail. En raison de la disponibilité des données, l'état de l'art est conséquent et la double problématique peut s'avérer complexe à comprendre. Nous sommes conscientes de la difficulté d'avoir une double problématique et espérons pouvoir discuter des aspects de manière cohérente dans ce travail.

3.2. Hypothèses de départ

3.2.1. Production de chaleur dans un réseau urbain

Il est supposé que la mutualisation des besoins en chaleur à l'échelle d'un quartier permettrait de bénéficier d'un effet d'échelle en optimisant le rendement global d'une installation décentralisée de chaleur. Les pertes seraient également réduites grâce à un rendement plus élevé par rapport à des installations individuelles (Simonis, 2018).

Ensuite, avec les ambitions environnementales wallonnes, les énergies renouvelables s'intégreraient facilement comme source de production d'un réseau de chaleur, partout sur le territoire. L'utilisation d'énergie renouvelable permettrait une neutralité carbone, correspondant aux ambitions belges en matière de chauffage. La géothermie ainsi que la biomasse sont considérées comme des sources pertinentes et renouvelables de chaleur pour un réseau urbain (Parlement européen; Conseil de l'Union européenne, 2018).

Les énergies renouvelables constituent une voie pertinente pour offrir une possibilité durable de réduire l'impact environnemental et les pressions sur les ressources dans le secteur du bâtiment et plus particulièrement dans le chauffage.

Il est possible, à l'heure actuelle, d'alimenter un réseau de chaleur urbain dans un tissu urbain vieillissant à l'aide uniquement de sources de chaleur d'origine renouvelables et ainsi s'inscrire dans les réglementations wallonnes en termes d'ambitions énergétiques (Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024).

3.2.2. Amélioration énergétique

À travers les pistes d'amélioration proposées pour l'étude de cas à l'année de référence, l'hypothèse de départ est que l'amélioration de l'enveloppe ainsi que la régulation des systèmes permettrait de diminuer la consommation d'énergie du cas pratique pour les besoins en chaud.

En améliorant l'isolation de l'enveloppe du bâtiment et en régulant la température intérieure à l'aide de thermostats simulés, la température moyenne à maintenir à l'intérieur du bâtiment diminue. L'isolation permet également au bâtiment une meilleure résilience face aux conditions extérieures (ADEME, 2025).

Par conséquent, l'écart entre la température intérieure et extérieure est réduit, ce qui entraîne une diminution des pertes thermiques à travers l'enveloppe du bâti (André, 2023). Cette réduction des déperditions aura pour effet direct une baisse de la consommation d'énergie nécessaire au chauffage du bâtiment et au maintien du confort des occupants.

Concernant l'isolation, deux pistes ont été envisagées : la laine minérale et la laine de bois afin d'observer si un isolant aura de meilleures performances sur la réduction du besoin en chaud. La laine de bois, ayant une capacité thermique supérieure à la laine minérale, est considérée comme plus performante que la laine minérale et pourrait permettre une marge supplémentaire dans la réduction de la consommation d'énergie pour supporter les besoins en chaud du cas d'étude. Concernant la surchauffe, il est possible qu'elle entraîne légèrement plus de surchauffe que la laine minérale en raison de cette même propriété thermique. Il existe peut-être un ratio isolation/surchauffe à mettre en évidence dans l'étude de la consommation d'énergie dans un bâtiment.

2.3.3. Projections climatiques

La hausse des températures extérieures prévue par les projections du GIEC entraînerait une réduction progressive des besoins en chaud du bâtiment. Avec cette augmentation moyenne des températures, il est possible que les besoins en chaud de l'étude de cas diminuent par la réduction de l'écart entre les températures intérieures et extérieures.

La littérature estime également que les automnes seront plus doux (SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, s.d.) et les hivers moins rigoureux. Cela pourrait affecter les périodes durant lesquelles le chauffage serait nécessaire au maintien du confort thermique.

Les mesures d'amélioration énergétiques pourraient également permettre une meilleure résilience du cas d'étude face aux conditions extérieures qui, si les températures extérieures moyennes augmentent, pourraient entraîner une diminution supplémentaire de la consommation dans les projections climatique par rapport à l'année de référence étudiée.

CHAPITRE II : Réseau de chaleur

1. Définition et principes fondamentaux

1.1. Concept d'un réseau de chaleur

Un réseau de chaleur est un système qui permet de produire et de distribuer de la chaleur issue d'une production centralisée et de la transporter à travers un circuit pour chauffer des bâtiments. Aussi appelé chauffage urbain, le réseau de chaleur est défini par Pascale Maes (2014) comme comprenant « *une ou plusieurs unités de production de chaleur, un réseau de distribution primaire par lequel la chaleur est transportée sous forme d'un fluide caloporteur vers des sous-stations, à partir desquelles les bâtiments raccordés sont desservis par un réseau de distribution secondaire.* » (Maes, 2014). Elle le décrit également comme un chauffage central agrandi à la taille d'un quartier ou d'une ville (Maes, 2014).

Le principe de centralisation de la production de chaleur dans un réseau thermique repose sur l'utilisation d'unités de production disposant de capacités élevées pour redistribuer l'énergie aux sous-stations par l'intermédiaire d'un réseau de distribution. Le réseau de chaleur urbain présente divers avantages en matière de rendement énergétique et d'efficacité du système, notamment lorsqu'on le compare à une production décentralisée où chaque bâtiment possède sa propre installation (Simonis, 2018).

En effet, la centralisation permet l'utilisation d'unités de production plus performantes avec des capacités plus importantes mais également l'utilisation de techniques qui ne sont réalisables qu'à grande échelle, telle que la valorisation de la chaleur fatale (Simonis, 2018). Ces installations possèdent des rendements élevés et bénéficient d'une maintenance et d'un suivi optimal pour garantir de meilleures performances ainsi qu'une gestion des émissions de polluants liés à la production de chaleur.

Néanmoins, les avantages d'un système centralisé sont à nuancer. La centralisation est pertinente lorsqu'elle utilise des sources d'énergie renouvelable valorisables à grande échelle et plus performantes que les énergies fossiles utilisées dans des systèmes individuels. Mais la viabilité technico-économique est également à prendre en compte dans l'étude et le dimensionnement d'un réseau pour assurer qu'il soit davantage efficace puisqu'il faut que la demande permette de rentabiliser l'investissement de ces infrastructures.

Toutefois, bien que l'investissement soit conséquent en raison de la centralisation de la production à plus grande échelle, un réseau de chaleur offre une distribution de l'énergie avec une mutualisation des coûts, la possibilité d'avoir une diversification des profils de consommateurs pour une meilleure utilisation et répartition de la chaleur produite et la possibilité d'implémenter des énergies

renouvelables dans les processus de production (Service public de Wallonie - SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie, 2025). Adaptable en fonction des besoins et de la situation préexistante, le réseau de chaleur urbain constitue une opportunité concrète dans les enjeux actuels d'efficacité énergétique et d'utilisation rationnelle de l'énergie et des ressources.

La Figure 1 propose un schéma d'un réseau de chaleur sur lequel sont distinguées les sous-stations, le réseau primaire ainsi que le réseau secondaire.

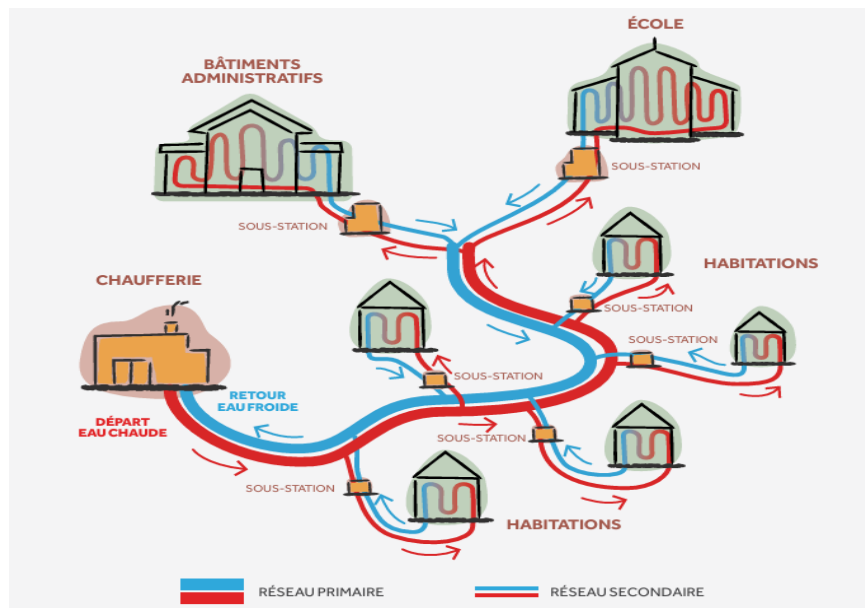


Fig. 1 Schéma d'un réseau de chaleur. Source : VALBIOM (2018).

1.2. Structure d'un réseau de chaleur

1.2.1. Unité de production de chaleur

Un réseau de chaleur dispose d'une ou plusieurs unités de production de chaleur qui serviront, via transport par un fluide caloporteur, à alimenter le système de chauffage des bâtiments raccordés au réseau.

Il existe divers moyens de produire ou récupérer cette chaleur qui peuvent être classés selon trois catégories : les sources de récupération de chaleur, les sources de production d'origine fossile et les sources de production issues du renouvelable (Maes, 2014). Perrin et Leyendecker (2021) les distinguent en seulement deux catégories : les sources carbonées et non carbonées (Perrin & Leyendecker, 2021).

1.2.2. Réseau de distribution primaire

Par un réseau de canalisations, le fluide chaud provenant des unités de production est transporté vers les immeubles raccordés au réseau urbain. Celui-ci fonctionnant en circuit fermé, il existe deux boucles intégrées au sein d'un réseau thermique : un circuit aller qui amène le fluide préalablement chauffé vers les sous-stations des bâtiments raccordés et un circuit retour qui ramène le fluide déchargé de son énergie thermique vers l'unité de production (Maes, 2014).

Le réseau de distribution constitue un élément important puisqu'il est un lieu de pertes non négligeables qui ont lieu lors du transport du fluide chaud vers les sous-stations de chaque infrastructure raccordée au réseau. Pour pallier ces pertes, les canalisations sont enterrées et isolées. Ces dernières sont majoritairement réalisées en acier mais on retrouve également des tuyauteries en polyéthylène réticulé ou en acier inoxydable ; les isolants sont en polyuréthane (Simonis, 2018) additionnés parfois de films étanches à l'humidité afin de protéger les canalisations (Maes, 2014).

Dans le livre « *Réseau de chaleur* » sont décrits trois types de fluides caloporteurs, à savoir de l'eau chaude avec une température comprise entre 60°C et 110°C, de l'eau surchauffée entre 110°C et 180°C et de la vapeur d'eau dont la température va de 200°C à 300°C (Perrin & Leyendecker, 2021, p. 42).

La température du fluide, les distances au sein du réseau, la modélisation des pertes en fonction des diamètres nominaux ainsi que les coûts et budgets envisagés sont autant de facteurs qui peuvent influencer le choix des canalisations du réseau de distribution primaire.

1.2.3. Sous-stations

Les sous-stations effectuent la liaison entre le réseau de distribution primaire et le bâtiment par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Le rôle de cet échangeur est « *d'être le vecteur de transmission d'énergie, sans transport de matière* » (Perrin & Leyendecker, 2021, p. 43).

Il permet donc de transférer la chaleur entre le circuit de distribution primaire du réseau de chaleur et le circuit de distribution dit « secondaire », soit celui du bâtiment à chauffer. Ce circuit secondaire comprend les canalisations, tuyauteries, radiateurs, robinetteries ou autres qui sont raccordés directement pour l'utilisation et le chauffage du bâtiment.

Les échangeurs sont principalement dits « à plaques » ; il existe cependant des modèles tubulaires moins répandus car privilégiés pour d'autres types d'installations avec récupération de fluides pressurisés, trop chauds ou impurs. L'échangeur à plaques est ainsi constitué de plaques fines en acier principalement, placées parallèlement les unes aux autres, à travers lesquelles circule le fluide chauffé afin d'être amené au circuit secondaire : la chaleur est transportée d'une plaque à l'autre par conduction.

Ces sous-stations peuvent également servir de régulateur lorsqu'elles sont pourvues de systèmes et outils dédiés à cet effet comme des thermomètres ou débitmètres, permettant ainsi de distinguer les circuits dédiés à l'eau chaude sanitaire et ceux dédiés au chauffage du bâti raccordé (Perrin & Leyendecker, 2021, p. 44).

La figure suivante (voir Figure 2) représente un réseau de chaleur avec des sources potentielles de production de chaleur, détaillées ci-après ; le réseau de distribution primaire en tracé rouge et bleu qui achemine le fluide caloporteur (ici de l'eau) ainsi que les sous-stations, avec échangeur de chaleur, qui alimentent le réseau secondaire des bâtiments connectés au réseau, ici en pointillés.

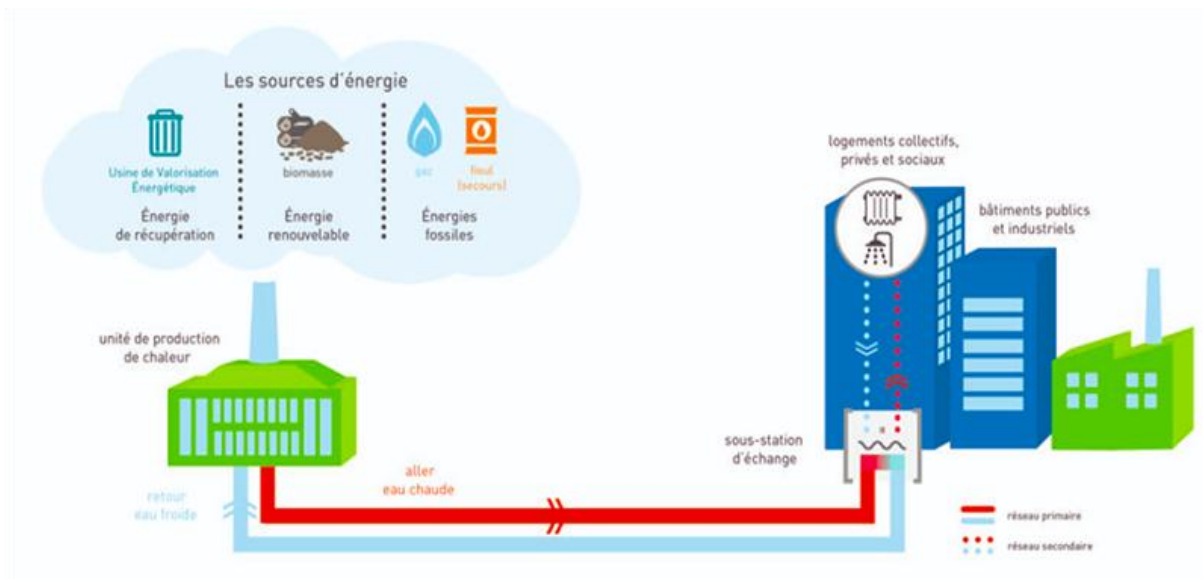


Fig. 2 Constitution d'un réseau de chaleur urbain. Source : Conseils.xpair.com (2025).

2. Aspects de production : sources potentielles de chaleur

2.1. Sources d'origine fossile

Historiquement, les réseaux de chaleur comportaient des sources d'origine non renouvelable mais selon Perrin et Leydendecker (2021), ces sources tendent progressivement à disparaître pour être remplacées par la récupération de chaleur fatale et les sources renouvelables. Bien que les systèmes de réseaux de chaleur soient de plus en plus performants et dirigés vers des sources dites durables, les sources fossiles, notamment le gaz, subsisteront encore des années au sein des réseaux de chaleur puisqu'ils constituent une source d'appoint fiable et pas toujours remplaçable par du renouvelable (Perrin & Leyendecker, 2021).

Parmi ces sources fossiles, on retrouve majoritairement le gaz de ville, mais aussi le fioul ou encore le charbon, qui alimentent une chaudière classique à grand format.

Par soucis de pertinence avec les enjeux environnementaux actuels, les sources d'origine fossile ne seront pas étudiées dans ce travail. Bien que représentant une source d'appoint non négligeable, les technologies sont établies et connues mais la transition énergétique s'oriente vers des solutions plus durables, détaillées ci-après.

2.2. Sources de récupération de chaleur fatale

Concernant les sources de récupération de chaleur, on utilise la chaleur récupérée de procédés industriels. C'est ce que l'on appelle communément la récupération de chaleur fatale, soit la chaleur produite *de facto* par le procédé et qui est dissipée et non récupérée initialement. Cette chaleur résulte d'activités industrielles qui nécessitent des températures très élevées avoisinant parfois les 1000°C (Chiche, 2020).

Dans sa thèse de doctorat « *Intégration de sources urbaines de chaleur fatale au sein d'un réseau de chaleur* » à l'Université Paris-Est, Samuel Chiche (2020) explore le potentiel de cette énergie fatale dans les réseaux de chaleur urbains. Parmi les sources disponibles pour produire de la chaleur récupérable, on considère les procédés métallurgiques et la sidérurgie, les fonderies, verreries, raffineries et les centres d'incinérations de déchets ménagers pour les régimes nécessitant de très hautes températures. Il est également possible de récupérer cette énergie thermique en provenance de centres de données (communément appelés *datacenters*) ou encore de réseaux d'eaux usées pour des températures moins élevées.

Selon Chiche (2020), l'incinération et le raffinage possèderaient les taux de récupération possible les plus élevés avec un ordre de grandeur compris entre 50 et 60%. Les autres procédés tournent aux alentours des 25% de part de récupération de la chaleur en fonction de l'énergie primaire consommée

par les procédés industriels (Chiche, 2020). Les principaux critères à connaître pour cette source de chaleur sont l'état liquide ou vapeur du fluide récupéré, la température à l'extraction, la quantité de fluide que l'on peut récupérer, la distance avec le réseau urbain pressenti ainsi que l'éventuelle intermittence du procédé industriel ciblé. Ces critères vont déterminer le potentiel de récupération d'un site et confirmer l'intérêt ou non d'un projet de récupération de chaleur pour un procédé donné.

Toutefois, les technologies de récupération de chaleur peuvent avoir un coût d'investissement initial important et d'après Bruckner *et al.* (2015), la rentabilité économique de ces procédés dépend essentiellement du nombre d'heures de fonctionnement annuel des récupérateurs de chaleur et du taux d'intérêt intégré sur la période de récupération estimée du projet (Sarah Bruckner, 2015).

Dans « Réseaux de chaleur », Perrin et Leyendecker (2021) classent la récupération de chaleur fatale dans les sources non carbonées, de même que Chiche qui la considère même comme énergie renouvelable. La chaleur fatale étant un sous-produit d'un procédé industriel, elle résulte d'un procédé qui produit une forte chaleur comme la combustion ou autre. Ce procédé peut être rendu possible par énergie fossile, mais la chaleur produite est alors considérée comme un déchet. Récupérer cette chaleur permet d'éviter de devoir la recréer par des processus nécessitant du combustible fossile, limitant ainsi le dégagement de CO₂.

On pourrait donc considérer la récupération de chaleur fatale comme une source non carbonée. Toutefois, il faut étudier l'impact environnemental potentiel du raccordement d'un réseau de chaleur en considérant les matériaux et les travaux, excavations et autres qui doivent être effectuées ainsi que le coût environnemental des technologies de récupération et de maintenance.

En Belgique, cinq secteurs sont pressentis pour la valorisation de chaleur fatale : la sidérurgie, la chimie, l'industrie du minerai non métallique, l'alimentaire ainsi que le papier. PIROTECH, bureau d'audit énergétique, a été mandaté afin d'estimer le potentiel de ces secteurs en Wallonie (Verbeke, 2024). Ce rapport dresse le graphe suivant sur le potentiel de récupération de la chaleur fatale des cinq secteurs industriels :

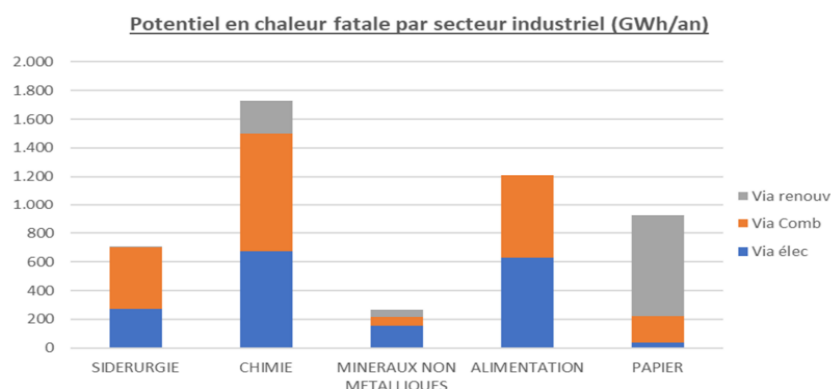


Fig. 3 Potentiel en chaleur fatale par secteur industriel [GWh/an]. Source : PIROTECH (2024).

2.3. Sources renouvelables

Concernant les sources issues du renouvelable, on retrouve majoritairement la géothermie horizontale ou verticale, où la chaleur stockée dans le sol est exploitée pour alimenter une pompe à chaleur ou encore la combustion de biomasse provenant de résidus de bois principalement mais également de déchets agricoles.

2.3.1. La géothermie

Dans un premier temps, il est important de comprendre les différents types de géothermie. Plusieurs classifications existent, en fonction de la profondeur des sondes géothermiques, de la température de la source, des types de systèmes utilisés (Harcouet-Menou, et al., 2023, p. 6). Le site Energie du SPW classe quatre catégories : la géothermique très basse énergie, basse énergie, moyenne énergie et haute énergie. (Service public de Wallonie - SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie, s.d.).

Pour la suite de ce travail, la classification sera en fonction des profondeurs des forages : la géothermie « très peu profonde et peu profonde » à moins de 500 mètres ainsi que la géothermie « profonde » à plus de 500 mètres jusqu'à 2500 mètres de profondeur. Cette distinction est basée sur les technologies de forages et les permis nécessaires à la réalisation de l'ouvrage (Pacyna, 2025).

Cette classification permet d'établir une base thermique, en fonction du gradient thermique qui peut permettre d'opter pour le type le plus adéquat selon les besoins du projet. Il est toutefois important de noter qu'en matière de géothermie, les classifications se croisent et se superposent parfois, en fonction des besoins, des études ou des points de vue (Orban, 2025).

La géothermie permet d'exploiter la chaleur contenue dans le sol, qui est relativement stable tout au long de l'année. En Belgique et plus particulièrement dans la province du Luxembourg, la température du sol avoisine constamment les 10°C à 12°C (Tychon, 2023). Comme partout sur le globe, cette température augmente à mesure que l'on creuse profondément dans le sol puisque l'on se rapproche du noyau terrestre dont la température est estimée à 5000°C. Cette augmentation de température en fonction de la profondeur est ce que l'on appelle le gradient géothermique et pour la Belgique, il est de l'ordre de 0.03°C par mètre de profondeur (Dassargues, 2019). Ce gradient est notamment la raison pour laquelle il existe plusieurs types de profondeur pour la géothermie.

En fonction de la profondeur et du gradient géothermique, la température de la source varie et offre différents classements de géothermie. La géothermie à basse température est considérée en dessous des 60°C, la géothermie à moyenne température va de 70°C à 120°C, la géothermie à haute température dépasse les 120°C.

2.3.1.1. Géothermie très peu profonde et peu profonde

La géothermie « très peu profonde » et la géothermie « peu profonde » correspondent à de la géothermie où les forages sont creusés à des profondeurs inférieures à 500 mètres.

La géothermie horizontale et la géothermie verticale peu profonde utilisent la chaleur emmagasinée dans le sol de manière indirecte. On peut notamment appeler ce principe la « géothermie à basse température ». En effet, le gradient géothermique ne permet pas une hausse de la température du sol suffisante pour chauffer directement un bâtiment (Nebhani, 2023, p. 6). De ce fait, la géothermie à basse température convient pour des réseaux dont la température ne dépasse pas 60°C (Gouvernement Wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024, p. 60). Elle peut couvrir les besoins en matière de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de climatisation ou de refroidissement d'un bâtiment ou réseau de bâtiments (Harcouet-Menou, et al., 2023, p. 3).

Pour la géothermie à basse température peu profonde on utilise des systèmes fermés où le fluide caloporteur circule dans une boucle de tuyauterie fermée et des systèmes ouverts où le circuit passe de manière ouverte par un aquifère ; c'est ce qu'on appelle aussi « géothermie sur nappe ».

Dans les systèmes ouverts, l'eau est pompée depuis la nappe afin de l'acheminer vers la pompe à chaleur qui récupère les calories avant de réinjecter l'eau refroidie dans l'aquifère par un circuit retour (ADEME, 2017, p. 6). Une pompe à chaleur permet d'augmenter la température initiale de la source afin de l'amener au réseau de distribution du bâtiment. Toutefois, ces systèmes ouverts doivent être étudiés afin de connaître les effets sur la qualité et la quantité des eaux souterraines et de surface de l'aquifère, ainsi que sur les écosystèmes en surface, selon Alain Dassargues (2019), Professeur Ordinaire en Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement à l'Université de Liège (Dassargues, 2019).

En ce qui concerne les systèmes fermés, il en existe trois types (Energie Plus le Site, s.d.) :

- Les pieux ou fondations géothermiques intègrent directement des échangeurs géothermiques dans les pieux en béton armé des fondations d'un bâtiment. Cela permet une double fonction des fondations et ne nécessite donc pas de forage supplémentaire. C'est toutefois réservé aux nouvelles constructions et cela demande un dimensionnement particulier car les pieux ne seront plus accessibles une fois le bâtiment construit. (voir Figure 4, à gauche) ;
- Les forages ou sondes géothermiques constituées de forages verticaux avec une profondeur aux alentours de 120 mètres mais pouvant aller de 50 à 400 mètres. Ces forages sont réalisés à l'aide de conduites en polyéthylène, en acier ou inox avec isolant et sont espacés d'une petite dizaine de mètres afin de limiter l'influence qu'ils ont l'un sur l'autre au niveau thermique. Afin d'étudier cette opportunité, une étude géologique ainsi que des autorisations et permis sont nécessaires afin de mettre en place ces forages. (voir Figure 4, au centre) ;
- Les nappes horizontales qui sont constituées de tubes enterrés de manière horizontale sous la surface du sol à environ 1 ou 2 mètres de profondeur. Cette technologie est maîtrisée et moins

couteuse mais demande une surface au sol dédiée à cet effet, ce qui peut ne pas être propice à un espace urbain s'il est à proximité directe d'habitations ou autres activités. Par ailleurs, il existe potentiellement des effets sur l'environnement liés au refroidissement en hiver de la surface dans laquelle sont enterrées les canalisations. (voir Figure 4, à droite).



Fig. 4 Types d'échangeurs géothermiques : pieux, sondes et nappes horizontales. Source : Energie Plus Le Site (2019).

Les systèmes fermés seront influencés par les paramètres thermiques du sous-sol, soient sa conductivité thermique, sa diffusivité thermique et sa capacité thermique, par la température initiale du sol, par la lithologie, par l'hydrogéologie (débit, pression) ainsi que par le type de sonde utilisée (Harcouet-Menou, et al., 2023, p. 7). Les systèmes ouverts, quant à eux, seront majoritairement influencé par la conductivité hydraulique directement proportionnelle au débit extractible dans la nappe ou l'aquifère (Dassargues, 2019).

Les systèmes géothermiques peu profonds fonctionnent de pair avec une pompe à chaleur qui permettra d'élever la chaleur récupérée dans le sol ou dans la nappe afin d'alimenter le bâtiment en chaleur.

Par le biais de la pompe à chaleur, les calories présentes dans le sol sont donc extraites par les capteurs (sonde verticale ou tuyauterie horizontale) et transférées à un fluide caloporteur : de l'eau glycolée, principalement pour éviter le risque de gel si les températures tombent.

Ces calories sont transmises dans l'évaporateur à un fluide frigorigène qui s'évapore à une température très basse (en dessous de 20°C). Ensuite, le fluide à l'état gazeux est comprimé dans un compresseur afin de chauffer le fluide réfrigérant vaporisé. Dans le condenseur, la chaleur est extraite du gaz chaud

à l'aide d'un échangeur et ces calories sont transférées vers un accumulateur de chaleur pour ensuite passer dans le circuit de chauffage du bâtiment. Une fois le fluide refroidi, il entre dans le détendeur qui le dépressurise et permet au fluide de retrouver sa forme liquide et de retourner dans l'évaporateur pour poursuivre son circuit.

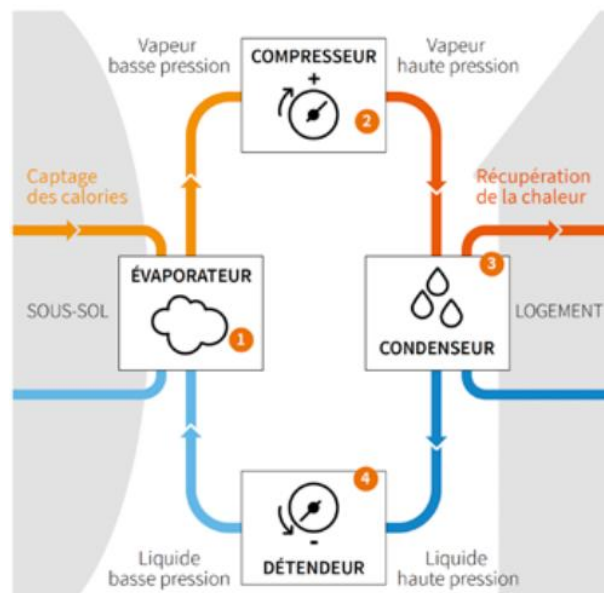


Fig. 5 Cycle thermodynamique d'une PAC. Source : ADEME, AFGP (2017).

La Figure 5 représente le fonctionnement d'une pompe à chaleur, expliqué au paragraphe ci-dessus.

Ce système permet donc de chauffer un bâtiment mais offre également la possibilité de le refroidir :

- En système fermé, la chaleur est extraite de l'environnement et acheminée par le fluide caloporteur pour être rendue au sol par un circuit de retour (Harcouet-Menou, et al., 2023, p. 7) ;
- En système ouvert, l'eau contenue dans la nappe peut être pompée afin d'être injectée dans une boucle de refroidissement puis réinjectée dans la nappe, c'est ce qu'on appelle le « geo-cooling » ou refroidissement passif (Energie Plus le Site, s.d.). Il est également possible, par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur réversible, d'avoir une production de froid et de chaud.

Un rapport de spécialistes en hydrogéologie rédigé pour le SPW Energie en 2023 propose le tableau suivant (Tableau 1) des différentes possibilités qu'offre la géothermie peu profonde :

Tab. 1 Différents types d'utilisation de la géothermie peu profonde. Source : Détermination du potentiel de la géothermie peu profonde (moins de 500 mètres) pour la production de chaleur et de froid en Wallonie, SPWallonie (2023).

Type d'utilisation	Application(s)	Système de production	Type d'utilisateurs
Production de chaud	Chauffage de Bâtiments	PAC géothermique	Maison individuelle, chauffage collectif, espaces tertiaires ou écoquartiers
	Chauffage de Bâtiments + Production d'eau chaud sanitaire	PAC double service	Maison individuelle, chauffage collectif, espaces tertiaires ou écoquartiers
	Production d'eau chaud sanitaire	Chauffe-eau thermodynamique par géothermie (CET géothermique)	Maison individuelle, chauffage collectif, espaces tertiaires ou écoquartiers
	Chauffage des bâtiments d'élevages et serres	PAC géothermique	Usages agricoles
Production de froid ou de frais	Production de froid actif	PAC réversibles	Maison individuelle, chauffage collectif, espaces tertiaires ou écoquartiers
	Production de frais avec géocooling	Echangeur de chaleur et pompe de circulation	Bâtiments
Production de chaud et de froid	Production de chaud/froid simultanée : chauffage de l'eau des bassins, des spas, vestiaires et bureaux production d'eau chaude sanitaire; froid pour déshumidification de l'air ambiant.	Thermofrigopompe	Piscines publiques
	Production de froid pour leurs plateaux techniques toute l'année, production d'eau chaude sanitaire et chauffage l'hiver, production de froid pour une partie des locaux en été.	Thermofrigopompe	Etablissements de santé (hôpitaux et cliniques, maisons de repos)
	Chauffage et rafraîchissement des locaux + contribution à la fourniture de l'énergie nécessaire aux procédés de fabrication notamment dans les procédés de refroidissement	Thermofrigopompe, PAC réversibles, PAC géothermique, géocooling	Usages industriels
	Chauffage ou climatisation, en alternance, de volumes simples à des températures peu élevées et sans amplitude importante.	PAC géothermique réversibles	Surface de distribution, hall d'expositions
	Production de chaud et de froid pour les caves et les procédés de vinification	PAC géothermique réversibles, Thermofrigopompes	Secteur viticole

La géothermie peu profonde semble donc offrir une solution probante et efficace afin d'utiliser les ressources renouvelables à notre disposition. Kevin Sartor (2018), dans sa thèse de doctorat sur l'analyse technico-économique et environnementale d'un réseau de chaleur, explique que, pour parvenir aux objectifs fixés dans les directives européennes en matière d'énergie et de durabilité, l'utilisation des pompes à chaleur pourrait contribuer à une meilleure efficacité énergétique et à une gestion améliorée des ressources renouvelables disponibles (Sartor, 2018).

En Belgique, le potentiel géothermique peu profond est toujours à l'étude. En fonction de la nature géologique et hydrogéologique du sol, des études sont nécessaires afin de connaître le potentiel de transfert thermique du sol belge, en fonction des régions étudiées.

Par ce biais, on évalue les propriétés physiques et chimiques du sous-sol comme sa composition, sa porosité, sa perméabilité afin d'obtenir des informations sur sa nature et ainsi dégager d'éventuels risques en cas de forages (Orban & Brouyère, 2024). Dans ces études, la conductivité thermique du sol en fonction de sa nature est également évaluée pour dégager un potentiel de dégagement thermique en fonction de la profondeur du forage.

Le Géoportail de la Wallonie propose une carte du potentiel géothermique en Wallonie pour les systèmes fermés :

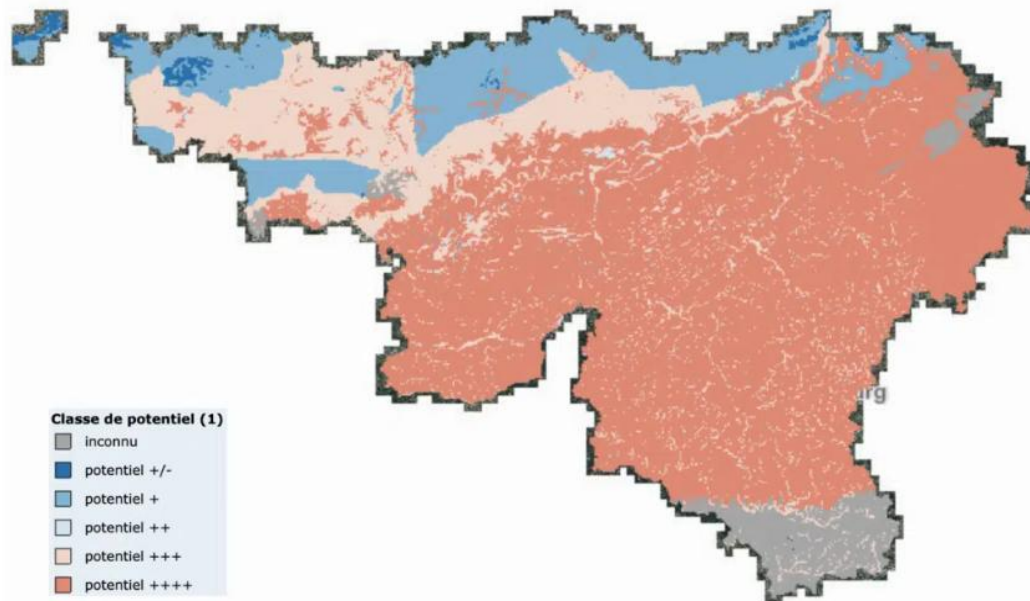


Fig. 6 Potentiel des systèmes géothermiques peu profonds. Source : Géoportail de la Wallonie - WalonMap (2023).

On constate, sur la Figure 6, que la majeure partie du territoire wallon offre un très bon potentiel en matière de géothermie peu profonde sur des systèmes de forages fermés.

Cependant, afin d'effectuer un forage, un permis d'environnement est nécessaire. En 2002, le Gouvernement wallon a publié un Arrêté classant les différents types de permis nécessaires et fonction des forages réalisés. Le forage à destination de sondes géothermiques est de « Classe 2 » correspondant à un impact environnemental modéré soumis à un permis d'environnement. La géothermie (très) peu profonde est soumise à cet Arrêté gouvernemental. La demande est à introduire auprès de la commune puis à la Région wallonne avec un dossier technique, une étude d'incidence sur les effets du projet sur l'environnement ainsi que de documentations annexes sur l'aménagement du territoire concerné, d'éventuels plans, l'affectation des bâtiments et autres (Gouvernement wallon, 2002).

Concernant la géothermie en nappe ouverte, un formulaire dédié est à remplir afin d'obtenir un permis d'environnement. Ce document doit définir, entre autres critères, le type d'ouvrage, la prise d'eau souterraine, les données piézométriques et l'usage futurs des puits. Ce document se trouve en Annexe I du Décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement du Gouvernement wallon (Gouvernement wallon, 1999).

La géothermie à basse température offre une solution concrète, tangible et adaptée à des projets de réseaux de chaleur qui ne dépassent pas les 60°C dans les circuits de distribution secondaire des bâtiments. Toutefois, il est à noter qu'actuellement en Belgique et particulièrement en Wallonie, le bâti est vieillissant. La plupart des chefs-lieux et grosses villes wallonne ont été construites vers la fin du

XIXe siècle ou le début du XXe, souvent sans isolation et les bâtiments classés sont légion (Fizman, 2022).

De ce fait, les systèmes de chauffage peuvent parfois être à moyenne température, entre 60°C et 90°C, ce qui les rend potentiellement plus difficilement compatibles avec un réseau de chaleur dont la source est issue d'une production à basse température. La géothermie à basse température peut s'envisager à l'aide d'appoints mais doit être correctement étudiée et dimensionnée afin d'envisager les pistes les plus économiquement viables et techniquement réalisables.

2.3.1.2. Géothermie profonde

La géothermie dite « profonde » couvre des profondeurs de plus de 500 mètres. Elle peut également être appelée géothermie à haute température, puisqu'elle exploite directement la chaleur récupérée et n'implique, en général, pas l'usage de pompes à chaleur (Petitclerc & Vanbrabant, 2011).

Toutefois, il est à préciser que la géothermie « profonde » peut également être une géothermie à basse ou moyenne température dépendant des systèmes de récupération de chaleur attendant (Orban, 2025).

La géothermie profonde peut extraire une chaleur entre 70 et 120°C (Gouvernement Wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024) et permettre de produire à la fois de l'électricité et d'alimenter un réseau de chaleur urbain (Zinsalo & Lamarche, 2015).

À des températures de source supérieures à 90°C, il est possible de produire de l'électricité à l'aide d'un turbo-alternateur, comme précisé ci-dessus. Cependant, ce cas de figure ne sera pas étudié pour ce travail ; le focus étant sur la production de chaleur pour alimenter un réseau urbain.

En Wallonie, différents sondages géothermiques ont été réalisés afin d'obtenir des données quant au potentiel de chaleur récupérable et aux profondeurs possibles des ouvrages en fonction de la nature (hydro-) géologique du sol. Toutefois, les données sont complexes à analyser et à l'heure actuelle, il est difficile de connaître le potentiel géothermique profond en Wallonie (Service public de Wallonie - SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie, s.d.).

Il n'existe actuellement que trois ouvrages géothermiques profonds en Belgique, dans la région montoise :

- Douvrain, avec une profondeur de 1350 mètres (1979) ;
- Ghlin, avec une profondeur de 1550 mètres (1981) ;
- Saint-Ghislain, à une profondeur comprise entre 2400 et 2630 mètres (1985).

Les trois forages ont un débit aux alentours de 100 m³/h et permettent d'obtenir des températures comprises entre 66°C et 73°C du plus au moins profond, permettant ainsi une géothermie à moyenne température (Dupont, Licour, & Rorive, 2014).

Deux cartes des zones d'intérêt géothermique ont été réalisées en 2011 par Estelle Petitclerc et Yves Vanbrabant de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique pour le compte du SPW Territoire, Logement, Patrimoine et Energie (Annexe 1).

La géothermie dite profonde est donc encore à l'étude et il n'est à l'heure actuelle pas possible d'affirmer que ce type de source de production puisse être implémenté pour tous les réseaux de chaleur envisagés sur le territoire wallon, à la fois en raison du manque de données, à la fois pour des raisons technico-économiques liées aux explorations, études et forages.

2.3.1.3. Géothermie minière

La géothermie des mines est une catégorie particulière de la géothermie puisqu'elle consiste à exploiter la chaleur résiduelle contenue dans les réservoirs géologiques que sont les anciennes mines, avec une profondeur de quelques centaines de mètres en général. La température moyenne au sein de ces réserves géothermiques est comprise entre 20°C et 30°C : il faut donc les associer à une pompe à chaleur afin d'élever la température d'un fluide pour alimenter un réseau de distribution secondaire via un échangeur de chaleur (Dupont, Kaufmann, Harcouet-Menou, & Matthijs, 2021).

Ce type de géothermie est à part puisqu'il peut fonctionner en système ouvert, avec ou sans réinjection de chaleur et en système fermé avec un puits à colonne permanente (forage isolé dans lequel circule le fluide caloporteur) (Dupont, Kaufmann, Harcouet-Menou, & Matthijs, 2021).

Selon que l'on puise à 500 mètres ou plus dans la mine, un changement de technique de forage justifie un permis exclusif de recherche et d'exploitation, ainsi qu'une évaluation des incidences environnementales et une enquête publique (Pacyna, 2025). Ces précautions sont inscrites dans le Code de la gestion des ressources du sous-sol sous le décret du 14 mars 2024 (Parlement wallon, 2024).

Afin d'exploiter les anciennes mines et pour estimer leur potentiel comme source de chaleur, il faut tenir compte de caractéristiques physiques comme la température au sein du réservoir, les volumes et débits récupérables mais également de critères logistiques comme le bon état des galeries, leur connectivité au réseau. Il faut donc rassembler des informations techniques sur l'état des galeries, des plans d'exploitation et obtenir des données hydrogéologiques et lithologiques afin d'estimer l'exploitabilité d'une ancienne mine (Dupont, Kaufmann, Harcouet-Menou, & Matthijs, 2021). Toutefois, dans le dossier consacré à ce sujet, Dupont *et al.* indiquent qu'il peut être complexe d'accéder à ce type d'information et que les paramètres décisifs demeurent « *les volumes de vides miniers et les gammes de températures* ».

En Belgique, les principaux lieux exploitables sont les anciennes mines de charbon, présentes dans la ceinture centrale de la Wallonie entre Mons et Liège ainsi que dans la campine flamande (voir Figure 7).

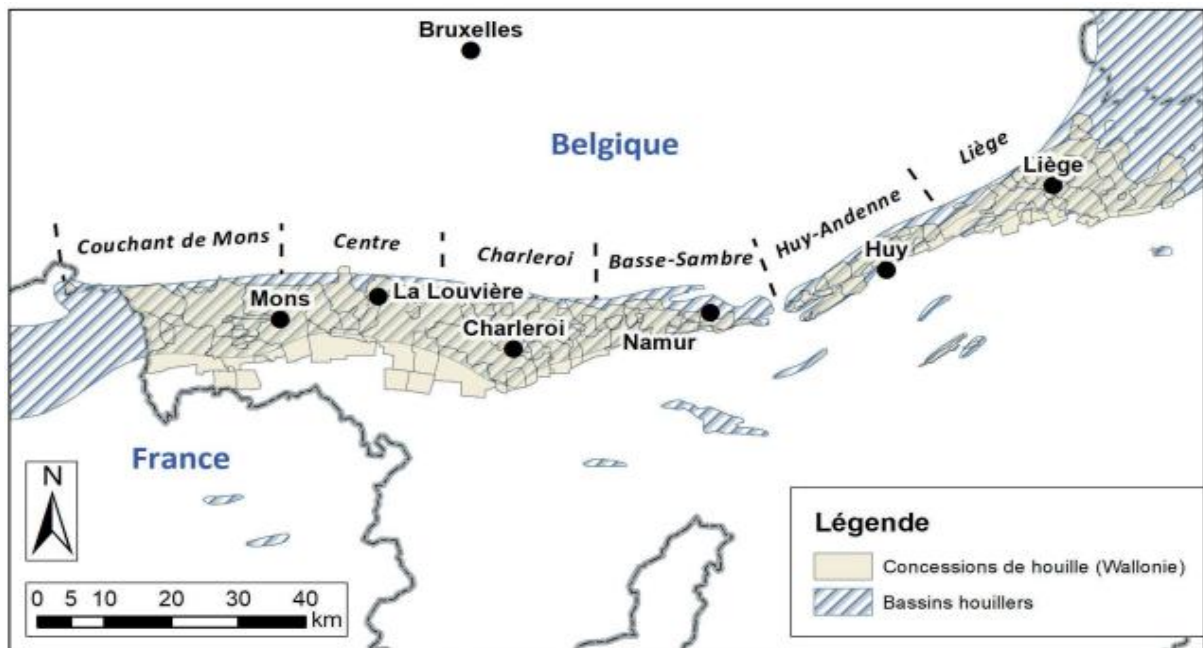


Fig. 7 Carte générale du bassin houiller wallon. Source : revue "Géologie n°221 - dossier Les eaux souterraine et la géothermie" (2021).

Dupont *et al.* (2021) ont estimé le potentiel d'exploitation des mines selon deux critères paramétrables : les volumes miniers (déterminés à partir de données d'archives sur les volumes de charbon produits) et les températures minimales et maximales (qui considèrent le gradient géothermique à l'échelle du réservoir étudié). Il ressort de cette étude que la géothermie des mines est un système exploitable pour des réseaux de chaleur de cinquième génération soient ceux producteurs à la fois de chaud et de froid (Dupont, Kaufmann, Harcouet-Menou, & Matthijs, 2021).

Les mines constituent également un bon espace de stockage potentiel. Les zones fracturées, les remblais, les galeries sont ennoyées : l'eau circule et les volumes sont conséquents, ce qui fait des anciennes mines une sorte « (...) d'éponge pour stocker » (Pacyna, 2025).

Dans le rapport « *Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid* », le SPW annonce pour la Wallonie et sur base de l'étude susmentionnée, trois bassins ayant un potentiel géothermique minier : le bassin du Couchant de Mons, le bassin de Charleroi ainsi que le bassin de Liège. Des projets pilotes sont en cours sur ces sites afin d'obtenir des informations plus précises sur le potentiel exploitable des anciennes mines wallonnes (VITO, 2020).

Cette source de production pourrait donc s'avérer pertinente mais reste cantonnée à une zone géographique peu étendue et n'est donc pas applicable à l'ensemble du territoire belge ou wallon.

2.3.2. La biomasse

La biomasse est de la matière organique qui peut être solide, liquide ou gazeuse et qui est issue de la fraction biodégradable :

- Des cultures à haut rendement (dédiées spécifiquement aux applications énergétiques) ou des déchets et résidus issus de l'agriculture ;
- Des produits, déchets et résidus provenant de la sylviculture et de la transformation de bois ;
- De la fraction biodégradable des déchets (et sous-produits) industriels ;
- De la fraction biodégradable de déchets ménagers alimentaires ou de l'industrie agro-alimentaire (Sartor, 2018, p. 17) & (Fagot, 2022, p. 21).

La biomasse peut être considérée comme renouvelable dès lors que sa gestion est durable (Simonis, 2018). Historiquement, les premières technologies de valorisation énergétique des matières organiques ont été effectuées à partir de matières premières en concurrence avec l'alimentation, comme les céréales (blé et maïs), la betterave sucrière ou les huiles végétales (colza). Il en résultait un biocarburant dit « de première génération » ou « conventionnel » (Greger, 2024).

Aujourd'hui, l'utilisation des matières premières alimentaires est restreinte et l'utilisation de déchets et sous-produits est privilégiée, c'est ce qu'on appelle la « deuxième génération » ou les biocarburants « avancés ». Les sous-produits utilisables en deuxième génération sont listés dans l'Annexe IX de la directive 2018/2001/UE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (Parlement européen; Conseil de l'Union européenne, 2018, p. 328/204) (Annexe 2).

Il est donc primordial de suivre ces recommandations et d'utiliser une matière organique « déchet » et non des matières premières. Toutefois, il est à noter que les pratiques agricoles sont changeantes et qu'à l'heure actuelle, certaines cultures sont dédiées aux hauts rendements et ne servent plus que comme source d'énergie. Néanmoins, en 2019, VALBIOM, ASBL spécialisée en valorisation de la biomasse, estimait que les cultures énergétiques telles que le maïs ne représentaient que 0.1% de la surface agricole en Wallonie.

Selon eux, la biomasse peut être revalorisée en biométhane pour produire du biogaz injecté dans les réseaux de distribution ; en biocarburant (plutôt pour le transport) ; mais également en combustion et gazéification pour la biomasse lignocellulosique (dérivés de bois et végétaux) qui pourrait alimenter un réseau de chaleur urbain (VALBIOM, 2019). La valorisation permet d'obtenir un bilan carbone nul puisque « *la quantité de CO₂ rejetée lors de (sa) combustion est équivalente à celle absorbée par la photosynthèse lors de la vie de la plante* » (Simonis, 2018). VALBIOM utilise également cet argument pour prôner les cultures énergétiques, mettant en avant l'impact carbone, la gestion des stocks, la qualité constante des intrants et l'assurance d'un revenu financier pour agriculteurs (VALBIOM, 2019).

Il est toutefois à noter que les principales études en Wallonie concernant la biomasse sont assurées par VALBIOM, acteur majeur dans le domaine. Après plusieurs recherches, il semble que les rapports européens¹ sur le sujet soient eux-mêmes sourcés depuis des rapports effectués par VALBIOM à la demande du SPW. Il est donc primordial de pouvoir nuancer les propos tenus par l'ASBL. Dans divers rapports et articles, VALBIOM mentionne la biomasse et les cultures énergétiques comme voie d'avenir, pouvant assumer 80% de la consommation de gaz en Région wallonne et offrant un revenu complémentaire aux agriculteurs.

Dans un rapport de 2019, il est mentionné que les intrants simplifiés (soient les cultures énergétiques, ensilage d'herbe et cultures intermédiaires à vocation énergétique) permettent une simplification technique et un besoin moindre de main d'œuvre malgré un coût de matière organique plus élevé ; en comparaison aux intrants complexes, soient les déchets existants dans le secteur agricole (VALBIOM, 2019, p. 17).

La limite est donc fine entre la rentabilité économique et l'utilisation de sous-produits non valorisés ou la culture de produits valorisables au détriment des cultures alimentaires.

2.3.2.1. Biomasse solide

Dans la biomasse solide, on trouve :

- Les combustibles bois ou « bois énergie » : sous la forme de pellets, plaquettes, copeaux, bûches et bûches reconstituées ou compressées ainsi que les déchets forestiers solide (branchages, écorces, troncs morts) (Fagot, 2022) ;
- Les résidus de cultures : pailles, rafles (souvent d'épis de maïs²), collets³, feuilles éventuelles ;
- Les cultures énergétiques : soient les taillis à courte rotation (cycles de cinq années) ou encore des cultures de miscanthus (Hoffman, 2015) ;
- Les déchets industriels : les palettes, caissettes, « chips » d'emballages ou de rembourrages ;
- Les déchets ménagers : ordures ménagères dans les poubelles « déchets compostables » dédiées à cet effet ;
- Les déchets de l'industrie agroalimentaire : tout ce qui n'est pas utilisable ou vendu par le secteur agroalimentaire (mauvais calibre, coups, produits avec emballage cassé, etc).

Les déchets ménagers, en Belgique, peuvent être compostés ou fermentés. L'Institut national de statistique de Belgique estime qu'en 2023, 20% des déchets municipaux ont été compostés ou fermentés résultant en un produit valorisé (Institut national de statistique de Belgique, 2024).

¹ Au sujet du territoire belge et wallon.

² Partie centrale de l'épis du maïs où sont implantés les grains de la plante mature.

³ Partie d'une plante qui est entre la tige et la racine.

2.3.2.2. *Biomasse liquide*

La biomasse liquide peut être indirectement liée à la biomasse solide et résulter d'un sous-produit de celle-ci. Parmi les produits, on retrouve :

- Les cultures énergétiques : le colza est principalement utilisé pour son huile qui après transformation résulte en du biodiesel, la betterave peut être fermentée pour produire du bioéthanol (les restes solides sont déshydratés, séchés et compactés pour en faire des granulés alimentaires pour bétail) (Greger, 2024) ;
- Les sous-produits de l'industrie agro-alimentaire : tels que le lactosérum⁴ pour produire du bioéthanol (Delhay, 2022) ; toutes les huiles et graisses végétales ou animales (abattoirs, restaurants, industries) qui peuvent être récupérées afin de produire du biodiesel (Greger, 2024).

Les intrants liquides peuvent être utilisés dans des chaudières spécifiques mais sont majoritairement revalorisés en unité de biométhanisation (Delhay, 2022).

2.3.2.3. *Biomasse gazeuse*

La biomasse gazeuse est produite après fermentation et digestion des matières organiques suivantes :

- La fraction biodégradable des déchets ménagers : introduite dans des digesteurs et digérée par des bactéries spécifiques en fonction des températures atteintes (Delhay, 2022) ;
- Les déchets d'origine agricole : lisiers et fumiers peuvent être valorisés pour produire du biogaz (Greger, 2024) ;
- Les sous-produits de l'industrie agro-alimentaires : les rejets, les moûts, et autres sous-produits sucrés du secteur agroalimentaire peuvent être valorisés pour produire du biogaz (Delhay, 2022).

Le biogaz est issu d'un processus de fermentation anaérobie de la matière organique. Celle-ci, qui contient protéines, lipides et sucres (hydrates de carbone), est introduite de manière continue, semi-continue ou discontinue dans un digesteur. Des microorganismes dégradent la matière en composés organiques simples (acides aminés, acides gras et sucres) ; il s'agit de la phase 1, l'hydrolyse.

Ensuite, les acides aminés, acides gras et sucres sont dégradés (à l'aide de bactéries acidogènes) en acides organiques à chaîne courte (acide propionique, acide butyrique), en alcool, en acide lactique ; il s'agit de la phase 2, l'acidogénèse.

⁴ « Petit-lait » qui subsiste après fabrication de fromages.

Les acides organiques et alcools sont dégradés (par des bactéries acétogènes) en acide acétique (CH_3COOH), en dioxyde de carbone (CO_2) et en hydrogène (H_2) ; il s'agit de la phase 3, l'acétogénèse.

Enfin, l'acide acétique et le dihydrogène sont dégradés (par des bactéries méthanogènes) en méthane (CH_4) et en sulfure d'hydrogène (H_2S) avec un rejet de dioxyde de carbone qui a permis la réaction ; il s'agit de la phase 4, la méthanogénèse.

Il y a deux sous-produits de cette fermentation : le digestat, résidu organique liquide qui peut être utilisé comme engrais et le biogaz brut (composé de 50 à 60% de méthane) (VALBIOM, 2019, p. 7).

Le biogaz est ensuite purifié pour obtenir un biométhane ($\text{CH}_{4\text{pur}}$) qui peut être utilisé comme substitut au gaz naturel (gaz de ville qui alimente les systèmes de chauffage). Il peut également être séché et désulfuré afin de servir à la production de chaleur ou d'électricité et chaleur lors d'une cogénération.

Dans ce cas, le biogaz alimente un moteur thermique qui entraîne un générateur qui produit de l'électricité (injectée sur le réseau ou autoconsommée). La chaleur fatale du procédé est récupérée dans les gaz d'échappements ou le circuit de refroidissement. Les calories peuvent être transférées à un fluide caloporteur qui est acheminé vers un échangeur pour la production d'eau chaude qui alimentera le réseau de chaleur par le réseau de distribution et les sous-stations.

La figure ci-dessous (voir Figure 8) décrit le fonctionnement d'une centrale de biométhanisation.

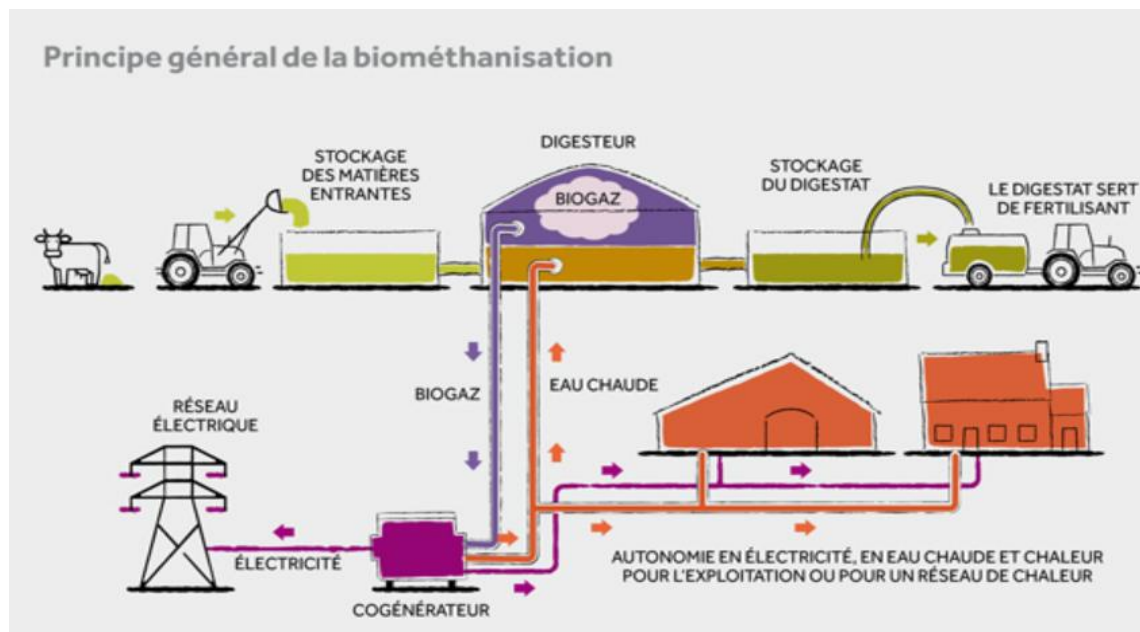


Fig. 8 Principe général de la biométhanisation. Source : Ferme du Faascht (s.d.).

2.3.3. Les autres sources potentielles issues du renouvelables

Les sources précitées sont celles avec le meilleur potentiel selon la littérature. Toutefois, il existe d'autres possibilités pour extraire de la chaleur d'un fluide afin d'alimenter un réseau de chaleur.

2.3.3.1. Aquathermie des eaux de surfaces

Parmi ces sources, on retrouve l'aquathermie, qualifiée de « *technique de chaleur durable qui utilise les eaux de surfaces (rivières, lacs et canaux) comme source thermique* » par le biais de « *pompes à chaleur pour augmenter la température de l'eau de surface (qui varie entre 5 et 25°C par an en Wallonie) jusqu'à la température de rejet souhaitée pour fournir la chaleur au bâtiment.* » (Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024).

L'aquathermie (voir Figure 9) peut être à la fois en circuit fermé lorsque la source d'eau est un bassin fermé ou peu ouvert aux échanges de masses d'eau et en circuit ouvert lors du pompage dans les eaux de surface d'un cours d'eau.

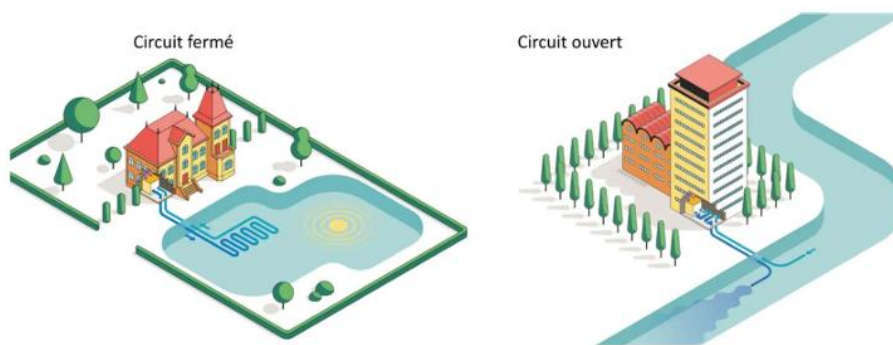


Fig. 9 Aquathermie des eaux de surface. Source : IDELUX (2024).

Le potentiel de l'aquathermie est influencé par la température, le débit, la piézométrie et autres caractéristiques propres à une masse d'eau, qu'elle soit en surface ou souterraine. Afin d'évaluer ce potentiel, l'Annexe C du rapport sur la Directive efficacité énergétique indique la nécessité d'effectuer une simulation dynamique pour les masses d'eau ciblées (Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024).

2.3.3.2. Riothermie

La riothermie est un processus de récupération de la chaleur contenue dans les réseaux des eaux d'égout. Par l'isolation des canalisations, la température des eaux usées offre une source potentielle de chaleur qui n'est pas soumise directement aux variations externes de températures. En moyenne,

la température de l'eau dans les égouts oscille entre 10°C et 35°C dans les pays de la Grande Région⁵ (Hansen, 2024).

VIVAQUA, réseau bruxellois de gestion de l'eau, indique que la température des eaux d'égout est plus faible que la température extérieure en été, ce qui offre une possibilité de refroidissement et est supérieure à la température extérieure en hiver, ce qui permet de répondre aux besoins en chaleur d'un réseau de bâtiments (Vivaqua, s.d.).

Lorsque les canalisations existantes sont rénovées, il est possible d'y implémenter un échangeur de chaleur afin de récupérer les calories contenues dans les eaux d'égout. Également connectés à une pompe à chaleur, ces échangeurs permettent de chauffer en hiver, et de refroidir en été.

D'un point de vue technique, l'Annexe B de la directive sur l'efficacité énergétique en Wallonie, établit la nécessité d'avoir, pour permettre l'installation des échangeurs, des canalisations avec un diamètre nominal de 400mm ce qui permet de transporter des quantités d'eau importantes avec un débit minimum de 100m³/h (Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024).

2.3.3.3. *Aérothermie*

Ce principe permet d'utiliser la température de l'air extérieur comme source afin de produire de la chaleur (voir Figure 10) . Une pompe à chaleur extrait les calories présentes dans l'air extérieur et les transfère à un fluide caloporteur qui, une fois comprimé, augmente en température et peut transférer sa chaleur au réseau de distribution de chauffage d'un bâtiment ou des sous-stations d'un réseau de chaleur. On appelle ce système une pompe à chaleur aérothermique.

Toutefois, ce type de pompe à chaleur sera dépendant de la température de la source extérieure qui fluctue en fonction de la météo du site exploité. Puisque la pompe à chaleur est davantage efficace à mesure que l'écart entre la température de la source et la température souhaitée est réduit, son efficacité globale est tributaire des températures extérieures. Plus la température de l'air extérieur est faible, moins la pompe à chaleur est efficace, ce qui pourrait diminuer les performances du système en Belgique où les températures hivernales diminuent fortement.

De ce fait, l'aérothermie nécessite un appoint dans chaque sous-station du réseau de chaleur afin de pallier un potentiel manque de puissance de la pompe à chaleur.

D'un point de vue technique, l'installation de ce système requiert une unité extérieure, sorte de ventilateur, qui extrait par une pompe la chaleur de l'air extérieur. Toutefois, ce bloc extérieur peut

⁵ Allemagne, Belgique, France (nord) et Luxembourg.

avoir un impact visuel négatif et provoquer des nuisances sonores puisque le ventilateur peut émettre jusqu'à une cinquantaine de décibels (ARTE Regards, 2024).

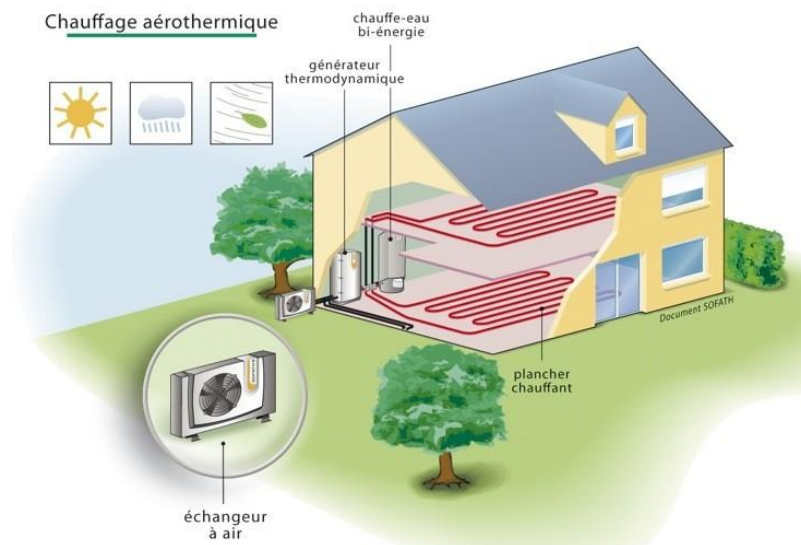


Fig. 10 Chauffage aérothermique. Source : SOFATH / Claude Faugeirol sur Idéesmaisons.com (s.d.).

3. Cadre légal concernant les réseaux de chaleur

3.1. Règlements européens

Pour comprendre le cadre réglementaire en matière de réseau de chaleur, il est important de parcourir les réglementations européennes relatives à l'énergie et leur complexité.

Historiquement, c'est au sortir de la Deuxième Guerre Mondiale que les discussions en matière d'énergie commencent. Sur la seconde moitié du XXe siècle, divers traités sont signés, des crises énergétiques et économiques sont traversées, des échecs politiques sont constatés.

Les politiques européennes sont en réalité bien souvent non-contraignantes, fixant des objectifs à atteindre pour les Etats membres mais chacun applique ces directives comme bon lui semble. Les ambitions sont présentes, mais dans la réalité, il est important de noter la difficulté à mettre en place les mécanismes de transition pour parvenir aux objectifs fixés.

Depuis le début des années 2000, de plus en plus de directives entrent en vigueur afin d'offrir un cadre réglementaire concret en matière de gestion de l'énergie et des ressources aux Etats membres.

3.1.1. Directive 2023/1791/UE relative à l'efficacité énergétique

Le 13 septembre 2023, le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne modifient la directive 2012/27/UE qui établissait un cadre pour promouvoir l'efficacité énergétique au sein des Etats membres de l'Union et des objectifs à fixer pour ces derniers. La refonte de 2023 fixe un nouvel objectif pour la diminution de la consommation d'énergie (primaire et finale).

La directive 2023/1791/UE encourage, dans l'Article 25, la valorisation des énergies renouvelable et l'utilisation de la chaleur fatale en vue de décarboner les technologies de chauffage et de refroidissement dans le secteur du bâtiment (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2023).

Elle pose également, dans l'Article 26 alinéa premier, les critères pour un réseau de chaleur et de froid efficace en fixant des objectifs à atteindre concernant le taux d'énergie renouvelable ou de récupération de chaleur fatale pour un réseau thermique pour les prochaines années à venir. Le détail de ces objectifs se trouve en Annexe 3.

L'Annexe X de la directive développe la méthode d'analyse d'efficacité en matière de chaleur et de froid pour les réseaux de chaleur. C'est sur base de cette Annexe X que les bureaux d'étude RESOLIA et CLIMACT, associé au Service Public de Wallonie – Territoire, Logement, Patrimoine, Energie, établissent un nouveau rapport sur le potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid en juillet 2024 (modifiant celui de 2021), mentionné plus haut dans ce travail.

3.1.2. Directive 2023/2413/UE relative à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables (RED III)

Le 18 octobre 2023, le Parlement et le Conseil modifient la directive 2018/2001/UE (RED II), le règlement 2018/1999/UE ainsi que la directive 98/70/CE.

La directive 2023/2413/UE s'articule autour de la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables pour atteindre 45% de renouvelable dans la consommation énergétique des Etats membres d'ici 2030 (Parlement européen; Conseil de l'Union européenne, 2023). Pour ce faire, elle encourage la coopération entre les différents acteurs en matière d'énergie : les producteurs, les gestionnaires de réseau de transports et les consommateurs.

En ce qui concerne les réseaux de chaleur, y sont mentionnées les possibles sources de production de chaleur et de froid orientées vers la biomasse, la géothermie, le solaire thermique et la chaleur fatale pour répondre aux objectifs de maximisation de l'utilisation des énergies renouvelables.

3.2. Règlements en Wallonie

3.2.1. Décret du 15 octobre 2020 relatif à l'organisation du marché de l'énergie et aux réseaux d'énergie thermique

En Wallonie, le décret du 15 octobre 2020 relatif à l'organisation du marché de l'énergie thermique et aux réseaux d'énergie thermique instaure le principal cadre réglementaire pour les réseaux de chaleur.

Ce décret transpose notamment en partie la directive 2012/27/UE et la directive 2008/2001 qui ont toutes deux été revues en 2023. Le décret n'a pas été modifié depuis en Wallonie.

L'Article 2 définit un réseau d'énergie thermique comme étant : « *la distribution d'énergie thermique à partir d'une installation centrale ou décentralisée de production et à travers un réseau de canalisations vers plusieurs bâtiments ou sites, pour le chauffage ou le refroidissement de locaux ou pour le chauffage ou le refroidissement industriel.* » (Parlement wallon, 2020), ce qui rejoint la définition de Pascale Maes⁶.

En outre, ce décret :

- Définit les termes relatifs aux réseaux d'énergie thermique (Article 2) ;

⁶ Voir Chapitre II, 1.1. Concept d'un réseau de chaleur.

- Enonce des dispositions générales pour le fonctionnement d'un réseau : installation des compteurs, accessibilité des données pour les consommateurs et les gestionnaires de réseaux, protection de la vie privée (Articles 3 à 11) ;
- Traite du soutien du Gouvernement dans la réalisation de projets de réseaux d'énergie thermique : aspects de productions et aspects des réseaux *stricto sensu* (Articles 12, 13 et 14) ;
- Établit un cadre réglementaire entre les opérateurs de réseaux et les fournisseurs d'énergie thermique : modalités de désignation, gestion des tâches, obligations de service public, gestion des questions relatives à l'aménagement du territoire lors des projets (Articles 15 à 23, Article 28) ;
- Précise les sanctions et les procédures en cas de non-respect des articles du décret (Articles 24 à 27) (Parlement wallon, 2020).

3.2.2. Arrêté du gouvernement du 07 juillet 2022 relatif à l'organisation du marché de l'énergie thermique et aux réseaux d'énergie thermique.

En juillet 2022, un arrêté du gouvernement détaille les modalités pratiques d'application du décret du 15 octobre 2020. Cet arrêté a pour objectif « *d'encadrer légalement le marché et la vente de chaleur et de promouvoir le développement des réseaux d'énergie thermique sur le territoire wallon.* » (SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie; Deplasse et associés, 2023, p. 7).

Cet arrêté encadre, entre autres, les exigences et obligations auxquelles sont soumises à la fois les communes désireuses d'installer ou rénover un réseau de chaleur urbain, mais également les gestionnaires de projet. Il définit également une série de termes relatifs aux réseaux de chaleurs dont celui d'un réseau d'énergie thermique efficace, soit un « *réseau (...) utilisant au moins 50% d'énergie renouvelable, 50% d'énergie thermique fatale, 75% d'énergie thermique issue de la cogénération non renouvelable ou 50% d'une combinaison de ces types d'énergie ou de chaleur* » (Parlement wallon, 2022).

Il met en évidence la nécessité de réaliser une étude d'opportunité sur les possibilités de déploiement d'un réseau. Cette application sera détaillée dans le Chapitre III : Présentation du réseau de chaleur à Arlon, où une étude d'opportunité a été réalisée par IDELUX à la demande de la Commune d'Arlon. Cette étude d'opportunité doit contenir les projets de constructions ou rénovation du bâti concerné, les potentielles expansions du réseau et la mention des travaux de voiries prévus.

Cet arrêté est en cours de révision (Delneville, 2025, p. 7).

3.3. Subsidés

Le décret wallon du 15 octobre 2020 met en évidence que le Gouvernement fait office de soutien dans les projets de réseaux de chaleur puisqu'il peut « *mettre en place un mécanisme d'aide à l'investissement pour les nouveaux réseaux d'énergie thermique et pour l'extension ou la rénovation substantielle des réseaux d'énergie thermique existants* », si production issue du renouvelable, chaleur fatale ou cogénération (Parlement wallon, 2020).

En 2023, la Région Wallonne lance un appel à projets pour la réalisation ou l'extension de réseaux de chaleur sur le territoire régional avec un budget de 30 millions d'euros. Le discours est le suivant : « *Valoriser l'énergie fatale produite sur le territoire Wallon et augmenter le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour lutter contre le réchauffement climatique.* » (SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie, 2023).

Les objectifs sont de promouvoir la création de réseaux de chaleur en Wallonie, d'inciter les réseaux existants à s'étendre et de valoriser les sources issues des procédés industriels. L'offre propose de densifier et étendre un réseau existant ou d'en subventionner un s'il utilise à minima 50% d'énergie renouvelable issue de la géothermie ou du solaire thermique ou issue de la chaleur fatale des procédés industriels. Toute entreprise ou opérateur public peut en bénéficier.

Néanmoins, trois conditions sont *sine qua non* à la candidature :

- Le principe d'efficacité inscrit dans l'article 1 de l'arrêté du gouvernement wallon du 07 juillet 2022 (définition au point 3.2.2 du présent chapitre) ;
- Un minimum de 250 consommateurs ou 2 mégawatts de puissance consommée ;
- La nécessité, pour un nouveau réseau, d'utiliser un minimum de 95% d'énergie renouvelable ou fatale.

L'appel à projet a été clôturé le 5 janvier 2024 et le projet Réseau de chaleur d'Arlon, présenté au Chapitre III n'est pas candidat.

CHAPITRE III : Présentation du réseau de chaleur à Arlon

1. Mise en contexte du projet Réseau de chaleur à Arlon : étude de préféabilité réalisée par IDELUX

En juin 2024, IDELUX publie une étude de préféabilité dans le cadre d'un projet de réseau de chaleur dans la ville d'Arlon, chef-lieu de la Province du Luxembourg. Une étude d'opportunité est réalisée et permet de parcourir les pistes et options à considérer dans le cadre de ce projet. L'objectif premier, que l'on retrouve dans le premier paragraphe de l'introduction vise à ce que : « *Ce réseau de chaleur (soit) alimenté à 100% par des sources d'énergie renouvelable qui, le cas échéant, pourront être combinées pour satisfaire la demande de chaleur.* » (Dubois, 2024).

Ce premier point « Mise en contexte du projet Réseau de chaleur à Arlon » a été rédigé à l'aide du document précité, écrit par Sébastien Dubois, chef de projets énergie pour l'entreprise IDELUX. Toute autre information présente sera sourcée de manière individuelle ; le reste émanant cette étude d'opportunité, la source utilisée est celle susmentionnée et ne sera pas répétée.

1.1. Périmètre du projet

Les bâtiments pressentis pour intégrer le réseau sont principalement des bâtiments administratifs du centre-ville d'Arlon ainsi que deux implantations externes : le centre sportif de la Spetz et le Campus Environnement de l'Université de Liège.

Sur la figure suivante (voir Figure 11) :

- Les bâtiments administratifs communaux pressentis soient la Caserne Léopold dans son ensemble, l'Hôtel de Ville, la Résidence de la Knippchen (maison de repos) ainsi que l'Ecole Communale fondamentale du Centre (école primaire et crèches) ;
- Le Campus Environnement de l'Université de Liège ;
- Le centre sportif de la Spetz ;
- Un terrain appartenant à l'Université de Liège où des sondes géothermiques pourraient éventuellement, selon l'étude de préféabilité, être implantées afin de fournir une source de production de chaleur géothermique au réseau de chaleur urbain ;
- La source de la Semois, située au nord-ouest du Campus Environnement.

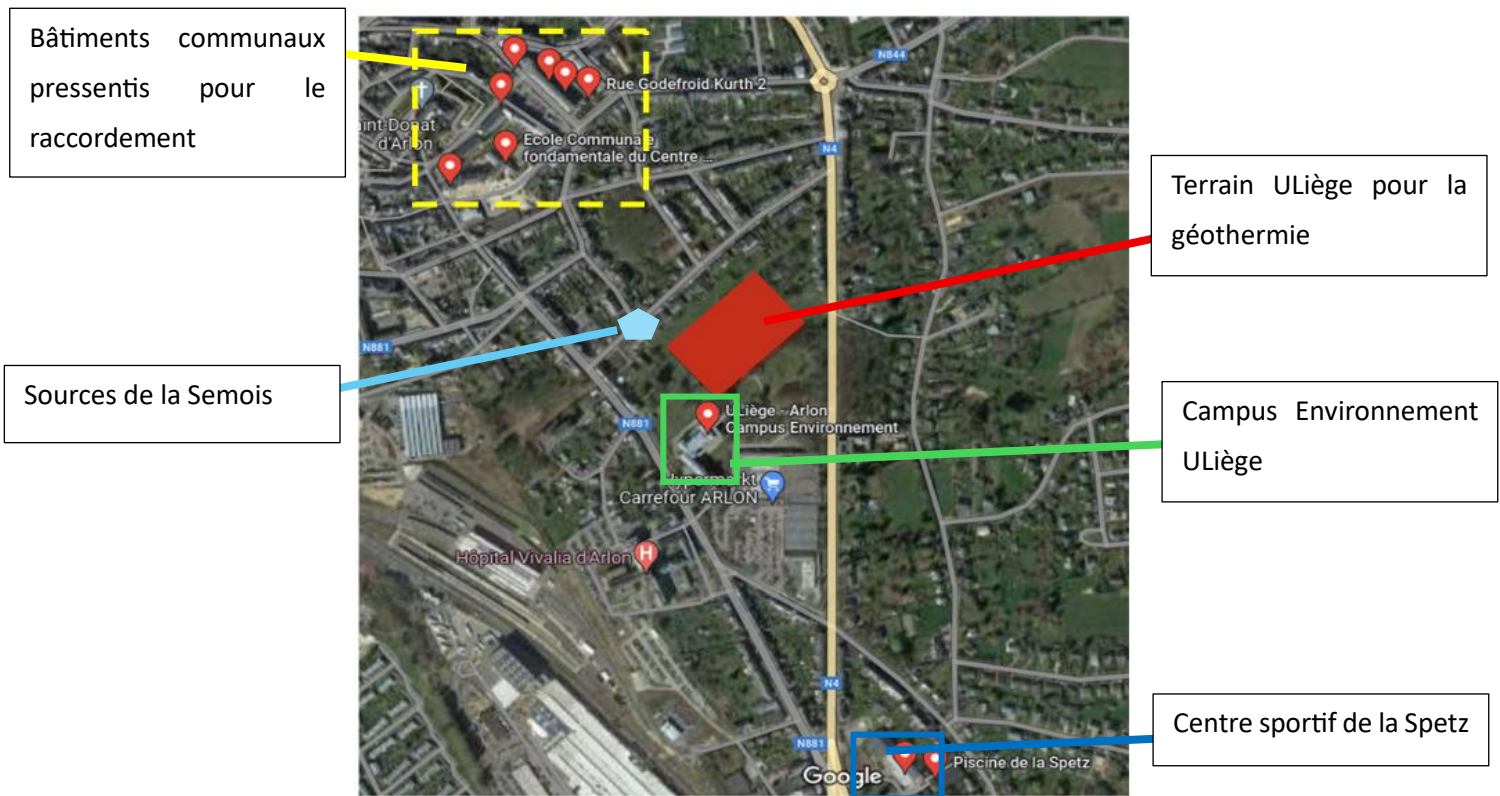


Fig. 11 Vue générale du projet avec bâtiments pressentis pour le réseau de chaleur à Arlon. Source : IDELUX (2024), modifiée par l'auteure (2025).

L'étude de pré faisabilité mentionne l'expansion possible du réseau à d'autres bâtiments sur le tracé : la banque BNP PARIBAS Arlon, la résidence « Les Thermes », la Maison de la Laïcité, le Service fédéral des pensions, l'Eglise du Sacré Cœur, la zone Carrefour-Brico-Auto5 ainsi que la possible future affectation de l'actuel hôpital VIVALIA. Tous les bâtiments additionnels mentionnés se trouvent à proximité immédiate du parcours pressenti, sur la figure ci-dessous. IDELUX évoque également l'idée d'étendre le réseau au bâti résidentiel avoisinant afin d'avoir une demande en chaud complémentaire puisque le tertiaire est, en général, inoccupé durant le week-end et les soirées.

Le parcours pressenti pour le réseau de chaleur est représenté sur la figure suivante (voir Figure 12). Les lieux considérés comme pouvant accueillir une unité de production de chaleur sont au niveau de la Spetz ainsi que sur le Campus Environnement (croix rouges sur la Figure 12). Le circuit partirait de la Spetz sur l'Avenue de Longwy pour rejoindre la rue des Déportés, poursuivrait dans la rue Paul Reuter pour finir sur la Place des Chasseurs Ardennais. Le tracé est d'environ 1 500 mètres.

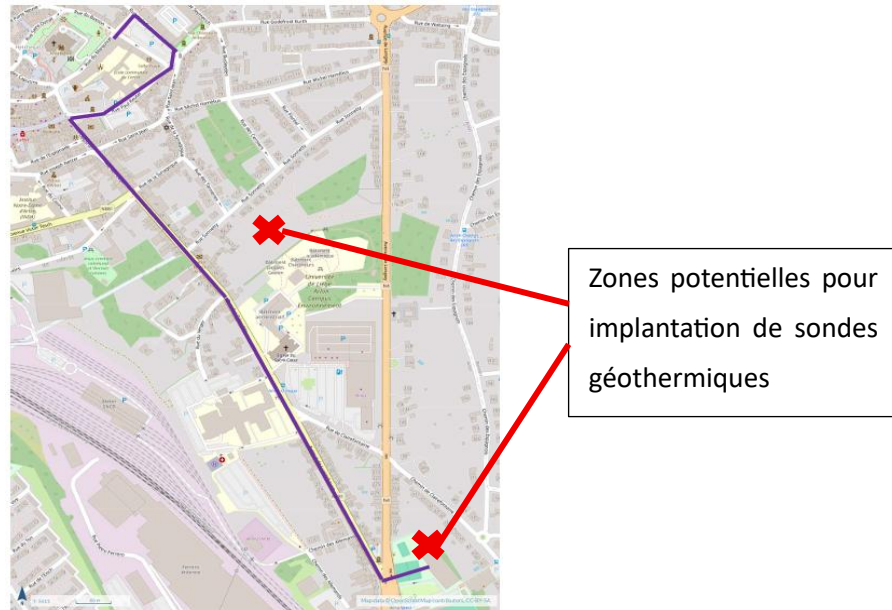


Fig. 12 Tracé potentiel du réseau de chaleur à Arlon.
 Source : Etude de préféabilité IDELUX (2024).

1.2. Contraintes potentielles à l'implantation du réseau de chaleur

L'étude de préféabilité fait état de diverses contraintes techniques, topographiques et environnementales qui pourraient constituer un frein plus ou moins important à la réalisation du projet. Dans ce rapport se trouvent une analyse topographique, une analyse environnementale, une analyse du sous-sol, ainsi que des points d'attention quant à la fréquentation des voiries pressenties pour le réseau de distribution primaire ainsi que la présence éventuelle de sites archéologiques sur le sol arlonais.

Concernant la topographie, l'étude fait état d'une différence de 28 mètres entre le point le plus bas présent sur le tracé (situé au croisement de la rue des Déportés et de la rue Sonnetty) et le point le plus haut (la résidence de la Knippchen). Le croisement se situe dans une cuvette entre deux points hauts, le deuxième point le plus haut étant le Campus Environnement.

Au niveau de l'analyse environnementale, IDELUX mentionne la proximité du tracé avec la source de la Semois (losange bleu ciel sur la Figure 11) et fait état de captages à proximité de la source. Claire Deroanne, chargée de projets chez IDELUX confirme que ces prises d'eau ne sont pas destinées à la consommation humaine (Deroanne, 2025).

Pour le sous-sol, le rapport fait mention de l'existence de câbles téléphoniques de la Défense, du réseau de gaz ORES, du réseau de distribution électrique ORES, du réseau de télédistribution VOO, du réseau téléphonique PROXIMUS, du réseau de distribution d'eau de la Société Wallonne des Eaux ainsi que du réseau d'égouttage de la ville.

1.3. Analyses thermiques

Concernant les systèmes de chauffage des bâtiments pressentis (hors expansion), les puissances des chaudières installées ont été recensées pour obtenir une puissance totale installée de 5 770 kW sur l'ensemble du réseau.

Les régimes de température sont pour la plupart à 60/40°C sauf pour la résidence de la Knippchen qui est à 70/50°C. Sur base de ces régimes, le rapport évoque l'idée d'un remplacement des systèmes de chauffages afin de passer à des régimes à basses températures.

Les consommations ont été calculées, pour chaque code EAN⁷ et pour l'année 2022, sur base de reconstitutions effectuées au moyen des relevés de consommation de gaz de ville disponible chez le gestionnaire de réseau ORES et de profils types de demande de chaleur fournis par l'outil d'aide à la décision en efficacité énergétique des bâtiments du secteur tertiaire Energie Plus Le Site.

Il est à noter que certains bâtiments ont plusieurs affectations. C'est le cas, notamment, du bloc B de la Caserne Léopold qui comprend une partie des classes de l'Ecole Industrielle en journée, ainsi que l'Académie des Beaux-Arts d'Arlon en soirée. De même que pour l'Ecole du Centre qui accueille en soirée et le week-end à la fois l'Académie du Musique ainsi que l'Ecole de Cirque d'Arlon. Les profils de ces différentes occupations ont donc été réalisés bien que présents au sein d'un même bâtiment.

Ci-dessous, la Figure 13 montre un graphe des consommations de l'ensemble des sites rassemble les données recueillies lors de l'étude de préfaisabilité présentée par IDELUX.

Il en ressort que les plus gros consommateurs d'énergie à destination du chauffage sont le Campus Environnement de l'Université de Liège (hors périodes de vacances scolaires), la maison de repos Knippchen ainsi que la piscine du centre sportif de la Spetz. Par ailleurs, on constate que, durant les périodes plus chaudes (mai, juin, juillet, août et septembre pour l'année 2022 avec des température moyenne extérieures supérieures à 15°C – page 33 de l'étude), la résidence Knippchen et la piscine conservent des consommations sensiblement plus élevées que les autres profils d'occupation.

⁷ European Article Numbering, code composé de 18 chiffres et lié aux fournisseurs en électricité ou gaz.

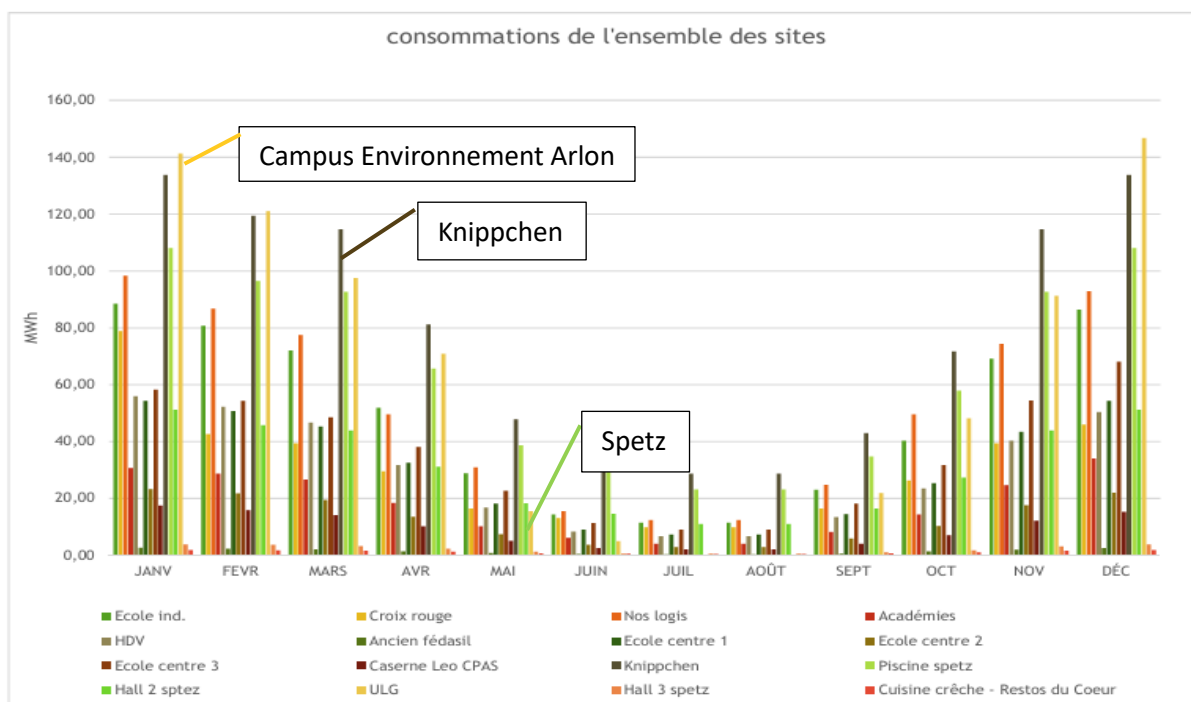


Fig. 13 Consommation théorique des sites pressentis pour le réseau de chaleur à Arlon. Source : étude de préféabilité IDELUX (2024).

1.4. Sources de production de chaleur envisagées

L'objectif du projet est d'alimenter à hauteur de 100% le réseau de chaleur urbain d'Arlon en énergies renouvelables, combinées ou non. De ce fait, plusieurs sources de chaleur ont été envisagées et sont présentées dans l'étude de préféabilité d'IDELUX.

La chaleur fatale est proposée en premier. L'usine FERRERO étant à proximité du tracé, il est possible d'envisager une récupération de chaleur fatale des procédés industriels du biscuitier. Toutefois, l'usine étant en période de remplacements de ses appareils, elle s'est finalement détachée du projet.

La géothermie peu profonde ouverte sur nappe ou fermée avec sondes verticales est mentionnée. En effet, Arlon est situé sur la masse d'eau souterraine RWM092. Cependant, la Société wallonne des eaux dispose de plusieurs captages dans la région utilisés pour récupération d'eau potable (Deroanne, 2025).

La riothermie est mentionnée comme source potentielle avec l'identification d'un collecteur situé au croisement de la rue des Déportés sur le tracé pressenti. Des mesures ont été effectuées par IDELUX et, pour trois jours de mars 2024, les températures dans le réseau d'égout ont oscillé entre 10.5°C et 12.8°C, avec un débit moyen compris entre 10 et 50 m³/h. Cependant, la littérature consultée sur la riothermie ainsi que l'étude de préféabilité confirment la nécessité d'un débit supérieur à 100 m³/h (Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024). En deçà, le potentiel riothermique est considéré par IDELUX comme modéré.

2. Etude de cas : les blocs D et E de la Caserne Léopold

2.1. La Caserne Léopold

La Caserne Léopold, qui se situe rue Godefroid Kurth à 6700 Arlon, est construite entre 1838 et 1839. Arlon étant devenu chef-lieu de la Province du Luxembourg à la même époque, il faut doter la ville d'une garnison militaire. De 1843 à 1940, elle abrite divers régiments militaires mais à l'orée de la Seconde Guerre mondiale, la Caserne est occupée par les Allemands (Demuysère, 2024). Toute la deuxième moitié du XXe siècle, la Caserne aura plusieurs occupations par la Défense jusqu'à la fin des années nonantes où la Ville d'Arlon rachète les lieux pour y installer de nouveaux services locaux.

Aujourd'hui, l'ancienne caserne militaire compte plusieurs sites et services de la fonction publique répartis comme suit :

Tab. 2 Séparation des différents blocs de la Caserne Léopold à Arlon. Source : auteure (2025).

Bloc	Services abrités
Bloc E	Croix-Rouge Crèche Office national de l'enfance (ONE) Quelques classes de l'Ecole Industrielle Garde-meuble non chauffé
Bloc D	Abri de nuit (avec accueil de jour pour les douches et l'accès aux machines à laver et séchoirs) Maison des jeunes d'Arlon (coin entre le bloc D et E)
Bloc B	Ecole Industrielle (cours du jour et cour du soir) Académie des Beaux-Arts de la ville d'Arlon (en fin d'après-midi et soirée)
Bloc A	Appartement (une personne)
Bloc H	Appartement (une personne)
Bloc I	Centre public d'action sociale (CPAS) Épicerie sociale
Bloc G	Cuisine de la crèche du bloc E Cuisine des restos du cœur Nos logis (37 appartements sociaux d'urgence pour une, deux ou trois personnes)

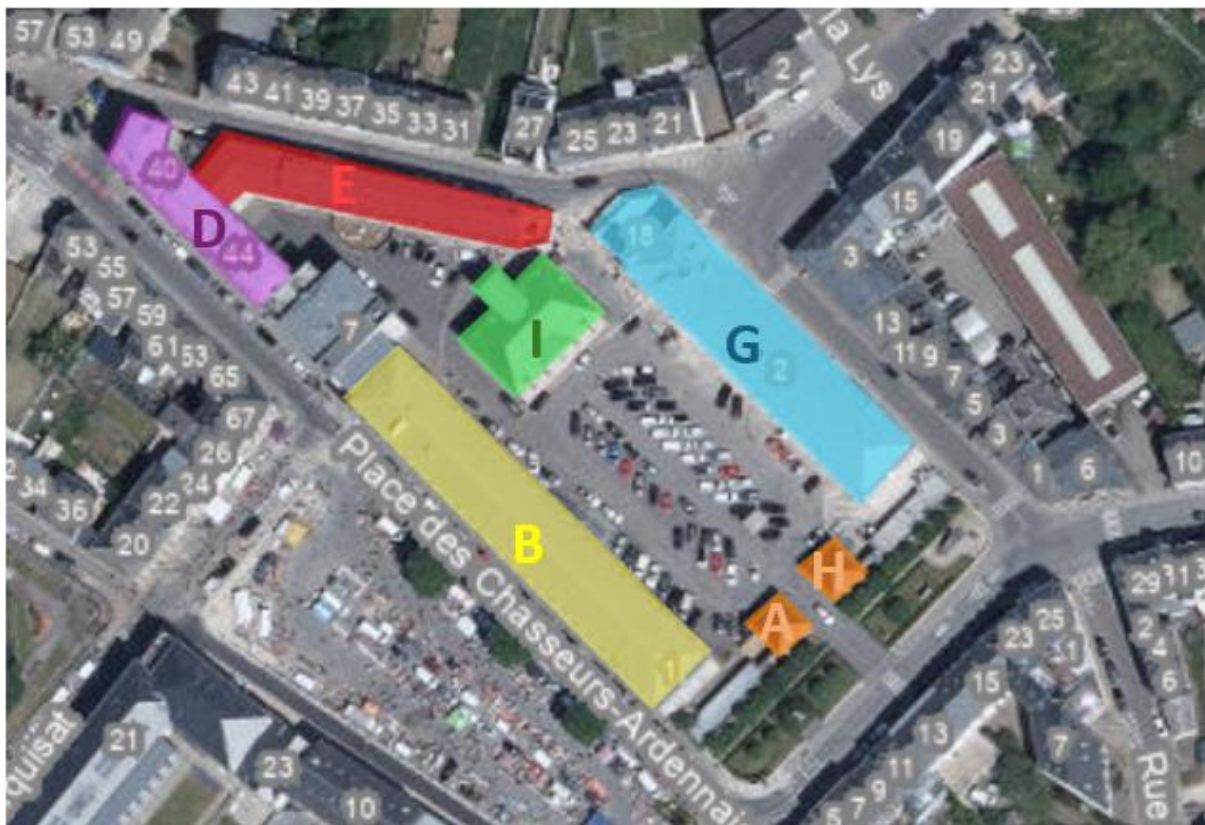


Fig. 14 Blocs de la Caserne Léopold à Arlon. Source : auteure & Google Earth (2025).

Sur la figure ci-dessus sont représentés les différents sites mentionnés dans le Tableau 2.

Le bloc gris situé entre les blocs D et B ne fait pas partie de l'étude, il s'agit d'un bâti privé.

Après avoir effectué une première visite du site, il apparaît que certaines chaudières alimentent plusieurs espaces de la Caserne. On constate notamment que les blocs D et E sont alimentés par la même chaudière ; le bloc B étant fourni par une chaudière tierce.

De ce fait, il a été décidé, pour la réalisation de ce travail, de se concentrer uniquement sur les blocs D et E pour l'analyse des consommations et les simulations du besoin en chaud.

2.2. Usage et occupation des blocs D et E

Les blocs D et E sont scindés en plusieurs fonctions et services. Afin de comprendre l'usage et l'occupation des sites, une description sous forme de tableau est proposée afin de mettre en évidence les différentes occupations de chaque site mentionné dans le cadre de cette étude (soient les blocs D et E uniquement) :

Tab. 3 Séparation des lieux occupés dans les blocs D et E de la Caserne Léopold. Source : auteure (2025).

Service	Occupation
Maison des Jeunes (coin des blocs D et E)	La maison des jeunes compte 5 employés et accueille des jeunes jusqu'à 25 ans de 10h à 18h. De nombreuses activités sont proposées tout au long de l'année et le taux d'occupation varie énormément en fonction des périodes. Durant les vacances scolaires, des stages sont organisés accueillant, selon les responsables, le triple de personnes comparé aux semaines régulières. L'occupation se fait sur un rez-de-chaussée, un premier étage et un second étage (le troisième étant condamné).
Croix-Rouge (bloc E)	Une dizaine de personnes sont employées à la Croix-Rouge et le service accueille, de 7h30 à 17h15 toute personne nécessitant un service de la Croix-Rouge. Une boutique sociale se trouve également dans ce site, ouverte du lundi au vendredi. Ce site occupe le premier étage du bloc E.
Crèche (bloc E)	Composée de six membres du personnel, ce site accueille quinze enfants de 7h30 à 16h30 environ. La crèche se situe au rez-de-chaussée du bloc E.
ONE (bloc E)	L'ONE accueille, du mardi au jeudi parents et enfants avec l'aide de quatre personnes travaillant sur place. Le site occupe également le rez-de-chaussée du bloc E
Garde-meuble (bloc E)	Un garde-meuble non chauffé se situe au troisième étage du bloc E.
Classes de l'Ecole Industrielle (bloc E)	Certaines classes de l'Ecole Industrielle se trouvent au sein du bloc E, accueillant des élèves en période scolaire de 8h à 17h. Les classes occupent le rez-de-chaussée, le premier ainsi que le deuxième étage du bloc E.
Abri de nuit (bloc D)	L'abri de nuit accueille, du 1 ^{er} octobre au 31 mai, vingt-deux personnes dans des dortoirs situés au premier étage. Le second étage accueille vingt personnes supplémentaires en période de grand froid. Le troisième étage est condamné (il rejoint notamment le troisième étage de la Maison des jeunes). Au rez-de-chaussée, on trouve des douches, un espace buanderie ainsi qu'un bureau ; le tout ouvert chaque jour de l'année.

2.3. Typologie de consommation des blocs D et E

Afin de clarifier la définition des zones, plusieurs visites des sites ont été organisées entre février 2025 et avril 2025, dont une pour la Caserne Léopold.

Au préalable, un questionnaire a été réalisé et envoyé, sous forme de questions ouvertes, au personnel communal participant aux visites afin d'obtenir d'éventuels éléments manquants.

2.3.1. Gaz

Les visites ont permis de voir les systèmes de chauffage, l'état et l'ancienneté des chaudières, les zones y étant raccordées ainsi que la confirmation des puissances pour celles où les informations étaient manquantes. Il a ainsi été confirmé que les blocs D et E de la Caserne Léopold étaient raccordés à la même chaudière avec un seule code EAN.

Des données de consommation ont été obtenues par l'intermédiaire de la commune et les relevés ont permis d'obtenir une consommation pour l'année de référence 2022 de 367 400 kWh annuels. Cette valeur a été recalculée sur base des relevés effectués au 24 janvier 2022 et au 14 février 2023. Afin de calibrer ces données sur l'année 2022 complète, du 1^{er} janvier au 31 décembre, les données kWh ont été agrégées en fonction d'un profil type de consommation fourni par Energie Plus Le Site.

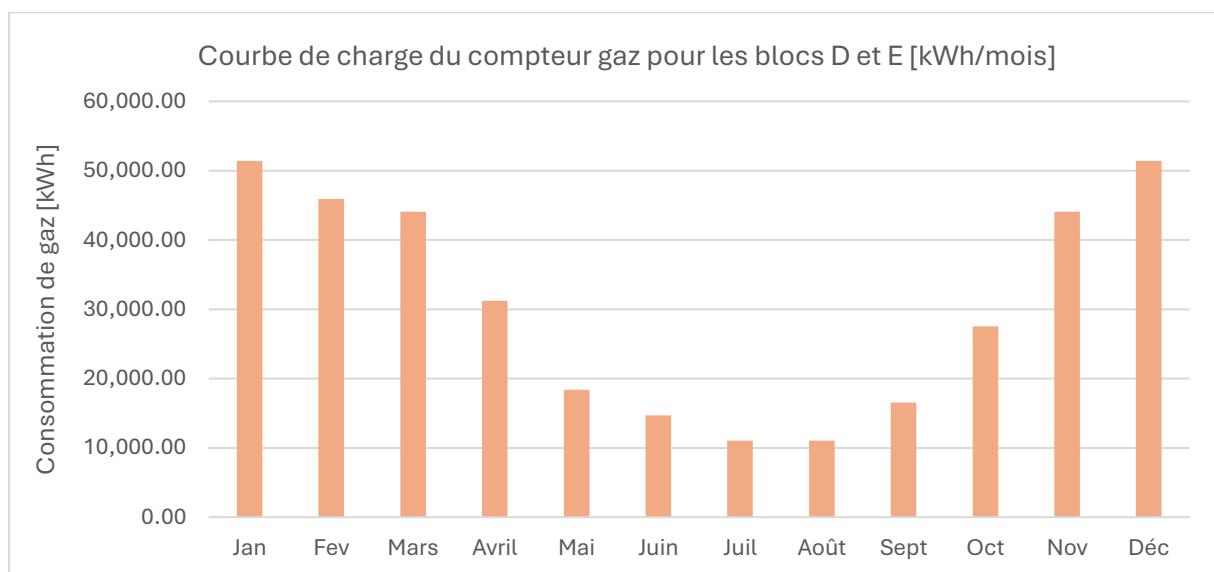


Fig. 15 Courbe de charge du compteur gaz pour les blocs D et E [kWh/mois] pour l'année 2022. Source : IDELUX (2024).

La valeur de la consommation totale annuelle sera utile ultérieurement afin d'effectuer les simulations et de paramétrer le bâtiment au plus près de la réalité. La superficie totale des blocs D et E fait 1 013m². La consommation spécifique annuelle est donc de 363 kWh/m², ce qui correspond aux standards d'un vieux bâtiment non isolé disposant d'une inertie thermique importante par sa compacité.

La Figure 15 montre un profil annuel assez cohérent pour une consommation de gaz à destination du chauffage. Les mois estivaux, de mai à septembre environ, ont une consommation de chauffage assez basse mais néanmoins présente. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le chauffage n'est pas coupé durant la période d'été et que la plupart des vannes thermostatiques présentes dans les blocs D et E sont accessibles aux occupants qui peuvent les régler manuellement. Sur la Figure 13, la « Croix-Rouge » correspond au compteur gaz des blocs D et E et montre également une légère consommation durant l'été.

2.3.2. Electricité

Concernant l'électricité, une difficulté est apparue : un seul compteur électrique rassemble les consommations qui alimentent les blocs D, E et B de la Caserne Léopold.

La consommation associée à ce compteur pour l'année 2022 est de 153 900 kWh électriques annuels. Cette valeur a également été recalculée sur base d'un profil de consommation annuel en fonction des relevés effectués.

Il est important de noter que cette valeur comprend la consommation de trois blocs distincts de la Caserne :

- Le bloc E, qui compte, comme expliqué, la Croix-Rouge, l'ONE, la Maison des Jeunes, une crèche communale ainsi que les classes de l'Ecole Industrielle et des combles non-occupés ;
- Le bloc D, où se situe l'abri de nuit ;
- Le bloc B, qui abrite l'Ecole Industrielle (journée) ainsi que l'Académie des Beaux-Arts (soirée).

Il faudra donc calculer la part de consommation électrique du bloc B, qui sera ensuite déduite de la consommation électrique totale de ce compteur. Ceci permettrait de connaître la part consommée par les blocs D et E uniquement.

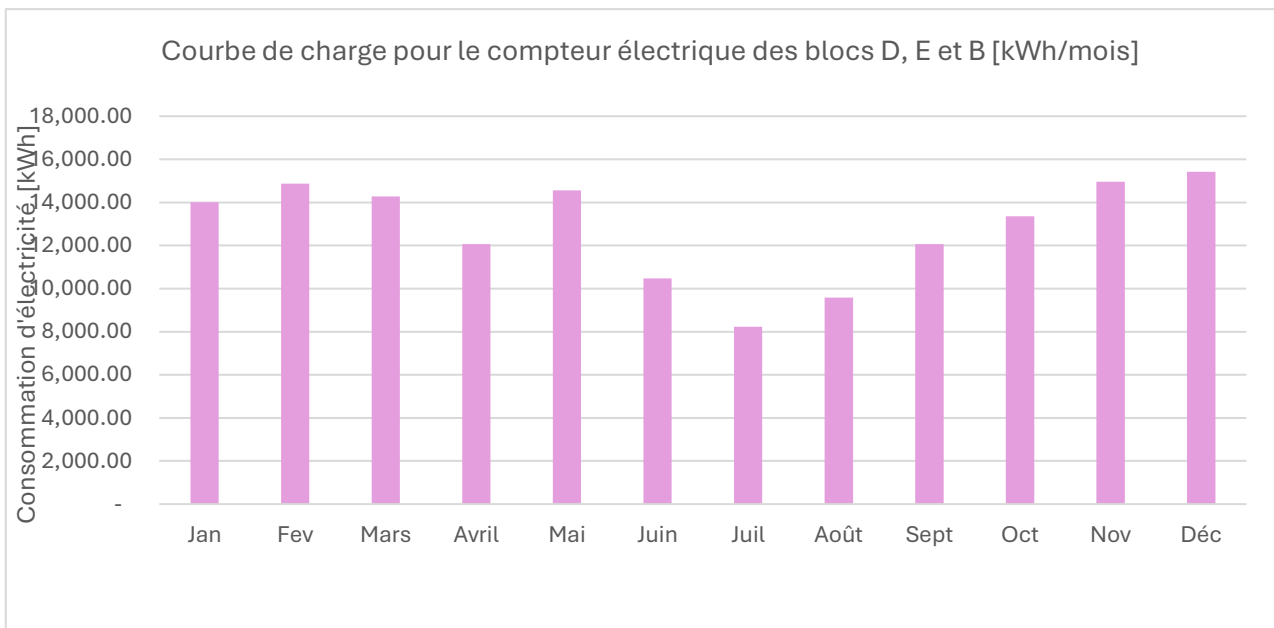


Fig. 16 Courbe de charge pour le compteur électrique des blocs D, E et B [kWh/mois] pour l'année 2022. Source : IDELUX (2024).

La Figure 16 établit les consommations électrique mensuelles qui semblent assez constantes et diminuent durant les mois de juin, juillet et aout. Cette diminution pourrait être induite par la fermeture partielle du bloc B durant les vacances scolaires, le site accueillant uniquement l'Académie des Beaux-Arts et l'Ecole Industrielle étant fermée pour la période.

CHAPITRE IV : Méthodologie des simulations par TRNSYS 18

pour l'année 2022

1. Simulation A : situation initiale des blocs D et E

TRNSYS, pour TRaNsient System Simulation tool, est un logiciel de simulation dynamique utilisé afin de modéliser, calibrer et analyser des systèmes thermiques et énergétiques en étude de bâtiments. Ce logiciel permet de modéliser un bâti avec des composantes d'enveloppes et de systèmes mais également d'ajouter des composantes externes comme des pompes à chaleur, des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, d'implémenter des données météorologiques du monde entier afin d'observer son comportement.

Dans le cadre de ce travail, le fichier SketchUp (pour le montage en trois dimensions du bâti, voir Figure 17) ainsi que le fichier .b18 (qui est lu en intégralité par le Type 56 et modifiable par l'interface TRNBuild) ont été effectués par Jonas Lambert, architecte et Elisabeth Davin, chercheuse. L'interface de simulation (SimulationStudio) avec implémentation des données météorologiques d'Arlon a été réalisée par Elisabeth Davin. Cette interface simple a été ensuite modifiée par l'auteure afin d'y implémenter des consignes de température et d'occupation par le biais de fichiers textes ; l'interface du bâtiment (Type 56 dans TRNbuild) a été modifiée afin de correspondre au mieux à la réalité.

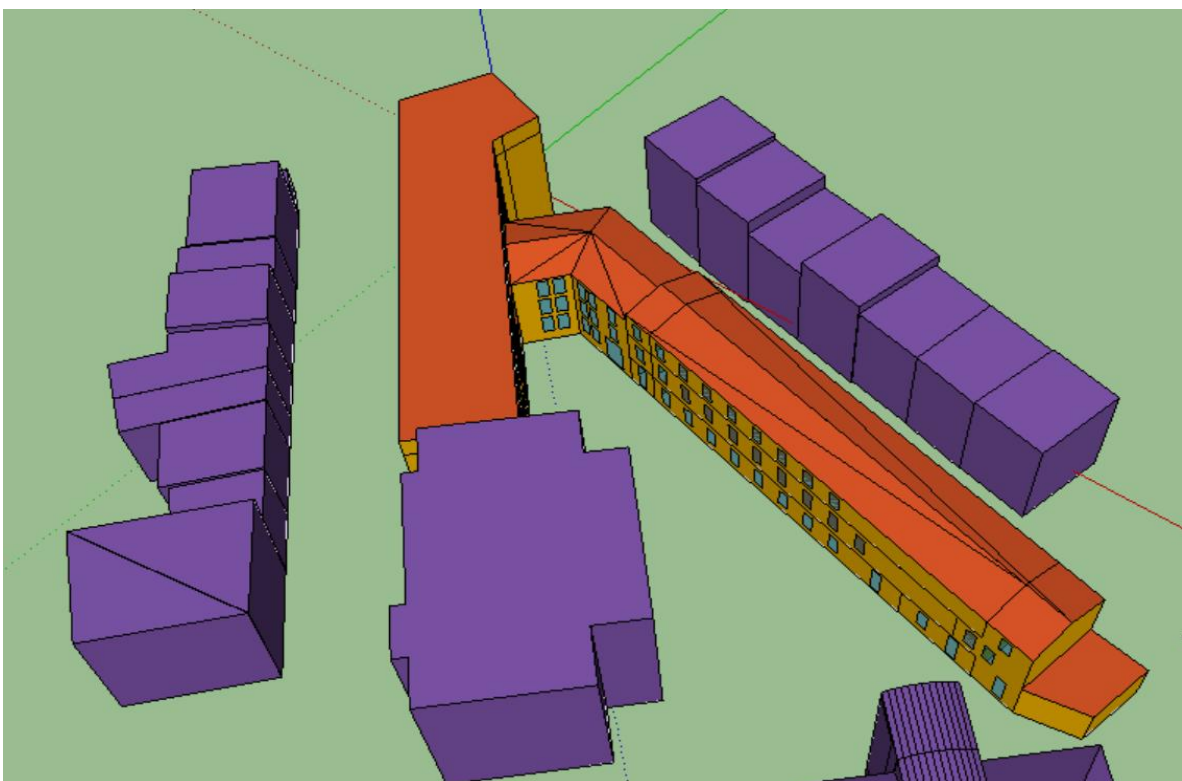


Fig. 17 Sur SketchUp : Blocs D (à gauche) et E (à droite) de la Caserne Léopold avec bâtiments autour (en mauve) modélisés pour ombrage. Source : Jonas Lambert et Elisabeth Davin (2025).

1.1. SimulationStudio

SimulationStudio est l'interface sur laquelle l'utilisateur peut concevoir une simulation. Les composants utilisés pour la première simulation sont :

- Type 9e⁹ : « data reader », permet de lire un fichier texte (.txt). Ici, il est utilisé pour lire les données de la station météorologique du BEMS pour l'année 2022, heure par heure avec la température extérieure [°C], l'irradiance [W/m²], le taux d'humidité relative dans l'air [%] ainsi que la pression atmosphérique [mBar]. Ce type lit aussi les différentes consignes de températures et de gains internes de personnes dans les zones thermiques du Type 56 ;
- Type 33e : transmet les informations du fichier .txt ci-dessus pour connaître la température sèche et le point de rosée ;
- Type 16c : calcule les paramètres solaires depuis le Type 9 qui lit les données météorologiques et transmet l'information au Type 69b ainsi qu'au Type 56 ;
- Type 69b : renvoie une température fictive du ciel au Type 56 ;
- Type 56 : représente le bâtiment, ce type sera analysé dans le point 1.2. « TRNBuild » ;
- Type 65d : « plotter », permet d'obtenir des graphes dans l'interface TRNEXE ;
- Type 24 : « integrator », intègre les données horaires sur une année ;
- Equa : calculatrice qui convertit, dans cette simulation, des unités kJh (sortie de TRNBuild dans le Type 56) en kWh/m² de surface pour chaque zone.

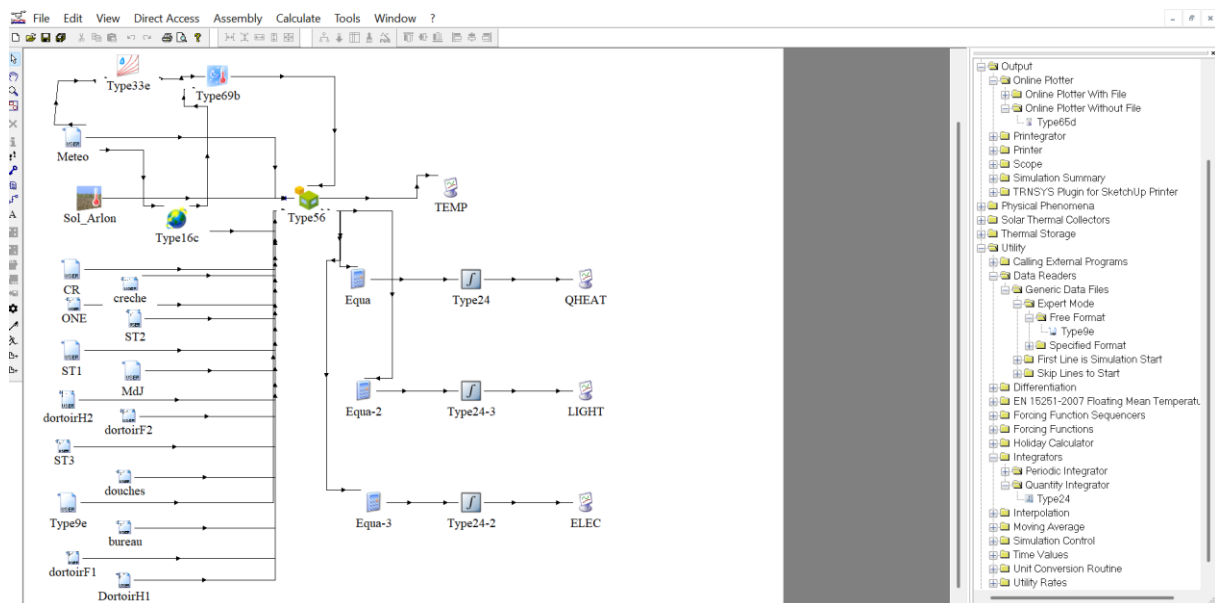


Fig. 18 Interface sur SimulationStudio de la simulation initiale pour la Caserne Léopold. Source : auteure (2025).

⁹ Par facilité, ils ont tous été nommés dans l'interface de simulation présentée afin de voir directement à quels fichiers .txt ils correspondent.

1.2. TRNBuild

TRNBuild est l'interface dédiée au Type 56 où il est possible de modifier les paramètres liés aux blocs D et E de la Caserne Léopold.

1.2.1. Airnodes : zones thermiques définies

Afin de mieux comprendre le travail effectué dans TRNBuild, voici un tableau des zones détaillées et modélisées, avec leur superficie respective et les blocs dans lesquels elles se trouvent.

Tab. 4 Zones thermiques définies et surfaces. Source : auteure (2025).

Zone thermique définie	Surface [m ²]
Combles 1 (bloc E, 2 ^e étage)	300
Croix-Rouge (bloc E, 1 ^{er} étage)	28
Crèche (bloc E, rdc)	23
ONE (bloc E, rdc)	6
ST2 (bloc E, cage d'escalier droite)	54
ST1 (bloc E, cage d'escalier gauche)	25
Classes industrielles (bloc E, sur 2 étages)	137
Maison des Jeunes (« MdJ », sur le coin des blocs D et E, sur 2 étages)	190
Dortoir H2 (bloc D, dortoir hommes de l'abri de nuit, 2 ^e étage)	109
ST3 (bloc D, cage d'escalier centrale de l'abri de nuit)	54
Dortoir F2 (bloc D, dortoir femme, 2 ^e étage)	53
Combles 2 (bloc D, 3 ^e étage)	386
Douches (bloc D, abri de nuit, rdc)	32
Bureau (bloc D, abri de nuit, rdc)	109
Dortoir F1 (bloc D, dortoir femme, 1 ^e étage)	32
Dortoir H1 (bloc D, dortoir homme, 1 ^e étage)	109

1.2.2. Construction Types

Dans TRNBuild, il est possible de créer des couches de matériaux spécifiques, de créer des compositions de parois pour chaque mur intérieur ou extérieur, les fenêtres et vitraux peuvent être constitués à l'aide d'une bibliothèque de composantes correctement fournie pour déterminer un simple, double ou triple vitrage.

Le fichier en format .b18, lu par le Type 56, a été reçu avec des compositions de parois définies par l'architecte. Ces compositions de parois seront modifiées ultérieurement.

1.2.3. Regime Types

1.2.3.1. Infiltration

La valeur à encoder dans TRNBuild pour l'infiltration est en volume par heure [vol/h] et correspond au taux de ventilation saisonnier moyen : « n_{sb} » (Hauglustaine & Simon, 2018, p. 17). Celui-ci est calculé en divisant le « n_{50} » par un facteur d'exposition au vent « a », selon la relation suivante :

$$n_{sb} = \frac{n_{50}}{a}$$

Le facteur « a » est généralement compris entre 10 pour les zones où l'exposition au vent est très forte et 30, où l'exposition au vent est très faible. Les valeurs utilisées oscillent généralement entre 15 et 25 pour les villes comme Arlon (Abrahams, 2024). La Caserne étant assez entourée, comme le montre la Figure 17, le facteur « a » a été fixé à 25.

La valeur « n_{50} » doit être fixée à l'aide de la littérature puisqu'aucun test d'étanchéité à l'air n'a été effectué. Toutefois, l'outil en ligne Energie Plus Le Site dispose d'un guide pour évaluer l'étanchéité de l'air d'un bâtiment. Un graphe détaille les valeurs « n_{50} » moyennes, soit l'infiltration sous 50 Pa, en fonction des années de 1900 à 1980 (Energie Plus Le Site, 2007) (Annexe 4). La Caserne ayant été construite en 1838, la valeur « n_{50} » reprise est celle de 1900, soit une valeur de 7 environ. Cette hypothèse est posée en raison du manque d'information sur les valeurs d'infiltration des bâtis datant du XIXe siècle.

$$n_{sb} = \frac{n_{50}}{a} = \frac{7}{25} = 0.28 \text{ vol/h}$$

L'infiltration a été fixée à 0.28 pour l'ensemble des blocs sauf pour les combles du bloc E, dont la toiture a été rénovée et pour laquelle l'infiltration a été baissée à 0.25 vol/h pour diminuer l'infiltration initiale de 10% grâce à l'isolation de la toiture des combles, sur base d'hypothèses formulées collégialement avec l'équipe du BEMS.

1.2.3.2. Chauffage

Afin de coller au mieux à la réalité d'utilisation des différentes zones thermiques des bâtiments, les consignes de chauffage ont été ordonnées à l'aide d'un fichier .txt lu dans un Type 9, dont les « outputs », soient les colonnes du fichier, sont transmises au Type 56 par le biais d'« inputs », créés dans TRNBuild afin de les appliquer au bâtiment.

Dans un premier temps, un fichier Excel a été réalisé pour chaque zone, indiquant pour chaque heure de l'année la température de consigne dans la zone ainsi que les gains internes liés à l'occupation.

Ces fichiers ont été formatés en .txt afin de pouvoir les intégrer au Type 9 pour les faire lire lors de la simulation.

Dans l'interface TRNBuild, un « input » est créé pour représenter la température de consigne établie heure par heure, pour chaque zone thermique :

T_Creche °C Input

Fig. 19 Exemple d'un input créé dans TRNBuild. Source : auteure (2025).

Ensuite, un « Heating Type » est créé pour chaque zone thermique définie. La consigne de température est donnée par un « input » avec l'ordre de lire une fois l'« input » :

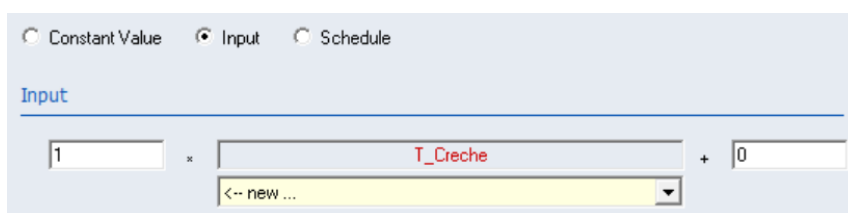


Fig. 20 Lecture de l'input dans TRNBuild. Source : auteure (2025).

Enfin, dans la zone thermique concernée, la consigne de température fixée sera atteinte par le mode de chauffage lu pour la zone par l'« input » créé précédemment.

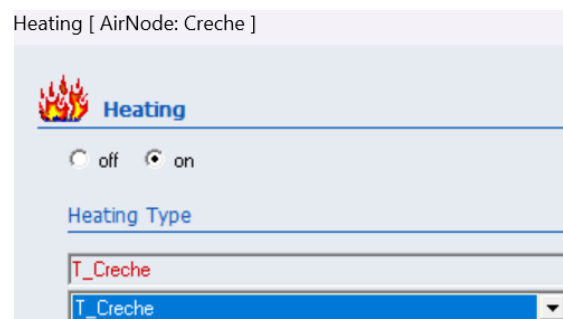


Fig. 21 Consigne de température dans TRNBuild. Source : auteure (2025).

Cette méthodologie est particulièrement intéressante à utiliser pour la paramétrisation de l'occupation du bâtiment et de la consommation. En effet, la possibilité, dans un fichier Excel ou .txt, de pouvoir implémenter des périodes de congés, des ralentis nocturnes, de pouvoir modifier les consignes de températures à une heure très précise de la journée, s'avère utile pour représenter au mieux l'utilisation réelle du bâtiment ou de la zone.

L'utilisation de l'outil « Schedules » dans TRNBuild est pertinente pour une utilisation simple d'un bâtiment qui aurait une consigne de température très stable, réglée par thermostat avec une ouverture tout au long de l'année ou encore peu de zones avec des utilisations bien différentes les unes des

autres. Si la calibration hebdomadaire dans TRNBuild est assez simple à exécuter, l'utilisation annuelle d'un bâtiment requiert une calibration plus modulable pour coller au mieux à la réalité, ce qui est difficilement exécutable dans TRNBuild avec l'outil « Schedule ».

De ce fait, les fichiers .txt seront utilisés ultérieurement dans ce travail pour paramétrer l'amélioration des systèmes avec contrôle des consignes de températures, afin d'imiter le comportement d'un thermostat dans les différentes zones.

1.2.3.3. Gains

1.2.3.3.a. Gains d'occupation

La création des gains internes relatifs à l'occupation a été effectuée de la même manière que pour le chauffage. Un « input » a été créé pour représenter les gains convectifs et radiatifs de chaque zone thermique, un gain a été créé pour chaque zone avec l'ordre de lire les « inputs » pour les parts radiatives et convectives du transfert de chaleur sensible.

Au préalable, il a été considéré qu'un gain moyen pour un adulte au repos est de 100W. Considérant qu'il y a une part d'utilisateurs assis, d'autres travaillant debout, d'autres dormant, cette moyenne a été conservée par facilité pour s'intégrer dans les feuilles de calcul Excel sans devoir tenir compte de chaque utilisation pour chaque zone. En moyenne, 60% de ce gain est dissipé sous forme radiative et 40% sous forme convective (Abrahams, 2024, p. 23). Dans les gains absolus relatifs à une personne dans TRNBuild, ces deux données sont à renseigner. Le calcul a été effectué comme suit :

$$60 W * 3.6 = 216 \frac{kJ}{h} \text{ et } 40 W * 3.6 = 144 \frac{kJ}{h}$$

On utilise donc ces valeurs de gains radiatif et convectif en les multipliant par le nombre d'adultes qui occupent les espaces en fonction des heures dans les « input » à lire.

Avec la présence d'enfants et de bébés au sein de certaines zones thermiques, un recalcul a été effectué afin de convertir des données adultes en fonction du nombres d'enfants ou de bébés présents, par une estimation du poids en fonction de l'âge. Le tableau suivant expose les valeurs recalculées utilisées dans ce travail :

Tab. 5 Gains convectifs et radiatifs pour un adulte, un enfant et un bébé. Source : FAO (s.d.).

	Gain RADIATIF [kJ/h]	Gain CONVECTIF [kJ/h]	Gain absolu [W]
1 adulte	216	144	100
1 bébé (+- 10 kg)	59	39	27
1 enfant (+- 30 kg)	94	63	44

1.2.2.3.b. Gains d'éclairage

Afin d'obtenir les gains internes relatifs à l'éclairage, plusieurs possibilités ont été explorées. Les blocs D et E de la Caserne sont, pour le compteur électrique, liés au bloc B qui comprend l'Ecole Industrielle et l'Académie des Beaux-Arts.

Pour la première piste, il est possible de fractionner la consommation au prorata des surfaces. Puisque les données de consommation du compteur électrique sont connues, il est possible de retirer, en fonction de la superficie, un pourcentage de la consommation associée au bloc B. Dans ce cas, il faudrait également pouvoir diviser les zones thermiques des blocs D et E au prorata des surfaces pour obtenir les gains d'éclairage pour chaque zone. Toutefois, celles-ci ayant des occupations sensiblement différentes et des périodes d'ouverture qui varient sur l'année, cette piste n'a pas été retenue dans le cadre de ce travail.

La deuxième piste, et celle retenue, est d'implémenter des « Schedules » hebdomadaires avec les heures d'ouverture et de fermeture des locaux et d'y implémenter des gains relatifs à l'éclairage disponible dans la bibliothèque de gains de TRNBuild. Celle-ci propose, sous le format « ENxxx » des gains repris dans les normes européennes actuelles.

L'éclairage choisi est le suivant : EN16798_302_office.

Les gains d'éclairage ont été implémentés sous forme de « Schedule » hebdomadaire appliqué toute l'année sauf dans les zones thermiques de l'abri de nuit pour les dortoirs hommes et femmes du premier étage, occupés uniquement du 1^{er} octobre au 31 mai et pour les classes de l'Ecole Industrielle, fermées lors des congés d'été ainsi qu'à Noël durant deux semaines. Pour ces trois zones, les gains radiatifs et convectifs liés à l'éclairage ont été implémentés sous forme de fichiers texte et lus par un Type 9 afin de prendre en compte les périodes de congés où les lumières sont à priori éteintes. Les autres zones ayant des horaires classiques sans fermeture annuelle ou maximum deux semaines sur l'année, l'utilisation de « Schedule » a été préféré, malgré un potentiel biais liés aux congés.

Les gains d'éclairage ont été encodés sous un « Schedule » allant de 8h à 18h car l'ensemble des horaires sont établis sur cette base. Il a été établi, après discussion, que placer des fichiers horaires pour la crèche de 7h à 17h ou de 8h à 18h n'aurait que peu de conséquences sur les gains thermiques relatifs à l'éclairage ; les autres zones thermiques ont bien un horaire de 8h à 18H plutôt classique.

Pour les classes de l'Ecole Industrielle, l'horaire implémenté en fichier texte va de 8h à 21h en raison des cours du soir. Concernant l'abri de nuit, les gains lumineux sont effectifs de 7 à 8h le matin, ainsi que de 16 à 22h le soir, pour la période d'occupation uniquement.

Afin d'obtenir les valeurs spécifiques pour ces zones et pouvoir les établir dans un fichier texte, une première simulation sur base hebdomadaire a été réalisée. Les pics de gains thermiques ont été notés pour chaque zone puis, implémentés sous fichier texte pour les zones susmentionnées. Ensuite, les

gains ont été répartis sous leurs formes convectives et radiatives avec le même ratio que pour les gains d'occupation (Abrahams, 2024, p. 23) :

Pour les gains radiatifs liés à l'éclairage : $1 kW = 3600 \frac{kJ}{h} * 0,6 = 2160 \frac{kJ}{h}$

Pour les gains convectifs liés à l'éclairage : $1 kW = 3600 \frac{kJ}{h} * 0,4 = 1440 \frac{kJ}{h}$

Les périodes de congés ont été établies comme étant nulle pour ces zones, afin de correspondre à la réalité de fermeture des sites.

Les combles non chauffés des blocs E et D, ainsi que les dortoirs hommes et femmes du deuxième étage de l'abri de nuit (occupés maximum dix jours sur l'année) sont réputés non éclairés pour ce travail ; les gains d'éclairage n'ont donc pas été simulés pour ces zones.

1.2.2.3.c. Gains d'équipements et appareils

Concernant ces gains, la même méthodologie que pour l'éclairage a été appliquée. Dans un premier temps, des gains d'équipements ont été choisis dans la bibliothèque de gains et ont été implémentés dans des « Schedules » dédiés (les mêmes que pour l'éclairage, considérant l'utilisation de la zone).

Ensuite, un relevé des gains a été effectué pour chaque zone. Enfin, pour les zones des classes industrielles, un horaire dédié a été implémenté dans un fichier texte en ayant la consommation par kW pour chaque heure d'utilisation, et les périodes de congé ont été considérées comme nulle.

Pour implémenter les gains, obtenus en kW dans l'interface de simulation, dans les fichiers textes en données lisibles pour TRNSYS 18, il a fallu les convertir en fonction des parts radiatives et convectives, qui diffèrent de celles pour l'occupation et l'éclairage (Abrahams, 2024, p. 23) :

Pour les gains radiatifs liés aux équipements : $1 kW = 3600 \frac{kJ}{h} * 0,25 = 900 \frac{kJ}{h}$

Pour les gains convectifs liés aux équipements : $1 kW = 3600 \frac{kJ}{h} * 0,75 = 2700 \frac{kJ}{h}$

Dans les espaces non chauffés, les cages d'escalier ainsi que les dortoirs de l'abri de nuit, les gains d'équipements et appareils sont considérés comme nuls.

1.3. Corrections et paramétrage dans TRNBuild

L'architecte ayant modélisé le bâtiment avec l'outil SketchUp à partir des hauteurs sous corniches, le volume total inscrit dans TRNBuild est le volume extérieur du bâtiment. Afin d'obtenir un volume

chauffé correspondant à l'intérieur des zones thermiques, chaque volume a été diminué de 20%, selon les bonnes pratiques du BEMS. Les nouveaux volumes ont été nommés V_{20} et sont en m^3 .

Les capacitances, en kJ/K , associées au volume V_{20} ont été multipliées dans chaque zone par 5. Cette multiplication constitue également une bonne pratique effectuée dans les simulations par l'équipe du BEMS afin de prendre en compte les objets, bureaux, armoires, chaises, tables..., présents dans une zone thermique.

Cette modification est importante puisqu'un volume vide n'aura pas la même consommation pour une même consigne de température qu'un volume rempli d'objets dont les capacités thermiques des matériaux vont stocker et transférer de la chaleur à l'environnement en fonction de l'orientation du bâtiment, des zones d'ombrages et de la quantité de rayonnement solaire qui entre dans les zones à travers les fenêtres. Pour les cages d'escalier ainsi que la Maison des Jeunes, la capacitance a été multipliée par 6 pour correspondre, pour les unes au béton coulé afin de réaliser les escaliers, pour l'autre à la présence de multiples objets, canapés, bureaux, armoires et autres, constatés lors de la visite.

Les volumes considérés dans la modélisation trois dimensions sont, pour les zones thermiques constituées sur plusieurs étages¹⁰, inscrits en une seule zone thermique. Les étages ne sont donc pas modélisés dans les volumes chauffés. De ce fait, des parois internes horizontales (sous la forme de « Ceilings ») ont été implémentées dans les zones des cages d'escalier, de la Maison des Jeunes ainsi que dans les classes de l'Ecole Industrielle afin de représenter les étages présents.

De la même manière, des parois internes verticales ont été implémentées dans certaines zones (sous la forme de « Wall ») afin de représenter les différentes séparations existantes au sein des zones thermiques.

Il est important de noter que ces ajouts de surfaces internes ont été effectués sur base des visites et d'estimations de surfaces verticales et horizontales présentes au sein des zones thermiques définies. Ces valeurs n'ont pas été mesurées et résultent d'une hypothèse basée sur les surfaces au sol pour les parois horizontales et sur les hauteurs de murs pour les parois verticales créées ; ceci pourrait constituer un léger biais mais est considéré comme négligeable.

Afin de correspondre au mieux à la réalité de consommation, certaines consignes de températures ont été diminuées ou augmentées de $1^{\circ}C$ pour ajuster la consommation totale de la simulation à la consommation réelle pour l'année 2022.

¹⁰ Soient les cages d'escalier, la Maison des Jeunes et les classes de l'Ecole Industrielle.

1.4. Résultats de la simulation A

1.4.1. Consommation de gaz

La consommation annuelle de gaz est de 367 400 kWh pour les deux blocs. Toutefois, il est important de calibrer le besoin en chaleur issu de la simulation sur base de cette valeur réelle. En effet, le système HVAC n'est pas modélisé dans l'interface SimulationStudio et le chauffage des zones thermique est activé selon une consigne de puissance illimitée : les kWh augmenteront jusqu'à ce que la température demandée soit atteinte et maintenue en fonction des horaires ordonnés. Le rendement dans une simulation sera quasi-total.

Or, dans la réalité, des pertes apparaissent lors de la production de la chaleur, lors de la distribution au sein du réseau, et des pertes à l'émission et à la régulation sont également à considérer.

Le rendement global « η » est calculé comme suit (Energie Plus Le Site, 2007) :

$$\eta_{global} = \eta_{production} * \eta_{distribution} * \eta_{émission} * \eta_{régulation}$$

Autrement, il peut être calculé sous forme de pourcentages plus facilement accessibles dans la littérature comme suit :

$$\eta_{global} = 100\% - \% \text{ des pertes de production} - \% \text{ des pertes à la distribution} \\ - \% \text{ des pertes à l'émission} - \% \text{ des pertes de régulation}$$

Où :

- Les pertes de production sont liées intrinsèquement au fonctionnement de la chaudière qui comptabilise les pertes par les fumées, par rayonnement dans le brûleur et les pertes à l'arrêt ;
- Les pertes à la distribution sont dissipées par les conduites de distribution, les vannes et circulateurs parcourus par le fluide caloporteur ;
- Les pertes à l'émission prennent en compte les pertes induites par les émetteurs de chaleur qui ne sont pas récupérables pour la zone thermique ;
- Les pertes de régulation constituent l'ensemble des pertes lors de la régulation d'un bâtiment en fonction de la puissance et du temps, la régulation n'étant pas effectuée de manière instantanée (Energie Plus Le Site, 2007).

Différentes valeurs types de rendement global d'un système de chauffage existent, notamment sur le site Energie Plus, qui possède un tableau de valeurs types. Cependant, les valeurs datant de 2007 et ne correspondant pas totalement au système installé dans l'étude de cas, l'hypothèse prise, selon les bonnes pratiques de l'équipe BEMS, fixe l'ensemble de ces pertes aux alentours de 25%.

De ce fait :

$$\text{Consommation réelle de gaz } \left[\frac{kWh}{an} \right] = \text{Besoin en chaleur simulé } \left[\frac{kWh}{an} \right] + \sum \text{des pertes}$$

Dans le contexte des blocs D et E, ceci revient à dire que :

$$\text{Besoin en chaleur simulé } \left[\frac{kWh}{an} \right] = \frac{\text{Consommation réelle } \left[\frac{kWh}{an} \right]}{1 + \sum \text{des pertes}}$$

Soit :

$$\frac{367\,400 \left[\frac{kWh}{an} \right]}{1 + 0.25} = 293\,920 \frac{kWh}{an} \approx 294\,000 \text{ kWh annuels}$$

Cela signifie que, pour assurer un paramétrage de la simulation conforme à la réalité du rendement du système de chauffage, les résultats doivent s'approcher au plus de 294 000 kWh pour le besoin en chaleur obtenu par la simulation.

Le résultat obtenu pour l'ensemble des zones, pour le besoin en chaleur simulé, s'élève à 293 500 kWh annuels, ce qui amène à un rendement estimé à 75% environ.

Ces résultats permettent de valider le paramétrage effectué et de confirmer les hypothèses prises préalablement puisque le besoin en chaleur obtenu dans la simulation A est très proche du besoin en chaud théoriquement à obtenir de 294 000 kWh. Ceci assurant une consommation réelle aux alentours de 367 400 kWh, avec une consommation théorique recalculée de 366 900 kWh pour 25% de pertes du système HVAC.

1.4.2. Consommation d'électricité

Le compteur électrique est lié à trois blocs distincts, le D et le E, qui sont l'objet de ce travail ainsi que le bloc B, qui lui n'a pas été modélisé. Si la consommation finale d'électricité est de 153 900 kWh, la part de consommation des blocs D, E et B n'est pas connue.

Une méthodologie a donc été appliquée afin d'obtenir la consommation hypothétique des blocs D et E uniquement. Il aurait été possible de travailler au prorata des surfaces, toutefois, la méthodologie appliquée sera différente et d'une toute autre logique, comme expliqué plus haut.

Le bloc B comprend l'Ecole Industrielle ainsi que l'Académie des Beaux-Arts. L'horaire d'utilisation de ce bâtiment est de 8h à 21h, soit assez similaire à celui des classes de l'Ecole Industrielle situées dans le bloc E. Ces classes constituent une zone thermique à part entière et des gains d'éclairage et d'équipements, intégrés sur une année avec les période de congés, ont été implémentés dans la simulation initiale pour cette zone thermique.

A l'issue de la simulation A, une valeur est obtenue, en kWh/an, pour les gains relatifs à l'éclairage et aux équipements pour cette zone des classes, ainsi que pour l'ensemble des zones thermiques des blocs D et E.

La valeur obtenue pour ces gains compris dans la zone thermique des classes industrielles a ensuite été divisée par la surface de la zone considérée, soit 137 m², afin d'obtenir des gains types pour l'éclairage et les équipements pour la zone des classes, en kWh/m². Cette valeur est adaptable au bloc B puisque l'utilisation et les horaires sont assez similaires selon les informations récoltées lors des visites de terrain.

Les gains relatifs à l'éclairage pour la zone des classes industrielles s'élèvent à 5 463 kWh par an ; les gains relatifs aux équipements d'élèvent à 2 931 kWh par an, selon les résultats de la simulation A.

Une fois divisés par la superficie de la zone, nous obtenons :

$$Gains\ d'\acute{e}clairage = \frac{5\ 463\ \frac{kWh}{an}}{137\ m^2} = 39.9\ \frac{kWh}{m^2}\ par\ an$$

$$Gains\ d'\acute{e}quipements = \frac{2\ 931\ \frac{kWh}{an}}{137\ m^2} = 21.4\ \frac{kWh}{m^2}\ par\ an$$

La superficie du bloc B s'élève à 1150 m². Il faut donc appliquer les gains susmentionnés à la superficie totale du bâtiment :

$$Gains\ d'\acute{e}clairage = 39.9\ \frac{kWh}{m^2} * 1\ 150\ m^2 = 45\ 885\ kWh\ par\ an$$

$$Gains\ d'\acute{e}quipements = 21.4\ \frac{kWh}{m^2} * 1\ 150\ m^2 = 24\ 610\ kWh\ par\ an$$

Puisque le bâtiment comporte des combles non-utilisés constituant un étage sur les cinq que comprend le bloc B (rdc, étage 1, étage 2, étage 3, combles), nous soustrayons 20% de ces gains pour hypothèse.

Les gains d'éclairage et d'équipements pour le bloc B s'élèvent donc hypothétiquement à 56 396 kWh annuels. La simulation A permet d'obtenir une somme des gains d'éclairage et d'équipements pour les blocs D et E équivalente à 60 730 kWh annuels.

Puisque les gains internes d'éclairage et d'équipements sont dissipés à environ 70 à 80% dans le bâtiment selon l'équipe du BEMS, la somme des gains pour les blocs D, E et B doit correspondre entre 70 et 80% de la consommation électrique annuelle réelle obtenue par les relevés de compteurs.

Pour rappel, la consommation annuelle s'élève, pour l'année 2022, à 153 900 kWh. Les gains dissipés pour l'ensemble des blocs D et E, avec une hypothèse calculée sur base de la consommation annuelle de la zone des classes industrielles, adaptée à la superficie du bloc B, sont de :

$$\begin{aligned} \text{Gains totaux} &= [\text{Gains simulés (éclairage + équipements) des blocs D et E}] \\ &+ [\text{Gains hypothétiques (éclairage + équipements) du bloc B}] \end{aligned}$$

$$\text{Gains totaux} = 60\,730 \text{ kWh} + 56\,396 \text{ kWh} = 117\,126 \text{ kWh par an}$$

Les gains doivent correspondre à 70 à 80% de la consommation réelle de 153 900 kWh, vérifions :

$$\frac{117\,126 \text{ kWh}}{153\,900 \text{ kWh}} * 100 = 76,1 \%$$

Les gains dissipés pour l'ensemble des blocs D et E implémentés dans la simulation A, ainsi que les gains hypothétiques du bloc B correspondent donc bien entre 70 et 80% de la consommation électrique réelle pour l'année 2022.

Cette méthodologie permet de valider les gains d'éclairage et d'équipements implémentés dans la simulation A qui seront maintenus pour les simulation suivantes.

2. Simulation B : amélioration de l'enveloppe

La Caserne ayant été construite durant la première moitié du XIXe siècle, l'enveloppe des bâtiments est vétuste. Le bloc D, où se situe l'abri de nuit du côté droit du site (voir Figures 14 et 17), n'est pas isolé et est constitué de l'enveloppe originelle du bâti. Le bloc E, quant à lui, a été isolé par de la laine minérale au rez-de-chaussée, dans les combles du 2^e étage ainsi que dans la toiture, le 1^{er} étage n'a pas encore été isolé.

Selon l'ADEME (2025), l'isolation de l'enveloppe peut contribuer à diminuer les pertes pour les parois verticales de 20 à 25% et pour les toitures de 25 à 30%¹¹ (ADEME, 2025).

La Caserne Léopold ne fait pas partie du patrimoine classé d'Arlon. Toutefois, une isolation par l'extérieur semble très contraignante si la remise en état à l'identique doit se faire après isolation, ce qui est préconisé dans les bonnes pratiques urbanistiques en Belgique (Magin, 2020). De ce fait, il a été choisi de simuler une isolation par l'intérieur au sein des blocs D et E.

2.1. Méthodologie pour l'isolation

2.1.1. Isolation des parois

Afin d'isoler les parois actuelles, il faut modifier leurs compositions dans l'interface TRNBuild. Chaque paroi a été établie pour la simulation A par l'architecte en fonction des données reçues et observées lors des visites. Certaines parois ont été revues avec de nouvelles informations obtenues ultérieurement, au préalable de la simulation initiale.

A travers les différentes recherches, il est estimé que 15 cm sont requis pour isoler une paroi. Plusieurs simulations ont été lancées afin de comprendre cette valeur : de la laine minérale et de la laine de bois ont été introduites dans chaque paroi avec différentes épaisseurs allant de 2 à 30 cm.

Les valeurs pour la laine minérale sont celles reprises dans la bibliothèque des composants, la laine de bois a été implémentées manuellement selon des données de plusieurs revendeurs et du SPWallonie :

Tab. 6 Propriétés de la laine minérale et de la laine de bois. Source : Librairie TRNSYS 18, SPWallonie (s.d.).

	Conductivité thermique [kJ/hmK]	Capacité thermique [kJ/kgK]	Densité [kg/m ³]
Laine minérale : MIWO	0.144	1	60
Laine de bois : LdB	0.130	2.1	55

¹¹ Valeurs françaises de l'ADEME. Les normes ISO et le site Buildwise pour la Belgique sont en accès restreints et n'ont pas pu être lus.

Le graphe suivant (voir Figure 22) représente la diminution de la consommation d'énergie (pertes comprises) en fonction de l'épaisseur de l'isolant. La laine minérale (« MIWO ») a été comparée à de la laine de bois (« LdB ») ; les résultats montrent deux courbes sensiblement similaires. On remarque que les premiers 5 cm sont déterminants ; qu'entre 5 et 10 cm, l'isolation permet de diminuer la consommation de près de 85% comparé à une épaisseur de 0 cm.

Au-delà de 15 cm, on remarque que la pente de la courbe diminue et tend vers une certaine linéarité, ce qui indique qu'au-delà de cette épaisseur de matériau, les bénéfices de l'isolation sont négligeables.

L'aire dessinée entre les courbes de consommation et chaque angle droit en trait rouge est proportionnelle à la réduction de la consommation en fonction de l'épaisseur de l'isolant : plus l'aire tracée est petite, plus la diminution de la consommation en fonction de l'épaisseur de l'isolant sera faible. Ce principe s'appuie sur la notion d'intégrale qui permet de mesurer une quantité accumulée. Dans ce cas, l'intégrale représente la somme des économies d'énergie réalisées en augmentant progressivement l'épaisseur de l'isolant.

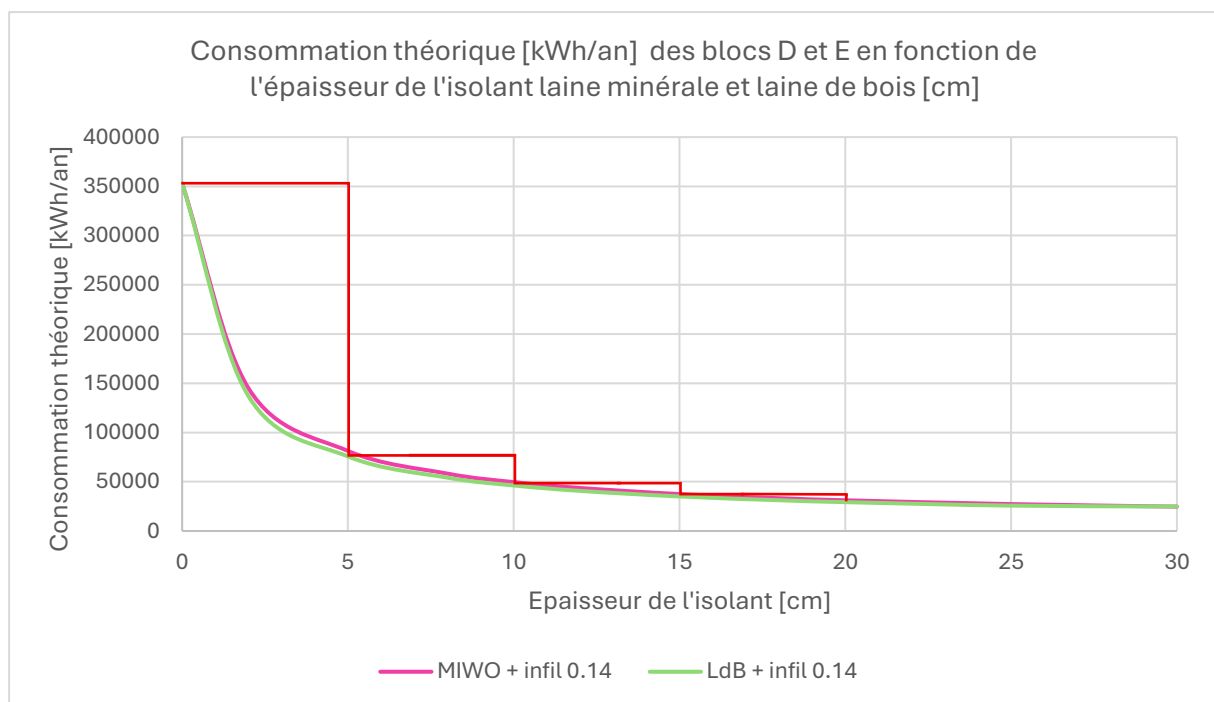


Fig. 22 Consommation [kWh/an] en fonction de l'épaisseur de l'isolant laine minérale et laine de bois [cm]. Source : auteure (2025).

Les coefficients thermiques des parois ont également été observés. Les résultats mettent en évidence que 15 cm d'isolant permet d'atteindre un coefficient de transmission thermique « U » inférieur à 0.24 W/m²K. Cette valeur est donnée par la réglementation PEB en Belgique, qui fixe un seuil pour la valeur « U » pour un mur extérieur ou une toiture ayant été isolée.

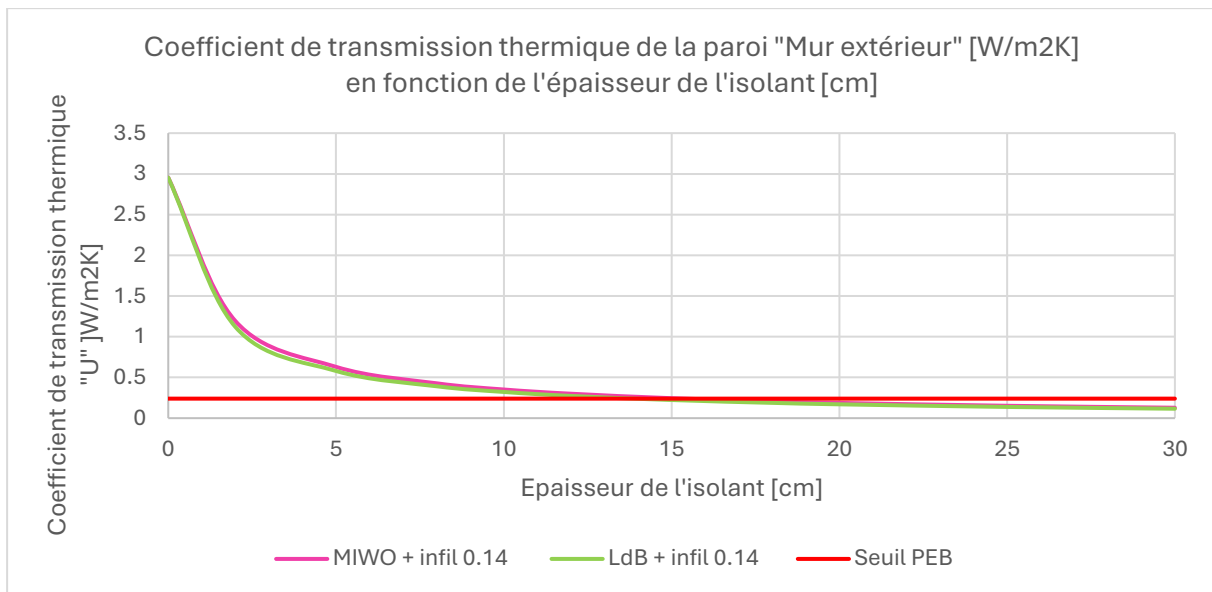


Fig. 23 Coefficient de transmission thermique de la paroi "Mur extérieur" [W/m²K] en fonction de l'épaisseur de l'isolant [cm]. Source : auteure (2025).

Les deux figures ci-dessus (voir Figures 22 et 23) confirment un point de convergence vers une épaisseur à 15 cm. Néanmoins, il est possible d'obtenir une valeur « U » inférieure à 0.24 W/m²K pour certains isolants, comme la laine de bois qui atteint ce seuil dès 13 cm d'épaisseur. Il y a donc un juste milieu technico-économique à considérer lors de l'isolation d'une enveloppe, en fonction du matériau choisi. Dès lors, 15 cm sont considérés comme une bonne pratique nécessaire à atteindre l'objectif PEB et sera la valeur intégrée dans les simulations B et D avec isolation des parois.

Concernant les fenêtres, celles-ci doivent présenter une valeur « U » maximale de 1.5 W/m²K pour le vitrage et le châssis, selon la réglementation belge (Service public de Wallonie - Territoire, Patrimoine, Logement, Energie, 2019). La valeur « U » étant de 1.1 W/m²K dans la simulation A, les vitrages ne seront donc pas modifiés.

Une isolation par l'intérieur nécessite un freine-vapeur afin de limiter la condensation à l'intérieur du bâtiment ; le pare-vapeur est plus idéalement placé lors d'une isolation par l'extérieur. La laine minérale étant un isolant non-hygroscopique, ce matériau peut s'alourdir et se tasser en présence d'humidité ce qui peut induire une diminution de son pouvoir isolant ou une apparition de moisissures ou de condensation du côté intérieur des parois (Collura, 2023). Ce matériau a été créé dans l'interface TRNBuild en fonction de données reprises sur différents sites revendeurs et implémenté dans les simulations afin de respecter les bonnes pratiques de construction.

Tab. 7 Propriétés d'un freine vapeur type. Source : KNEIP (s.d.).

	Conductivité thermique [kJ/hmK]	Capacité thermique [kJ/kgK]	Densité [kg/m³]
Freine vapeur	0.35	1.9	900

2.1.2. Infiltration

Selon un tableau fourni par l'architecte Jonas Lambert, l'infiltration choisie pour la simulation A correspond à un bâti existant sans aucune rénovation et présentant un renouvellement d'air compris entre 6 et 12 vol/h. La simulation A, avec les informations obtenues sur Energie Plus Le Site, postule une valeur indicative de 7 vol/h pour la valeur « n_{50} ».

L'infiltration pour la simulation B doit être modifiée pour correspondre à l'ajout d'isolant dans les parois extérieures. De ce fait et avec l'aide du tableau fourni, la valeur « n_{50} » du bâtiment isolée est fixée, pour l'hypothèse de la simulation B, à 3.5 vol/h. Le facteur « a » d'exposition reste identique.

La valeur « n_{sb} » sera donc :
$$n_{sb} = \frac{n_{50}}{a} = \frac{3.5}{25} = 0.14 \text{ vol/h}$$

2.2. Résultats de la simulation B

Lors de la simulation B, 15 cm de laine minérale ont été ajoutés dans les parois extérieures, jusqu'alors non isolées, de la toiture et des murs extérieurs des blocs D et E. Les parois isolées dans la simulation A, correspondant à l'état actuel du bâtiment n'ont pas été modifiées afin de correspondre à la réalité : elles sont considérées comme isolées et ne seront probablement pas réisolées dans les prochaines années.

Concernant la paroi représentant le sol des bâtiments, il semble compliqué de pouvoir installer une épaisseur de 15 cm d'isolant dans un sol existant. D'après l'ADEME (2025), l'isolation du sol peut représenter jusqu'à 10% de diminution de la consommation d'un bâti (ADEME, 2025). L'Agence de la transition écologique indique également qu'une isolation par les caves, si possible, est préférable. D'après le gestionnaire rencontré, la Caserne dispose de caves mais leur état reste vétuste et afin de proposer un stratégie pertinente, l'isolant au sol est posé, pour la simulation B, sous la première couche au sol afin de faciliter les travaux. Si isoler le sol ne représente un potentiel de diminution que de 10%, il semble cohérent de permettre une facilité de pose en ne passant pas par les caves dont l'état et l'accès sont incertains. De plus, la présence de voutes en pierre dans ces dernières, constatées lors des visites, pourrait également compliquer la pose d'un isolant par les caves.

Une diminution de consommation a été observée lors des essais par TRNSYS 18. Une simulation sans isolant au sol (B.1) et une simulation avec isolation du sol à 2 cm d'épaisseur (B.2) avec isolation des parois extérieures ont été réalisées afin de fournir un résultat pour une isolation envisageable si des travaux étaient entrepris sur les blocs D et E de la Caserne.

Afin de pouvoir comparer ces résultats à un deuxième isolant, une troisième simulation (B.3 laine de bois) a été effectuée avec 15 cm de laine de bois dans les parois extérieures ainsi que 2 cm au sol.

Les résultats des simulations B.1, B.2 et B.3 sont décrits dans le tableau suivant :

Tab. 8 Résultats des simulations B.1, B.2 et B.3 à l'année 2022. Source : auteure (2025).

	Simulation B.1	Simulation B.2	Simulation B.3
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toitures isolées avec 15 cm de laine minérale, sol non isolé	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois
Consommation finale théorique pour l'année 2022 [kWh/an]	127 334 kWh/an	68 829 kWh/an	64 879 kWh/an

Sur le graphe suivant (voir Figure 24), on observe que l'isolation du sol, même à 2 cm, offre une réduction supplémentaire de la consommation, bien qu'isoler l'enveloppe extérieure offre une diminution significative. L'ajout d'un isolant s'avère pertinent pour diminuer la demande durant les période de chauffe de la Caserne.

Il est également intéressant de noter que pour deux isolants aux propriétés similaires et à même épaisseur, les coefficients de transmission thermique des parois sont très semblables (voir Figure 23) et dès lors, l'isolation mènera à une diminution similaire de la consommation d'énergie d'un bâti.

Ce constat s'observe sur la Figure 24 où les courbes de consommation pour la laine minérale et la laine de bois se superposent quasiment.

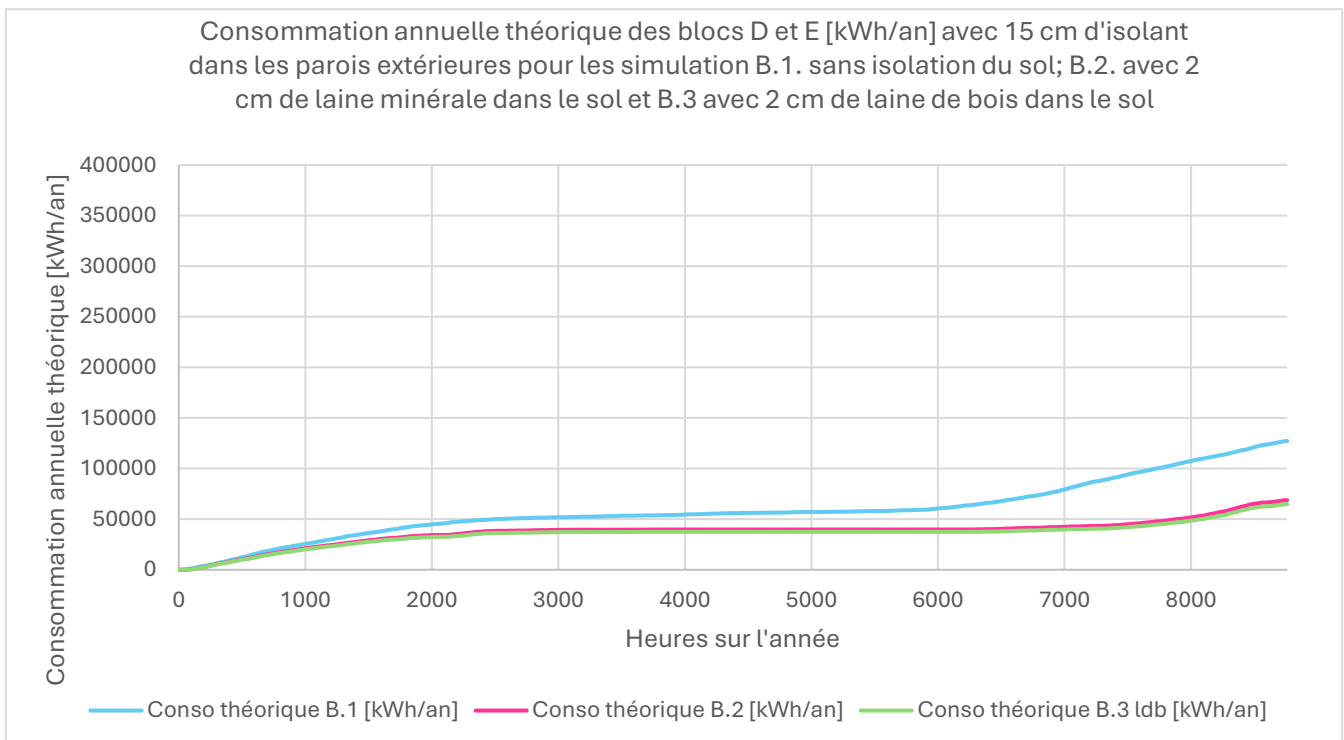


Fig. 24 Consommation annuelle théorique des blocs D et E [kWh/an] pour l'année 2022. Source : auteure (2025).

3. Simulation C : optimisation des systèmes avec simulation d'un thermostat

3.1. Composante comportementale

Lors des visites, il a été constaté que les employés des bâtiments de la Caserne n'étaient pas forcément tenus au courant des régimes de chauffe, du fonctionnement des thermostats et vannes ou encore de la consommation raisonnée de chauffage. Des discussions avec le personnel communal dans les différents blocs ont mis en lumière quelques incohérences dans la gestion efficace de l'énergie.

La zone thermique pour l'Office national de l'enfance constitue un premier exemple. L'ONE étant ouvert du mardi et jeudi, une bénévole présente sur place confirme la fermeture des vannes thermostatiques sur les radiateurs lors de la fermeture de l'établissement le jeudi soir et une ouverture de celles-ci par l'équipe technique de surface le mardi matin, jour d'ouverture de l'ONE. Elle confie ne pas s'en charger elle-même. Lors de la visite le mardi vers 14h environ, l'équipe sur place a constaté que la température au sein de la pièce semblait élevée. Sans pouvoir donner une température précise mais en comparaison avec les températures ressenties dans d'autres espaces disposant de thermostats ou thermomètres d'ambiance, la température dans l'ONE oscillait potentiellement entre 22°C et 26°C.

Cela ne peut correspondre avec les explications de la bénévole selon lesquelles les vannes des radiateurs sont ouvertes le mardi vers 8h, après fermeture du local et des vannes pendant quatre jours et cinq nuits. Par ailleurs, la température extérieure lors de la visite au 25 février 2025 à 14h était inférieure à 7°C, selon les données de la station météorologique du Campus Environnement Arlon (Building Energy Monitoring and Simulation, 2025).

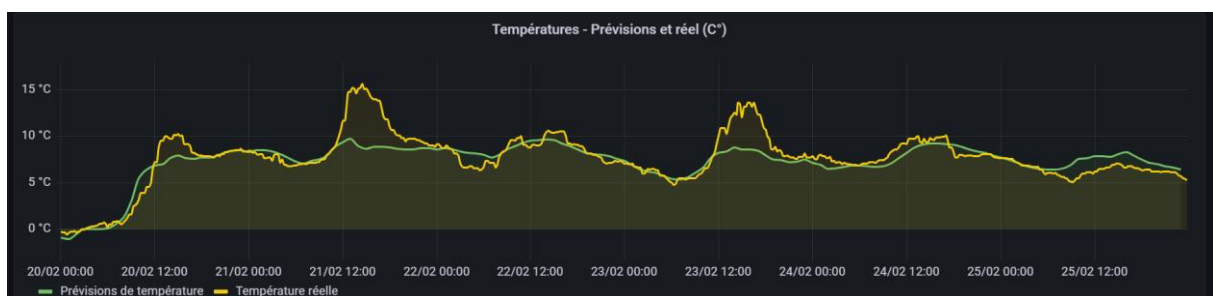


Fig. 25 Températures extérieures à la station météo d'Arlon. Source : BEMS ULiège (2025).

Les températures extérieures ayant oscillé entre 5°C et 10°C (hors pics à 15°C et 13°C) (Building Energy Monitoring and Simulation, 2025) durant la période de fermeture précédant la visite et au vu de l'enveloppe vétuste du bâti, il semble incohérent d'atteindre un niveau de température jusqu'à 26°C avec une chaudière alimentant un espace de plus de près de 1 000 m² et après quatre jours non chauffés pour cette zone thermique.

D'autres incohérences ont été constatées. Dans les locaux de la Croix-Rouge (située à l'étage au-dessus de l'ONE et de la crèche), les vannes thermostatiques semblent dérèglées ou cassées et tournent fou. Le personnel confie qu'elles ne sont pas réglables et que les températures ambiantes dans cette zone thermique sont aléatoires.

Au sein de la crèche, la température affichée au thermostat indique une température supérieure à 24°C. L'employée exprime éteindre le chauffage le soir et lors des week-ends. Durant la visite, la vanne thermostatique du bureau de la zone est positionnée sur le 5.

Les vannes situées dans les classes de l'Ecole Industrielle (bloc D) sont ouvertes bien que l'école soit fermée lors de la visite, la régulation de celles-ci est libre pour les utilisateurs. Seules les vannes situées dans les couloirs et la cage d'escalier semblent régies par le gestionnaire du bâtiment. Les températures de consignes de la zone sont réglées par thermostat pour atteindre 20°C de 6h30 à 21h, et 17°C lors du ralenti nocturne et des week-ends.

Les employés de la Maison des Jeunes, quant à eux, sont au fait que les factures sont payées par la commune et semblent conscientisés à un maintien correct des températures. Les vannes thermostatiques ne sont pas ouvertes dans les espaces non occupés et sont positionnées sur 3 ou 4 dans les pièces occupées. Le personnel exprime faire attention et fermer les vannes le soir et surtout durant les week-ends et périodes de fermeture de la Maison des jeunes.

Il en va de même pour l'abri de nuit, où la visite met en évidence que les vannes thermostatiques sont toutes fermées dans les dortoirs et cages d'escalier non occupés en journée.

Il semble donc que le comportement, la conscience et les connaissances¹² des utilisateurs d'un espace soient potentiellement liés aux températures de celui-ci. Cela a également un impact éventuel sur la consommation de gaz pour le système de chauffage des blocs D et E, la chaudière n'étant pas éteinte en été. Afin de quantifier cet impact, la simulation C impose des températures diminuées, des ralentis nocturnes ainsi que des périodes hors-gel, lorsque les espaces sont non-occupés ou que le chauffage des locaux n'est pas requis pour le maintien du confort intérieur.

3.2. Méthodologie pour la simulation d'un thermostat

Les températures de consigne pour chaque zone thermique ont été définies par un fichier texte établi sur base des observations lors des visites. Afin de simuler un thermostat et une régulation de la température au sein des zones, chaque fichier texte a été modifié afin de simuler une nouvelle consigne de température.

¹² En matière de fonctionnement d'un système de chauffage, d'utilisation d'un thermostat, de vannes, etc.

Pour la majorité des espaces, la température minimum consignée pour la simulation A à 15°C (correspondant à une vanne thermostatique en position 1 ou 2) lors des périodes de fermeture complète des établissements, a été diminuée à 12°C. En effet, selon Rollo Collura (2023), dans son cours intitulé « *Ecoconstruction* », la température minimum pour maintenir un bâtiment en bonne santé et éviter tout risque de moisissure ou condensation est de 12°C (Collura, 2023).

Les températures supérieures à 20°C constatées lors des visites en périodes d'occupation des espaces ont été abaissées à 20°C, soit la température ambiante minimum pour un travail léger selon le Règlement Général pour la Protection du Travail (Région de Bruxelles-Capitale, 2013).

Certaines exceptions ont tout de fois été conservées. Compte tenu de la précarité dans laquelle sont les bénéficiaires de l'abri de nuit et au vu de la période d'ouverture (1^{er} octobre au 31 mai), les consignes de températures de la simulation A, lors des périodes d'occupation ont été maintenues entre 17 et 21°C en fonction de l'heure et de l'occupation. Lors de la période de fermeture, la température a été ordonnée à 12°C comme pour les autres bâtiments.

3.3. Résultats de la simulation C

Les résultats de la simulation C indiquent la consommation théorique suivante :

Tab. 9 Résultats des simulations C à l'année 2022. Source : auteure (2025).

	Simulation C
Explication de la simulation	Simulation avec parois identiques à la simulation A et modification des fichiers texte pour implémenter une consigne de température fixée à 20°C maximum et avec une simulation d'un état hors gel à 12°C en période estivale
Consommation finale théorique pour l'année 2022 [kWh/an]	279 135 kWh/an

Tout comme pour la simulation B, la consommation théorique est obtenue en ajoutant 25% au besoin en chaud simulé obtenu afin de prendre en compte les pertes du système HVAC, estimées à cette valeur par l'équation décrite dans le point 1.4 du Chapitre IV « Résultats de la simulation A ».

En comparant la Figure 26 à la Figure 24, on constate que l'effet de thermostats simulés possède un effet de réduction moindre que l'ajout d'isolant sur la consommation théorique finale à l'année de référence 2022.

La consommation annuelle pour 2022 pour la simulation C est observée sur le graphe suivant :

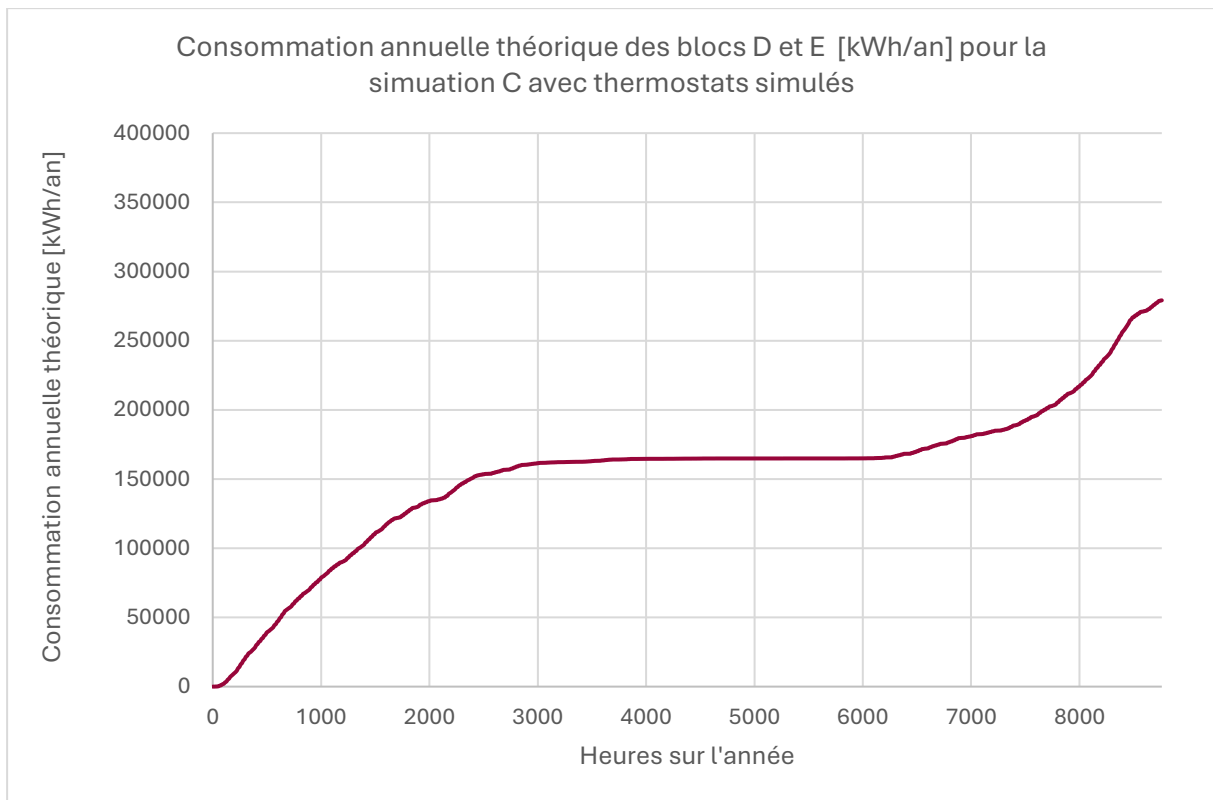


Fig. 26 Consommation théorique pour la simulation C à l'année 2022. Source : auteure (2025).

4. Simulation D : combinaison de l'isolation et de la régulation

4.1. Méthodologie pour la combinaison

Afin d'observer une combinaison de l'isolation et de la régulation des températures intérieures, deux simulations supplémentaires ont été réalisées. La simulation D.2 contient l'isolant laine minérale et la simulation D.3, la laine de bois. La simulation B.1 n'a pas été reproduite avec thermostat.

4.2. Résultats de la simulation D

Lorsque l'on combine les pistes d'amélioration énergétique observées dans le cadre de ce travail, les résultats sont les suivants :

Tab. 10 Résultats des simulation D.2 et D.3 en 2022 [kWh/an]. Source : auteure (2025).

	Simulation D.2	Simulation D.3
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale + thermostats simulés	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois + thermostats simulés
Consommation finale théorique pour l'année 2022 [kWh/an]	49 786 kWh/an	46 096 kWh/an

Les résultats de consommation obtenus par la même méthodologie que pour les autres simulations.

Sur la Figure 27, on constate que la combinaison d'une amélioration énergétique optimisée avec isolation et thermostat donne les résultats de consommation à destination du chauffage les plus réduits, comparé aux autres simulations.

On remarque également, lorsque l'on compare les données chiffrées des Tableaux 8 et 10, pour les simulations B/D.2 et B/D.3 que l'écart entre la laine minérale et la laine de bois augmente lorsque l'on ajoute les thermostats. L'écart entre les deux isolants dans la simulation B est de 3 950 kWh contre 3 690 kWh pour la simulation D, l'isolation restant identique. L'ajout d'un thermostat pourrait donc potentiellement amplifier la résilience d'un bâtiment isolé face aux conditions extérieures.

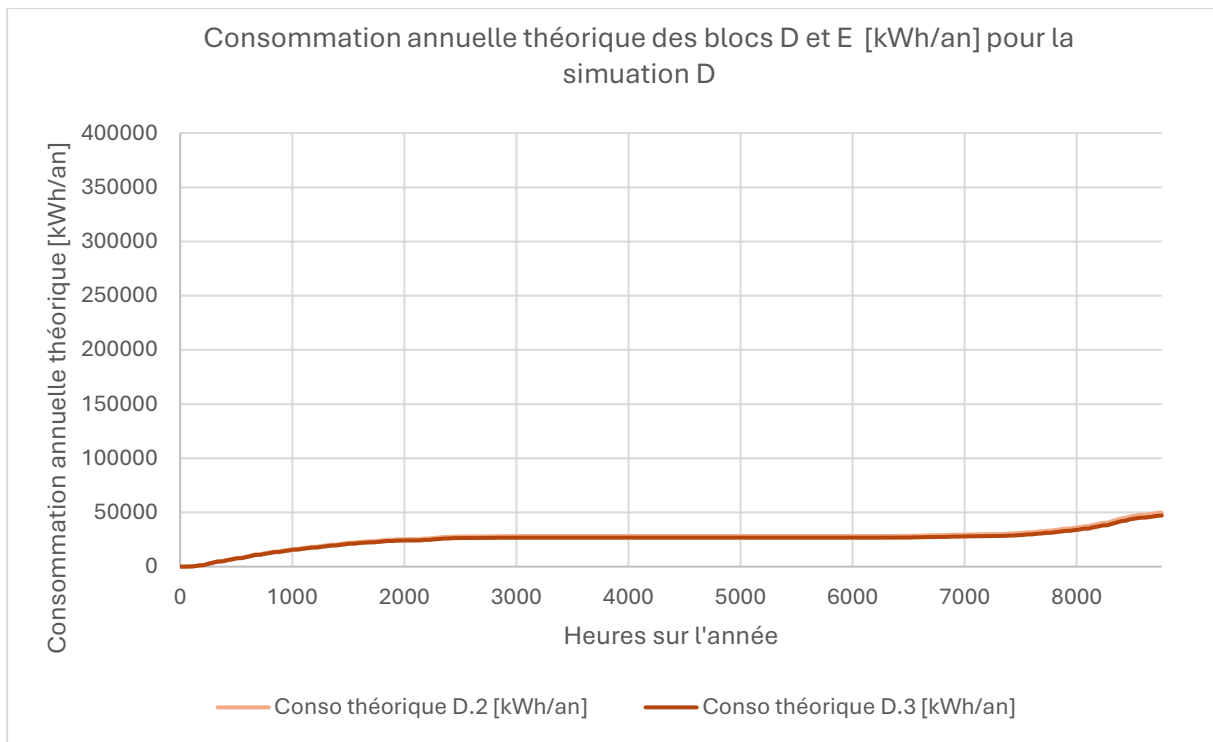


Fig. 27 Consommation annuelle théorique pour la simulation D [kWh/an]. Source : auteure (2025).

CHAPITRE V : Méthodologie des simulations par TRNSYS 18

pour les horizons 2050 et 2100

1. Données météorologiques futures

En 2022, Sébastien Doutreloup *et al.* (2022) publient « *Historical and future weather data for dynamic building simulations in Belgium using the regional climate model MAR: typical and extreme meteorological year and heatwaves* » (Doutreloup, *et al.*, 2022).

Cet article présente différents modèles de données météorologiques qui vont de 1980 à 2100 et sont basés sur plusieurs paramètres.

Afin d'avoir une meilleure compréhension des différents types de fichiers et après une lecture approfondie de l'article, un tableau a été réalisé avec l'aide de l'intelligence artificielle afin de comprendre les différents fichiers proposés par les chercheurs belges :

Tab. 11 Description des types de fichiers proposés par Doutreloup *et al.* (2022). Source : auteure, Open AI (2025) & Doutreloup *et al.* (2022).

Nom du fichier	Signification	Type d'année représentée	Type de climat représenté
HWE_all	<i>Hot Weather Events - all</i>	Ensemble d'années chaudes modélisées avec tous les épisodes de canicule	Extrêmes chauds avec toutes les vagues de chaleur
HWE_HI	<i>Hot Weather Events - High Irradiance</i>	Année future chaude avec forte irradiation solaire et vagues de chaleur la plus intense	Extrême chaleur et ensoleillement élevé
HWE_HT	<i>Hot Weather Event - High Temperature</i>	Année future chaude avec température maximale élevée et vague de chaleur la plus chaude	Extrême chaleur
HWE_LD	<i>Hot Weather Event - Long Duration</i>	Année avec vague de chaleur longue	Extrême chaleur prolongée
TMY_SWD_based	<i>Typical Meteorological Year - Similarity With Dry years</i>	Année typique proche du climat futur en fonction de critères passés	Année réelle la plus proche d'un climat projeté
TMY_TT_based	<i>Typical Meteorological Year - Temperature Threshold based</i>	Année synthétique basée sur le dépassement de seuils spécifiques de températures représentatifs du climat futur modélisé	Moyenne future représentative

XMY_SWD_based	<i>eXtreme Meteorological Year – Similarity With Dry years</i>	Année extrême proche du climat futur choisie en fonction de critères passés	Extrême chaud observé, proche du futur simulé
XMY_TT_based	<i>eXtreme Meteorological Year – Temperature Threshold</i>	Année synthétique représentant les extrêmes futurs	Année extrême projetée avec longues périodes de chaleur et températures élevées

Concernant les modèles prévisionnels utilisés, Doutréloup *et al.* (2022) utilisent le MAR ou Modèle Atmosphérique Régional, comme modèle principal, couplés à des modèles globaux pour forcer certaines trajectoires.

Ces modèles globaux proposent des projections générales qui peuvent donner une tendance et une direction climatique lorsqu'ils sont couplés à un modèle régional comme c'est le cas dans l'étude mentionnée.

Tab. 12 Description du modèle régional et des modèles globaux utilisés par Doutréloup *et al.* (2022). Source : auteure, Open AI (2025) & Doutréloup *et al.* (2022).

Nom du modèle	Description	Type de climat représenté
MAR – Modèle Atmosphérique Régional (Regional Climate Model)	Modèle régional avec une excellente résolution spatiale et temporelle qui prend en compte des facteurs locaux tels que le relief, la végétation, l'occupation du sol	Proposé pour 12 villes belges, représente le climat local réaliste avec une résolution spatiale de 5 km, propice à la simulation énergétique de type TRNSYS
MIROC6 – Model for Interdisciplinary Research on Climate (Global Climate Model)	Modèle qui projette un réchauffement climatique plus important avec une hausse des températures avec des vagues de chaleur, des étés chauds	Représente un climat où les risques de surchauffe sont élevés et permet une diminution des besoins en chauffage lors d'une simulation énergétique de type TRNSYS
BCC-CSM2-MR – Beijing Climate Center Model (Global Climate Model)	Modèle qui simule un réchauffement climatique modéré avec une représentation des précipitations	Représente un climat tempéré et avec une vue moins axée sur les extrêmes climatiques potentiels et une hausse des températures optimiste
MPI-ESM.1.2 – Max Planck Institute Earth System Model (Global Climate Model)	Modèle qui simule un réchauffement climatique moindre	Représente un climat équilibré avec une hausse des températures optimiste qui peut être plausible en Europe mais pas forcément dans le reste du monde

Il existe un autre modèle, le ERA5 qui fournit des données passées de 1980 à 2020 et permet une réanalyse des données météorologiques historiques afin de comparer les données actuelles

(Doutreloup, et al., 2022). Ce modèle (MAR, forcé avec ERA5) peut être utilisé pour simuler le climat actuel si des données réelles ne sont pas disponibles.

Ensuite, pour chaque fichier et modèle ci-dessus, des parcours socio-économiques partagés sont proposés, suivant les projections du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Les projections du GIEC sont indiquées selon une norme précise, « SSP X-Y » où :

- SSP signifie « Shared Socio-economic Pathways », soient des trajectoires socio-économiques partagées qui seront définies par les décisions sociales, économiques et politiques prises au cours des prochaines années ;
- X représente la trajectoire socio-économique choisie, allant de 1 avec le modèle le plus durable, jusque 5 avec un développement mondial rapide basé sur les ressources fossiles ;
- Y correspond au forçage radiatif [W/m^2] soient les flux radiatifs subsistant en raison des émissions de gaz à effet de serre.

Il existe plusieurs trajectoires du GIEC, toutefois, Douthreloup *et al.* (2022) n'en mentionnent que trois :

Tab. 13 Description des scénarii GIEC travaillés par Douthreloup *et al.* (2022). Source : auteure (2025), GIEC (2021) & Douthreloup *et al.* (2022).

Scénario	Forçage radiatif prévu en 2100 [W/m^2]	Type de climat représenté
SSP 2-4.5	4.5	Futur réaliste avec une politique climatique moyenne, qui se stabilise jusque dans les années 2050 puis tend vers une neutralité carbone
SSP 3-7.0	7.0	Futur qui permet de voir les risques potentiels avec une politique climatique faible et un risque d'augmentation des conflits liés au changement climatique avec une hausse linéaire des émissions de gaz à effet de serre
SSP 5-8.5	8.5	Futur extrême avec une utilisation massive des ressources d'origine fossile, une politique climatique inexistante et une augmentation extrême des gaz à effets de serre

Lorsqu'une analyse des projections climatiques est initiée, il est important de choisir le scénario le plus adapté. En fonction des orientations politiques et du « climat » socio-économique actuel, les trajectoires futures peuvent être s'avérer très imprécises.

Dans un futur proche, il est possible de considérer que les gouvernements sont conscients des enjeux environnementaux et mènent des politiques en faveur de l'environnement et des Accords de Paris, qui maintiendraient une hausse des températures minimale. Dans cette optique, des scénarii plus optimistes peuvent être envisagés. Toutefois, en 2025, le monde politique est confronté à un recul dans les ambitions environnementales, notamment par l'instrumentalisation de ces dernières comme une contrainte par certains extrêmes politiques.

De plus, la hausse des températures extérieures observées les deux premières décennies du XXI^e siècle montre une augmentation déjà supérieure aux objectifs de la COP21. Le SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement rapporte les déclarations de l'Organisation météorologique mondiale qui estime que les températures moyennes dépasseront de 1.5°C les températures de l'ère préindustrielle¹³ pour au moins une année entre 2022 et 2026 (SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, s.d.).

Il est donc possible que les objectifs de la COP21, correspondant à une trajectoire SSP 1-1.9, soient obsolètes. Un scénario intermédiaire, tel que le SSP 2-4.5, apparaît plus réaliste puisqu'accompagné d'efforts environnementaux bien que sans réduction collective des émissions de gaz à effet de serre.

Afin de travailler sur un modèle cohérent, il serait possible d'utiliser le modèle MAR, forcé par les modèles MPI ou BCC pour simuler les horizons 2030 à 2050 avec le SSP 2-4.5, ce qui permettrait d'obtenir un modèle correspondant à une société qui fournit des efforts environnementaux. Néanmoins, il n'est pas garanti que ces modèles soient pertinents pour l'horizon 2080 à 2100 tant les ambitions politiques peuvent fluctuer et que le « c » de climat semble encore être associé au « c » de complot dans certaines gouvernances politiques et médiatiques.

Dès lors, afin de prédire des données pour la seconde moitié du XXI^e siècle, des scénarii plus durs et moins résilients peuvent s'avérer plus pertinents. C'est le cas du forçage MIROC6 avec un SSP 5-8.5, correspondant à une société qui ne s'est pas forcément remise en question sur les enjeux environnementaux, sociaux et économiques.

Pour simuler un climat plus pessimiste, le couple MAR-MIROC6 sera utilisé afin de percevoir d'éventuelles surchauffes qui pourraient être à l'initiative d'une réflexion d'implémenter d'ores et déjà un système de refroidissement dans le réseau de chaleur à Arlon, si les effets s'en font ressentir.

Afin de proposer un scénario balancé, ce seront les températures moyennes (TMY) qui seront observées pour les trajectoires SSP 2-4.5 et SSP 5-8.5 en 2050 et 2100. Ces deux trajectoires, forcées par le couple MAR-MIROC6, semblent constituer un bon compromis pour les prévisions futures. Ces quatre scénarii sont proposés également afin de pouvoir établir une comparaison entre eux, puisque construits de manière identique, bien qu'ils soient rendus incertains par les projections sociales, économiques et politiques envisagées et envisageable à plus long terme.

Ce choix est donc assez arbitraire et ne repose que sur les observations et hypothèses de l'auteure en fonction des informations recueillies dans les divers articles de Sébastien Doutreloup et Xavier Fettweis, climatologues ayant mené à bien la réalisation de ce projet d'envergure.

¹³ Valeurs fixes utilisées pour comparer l'augmentation des températures.

2. Projections des simulations pour l'horizon 2050 : SSP 2-4.5

2.1. Simulation A

Afin de projeter le comportement des deux blocs du cas pratique dans des conditions météorologiques futures, le premier scénario choisi est le SSP 2-4.5. Ce scénario correspond à une politique climatique modérée, soit celle actuelle avec quelques ambitions environnementales afin de baisser les émissions de gaz à effet de serre et d'atteindre une neutralité carbone après 2100. Cette trajectoire estime une hausse des température de l'ordre de 2°C en 2050.

Une fois les données météorologiques projetées de Doutrouloup *et al.* (2022) téléchargées, il faut modifier les fichiers afin de les faire lire par le Type 9, dédié aux données météorologiques de la simulation A. Pour ce faire, quelques colonnes non lues sont supprimées ou remplacées et les données sont converties afin de coïncider avec les besoins du composant lecteur.

Le fichier choisi est le suivant : Arlon-City_TMY2041-2060_ssp245_MAR-MIR_TTbased, en format texte.

Les résultats de consommation pour la simulation A, à l'horizon 2050 dans le scénario SSP 2-4.5 sont les suivants :

Tab. 14 Résultats de la simulation A pour le SSP 2-4.5 en 2050. Source : auteure (2025).

Simulation A_SSP245_2050	
Explication de la simulation	Simulation initiale sans isolation sauf bâti réellement isolé
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	404 195 kWh/an

Le Tableau 14 affiche près de 37 000 kWh annuels en plus que l'année 2022, soit une augmentation de 10% de la consommation par rapport à l'année de référence.

La consommation est calculée de la même manière que pour les simulations à l'année 2022, avec l'ajout de 25% au besoin en chaud simulé pour estimer les pertes du système HVAC non modélisé.

Il est important de préciser que ces résultats sont à prendre avec précaution puisqu'un remplacement du système est possible et qu'une nouvelle chaudière pourrait avoir un meilleur rendement avec les avancées technologiques. Cette consommation est donc basée sur le système de chauffage actuel des bâtiments.

Une diminution de cette consommation et un meilleur rendement peuvent être considérés avec un remplacement de l'unité de chauffage. Le besoin simulé et les consommations théoriques recalculées demeurent des résultats concrets, dans les limites des scénarii de projections futures et des calculs de l'outil TRNSYS 18.

2.2. Simulation B

Pour la simulation B à l'horizon 2050, seules les pistes B.2 et B.3 sont étudiées afin de comprendre l'impact de l'isolant sur la consommation d'énergie à destination du chauffage. Si les résultats précédents ont montré que laine minérale et laine de bois ont des propriétés isolantes similaires et permettent d'obtenir des diminutions de consommations assez semblables, ce résultat n'est pas garanti *de facto* pour les projections futures.

La consommation des simulations B.2 et B.3 se comporte comme suit à l'horizon 2050 :

Tab. 15 Résultats de la simulation B.2 et B.3 pour le SSP 2-4.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation B.2_SSP245_2050	Simulation B.3_SSP245_2050
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	78 303 kWh/an	73 977 kWh/an

De même que pour la simulation A, on constate une hausse de la consommation dans cette projection temporelle et socio-économique par rapport à 2022 qui affichait, pour les simulations B.2 et B.3 respectivement environ 68 900 et 64 900 kWh annuels. Pour le SSP 2-4.5 en 2050, la consommation de la simulation isolée augmente d'environ 10 000 kWh par rapport à l'année de référence.

2.3. Simulation C

Les résultats de la simulation C avec implantation de thermostats dans le scénario défini sont les suivants :

Tab. 16 Résultats de la simulation C pour le SSP 2-4.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation C_SSP245_2050
Explication de la simulation	Simulation avec parois identiques à la simulation A et modification des fichiers texte pour implémenter une consigne de température fixée à 20°C maximum et avec une simulation d'un état hors gel à 12°C en période estivale
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	313 583 kWh/an

En 2022, la consommation théorique avec thermostat s'élevait à 279 000 kWh environ, soit environ 34 500 kWh de moins que pour la projection.

2.4. Simulation D

Lorsqu'on simule à la fois les thermostats et l'isolant laine minérale et laine de bois avec 15 cm dans les parois extérieures et 2 cm de sol, les résultats sont les suivants :

Tab. 17 Résultats de la simulation D.2 et D.3 pour le SSP 2-4.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation D.2_SSP245_2050	Simulation D.3_SSP245_2050
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale + thermostats simulés	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois + thermostats simulés
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	57 486 kWh/an	54 503 kWh/an

Pour rappel, en 2022 les consommations théoriques des simulations D.2 et D.3 étaient respectivement d'environ 50 000 et 47 000 kWh annuels. L'augmentation de la consommation pour cet horizon est moins importante pour cette simulation que pour la simulation B mais augmente tout de même de 7 000 kWh en moyenne.

Le constat est donc le même pour chaque simulation dans le scénario SSP 2-4.5 à l'horizon 2050, la consommation d'énergie à destination du chauffage augmente dans les blocs D et E de la Caserne lorsque confronté à un scénario projeté.

3. Projections des simulations pour l'horizon 2050 : SSP 5-8.5

3.1. Simulation A

Dans cette simulation initiale, on implémente le scénario SSP 5-8.5 avec une société énergivore à l'horizon 2050 et qui impose un forçage radiatif de 8.5 W/m^2 à l'horizon 2100. Ce scénario est basé sur une société capitaliste avec une croissance économique globale basée sur l'utilisation de combustibles fossiles non renouvelables et sans politique environnementale et climatique.

Ce développement, bien qu'important et propice pour les pays en voie de développement, est considéré comme non durable et provoquerait une hausse importante des émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'une hausse des températures de 2 à 3°C à l'horizon 2050.

Cette trajectoire, bien qu'en « TMY », lorsqu'on la prend avec le couple MAR-MIROC6, s'accompagne d'un risque élevé de vagues de chaleur plus fortes, plus longues ainsi qu'avec une hausse des températures minimales des minimas (Doutreloup, et al., 2022).

Le fichier choisi est le suivant : Arlon-City_TMY2041-2060_ssp585_MAR-MIR_TTbased, en format texte.

Les résultats de la simulation A, à l'horizon 2050 mais avec un scénario plus extrême sont les suivants :

Tab. 18 Résultats de la simulation A pour le SSP 5-8.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation A_SSP585_2050
Explication de la simulation	Simulation initiale sans isolation sauf bâti réellement isolé
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	376 564 kWh/an

Dans ce scénario climatique plus extrême que le précédent, la consommation pour la simulation A augmenterait de 9 000 kWh, soit de 2.5 % par rapport à l'année 2022.

3.2. Simulation B

Lors de la simulation B, la laine minérale et la laine de bois sont également simulées avec 15 cm d'isolant aux parois extérieures et 2 cm de sol, toujours dans l'idée d'offrir la possibilité d'effectuer des travaux d'isolation dans le sol. Les résultats sont les suivants :

Tab. 19 Résultats de la simulation B.2 et B.3 pour le SSP 5-8.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation B.2_SSP585_2050	Simulation B.3_SSP585_2050
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	73 299 kWh/an	69 212 kWh/an

Cette trajectoire offre une diminution de la consommation par rapport au SSP 2-4.5 qui obtient une moyenne, pour les simulations B.2 et B.3, de 76 000 kWh annuels dédiés au chauffage des blocs. Cela montrerait que la trajectoire climatique la plus extrême à l'horizon 2050 provoquerait une légère diminution des consommations par rapport à une trajectoire plus durable.

Néanmoins, la consommation d'énergie à destination du chauffage s'avère tout de même plus élevée que pour l'année 2022, à l'instar de la trajectoire 2-4.5.

3.3. Simulation C

Voici les résultats pour la pose de thermostats simulés dans un scénario SSP 5-8.5 à l'horizon 2050 :

Tab. 20 Résultats de la simulation C pour le SSP 5-8.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation C_SSP585_2050
Explication de la simulation	Simulation avec parois identiques à la simulation A et modification des fichiers texte pour implémenter une consigne de température fixée à 20°C maximum et avec une simulation d'un état hors gel à 12°C en période estivale
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	291 048 kWh/an

La trajectoire 5-8.5 montre également une diminution de la consommation, pour l'horizon 2050, par rapport à la trajectoire 2-4.5, potentiellement due à des températures moyennes extérieures légèrement plus élevées (2 à 3°C pour le SSP 5-8.5 contre 2°C pour le SSP 2-4.5) ; mais également une augmentation de plus de 4% de la consommation théorique annuelle comparé à l'année de référence.

3.4. Simulation D

La simulation D pour la laine minérale et la laine de bois avec thermostats ont les résultats de consommation suivants :

Tab. 21 Résultats de la simulation D.2 et D.3 pour le SSP 5-8.5 en 2050. Source : auteure (2025).

	Simulation D.2_SSP585_2050	Simulation D.3_SSP585_2050
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale + thermostats simulés	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois + thermostats simulés
Consommation finale théorique pour l'année 2050 [kWh/an]	53 432 kWh/an	50 639 kWh/an

La consommation théorique de la simulation D à l'horizon 2050 pour le scénario extrême 5-8.5 est inférieure, comme pour les résultats précédents, à celle obtenue pour le scénario plus résilient 2-4.5. Il est toutefois supérieur d'environ 3 000 kWh annuel par rapport à 2022.

4. Projections des simulations pour l'horizon 2100 : SSP 2-4.5

4.1. Simulation A

Pour les projections à l'horizon 2100, les scénarii sont les mêmes que ceux expliqués dans la simulation A au point 2 du présent chapitre.

Le fichier choisi est le suivant : Arlon-City_TMY2081_2100_ssp245_MAR-MIR_TTbased, en format texte, afin de simuler les projections pour l'horizon 2100.

Pour la simulation A, les résultats de consommation sont les suivants :

Tab. 22 Résultats de la simulation A pour le SSP 2-4.5 en 2100. Source : auteure (2025).

Simulation A_SSP245_2100	
Explication de la simulation	Simulation initiale sans isolation sauf bâti réellement isolé
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	378 198 kWh/an

La consommation théorique pour les besoins en chaud des blocs D et E de la Caserne augmente de 11 000 kWh comparé à l'année 2022. A l'horizon 2100, la consommation finale s'avère moins élevée qu'à l'horizon 2050 pour la même trajectoire SSP 2-4.5. Ceci pourrait s'expliquer par la hausse de 0.8°C de la température extérieure moyenne prévue pour l'horizon 2100 par rapport à l'horizon 2050 pour cette même trajectoire.

On constate cependant que le résultat est pratiquement identique à ceux obtenus pour l'horizon 2050 du SSP 5-8.5. Ceci sera le cas pour toutes les simulations de ces deux trajectoires et sera discuté ultérieurement.

4.2. Simulation B

Voici les résultats des simulations B à l'horizon 2100 avec le scénario 2-4.5 :

Tab. 23 Résultats de la simulation B.2 et B.3 pour le SSP 2-4.5 en 2100. Source : auteure (2025).

	Simulation B.2_SSP245_2100	Simulation B.3_SSP245_2100
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	72 579 kWh/an	68 501 kWh/an

Tout comme pour les résultats de la simulation A, cette trajectoire est sensiblement similaire à celle de l’horizon 2050 du SSP 5-8.5.

La consommation finale pour la simulation B est également légèrement supérieure à celle obtenue pour l’année 2022, mais inférieure à celle de la trajectoire plus résiliente SSP 2-4.5 à l’horizon 2050.

Cet effet pourrait, comme pour les résultats précédents, s’expliquer par une augmentation de la température moyenne extérieure à l’horizon 2100 de la trajectoire résiliente et pour la trajectoire plus extrême à l’horizon 2050, comparée à la trajectoire 2-4.5 à l’horizon 2050 qui montre une augmentation de la température extérieure moins significative que les autres trajectoires socio-économiques. Cette comparaison de température sera également discutée ultérieurement.

4.3. Simulation C

Lorsque l’on place des thermostats à l’horizon 2100 dans le même scénario, voici les résultats :

Tab. 24 Résultats de la simulation C pour le SSP 2-4.5 en 2100. Source : auteure (2025).

Simulation C_SSP245_2100	
Explication de la simulation	Simulation avec parois identiques à la simulation A et modification des fichiers texte pour implémenter une consigne de température fixée à 20°C maximum et avec une simulation d’un état hors gel à 12°C en période estivale
Consommation finale théorique pour l’année 2100 [kWh/an]	290 686 kWh/an

La simulation C pour le SSP 2-4.5 à l’horizon 2100 montre également une augmentation de la consommation de 4% par rapport à 2022 et une diminution de 7% par rapport au même scénario à l’horizon 2050. Cela confirme la diminution des consommations prévues pour une même trajectoire dans un espace temporel plus éloigné.

4.4. Simulation D

Voici les résultats pour les simulations D.2 et D.3 :

Tab. 25 Résultats de la simulation D.2 et D.3 pour le SSP 2-4.5 en 2100. Source : auteure (2025).

	Simulation D.2_SSP245_2100	Simulation D.3_SSP245_2100
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale + thermostats simulés	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois + thermostats simulés
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	52 948 kWh/an	50 138 kWh/an

La consommation augmente, par rapport à la même simulation en 2022 mais diminue par rapport aux autres trajectoires pour ce scénario.

Il se pourrait que la consommation diminue entre deux horizons pour la même trajectoire par l'influence de l'augmentation progressive des températures moyennes extérieures au fur et à mesure des décennies qui passent, en raison du forçage radiatif.

5. Projections des simulations pour l'horizon 2100 : SSP 5-8.5

5.1. Simulation A

Lorsque l'on place la simulation A à l'horizon 2100 dans le scénario SSP 5-8.5, les résultats de consommation d'énergie sont les suivants :

Tab. 26 Résultats de la simulation A pour le SSP 5-8.5 en 2100. Source : auteure (2025).

Simulation A_SSP585_2100	
Explication de la simulation	Simulation initiale sans isolation sauf bâti réellement isolé
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	323 095 kWh/an

On constate une diminution de 12% de la consommation théorique finale comparée à l'année de référence pour la simulation initiale A, soit celle sans aucune amélioration de l'enveloppe ou optimisation de régulation du chauffage.

Cette trajectoire extrême et temporellement plus éloignée montre également la diminution de consommation la plus importante, tous scénarii confondus.

5.2. Simulation B

Dans les simulations B.2 et B.3 soient avec ajout de laine minérale et de laine de bois respectivement, la consommation d'énergie diminue de la sorte :

Tab. 27 Résultats de la simulation B.2 et B.3 pour le SSP 5-8.5 en 2100. Source : auteure (2025).

	Simulation B.2_SSP585_2100	Simulation B.3_SSP585_2100
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	61 395 kWh/an	57 834 kWh/an

La diminution de la consommation est moins visible pour cette simulation B mais cette trajectoire pour l'horizon 2100 montre une diminution de 13% en moyenne entre la laine minérale et la laine de bois par rapport à 2022.

5.3. Simulation C

L'ajout de thermostats simulés dans la simulation C donne les résultats suivants :

Tab. 28 Résultats de la simulation C pour le SSP 5-8.5 en 2100. Source : auteure (2025).

Simulation C_SSP585_2100	
Explication de la simulation	Simulation avec parois identiques à la simulation A et modification des fichiers texte pour implémenter une consigne de température fixée à 20°C maximum et avec une simulation d'un état hors gel à 12°C en période estivale
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	245 753 kWh/an

Le SSP 5-8.5 à l'horizon 2100 indique une diminution de 10% de la consommation théorique par rapport à la même simulation en 2022 et montre également une diminution par rapport aux autres trajectoires.

5.4. Simulation D

Lorsque l'on place à la fois de l'isolant et des thermostats simulés à l'horizon 2100 pour le scénario SSP 5-8.5, les résultats sont les suivants :

Tab. 29 Résultats de la simulation D.2 et D.3 pour le SSP 5-8.5 en 2100. Source : auteure (2025).

	Simulation D.2_SSP585_2100	Simulation D.3_SSP585_2100
Explication de la simulation	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale + thermostats simulés	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois + thermostats simulés
Consommation finale théorique pour l'année 2100 [kWh/an]	44 721 kWh/an	42 307 kWh/an

Les résultats sont sensiblement similaires aux autres présentés pour le SSP 5-8.5 en 2100, avec une diminution de la consommation dans cette trajectoire comparée aux autres projections ainsi que pour l'année de référence. La simulation D montre systématiquement les résultats de consommation les moins élevés et la trajectoire extrême à l'horizon 2100 est la seule à indiquer une diminution de la consommation par rapport à 2022, probablement en raison de l'augmentation plus élevée des températures moyennes.

CHAPITRE VI : Discussion des résultats de consommation théorique d'énergie pour les simulations A, B, C et D à l'année 2022 ainsi qu'aux horizons 2050 et 2100

1. Observation de la simulation initiale comparée aux pistes d'amélioration énergétique proposées pour l'année 2022

1.1. Comparaison des résultats

La deuxième hypothèse présentée dans le Chapitre I de ce travail de recherche suppose qu'une amélioration énergétique dans un bâtiment permet une diminution du besoin en chaud et dès lors, une réduction de la consommation d'énergie à destination du chauffage.

Le Tableau 30 remet en évidence les simulations effectuées pour plus de compréhension des résultats discutés ci-dessous, à la fois pour l'observation à l'année 2022 mais également pour les projections climatiques.

Tab. 30 Récapitulatif des simulations effectuées pour les améliorations énergétiques. Source : auteure (2025).

Simulation	Explication
A	Simulation initiale sans piste d'amélioration
B.2	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale
B.3	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois
C	Simulation avec parois identiques à la simulation A et modification des fichiers texte pour implémenter une consigne de température fixée à 20°C maximum et avec une simulation d'un état hors gel à 12°C en période estivale
D.2	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine minérale, sol isolé avec 2 cm de laine minérale + thermostats simulés
D.3	Simulation avec murs extérieurs et toiture isolée avec 15 cm de laine de bois, sol isolé avec 2 cm de laine de bois + thermostats simulés

Les résultats présentés au Chapitre IV indiquent une diminution de la consommation pour chaque amélioration énergétique proposée soient l'isolation, la régulation des consignes de températures et la combinaison des deux pistes d'amélioration énergétique.

Afin de pouvoir observer et discuter les résultats dans leur ensemble, le graphe suivant (voir Figure 28) propose une comparaison des cinq simulations :

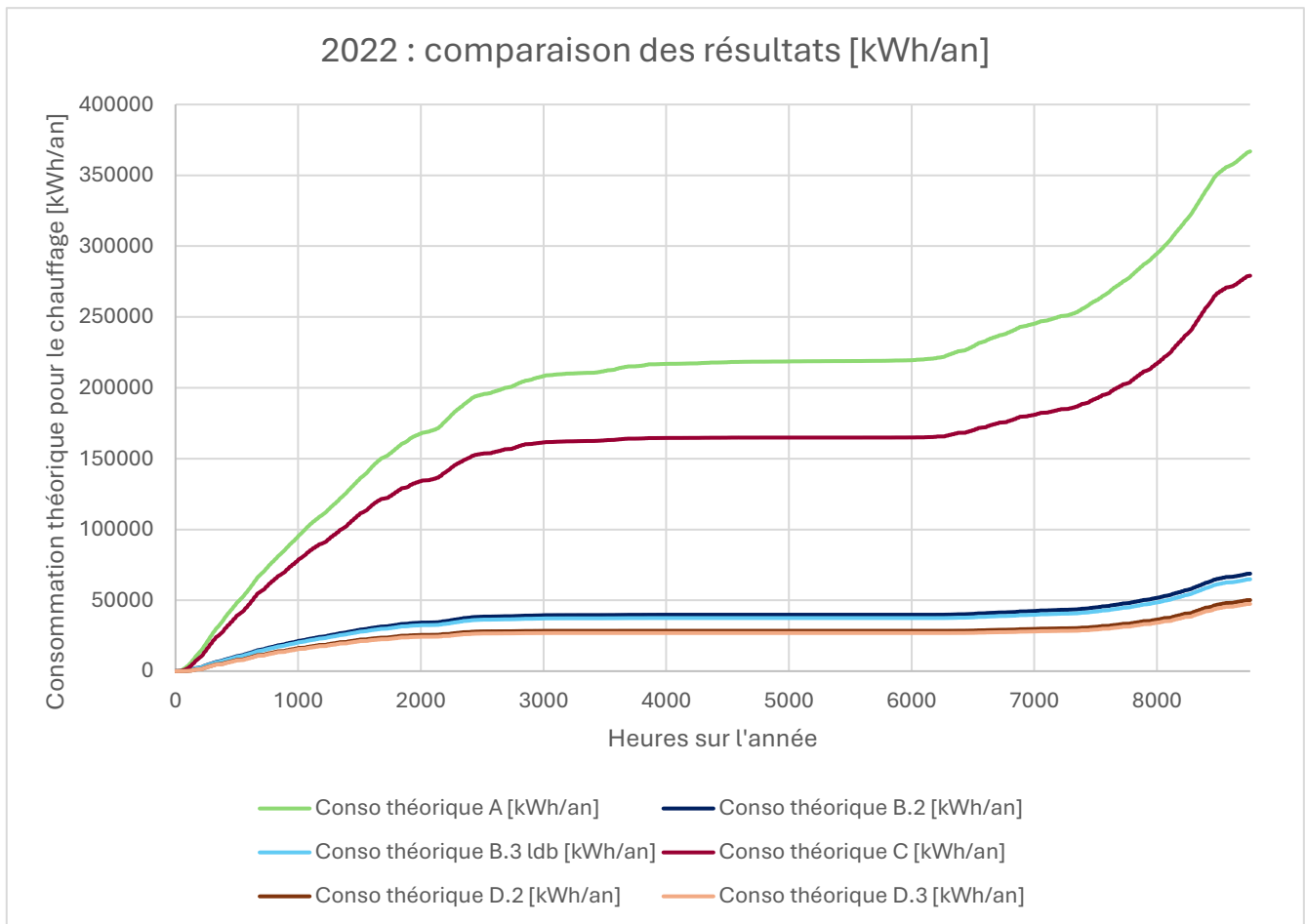


Fig. 28 Comparaison des résultats [kWh/an] pour chaque amélioration énergétique proposée pour l'année 2022. Source : auteure (2025).

Si l'on compare la simulation A et les deux simulations B.2 (laine minérale) et B.3 (laine de bois), on constate une diminution très nette de la consommation théorique d'énergie pour le chauffage lors de la pose de l'isolant. Si l'ADEME estime que l'isolation d'un bâti permet une diminution d'environ 65% avec, dans les valeurs maximales, 30% pour la toiture, 25% pour les parois extérieure et 10% pour le sol (ADEME, 2025), les résultats du Tableau 8 montrent qu'isoler l'enveloppe extérieure en ajoutant 2 cm au sol permettrait d'augmenter la diminution de la consommation jusqu'à plus de 80%.

Les résultats de la simulation B semblent plus performants que les valeurs indicatives de l'Agence française.

On constate, sur la Figure 28, que simuler l'ajout de thermostat (simulation C) permet de diminuer d'un quart la consommation d'énergie par rapport à la simulation initiale en l'état actuel d'utilisation du chauffage dans les blocs D et E de la Caserne.

Selon le Guichet Energie Wallonie, du SPW Energie, augmenter la température intérieure de 1°C équivaut à une augmentation de la consommation de 7 à 8% (Guichet Energie Wallonie, s.d.). Pauline Abrahams, dans le cours intitulé Simulation et Optimisation, évoque 7% (Abrahams, 2024) qui sera la valeur hypothétique prise pour cette discussion.

Lorsque les deux pistes sont combinées dans les simulations D.2 et D.3, il est observable que l'ajout d'une régulation des consignes de températures et d'une isolation permet de réduire considérablement la consommation d'énergie pour couvrir les besoins en chaud des blocs D et E de la Caserne, par rapport à l'état actuel du bâtiment (Simulation A). On observe également que les courbes de consommation D sont lissées par rapport à la A, ceci est dû au format de l'axe des ordonnées qui permet de comparer avec la simulation A, davantage consommatrice. Il en va de même pour la simulation B.

1.2. Discussion des résultats

1.2.1. Valeurs indicatives de l'ADEME

Dans un premier temps, il est important de noter que les valeurs obtenues par l'ADEME pour l'isolation d'une enveloppe de bâti sont à titre indicatif et ne constituent pas une réponse à toute situation. Il n'est pas expliqué comment ces valeurs sont obtenues mais nous supposons qu'elles sont le résultat de divers tests et constituent une moyenne qui donne une idée à quiconque voudrait entreprendre des travaux d'isolation.

De plus ce document comporte des valeurs typiques d'un logement, avec une superficie inférieure et une construction plus récente. Cela pourrait potentiellement affecter l'adaptabilité de ces valeurs au cas d'étude de la Caserne.

1.2.2. Coefficient de forme

Ensuite, la diminution de la consommation d'énergie pourrait notamment se justifier par la forme rectangulaire des blocs D et E. En architecture, il existe un coefficient de forme qui exprime le rapport entre la surface d'enveloppe en contact avec l'extérieur « s » et le volume habitable du bâtiment « V » (Catalina, Roux, Virgone, & Blanco, 2008) et qui permet de calculer les déperditions de chaleur d'un bâtiment en fonction du volume chauffé :

$$Cf = \frac{s [m^2]}{V [m^3]}$$

Plus ce coefficient est faible, plus un bâtiment est considéré comme compact et nécessitera une consommation inférieure de chauffage puisqu'il y aura moins de pertes de chaleur pour un même volume. Plus le coefficient sera élevé, plus il y aura de déperditions de chaleur et plus la consommation pour chauffer l'espace sera élevée.

Dans l'étude de cas des blocs D et E, la forme rectangulaire et compacte des bâtiments offre une structure potentiellement plus performante d'un point de vue énergétique et thermique, ce qui

pourrait augmenter la diminution simulée de la consommation par rapport aux mesures de l'ADEME. Dès lors, il semble cohérent que les résultats des simulations soient supérieurs aux valeurs indicatives de l'agence française.

1.2.3. Coefficient de déperdition par transmission

Le besoin en chaleur et la consommation d'énergie pour le chauffage sont proportionnels au coefficient de déperdition par transmission « H_T » [W/K], lequel dépend des caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment selon la relation suivante (André, 2023) :

$$Q = \sum[HT * (T_{in} - T_{out})] * t$$

Où :

- Q [J] quantifie l'énergie perdue par transmission,
- H_T [W/K] est le coefficient de déperdition par transmission,
- T_{in} [°C] est la température à l'intérieur de la zone,
- T_{out} [°C] est la température à l'extérieur
- t [s] est la durée de la période de calcul des déperditions.

Le coefficient de déperdition par transmission « H_T » est la somme des produits des surfaces « A » des différentes parois et des coefficients de transmission thermique « U » [W/m²K] de ces parois.

Ainsi, une amélioration de l'isolation par une réduction des valeurs « U » entraîne une diminution du coefficient de déperdition « H_T » et donc des pertes de chaleur au sein d'un bâtiment ou d'une zone thermique.

Comme expliqué au point 2 du Chapitre IV, lorsque la simulation B est traitée, l'amélioration de l'enveloppe par ajout d'isolant sur la paroi « Mur-Ext » se traduit par une diminution du coefficient de transmission thermique « U » de la paroi, en fonction de l'épaisseur de l'isolant appliqué (voir Figure 23).

Avec l'ajout de 15 cm d'isolant dans les toitures et parois verticales extérieures de l'enveloppe du bâti et de 2 cm au sol, les coefficients de transmission thermique des parois deviennent inférieurs à 0.24 W/m²K (à l'exception du plancher qui nécessite également 15 cm pour respecter les exigences de la norme PEB).

Cette amélioration de l'enveloppe thermique semble avoir un impact notable sur la réduction de la consommation de chauffage des simulations B par rapport à la simulation A.

1.2.4. Impact de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur

Dans la simulation C, la température nocturne ou en période d'inactivité est fixée à 12°C et la température maximum est à 20°C en période occupée. Cet écart de 8°C, lorsqu'on le multiplie par 7% sur les 8h d'occupation (en moyenne) de la journée, donnera une économie d'environ 15 à 20%.

La diminution indiquée de 24% correspond à une simulation dans laquelle le système HVAC n'a pas été modélisé. Cela signifie qu'il n'y a aucune perte au démarrage du chauffage. La simulation oblige la consigne à 20°C à l'heure indiquée dans les fichiers texte lus par le Type 9 sans prendre en compte le temps de démarrage du chauffage ni une diminution de la température progressive lorsque le chauffage s'éteint. L'écart de température de 8°C reste assez similaire à l'écart présent dans la simulation A où certaines zones étaient maintenues à 15°C en période inoccupée et entre 20 et 24°C pour les périodes occupées, selon les sites observés lors de la visite. Si l'écart de température intérieur et extérieur peut parfois être inférieur dans la simulation A à ce qui est observé dans la simulation C qui conserve toujours un écart de 8°C, le fait que les températures soient plus basses pourrait expliquer la diminution de la consommation puisque la température extérieure est plus proche des 20°C que des 24°C en période de chauffe.

Nonobstant, cette simulation s'avère pertinente dans le cadre du projet de réseau thermique urbain puisque l'isolation de l'enveloppe du bâti peut s'avérer très onéreuse comparée à la pose de thermostats sur un système existant. De plus, des travaux d'envergure bloqueront potentiellement l'accès aux bâtiments qui abritent des services sociaux très importants pour le bon fonctionnement de la ville, tels que la Croix Rouge, l'ONE ou encore l'abri de nuit.

De ce fait, l'ajout de thermostat peut être envisagé à court terme puisqu'il permet l'économie de près d'un quart de la consommation actuelle d'énergie pour le chauffage et s'avère techniquement plus simple et rapide à mettre en place qu'une isolation de l'enveloppe. Additionné à une sensibilisation du personnel sur la consommation d'énergie et l'importance de la gestion d'un thermostat, cette régulation peut ne pas être compromise et permettre une belle économie de consommation.

Toutefois, la composante sociale, comme vu précédemment, est complexe et nécessite de prendre quelques précautions. Réduire la température dans des locaux occupés n'est pas une action anodine. Le confort de l'occupant, bien qu'estimé suffisant dès 20°C dans un espace de travail (Roulet, 2004), peut se voir altéré si le gestionnaire des lieux diminue la température sans en avertir le personnel.

Dès lors, l'information des occupants peut s'avérer tout aussi utile que la sensibilisation aux enjeux climatiques afin de limiter au mieux la résistance au changement.

Une étude par questionnaire sur différents groupes témoins pourrait s'avérer pertinente afin d'évaluer ce facteur d'opposition au changement du personnel communal si la température de consigne venait à être diminuée prochainement.

1.2.5. Combinaison des pistes d'amélioration

L'ajout, à la fois d'isolant et de thermostats simulés permet d'obtenir une réduction d'environ 86% de la consommation annuelle pour les blocs D et E de la Caserne Léopold.

On constate, si l'on compare ces résultats aux simulations B.2 et B.3 (Tableau 27) qui offrent également des résultats supérieurs à 80% dans la réduction de la consommation, que les thermostats ajoutés à ces simulations D.2 et D.3 n'offrent qu'une compensation supplémentaire assez peu significative.

Cela pourrait vouloir dire, en prenant en compte les résultats des simulations B et C précédentes, que l'ajout d'une isolation a plus d'impact sur la consommation finale d'un bâtiment que sur les systèmes qui régulent l'apport de chaleur. Les quelques pourcents supplémentaires que l'on peut obtenir sont donc assez peu significatifs si des travaux d'isolation du bâti sont entrepris.

Toutefois, comme expliqué dans le point précédent, l'ajout, au préalable de thermostat pourrait constituer une première démarche, plus simple à mettre en place et moins onéreuse, visant à réduire la consommation d'énergie à destination du chauffage et ainsi permettre d'étendre le réseau de chaleur à d'autres bâtiments ou de réduire le dimensionnement du réseau avant d'effectuer d'autres travaux d'envergure comme l'isolation.

1.2.6. Modélisation dans TRNSYS 18

L'isolation dans l'outil TRNSYS 18, telle que les simulations effectuées le proposent, suppose une maîtrise parfaite de la pose de l'isolant : aucun pont thermique entre les plaques d'isolants n'existe, les ébrasements entre surfaces verticales et horizontales isolées sont parfaitement comblés. L'isolant est posé de manière continue sur l'intégralité des parois, formant une couche homogène et sans discontinuité.

Toutefois, la réalité du terrain impose parfois de devoir découper des plaques d'isolant afin de les insérer, des écarts entre les plaques peuvent apparaître, créant ainsi des discontinuités dans l'enveloppe isolante, des joints peuvent être oubliés, etc. La valeur théorique obtenue par TRNSYS 18 pour un coefficient de transmission thermique « U » d'une paroi est donc potentiellement supérieure à la valeur réelle que la pose d'un isolant pourrait donner à cette même paroi.

Il en va de même pour le coefficient de déperdition par transmission « H_T » qui supposerait une pose parfaite sur l'ensemble de la surface de la paroi considérée. Il est possible que la résistance thermique d'une paroi isolée ne soit pas uniforme en raison de difficulté de pose du matériau choisi. TRNSYS 18, dans les simulations effectuées, tient compte d'une valeur constante appliquée à chaque m^2 de paroi, ce qui n'est pas le cas dans la réalité et pourrait causer un léger biais dans les résultats.

En outre, l'infiltration renseignée pour la valeur « n_{sb} » dans les simulations est tout à fait théorique et arbitraire. Seul un test d'étanchéité à l'air permettrait d'obtenir une valeur précise pour chaque zone thermique. Une valeur constante est donc appliquée dans chaque zone thermique considérée et ne prend pas en compte certaines spécificités d'enveloppe qui pourraient exister dans des zones et qui pourraient impacter le résultat de consommation.

Par ailleurs, TRNSYS 18, dans l'interface de simulation réalisée, ne prend pas en compte la composante humaine qui pourrait interférer avec les résultats présentés. En effet, l'occupant peut décider d'éteindre ou d'allumer un chauffage, d'ouvrir une fenêtre, de baisser des stores ou tout autre comportement non pris en compte dans cette étude et qui pourraient influencer les résultats obtenus.

1.3. Discussion générale sur les pistes d'amélioration énergétique

La deuxième hypothèse présentée dans ce mémoire concerne l'amélioration énergétique d'un bâtiment. En effet, l'isolation de l'enveloppe et la régulation de la température de consigne intérieure permettent, dans cette étude de cas, de diminuer la consommation d'énergie respectivement d'environ 80% lors de la simple isolation, de 25% lors de la pose d'un thermostat dans les zones thermiques et, de 85% lors de la combinaison des deux pistes d'amélioration énergétique des blocs D et E de la Caserne.

Tab. 31 Pourcentage de diminution de la consommation pour chaque simulation d'amélioration énergétique par rapport à la consommation initiale de l'année 2022. Source : auteure (2025).

A	B.2 laine minérale	B.3 laine de bois	C	D.3 laine minérale	D.3 laine de bois
367 400 kWh pour l'année 2022	-81%	-82%	-24%	-86%	-87%

Ces valeurs, malgré les biais détaillés dans la discussion des résultats du présent chapitre, permettent de confirmer l'intérêt d'une isolation, mais également de l'ajout de thermostat dans la diminution du besoin en chaud d'un bâtiment et, dès lors, de la consommation d'énergie à destination du chauffage.

2. Observation de chaque simulation en fonction des trajectoires climatiques étudiées

2.1. Comparaison des résultats

2.1.1. Simulation A

Pour rappel, la simulation A correspond à la situation des blocs D et E tels qu'ils le sont aujourd'hui, à savoir sans isolation pour la plupart des parois, sauf certains pans de murs de la crèche et de la cage d'escalier gauche du bloc E.

Le graphe suivant montre l'évolution intégrée de la consommation théorique recalculée en fonction du besoin simulé pour la simulation A et pour chaque scénario étudié soient l'année 2022, le SSP 2-4.5 à l'horizon 2050 et 2100 ainsi que le SSP 5-8.5 également à l'horizon 2050 et 2100.

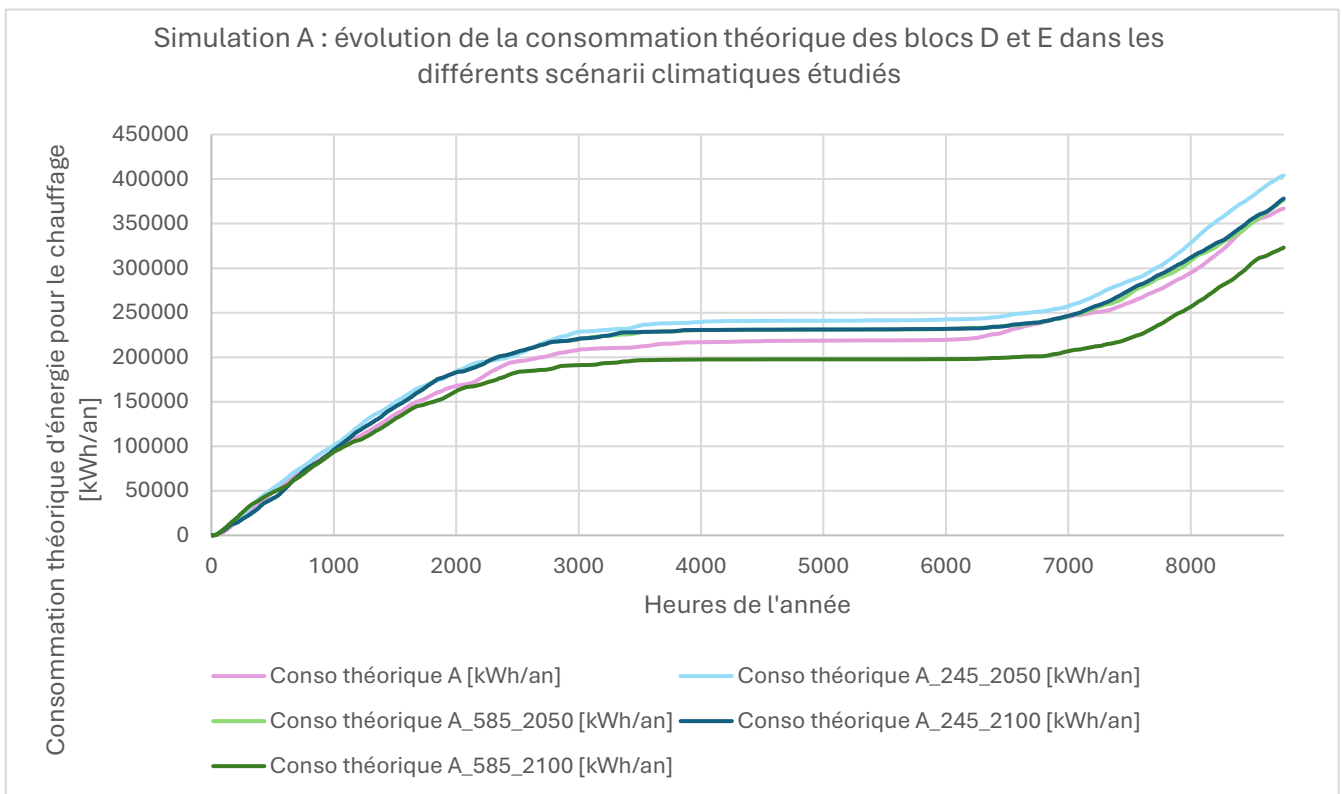


Fig. 29 Simulation A : évolution de la consommation théorique d'énergie à destination du chauffage pour les scénarii climatiques étudiés. Source : auteure (2025).

On remarque une diminution de la consommation pour la simulation initiale à l'horizon 2100 du scénario extrême SSP 5-8.5, par rapport à l'année 2022. Les autres scénarii montrent une augmentation de la consommation pour les projections climatiques.

2.1.2. Simulation B

2.1.2.1. B.2 : laine minérale

Dans ce graphe (voir Figure 30), on compare les scénarii climatiques étudiés avec le placement de laine minérale dans les parois verticales et toitures, à raison de 15 cm en parois extérieures et 2 cm dans le sol.

L'axe des ordonnées a été placé à une échelle différente de la simulation A afin de pouvoir observer la diminution de consommation. Avec un axe similaire à la simulation A, les courbes se confondent de sorte que les résultats des différentes projections ne sont pas visibles.

Afin d'observer la diminution de la consommation, les résultats chiffrés de chaque simulations sont écrits dans le chapitre précédent.

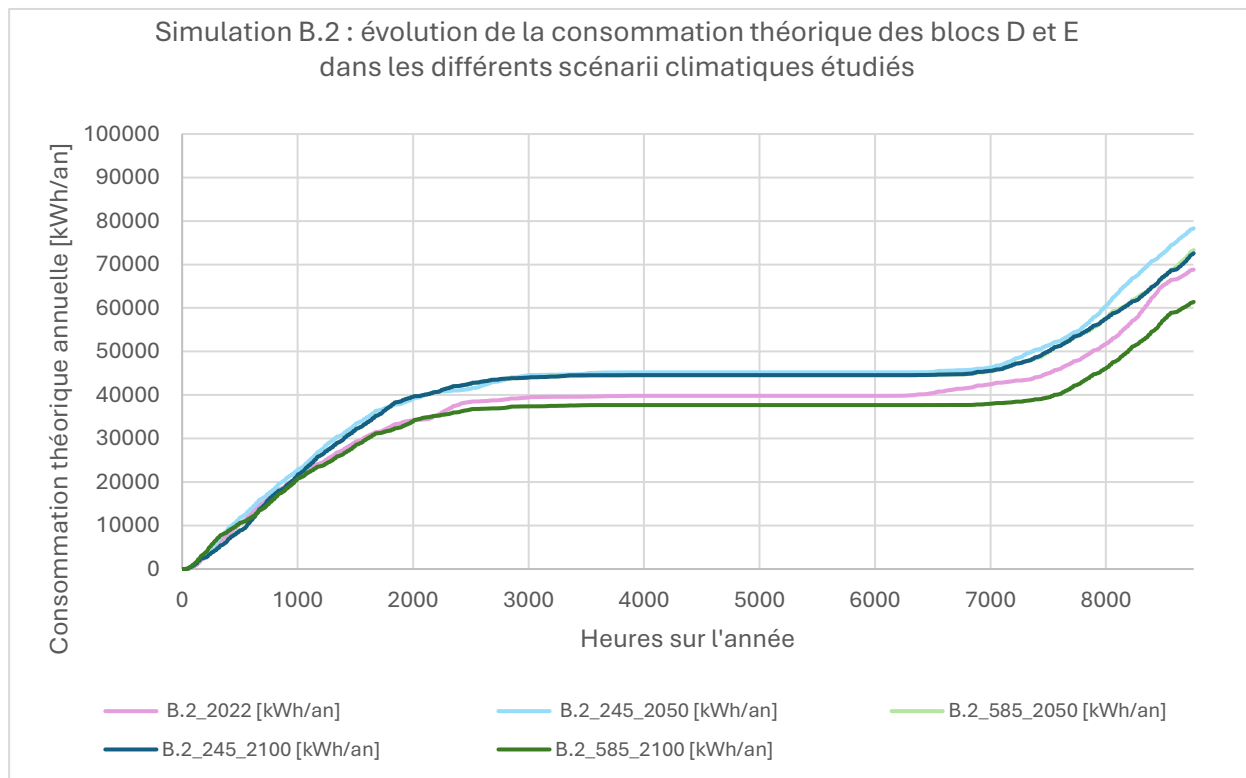


Fig. 30 Evolution de la consommation théorique pour les différents scénarii pour la simulation B.2 avec laine minérale. Source : auteure (2025).

De manière similaire à la simulation A, les courbes du SSP 2-4.5 à l'horizon 2100 et du SSP 5-8.5 à l'horizon 2050 se confondent totalement, en raison de la méthodologie d'obtention des données de température par Doutréou et al. (2022).

2.1.2.2. B.3 : laine de bois

Comme constaté dans les résultats des simulation B.2 et B.3 en 2022, la laine de bois offre, pour les projections, une meilleure résistance du cas d'étude au froid et la consommation est légèrement diminuée. Néanmoins, l'écart entre la consommation annuelle d'énergie pour la laine minérale et la laine de bois tend à diminuer à mesure que les scénarii sont extrêmes et temporellement éloignés. Cela pourrait signifier que même si la laine de bois offre de meilleurs résultats en 2022, cette issue n'est pas garantie à l'horizon 2100 au plus.

Cependant, la laine de bois possède des propriétés très similaires à la laine minérale et les résultats des graphes de consommation sont quasi identiques, avec une diminution très similaire aux simulations avec laine minérale. Ces graphes de consommation ne seront donc pas proposés mais la surchauffe liée à ces deux poses d'isolant sera discutée ultérieurement.

2.1.3. Simulation C

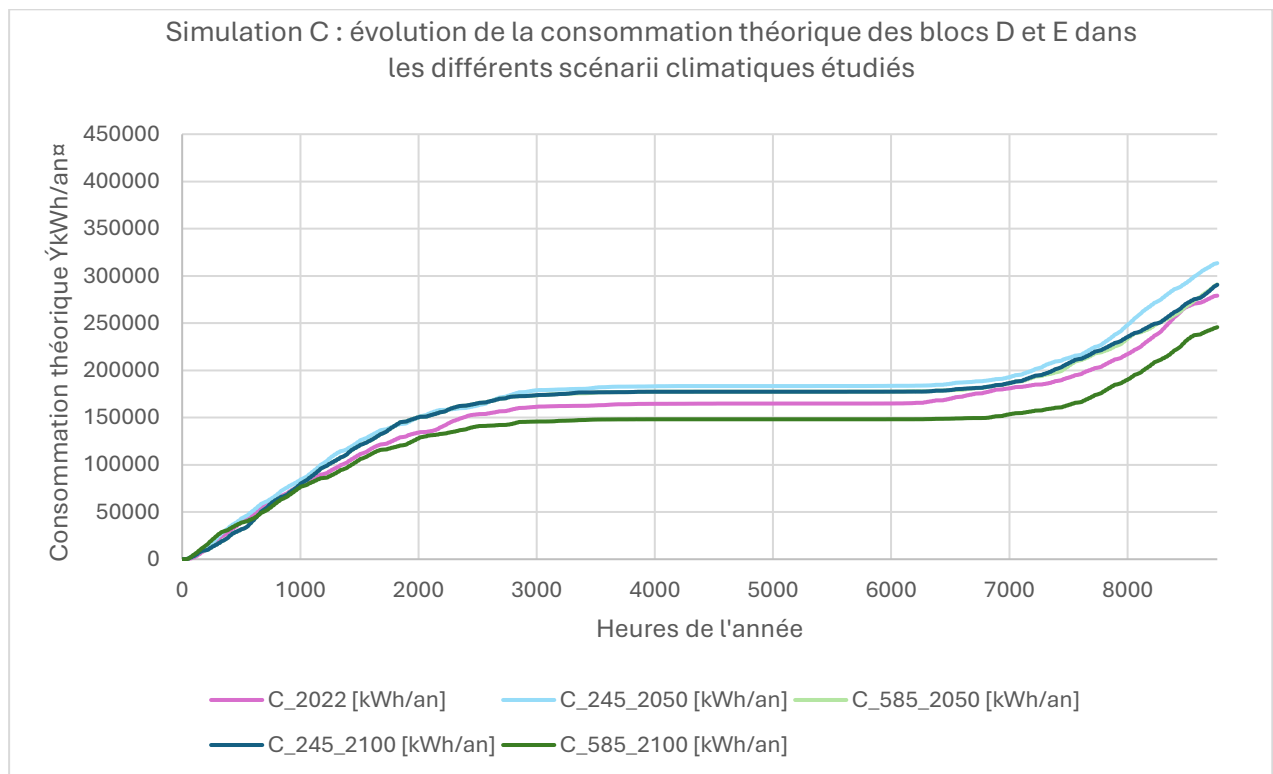


Fig. 31 Evolution de la consommation théorique à destination du chauffage pour les blocs D et E de la Caserne Léopold pour la simulation C en fonction des différents scénarii étudiés. Source : auteure (2025).

Les résultats de la simulation C dans les projections montrent une diminution entre 33% pour le scénario SSP 5-8.5 et 15% pour le SSP 2-4.5 en 2050, soit le résultat le moins élevé. La réduction de la consommation pourrait donc osciller entre 15 et 30% environ, en fonction des températures extérieures pour une même consigne de température donnée.

2.1.4. Simulation D

2.1.4.1. D.2 : laine minérale

De même que pour la simulation B.2, le graphe a été remis à échelle de manière à pouvoir comparer les consommations de chaque simulation.

Cette simulation représente la combinaison d'isolant laine minérale et l'ajout de thermostats afin d'obtenir une optimisation des systèmes couplée à une amélioration de l'enveloppe thermique.

Sur la Figure 32, les consommations théoriques pour les projections climatiques semblent indiquer le maintien de la double performance isolation et thermostat avec une variation entre 84 et 88% de diminution de la consommation entre le scénario le plus optimiste à l'horizon le plus proche et le scénario de plus pessimiste et temporellement plus éloigné.

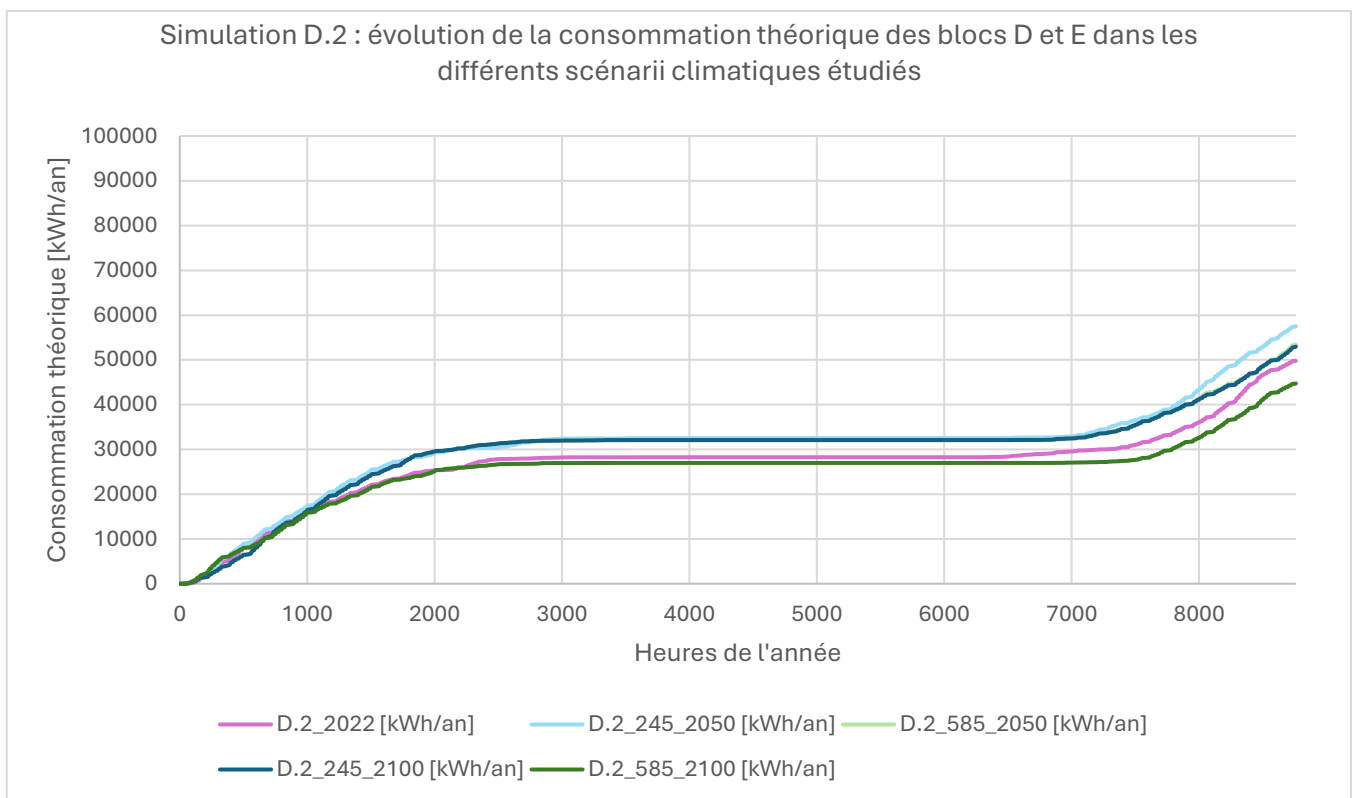


Fig. 32 Evolution de la consommation théorique à destination du chauffage pour la simulation D.2 avec laine minérale selon les scénarii étudiés. Source : auteure (2025).

2.1.4.2. D.3 : laine de bois

Comme expliqué précédemment, le graphe est pratiquement identique et ne sera pas discuté dans le cadre de la consommation.

2.2. Discussion des résultats

2.2.1. Biais dans la méthodologie de calcul de la consommation théorique

Il existe un biais non négligeable dans les simulations, quelles qu'elle soient, puisque les consommations théoriques sont calculées sur base d'un rendement constant de 75%.

Cette déduction de pertes est à prendre avec précaution puisque d'une part, elle ne reflète peut-être pas la réalité car elle provient d'un paramétrage des blocs D et E basé sur diverses hypothèses. D'autre part, les pertes ne sont pas constantes et le système HVAC n'ayant pas été modélisé, il se peut que les pertes soient variables en fonction des heures de fonctionnement de la chaudière. Dès lors, cette valeur constante pourrait fausser le calcul de la consommation théorique pour les projections futures, mais également pour les résultats de l'année de référence 2022.

Par ailleurs, les projections ne prennent pas en compte le vieillissement du système, les pertes qui peuvent s'ajouter en cas d'hivers plus rudes, un changement de maintenance ou de régulation, etc. De plus, bien que les visites des espaces abritant les chaudières n'aient pas révélé de systèmes vétustes et devant être remplacés sous peu, il n'est pas improbable qu'un remplacement du système HVAC s'opère d'ici à 2050. Cela pourrait influencer la consommation d'énergie si un système avec un meilleur rendement est installé dans le cadre de l'intégration de la Caserne à un réseau de chaleur. Les résultats proposés pourraient alors être revus, en fonction des rendements nominaux d'un nouveau système.

Néanmoins, il s'agit ici de résultats indicatifs des tendances et non d'une réalité absolue de la situation. Ils sont à remettre en considération de manière continue pour chaque simulation réalisée et pourraient se révéler erronés dans des projections futures qui prendraient en compte un renouvellement ou quelconque travaux de rénovation du système de chauffage.

2.2.2. Evolution de la consommation à destination du chauffage pour les projections observées

Lorsque l'on compare les graphes entre eux, on remarque que, pour toutes les simulations, la consommation d'énergie à destination du chauffage pour le cas pratique, augmente pour chaque scénario, à l'exception du scénario SSP 5-8.5 à l'horizon 2100.

Ce phénomène peut paraître étrange en raison de l'augmentation prévue des températures extérieures mais pourrait également se justifier par le choix du modèle. En effet le modèle MAR avec un forçage par le modèle MIROC6 peut inclure des pics plus chauds en été et des pics plus froids en hiver, en plus de l'augmentation moyenne des températures. C'est ce qui est observable lorsque l'on compare les

années typiques réalisées par Doutréou et al. (2022) et l'année de référence dont les données météorologiques ont été relevées quotidiennement.

Sur la Figure 33 ci-dessous, les données météorologiques de 2022 sont comparées, heure par heure, aux projections climatiques des chercheurs universitaires.

Pour les scénarii SSP 2-4.5 (en bleu, à gauche), des hivers plus froids, visibles par des pics de minimas s'approchant des -10°C , indiquent que les extrêmes froids vont s'intensifier. Les étés, quant à eux, seront légèrement plus chauds, surtout à l'horizon 2100, avec des températures visiblement plus élevées qu'à l'année 2022. On remarque également une augmentation des pics de chauds, indiquant de potentiels épisodes de canicules plus fréquents et plus intenses.

Pour les scénarii SSP 5-8.5 (en vert, à droite), l'horizon 2050 présente des pics de froids également aux alentours des -10°C et des températures plus élevées en été que pour l'année 2022 ou les trajectoires 2-4.5. A l'horizon 2100, l'augmentation des températures prévues est particulièrement visible puisque les pics de froids, bien que présents, sont moins intenses et que les températures en été sont plus chaudes. Les étés pourraient également être marqués par des épisodes de canicules plus intenses dans cette trajectoire extrême, comparé au SSP 2-4.5.

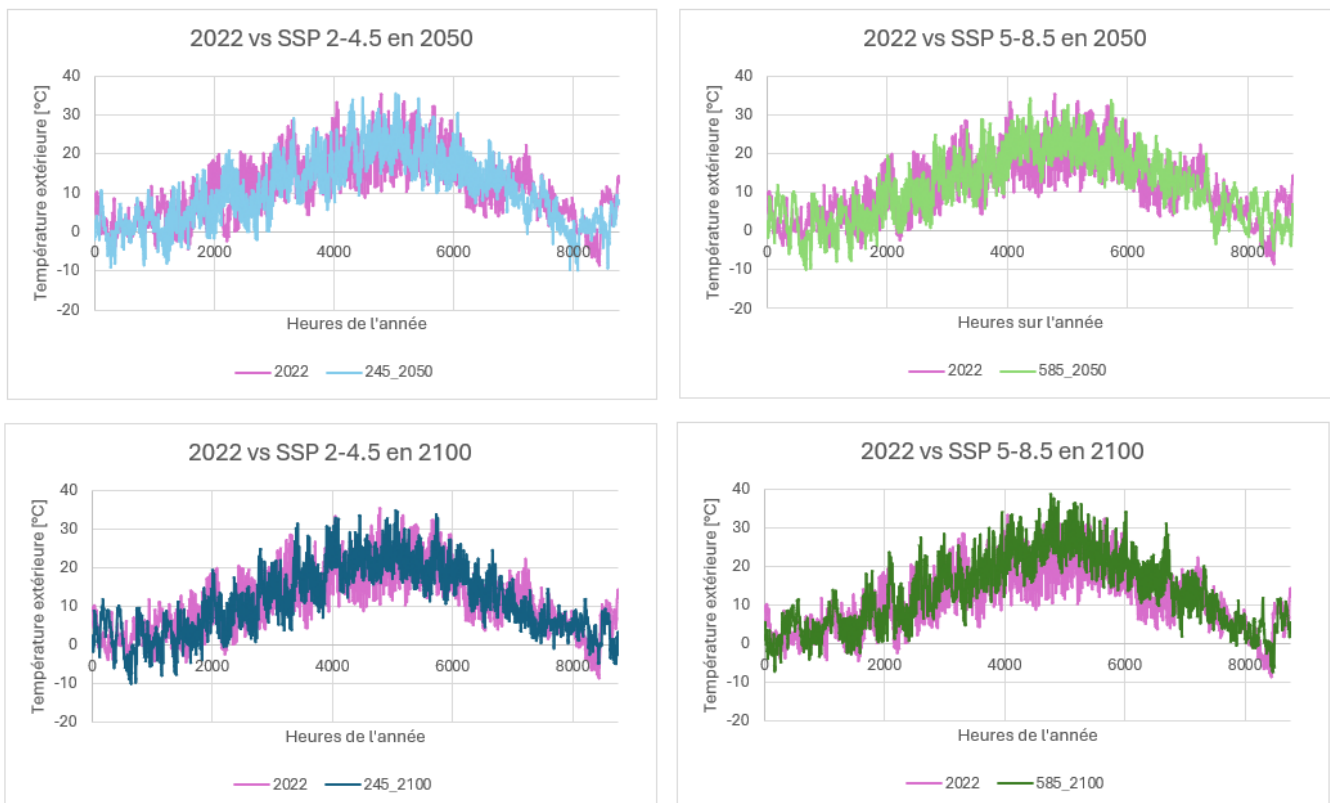


Fig. 33 Comparaison des températures extérieures de l'année de référence 2022 par rapport aux températures extérieures des scénarii étudiés. Source : auteure (2025) & Doutréou et al. (2022).

Un autre constat a également été fait quant aux variations de températures. L'année 2022 montre une marge de températures plus lissée que les projections futures. Les scénarii projetés indiquent plus de pics de chaud et de froid. Cela pourrait notamment indiquer que les extrêmes de températures évoluent en fonction des scénarii. Les pics extrêmes de froid durant les périodes hivernales peuvent provoquer des écarts de températures plus importants, ce qui aurait pour corolaire l'augmentation de la consommation théorique à destination du chauffage.

L'augmentation de la consommation pour chaque simulation comparée à l'année 2022 pourrait indiquer l'importance des pics extrêmes climatiques durant les hivers par rapport à l'augmentation moyenne des températures lorsque la consommation d'énergie à destination du chauffage est étudiée.

Pour les scénarii SSP 2-4.5 en 2100, SSP 5-8.5 en 2050 et l'année de référence 2022, les courbes se confondent sur la fin d'année pour chaque simulation, donnant une consommation théorique finale assez similaire pour les trois scénarii. Lorsque l'on compare les températures pour ces trois essais, on remarque que l'augmentation des températures pour les scénarii projetés, pourrait potentiellement compenser les pics extrêmes de froids visibles sur les deux trajectoires futures, en moyenne saison. Le tout donnerait des consommations finales assez similaires, comme pour les températures observées à la Figure 33 où les minima diminuent et les maxima augmentent.

Dans le cas du SSP 2-4.5 à l'horizon 2050, les pics de températures extrêmes durant la période hivernale sont bien présents. On remarque également une légère diminution des températures en hiver comparé à l'année 2022. Bien que les projections indiquent une augmentation moyenne des températures de 2°C à l'horizon 2050 pour ce scénario (SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, s.d.), cette hausse moyenne des températures semblerait ne pas compenser les hivers plus rigoureux que le scénario projeté, en termes de consommation d'énergie à destination du chauffage.

Lorsqu'on s'attarde sur le cas du SSP 5-8.5 à l'horizon 2100, l'inverse est remarqué. La consommation annuelle s'avère moins élevée que pour tous les autres scénarii observés. Les températures projetées de ce scénario, visible sur la Figure 33, montrent à la fois que les pics d'extrêmes plus froids s'atténuent, mais également que les températures augmentent pour la période estivale.

On remarque, sur les Figures 29, 30, 31 et 32, que l'écart est assez important entre la courbe de consommation de 2022 et celle projetée dans le SSP 5-8.5 en 2100, surtout en fin d'année. Cela pourrait indiquer que la hausse des températures moyennes sur l'année entière permettrait une diminution de la consommation finale, qui serait également possible grâce à la diminution de fréquence et d'intensité des extrêmes froids durant les périodes hivernales en 2100 pour le SSP 5-8.5, selon les températures projetées du scénario.

De ce fait, il se pourrait que la hausse des températures moyennes sur l'année ne soit peut-être pas le seul facteur qui influencera la consommation finale d'un bâtiment, comme c'est le cas pour la Caserne. Les pics de froid durant la période de chauffe représentent un phénomène météorologique à prendre en compte puisque ses effets pourraient potentiellement impacter la consommation finale d'un bâtiment pour ses besoins en chauffage, comme c'est le cas pour le SSP 2-4.5 à l'horizon 2050.

Il est à noter toutefois que seul le scénario SSP 5-8.5 a été calculé par Doutreloup et son équipe. Le scénario 2-4.5 a été recalculé en fonction du modèle régional forcé par les modèles globaux. Dès lors, il est cohérent que les courbes du SSP 2-4.5 à l'horizon 2100 et celles du SSP 5-8.5 à l'horizon 2050 se confondent pour tous les résultats proposés dans le cadre de ce travail (Doutreloup, et al., 2022). Les projections les plus éloignées temporellement sont obtenues par les horizons plus proche du scénario le plus extrême. Ceci confirme que les courbes se chevauchent et sont pratiquement indissociables sur les graphes proposés dans ce travail.

2.2.3. Effet des projections climatiques sur le nombre d'heures de chauffe

Les résultats de la simulation A supposent que, sans isolation, les blocs D et E seront davantage soumis aux températures extérieures et si le scénario SSP 5-8.5 montre une augmentation des températures extérieures, l'écart entre les températures intérieures et extérieures se voit réduit. Cela pourrait avoir un impact sur le nombre d'heures de fonctionnement de l'unité de chauffage.

On remarque plus particulièrement dans la comparaison de la simulation B.2 avec l'année 2022, que l'effet de l'isolant permettrait de réduire le nombre d'heures de chauffe sur l'année (voir Figure 30).

Pour 2022, le besoin en chaud s'arrête et stagne aux environs de l'heure 3 000, soit dans le courant de la première semaine du mois de mai, et reprend vers l'heure 6 500, soit au 1^{er} octobre environ. Ceci comptabilise un total de 5 260 heures de chauffage environ.

Pour les projections climatiques du SSP 2-4.5 aux horizons 2050 et 2100 et pour le SSP 5-8.5 à l'horizon 2050, la période de chauffe s'arrête aux environs de l'heure 2 800, soit au 1^{er} mai environ et reprend à l'heure 6 800, soit dans la dernière semaine du mois d'octobre. Cela ferait un total de 4 760 heures de chauffe sur l'année.

Pour le scénario SSP 5-8.5 à l'horizon 2100, le chauffage des blocs se stabilise vers l'heure 2 500, soit à la mi-avril et reprend vers l'heure 7 000 soit à la mi-novembre. La période estivale semble donc s'étendre dans les projections météorologiques du scénario le plus extrême observé.

Ce phénomène est nettement moins visible dans le graphe pour la simulation A (voir Figure 29), ce qui pourrait signifier que l'ajout d'isolant dans l'enveloppe du bâtiment contribuerait peut-être à une certaine résilience du bâtiment face aux mi-saisons.

En effet, l'efficacité énergétique d'un bâtiment est influencée par les conditions climatiques extérieures. Les projections climatiques indiquent une augmentation de la température moyenne ainsi qu'une augmentation des pics de froids plus extrêmes durant les périodes hivernales. Avec une enveloppe isolée, le bâtiment peut s'avérer moins sensible aux variations de températures des saisons et permettre une consommation d'énergie différée et sur une période moins longue que pour l'année 2022.

Néanmoins, la consommation finale est augmentée pour le scénario 2-4.5 en 2050 pour chaque simulation. Cela indiquerait que les projections climatiques annonçant des automnes plus doux ne compenseraient pas forcément les pics de froids prévus et que ceux-ci pourraient tout de même mener à une consommation finale plus élevée, malgré des périodes de chauffe plus courtes.

Le même léger décalage des périodes de chauffe est constaté sur la simulation C. Dans cette simulation, la Figure 31 montre que, pour l'année 2022, la période de chauffe stagne vers l'heure 3 500, soit à la fin du mois de mai, puis reprend dès l'heure 6 200, soit à la mi-septembre. Cela indiquerait un nombre d'heure de chauffe de 6 060 heures pour l'année de référence.

Pour le scénario extrême SSP 5-8.5 à l'horizon 2100, la consommation à destination du chauffage s'arrête également vers l'heure 3 500 mais reprend seulement à l'heure 6 900 environ, soit à la mi-octobre, près d'un mois plus tard que pour l'année de référence.

Pour les trois autres projections, la courbe se stabilise également vers l'heure 3 500 pour reprendre seulement vers l'heure 6 500, soit au 1^{er} octobre, comptabilisant 5 760 heures de chauffe, soient 300 heures de moins que pour la simulation de référence en 2022.

Ces résultats pourraient confirmer que les périodes de chauffe évoluent à l'avenir pour tendre vers des automnes plus doux et des printemps plus froids que ce que l'année de référence montre. Ce constat est également posé par les climatologues (Fettweis, 2024) (SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, s.d.).

Toujours pour la simulation C, on remarque que l'écart entre chaque consommation théorique projetée reste assez stable tout au long de l'année et que, dans les 3 000 premières heures, la consommation n'augmente pas de la même manière que pour la simulation B.2. Ce résultat indiquerait que l'ajout d'un thermostat permet de compenser les pertes thermiques liées à l'écart de température entre l'intérieure et l'extérieure, si la température intérieure est abaissée par les thermostats.

Bien que l'ajout de thermostat offre un gain discutable en comparaison avec l'ajout d'isolant, l'écart entre les courbes de consommation des scénarii projetés semble indiquer que l'impact de cette optimisation des systèmes pourraient s'avérer pertinente pour diminuer la consommation d'énergie à destination du chauffage pour les années à venir.

Ce constat est observable également pour les résultats de la simulation D (voir Figure 32) puisque les périodes de chauffe semblent également légèrement décalées.

A l'année de référence 2022, la période de chauffe semble s'arrêter à l'heure 2 500, soit mi-avril pour reprendre à l'heure 6 500, au 1^{er} octobre, pour un total de 4 760 heures de chauffage sur l'année.

Pour le scénario extrême SSP 5-8.5 à l'horizon 2 100, la consommation d'énergie à destination du chauffage semble s'arrêter, sur la Figure 34, à l'heure 2 500 également mais se prolonge jusqu'à l'heure 7 500, soit un peu avant la mi-novembre. Le nombre d'heure de chauffage s'élève à 3 760 heures.

Pour les autres projections, la période de chauffe s'arrête vers l'heure 2 800, au 1^{er} mai et recommence vers l'heure 7 000, soit dans le courant de la dernière semaine du mois d'octobre.

Cette simulation confirme également la prolongation de la période estivale sur l'automne qui semble, d'une part maintenir des températures plus élevées dans les projections, comme on peut le voir sur la Figure 32, d'une autre offrir une certaine possibilité de résilience d'un bâtiment isolé face à un autre.

Le Tableau 32 reprend toutes les informations discutées ci-dessus.

Tab. 32 Tableau de l'heure à laquelle le système de chauffage s'arrête et reprend, avec le nombre d'heures de chauffage pour chaque simulation et dans toutes les trajectoires socio-économiques partagées observées. Source : auteure (2025).

	Heure à l'arrêt	Heure à la reprise	Nombre d'heures de chauffage [h]
Simulation A			
2022	4 000	6 100	6 660
SSP 5-8.5 en 2100	3 500	6 900	5 360
Autres	4 000	6 400	6 360
Simulation B			
2022	3 000	6 500	5 260
SSP 5-8.5 en 2100	2 500	7 000	4 260
Autres	2 800	6 800	4 760
Simulation C			
2022	3 500	6 200	6 060
SSP 5-8.5 en 2100	3 500	6 900	5 360
Autres	3 500	6 500	5 760
Simulation D			
2022	2 500	6 500	4 760
SSP 5-8.5 en 2100	2 500	7 500	3 760
Autres	2 800	7 000	4 760

Une ligne du temps se trouve en Annexe 5 afin d'observer les mois en fonction des heures.

2.2.4. Effets des projections climatiques sur les performances des améliorations énergétiques

2.2.4.1. Isolation de l'enveloppe

Comme vu précédemment, l'efficacité d'une isolation thermique dépend directement de l'écart de température entre la consigne intérieure et le climat extérieur auquel le bâtiment est soumis.

Plus cet écart est élevé, plus les pertes de chaleur par transmission à travers les parois sont importantes. Dès lors, plus le gradient de température est élevé, meilleur sera l'impact de l'isolation.

Lorsqu'on isole les parois extérieures et toitures des blocs D et E, les coefficients de transmission thermiques des parois sont inférieurs aux seuils exigés par la norme (sauf pour le sol).

Les pertes de chaleur par transmission (ou flux de chaleur « Φ » [W]) sont directement proportionnelles au coefficient de déperdition par transmission « H_T », multiplié par l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur (André, 2023). Ceci permet de dégager la quantité de chaleur transférée par unité de temps « Q » [kWh] à travers une paroi. Dès lors, la chaleur perdue par la paroi est dépendante de cet écart de température.

Avec les projections climatiques de Doureloup *et al.* (2022), on constate que l'écart de température durant les périodes de chauffe peut s'intensifier, en comparaison à l'année 2022 ; en raison des pics de froids visibles sur la Figure 33. Bien que les températures moyennes augmentent, comme vu précédemment, les bâtiments seront soumis *de facto* à ces variations climatiques qui pourraient engendrer une consommation supérieure pour les années à venir, comme les résultats l'indiquent.

En observant les premières 3000 heures de consommation d'énergie à destination du chauffage de la simulation B.2, on remarque dès l'heure 1 000, soit à la mi-février environ, qu'un écart se crée entre l'année 2022 et le SSP 5-8.5 à l'horizon 2100 d'une part, et d'autre part les SSP 2-4.5 en 2050 et 2100 et le SSP 5-8.5 à l'horizon 2050.

Cet écart est probablement directement lié aux pics de froids qui sont visibles sur ces trois dernières trajectoires (voir Figure 30). Le scénario 5-8.5 et l'année 2022 indiquent, à nouveau en deans les 3 000 premières heures, moins de pics de froid et une température moyenne plus élevée que sur les trois autres projections.

Il est observable sur la Figure 33 que les extrêmes plus froids annoncés dans certaines trajectoires entraîneront des écarts de températures plus importants. Cela aura pour corolaire, selon les résultats de cette étude, une augmentation de la consommation d'énergie à destination du chauffage qui ne serait pas compensée par l'augmentation moyenne des températures futures, malgré des parois isolées. Le même écart est observable durant les dernières 2 000 heures de la simulation B.2 projetées dans les scénarii étudiés (voir Figure 30). Les résultats sont identiques pour la simulation B.3 avec laine de bois.

2.2.4.2. Régulation des températures de consigne

De manière similaire, dans la simulation C, l'ajout d'un thermostat semble pouvoir diminuer d'un quart la consommation d'énergie à destination du chauffage, comparé à la simulation A à l'année 2022, mais seulement de 15% pour le SSP 2-4.5 en 2050 et 21% pour les SSP 2-4.5 en 2100 et le 5-8.5 en 2050. Le scénario 5-8.5 à l'horizon 2100 offre une diminution d'un tiers de la consommation avec l'ajout de thermostat. Il semblerait donc qu'il y ait un lien entre la température extérieure et la température intérieure pour la consommation.

Dans cette simulation C, la température intérieure est réduite par rapport à la simulation initiale A par l'ajout de thermostats qui simulent une consigne de température intérieure maximale fixée à 20°C. Ceci permet de réduire l'écart de température entre les espaces intérieurs et l'extérieur.

Dans un contexte de réchauffement climatique global observable dans les scénarii projetés dans ce travail, il est visible, toujours sur la Figure 33, que la température moyenne extérieure tend vers une augmentation, surtout pour le scénario extrême et temporellement éloigné.

Les pics de froid annoncés dans le SSP 2-4.5 à l'horizon 2050 entraîne une augmentation de la consommation, dans la simulation C, par rapport à l'année 2022. Comme expliqué plus haut, la baisse des minimas hivernaux entraînerait une augmentation de la consommation pour pallier les pertes énergétiques du bâtiment. Il semblerait que l'augmentation moins élevée de la température moyenne extérieure comparé aux autres projections pourrait impacter le besoin en chaud des blocs D et E.

Les scénarii intermédiaires (SSP 2-4.5 en 2100 et SSP 5-8.5 en 2050) offrent une diminution de la consommation théorique de 21%, soit 3% de moins que pour l'année 2022. Cela pourrait également s'expliquer par la relation entre les pics de froids présents dans ces trajectoires et une relative augmentation de la température extérieure moyenne. En revanche, le scénario extrême 5-8.5 en 2100 offre une diminution de 33% de la consommation, ce qui indiquerait que la hausse des températures extérieures dans cette trajectoire permettrait une diminution de la consommation supplémentaire par rapport à l'année de référence avec l'ajout de thermostat.

Si l'écart entre la température intérieure, diminuée par la régulation du système de chauffage, et la température extérieure, augmentée par le réchauffement climatique, est réduit, les pertes par transmission le seront aussi. Par conséquent, la consommation théorique annuelle du bâtiment à destination du chauffage diminuerait également dans les scénarii projetés avec l'installation de thermostats, en comparaison avec la simulation A qui ne contient pas de régulation de consigne pour la température intérieure au sein des blocs D et E.

2.2.5. Effets combinés de l'optimisation des systèmes et de l'amélioration de l'enveloppe

Pour rappel, lorsqu'on compare la simulation A avec la C, soit l'ajout de thermostat seul, on peut remarquer que l'ajout d'une certaine régulation permet de diminuer d'environ un quart la consommation théorique finale, l'impact de cette régulation est légèrement amélioré par l'ajout d'un isolant dans la simulation D.2.

Si l'ajout d'un thermostat offre une réduction moyenne pour la consommation d'énergie à destination du chauffage de 24% par rapport à la simulation A, la combinaison de l'optimisation des systèmes et l'amélioration de l'enveloppe permet une diminution de la consommation de 27% en moyenne pour la simulation D.2 par rapport à la B.2 avec l'amélioration de l'enveloppe seule.

Selon les résultats de réduction de consommation mais également lorsque le nombre d'heures de chauffe est pris en considération, il semble tout de même que la combinaison des stratégies d'amélioration énergétique offre les perspectives les plus intéressantes.

Lorsque l'on combine, pour établir une moyenne, le nombre d'heure de chauffe des cinq scénarii météorologiques proposés, on remarque que la combinaison des deux mesures offre la moyenne d'heure de chauffe la plus basse.

On remarque également que l'écart, dans les 3 000 premières heures de la simulation, semble réduit entre les courbes des SSP 2-4 .5 en 2050 et 2100 ainsi que la courbe SSP 5-8.5 en 2050, en comparaison des courbes de consommation de l'année 2022 et du SSP 5-8.5 à l'horizon 2100, entre la simulation D.2 et la B.2.

La présence d'un thermostat simulé permet de maintenir une température intérieure théoriquement à un maximum de 20°C. Lorsque cette température est atteinte, la consommation de chauffage s'arrête dans la simulation D.2. Ce n'est pas le cas dans la simulation B.2 puisque certains espaces ont été indiqués comme ayant des températures intérieures supérieures à 20°C durant les horaires de présences du personnel communal. Il semble donc que les thermostats, lorsqu'ils font baisser les flux de chaleur traversant les parois extérieures du bâti, permettent également d'amortir les pics de consommation durant les périodes hivernales.

Dans ce cadre de cette double piste, la puissance demandée au système, en période hivernale, pourrait également diminuer par l'optimisation du système par régulation des température et serait également moins soumise aux fluctuations météorologiques extérieures avec l'amélioration de l'enveloppe.

Une amélioration de l'enveloppe du bâti ainsi que l'optimisation du système de chauffage permettent, selon les résultats présentés tout au long de ce chapitre et du précédent, de diminuer de manière significative les pertes par transmission et donc la consommation d'énergie à destination du chauffage. Parallèlement, il serait possible d'envisager que ces travaux puissent contribuer à baisser la puissance

de chauffage nécessaire pour couvrir les besoins du bâtiment et de ses occupants, même lors des périodes les plus froides dans les projections climatologiques futures.

Cette baisse de puissance pourrait permettre d'également diminuer les températures d'entrée et de sortie du système HVAC et de gagner en efficacité énergétique avec un fonctionnement basse température. Cette piste pourrait plus facilement ouvrir la portes à des sources de production de chaleur renouvelables telles que des pompes à chaleur géothermiques, air-air ou d'autres systèmes qui nécessitent des températures ainsi que des puissances moins élevées.

Ces pistes d'évolution dans les blocs D et E de la Caserne pourraient s'avérer davantage pertinentes dans le cadre du réseau de chaleur d'Arlon.

2.3. Discussion générale autour des projections climatiques

La troisième hypothèse présentée en début de mémoire postule, dans un premier temps, que dans un contexte de réchauffement climatique, l'augmentation des températures moyennes extérieures permet une diminution des besoins en chaud pour le cas d'étude.

Les résultats discutés ci-dessus indiquent que, malgré une augmentation visible des températures extérieures, des pics de froids pourraient venir influencer la consommation. En effet, avec un écart de température plus important en hiver, les besoins en chaud des blocs D et E augmentent pour la plupart des scénarii.

Le scénario SSP 5-8.5 à l'horizon 2100 est le seul qui montre une diminution de la consommation d'énergie et des besoins en chaud du cas d'étude, en raison de l'augmentation moyenne des températures, même en hiver et de la baisse de fréquence et d'intensité des pics de froid par rapport aux autres scénarii temporels.

Néanmoins, ces projections climatique peuvent être discutées. Xavier Fettweis, climatologue à l'Université de Liège confirme que les données météorologiques observables aujourd'hui dépassent déjà certaines prévisions météorologiques d'une dizaine d'années (Fettweis, 2024). Dans une entrevue avec le média RTL, il confirme que, d'ici à 2050, il est probable de n'avoir plus que quelques jours de neige en Belgique tout au plus (Fettweis, Xavier Fettweis, climatologue , 2024). Ce postulat pourrait contredire les minima observables à la Figure 33 qui montrent des pics de froid à -10°C pour les SSP 2-4.5 aux horizons 2050 et 2100 et 5-8.5 à l'horizon 2050.

Il est donc tout à fait possible que les données météorologiques utilisées dans le cadre de ce mémoire sous-estiment l'impact du réchauffement climatique. Le choix du modèle MAR, forcé par le modèle global MIROC6, s'est fait sur base, notamment, de ses prévisions plus pessimistes afin de

potentiellement pallier cette accélération du réchauffement climatique observée en ce début des années 2020 par les climatologues. Néanmoins, Fettweis (2024) confirme que d'ici à 2050, si aucune amélioration environnementale n'est faite, les pics de froids hivernaux observés dans le cadre de ce mémoire pourraient diminuer voire ne pas arriver durant les prochaines décennies.

De ce fait, il est possible que les résultats des consommations théoriques obtenus dans le cadre de ce mémoire surestiment certains épisodes hivernaux qui influencent les résultats des simulations. De plus, dans différentes conférences, le climatologue belge postule un réchauffement climatique plus fort en été avec la perspective, d'ici 2100, d'un climat du sud de la France pour les terres intérieures de la Belgique (Fettweis, 2024). Ceci confirme l'hypothèse selon laquelle les projections climatiques mèneraient d'ici 2050, à des automnes plus doux et à des printemps similaires aux températures automnales, altérant les périodes de chauffe et, en résultante, le nombre d'heure de chauffage nécessaire au maintien du confort intérieur.

Les résultats des projections climatiques mettent en évidence une prolongation des périodes plus douces, accompagnée d'une diminution progressive du nombre d'heures de chauffage nécessaire au maintien du confort thermique¹⁴ dans le cas d'étude. Cette réduction pourrait améliorer le rendement global du système installé puisque les résultats présentés indiquent une possible diminution d'environ 2000h du temps de fonctionnement du système HVAC (voir Tableau 32).

Si des échangeurs et des pompes à chaleur sont mis en place au niveau des sous-stations raccordées au réseau, il est possible que le coefficient de performance nominal soit maintenu. Combiné à l'augmentation attendue des températures extérieures moyennes et à des hivers moins rigoureux, cela pourrait également garantir un coefficient de performance intéressant dans le cadre de systèmes aérothermiques intégrés en sous-stations.

Les projections climatiques observées sont donc complexes à analyser et bien que les données météorologiques actuelles dépassent déjà certaines prévisions, le modèle MIROC6 utilisé dans le cadre de ce travail semble robuste et pertinent dans l'étude des trajectoires de consommation pour l'étude de cas de la Caserne Léopold. De plus, les résultats pour les périodes de chauffe semblent cohérents avec la littérature belge en matière de réchauffement climatique et de ces effets sur le comportement d'un bâtiment.

¹⁴ Hypothèse établie sur base de la littérature concernant la température optimale pour assurer un certain confort sur un lieu de travail. Aucun indice de mesure du confort n'a été utilisé pour ce travail.

CHAPITRE VII : Discussion sur la mise en place d'un réseau de chaleur à Arlon

1. Aspects de production : sources renouvelables potentielles pour Arlon

La première hypothèse de ce travail concerne la production de chaleur dans un réseau thermique urbain. En effet, il était supposé que des sources de production de chaleur renouvelables pourraient facilement s'intégrer dans un tel projet. Si les ambitions européennes visent 100% d'approvisionnement d'un réseau thermique à l'année 2050, en 2027 tout réseau existant doit être approvisionné à minimum 50% d'énergie renouvelable ou fatale (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2023).

Néanmoins, l'étude de préfaisabilité du futur réseau arlonais vise un taux de 100% d'énergie renouvelable d'ici la mise en place du réseau.

A la suite des réunions pour le projet Réseau de chaleur d'Arlon, plusieurs pistes ont été proposées afin de fournir une ou plusieurs sources de production pour le réseau urbain. Les sources envisagées par IDELUX dans le cadre de l'étude de préfaisabilité ont également été discutées lors d'entrevues mais n'ont finalement pas été retenues comme options en raison de différents facteurs qui ne seront pas abordés dans le cadre de ce travail.

Afin de comprendre les enjeux liés aux sources de production potentiellement adaptées pour le réseau arlonais, voici trois pistes qui ont été abordées avec le comité de pilotage et qui seront discutées dans ce premier point de chapitre, pour les aspects de production du réseau thermique urbain.

1.1. Géothermie peu profonde en systèmes ouverts ou fermés

Dans un premier temps, la géothermie peu profonde a été abordée comme principale source potentielle pour alimenter le réseau du chef-lieu luxembourgeois.

La formation d'Arlon est située dans le Sinémurien, soit le deuxième étage géologique du Jurassique Inférieur (datant d'il y a 191 à 199 millions d'années).

Les études géologiques constatent que le sous-sol est ainsi composé d'une succession de couches perméables (calcaires et sables gréseux) et de couches imperméables (marnes et argiles) (Petitclerc & Vanbrabant, 2011). L'eau peut circuler dans les formations de grès et calcaires fissurés mais les formations marneuses et argileuses superposées réduisent la capacité de recharge des aquifères. Cependant, le rapport susmentionné indique que, dans la région sud de la Province du Luxembourg,

ces couches présentent une épaisseur faible et un pendage (inclinaison des couches de roches) peu marqué, ce qui limite les volumes disponibles et les débits potentiellement peu exploitables.

Une stratigraphie du sol de la région ainsi qu'une carte de la Bibliothèque universitaire du Campus Arlon Environnement confirment que la masse d'eau souterraine présente dans le sous-sol arlonais est une formation principalement aquitarde et aquiclude avec pour une partie du périmètre autour de la ville qui se situerait en aquifère perméable et exploitable (Annexe 5 et Annexe 6).

En système fermé, les formations calcaires ont une puissance d'extraction par mètre de profondeur pour des sondes géothermiques d'environ 55 W/m, les grès de 60 W/m. Ces puissances ont été calculées en fonction de la durée annuelle de fonctionnement d'une pompe à chaleur, moyennée à 2 000 h/an (Harcouet-Menou, et al., 2023, p. 10). Ce rapport n'indique pas les puissances d'extractions des marnes et argiles mais pose que leur conductivité thermique est inférieure à celles des couches susmentionnées. Comme expliqué dans le chapitre précédent, les heures de chauffage nécessaires à alimenter les blocs D et E sont toutefois supérieures à 2 000 heures et il se pourrait que les puissances extractibles ne soient pas suffisantes pour alimenter l'intégralité du réseau.

En système ouvert, François Bertrand, expert consulté dans le cadre du projet évoque un potentiel bien plus élevé pour la géothermie ouverte sur nappe, avec un débit exploitable de 17 m³/h, ce qui confère à la zone un potentiel correct. Selon lui, l'aquifère serait assez productif entre 60 et 120 mètres de profondeur pour une puissance extractible entre 140 et 700 kW (Bertrand, 2025). Une étude approfondie des couches et profondeurs serait idéale afin de connaître les profondeurs exactes auxquelles se situent les parties perméables de l'aquifère et ainsi pouvoir calculer un potentiel géothermique avec sondes verticales ou doublets. Ceci est confirmé Bertrand (2025).

Cependant, plusieurs freins sont mentionnés par Daniel Pacyna, expert du service Géologie du service public de Wallonie lors d'une entrevue téléphonique à propos de la géothermie peu profonde. Dans un premier temps, les zones exploitées peuvent être refroidies en fonction du nombre de sondes implantées, dans un système fermé sans circuit de refroidissement qui permettrait, en été, de restituer au sol la chaleur prise en période hivernale. Cela n'a, selon le SPW qu'un faible impact environnemental mais pour le projet à Arlon, la présence de deux stations météorologiques universitaires à moins de 50 mètres de la zone pressentie pour la pose de sondes est à considérer. La proximité du terrain avec les habitations présentes en contrebas est également à étudier puisque le forage et l'implantation de sondes géothermiques nécessite un permis d'environnement.

Pour rappel, les systèmes géothermiques de moins de 500 mètres de profondeur nécessitent un permis d'environnement de « Classe 2 ». Celui-ci requiert une étude d'incidence environnementale simplifiée qui analysera les risques de contaminations des eaux souterraines (la source de la Semois est située au nord de la zone pressentie) et les mesures de protection mises en place ; les risques éventuels de pollution lors des forages ; les impacts sonores et vibratoires potentiels (Magin, 2020).

Une enquête publique aura également lieu. Celle-ci devra être publiée officiellement par l'administration communale avec un avis d'enquête publique. Les riverains seront notifiés de l'enquête, pourront consulter le dossier et y consigner remarques, questions, objections concernant l'implantation des sondes géothermiques et leur exploitation. L'enquête s'établit sur une durée de quinze jours ouvrables sauf cas contraire (Moniteur belge, 2024). En outre, une description détaillée du projet, des plans et schémas techniques et les mesures de protection de l'environnement devront être décrites dans la demande de permis de « Classe 2 » (Magin, 2020). Selon Daniel Pacyna (2025), les riverains peuvent constituer un frein important à la réalisation d'un tel projet en raison d'une opposition fréquente aux permis d'environnement de ce type (Pacyna, 2025).

Il sera donc nécessaire, pour mener à bien ce projet, de connaître la consommation finale du réseau souhaité afin de pouvoir opter pour un système fermé ou ouvert en fonction des besoins.

Néanmoins, l'impact environnemental et social de l'utilisation de la géothermie comme source de production de chaleur du réseau devrait être pris en compte afin d'éviter toute nuisance environnementale ultérieure ainsi que d'éventuels conflits avec les riverains qui pourraient entraîner un retard dans l'avancement du projet.

Si la géothermie offre un potentiel non négligeable, d'un point de vue des sciences et gestion de l'environnement, il semble primordial de pouvoir analyser tous les effets possibles de l'installation de sondes et ce, pour les prochaines décennies, afin de minimiser les risques futurs. Ceci pourrait constituer une suite du projet, si différents experts sont contactés et si des études environnementales sont effectuées pour parvenir à un risque minimum pour l'environnement.

1.2. Solaire thermique

Avec la première piste géothermique pour alimenter le réseau, arrive une question également abordée dans le point ci-dessus : la restitution de la chaleur au sol.

En effet, le réseau de chaleur, si la géothermie est utilisée comme source de production principale, pompera des calories du sol à chaque hiver. Si un réseau de retour n'est pas installé, par le biais d'un réseau de froid ou par l'installation de solaire thermique, le sol pourrait se refroidir de manière durable et sa température, réputée constante, pourrait éventuellement baisser progressivement au fur et à mesure des années. Le solaire thermique dans un réseau de chaleur ne se fera donc pas au niveau des sources de production mais serait plutôt utilisé afin de restituer les calories au sol.

L'intégration de capteurs solaires thermiques sur les toitures de certains bâtiments pressentis pour le réseau de chaleur arlonais pourrait représenter une opportunité intéressante pour améliorer la durabilité du réseau et limiter d'éventuels risques environnementaux liés à la baisse de la température du sol.

En période estivale, la demande en chauffage est considérée comme nulle et, avec les projections météorologiques exposées précédemment. L'été pourrait se prolonger par des automnes très doux de sorte que la période de chauffage reprenne plus tard dans l'année, comme discuté dans les résultats du chapitre précédent. Dès lors, l'installation de capteurs solaires thermiques permettrait de récupérer l'énergie solaire afin de recharger le sol durant l'été. Cette chaleur inutilisée par le réseau pourrait être réinjectée dans le sous-sol par des sondes géothermiques verticales de retour et ainsi maintenir une température davantage constante du sous-sol ou du moins, pourrait limiter son refroidissement à l'avenir.

A terme, ce principe aurait également pour effet de maintenir de meilleures performances aux pompes à chaleur puisque le coefficient de performance diminue à mesure que l'écart de température entre la source froide et la source chaude augmente.

L'utilisation des toitures existantes devra néanmoins être attentivement étudiée. D'après l'analyse préliminaire, plus de 1 800 m² de toitures seraient disponibles pour y intégrer des capteurs thermiques (Davin, 2025).

Toutefois, la vétusté et l'état général des toitures est à considérer dans cette analyse. En effet, les bâtiments présentés dans l'étude de cas pour ce travail ont été construits durant la première moitié du XIXe siècle. La toiture des blocs D et E a près de 190 ans et il n'est pas garanti que l'installation de panneaux solaires thermiques puisse être envisagée sur l'intégralité des toitures disponibles. Une analyse structurelle préalable est indispensable afin d'éviter tout risque de surcharge et de déformation des toitures existantes sur les bâtiments pressentis pour rejoindre le réseau de chaleur.

1.3. Biomasse plaquette

Une autre source de production de chaleur a également été abordée dans les réunions du projet : la biomasse bois énergie. Si la couverture de biomasse bois dont disposerait la commune d'Arlon pour alimenter le réseau semble limitée, la plaquette sous forme de plaquettes pourrait constituer une source de production de chaleur éventuelle ou être utilisée comme appoint pour un réseau principalement alimenté par sondes géothermiques verticales.

En effet, avec un système géothermique permanent, une unité de biomasse peut servir d'appoint de chauffage pour couvrir les pics de demandes pour les périodes de froid plus intenses. A la lecture des différentes projections de températures pour les scénarii étudiés, les minima tendent à baisser et des pics de froid en hiver pourraient être à considérer. Si le coefficient de performance d'une pompe à chaleur n'est plus garanti durant les pics de froid, une chaufferie biomasse dimensionnée comme chaudière d'appoint pourrait prendre le relais et couvrir les besoins en chauds supplémentaires en évitant une sollicitation trop conséquente des pompes à chaleur et des sondes géothermiques

installées. La plaquette pourrait alors constituer une deuxième source pertinente pour maintenir le confort thermique des bâtiments.

Dans ce cadre, une chaudière spéciale est alors à mettre en place. Celle-ci doit disposer d'une vis sans fin ou d'une pente afin d'acheminer en continu des plaquettes séchées contenant une humidité maximale de 20% à 30% jusqu'à une chambre de combustion (Intervenant du secteur bois énergie, 2025). Au sein du foyer de la chaudière, un décendrage et une filtration des fumées sont indispensables afin d'éviter l'échappement de suies et oxydes d'azote nocifs à l'environnement. La chaleur de combustion est ensuite transférée à un échangeur de chaleur qui chauffe un fluide caloporteur pour l'amener vers les sous-stations des bâtiments raccordés au réseau.

Néanmoins, un intervenant spécialisé dans le domaine du bois énergie de l'ASBL VALBIOM évoque l'importance du choix du fournisseur de plaquette. En effet, aucune réglementation n'a été fixée en matière de qualité de plaquettes biomasse, ni pour leur composition, ni pour leur taille ou leur taux d'humidité (Intervenant du secteur bois énergie, 2025). L'intervenant évoque des tracas fréquents lorsque les plaquettes fournies proviennent de déchets verts communaux dans lesquels peuvent se trouver graviers ou gravillons qui viennent se loger en chambre de combustion et peuvent compromettre le bon fonctionnement des chaudières. Les plaquettes de bois étant majoritairement constituées de bois de « moindre qualité » comme l'évoque l'intervenant, tout type de bois peut se trouver dans la composition des plaquettes et celles-ci ne sont pas contrôlées. L'intervenant mentionne l'existence d'un « guide de bonnes pratiques » destinés aux fournisseurs de plaquettes mais rien n'assure un contrôle de qualité des produits vendus.

De plus, l'intervenant confirme la nécessité d'un entretien rigoureux des chaudières à biomasse plaquette avec une visite quotidienne de la chambre de combustion en période de chauffe intense, une vérification hebdomadaire du système et des contrôles réguliers pour assurer le bon fonctionnement de la chaudière.

Ceci nécessite une main d'œuvre qualifiée et compétente pour ce type d'installation ainsi qu'une maintenance quotidienne à devoir intégrer aux budgets prévisionnels à l'intégration d'une unité de production de biomasse plaquette pour un réseau de chaleur.

Pour comprendre les aspects relatifs à la durabilité, l'intervenant mentionne qu'à l'heure actuelle, seuls les déchets et sous-produits sont valorisés en bois énergie, que ce soit en plaquettes ou en pellets. Selon lui, le bois d'œuvre reste économiquement rentable et reste donc la priorité économique des gestionnaires de parcelles forestières. La tendance ne serait donc pas, comme pour celle de la biométhanisation, à un changement des pratiques afin de produire un sous-produit valorisable énergétiquement au détriment des fonctions précédentes du terrain. Il confirme néanmoins que « *dans la réalité, la rentabilité (économique) et le marché définisse la finalité du bois* » (Intervenant du secteur bois énergie, 2025).

1.4. Discussion générale autour des sources de production renouvelables

Après plusieurs mois, le comité de pilotage du réseau de chaleur analyse toujours les pistes discutées ci-dessus. La biomasse, initialement envisagée comme source d'appoint a ensuite été discutée comme source principale, en raison de la baisse du coefficient de performance d'un système biomasse dimensionné comme appoint d'une unité de production géothermique.

Toutefois, la biomasse semble être une source de production assez contraignante. En plus de la main d'œuvre et de la maintenance discutée ci-dessus, la sécurité d'approvisionnement en plaquette tout au long de l'année demeure incertaine. De plus, la fluctuation des coûts par mètre cube apparent constitue un facteur déterminant dans l'analyse technico-économique des sources de production en vue du dimensionnement d'un réseau de chaleur.

A l'issue des entrevues avec les différents partenaires du projet, la géothermie en système fermé semble exclue en raison du coût d'investissement et du nombre de sondes géothermiques à devoir installer pour fournir le réseau. La géothermie ouverte reste la piste privilégiée, couplée à un système aérothermique individuel pour chaque sous-station. Cependant, les contraintes de permis d'environnement, de débit et pendage de l'aquifère ainsi que la puissance extractible de la géothermie en système ouvert demeurent des questions récurrentes lors des comités de pilotage.

Au cours des six mois d'investissement et de participation aux réunions du projet Réseau de chaleur à Arlon, un constat a été posé sur la difficulté, compte tenu de la puissance requise pour alimenter tous les bâtiments pressentis pour le raccordement, d'obtenir une production 100% renouvelable pour le réseau de chaleur arlonais.

En effet, après l'analyse du cas d'étude des blocs D et E de la Caserne, il semble que l'amélioration énergétique des bâtiments pourraient constituer une piste intéressante pour diminuer la puissance requise des bâtiments raccordés. De plus, une ouverture s'est posée quant au maintien d'un appoint par gaz de ville dont l'origine est fossile, au vu des difficultés établies de rendre ce réseau intégralement fourni par une production de chaleur issue du renouvelable.

Les sources de production envisageables pour alimenter le réseau de chaleur arlonais devront donc être étudiées de près, afin d'assurer une durabilité maximale de la source et un effet minimal sur l'environnement. Alimenter un réseau urbain en énergie renouvelable n'est pas aisé et chaque impact doit être étudié minutieusement afin de fournir au réseau une source de production la plus durable et respectueuse de l'environnement possible.

Se pose alors la question de l'intérêt d'engager une combinaison de sources de production qui, pour leurs installations, seront émettrices de gaz à effet de serre, dans le but d'alimenter un bâti vieillissant et sans objectif de rénovation énergétique et de surcroît dont les consommations pourraient être diminuées avec les stratégies d'amélioration énergétique présentées dans ce travail.

2. Aspects de consommation : évolution des résultats pour l'année 2022 avec amélioration énergétique et perspectives d'avenir du réseau

La mise en place d'un réseau de chaleur alimenté uniquement par énergie renouvelable, comme c'est l'ambition du réseau de chaleur à Arlon, nécessite un dimensionnement précis mêlant à la fois les aspects de production et de consommation, avec des aspects technico-économiques. Dans ce cadre, la réduction de la consommation d'énergie au sein des blocs D et E de la Caserne s'avère pertinente afin de prévoir le dimensionnement du réseau.

Améliorer l'enveloppe du bâti permettrait, d'après les simulations par TRNSYS 18, une diminution significative des pertes par transmission et éventuellement des pertes par ventilation, bien que cet aspect n'ait pas été traité dans ce travail. La pose d'un thermostat, même si l'impact est moins marquant que la pose d'isolant, permettrait également une diminution de la consommation d'énergie à destination du chauffage.

Cette réduction de la consommation, constatée dans le cas des blocs D et E, peut potentiellement s'extrapoler aux autres bâtiments de la Caserne Léopold puisque pour la plupart, ont été construits avec les mêmes compositions de parois. Le bloc B et le bloc G (voir Figure 14), par exemple, constituent deux pistes pour extrapoler les résultats obtenus puisque ces blocs sont construits de manière identique à ceux étudiés pour ce travail. Bien que l'occupation ne soit pas forcément la même, il est tout à fait possible d'envisager les effets d'un thermostat ou d'une isolation à ces autres blocs afin de réduire la facture énergétique de l'ensemble de la Caserne.

Dans le cadre du projet, des simulations ont également été réalisées sur ces bâtiments avec des fichiers textes construits de manière identique à ceux utilisés pour les simulations étudiées. De fait, la simulation A ayant déjà été effectuée pour chaque bâtiment pressenti pour le réseau urbain, les résultats concernant l'isolation et la régulation du système de chauffage peuvent être supposés pour certains autres bâtiments.

Ce dernier point n'est toutefois pas applicable à l'ensemble des bâtiments pressentis pour le raccordement puisque les compositions de parois varient d'un lieu à un autre. De plus, bien que les résultats obtenus se rapprochent des valeurs indicatives de l'ADEME, ils ne sont pas forcément applicables à d'autres bâtiments construits ultérieurement. En effet, une étude menée sur un bâtiment passif montre une diminution de la consommation aux horizons futurs, ce qui n'est pas le cas du cas pratique de la Caserne (Bayart, 2024).

Néanmoins, la réduction éventuelle de consommation d'énergie à destination du chauffage pour les bâtiments pressentis pourrait être prise en compte dans les aspects de dimensionnement du réseau de chaleur, sous deux angles discutés ci-dessous.

2.1. Réduction du besoin de production

Dans un premier temps, avec l'applicabilité partielle des résultats à certains autres bâtiments pressentis par l'étude de préfaisabilité pour le raccordement au réseau, une baisse significative de la consommation d'énergie à destination du chauffage permettrait de réduire la puissance de production nécessaire pour alimenter le réseau de chaleur.

De ce fait, il est possible de dimensionner une unité de production à une échelle plus petite et dès lors potentiellement diminuer les coûts d'installation et d'investissement pour le réseau de chaleur. Notons toutefois qu'une étude technico-économique doit être réalisée afin de vérifier cet aspect et que, comme expliqué dans le Chapitre I, le rendement d'une installation n'est pas lié directement à sa taille.

Par ailleurs, si les besoins sont diminués avec la régulation des consignes de température et l'implémentation d'isolant dans les parois extérieures, il serait possible de réduire la température d'entrée des chaudières, actuellement à un régime 60/40°C. La diminution du régime de température permettrait en outre de diminuer les pertes au sein du réseau de distribution et permettre à la source de produire de la chaleur à une température moins élevée et donc de manière moins énergivore.

Dans le cas où la géothermie serait utilisée comme source de production, il serait pertinent de réduire la consommation du réseau de chaleur afin d'obtenir des régimes de températures moins élevés donc davantage compatibles avec la géothermie peu profonde et l'utilisation d'un échangeur de chaleur pour chaque sous-station, en complément de l'aérothermie. En favorisant un dimensionnement à basse température, le réseau de chaleur peut s'avérer plus efficace avec des pertes réduites dans le réseau de distribution (Gouvernement Wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024).

Dans le cas où la biomasse serait envisagée, cette réduction du besoin de production permettrait de diminuer les contraintes logistiques et l'approvisionnement en plaquettes. Bien que la biomasse soit en théorie une ressource renouvelable, le bois-énergie comporte ses points d'attention et limiter le régime de température et le besoin en chauffage permettrait de réduire la quantité de combustible nécessaire pour alimenter le réseau de chaleur. Cette diminution aura également un impact sur le coût de maintenance du réseau avec, potentiellement, un approvisionnement moins conséquent et moins fréquent, ce qui pourrait mener à des économies financières sur l'achat du combustible bois.

La mise en place, au sein de chaque sous-station, d'une unité aérothermique individuelle par le biais d'une pompe à chaleur air/eau ou air/air, pourrait également être envisagée si une réduction de la consommation est observée à la suite de l'implémentation de mesures d'amélioration énergétique dans les bâtiments raccordés au réseau.

Toutefois, ces discussions sont valables pour cette étude de cas mais potentiellement pas applicables à d'autres études de cas, notamment sur des bâtiments plus récents ou sur d'autres localités en raison de contraintes techniques ou économiques.

2.2. *Extension du réseau de chaleur*

Dans un second temps, la réduction de la consommation dans les blocs D et E, extrapolée ou analysée ultérieurement pour les autres bâtiments pressentis au raccordement, pourrait permettre l'extension du réseau de chaleur à d'autres bâtiments.

La ville d'Arlon souhaitant voir son réseau de chaleur en fonction et n'ayant, lors des réunions pour le projet, pas envisagé quelconque travaux d'amélioration de l'enveloppe ou d'optimisation des systèmes de chauffage, il est probable que le réseau de chaleur voit le jour avant l'isolation et les thermostats. Dès lors, il serait dimensionné en fonction des besoins actuels du réseau, sur l'entièreté des bâtiments pressentis qui, actuellement, ne sont, pour la plupart, pas isolés et ne disposent pas de système de régulation des consignes de température.

La réduction du besoin en chaud par l'isolation ou l'ajout de thermostat dans les espaces qui n'en disposent pas permettrait d'ouvrir la réflexion à une extension du réseau, soit aux bâtiments pressentis pour l'extension, déjà mentionnés par l'étude de préfaisabilité d'IDELUX, ou à d'autres bâtiments situés à proximité du réseau de chaleur, publics ou privés.

Si la question de l'intégration de bâtiments privés à un réseau de chaleur financé par les services publics se pose, le dimensionnement actuel du réseau de chaleur constituerait une opportunité d'étendre la portée du réseau et ainsi ne pas perdre de la chaleur produite qui n'est pas consommée.

L'extension du réseau pourrait permettre une diversification des profils de consommation et ainsi, permettre à une unité de production de fonctionner à un régime quasi permanent et limiter les pertes (Gouvernement Wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024). Les bâtiments communaux, sauf pour l'abri de nuit et le bloc G qui accueillent des bénéficiaires de jour comme de nuit, sont principalement utilisés à des heures de bureaux, tandis que des foyers raccordés au réseau profiteraient du fonctionnement de l'unité de production en soirée ainsi que la nuit afin de maintenir une température acceptable, surtout en période hivernale.

Par ailleurs, si le réseau atteint ses objectifs environnementaux quant à la production, le raccordement d'habitations pourrait permettre une diminution de l'utilisation de ressources fossiles, comme le gaz de ville ou le mazout, si les particuliers ne disposent pas d'une unité de production individuelle renouvelable.

Accroître la portée du réseau de chaleur à Arlon pourrait donc permettre de rentabiliser l'investissement initial pour la construction et la maintenance du réseau, tant au niveau économique, social, qu'environnemental.

3. Prévisions climatiques : réflexion sur la surchauffe et perspectives de mise en place d'un réseau de froid

3.1. Contexte de surchauffe

Comme on peut le voir sur les graphes qui traitent des températures extérieures, émanant de l'équipe de recherche de Sébastien Doutreloup (Doutreloup, et al., 2022), on constate une hausse des températures pour les quatre scénarii observés dans le cadre de ce travail.



Fig. 34 Comparaisons de la température extérieure des différents scénarii observée par rapport à l'année 2022. Source : auteure (2025) & Doutreloup et al. (2022).

Si, depuis plusieurs années, les vagues de chaleur augmentent tant en fréquence qu'en durée, les projections météorologiques tendent vers des extrêmes chauds plus conséquents que ce qu'on vit actuellement (Fettweis, 2024).

La surchauffe est alors un élément à prendre en considération lors de la construction d'un bâtiment. En effet, les nouvelles constructions passives sont de plus en plus isolées et étanches à l'air. Si l'isolation et l'étanchéité à l'air permettent de diminuer les besoins de chauffage et donc la consommation

d'énergie, ces paramètres peuvent également provoquer une surchauffe conséquente durant les périodes d'été et de canicules (Bayart, 2024).

L'étude de la surchauffe permet alors de comprendre le comportement du bâtiment lorsqu'il est confronté à différents paramètres, notamment des projections climatiques. En réalisant diverses simulations, en modifiant l'infiltration, les épaisseurs d'isolants, les compositions de parois, etc, notamment par le biais de l'outil TRNSYS 18, il est possible d'observer les paramètres qui influenceront le plus la surchauffe et donc, de potentiellement éviter cette problématique de plus en plus actuelle.

3.2. Méthodologie de calcul de la surchauffe

Dans cette perspective, la surchauffe est calculée comme la somme des écarts de température si celle-ci dépasse 26°C dans la zone thermique, additionnés tout au long de l'année. Ceci pour les heures et périodes d'occupation de chaque zone. Les week-ends, heures de fermeture et périodes de congés ne sont donc pas prises en compte dans le calcul.

La surchauffe a été calculée pour chaque zone, pour chaque simulation et dans chaque scénario projeté. Néanmoins, tous les résultats ne sont pas pertinents à montrer. Par exemple, les simulations ont montré qu'il n'y a pas de surchauffe présente dans les dortoirs de l'abri de nuit, ouverts en période hivernale même aux horizons 2100 ; les cages d'escalier non chauffées montrent un inconfort potentiel durant les périodes hivernales avec de la sous-chauffe et en été avec de la surchauffe mais sont réputées non occupées de manière permanente. Dès lors, ces résultats ne seront pas exposés.

Afin d'effectuer un comparatif correct pour les scénarii observés, une analyse de la surchauffe dans la Maison des Jeunes est proposée. La Maison des Jeunes est un espace de 190 m² sur trois étages qui accueille des travailleurs adultes ainsi qu'une trentaine d'adolescents et jeunes adultes de 10 à 25 ans en semaine et le samedi. De nombreuses activités y sont organisées comme des sessions sportives, des jeux d'arcades, du gaming, des ateliers cuisine ou autre.

Chaque simulation a donc été observée afin de percevoir la surchauffe en fonction des différents scénarii climatiques proposés dans le cadre de ce travail.

Toutefois, il est à noter que le besoin en refroidissement des bâtiments n'a pas été considéré pour les blocs D et E de la Caserne. Afin de confirmer les résultats ci-dessous, une analyse de la consommation d'énergie à destination du refroidissement aurait tout son intérêt.

3.3. Résultats pour la zone thermique test : Maison des Jeunes

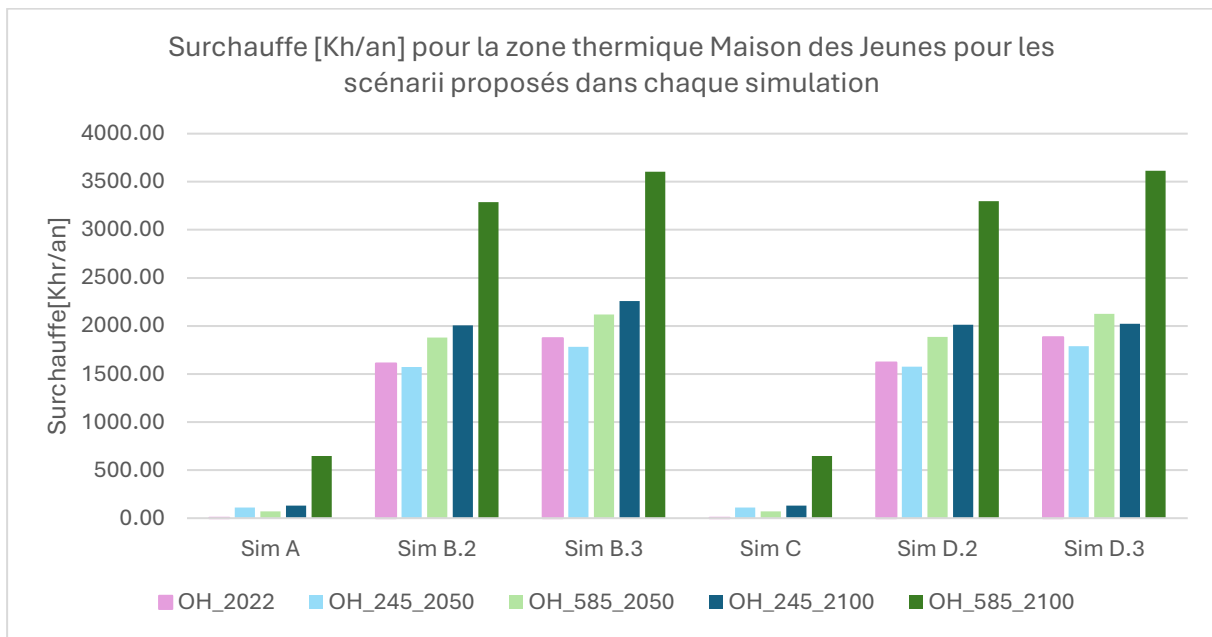


Fig. 35 Surchauffe [Kh/an] pour la Maison des Jeunes dans chaque simulation et chaque scénarii climatique étudié. Source : auteure (2025).

Dans un premier temps, si l'on compare les simulations pour l'année 2022 (en mauve), on remarque que le nombre d'heure de surchauffe augmente dès l'isolation du bâtiment. L'ajout de thermostat dans la simulation D ne semble pas avoir d'effet sur la surchauffe.

Ensuite, après observation des simulations B et D, il semble que l'ajout de laine de bois (B.3 et D.3), comparé à la laine minérale (B.2 et D.2), fait grimper le nombre d'heures de surchauffe dans la zone thermique étudiée.

Enfin, si la surchauffe paraît augmenter légèrement en fonction des scénarii climatiques, il semble que la trajectoire extrême du SSP 5-8.5 à l'horizon 2100 soit celle qui provoquerait le plus de surchauffe, avec une augmentation assez conséquente comparé aux autres trajectoires observées. Xavier Fettweis, estime que si aucune ambition politique ne corrige la trajectoire actuelle, ce scénario sera le plus probable pour la Belgique (Fettweis, 2024).

3.4. Discussion des résultats et des perspectives

La question de la surchauffe dans les bâtiments est devenue un point central des discussions actuelles entre climatologues, énergéticiens et architectes. Dans un contexte où les nouvelles constructions tendent à performer sur l'isolation sans toujours prendre en compte le phénomène de surchauffe, il n'est pas improbable que les conséquences des canicules se fassent de plus en plus ressentir d'ici les décennies à venir (Bayart, 2024).

L'accumulation de chaleur excédentaire qui ne s'évacue pas appelle à une réflexion plus large qui englobe non seulement l'efficacité énergétique en hiver avec une diminution de la consommation mais qui prend aussi en compte le confort en été et la résilience du bâti face aux évolutions climatiques.

3.4.1. Scénarii proposés

Dans un premier temps, il est important de rappeler que les scénarii présentés dans le cadre de ce travail donnent des températures pour une année moyenne. Puisque déjà étudiés pour leur pertinence estimée dans le cadre de ce travail, ils sont également repris pour l'analyse de la surchauffe. Ils sont toutefois questionnables puisque potentiellement obsolètes et n'indiquant peut-être pas toujours les projections les plus pessimistes, comme l'explique Fettweis qui fait partie de l'équipe de chercheurs ayant publié ces données (Fettweis, 2024).

Il est également à noter que les fichiers utilisés ne prennent pas en compte les vagues de chaleur prévues, ni leur fréquences. Il aurait fallu, peut-être, réaliser ces résultats selon les fichiers qui prennent en compte les « *Heat Waves Events* ». Selon Doutreloup *et al.* (2022), il serait plus intéressant d'utiliser ces données afin d'étudier les risques de surchauffe et de simuler le comportement d'un bâtiment dans des conditions plus extrêmes.

Toutefois, afin de pouvoir comparer les résultats, les mêmes fichiers ont été analysés à la fois pour le calcul des consommations et celui des surchauffes.

Cette hypothèse pourrait ne pas être représentative des canicules et vagues de chaleur posées par les climatologues. Cependant, nous considérons que, dans le cadre de ce travail, les projections proposées, notamment par la robustesse du forçage par le modèle MIROC6 offrent une vue d'ensemble des risques de surchauffe et permettent d'entrevoir le comportement des blocs D et E de la Caserne en fonction des potentielles trajectoires socio-économiques pour l'avenir.

3.4.2. Le paradoxe de l'isolation

L'amélioration des performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment permettrait, comme constaté dans les résultats discutés au Chapitre VI pour l'étude de cas, de réduire significativement la consommation d'énergie à destination du chauffage.

Pour chaque simulation, deux isolants ont été proposés : la laine minérale, déjà présente dans certaines zones thermiques, et la laine de bois, proposée pour un comparatif. On constate que la laine de bois permet une légère diminution de la consommation à une épaisseur égale, par rapport à de la laine minérale.

Toutefois, lorsque l'on s'attarde sur la Figure 36, on constate que la laine de bois provoque davantage de surchauffe que la laine minérale. Si, à l'année de référence 2022, la laine de bois peut s'avérer légèrement plus intéressante au niveau de la consommation, ce n'est pas le cas si on observe la surchauffe, ni à l'année de référence, ni dans les prévisions climatiques. Ce résultat montre l'ambivalence du choix de l'isolant entre consommation et surchauffe.

Bien que la laine de bois soit considérée comme un matériau plus écologique et biosourcé, avec un impact carbone réduit par rapport à la laine minérale (Collura, 2023), l'analyse de la surchauffe pourrait être prise en compte dans le choix de l'isolant afin de ne pas compenser le gain de consommation par l'utilisation de climatiseurs pour pallier les défauts potentiels, entraînant une possible augmentation des émissions de gaz à effet de serre pour le refroidissement d'un bâti.

En effet, la capacité thermique de la laine de bois est deux fois supérieure à celle de la laine minérale. Or, plus la capacité thermique d'un matériau est élevée, plus le matériau est capable d'absorber une quantité de chaleur avant que sa température n'augmente de 1 Kelvin (Roulet, 2004). La laine de bois a donc une plus grande capacité à accumuler la chaleur au sein de la paroi en journée et de la restituer durant la nuit lorsque la température extérieure se rafraichit. Ce phénomène s'appelle le déphasage thermique (Roulet, 2004) et entraîne une surchauffe potentielle pour une isolation à la laine de bois.

Afin de percevoir l'ampleur de ce phénomène, il faudrait toutefois pouvoir étudier un panel d'isolants, tant issus de la construction conventionnelle que de matériaux biosourcés et écologiques et toutes propriétés confondues. Pour pouvoir confirmer les résultats observés dans ce travail, une recherche approfondie des différents isolants disponibles sur le marché et de leur comportement face aux projections climatiques futures pourrait s'avérer pertinente et valider ou non les résultats obtenus pour la zone thermique étudiée dans ce point.

Par ailleurs, l'impact environnemental de ces isolants serait également à prendre en compte dans leur cycle de vie. Si la laine de bois est réputée avoir un moindre impact carbone que la laine minérale, il n'est pas improbable de devoir utiliser des systèmes de refroidissements énergivores à l'avenir et ces trajectoires devraient être analysées afin de comprendre l'impact, tout au long de son cycle de vie et des conséquences du choix d'un isolant.

3.4.3. Projections climatiques et augmentation des températures

Comme on peut l'observer dans le graphe des comparaisons des différentes températures en fonction des scénarii étudiés (voir Figure 35), les projections indiquent une augmentation des températures. Ce phénomène montre ses répercussions dans les résultats de surchauffe qui ne font qu'augmenter à mesure de la gravité des scénarii proposés (voir Figure 36).

Si la surchauffe augmente de manière assez linéaire pour le SSP 2-4.5 aux horizons 2050 et 2100 ainsi que pour le SSP 5-8.5 à l'horizon 2050, le scénario extrême à l'horizon 2100 montre une augmentation significative de la surchauffe dans la zone thermique test. L'augmentation des températures observables pour cette trajectoire coïncide avec une augmentation assez élevée des risques de surchauffe mentionnés par les climatologues (Fettweis, 2024) & (SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement, s.d.).

Ces résultats montrent que les deux bâtiments étudiés dans ce cas pratique peuvent offrir une certaine résilience dans le climat actuel mais seront peut-être soumis à des conditions climatiques pour lesquelles ils n'ont pas été dimensionnés. Pour rappel, la Caserne a été conçue en 1838, soit avant la première révolution industrielle et les questions climatiques n'étaient à l'époque par abordées.

Avec les différentes trajectoires, on constate que le risque de surchauffe ne fait qu'augmenter à mesure que les années passent et que les projections sont de plus en plus extrêmes. Ce futur pourrait provoquer un réel stress énergétique, économique et sanitaire sur le bâtiment ainsi que sur ses occupants.

3.4.4. Perspectives pour le futur : un réseau de froid ?

La surchauffe est un phénomène qui se remarque davantage au sein des milieux urbains denses. En fonction de la densité du bâti, souvent plus élevée dans les villes par rapport aux villages, la ville à plus de mal à se refroidir. De plus en plus bétonnée, les espaces verts diminuent progressivement dans le tissu urbain pour laisser place à un sol dur et chaud, qui emmagasine la chaleur en journée et la restitue la nuit. A Arlon, la place Léopold, pour ne citer qu'elle, n'offre qu'un très petit espace à l'ombre et les espaces verts au sein du chef-lieu tendent progressivement à disparaître à mesure que le bâti résidentiel s'étoffe.

Pour pallier cela, les climatiseurs électriques constitueraient une solution de fortune pour éviter la surchauffe au sein des bâtiments. Néanmoins, ces derniers rejettent de l'air chaud à l'extérieur et réchauffent donc la ville durant les périodes nocturnes (ARTE, 2025). Si la ville se réchauffe à la fois en raison du changement climatique (Fettweis, 2024) mais également en raison des conséquences de celui-ci et des réponses comportementales comme le mentionne ARTE (2025), le risque sanitaire lié à la surchauffe pourrait être accru. Si l'air extérieur de la ville se réchauffe, les bâtiments se réchauffent également, quelles que soient les raisons de ce réchauffement citadin. Les climatiseurs pourraient constituer non plus la solution mais plutôt le pensement qui cache et contribue à l'hémorragie.

Dès lors, un autre schéma de pensée intervient : celui de l'anticipation.

Au vu des risques augmentés de surchauffe constatés dans la zone thermique analysée, il est possible de discuter au préalable de la nécessité d'implémenter un moyen de refroidissement des bâtiments qui n'engendrera pas une dépense énergétique de fortune.

Un réseau de froid urbain est construit sur le même modèle qu'un réseau de chaleur : il permet de mutualiser la production et la distribution du froid aux sous-stations raccordées au réseau (Gouvernement Wallon; RESOLIA; CLIMACT, 2024).

Dans le cas où la géothermie serait utilisée pour alimenter le réseau en chaleur, elle peut également être utilisée pour alimenter le réseau en froid. En exploitant la température relativement constante du sol qui tourne autour de 10 à 12°C (Tychon, 2023), la géothermie peut offrir un refroidissement pour les bâtiments raccordés au réseau urbain.

Dans le cas d'un refroidissement passif, des pompes prélèvent de l'eau fraîche issue de l'aquifère et la font circuler dans un réseau secondaire de froid, par lequel l'eau transite avant de transférer sa fraîcheur aux échangeurs présents dans les sous-stations des bâtiments (Géothermies, s.d.).

Pour un refroidissement actif, une pompe à chaleur réversible est utilisée avec la géothermie très peu profonde comme source froide constante. La chaleur est alors extraite des bâtiments par les pompes et est renvoyée dans le sol (Géothermies, s.d.). Ce type de système permet notamment de rendre les calories prises durant les périodes de chauffe et de maintenir une certaine stabilité dans la température du sol qui sera refroidit en hiver et réchauffé en été. Ce système limiterait également la nécessité d'implémenter un système de restitution tiers, comme le cas du solaire thermique. Ces deux types de refroidissement peuvent être organisés de manière décentralisée avec des pompes à chaleur dans chaque sous-station, ou de manière centralisée avec un système plus conséquent dimensionné pour l'ensemble des bâtiments à devoir refroidir.

Au vu des résultats constatés dans la Maison des Jeunes, et des résultats non présentés obtenus dans le cadre de ce travail, il est probable que la surchauffe constituera une contrainte majeure de l'avenir lorsque l'on aborde le comportement du bâtiment. Si des travaux d'amélioration de l'enveloppe sont envisagés afin de réduire la consommation donc l'unité de production ou d'étendre le réseau de chaleur, les résultats obtenus pourraient également être extrapolés aux autres bâtiments pressentis pour être raccordés au réseau de chaleur étudié à Arlon.

Dès lors, le développement parallèle d'un réseau de froid pourrait constituer une solution efficace et pertinente pour atténuer les risques sanitaires et de consommation supplémentaire relatifs à la surchauffe. En mutualisant la production de froid en même temps que le chaud, ce réseau thermique urbain pourrait permettre de limiter la consommation d'énergie, à la fois de sources non renouvelables pour le chauffage, mais également d'électricité pour le refroidissement.

Au-delà des considérations énergétiques, intégrer cette problématique de surchauffe et réfléchir dès aujourd'hui à la mise en place d'un réseau de froid relève d'un enjeu social assez peu pris en compte dans les débats autour de l'énergie dans le secteur du bâtiment.

L'utilité première d'un bâtiment est d'accueillir des occupants, que ce soit de nuit dans un logement, ou de jour sur un lieu de travail. De ce fait, garantir des conditions de vie acceptables au sein de ces bâtiments devient essentiel afin de préserver ses usagers. L'augmentation des épisodes extrêmes et des vagues de chaleur que les prévisions climatologiques mettent en évidence devient un risque à prendre en compte dès aujourd'hui afin de préserver le confort et la santé des occupants et usagers d'un bâtiment.

Si les températures extérieures continuent d'augmenter, si les espaces verts au sein des villes diminuent, si des solutions temporaires comme les climatiseurs électriques demeurent la réponse privilégiée, plusieurs questions se posent. Où les citoyens pourront-ils encore trouver des lieux de répit face aux épisodes de canicule ? Où seront les espaces frais ? Et surtout, comment la société et le secteur du bâtiment sauront-ils s'adapter face aux vagues de chaleur extrêmes que les climatologues s'emploient à démontrer afin de prévenir et éviter leurs conséquences les plus sévères ?

« Bah oui, (la canicule) ce n'est pas agréable, lorsqu'on est fragile, on reste chez soi et on se met à l'ombre ! », Pascal Praud, journaliste sportif et climatologue climatosceptique à ses heures perdues, le 1^{er} juillet 2025 dans une chronique traitant du réchauffement climatique et des canicules à venir (Europe 1; CNews, 2025).

CHAPITRE VIII : Conclusions

1. Limites méthodologiques

Tout au long de ce travail de recherche, une série d'obstacles se sont présentés et ont potentiellement impacté la qualité de la rédaction.

1.1. Données et ressources utilisées dans le cadre du mémoire

Dans un premier temps, la disponibilité des ressources à quelque peu contraint la tournure de la rédaction de ce travail. Certaines bases de travail, comme la modélisation trois dimensions nécessaire à la construction des blocs D et E dans l'outil TRNSYS 18 ont eu du retard et, n'ayant pas les plans des bâtiment, il n'a pas été possible de réaliser nous-même la modélisation à l'avance.

De ce fait, et afin de ne pas perdre de temps, il a été décidé de commencer à réaliser l'état de l'art sur le réseau de chaleur avant de recevoir les données sur lesquelles le travail était basé. Dès lors, l'état de l'art est conséquent et a été finalisé plusieurs semaines avant la réception des données pour effectuer les simulations. Ce chapitre contient une grande quantité d'informations très théoriques et qui peuvent sembler ne pas correspondre à la suite du travail, soit l'étude du cas pratique et des consommations.

Nous avons néanmoins travaillé de sorte que les deux aspects soient considérés, pour la théorie dans les aspects de production et pour le cas pratique dans les aspects de consommation. Ceci afin de pouvoir avoir une vue d'ensemble d'un réseau de chaleur, sous plusieurs angles.

Afin d'effectuer un travail similaire pour d'autres bâtiments par exemple, il faudrait obtenir les données mentionnées dans ce travail et pouvoir les vérifier de manière antérieure à la rédaction d'un travail de recherche, afin de procéder à une analyse la plus efficace possible et proposer des résultats avec des biais limités.

1.2. Modélisation trois dimensions par l'outil SketchUp

Ensuite, la modélisation trois dimensions comporte une série d'erreurs de dimensionnement pour certaines zones thermiques. Certaines zones ont été délimitées de manière qu'elles ne représentent pas la réalité de répartition des espaces au sein des blocs D et E de la Caserne. Il semble que les volumes chauffés de ces zones soient, en réalité, inférieurs à ce qui a été modélisé. De ce fait, la consommation d'énergie à destination du chauffage pour ces espaces serait probablement inférieure à la valeur obtenue pour ces zones thermiques lors des simulations.

Ceci peut avoir impacté la simulation en augmentant les besoins en chaud, obtenus lors de la calibration de la simulation A, pour ces zones thermiques et entraîner des conséquences, à la fois sur le paramétrage et sur la répartition de la consommation théorique d'énergie à destination du chauffage pour chaque zone thermique étudiée dans le cadre de ce travail.

Bien que les erreurs observées puissent entraîner une altération des résultats, nous pensons qu'elle s'avère peu significatives pour cette recherche consacrée à l'amélioration énergétique et aux projections climatiques, pour les aspects de consommation.

En outre, afin d'effectuer un paramétrage optimal, il semble qu'effectuer à la fois le modèle trois dimensions et les recherches architecturales pourrait mener à des résultats plus proches de la réalité.

1.3. Modélisation des blocs D et E dans l'interface TRNBuild

L'interface TRNBuild, notamment pour les compositions de parois, a également été réalisée par l'équipe de recherche. Lors de la réception du fichier, soit après la période de stage ce qui a eu pour corolaire un retard conséquent, plusieurs erreurs ont été observées, notamment concernant les compositions de certaines parois.

Certaines observations ont été considérées sans conséquence. Par exemple, la pierre utilisée en couche extérieure dans l'interface TRNBuild est notée comme du granit. Après plusieurs discussions, il semblerait que la pierre utilisée soit plutôt du grès ou de la pierre de Gaume. En effet, ces deux types de pierre sont utilisés à l'époque de la construction de la Caserne au XIXe siècle (Groessens, 1990). Le territoire géographique étudié correspond également à la localisation des carrières gréseuses et calcaires situées en Gaume. Cependant, après vérification, il semble que le granit ait des propriétés assez similaires à ces deux types de pierres et dès lors, sur les conseils des promoteurs, cette couche des compositions de parois n'a pas été modifiée pour éviter de perdre davantage de temps.

Néanmoins, certaines erreurs dans les parois extérieures et la toitures ont dû être rectifiées car ne correspondaient pas aux informations reçues lors des visites et certains oublis auraient pu compromettre les résultats des simulations.

En outre, certains résultats, comme la surchauffe, n'ont pu être analysés en raison d'erreurs dans les parties isolées et non-isolées en fonction des lieux. N'ayant pas nous-même modélisé en trois dimensions les bâtiments, il nous a semblé risqué de tenter une rectification de ces biais ; au vu du nombre de parois existantes dans la modélisation SketchUp et dans TRNbuild.

De ce fait, la surchauffe n'a pas pu être analysée dans les zones pressenties pour l'étude initiale. En effet, l'idée était d'analyser la surchauffe pour l'ONE, la crèche, la Croix-Rouge, soient des zones

thermiques accueillant des enfants en bas âge et des personnes précaires, pour lesquelles la surchauffe pourrait avoir des effets sanitaires plus importants que pour des adultes en bonne santé.

Bien que tous les résultats aient été obtenus, la surchauffe a été uniquement présentée dans la zone thermique de la Maison des Jeunes puisque, d'après les données architecturales reçues, il semble que cette zone soit celle susceptible d'avoir le moins de défaut de bâti liés à l'isolation des espaces adjacents.

Dès lors, il semble cohérent d'établir le type 58 dans l'interface TRNBuild ainsi que les modélisations SketchUp de manière commune ou du moins concertée. Ceci permettrait de corriger rapidement certaines erreurs de modélisation et permettrait un paramétrage unique du Type 56 pour toutes les simulations et résultats obtenus.

1.4. Utilisation de l'outil TRNSYS 18

Bien que TRNSYS soit un outil fréquemment utilisé pour la simulation énergétique de bâtiments, notamment pas l'équipe universitaire du BEMS, cet outil présente certaines limites qui peuvent influencer la précision des résultats obtenus quant aux besoins en chaud et donc aux consommations théoriques projetées dont traite ce travail.

L'interface TRNBuild, par le Type 56, permet de travailler par zones thermiques qui supposent une certaine homogénéité des conditions à l'intérieur de chaque zone. Cette homogénéité n'est pas garantie et peut impacter les résultats obtenus. Cette homogénéité ne prend pas en compte certains comportements humains qui peuvent faire varier, au cours du temps, les conditions à l'intérieur d'une zone thermique. Par exemple, l'ouverture d'une fenêtre s'il fait trop chaud, les augmentations ou diminutions ponctuelles de la température au sein de certaines zones par action sur les vannes thermostatiques...

De la même manière, les températures intérieures sont imposées par l'intermédiaire d'un lecteur de données et sont constantes tout au long des périodes d'occupation ou d'inoccupation. Cela peut impacter les résultats puisque, comme discuté au chapitre précédent, l'écart entre la température intérieure et extérieure influence le flux de chaleur qui circule dans les parois d'une zone thermique. Afin de pouvoir calibrer correctement la simulation initiale, un relevé des températures pourrait être effectué durant plusieurs mois au sein des différents espaces pour permettre d'approcher au mieux le comportement des occupants et la réaction du bâtiment face aux conditions climatiques extérieures.

Certaines autres données sont constantes, comme la valeur d'infiltration de laquelle dépend entièrement la consommation d'énergie au sein d'un bâtiment. Si celle-ci a été modifiée dans les zones isolées, la valeur a été choisie sur base d'hypothèses et pourrait s'avérer totalement erronée. Afin de vérifier les résultats, un test d'étanchéité à l'air pourrait être envisagé, soit pour une zone type et

extrapolé à l'intégralité de la Caserne, soit pour un bâtiment type afin d'obtenir un résultat plus proche de la réalité et de pouvoir réaliser une simulations sur base d'observations et non plus sur base d'hypothèses.

Toutes les hypothèses prises dans le cadre de ce travail, et principalement pour le paramétrage de la simulation initiale peuvent être justifiées. Néanmoins, il est possible qu'elles ne soient pas toutes correctes ni au plus proche de la réalité des blocs D et E de la Caserne.

Toutefois, la même calibration a été utilisée pour chaque simulation et projection climatique. Dès lors, si la simulation initiale peut être discutée, hypothèse prise par hypothèse prise, TRNSYS 18 permet de pouvoir comparer le comportement d'une simulation dans différentes projections, à la fois pour les pistes d'amélioration et d'optimisation mais aussi les scénarii climatiques projetés sur une même base.

Ce travail comporte une série de limites en raison de la complexité du projet de réseau de chaleur auquel il est lié. Nonobstant les aspects de production ont été étudiés et présentés tant au niveau national que local, exposant des points techniques mais également les faiblesses et les forces des sources de production de chaleur renouvelable. Pour ce qui est l'analyse des consommation du cas pratique de la Caserne Léopold, le paramétrage des simulations et la robustesse du modèle climatologique choisi assure également une certaine cohérence aux résultats présentés.

2. Conclusion finale

A peine dix années après sa signature, l'objectif de l'Accord de Paris du maintien des températures à une augmentation de 1.5°C à l'horizon 2100 est dépassé. Les observations des climatologues du monde entier indiquent que, pour la période 2020-2030, il est fort probable que les températures observées dépassent de 1.5°C celles de l'ère préindustrielle. Ce que nous redoutions en 2100 est arrivé au premier quart du siècle.

En 2025, nous atteignons avec 70 ans d'avance les seuils environnementaux de la COP21, le jour du dépassement de la Terre n'a de cesse d'avancer et nous voyons chaque jour nos ressources s'épuiser à mesure que la surconsommation nous entoure.

Lorsque l'on parle de ressources et de réchauffement planétaire, le secteur du bâtiment est décrié comme énergivore et émetteur de gaz à effet de serre. Les objectifs européens, dans ce secteur, visent une diminution de la consommation d'énergie fossile en privilégiant les énergies renouvelables et l'utilisation rationnelle de l'énergie. La mise en place d'un réseau de chaleur alimenté par des sources de chaleur renouvelables prend alors tout son intérêt.

L'objectif de ce travail était d'alimenter une réflexion autour de la production de chaleur renouvelable et de l'évolution de la consommation d'énergie à destination du chauffage avec amélioration énergétique et projections climatiques en vue de la mise en place d'un réseau thermique dans un tissu urbain dense et vieillissant.

Dans l'analyse de la production de chaleur d'origine non-fossile, il existe une multitude de sources pour alimenter un réseau en chaud mais aussi en froid. Chacune de ces sources, renouvelable ou fatale, dispose d'avantages et d'inconvénients techniques, logistiques et financiers. Lorsque l'on confronte la théorie à la pratique du cas étudié, il est observé que toutes les sources ne sont pas implémentables partout en Belgique. Le territoire sur lequel un réseau est envisagé ainsi que sa consommation annuelle sont deux facteurs déterminants dans le choix d'un scénario de production de chaleur. D'autre part, l'aspect renouvelable et durable d'une source de production peut tout à fait être remis en question lorsqu'il est confronté à la puissance requise pour alimenter un réseau thermique. En outre, de nombreux paramètres technico-économiques sont à analyser dans le dimensionnement et la conception d'un réseau urbain de chaleur ou de froid.

Concernant les aspects de consommation, nous avons pu observer l'intérêt d'une amélioration énergétique par amélioration de l'enveloppe et optimisation des systèmes dans la diminution de la consommation de notre cas d'étude. Lorsque l'on a confronté ces améliorations aux projections climatiques, il a été observé que la consommation d'énergie pourrait augmenter en fonction des trajectoires socio-économiques partagées envisagées. Si ces résultats sont propres à notre cas d'étude et ne constituent pas une réponse pour tout le secteur du bâtiment, il est concevable qu'ils puissent s'adapter aux bâtiments pressentis pour être raccordés au réseau arlonais.

Tout au long de la période de stage et de manière plus marquée lors de l'écriture des discussions autour des résultats et du réseau de chaleur, une question s'est posée quant à la pertinence d'implémenter un réseau de chaleur dans un tissu urbain vieillissant.

Si cette problématique était le premier fil conducteur de ce travail, il aurait fallu, pour répondre à la question, pouvoir effectuer une analyse technico-économique et observer différents critères environnementaux afin d'évaluer la pertinence des sources et de la mise en place d'un réseau à Arlon.

Néanmoins, cette question à toute son importance dans le secteur du bâtiment à l'heure actuelle. En effet, le système économique et capitaliste force un certain techno-centrisme et envisage des solutions coûteuses dans l'idée d'un développement durable.

Le réseau de chaleur d'Arlon constitue un excellent exemple puisqu'il ambitionne un réseau 100% renouvelable sur des bâtiments anciens et énergivores. Le projet dimensionne sur base des besoins actuels, sans aucune piste d'amélioration énergétique envisagée, dans le but de peut-être pouvoir étendre le réseau urbain si la consommation des bâtiments raccordés diminue. Que coûterait, tant financièrement qu'environnementalement parlant, la mise en place d'un réseau de chaleur avec unité de production renouvelable pour des bâtiments qui consomment autant, face au maintien des chaudières à gaz de ville sur un ensemble de bâtiments rénovés et dont les consommations ont baissé ?

Pour finir ce projet de mémoire, nous posons l'utilisation d'un principe de pertinence ou principe de raison. En 1972, le Rapport Meadows postulait une limite à la croissance ; cinquante ans plus tard, il semble n'y avoir plus aucune limite à celle-ci tant qu'elle est estimée verte et renouvelable. Dans une société basée sur un déterminisme technocentré, les limites technologiques et scientifiques sont sans arrêt repoussées. Mais tout cela est-il pertinent ? Quel est le coût environnemental de ces technologies, de leur implémentation, des ressources utilisées pour les développer ? De quel recul dispose-t-on ? Est-ce qu'il ne se serait pas plus intéressant de revenir à une architecture intelligente, à une vision d'ensemble de la vie d'un bâtiment et de ses occupants ?

Techniquement et financièrement parlant, un réseau de chaleur à Arlon, alimenté par unité de production 100% renouvelable pour chauffer ce que les énergéticiens appellent communément des « passoires », c'est faisable. Mais dans le cadre d'un tissu urbain vieux de près de deux siècles, tel qu'il est étudié dans ce travail, est-ce réellement raisonnable ?

« Une société qui survit en créant des besoins artificiels pour produire efficacement des biens de consommation inutiles ne paraît pas susceptible de répondre à long terme aux défis posés par la dégradation de notre environnement » (Joliot-Curie, 2001).

Bibliographie

(s.d.).

(s.d.).

Abrahams, P. (2024). *MEEE - Climatisation des bâtiments*. (BEMS, Éd.) Liège: Unuversité de Liège.
Consulté le mai 28, 2025

Abrahams, P. (2024). *Simulation et Optimisation*. Arlon: Université de Liège. Consulté le juillet 07, 2025

- ADEME. (2017). *Chauffer et Rafraichir avec une énergie renouvelable*. Angers: Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie. Consulté le avril 14, 2025, sur https://librairie.ademe.fr/index.php?controller=attachment&id_attachment=1621&preview
- ADEME. (2025, avril 15). *Pourquoi et comment isoler son logement ?* Consulté le juin 07, 2025, sur La librairie ADEME: <https://librairie.ademe.fr/batiment/976-pourquoi-et-comment-isoler-son-logement-.html>
- André, P. (2023). *Gestion intégrée de l'énergie en particulier dans le secteur du bâtiment : cours n° 11*. Arlon: Université de Liège. Consulté le aout 01, 2025
- ARTE (Réalisateur). (2025). *Tous égaux ace à la canicule ?* [Film]. France . Consulté le aout 07, 2025, sur <https://www.youtube.com/watch?v=lsb1cFsd-vs>
- ARTE Regards (Réalisateur). (2024). *Chauffage : le tournant énergétique* [Film]. Consulté le avril 17, 2025, sur https://www.youtube.com/watch?v=_wid4xH_f4E
- Bayart, T. (2024). *Evaluation de la résilience thermique d'une construction wallonne intelligente face aux variations du changement climatique*. Liège: Université de Liège. Consulté le aout 07, 2025, sur https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/20818/7/Tina_BAYART_Me%cc%81moireJuin2024.pdf
- Bertrand, F. (2025, mai 15). Réseau de chaleur - Arlon : Potentiel géothermique. Université de Liège.
- Building Energy Monitoring and Simulation. (2025, février 25). *Live Camera Uliège (Campus Arlon)*. Consulté le mai 10, 2025, sur <http://139.165.118.202:3000/d/6pZc46Zgk/meteo-uliege-public?from=1740438000000&to=1740524399000>
- Catalina, T., Roux, J.-J., Virgone, J., & Blanco, E. (2008, Novembre). *Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation*. Consulté le juillet 07, 2025, sur Research Gate: [https://www.researchgate.net/publication/29599521_Effet_de_l'inertie_thermique_de_la_s urface_vitree_et_du_coefficient_de_forme_sur_les_besoins_en_chauffage_d'une_habitatio n](https://www.researchgate.net/publication/29599521_Effet_de_l'inertie_thermique_de_la_surface_vitree_et_du_coefficient_de_forme_sur_les_besoins_en_chauffage_d'une_habitatio_n)
- Chiche, S. (2020). *Intégration de sources urbaines de chaleur fatale dans les réseaux de chaleur*. Paris: Université Paris-Est. Consulté le avril 08, 2025, sur <https://theses.hal.science/tel-02880929v1/document>
- Collura, S. R. (2023). *Ecoconstruction et écorénovation*. Bruxelles: Haute Ecole Libre de Bruxelles - Ilya Prigogine. Consulté le juin 07, 2025

- Conseil de l'Union européenne. (2025, février 21). *Accord de Paris sur le changement climatique*. Consulté le mars 21, 2025, sur Consilium.europa: <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/paris-agreement-climate/>
- Conseil de l'Union européenne. (2025, mars 17). *Fit for 55*. Consulté le mars 24, 2025, sur Consilium.europa: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/#:~:text=The%20Fit%20for%2055%20package%20is%20a%20set%20of%20laws,just%20a%20socially%20fair%20transition>
- Dassargues, A. (2019). *Introduction à la géothermie et principes théoriques sur le transfert et le stockage de chaleur dans le sous-col*. Liège: Université de Liège. Consulté le avril 14, 2025, sur <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/233163/5/CBHG%C3%A9othermiePeuProfonde-AD.pdf>
- Davin, E. (2025, juin 24). Réseau de chaleur : réunion du 24 juin 2025. Arlon: Arlon Campus Environnement; BEMS. Consulté le juillet 23, 2025
- Delhaye, G. (2022). *La gestion des déchets*. Liège: Haute Ecole de la Province de Liège. Consulté le mai 06, 2025
- Delneuve, C. (2025, février 20). Marché et réseaux d'énergie thermique en Wallonie. *Informations et impacts pour les pouvoirs publics locaux*. Belgique: Service Public de Wallonie - SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie. Consulté le mai 08, 2025
- Demuysère, S. (2024). *Reconversion du patrimoine militaire : La mémoire de la fonction militaire perdure-t-elle à travers le nouveau projet ? Etude de cas de casernes reconverties en Belgique*. Liège: Université de Liège. Consulté le avril 24, 2025
- Deroanne, C. (2025, avril 24). Entrevue dans le cadre du mémoire sur les réseaux de chaleur . (L. Menendez, Intervieweur)
- Doutreloup, S., Fettweis, X., Rahif, R., Elgenar, E., Pourkiaei, M., Amaripadath, D., & Attia, S. (2022, juillet 06). Historical and future weather data for dynamix building simulations in Belgium using the regional climate model MAR : typical and extreme meteorological year ans heatwaves. *Earth System Science Data* , 14(7), p. 3039 à 3951 . Consulté le juillet 09, 2025, sur <https://essd.copernicus.org/articles/14/3039/2022/>
- Dubois, S. (2024). *Etude de pré-faisabilité - Réseau de chaleur Arlon* . Arlon: Idelux. Consulté le avril 22, 2025
- Dupont, Licour, & Rorive. (2014). *Géothermie en Hainaut*. Mons: Université de Mons. Consulté le mai 03, 2025, sur https://orbi.umons.ac.be/bitstream/20.500.12907/25955/1/echokarstN98_Geoth.pdf

- Dupont, N., Kaufmann, O., Harcouet-Menou, V., & Matthijs, J. (2021). La géothermie des eaux des mines et son potentiel en Wallonie (sud de la Belgique). *Géologues*. Consulté le avril 22, 2025, sur https://orbi.umons.ac.be/bitstream/20.500.12907/26068/1/G%C3%A9ologues_211_Article_Nicolas_Dupont_Geothermie_Eaux_des_mines_Wallonie.pdf
- Energie Plus Le Site. (2007, septembre 25). *Evaluer l'étanchéité à l'air*. Consulté le juillet 28, 2025, sur Energieplus-lesite: <https://energieplus-lesite.be/evaluer/etancheite-a-l-air3/evaluer-l-etancheite-a-l-air/>
- Energie Plus Le Site. (2007, septembre 25). *Rendement d'une installation de chauffage central*. Consulté le mai 22, 2025, sur Energie Plus Le Site: <https://energieplus-lesite.be/theories/chauffage11/rendement-d-une-installation-de-chauffage-central/>
- Energie Plus le Site. (s.d.). *Echangeurs géothermiques*. Consulté le avril 14, 2025, sur Energie Plus le Site: <https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-par-pompe-a-chaaleur2/geothermie/>
- Europe 1; CNews. (2025, juillet 01). Chronique L'Heure des Pros. *Pascal Praud sur la canicule : "Je n'ose même pas dire ce que je pense"*. Consulté le juillet 18, 2025, sur <https://www.youtube.com/watch?v=FPZsh9VKyAg&t=181s>
- Fagot, L. (2022). *Energies renouvelables*. Liège: Haute Ecole de la Province de Liège. Consulté le mai 04, 2025
- Fettweis, X. (2024, mai 08). Conférence de Xavier Fettweis : Changements Climatiques en Province de Liège aujourd'hui et demain. Liège, Belgique: Green Office ULiège. Consulté le aout 06, 2025, sur <https://www.youtube.com/watch?v=W1y3chDDLWo>
- Fettweis, X. (2024, juin 19). Xavier Fettweis, climatologue . (C. Deborsu, & L. Gilson, Intervieweurs) Bruxelles . Consulté le aout 06, 2025, sur <https://www.rtl.be/page-videos/belgique/xavier-fettweis-climatologue/2024-06-19/video/681862>
- Fizman, P. (2022). *Géographie de la Belgique*. Bruxelles: Haute Ecole Libre de Bruxelles - Ilya Prigogine. Consulté le avril 15, 2025
- Géothermies. (s.d.). *Refroidissement et rafraichissement : un atout avec ou sans pompe à chaleur géothermique*. Consulté le juillet 18, 2025, sur Géothermies.fr: <https://www.geothermies.fr/refroidissement-et-rafraichissement-un-atout-avec-ou-sans-pompe-chaaleur-geothermique>

- Gouvernement fédéral belge. (2023). *Projet de mise à jour du Plan National Energie et Climat belge 2021-2030 (PNEC 2023)*. Bruxelles. Consulté le mars 24 , 2025, sur <https://www.plannationalenergieclimat.be/be-pnec-projet-actualisation.pdf>
- Gouvernement wallon. (1999, mars 11). *Service Public Wallonie environnement*. Consulté le avril 15, 2025, sur Annexe 1/03 : Formulaire relatif aux prises d'eau, aux forages, à l'équipement de puits et pour la recharge ou les essais de recharge artificielle des eaux souterraines: <https://forms6.wallonie.be/formulaires/pepu/1-03-FormulairePrisesEaux.pdf>
- Gouvernement wallon. (2002, septembre 21). *04 juillet 2002 - Arrêté du Gouvernement wallon relatif à la procédure et à diverses mesures d'exécution du décret du 11 mars 1999 relatif au permis d'environnement*. Consulté le avril 15, 2025, sur Wallex: <https://wallex.wallonie.be/eli/arrete/2002/07/04/2002027817/2002/10/01>
- Gouvernement wallon. (2023, mars 21). *PACE 2030*. Consulté le mars 25, 2025, sur Energie. wallonie: https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/pace-2030-02_03_2024.pdf?ID=73812
- Gouvernement Wallon; RESOLIA; CLIMACT. (2024). *Directive d'efficacité énergétique 2023/1791/EU - ART.25 - Annexe X : Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid*. Gouvernement Wallon. Consulté le avril 13, 2025, sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/rapport-complet-potentiel-d-efficacite-en-matiere-de-chaleur-et-de-froid-2023-1791-eu-art25.pdf?ID=84472>
- Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT. (2024). *Directive d'efficacité énergétique 2023/1791/EU - ART.25 - Annexe X : Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid - Annexe C : Potentiel de l'aquathermie*. Gouvernement wallon. Consulté le avril 15, 2025, sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-c-potentiel-de-l-aquathermie.pdf?ID=84510>
- Gouvernement wallon; RESOLIA; CLIMACT. (2024). *Directive d'efficacité énergétique 2023/1791/EU - ART.25 - Annexe X Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid Annexe B : Potentiel de l'aquathermie et de la riothermie*. Service Public de Wallonie énergie. Consulté le avril 17, 2025, sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-b-aquathermie-riothermie-estimation-du-potentiel-global-et-crite-res.pdf?ID=84509>
- Greger, M. (2024). *Technologies énergétiques non conventionnelles et valorisation des énergies renouvelables, Partie Valorisation de la biomasse (énergétique)*. Ville de Luxembourg, Grand Duché du Luxembourg: Université du Luxembourg et Université de Liège. Consulté le mai 05, 2025

- Groessens, E. (1990). Calcaires et grès mésozoïques exploités comme pierre de construction en Gaume (Belgique) et dans le Gutland (Grand Duché de Luxembourg). *Bulletin de la Société belge de Géologie*, p. 185 à 195. Consulté le juillet 30, 2025
- Guichet Energie Wallonie. (s.d.). *101 idées futées pour faire des économies d'énergie chez soi*. Consulté le juillet 07, 2025, sur Energie.Wallonie.be: https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/spw_101idees-modif_10-10-2022.pdf?ID=56489&utm_source=chatgpt.com
- Habran, M. (2023). *Politique énergétique européenne*. Arlon: Université de Liège. Consulté le mars 17, 2025
- Hansen, J. (2024). Wastewater treatment and technologies. *Sustainable Water and Resources Management*. Luxembourg: Université du Luxembourg. Consulté le avril 15, 2025
- Harcouet-Menou, V., Dirix, K., Vermeiren, K., Uljee, I., Petitclerc, E., Baudinet, C., . . . Cuvelier, N. (2023). *Détermination du potentiel de la géothermie peu profonde (moins de 500m) pour la production de chaleur et de froid en Wallonie*. Service Public Wallon énergie. Consulté le avril 15, 2025
- Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2018). *La ventilation et l'énergie*. Consulté le mai 16, 2025, sur Energie Plus: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-bleu-ventilation-optimise.pdf?IDR=41652>
- Hoffman, L. (2015, décembre 24). *Le Miscanthus, une culture de biomasse prometteuse*. Récupéré sur Luxembourg Institute of Science and Technology : [https://www.list.lu/fr/news/le-miscanthus-une-culture-de-biomasse-prometteuse/#:~:text=Le%20Miscanthus%20\(commun%C3%A9ment%20appel%C3%A9%20'herbe,ait%20besoin%20de%20le%20replanter](https://www.list.lu/fr/news/le-miscanthus-une-culture-de-biomasse-prometteuse/#:~:text=Le%20Miscanthus%20(commun%C3%A9ment%20appel%C3%A9%20'herbe,ait%20besoin%20de%20le%20replanter).
- Institut national de statistique de Belgique. (2024, décembre 20). *Déchets municipaux*. Consulté le mai 05, 2025, sur STATBEL: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/dechets-et-pollution/dechets-municipaux#:~:text=Au%20niveau%20national%2C%20on%20d%C3%A9nombrat,1%25%20%C3%A9taient%20mis%20en%20d%C3%A9charge>.
- Intervenant du secteur agricole, a. (2025, mai 09). Entrevue téléphonique au sujet des pratiques agricoles à vocation énergétiques. (L. Menendez, Intervieweur)
- Intervenant du secteur bois énergie, a. (2025, mai 12). Entrevue avec un intervenant du secteur bois énergie. (L. Menendez, Intervieweur)
- Joliot-Curie, P. (2001). *La recherche passionément*. (O. Jacob, Éd.) Paris, France: Edition Odile Jacob. Consulté le août 08, 2025

- Lambert, J. (2025). Valeurs cibles d'étanchéité à l'air par niveau de rénovation.
- Maes, P. (2014, juin 10). Réseaux de chaleur - Principes, atouts et enjeux. *Construction et travaux publics* . Consulté le avril 03, 2025, sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-le-chauffage-43814210/reseaux-de-chaleur-tba2674/>
- Magin, R. (2020). *Droit de l'Aménagement du Territoire et Urbanisme I* . Bruxelles: Haute Ecole Libre de Bruxelles - Ilya Prigogine.
- Moniteur belge. (2024). *Environnement.Wallonie*. Consulté le mai 14, 2025, sur Code de l'environnement - Dispositions communes et générales: <https://environnement.wallonie.be/legis/Codeenvironnement/codeLlcoordonneD.htm>
- Nebhani, M. (2023). *Etude de l'intégration d'un système géothermique dans un réseau de chaleur à basse température*. Liège: Université de Liège. Consulté le avril 14, 2025, sur https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/16758/8/TFE_NEBHANI_MANAL.pdf
- Orban, P. (2025, avril 15). Entrevue sur la géothermie et les classifications de géothermie . (L. Menendez, Intervieweur)
- Orban, P., & Brouyère, S. (2024). *GEOL1031-1 Gestion qualitative et quantitative des eaux souterraines : Forages / piézométrie*. Liège, Province de Liège, Belgique: Université de Liège. Consulté le avril 15, 2025
- Pacyna, D. (2025, avril 23). Entrevue téléphonique au sujet de la géothermie des mines en Belgique. (L. Menendez, Intervieweur)
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne. (2023, septembre 13). *Directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 relative à l'efficacité énergétique et modifiant le règlement (UE) 2023/955 (refonte) (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)*. Consulté le mai 03, 2025, sur eur-lex.europa.eu: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj?locale=fr>
- Parlement européen; Conseil de l'Union européenne. (2018). *Directive (UE) 2018/2001 du Parlement et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (refonte)*. Strasbourg: Journal officiel de l'Union européenne. Consulté le mai 06, 2025
- Parlement européen; Conseil de l'Union européenne. (2023, octobre 18). *Directive (UE) 2023/2413 du Parlement européen et du Conseil du 18 octobre 2023 modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de*

- Service public de Wallonie - SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie. (s.d.). *Valoriser la chaleur du ventre de la terre, c'est possible !* Consulté le 03 2025, 2025, sur energie.wallonie.be: <https://energie.wallonie.be/fr/la-geothermie-profonde.html?IDC=6173#:~:text=Lors%20de%20sa%20s%C3%A9ance%20du,%2C%20scientifique%2C%20etc.>
- Service public de Wallonie - Territoire, Patrimoine, Logement, Energie. (2019). *Les exigences PEB et d'électromobilité.* Consulté le juin 07, 2025, sur Energie.wallonie: <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-electromobilite.html?IDC=9136>
- Simonis, C. (2018). *Etude par la simulation de la rentabilité économique d'un micro réseau de chaleur connecté à une installation de cogénération biomasse.* Liège: Université de Liège. Consulté le avril 03, 2025, sur https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/4505/6/TFE_SIMONIS_Caroline.pdf
- SPF Santé publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement. (s.d.). *Réchauffement planétaire.* Consulté le juillet 30, 2025, sur Climat.be: <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rechauffement-planetaire>
- SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie. (2023, décembre 12). *Appel à projets pour la réalisation ou l'extension de réseaux d'énergie thermique -2023.* Consulté le avril 11, 2025, sur Energie Wallonia: <https://energie.wallonie.be/fr/appel-a-projets-pour-la-realisation-ou-l-extension-de-reseaux-d-energie-thermique-2023.html?IDC=10533>
- SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie; Deplasse et associés. (2023). *Mise à disposition d'outils pour faciliter la mise en oeuvre de projet de réseau d'énergie thermique en Wallonie.* SPW Territoire, Logement, Patrimoine, Energie. Consulté le mai 08, 2025, sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/agw-energie-thermique-faq-version-1-1.pdf?ID=74720>
- Tychon, B. (2023). *Environnement sol.* Arlon: Université de Liège. Consulté le avril 09, 2025
- VALBIOM. (2019, décembre 17). *Cultures dédiées en biométhanisation : Que faut-il savoir ? - Partie 1.* Consulté le mai 07, 2025, sur VALBIOM: <https://www.valbiom.be/actualites/analyse-cultures-deedees-en-biomethanisation-que-faut-il-savoir-partie-1>
- VALBIOM. (2019). *Quelle place pour le biométhane injectable en Belgique.* VALBIOM. Consulté le mai 09, 2025, sur <https://www.valbiom.be/sites/default/files/tool/file/Quelle%20place%20pour%20le%20biom%C3%A9thane%20en%20belgique.pdf>

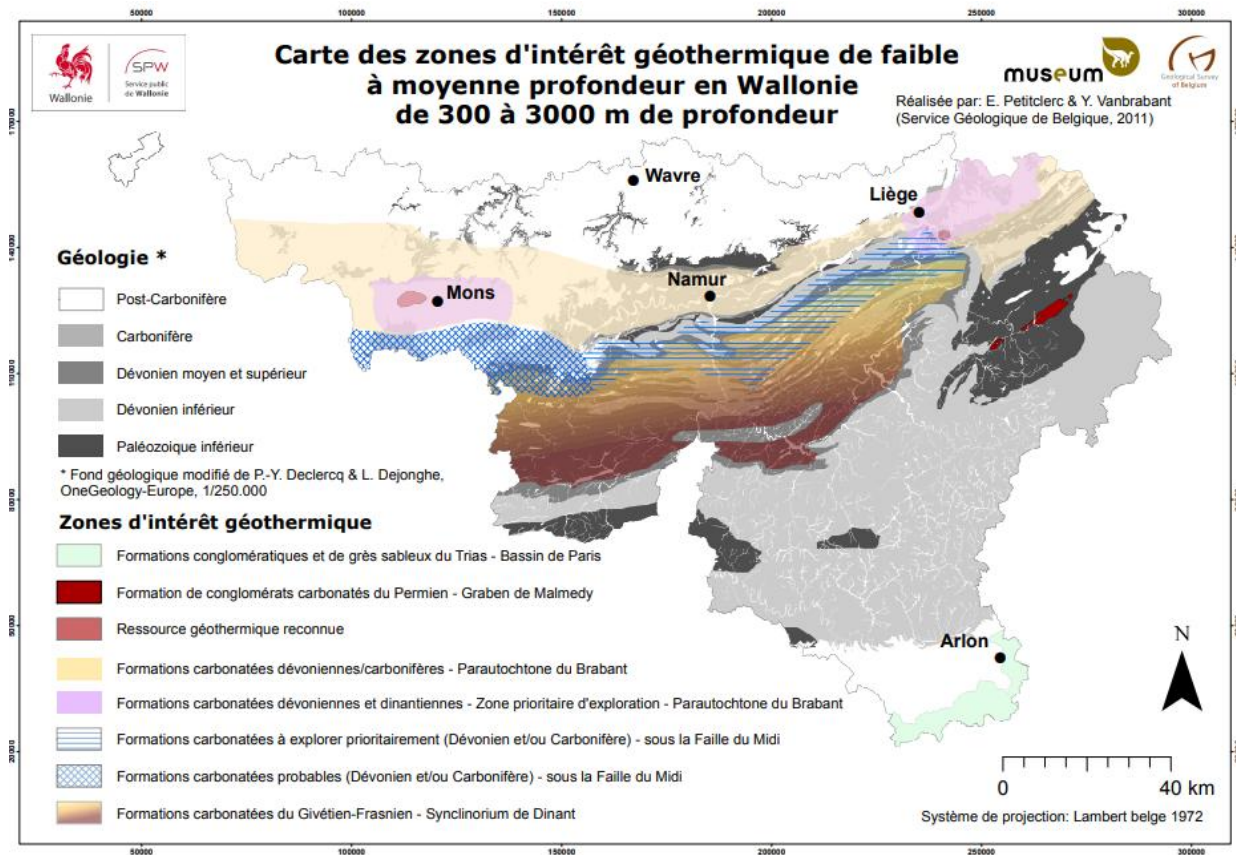
- Verbeke, J.-B. (2024). *Evaluation du potentiel de chaleur fatale en Wallonie*. Namur : Pirotech. Consulté le avril 11, 2025, sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-a-evaluation-du-potentiel-de-la-chaleur-fatale-en-wallonie-pirotech.pdf?ID=84508>
- VITO. (2020, juin). *Détermination du potentiel géothermique des anciennes mines désaffectées en Wallonie*. Consulté le mai 03, 2025, sur [energie.wallonie.be: https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/rapport-final-geothermie-mines-wallonie.pdf?ID=64987](https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/rapport-final-geothermie-mines-wallonie.pdf?ID=64987)
- Vivaqua. (s.d.). *Qu'est-ce que la riothermie*. Consulté le avril 15, 2025, sur Vivaqua: <https://www.vivaqua.be/fr/nos-activites/nos-activites-egouttage/riothermie/#:~:text=Qu'est%2Dce%20que%20la,d'un%20mat%C3%A9riau%20bon%20march%C3%A9>.
- Zinsalo, J., & Lamarche, L. (2015). *La géothermie profonde : un potentiel peu exploré*. Substance. Consulté le avril 22, 2025, sur <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/22684/1/Lamarche-L-2015-22684.pdf>

L'intelligence artificielle (Open AI et LN Notebook) a été également utilisée afin de proposer une structure de départ de ce travail, pour comprendre les différents jeux de données climatiques proposées par Doutréloup *et al.* ainsi que pour certaines reformulations pour plus de rigueur scientifique.

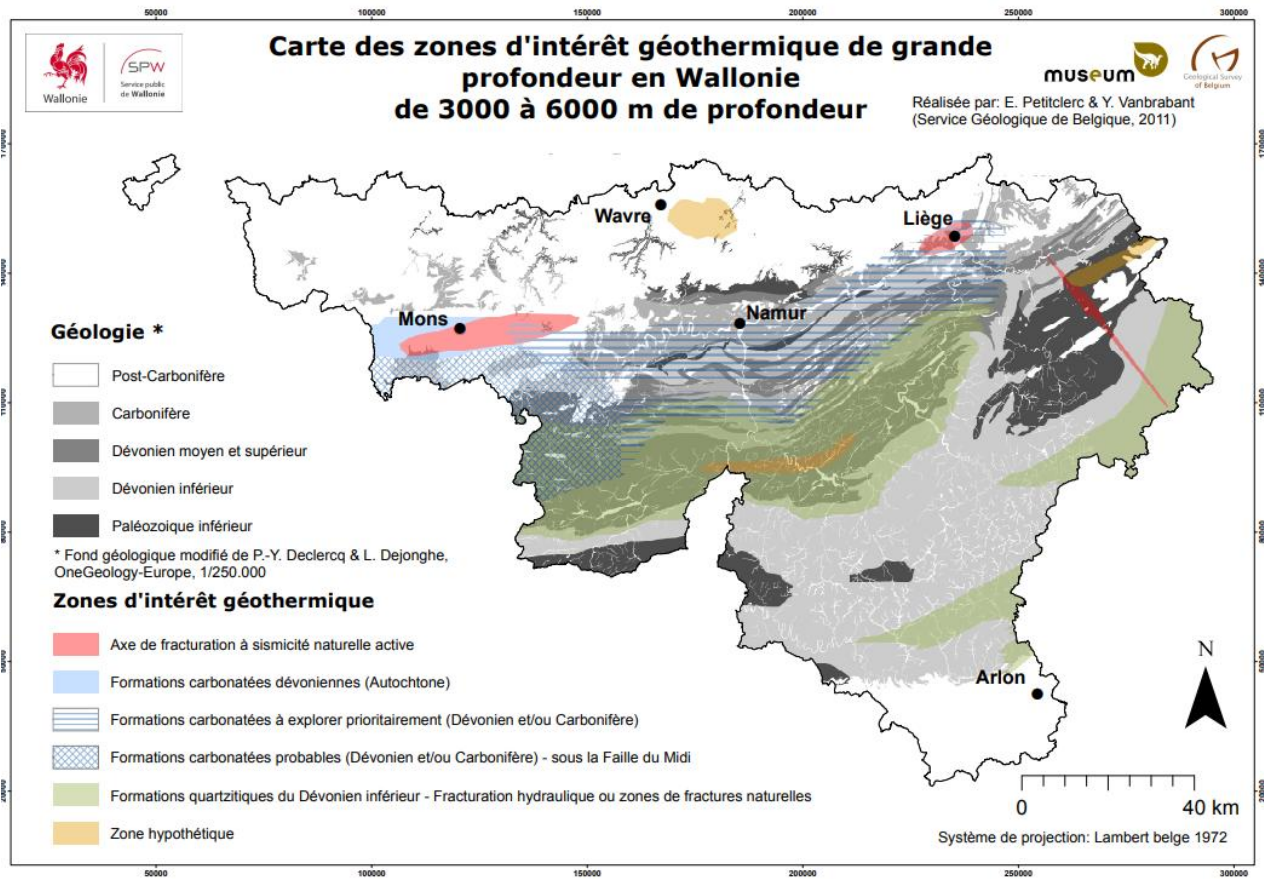
Annexes

Annexe 1 : cartes des zones d'intérêt géothermique de faible à moyenne profondeur en Wallonie de 300 à 3000 mètres de profondeur (1) et de 3000 à 6000 mètres de profondeur (2), disponible chez Petitclerc et Vanbrabant (2011).

(1)



(2)



Annexe 2 : sous-produits utilisables pour la biomasse de secondé génération, listés à l'Annexe IX de la directive 2018/2001/UE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne, disponible sur portail officiel de l'Union européenne à la page 123 de la directive.

ANNEXE IX

Partie A. Matières premières pour la production de biogaz pour le transport et de biocarburants avancés dont la contribution aux parts minimales visées à l'article 25, paragraphe 1, premier et quatrième alinéas, peut être considérée comme équivalant au double de leur contenu énergétique:

- a) algues si cultivées à terre dans des bassins ou des photobioréacteurs;
- b) fraction de la biomasse correspondant aux déchets municipaux en mélange, mais pas aux déchets ménagers triés relevant des objectifs de recyclage fixés à l'article 11, paragraphe 2, point a), de la directive 2008/98/CE;
- c) biodéchets tels que définis à l'article 3, point 4), de la directive 2008/98/CE, provenant de ménages privés et faisant l'objet d'une collecte séparée au sens de l'article 3, point 11), de ladite directive;
- d) fraction de la biomasse correspondant aux déchets industriels impropres à un usage dans la chaîne alimentaire humaine ou animale, comprenant les matières provenant du commerce de détail et de gros ainsi que des industries de l'agroalimentaire, de la pêche et de l'aquaculture, et excluant les matières premières visées dans la partie B de la présente annexe;
- e) paille;
- f) fumier et boues d'épuration;
- g) effluents d'huileries de palme et rafles;
- h) brai de tallol;
- i) glycérine brute;
- j) bagasse;
- k) marcs de raisins et lies de vin;
- l) coques;
- m) balles (enveloppes);
- n) râpes;
- o) fraction de la biomasse correspondant aux déchets et résidus provenant de la sylviculture et de la filière bois, c'est-à-dire les écorces, branches, produits des éclaircies précommerciales, feuilles, aiguilles, cimes d'arbres, sciures de bois, éclats de coupe, la liqueur noire, la liqueur brune, les boues de fibre, la lignine et le tallol;
- p) autres matières cellulosiques non alimentaires;
- q) autres matières ligno-cellulosiques à l'exception des grumes de sciage et de placage.

Partie B. Matières premières pour la production de biocarburants et de biogaz pour le transport dont la contribution à la part minimale fixée à l'article 25, paragraphe 1, premier alinéa, est limitée et peut être considérée comme équivalant au double de leur contenu énergétique:

- a) huiles de cuisson usagées;
- b) graisses animales classées dans les catégories 1 et 2 conformément au règlement (CE) n° 1069/2009.

Annexe 3 : Article 26 de la Directive 2023/1791/UE qui détaille les ambitions d'utilisation de la chaleur fatale et des énergies renouvelables dans les réseaux de chaleur et de froid, disponible sur le portail officiel de l'Union européenne.

Article 26

Approvisionnement en chaleur et en froid

1. Afin d'assurer une consommation d'énergie primaire plus efficace et d'accroître la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement en chaleur et en froid du réseau, un réseau de chaleur et de froid efficace répond aux critères suivants:

- a) jusqu'au 31 décembre 2027, un réseau utilisant au moins 50 % d'énergie renouvelable, 50 % de chaleur fatale, 75 % de chaleur issue de la cogénération ou 50 % d'une combinaison de ces types d'énergie et de chaleur;
- b) à partir du 1^{er} janvier 2028, un réseau utilisant au moins 50 % d'énergie renouvelable, 50 % de chaleur fatale, 50 % d'énergie renouvelable et de chaleur fatale, 80 % de chaleur issue de la cogénération à haut rendement ou au moins une combinaison de ces énergies thermiques entrant dans le réseau dans laquelle la part d'énergie renouvelable est d'au moins 5 % et la part totale d'énergie renouvelable, de chaleur fatale et de chaleur issue de la cogénération à haut rendement est d'au moins 50 %;
- c) à partir du 1^{er} janvier 2035, un réseau utilisant au moins 50 % d'énergie renouvelable, 50 % de chaleur fatale ou 50 % d'énergie renouvelable et de chaleur fatale, ou un réseau dans lequel la part totale d'énergie renouvelable, de chaleur fatale ou de chaleur issue de la cogénération à haut rendement est d'au moins 80 % et, en outre, la part totale d'énergie renouvelable ou de chaleur fatale est d'au moins 35 %;
- d) à partir du 1^{er} janvier 2040, un réseau utilisant au moins 75 % d'énergie renouvelable, 75 % de chaleur fatale ou 75 % d'énergie renouvelable et de chaleur fatale, ou un réseau utilisant au moins 95 % d'énergie renouvelable, de chaleur fatale et de chaleur issue de la cogénération à haut rendement et, en outre, la part totale d'énergie renouvelable ou de chaleur fatale est d'au moins 35 %;
- e) à compter du 1^{er} janvier 2045, un réseau utilisant au moins 75 % d'énergie renouvelable, 75 % de chaleur fatale ou 75 % d'énergie renouvelable et de chaleur fatale;
- f) à partir du 1^{er} janvier 2050, un réseau utilisant uniquement de l'énergie renouvelable, uniquement de la chaleur fatale ou uniquement une combinaison d'énergie renouvelable et de chaleur fatale.

2. Les États membres peuvent également choisir, en lieu et place des critères énoncés au paragraphe 1 du présent article, des critères de performance en matière de durabilité fondés sur la quantité d'émissions de gaz à effet de serre du réseau de chaleur et de froid par unité de chaleur ou de froid fournie aux clients, en tenant compte des mesures mises en œuvre pour satisfaire à l'obligation prévue à l'article 24, paragraphe 4, de la directive (UE) 2018/2001. Lors du choix de ces critères, un réseau de chaleur et de froid efficace présente la quantité maximale suivante d'émissions de gaz à effet de serre par unité de chaleur ou de froid livrées aux clients:

- a) jusqu'au 31 décembre 2025: 200 grammes/kWh;
- b) à partir du 1^{er} janvier 2026: 150 grammes/kWh;
- c) à partir du 1^{er} janvier 2035: 100 grammes/kWh;
- d) à partir du 1^{er} janvier 2045: 50 grammes/kWh;
- e) à partir du 1^{er} janvier 2050: 0 gramme/kWh.

3. Les États membres peuvent choisir d'appliquer les critères relatifs aux émissions de gaz à effet de serre par unité de chaleur ou de froid pour toute période donnée visée au paragraphe 2, points a) à e), du présent article. S'ils choisissent de le faire, ils en informent la Commission au plus tard le 11 janvier 2024 pour la période visée au paragraphe 2, point a), du présent article, et au moins six mois avant le début des périodes pertinentes visées au paragraphe 2, points b) à e), du présent article. Cette notification comprend les mesures mises en œuvre pour satisfaire à l'obligation prévue à l'article 24, paragraphe 4, de la directive (UE) 2018/2001 si elles n'ont pas été déjà notifiées dans la dernière mise à jour de leur plan national en matière d'énergie et de climat.

4. Pour qu'un réseau de chaleur et de froid soit considéré comme efficace, les États membres veillent à ce que, lorsqu'il est construit ou que ses unités d'alimentation font l'objet d'une rénovation substantielle, le réseau de chaleur et de froid réponde aux critères énoncés au paragraphe 1 ou 2 applicables au moment de son entrée en service ou de sa reprise de service à l'issue de la rénovation. En outre, les États membres veillent à ce que, lorsqu'un réseau de chaleur et de froid est construit ou que ses unités d'alimentation font l'objet d'une rénovation substantielle:

- a) il n'y ait pas d'augmentation de l'utilisation de combustibles fossiles autres que le gaz naturel dans les sources de chaleur existantes par rapport à la consommation annuelle moyenne au cours des trois années civiles précédentes de plein fonctionnement avant la rénovation; et
- b) aucune nouvelle source de chaleur dans ce réseau n'utilise de combustibles fossiles, à l'exception du gaz naturel, en cas de construction ou de rénovation substantielle de ce réseau jusqu'en 2030.

5. Les États membres veillent à ce que, à partir du 1^{er} janvier 2025 et tous les cinq ans par la suite, les exploitants de tous les réseaux de chaleur et de froid existants dont la production totale de chaleur et de froid dépasse 5 MW et qui ne remplissent pas les critères énoncés au paragraphe 1, points b) à e), préparent un plan visant à assurer une consommation d'énergie primaire plus efficace, à réduire les pertes de distribution et à accroître la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement en chaleur et en froid. Le plan comprend des mesures visant à satisfaire aux critères énoncés au paragraphe 1, points b) à e), et doit être approuvé par l'autorité compétente.

6. Les États membres veillent à ce que les centres de données dont la puissance totale nominale est supérieure à 1 MW utilisent la chaleur fatale ou d'autres applications de récupération de la chaleur fatale, à moins qu'il ne soit démontré, conformément à l'évaluation visée au paragraphe 7, que ce n'est pas techniquement ou économiquement faisable.

7. Afin d'évaluer la faisabilité économique de l'accroissement de l'efficacité énergétique de l'approvisionnement en chaleur et en froid, les États membres veillent à ce qu'une analyse coûts-avantages au niveau des installations soit réalisée conformément à l'annexe XI lorsque les installations suivantes font l'objet d'une nouvelle planification ou d'une rénovation substantielle:

- a) une installation de production d'électricité thermique dont la puissance annuelle moyenne totale est supérieure à 10 MW, afin d'évaluer les coûts et les avantages d'une mise en service de l'installation en tant qu'installation de cogénération à haut rendement;
- b) une installation industrielle dont la puissance moyenne annuelle totale est supérieure à 8 MW, afin d'évaluer l'utilisation de la chaleur fatale sur site et hors site;
- c) une installation de service dont la puissance moyenne annuelle totale est supérieure à 7 MW, telle que des stations d'épuration des eaux usées et des installations de GNL, afin d'évaluer l'utilisation de la chaleur fatale sur site et hors site;
- d) un centre de données dont la puissance totale nominale est supérieure à 1 MW, afin d'évaluer le coût et de procéder à une analyse des avantages, notamment, mais sans s'y limiter, pour ce qui est de la faisabilité technique, de l'efficacité au regard des coûts et de l'incidence sur l'efficacité énergétique et la demande locale de chaleur, y compris la variation saisonnière, de l'utilisation de la chaleur fatale pour satisfaire une demande économiquement justifiée, et du raccordement de cette installation à un réseau de chaleur ou à un réseau de froid efficace/fondé sur les SER ou à d'autres applications de récupération de la chaleur fatale.

L'analyse visée au premier alinéa, point d), prend en considération les solutions en matière de système de refroidissement qui permettent d'extraire ou de capter la chaleur fatale à un niveau de température utile avec un apport minimal d'énergie auxiliaire.

Les États membres s'efforcent de supprimer les obstacles à l'utilisation de la chaleur fatale et de soutenir l'utilisation de cette chaleur lorsque les installations sont nouvellement planifiées ou rénovées.

L'installation d'équipements de captage de dioxyde de carbone produit par une installation de combustion en vue de son stockage géologique conformément à la directive 2009/31/CE n'est pas considérée comme une rénovation aux fins des points b) et c) du présent paragraphe.

Les États membres exigent que l'analyse coûts-avantages soit réalisée en coopération avec les entreprises responsables de l'installation.

8. Les États membres peuvent exempter du paragraphe 7:

- a) les installations de production d'électricité utilisées dans les périodes de pointe de charge ou de secours qui sont conçues pour fonctionner moins de 1 500 heures d'exploitation par an en moyenne mobile calculée sur une période de cinq ans, sur la base d'une procédure de vérification établie par les États membres afin de garantir le respect de ce critère;
- b) les installations qui doivent être placées à proximité d'un site de stockage géologique autorisé au titre de la directive 2009/31/CE;
- c) les centres de données dont la chaleur fatale est ou sera utilisée dans un réseau de chauffage urbain ou directement pour le chauffage de locaux, la production d'eau chaude sanitaire ou d'autres usages dans le bâtiment ou le groupe de bâtiments ou d'installations où elle se situe.

Les États membres peuvent exempter les installations individuelles du paragraphe 7, points c) et d), en fixant des seuils pour de telles exemptions, exprimés en termes de quantité de chaleur fatale valorisable disponible, de demande de chaleur ou de distance entre les installations industrielles et les réseaux de chaleur.

Les États membres notifient les exemptions adoptées au titre du présent paragraphe à la Commission.

9. Les États membres adoptent les critères d'autorisation visés à l'article 8 de la directive (UE) 2019/944, ou des critères équivalents en matière de permis, afin de:

- a) tenir compte des résultats de l'évaluation complète visée à l'article 25, paragraphe 1;
- b) veiller au respect des exigences fixées au paragraphe 7;
- c) tenir compte des résultats de l'analyse coûts-avantages visée au paragraphe 7.

10. Les États membres peuvent exempter les installations de l'obligation, prévue par les critères d'autorisation ou les critères équivalents en matière de permis visés au paragraphe 9, de mettre en œuvre les options dont les avantages sont supérieurs aux coûts si cette exemption résulte de raisons impérieuses de droit, de propriété ou d'ordre financier. En pareils cas, l'État membre concerné transmet à la Commission une décision motivée dans les trois mois suivant l'adoption de celle-ci. La Commission peut émettre un avis sur la décision dans les trois mois de sa réception.

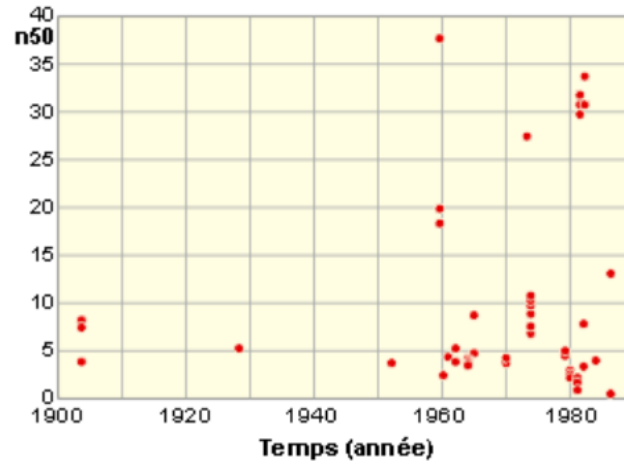
11. Les paragraphes 7, 8, 9 et 10 du présent article s'appliquent aux installations relevant de la directive 2010/75/UE, sans préjudice des exigences prévues par ladite directive.

12. Les États membres recueillent des informations sur les analyses coûts-avantages effectuées conformément au paragraphe 7, points a) à d). Ces informations devraient au moins comprendre les données sur les quantités de chaleur disponibles et les paramètres de la chaleur, le nombre d'heures d'exploitation prévues chaque année et la situation géographique des sites. Ces données sont publiées en tenant dûment compte de leur sensibilité potentielle.

13. Sur la base des valeurs harmonisées de rendement de référence visées à l'annexe III, point d), les États membres veillent à ce que l'origine de l'électricité produite par cogénération à haut rendement puisse être garantie selon des critères objectifs, transparents et non discriminatoires fixés par chaque État membre. Ils veillent à ce que cette garantie d'origine soit conforme aux exigences fixées à l'annexe XII et contienne au moins les informations spécifiées dans ladite annexe. Les États membres reconnaissent mutuellement leurs garanties d'origine, exclusivement à titre de preuve des informations visées au présent paragraphe. Tout refus de reconnaître une garantie d'origine comme une telle preuve, en particulier pour des raisons liées à la prévention des fraudes, est fondé sur des critères objectifs, transparents et non discriminatoires. Les États membres notifient un tel refus, ainsi que sa motivation, à la Commission. En cas de refus de reconnaître une garantie d'origine, la Commission peut adopter une décision visant à contraindre la partie qui refuse de reconnaître la garantie à reconnaître celle-ci, en particulier au regard des critères objectifs, transparents et non discriminatoires sur lesquels est fondée cette reconnaissance.

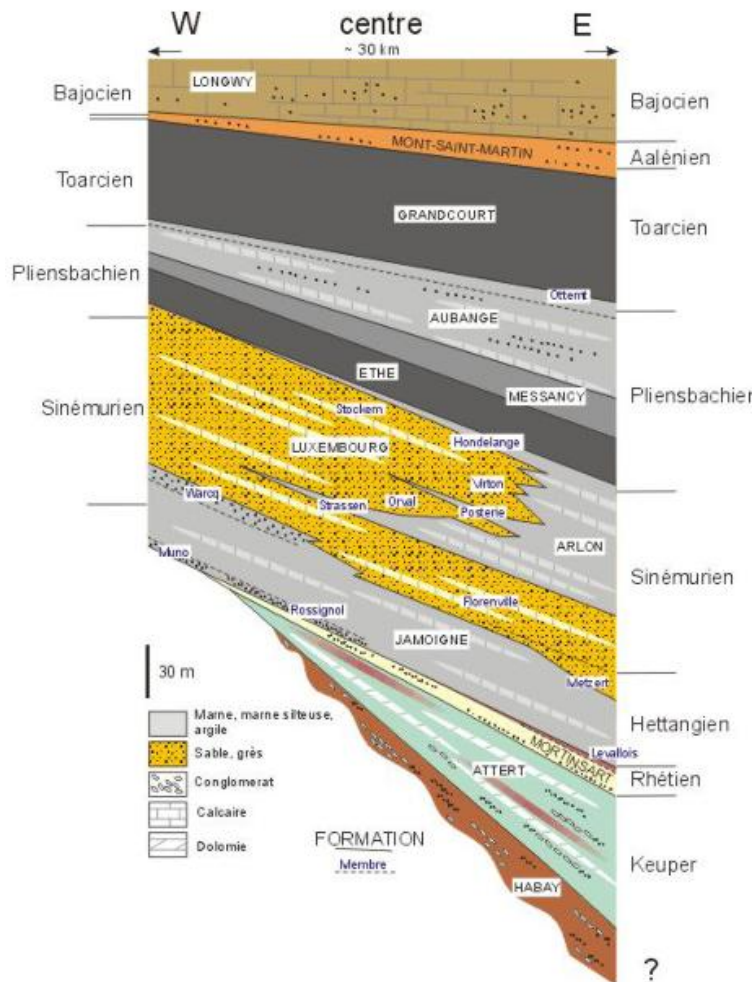
14. Les États membres veillent à ce que tout soutien disponible en faveur de la cogénération soit subordonné à la condition que l'électricité produite soit issue de la cogénération à haut rendement et que la chaleur fatale soit réellement valorisée pour réaliser des économies d'énergie primaire. Les aides publiques en faveur de la cogénération, de la production et des réseaux de chaleur sont soumises aux règles régissant les aides d'État. le cas échéant.

Annexe 4 : graphe du taux de ventilation à 50 Pa de bâtiments en fonction de leur année de construction, disponible sur Energie Plus Le Site.



Taux de ventilation à 50 PA de bâtiments en fonction de l'année de construction.

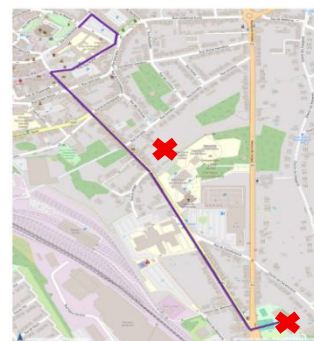
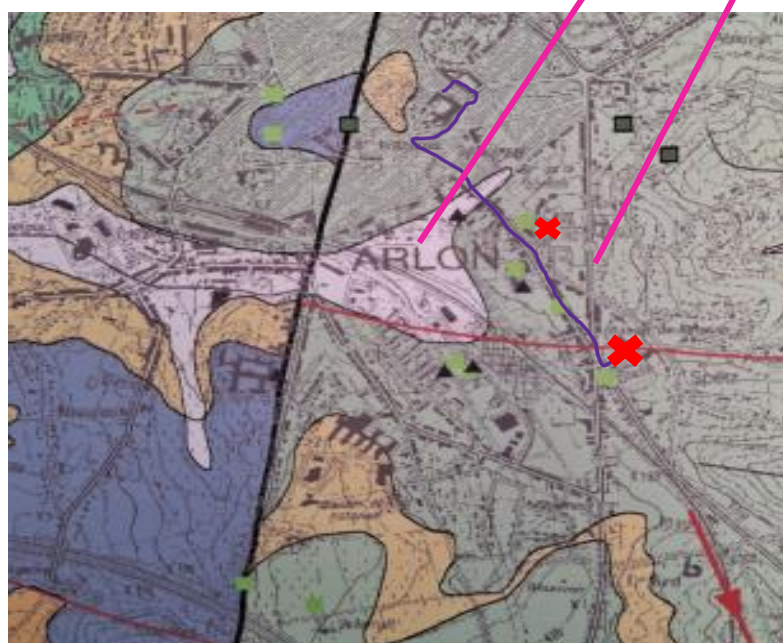
Annexe 5 : stratigraphie du sol dans la région sud-Luxembourg avec la ville d'Arion visible en marne-argiles (gris) et grès-sable (jaune), disponible à la page 140 du rapport « Développement de la plateforme Géothermique de Wallonie » rédigé par Estelle Petitclerc et Yves Vanbrabant de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique.



Annexe 6 : tableau litho-stratigraphique pour la région sud-Luxembourg avec carte pour la ville d'Arlon, consultable aux archives de la bibliothèque du Campus Environnement Arlon de l'Université de Liège.

**Tableau litho-stratigraphique
Géologie - Hydrogéologie**

Ere	Système	Série	Etage	Formation	Membre	Abréviation	Lithologie	Hydrogéologie			
CENOZOÏQUE	QUATERNAIRE	Holocène		Alluvions modernes		AMO	sables et argile limoneux - gravier - tourbe	Aquifère			
?	?	?	?	Hirzenberg		HRZ	sable-argile-cailloux de grès et schiste-gravier	Aquitard			
MESOZOÏQUE	JURASSIQUE	Lias	Pliénabachien	Messancy		MES	silt et argile limoneuse et micacée	Aquitard			
				Ethe		ETH	argilite bleue calcaire limoneuse	Aquiclude			
				Arlon		ARL	calcaire argileux - argile sableuse	Aquifère			
						Sinémurien	Arlon	Hondelange	HON	calcaire gréseux - argile sableuse	Aquifère des grès sableux de Virton
			Luxembourg	Virton	VIT		sable - bancs de grès tendre, grès calcaire	Aquiclude			
			Arlon	Posterie	POS		argile sableuse - argilite	Aquifère des grès sableux d'Orval			
						Hettangien	Luxembourg	Orval	ORV	grès calcaire - sable calcaire	Aquiclude
							Arlon	Strassen	STR	argile sableuse	Aquifère des grès calcaires de Florenville
							Luxembourg	Florenville	FLO	grès calcaire - grès - sable calcaire base: sable de Miltzer	Localement aquifère
				TRIAS	Supérieur	Keuper	Rhétien	Mortinsart	MOR	calcaire argilo-sableux - marnes sable homogène - silt - grès - horizon intercalaire d'argilite	Aquifère des sables de Mortinsart
			Norien				Attert	ATT	argilite - marnes dolomitiques - dolomie	Aquiclude	
			Carlien				Habay	HAB	argile conglomérat à ciment dolomitique	Aquifère	
PALEOZOÏQUE	DEVONIEN	Inférieur	Praguien	Mirwart		MIR	schiste - phyllades - bancs de grès quartzifère et argileux	Aquifère du Massif Ardennais (zones fissurées)			



En mauve, le tracé du réseau ; en rouge, les deux zones potentielles pour l'installation de sondes géothermiques en zone aquitarde ; les carrés verts représentent des zones de captages d'eau.

