

Étude technico-économique de la mise en place d'un système de chaleur sur les eaux grises pour un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg

Auteur : Thiry, Thomas

Promoteur(s) : Dewallef, Pierre; 2770

Faculté : Faculté des Sciences

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9640>

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.

Logo de l'institution d'accueil



Étude technico-économique de la mise en place d'un système de récupération de chaleur sur les eaux grises pour un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg

Année académique : 2019 - 2020

Mémoire présenté par Thomas THIRY

en vue de l'obtention des grades de

**Master en Sciences et Gestion de l'Environnement – finalité Énergies Renouvelables et
Bâtiments Durables (ULiège)**

Master en Développement Durable – finalité Énergie-Environnement (Uni.lu)

Rédigé sous la direction de Monsieur Pierre DEWALLEF et Monsieur Frank SCHOLZEN

Comité de lecture :

Monsieur Pierre Dewallef, Monsieur Frank Scholzen, Monsieur Philippe André et Monsieur Olivier Martin

« Copyright »

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

« *L'autorité académique est représentée par les promoteurs membres du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg. »

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

« Auteur du présent document : Thomas Thiry ;
thomas_thiry@yahoo.fr »

Remerciements

Ce mémoire est la concrétisation de deux années de master en Science et Gestion de l'Environnement à finalité Énergies Renouvelables et Bâtiments Durables à l'Université de Liège en co-diplomation avec le master en Développement Durable à finalité Énergie-Environnement à l'Université du Luxembourg. Ce mémoire est également le résultat de 3 mois de stage au sein de l'entreprise luxembourgeoise *Energiepark Réiden s.a.*

Ainsi, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à mes études, à la réalisation de mon stage et à l'élaboration de ce travail.

Premièrement, je tiens à remercier chaleureusement mon maître de stage Monsieur Olivier Martin, qui a été présent, par un encadrement de qualité, de mon entretien d'embauche à la fin de mon stage ainsi que pour ce travail.

D'une manière générale, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'intégralité des membres d'*Energiepark Réiden s.a* et des sociétés partenaires pour leur hospitalité, pour mon intégration dans leur équipe, pour leur soutien au niveau de mon stage, pour cette belle expérience professionnelle et pour tous les échanges que nous avons eus.

Deuxièmement, j'adresse mes remerciements à Monsieur Pierre Dewallef, professeur à l'Université de Liège, d'avoir répondu favorablement à l'encadrement de ce travail et pour ses conseils avisés concernant ce mémoire et la soutenance. Mes remerciements à Monsieur Franck Scholzen, professeur à l'Université de Luxembourg, quant à sa disponibilité pour mes questionnements.

Je souhaite remercier également les professeurs de l'Université de Liège du campus Environnement d'Arlon, dirigés par Monsieur Phillipe André, et de l'Université de Luxembourg pour la qualité de l'enseignement et la création de cette formation innovante.

En dernier lieu, je tiens sincèrement à remercier ma famille et mes proches qui m'ont toujours encouragé et accompagné tout au long de mes études. Je voudrais également remercier Alain Renault pour ses précieuses relectures et ses nombreux conseils.

Table des matières

Remerciements	3
Table des matières	4
Table des figures.....	6
Table des tableaux.....	8
Tables des équations	9
Glossaire	10
I. INTRODUCTION	11
1. Contexte	11
1.1. Global.....	11
1.2. Projet d'un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg.....	12
2. Objectifs.....	14
3. Limites de l'étude	15
II. REVUE DE LA LITTÉRATURE	16
1. Méthode de recherche.....	16
2. État de l'art	17
III. PARTIE THÉORIQUE	19
1. Potentiel énergétique des eaux usées	19
1.1. Besoins en eau chaude sanitaire	19
1.2. Rejets des eaux usées.....	21
1.3. Potentiel de valorisation de la chaleur des eaux usées.....	24
2. Systèmes de récupération de la chaleur à partir des eaux usées	25
2.1. Systèmes individuels de récupération de la chaleur des eaux grises.....	25
2.2. Systèmes combinés de récupération de la chaleur des eaux grises	38
2.3. Systèmes combinés de récupération de la chaleur des eaux usées	40
3. Contraintes aux systèmes de récupération de chaleur	43
4. Synthèse de la partie théorique	44
IV. PARTIE PRATIQUE	45
1. Analyse bibliographique	45
2. Matériel et méthode	48
2.1. Données techniques et énergétiques.....	48
2.2. Données économiques	54

2.3.	Données environnementales	55
2.4.	Formules.....	57
3.	Résultats	60
3.1.	Sélection du récupérateur de chaleur pour les eaux de drainage	60
3.2.	Étude énergétique	62
3.3.	Étude économique	65
3.4.	Étude environnementale.....	69
3.1.	Analyse de la sensibilité des paramètres	71
V.	DISCUSSION	75
1.	Partie théorique	75
2.	Partie pratique.....	76
2.1.	Dimension énergétique	76
2.1.	Dimension économique.....	78
2.2.	Dimension environnementale	81
2.3.	Analyse de la sensibilité des paramètres	82
VI.	CAS D'ÉTUDE : PROJET D'UN LOTISSEMENT RÉSIDENTIEL	86
VII.	CONCLUSION	88
V.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	90
VI.	ANNEXES.....	I
1.	Annexe 1 : Caractéristiques techniques du projet du lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg.....	I
2.	Annexe 2 : Résumé de la revue de la littérature	II
3.	Annexe 3 : Fiche d'étiquetage de l'électricité des fournisseurs.....	VI

Table des figures

Figure 1: Plan d'aménagement du projet (1 à 16 - Maisons unifamiliales, 17a et b - Parkings + Carport)	13
Figure 2: Profil journalier de la consommation de l'ECS d'après [53] sur base des données fournies par [55]....	20
Figure 3: Répartition de l'utilisation de l'eau potable dans un ménage selon les données de [56]	22
Figure 4: Attribution de la consommation énergétique en fonction du type de bâtiment (à gauche). Composition des eaux usées en fonction du type de bâtiment (à droite) [20].	23
Figure 5: Configurations possibles des DWHR selon [60] modifié par l'auteur	26
Figure 6: Échangeur de chaleur à co-courant par [52] modifié par l'auteur selon [63]	28
Figure 7: Échangeur à contre-courant par [52] modifié par l'auteur selon [63]	29
Figure 8: Échangeur à courants croisés par [52] modifié par l'auteur	30
Figure 9: Comparaison de l'écoulement des eaux de drainage dans un DWHR vertical (à gauche) et horizontal (à droite) [45]	30
Figure 10: Illustration des deux types de DWHR verticaux : les tubes concentriques à gauche [21], [60] et les tubes hélicoïdaux à droite [52], [65]	32
Figure 11: DWHR horizontal intégré dans le caniveau : schéma (à gauche) [21] et ReQup-Floor (à droite) [66].	34
Figure 12: DWHR horizontal sous la douche : système Zypho [68] (à gauche) et système Obox [69] (à droite)..	34
Figure 13: DWHR horizontal intégré dans le bac de douche: EcoShower Tray de l'entreprise Wagner Solar [70]	35
Figure 14: Système de récupération de chaleur combiné des eaux grises - ERS de Biofluides Environnement [72]	38
Figure 15: Système de récupération de chaleur combiné à partir des eaux usées – Rabtherm Energy Systems [74]	41
Figure 16: Système combiné de récupération de la chaleur à partir des eaux usées - ThermWin de HUBER SE [75]	41
Figure 17: Distribution des fréquences de la douche selon [21].....	49
Figure 18: Résultats de la simulation TRNSYS pour définir la température moyenne de l'eau de ville	51
Figure 19: Efficacité des DWHR en fonction du débit	52
Figure 20: Simulation énergétique et environnementale des DWHR associés à une pompe à chaleur sur 30 ans	61
Figure 21: Valeur actuelle nette pour des DWHR associés à une pompe à chaleur sur 30 ans pour différents ménages	61
Figure 22: Énergie annuellement évitée grâce au DWHR en fonction de la durée et du débit de la douche.....	63
Figure 23: Besoins énergétiques annuels des ménages en fonction de leur comportement en présence et en absence du DWHR.....	64
Figure 24: Consommation énergétique annuelle pour la douche en fonction des préparateurs d'ECS pour un ménage moyen	64
Figure 25: Évolution de la valeur actuelle nette en fonction de la durée et du débit de la douche	65

Figure 26: Valeur actuelle nette en fonction du comportement des ménages avec une pompe à chaleur	66
Figure 27: Valeur actuelle nette en fonction du comportement des ménages avec un chauffe-eau au gaz	67
Figure 28: Valeur actuelle nette en fonction du comportement des ménages avec un chauffe-eau électrique .	67
Figure 29: Comparaison économique des préparateurs d'ECS avec et sans DWHR	68
Figure 30: Comparaison des émissions de CO ₂ émises par les préparateurs d'ECS avec et sans DWHR	69
Figure 31: Fiche d'étiquetage de l'électricité du fournisseur Enovos [92]	VI
Figure 32: Fiche d'étiquetage de l'électricité du fournisseur d'électricité verte Eida s.a.[93]	VII

Table des tableaux

Tableau 1: Références des articles scientifiques examinés en fonction des systèmes de récupération de la chaleur.	17
Tableau 2: Utilisation journalière de l'ECS en fonction des différents postes pour un ménage [53], [55], [56] ...	21
Tableau 3: Caractéristiques des eaux usées concernant leur source, composition et température d'après [16]	22
Tableau 4: Liste des fabricants en fonction des différentes technologies pour les DWHR.....	36
Tableau 5: Liste des fabricants pour les systèmes combinés sur les eaux grises.....	39
Tableau 6: Liste des fabricants en fonction des technologies pour les systèmes combinés sur les eaux usées...	42
Tableau 7: Analyse bibliographique des études scientifiques concernant les dimensions énergétiques, économiques et environnementales de l'installation d'un DWHR	47
Tableau 8: Valeurs de la durée d'une douche étudiées dans la littérature scientifique.....	49
Tableau 9: Valeurs des débits d'une douche étudiés dans la littérature scientifique	50
Tableau 10: Valeurs de la température moyenne des eaux de drainage dans la littérature scientifique	51
Tableau 11 : Résumé des données des préparateurs d'ECS	53
Tableau 12: Détermination de l'évolution du prix de l'énergie selon les valeurs de STATEC [86], [87]	55
Tableau 13: Résumé des caractéristiques comportementales des ménages	63
Tableau 14: Résumé des données économiques pour l'étude de rentabilité.....	65
Tableau 15: Consommation de l'énergie primaire selon le préparateur d'ECS, le ménage et la présence du DWHR	70
Tableau 16: Analyse de la sensibilité du taux d'occupation sur les trois domaines d'étude après 30 ans.....	71
Tableau 17: Analyse de la sensibilité de la durée de vie selon les 3 aspects de l'étude pour un ménage moyen	72
Tableau 18: Analyse de la sensibilité de la température des eaux de drainage selon les 3 aspects d'étude pour un ménage moyen	72
Tableau 19: Analyse de la sensibilité de la température de l'eau de ville selon les 3 aspects d'étude pour un ménage moyen	73
Tableau 20: Analyse de la sensibilité du taux d'actualisation sur la rentabilité économique après 30 ans pour un ménage moyen	73
Tableau 21: Analyse de la sensibilité de l'augmentation du coût de l'énergie sur la rentabilité économique après 30 ans pour un ménage moyen	74
Tableau 22: Résumé des résultats obtenus dans le point IV.3.3.1, page 65.....	78
Tableau 23: Simulation de l'association d'un DWHR avec la pompe à chaleur du projet après 30 ans	86
Tableau 24: Caractéristiques techniques des maisons unifamiliales du projet du lotissement résidentiel	I
Tableau 25: Résumé de la revue de la littérature des articles scientifiques utilisés dans ce travail.....	II

Tables des équations

Équation 1: Flux thermique à travers la surface d'échange S_2 dans l'échangeur à écoulement parallèle [28], [63]	28
Équation 2: Moyenne logarithmique de la température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur [28], [63]	28
Équation 3: Évolution du prix de l'énergie pendant 1 an.....	54
Équation 4: Évolution du prix de l'énergie sur deux années	54
Équation 5: Énergie requise annuellement pour chauffer l'eau de la douche du ménage sans DWHR	57
Équation 6: Accroissement de la température de l'eau de ville selon [34]	57
Équation 7: Définition de l'énergie consommée par les préparateurs d'ECS en fonction de leur efficacité	58
Équation 8: Détermination du coût de l'énergie de l'année « n » [8].....	58
Équation 9: Détermination du facteur d'actualisation [8]	58
Équation 10: Détermination de la valeur actuelle nette [8]	59
Équation 11: Détermination de l'énergie primaire à partir de l'énergie finale consommée [1].....	59
Équation 12: Détermination des émissions de CO_2 à partir de l'énergie finale consommée [1]	59

Glossaire

Coefficient de performance (COP) : Le coefficient de performance est le ratio de l'énergie utile comparée à l'énergie finale requise. Il est utilisé afin de déterminer la performance d'une pompe à chaleur [1].

Drain water heat recovery (DWHR) : Le DWHR est un dispositif individuel de récupération de la chaleur à partir des eaux grises. Ce dispositif, fonctionnant passivement, est constitué d'un échangeur de chaleur.

Eau chaude sanitaire (ECS) : L'eau chaude sanitaire représente l'eau chauffée par un préparateur puis transportée par des canalisations vers différents postes de consommation de l'eau chaude sanitaire tels que la douche, les lavabos, le lave-vaisselle, le lave-linge...

Eaux grises : Les eaux grises correspondent à la partie des eaux usées utilisées uniquement pour les activités domestiques telles que la douche, les éviers, le lave-vaisselle...

Eaux noires/eaux-vannes : Les eaux noires, également appelées les eaux-vannes, résultent de l'utilisation de l'eau par l'homme aux toilettes. Les eaux noires se composent des eaux jaunes, principalement constituées d'urine, et des eaux brunes consistant aux fèces [2].

Eaux usées : Les eaux usées sont les eaux ayant subi des changements (pH, température, composition...) en raison de leur utilisation par les ménages, l'agriculture, les industries... [2]. Dans ce travail, les eaux usées correspondent à l'eau utilisée et dégradée par l'homme pour ses besoins et pour ses activités domestiques. Cette dénomination regroupe les eaux grises et les eaux noires.

Efficacité énergétique : La Directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique définit ce terme comme étant : « *le rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet* » [3]. L'amélioration de l'efficacité énergétique peut être réalisée par « *des modifications d'ordre technologique, comportemental et/ou économique* » [3].

Énergie finale : L'énergie finale représente l'énergie qui rentre dans le bâtiment et que le consommateur final paie, cette énergie a donc subi toutes les transformations et se trouve sous différentes formes : mazout, gaz naturel, électricité, pellets de bois... [1], [4].

Énergie ou chaleur fatale : L'énergie fatale est la part d'énergie inévitablement perdue et non valorisée, soit dans un flux incontrôlé ou un matériau, lors du fonctionnement d'un procédé [5], [6].

Énergie primaire : L'énergie primaire correspond à l'énergie brute trouvée directement dans la nature sous diverses formes : pétrole brut, charbon, minerai d'uranium, gaz naturel brut... L'énergie primaire est utilisée comme un indicateur de l'utilisation des ressources. Elle comprend l'énergie finale et les pertes de distribution et de transformation en énergie secondaire telle que l'électricité [1], [4].

Énergie utile : L'énergie utile détermine le besoin énergétique net d'un bâtiment pour le chauffage et/ou pour l'eau chaude sanitaire. Cette énergie correspond à l'énergie réellement utilisée pour produire le service demandé, c'est-à-dire qu'elle équivaut à l'énergie finale sans les pertes de rendement du système [1], [4].

Taux d'actualisation : Le taux d'actualisation permet de confronter des valeurs monétaires dans le temps, c'est « *un taux de substitution entre le futur et le présent ; il traduit la valeur du temps pour une entreprise* » [7].

Taux de rentabilité interne (TRI) : Le taux de rentabilité interne, exprimé en %, se réfère au taux d'actualisation pour lequel la valeur actuelle nette est nulle [8].

Temps de retour sur investissement (TR) : Le temps de retour sur investissement est la durée nécessaire pour que la valeur actuelle nette du projet soit nulle, c'est-à-dire le temps pour que le coût de l'investissement soit remboursé grâce au profit actualisé du projet [8].

Valeur actuelle nette (VAN) : La valeur actuelle nette, également intitulée le coût actualisé, est utilisée pour définir la rentabilité économique d'un investissement. Elle correspond à la somme des profits nets futurs actualisés, soustraction faite du coût d'investissement [8].

I. INTRODUCTION

1. Contexte

1.1. Global

Alors que les émissions anthropiques croissantes d'agents précurseurs du changement climatique renforcent la nécessité d'actions de réduction drastique de la consommation énergétique, les scénarios des scientifiques éminents concernant la croissance démographique mondiale amènent au questionnement de la rationalisation de l'énergie à l'horizon 2050. Les scénarios identifiés par l'*Agence Internationale de l'Énergie* [9] annoncent, d'ici 2050, une augmentation de 67% des ménages au niveau mondial par rapport à 2007, ce qui implique une hausse de 60% de la consommation domestique de l'énergie. Du point de vue environnemental, cela représente le double des émissions en CO₂, à savoir 15,2 Gt attribués au secteur résidentiel mondial pour 2050 [9].

Au niveau européen, le secteur résidentiel est pointé du doigt parce que responsable, à lui seul, de 40% de l'utilisation de l'énergie finale. En outre, 46% des importations européennes de gaz sont destinées à ce secteur [10].

Au niveau du Grand-Duché de Luxembourg, la consommation en énergie finale des ménages ne représente que 12% de la consommation totale. Ce ratio est très faible étant donné la consommation énergétique importante du pays pour le secteur du transport (62% de la consommation totale) [11]. Cela s'explique principalement par le tourisme à la pompe. En effet, environ 77% des ventes de carburant du Grand-Duché de Luxembourg sont destinés aux pays frontaliers [12]. Néanmoins, la consommation d'énergie finale des ménages luxembourgeois, en 2017, représente tout de même 23.712 TJ, dont 12.337 TJ de gaz et 3.494 TJ d'électricité [11]. La grande consommation énergétique du secteur résidentiel induit inévitablement des émissions de CO₂ importantes. En 2017, les 236.700 ménages recensés au Grand-Duché de Luxembourg par l'*Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg (STATEC)* ont émis 1,12 MtCO₂eq [STATEC-Document interne]. Le *Plan National intégré en matière d'Énergie et de Climat*, adopté en 2019 par le *Conseil de Gouvernement*, identifie les mesures de réduction des gaz à effet (GES) pour respecter l'objectif de -55% d'ici 2030 définis par le projet de loi relative au climat [13]. Ce plan national préconise notamment de renforcer l'efficacité énergétique du secteur résidentiel par des stratégies de rénovation et l'utilisation de sources d'énergies renouvelables [13].

De fait, l'efficacité énergétique, de manière générale, est prônée comme étant la solution capitale dans le contexte du changement climatique pour réduire radicalement la consommation énergétique et les émissions de GES mondiales [14]. C'est dans ce contexte que les exigences en matière de performance énergétique des bâtiments sont de plus en plus strictes.

Au Grand-Duché de Luxembourg, depuis le 1^{er} janvier 2017, les nouvelles constructions doivent être conformes à des exigences énergétiques strictes, c'est-à-dire que ces maisons doivent présenter des classes énergétiques élevées de niveau B voire de niveau A [15]. Depuis cette date, le parc immobilier luxembourgeois se régénère en des bâtiments plus performants encore puisque leur consommation énergétique est très faible, voire quasiment nulle pour les bâtiments qualifiés de « *Near Zero Energy Building (NZEB)* » (dont la consommation énergétique est de 80 à 90% en moins par rapport aux bâtiments traditionnels) [15], [16]. Mais ces bâtiments présentent encore une part d'énergie fatale considérable. En effet, les eaux usées, et davantage les eaux grises constituent une source importante

de chaleur fatale potentiellement valorisable. Les eaux usées correspondent à 20% des pertes de consommation d'énergie finale pour les anciennes maisons. Par ailleurs, plus les bâtiments s'approchent du NZEB, plus les pertes dues aux eaux usées sont conséquentes, jusqu'à 50% pour les constructions passives [16], [17]. En effet, les nombreux efforts d'efficacité énergétique attribués à ces bâtiments pour parvenir à une consommation de chauffage inférieure à 15 kWh/m² sont réalisés au détriment de la consommation énergétique pour l'eau chaude sanitaire (ECS) qui nécessite 50 kWh/m², selon la norme « *Passivhaus* » [18]. La réduction de cette consommation est toutefois très difficile étant donné les exigences élevées pour le confort humain [16], [19], [20].

Ainsi, les sources de déperditions sont de plus en plus concentrées au niveau des eaux usées. Étant donné que la consommation d'eau chaude sanitaire est relativement constante, et que la majorité de cette eau finit dans les eaux usées, les chercheurs ont étudié la récupération de la chaleur fatale de ces eaux puisqu'elle semble présenter un intérêt potentiel. En effet, ces pertes sont aisément valorisables par un système de récupération de chaleur permettant de récupérer les calories encore présentes dans les eaux usées. Un tel système est en général situé soit directement à la source (douche, lave-vaisselle...), soit dans les canalisations d'évacuation des eaux grises ou enfin dans les égouts.

Les systèmes de récupération de la chaleur ont été développés très tôt pour des secteurs dont la quantité de chaleur fatale est importante, à savoir les industries, les hôtels, les piscines, les restaurants... [19]. À l'échelle résidentielle, bien que ces systèmes existent depuis 1990, cette technologie semble peu répandue [21], [22]. En effet, l'investissement important et la faible efficacité démontrée par les prototypes ont éloigné l'intérêt des ménages [22]. Cependant, depuis quelque temps ces systèmes prennent progressivement de l'importance au niveau résidentiel en raison de l'évolution technologique qui a conduit à la baisse de leur prix et à l'augmentation de leur efficacité. De plus, contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, ces systèmes sont très peu dépendants des conditions météorologiques, seule la température de l'eau de ville peut subir cette influence [28], [32].

1.2. Projet d'un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité du stage effectué dans l'entreprise *Energiepark Réiden s.a* située à Beckerich. La société *Energiepark*, créée en 1999, se définit comme spécialisée dans « *la gestion, la récupération et l'utilisation rationnelle de l'énergie ou de sources d'énergie renouvelables* ».

Dans ce contexte, *Energiepark* réalise actuellement la conception d'un lotissement de 16 maisons unifamiliales à très haute efficacité énergétique (Figure 1). Cette réalisation adhère au projet Interreg Europe du Nord-Ouest intitulé « *D2GRIDS* » qui signifie « *des réseaux axés sur la demande* » consistant au déploiement de la 5ème génération de chauffage et de refroidissement urbains en Europe. *Energiepark*, étant partenaire de ce projet, souhaite développer un lotissement bénéficiant de cette 5ème génération de chauffage et de refroidissement.

Le développement du projet s'effectue selon 4 fondements :

- L'optimisation technologique
- L'efficacité économique
- L'innovation
- Le principe de l'autosuffisance énergétique

Les 16 maisons unifamiliales du projet ont une surface de terrain qui varie de 205 à 676 m² et une surface de plancher net de 168 à 254 m² (Tableau 24: Caractéristiques techniques des maisons unifamiliales du projet , page I). Le Tableau 24 présente les besoins thermiques utiles qui ont été calculés sur base de la surface de plancher nette multipliée par les indices de la chaleur spécifique.

Les 16 maisons passives du projet seront alimentées par un réseau de chaleur basse température (35°C) (Figure 1). La source énergétique de ce réseau sera une pompe à chaleur géothermique à forage vertical permettant également un refroidissement passif en été. Les maisons seront individuellement équipées d'une pompe à chaleur eau-eau pour la préparation de l'eau chaude sanitaire (55°C).



Figure 1: Plan d'aménagement du projet (1 à 16 - Maisons unifamiliales, 17a et b - Parkings + Carport)

Concernant l'électricité, des installations solaires photovoltaïques sur les toitures favorables et sur le carport des parkings permettront une production électrique d'origine renouvelable. Étant donné l'intermittence intrinsèque à la production électrique renouvelable, le surplus d'électricité pourra être soit injecté sur le réseau, soit stocké dans des batteries ou convertis en chaleur par un système "power-to-heat" puis stockée dans un ballon de stockage saisonnier. Ces différentes possibilités sont encore à l'étude, mais l'objectif est d'obtenir une autonomie énergétique à plus de 80%.

C'est dans le contexte de la recherche d'une autonomie et d'une efficacité énergétique maximale que ce mémoire s'inscrit. De ce fait, le mémoire consiste à une « étude technico-économique de la mise en place d'un système de récupération de chaleur sur les eaux grises pour un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg ».

2. Objectifs

De manière générale, l'objectif de ce travail s'insère dans la recherche perpétuelle de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels afin de réduire la consommation énergétique et les émissions de CO₂. Cette étude technico-économique vise à identifier la pertinence énergétique, économique et environnementale des différents systèmes de récupérateurs de chaleur pour le projet d'un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg. Ces trois dimensions (technique, environnementale et économique) seront donc largement étudiées pour chaque technologie identifiée afin de sélectionner la plus appropriée pour ce projet.

Tout d'abord, afin d'établir l'état des connaissances actuelles sur le sujet des récupérateurs de chaleur à partir des eaux usées, une revue de la littérature sera effectuée. Des articles vulgarisés aux publications scientifiques, la revue de la littérature permettra d'identifier les avancées technologiques, les techniques actuelles et les études sur ce sujet. En outre, dans le cadre du stage réalisé à *Energiepark*, une base de données répertoriant tous les produits présents sur le marché a déjà été conçue. Cet outil a pour objectif d'établir les caractéristiques techniques et monétaires des produits pour chaque système de récupération de la chaleur.

Ensuite, dans la partie théorique de ce mémoire, les systèmes de récupération de la chaleur fatale à partir des eaux usées seront étudiés sur base de la documentation trouvée dans la revue de la littérature. Ces systèmes seront classés en trois catégories :

- Récupération de la chaleur fatale directement dans l'évacuation des eaux grises individuelles : ce système constitue un échangeur de chaleur dont la récupération est réalisée individuellement et passivement. C'est-à-dire que ces systèmes sont appliqués directement dans l'évacuation des eaux grises sans qu'il y ait une collecte de celle-ci. Communément, ces systèmes s'intitulent « récupération de la chaleur des eaux de drainage (DWHR- Drain Water Heat Recovery) » puisqu'ils récupèrent généralement la chaleur des eaux de la douche, appelées également les eaux de drainage. Contrairement aux autres systèmes, cette technologie s'applique à une seule maison voir une seule source d'utilisation de l'eau chaude sanitaire.
- Récupération de la chaleur fatale après la collecte des eaux grises dans un ballon de stockage : ce système récupère activement la chaleur fatale de toutes les eaux grises collectées grâce à une pompe à chaleur.
- Récupération de la chaleur fatale dans ou en dehors de la canalisation des eaux usées : ce système s'applique aux eaux usées dans les égouts. La récupération de chaleur s'effectue activement à l'aide d'une pompe à chaleur soit au sein même de la canalisation ou en déviant une partie des eaux usées.

L'objectif de cette partie théorique est d'identifier la faisabilité et les contraintes techniques de chaque système d'un point de vue global. Ensuite, cette analyse sera affinée à l'échelle locale afin de sélectionner le système le plus approprié dans le contexte du projet d'un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg.

La rentabilité économique des DWHR, qui présentent la faisabilité technique la plus appropriée au projet sera également étudiée dans la partie pratique. Pour cela, les données de consommation des douches du projet devront être préalablement estimées. Ainsi, la quantité d'énergie économisée chaque année sera rapportée à son coût en fonction du vecteur énergétique utilisé pour la préparation

de l'eau chaude sanitaire (ECS). En effet, ce travail va comparer la rentabilité et la pertinence environnementale des DWHR pour des préparateurs d'ECS utilisant différentes sources énergétiques. Les spécificités du projet du lotissement permettent d'innover vis-à-vis des recherches scientifiques actuelles puisqu'aucune recherche, selon les connaissances de l'auteur, n'étudie la rentabilité économique pour une pompe à chaleur eau-eau comme préparateur d'ECS. Selon Kordana, chercheuse éminente pour la récupération de la chaleur à partir des eaux usées, seul un article scientifique polonais se penche sur l'utilisation d'un récupérateur associé à une pompe à chaleur eau-eau. Néanmoins, cet article [23] n'apporte pas de recommandations utilisables pour cette étude. Concernant les autres pompes à chaleur, seules les études [24], [25] s'y intéressent. Toujours dans la partie pratique, la sensibilité de certains paramètres sera mise en exergue afin d'identifier plus précisément les facteurs limitant l'efficacité énergétique, la rentabilité économique et la pertinence environnementale de l'installation d'un DWHR.

Par la suite, les résultats de la partie théorique et de la partie pratique seront discutés dans le but de déterminer la pertinence énergétique, économique et environnementale de l'utilisation d'un DWHR pour différents scénarios et préparateurs d'ECS.

Enfin, le cas d'étude de ce travail à savoir, le projet d'un lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg, sera étudié au regard des résultats préalablement discutés. Cette partie permettra d'étudier la pertinence de l'implémentation de cette technologie pour ce projet ambitieux.

3. Limites de l'étude

Ce travail est le fruit de l'analyse de l'auteur. Il se compose d'éléments provenant de la littérature vulgarisée et scientifique, d'apports personnels et de documents internes à la société *Energiepark*.

La base de données utilisée, contenant une liste des produits existants ainsi que des fabricants, a été réalisée durant le stage à *Energiepark*, elle est assurément non-exhaustive.

La majorité des articles et des documents scientifiques utilisés dans ce travail ont été trouvés grâce à l'accès aux bibliothèques et aux abonnements des universités de Liège et du Luxembourg. Néanmoins, certains articles restent inaccessibles, et ce travail ne prétend pas couvrir toute la littérature scientifique. De plus, d'autres documents, comme la norme *NEN 7120*, n'ont pas pu être examinés puisqu'ils sont payants.

Le développement de la partie pratique se base sur une méthode comportant beaucoup d'hypothèses et de données théoriques. En effet, le projet est toujours en phase de développement, et il n'y a pas encore eu de mesures quantitatives concrètes. Les seules données pratiques accessibles proviennent des autres projets de la société *Energiepark*. Dans ce contexte, l'accès aux détails techniques de la mise en œuvre du projet est donc limité puisque les décisions et les données continuent à évoluer.

De la même manière, les performances réelles des récupérateurs de chaleur n'ont pas été mesurées dans le cadre de ce travail. Les simulations se basent donc sur des valeurs annoncées par les fabricants et vérifiées par des sociétés de certifications telles que l'entreprise *KIWA* ou le *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*. En outre, les simulations de ce travail ne tiennent pas compte de l'aspect dynamique des échangeurs de chaleur comme le temps de réchauffage dû à l'inertie des matériaux.

Enfin, les aspects pratiques de la mise en œuvre d'un système de récupération de la chaleur comme le dimensionnement et le parcours des canalisations ne sont pas abordés dans ce travail puisque le projet est en phase de conception et peu d'éléments pratiques sont disponibles.

II. REVUE DE LA LITTÉRATURE

1. Méthode de recherche

Afin de répondre aux différents objectifs, ce travail constitue une recherche bibliographique très importante. Cette section a pour objectif de décrire la méthode de recherche employée dans la réalisation de ce travail.

Dans un premier temps, une prise de connaissance du domaine via des articles destinés au grand public et des rapports scientifiques vulgarisés a été réalisée afin d'obtenir une compréhension globale du sujet. À titre d'exemple, le rapport de Dedecker (2017) [17] pour la *Formation Bâtiment Durable* organisée par *Bruxelles Environnement* permet aisément de saisir les différents concepts du sujet. Le rapport de Gerin [21], chercheur au *Centre Scientifique et Technique de la Construction*, a également été consulté dans le but de faciliter la compréhension du sujet. Cette première phase de recherche documentaire a permis d'identifier les différents systèmes de récupération de la chaleur fatale.

Ensuite, une base de données comportant tous les fabricants des marchés de la Grande-Région (Allemagne, Luxembourg, Belgique et France) et les caractéristiques de leurs produits a été réalisée. Cette base de données, initialement destinée à faciliter les recherches de l'équipe d'*Energiepark*, a permis de distinguer plus précisément les produits présents sur le marché et leur faisabilité technique, à savoir : le débit maximal accepté, les différentes configurations possibles, l'entretien, la durée de vie, le prix, l'efficacité...

Les systèmes individuels (DWHR) sont la technologie la plus présente et la plus mature sur le marché européen avec 35 produits répertoriés provenant de plusieurs pays comme les Pays-Bas, l'Allemagne, la Suisse, la France, la Norvège, la Grande-Bretagne. Ensuite, ce sont les systèmes combinés à partir des eaux usées pour lesquels 14 produits figurent sur le marché européen, essentiellement d'Allemagne, de Suisse et d'Autriche. Enfin, les systèmes combinés à partir des eaux grises conçus en France et en Allemagne sont très peu présents sur le marché actuel puisque seulement 5 produits sont disponibles.

Les statistiques nationales ont ensuite été étudiées à travers les documents de *STATEC* dans l'optique de déterminer la composition et le comportement d'un ménage luxembourgeois moyen. Cependant, toutes les informations recherchées n'étaient pas disponibles et d'autres statistiques ont dû être analysées afin de correspondre le plus étroitement possible au Grand-Duché de Luxembourg. Pour le profil de consommation d'eau chaude sanitaire des ménages, en plus des statistiques, certaines études [16], [19], [26] ont également avancé des données intéressantes sur base des mesures effectuées respectivement à l'échelle d'une résidence multifamiliale, d'un quartier et d'un pays.

Enfin, ce sont les articles de recherches scientifiques qui ont été examinés. Étant donné que le sujet est assez innovant, ces articles sont très récents. En effet, hormis certaines études de Zaloum et al. (2007) [27], [28], la plupart des articles scientifiques datent des dix dernières années. Ils ont été écrits à travers le monde, mais une majorité vient de Pologne [22], [29]–[36] dont les principaux auteurs sont S, Kordana ; D, Slys et A, Mazur, de la *Rzeszów University of Technology*.

La recherche bibliographique concernant les articles scientifiques a été menée par l'insertion de mots clés (Drain Water Heat Recovery, grey water, heat recovery system...) dans des bases de données bibliographiques comme Science Direct, Proquest..., dans des moteurs de recherche tels que *Collection Uliège*, *Google Scholar*... et auprès des éditeurs scientifiques, par exemple, *Elsevier*.

Certains journaux scientifiques ont été importants dans la revue de la littérature, comme « *Energy and Buildings* » de *Elsevier* dont 10 articles ont été sélectionnés pour ce travail. Dans le même contexte, 8 publications en libre accès du site « *E3S Web of Conferences* » ont été étudiées.

Parmi une cinquantaine d'articles scientifiques, 31 publications pertinentes ont été employées dans la réalisation de ce travail. Un tableau reprenant les objectifs et les résultats de chaque publication a été réalisé afin de confectionner aisément la revue de la littérature (Tableau 25: Résumé de la revue de la littérature des articles scientifiques utilisés dans ce travail, page II). Ce tableau a également permis de catégoriser les différentes études en fonction du système de récupération de chaleur ciblé.

Le Tableau 1 est un résumé de la répartition des articles scientifiques en fonction du système abordé. Tout comme dans la base de données des fabricants et des technologies, des disparités sont observées au niveau de la quantité d'informations et de recherches par rapport aux différents systèmes

Tableau 1: Références des articles scientifiques examinés en fonction des systèmes de récupération de la chaleur.

Références scientifiques des systèmes de récupération de la chaleur fatale.		
	Horizontal	Vertical
Système individuel à partir des eaux de drainage	[7], [10], [21]–[23]	[19], [24], [25], [27], [28], [32]–[35], [40]–[47]
Système combiné à partir des eaux grises		[29]
Système combiné à partir des eaux usées		[48]–[51]

2. État de l'art

Cette section examine les 29 documents (Tableau 25) sélectionnés lors de la recherche bibliographique afin d'établir l'état actuel des connaissances sur les récupérateurs de chaleur au niveau des eaux usées. Ces publications scientifiques vont être étudiées selon les 3 technologies de récupération de la chaleur fatale. De plus, les 3 aspects abordés dans ce travail, à savoir énergétiques, environnementaux et économiques, vont également être considérés.

Certaines études [16], [30], [36], [52] examinent les 3 systèmes de récupération de la chaleur fatale afin de comparer leur faisabilité technique et économique. Selon Mazhar et al. [16], malgré la maturité des systèmes de récupération de chaleur, certains paramètres entravent leur présence sur le marché actuel. Cette analyse est partagée par les études [30], [36], [52] qui mettent en évidence l'influence considérable du comportement des utilisateurs dans l'efficacité des systèmes. Outre les paramètres inhérents aux ménages, le prix de l'énergie impacte nettement la pertinence des systèmes puisqu'un faible prix engendrera une diminution de l'économie financière [52], tandis qu'une hausse des prix augmente l'intérêt de la récupération de chaleur fatale [16].

Les systèmes DWHR sont les technologies les plus sollicitées à ce jour si l'on s'en réfère au nombre de produits différents sur le marché et au nombre d'articles scientifiques publiés. À la lecture des articles, la première constatation qui peut être faite est la classification des DWHR. En effet, les DWHR peuvent être disposés en deux groupes : les dispositifs verticaux, généralement installés autour de la canalisation de la chute des eaux grises, et les dispositifs horizontaux, placés sous la douche ou directement dans le bac à douche. La deuxième constatation correspond à l'inégalité de la quantité d'articles étudiant les différents dispositifs (Tableau 1). De fait, les systèmes verticaux sont composés d'un échangeur de chaleur assez sommaire, mais surtout plus efficaces que les systèmes horizontaux. Par conséquent, ce dispositif a été fortement étudié pour mesurer sa rentabilité économique [27],

[31]–[35], [43], [45], [46]. La publication éminente de Kordana et Slyš [33] intitulée : “ *Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing*” a défini les bases de l’évaluation financière d’un tel système. L’analyse des articles scientifiques concernant la rentabilité économique sera parachevée au point IV.1. Afin d’améliorer les dispositifs verticaux, de nombreuses études ont mesuré les paramètres sensibles de l’efficacité de ceux-ci [28], [40]–[42], [44], [47]. Le professeur Michael Collins et le doctorant Ramin Manouchehri ont abondamment travaillé sur les aspects thermodynamiques de ces échangeurs de chaleur. À titre d’exemple, dans l’étude [40], ils ont mesuré l’impact de l’inclinaison d’un DWHR vertical. Cette étude a souligné l’importance d’une chute d’eau parfaitement verticale afin d’éviter de grandes pertes d’efficacité. Concernant les DWHR horizontaux, l’intérêt de ces systèmes s’amplifie progressivement pour la simple raison qu’ils sont plus facilement mis en œuvre [39]. De fait, malgré leur efficacité moindre, les DWHR horizontaux sont applicables dans une plus grande majorité de cas, contrairement aux DWHR verticaux. C’est pourquoi les articles [22], [37]–[39] étudient les possibilités d’amélioration de l’efficacité des DWHR horizontaux.

Moins nombreux, les articles scientifiques concernant les systèmes combinés à partir des eaux grises ont été difficilement disponibles. Mise à part l’étude de Paduchowska et al [29], aucune autre publication se basant exclusivement sur ces systèmes n’a été identifiée. Néanmoins, l’étude démontre l’intérêt de ces systèmes pour une consommation d’eau chaude sanitaire élevée comme dans les résidences à forte occupation, les hôtels et les piscines.

Quant aux systèmes combinés à partir des eaux usées, beaucoup d’études de faisabilité techniques et économiques ont été examinées. Cependant, seules quelques-unes ont été retenues pour ce travail puisqu’elles illustraient correctement la problématique de ces systèmes [48], [50], [51]. Souvent, ces publications constituent des études préalables à la faisabilité d’un projet à l’échelle d’un quartier [48] ou d’une ville [50], [51] et non pour des logements individuels. L’étude de Spriet et al. [50], par exemple, a étudié le potentiel de récupération de chaleur dans les égouts de Bruxelles, ce qui leur a permis d’avancer que 35% de la Région de Bruxelles-Capitale sont éligibles à cette technologie. En ce qui concerne l’évaluation de la faisabilité technique de ces systèmes de récupération de la chaleur, Dürrenmatt et Wanner [49] ont identifié les paramètres sensibles de cette technologie.

Cette revue de la littérature a permis de mettre en exergue la méthode employée afin de collecter les informations relatives au sujet. En effet, cette section est importante puisqu’elle montre l’analyse systématique utilisée pour réaliser l’état de l’art de ces technologies en perpétuel développement. Une analyse plus exhaustive des publications scientifiques sera élaborée à la section IV.1 dans le but d’analyser précisément les observations et les recommandations des différents auteurs.

III. PARTIE THÉORIQUE

En se basant sur tous les documents trouvés lors de la recherche bibliographique et sur les connaissances de l'auteur, cette partie constitue une description théorique du potentiel énergétique des eaux usées et des systèmes de récupération de la chaleur.

Dans un premier temps, le potentiel énergétique des eaux usées sera mis en évidence par l'identification des besoins en eau chaude sanitaire puis, par la description et la quantification des eaux usées rejetées.

Dans un deuxième temps, les systèmes de récupération de la chaleur à partir des eaux usées seront techniquement décrits à l'aide de schémas et de tableaux. Dans chaque cas, les applications et les contraintes seront analysées en référence aux résultats des publications scientifiques.

Dans un troisième temps, certains obstacles aux différentes technologies seront mis en lumière afin d'expliquer la réticence des ménages à ces systèmes. De plus, ces obstacles constituent majoritairement les facteurs influençant négativement l'efficacité des systèmes de récupération.

Enfin, une synthèse de la partie théorique permettra de distinguer le système de récupération de la chaleur le plus adapté au projet du lotissement résidentiel. Cette synthèse est essentielle puisque la partie pratique se consacre exclusivement à la technologie sélectionnée.

1. Potentiel énergétique des eaux usées

Avant d'identifier le potentiel énergétique présent dans les eaux usées, la consommation de l'eau doit être étudiée. Selon Ni et al [53], le secteur résidentiel n'est pas seulement un important consommateur de l'énergie. En effet, l'eau potable est également utilisée en abondance. La consommation de l'eau potable au Luxembourg s'élève à 115 litres/personne/jour ce qui correspond aux valeurs des autres pays de la Grande Région [54]. Néanmoins, les données concernant la répartition de la consommation d'eau pour les différents postes dans un ménage (cuisine, salle de bain, toilettes...), et par conséquent les quantités d'eaux usées rejetées par chacun de ces postes, sont rares puisque leur collecte est difficile. Cette problématique de la collection des données de consommation a été mise en évidence par Mazhar et al. dans leur étude intitulée « *A Key Review of Non-Industrial Greywater Heat Harnessing* » [16]. Néanmoins, une certaine constance est observée en ce qui concerne les besoins journaliers d'eau chaude sanitaire d'un ménage.

1.1. Besoins en eau chaude sanitaire

Le *Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques (COSTIC)* a démontré qu'en moyenne, dans une maison individuelle, la consommation journalière en eau chaude sanitaire à 40°C est de 56 \pm 23 litres par personne [26]. Les besoins en eau chaude sanitaire représentent donc 48% de la demande journalière en eau potable. Un ménage constitué de 4 personnes dans une maison individuelle va ainsi consommer 170 \pm 70 litres d'ECS à 40°C par jour [26]. Pour une température de 55°C, la consommation journalière s'élève à 35 \pm 14 litres par personne avec une température moyenne de l'eau froide de 16°C. Toutefois, le groupe *COSTIC* met en garde sur l'utilisation de données à des températures supérieures à 40°C puisque les résultats pour 55°C sont dépendants de la température de l'eau froide. Contrairement aux résultats pour 40°C, car dans ce cas, très peu d'eau froide est utilisée dans le mitigeur. Ces chiffres, publiés par l'*Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie*, proviennent de 15.500 relevés de compteur d'eau en France de 2002 à 2015 [26].

Ces besoins en eau chaude sanitaires proviennent de différentes sources d'utilisation dont les principales sont : le lave-linge, le lave-vaisselle, la douche, le bain et les éviers [55]. Toutefois, les besoins diffèrent tant au niveau de la température d'utilisation que du volume nécessaire. De plus, les périodes d'utilisation sont également distinctes comme cela est représenté par la Figure 2 [53], [55]. À titre d'exemple, pour un ménage de 3 personnes, un lave-vaisselle nécessite un volume 16 litres/jour à une température de 49 °C et son profil d'utilisation se situe essentiellement en début de soirée. A contrario, le volume d'ECS nécessaire pour la douche est de 88 litres à 40 °C utilisé surtout entre 6 et 9 heures du matin (Figure 2 et Tableau 2) [53], [55], [56].

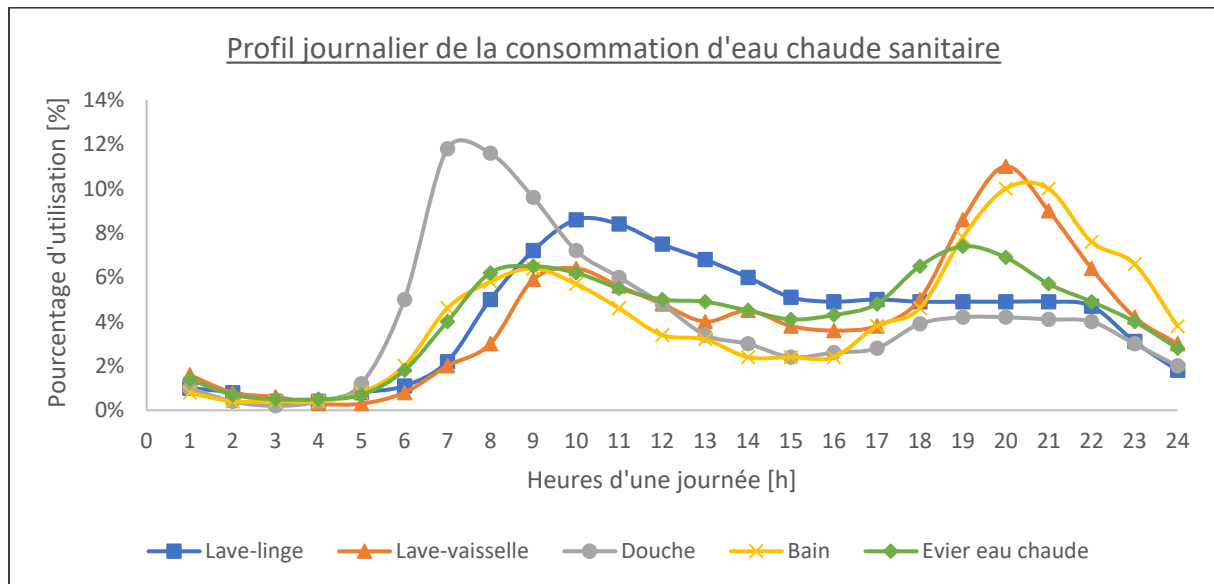


Figure 2: Profil journalier de la consommation de l'ECS d'après [53] sur base des données fournies par [55]

De manière générale, la consommation de l'eau chaude sanitaire dans un ménage s'effectue en dehors des heures de travail [16] c'est-à-dire de 6 à 9 heures pour le matin et de 18 à 23 heures pour le soir (Figure 2). Néanmoins, les avancées technologiques des appareils électroménagers comme le lave-vaisselle ou le lave-linge permettent des utilisations différées ce qui adoucit les pics sur la Figure 2. Outre la variation horaire de la consommation d'ECS, il y a également une variation en fonction des jours de la semaine et des jours de week-end. Par exemple, la consommation en semaine pour le lave-linge est représentée par un facteur de 0,94 tandis qu'en week-end il est de 1,15 [55]. Le profil de consommation d'ECS subit également des variations saisonnières. À titre d'exemple, en février, la consommation est de 14% au-dessus de la moyenne tandis qu'en juillet, la consommation est 19% en dessous [19].

En ce qui concerne le volume nécessaire, les études américaines [55], [56] montrent la répartition des besoins en eau chaude sanitaire (Tableau 2). Malgré la provenance des données (les États-Unis sont de gros consommateurs d'eau potable) les quantités journalières identifiées par DeOreo et al. [56] reflètent intimement les besoins en ECS identifiés par le groupe français *COSTIC*. Cependant, au regard des résultats de l'autre étude américaine [55], il y a un écart au niveau du volume journalier de 46%. De plus, la part attribuée aux éviers par DeOreo et al. [56] semble importante et inversement pour les douches vis-à-vis du rapport de [55].

Tableau 2: Utilisation journalière de l'ECS en fonction des différents postes pour un ménage [53], [55], [56]

Postes d'utilisation de l'ECS	Volume [litre/jour]		Répartition [%]		Température [°C]
	[56]	[55]	[56]	[55]	[53]
Douche	67,4	88,3	39,1	35,0	40,6
Évier	58,3	78,8	33,8	31,2	40,6
Lave-linge	16,7	47,3	9,7	18,8	49,0
Bain	9,8	22,1	5,7	8,8	40,6
Lave-vaisselle	8,3	15,8	4,8	6,2	49,0
Fuites	7,9	/	4,6	/	/
Autres ¹	3,4	/	2	/	/
Total	171,9	252	100		/

Ainsi, pour identifier les sources potentiellement valorisables, nous considérons davantage la répartition (%) de l'eau chaude sanitaire en fonction des postes d'utilisation puisque les études s'accordent sur ces chiffres. Le Tableau 2 montre donc l'importance des douches et des éviers dans la demande en eau chaude sanitaire puisque 66 à 73% du volume leur sont attribué.

1.2. Rejets des eaux usées

Selon Niewitecka [36] : « la quantité réelle d'eaux grises rejetées par les bâtiments résidentiels dépend de nombreux facteurs tels que le prix de l'eau, la quantité et la qualité des ustensiles sanitaires, les habitudes des résidents et les dispositifs utilisés dans les bâtiments pour réduire la consommation d'eau ». En effet, les facteurs souvent mis en avant pour expliquer la variabilité de la consommation de l'eau potable sont : la situation géographique (climat, disponibilité de l'eau...), le prix de l'eau, les régulations politiques (restrictions), l'efficacité des appareils utilisant l'eau et les caractéristiques des ménages (revenus, situation familiale, nombre d'individus...) [36], [45], [57]. Ainsi, le rejet des eaux usées comporte cette même variabilité que la consommation de l'eau potable puisqu'ils sont étroitement corrélés. En effet, selon le professeur docteur-ingénieur Hansen, 90 à 95% de l'eau potable consommée par un ménage finit sous forme d'eaux usées, le reste correspond à l'irrigation, l'évaporation... [2]. La Figure 3 représente donc la consommation en eau potable d'un ménage pour tout usage domestique intérieure, cela signifie que l'eau nécessaire au jardinage n'est pas prise en compte.

La Figure 3 [56] illustre la répartition de la consommation de l'eau potable pour des usages intérieurs, mais implicitement, les sources d'eaux usées sont également représentées. Cette distribution est dominée par les toilettes (24% du volume total) puis par les douches et les éviers (20% chacun). La consommation des toilettes peut être effectivement très importante dans le cas d'anciens dispositifs sanitaires, dont la chasse d'eau peut déverser entre 9 à 12 litres [2]. Ces eaux usées généralement regroupées dans une canalisation commune vont ensuite se décharger dans les égouts ou dans un dispositif d'épuration autonome. Cependant, avant de regrouper les eaux usées, il serait intéressant d'exploiter les différentes fractions qui les composent.

¹ La catégorie « autres » concerne toutes les utilisations intérieures de l'ECS non répertoriées comme le refroidissement par l'évaporation, par exemple [56].

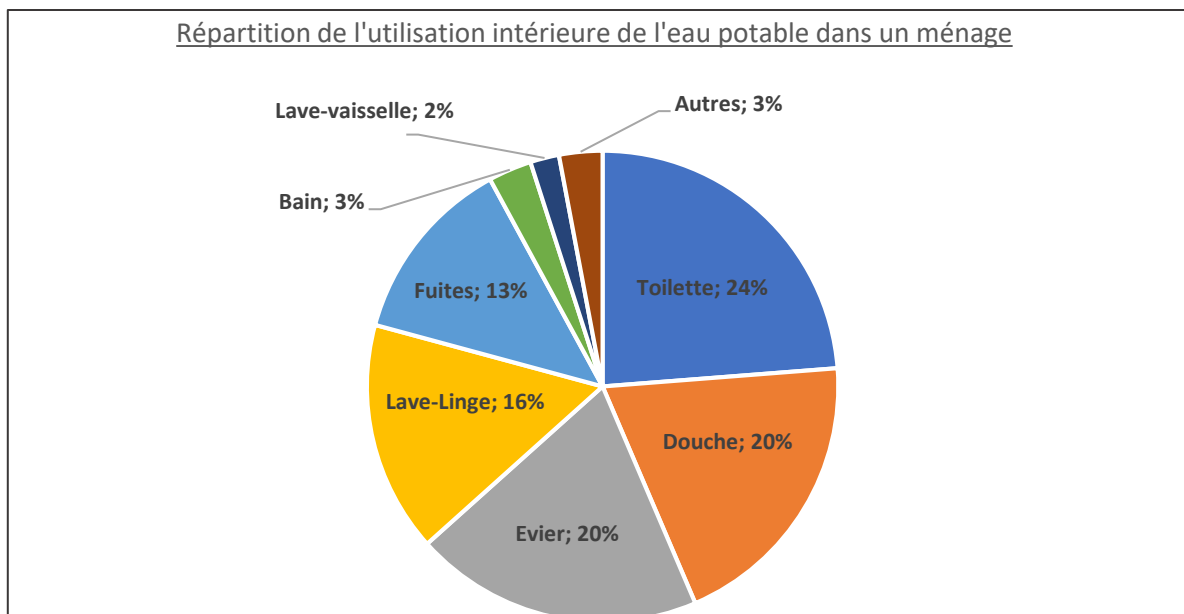


Figure 3: Répartition de l'utilisation de l'eau potable dans un ménage selon les données de [56]

De fait, les eaux usées sont généralement catégorisées en deux groupes, à savoir les eaux grises, émanant de la salle de bain et de la cuisine, et les eaux noires (ou les eaux-vannes) provenant des toilettes. En outre, Mazhar et al. [16] ont distingué deux types d'eaux grises : les eaux grises légères issues de la salle de bain et les eaux grises lourdes de la cuisine. Ainsi, les eaux usées émises par chaque ménage comportent plusieurs fractions dont les paramètres de différenciation sont leur provenance et leur composition (Tableau 3).

Selon Mazhar et al. [16], les eaux grises légères, appelées les eaux de drainage, proposent le plus grand potentiel de valorisation énergétique étant donné leur température et leur composition. Concernant les eaux grises lourdes, la charge importante de graisses et d'impuretés est nocive pour les échangeurs de chaleur. Cela nécessite donc une filtration préliminaire onéreuse. Quant aux eaux noires, elles offrent le potentiel énergétique le plus faible ainsi qu'une composition en déchet élevée.

Tableau 3: Caractéristiques des eaux usées concernant leur source, composition et température d'après [16]

Dénomination	Source	Composition	Température de sortie
Eaux grises légères	Douche, bain, lavabos	Particules organiques, savon, cheveux, bactéries,	30 – 40 [35], [36]
Eaux grises lourdes	Éviers de cuisine, lessive, lave-vaisselle	Surfactants, détergents, phosphates, métaux lourds, solides en suspension, particules organiques, huile, graisse, bactéries	30 – 40 [35], [36]
Eaux noires	Toilettes	Urine, fèces, papier toilette	/
Eaux usées	Ensemble du ménage	Eaux grises et eaux noires	14 à 18°C (dans l'égout) [16], [36], [58]

L'importante différence de température et de composition des fractions des eaux usées rend donc nécessaire la séparation des eaux grises et noires pour pouvoir récupérer la chaleur fatale. Cependant, dans les ménages conventionnels, les petites canalisations convergent vers une « cheminée » centrale d'évacuation [16]. Or, la séparation des fractions des eaux usées constitue le prérequis des systèmes de récupération de chaleur sur les eaux grises.

C'est d'autant plus le cas pour les maisons basse énergie. En effet, l'étude de Meggers et Leibundgut [20] a montré que les maisons basse énergie présentent un potentiel de récupération de chaleur élevé puisque plus une maison est basse énergie, plus les eaux usées sont chaudes (Figure 4) [16], [20]. Cela peut s'expliquer par l'utilisation progressive de dispositifs hydroéconomes, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'eau froide impliquant des températures d'eaux grises plus élevées [6]. Par exemple, l'utilisation de toilettes équipées d'une chasse d'eau économe (de 6 à 2,5 litres par chasse d'eau) réduit considérablement la consommation d'eau froide.

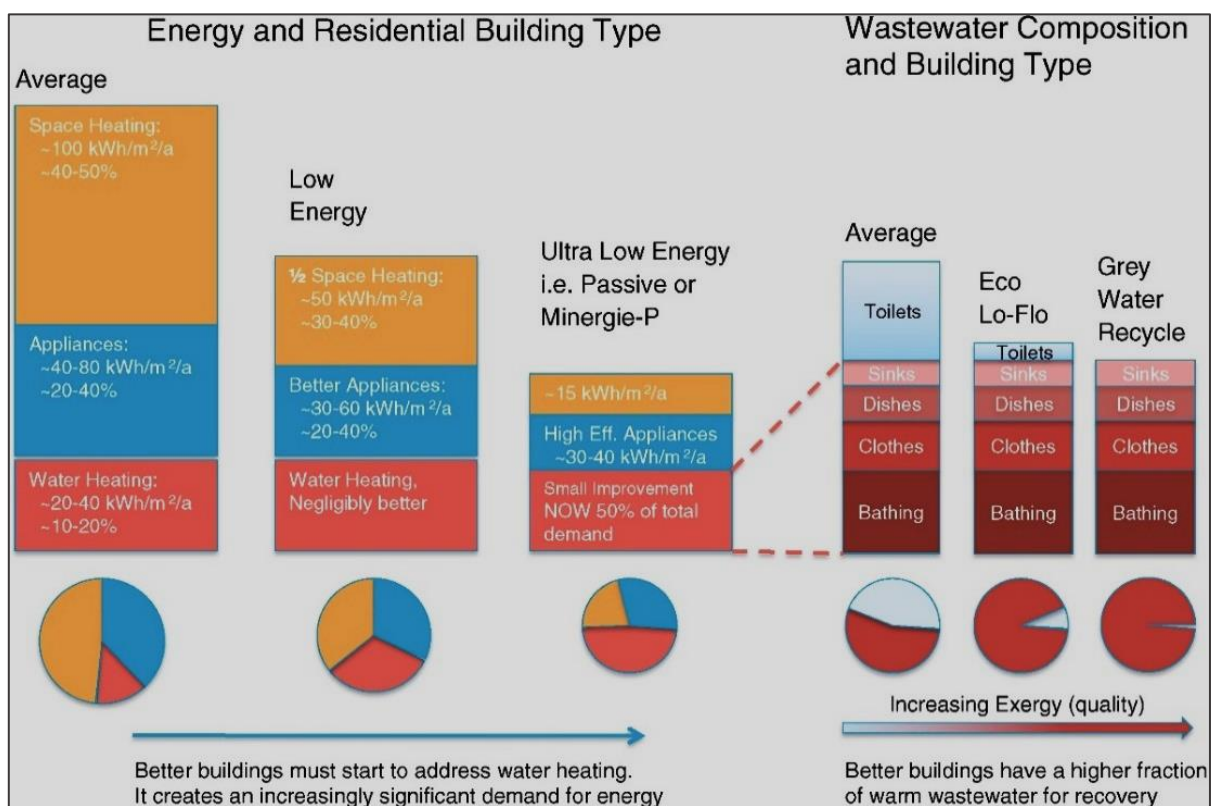


Figure 4: Attribution de la consommation énergétique en fonction du type de bâtiment (à gauche). Composition des eaux usées en fonction du type de bâtiment (à droite) [20].

1.3. Potentiel de valorisation de la chaleur des eaux usées

Afin d'identifier le potentiel de valorisation de la chaleur des eaux usées, Niewitecka [36] affirme que les premiers critères de sélection sont la quantité et la température. Ensuite, les autres critères correspondent à la qualité des eaux usées, à l'état des égouts, aux besoins des consommateurs...

D'après les informations identifiées ci-dessus, la douche semble être l'emplacement émettant la plus grande quantité d'eau grise puisque 35 à 39% de l'eau chaude sanitaire est mobilisée à cet usage. De plus, la température des eaux grises provenant de la douche varie de 30 à 40°C. La douche est donc un emplacement crucial pour la récupération de la chaleur à l'échelle domestique.

Cet avis est partagé par Olivier Gerin du *Centre Scientifique et Technique de la Construction* puisqu'il affirme que la priorité doit être donnée aux douches, vu qu'elles présentent le plus haut potentiel de valorisation énergétique dans un bâtiment résidentiel. En effet, hormis la douche, les autres postes de consommation de l'ECS présentent des désavantages concernant le timing ou le temps de puisage qui impactent négativement leur potentiel [21].

Au sujet des lavabos et des éviers de cuisine, le temps de puisage est trop bref pour que l'échangeur de chaleur puisse se réchauffer. De fait, étant donné l'inertie thermique des matériaux, l'échangeur de chaleur nécessite un temps de réchauffage pour atteindre son efficacité maximale. Néanmoins, cet aspect dynamique ne sera pas pris en compte dans ce travail [21].

En ce qui concerne le bain, le lave-vaisselle et la lessive, la chaleur de l'eau est dissipée à cause du temps important entre le puisage et le rejet de celle-ci [19]. En outre, pour les machines à laver et les lave-vaisselles, « *l'offre et la demande* » ne sont pas simultanées, ce qui oblige l'utilisation d'un ballon de stockage [16].

La douche est donc le seul poste de consommation d'ECS pertinent pour un système de récupération de chaleur individuel étant donnée la simultanéité entre « *l'offre et la demande* ». De fait, les DWHR ne sont pas très efficaces pour des rejets différés tels que les éviers, le bain... Néanmoins, pour un système de récupération de chaleur combiné, l'ensemble des eaux grises peut être envisagé [21].

L'entreprise française *EHTech* qui a mis au point le produit *Obox* (Figure 12) affirme qu'avec l'utilisation des eaux grises lourdes (cuisine, machine à laver et lave-vaisselle) « *la plus-value énergétique ne compense que très rarement le surcoût et le supplément de dépôts* » [59].

D'un point de vue de la quantité, les eaux usées présentent également un potentiel important [36], [49]. Bien que les températures ne soient pas aussi élevées que pour les eaux grises, cette source de chaleur (14 à 18°C) démontre toutefois un potentiel plus important que la géothermie [36]. Pour permettre la valorisation énergétique, les systèmes de récupération de la chaleur sur les eaux usées nécessitent une pompe à chaleur. De plus, afin d'obtenir des quantités suffisantes, ces réalisations se font à l'échelle de résidences importantes, d'un quartier ou bien d'une ville.

2. Systèmes de récupération de la chaleur à partir des eaux usées

Étant donné que le potentiel des eaux usées selon ses différentes fractions a été identifié, cette section présente les divers systèmes de récupération de la chaleur envisagés dans le cadre du projet du lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg.

Typiquement, trois systèmes de récupération de la chaleur se distinguent dans la littérature à savoir, la récupération de chaleur au sein même du bâtiment, dans les égouts ou dans la station d'épuration [16], [17]. Dans ce travail, la récupération de la chaleur fatale dans la station d'épuration ne sera pas traitée puisque le projet ne présente pas cette possibilité. Ainsi, trois systèmes seront examinés :

- Les systèmes individuels sur les eaux grises
- Les systèmes combinés sur les eaux grises
- Les systèmes combinés sur les eaux usées

La présentation des systèmes comporte des informations à propos du principe de fonctionnement, des différentes technologies existantes, des avantages et inconvénients, et des applications possibles. L'intention de cette section est d'identifier un système de récupération de la chaleur approprié au projet. Les performances de ce système seront ensuite simulées dans la partie pratique.

2.1. Systèmes individuels de récupération de la chaleur des eaux grises

Les systèmes individuels appelés « *Drain Water Heat Recovery* » (DWHR) constituent la technologie la plus simple tant au niveau de sa mise en œuvre que de son fonctionnement. Pour ces systèmes, le récupérateur de chaleur est situé directement à la source des eaux grises (ou eaux de drainage dans le cas de la douche), typiquement au niveau de l'évacuation ou de la canalisation de la douche. Ces dispositifs sont généralement faciles à installer et peu encombrants. De plus, ils ne requièrent pas d'énergie pour la valorisation calorifique puisqu'elle se fait directement par un échangeur de chaleur. Ces systèmes sont donc qualifiés de passifs. L'intérêt de ces systèmes est justifié lorsqu'il y a une simultanéité entre l'offre des eaux de drainage et la demande en eaux chaudes sanitaires, ce qui permet de réaliser l'échange de chaleur de manière instantanée [28], [33].

Les systèmes individuels peuvent se différencier par certains facteurs qu'il est important de prendre en considération, car ils impactent considérablement l'efficacité du système [28] :

1. La configuration du DWHR : mixte, simple relié au mitigeur ou simple relié au ballon d'ECS ;
2. Le type d'échangeur de chaleur : à co-courant, à contre-courant ou à courants croisés ;
3. L'orientation de l'échangeur : verticale ou horizontale.

L'efficacité du système dépend également des caractéristiques du ménage comme :

- Le taux d'occupation [46] : cela définit le volume journalier d'ECS ;
- La durée de la douche [21], [33], [45] : variable selon les utilisateurs, les enfants et les adolescents ont tendance à prendre des douches plus longues [45] ;
- Le vecteur énergétique pour la préparation de l'eau chaude sanitaire : cette influence sera démontrée dans la partie pratique IV (page 45) [27], [33], [35] ;
- La température de l'eau de ville : plus la température est basse plus l'efficacité augmente [42].

D'autres paramètres propres à la douche ont également été identifiés comme étant facteurs d'influence [21] :

- Le type de pommeau de douche : le débit du pommeau de douche et, dans une moindre mesure, le matériau utilisé (forte ou faible inertie) ;
- La configuration de la douche : par exemple, les douches italiennes, les douches équipées d'un rideau ou les douches fermées, mais, également la présence d'écarts au niveau des jointures, influencent l'évaporation ce qui entraîne un refroidissement des eaux de drainage [21];
- Le bac de douche : il peut influencer la température des eaux de drainage dû au matériau utilisé (inertie thermique) et à la rapidité d'évacuation ;
- L'éloignement du DWHR par rapport au bac de douche : cela peut entraîner des pertes thermiques.

2.1.1. Configuration du DWHR

La configuration des DWHR affecte sensiblement l'efficacité du dispositif. Le choix de la configuration dépend habituellement de la possibilité technique de celle-ci en fonction du bâtiment. Dans le cas d'une nouvelle construction, la configuration mixte devra être privilégiée si et seulement si un ballon de stockage est présent comme expliqué ci-dessous [33]. Dans le cas échéant, la liaison au mitigeur sera uniquement possible.

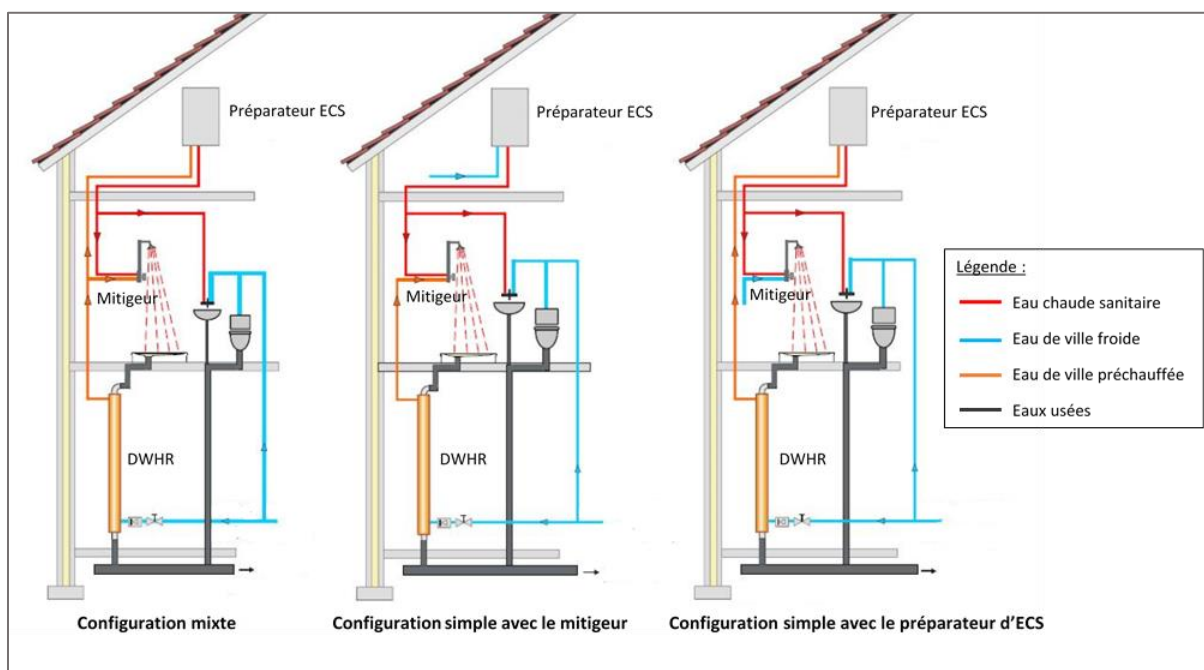


Figure 5: Configurations possibles des DWHR selon [60] modifié par l'auteur

La configuration mixte consiste à une double liaison du DWHR vers le mitigeur et le ballon d'eau chaude sanitaire présent dans le préparateur d'ECS (Figure 5). L'eau de ville préchauffée par les eaux de drainage dans le DWHR va directement alimenter le mitigeur en eau tiède et le préparateur d'ECS. Cette configuration est la plus optimale puisqu'elle permet une efficacité élevée de 32 à 66% selon les fabricants et les technologies.

Une autre configuration est la liaison unique avec le mitigeur afin de préchauffer l'eau de ville froide (Figure 5). Le DWHR agit donc comme un échangeur de chaleur instantané ce qui est seulement possible dans le cas de la douche. De fait, cette possibilité provient de la simultanéité entre le rejet d'eaux grises et le besoin d'eau froide comme pour les douches [61], [62]. En effet, dans cette configuration « *le débit d'eau grise évacuée de la douche et l'eau froide circulant dans l'échangeur de chaleur sont égaux, de sorte que l'augmentation de la température de l'eau chauffée est approximativement égale à la diminution de la température des eaux usées* » [33]. Ce type de liaison est caractéristique de l'absence d'un système de stockage [61], [62]. Pour permettre cette simultanéité, les matériaux utilisés ont une faible inertie thermique ce qui induit un faible temps de réchauffage [19]. Cette configuration est qualifiée d'acceptable par Gerin [21], car elle réduit l'efficacité du DWHR de 15 à 20% par rapport à la configuration mixte [19], [21].

Enfin, le DWHR peut également être exclusivement relié à un chauffe-eau ou à un ballon de stockage (Figure 5) pour préchauffer l'eau chaude sanitaire. Cette configuration est la moins efficace puisqu'elle induit une diminution de 25 à 30% de l'efficacité par rapport à la configuration mixte [19], [21]. Cela a été confirmé à la lecture des fiches techniques des différentes technologies bien que certains fabricants affirment que la liaison au mitigeur est moins efficace que la liaison au ballon de stockage.

Comme affirmé dans l'étude [33], tous les échangeurs peuvent en théorie présenter ces 3 configurations. Néanmoins, les échangeurs horizontaux sous la douche et intégrés dans le receveur ou dans le bac de douche sont, dans la pratique, généralement reliés directement au mitigeur. De fait, leur emplacement proche du mitigeur engendre souvent une distance élevée par rapport au préparateur d'eau chaude sanitaire. Ainsi, la liaison avec celui-ci induit des coûts de montage supplémentaires dus aux besoins plus importants de canalisations [33].

Dans le cas de maisons en construction, la mise en œuvre de la configuration mixte est aisée. Cependant, la configuration choisie dans les bâtiments existants dépend de plusieurs facteurs comme la distance entre le préparateur d'ECS et la douche, l'espace disponible pour le DWHR et les travaux à effectuer [33].

2.1.2. Types d'écoulement du DWHR

L'efficacité des échangeurs de chaleur dépend principalement de [22] : « *la surface de l'échangeur de chaleur, la différence de température entre les eaux usées et l'eau [de ville], le type de matériau de l'échangeur de chaleur et sa conductivité thermique, ainsi que l'épaisseur de la cloison séparant les deux fluides circulant dans le dispositif* ». Généralement, les échangeurs se composent de cuivre dont la conductivité thermique est très élevée (390 W/m.K à 20°C), mais certains peuvent être en aluminium (185 W/m.K à 20°C) [33], [38]. Outre ces facteurs d'influence, le type de courant présent dans l'échangeur a également un impact considérable sur l'efficacité. Pour les DWHR, 3 types d'échangeurs ont été distingués.

i. Échangeur à co-courant

Les échangeurs à co-courant, également appelés échangeurs anti-méthodiques, présentent un écoulement d'eau de drainage parallèle et de même sens que l'écoulement de l'eau de ville (Figure 6). Les recherches effectuées par l'auteur de ce travail montrent qu'aucune technologie appliquée aux eaux grises n'utilise ce mode d'écoulement (Tableau 4). En effet, le transfert de chaleur par l'échangeur à co-courant est moins efficace que celui à contre-courant [16], [41], [52], [63].

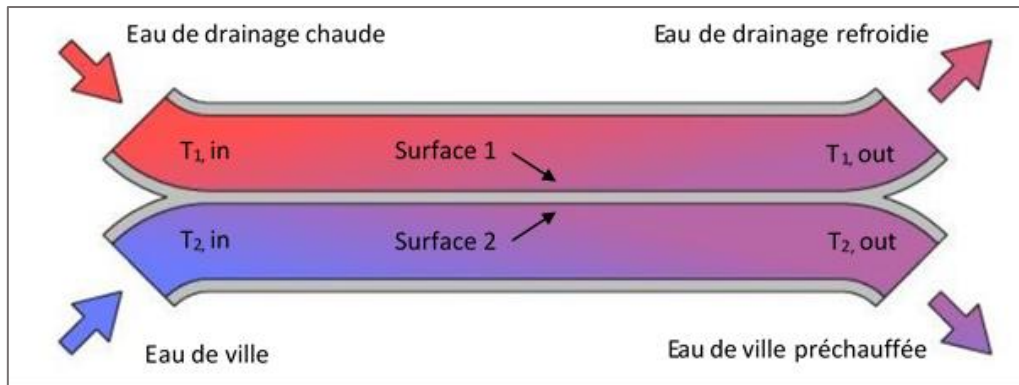


Figure 6: Échangeur de chaleur à co-courant par [52] modifié par l'auteur selon [63]

Pour comprendre la différence d'efficacité entre les échangeurs, l'équation du flux de chaleur doit être étudiée. Le flux de chaleur échangé est défini par l'Équation 1 en considérant que le coefficient global de transfert (h) est constant :

Équation 1: Flux thermique à travers la surface d'échange S_2 dans l'échangeur à écoulement parallèle [28], [63]

$$\varphi = h \cdot S_2 \cdot \Delta T_m$$

Où :

φ : est le flux de chaleur en [W]

h : est le coefficient global de transfert [$W/m^2.K$]

S_2 : est la surface d'échange côté froid [m^2]

ΔT_m : est la température moyenne logarithmique entre l'entrée et la sortie de l'échangeur [K]

L'équation du flux de chaleur est la même pour les échangeurs à co-courant et à contre-courant, mais, c'est au niveau de la température moyenne logarithmique (Équation 2) que la différence s'opère :

Équation 2: Moyenne logarithmique de la température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur [28], [63]

Échangeur à co-courant :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} = \frac{(T_{1,in} - T_{2,in}) - (T_{1,out} - T_{2,out})}{\ln \left(\frac{T_{1,in} - T_{2,in}}{T_{1,out} - T_{2,out}} \right)}$$

Échangeur à contre-courant :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} = \frac{(T_{1,in} - T_{2,out}) - (T_{1,out} - T_{2,in})}{\ln \left(\frac{T_{1,in} - T_{2,out}}{T_{1,out} - T_{2,in}} \right)}$$

Exemple :

Cas général d'une douche à 40°C et d'une eau de ville à 10°C avec un rendement de récupération de chaleur de 49%.

$T_{1,in} = 40^\circ C$, $T_{1,out} = 29^\circ C$

$T_{2,in} = 10^\circ C$, $T_{2,out} = 24^\circ C$

Échangeur à co-courant

$$\Delta T_m = \frac{(40 - 10) - (29 - 24)}{\ln \left(\frac{40 - 10}{29 - 24} \right)} = 13,95^\circ C$$

Échangeur à contre-courant

$$\Delta T_m = \frac{(40 - 24) - (29 - 10)}{\ln \left(\frac{40 - 24}{29 - 10} \right)} = 17,45^\circ C$$

Ainsi, dans les mêmes conditions, le flux de chaleur d'un échangeur à contre-courant sera toujours supérieur à un échangeur à co-courant. En effet, les échangeurs à contre-courant démontrent un ΔT_m constamment plus élevé, ce qui engendre dans l'Équation 1 un flux de chaleur plus important.

Dans l'échangeur à co-courant, la température de sortie de l'eau de ville (T_2, out) est toujours inférieure à la température de sortie des eaux de drainage (T_1, out). De fait, si $T_2, out = T_1, out$, l'échange de chaleur n'est plus réalisable [63].

ii. Échangeur à contre-courant

Les échangeurs à contre-courant, ou échangeurs méthodiques, comportent également des écoulements parallèles, mais, dans ce cas-ci, ils sont de sens opposés (Figure 7). Ces échangeurs sont omniprésents sur le marché des DWHR verticaux en raison de leur grande efficacité (Tableau 4).

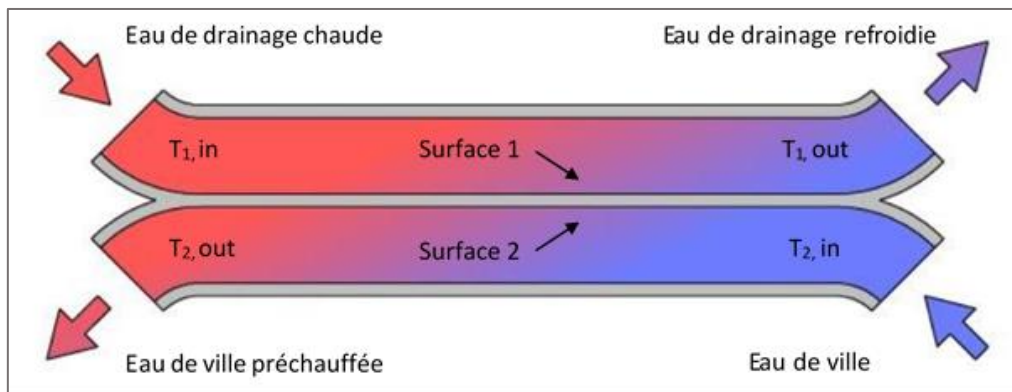


Figure 7: Échangeur à contre-courant par [52] modifié par l'auteur selon [63]

Cette technologie est utilisée depuis longtemps dans le secteur résidentiel au niveau de la ventilation ou bien même du chauffage, car l'air qui se réchauffe par convection circule dans le sens opposé à l'eau chaude [52]. La raison de son succès est vraisemblablement due à la récupération importante des calories du fluide chaud [32]. De fait, dans ce type d'échangeur, il est possible que la température de l'eau de ville préchauffée (T_2, out) soit supérieure à l'eau grise refroidie (T_1, out), mais elle ne sera jamais plus élevée que l'eau grise chaude [63].

iii. Échangeur à courant croisé

Dans ce dispositif, l'eau grise chaude va traverser perpendiculairement les tubes contenant l'eau de ville froide afin de les préchauffer (Figure 8). Ce type d'échangeur est, généralement, composé d'un fluide brassé, l'eau grise, et d'un fluide non brassé qui est l'eau de ville puisqu'elle s'écoule de manière concentrée dans plusieurs tubes [63].

L'efficacité de ces échangeurs est couramment plus faible que les échangeurs à contre-courant. De plus, la facilité d'encrassement de ces dispositifs affecte également leur efficacité. Ces échangeurs constituent la majeure partie des DWHR horizontaux (Tableau 4) présentés dans la section suivante.

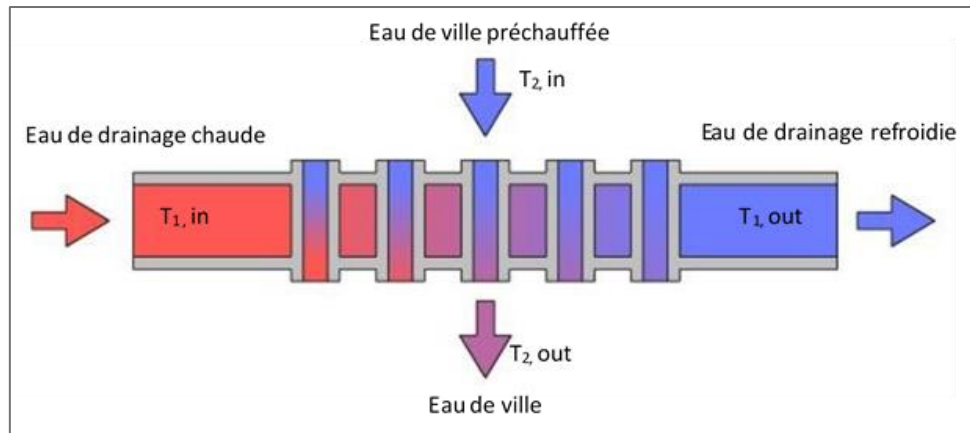


Figure 8: Échangeur à courants croisés par [52] modifié par l'auteur

2.1.3. Orientation des DWHR

Le dernier critère de différenciation des DWHR est leur orientation. En effet, deux types de récupérateurs de chaleur individuels se distinguent, tant au niveau de l'orientation que de l'efficacité, ce sont : les systèmes verticaux ou échangeurs tubulaires, directement dans la canalisation de la douche, et les systèmes horizontaux, dans la canalisation, dans le bac de douche ou bien dans l'évacuation [36].

i. DWHR à orientation verticale

L'orientation verticale est la plus présente sur le marché actuel et dans les publications scientifiques pour la simple raison qu'elle est la plus efficace. Cette orientation offre effectivement une surface d'échange thermique plus importante que l'orientation horizontale ce qui induit une meilleure efficacité.

Le principe des échangeurs tubulaires se nomme l'« effet du film tombant » et il s'explique par les notions de gravité et de tension superficielle de l'eau. Dans un DWHR vertical, les eaux de drainage tombent verticalement sous l'effet de la gravité. Comme illustré à la Figure 9, à débit normal, leur chute n'est pas turbulente, mais plutôt laminaire, puisque les eaux de drainage forment un film sur la paroi due à la tension superficielle de l'eau. Ainsi, étant donné que les eaux de drainage sont en contact permanent avec la paroi, la température de la canalisation s'accroît due à la chaleur dissipée de l'eau [16], [44], [45], [52], [64]. L'effet du film tombant maximise donc la surface de contact entre l'eau et la paroi, contrairement à l'écoulement dans un DWHR horizontal (Figure 9) [45]. C'est ce qui justifie la plus grande efficacité des DWHR verticaux.

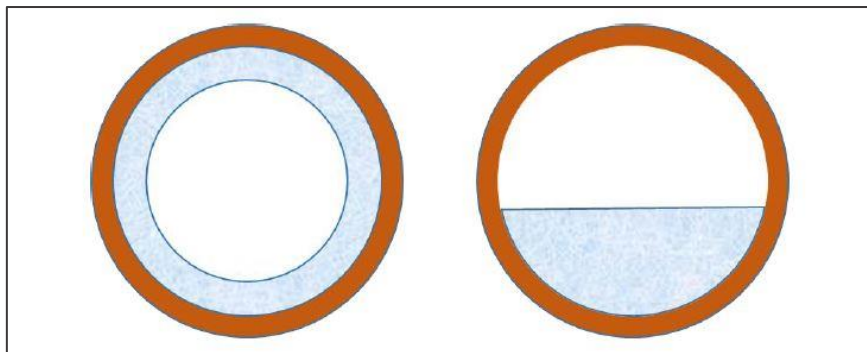


Figure 9: Comparaison de l'écoulement des eaux de drainage dans un DWHR vertical (à gauche) et horizontal (à droite) [45]

De manière générale, un débit important n'est pas conseillé pour les DWHR verticaux. En effet, un débit maximal de 15 l/min est généralement prescrit, car au-delà de cette valeur la majorité des eaux de drainage tombe au milieu de la canalisation sans effet de film tombant [16], [28]. C'est également ce qu'a démontré l'étude [44] qui conclut que l'efficacité des DWHR verticaux diminue avec l'augmentation du débit en raison de la rupture de l'effet du film tombant.

Un avantage des DWHR verticaux consiste à la grande durée de vie qu'ils présentent. La durée de vie mise en avant par les fabricants se situe généralement à 30 ans (voire 50 ans), ce qui correspond à la durée de vie du cuivre. Cela peut s'expliquer par l'absence de pièces mobiles, de pièces électroniques, de batteries... La maintenance est un autre atout des échangeurs tubulaires. En effet, ces systèmes exclusivement verticaux ont l'avantage de ne pas facilement s'encrasser puisque les dépôts sont quasiment inexistantes dû au passage, à fort débit, des eaux de drainage et à la verticalité du système. Mais, selon Monsieur Durou, président de la société *Ehtech* concevant des DWHR horizontaux, bien que l'encrassement soit moins important dans les échangeurs tubulaires, le refroidissement des eaux grasses induit aussi des dépôts. Cet argument légèrement partial met en avant la nécessité de l'utilisation d'un détergent dans le cas d'eau chaude sanitaire grasse comme les eaux grises lourdes.

Bien que les DWHR présentent une efficacité importante, leur mise en œuvre n'est toutefois pas aisée dans toutes les situations. En effet, ces systèmes sont bien adaptés aux canalisations gravitaires comme dans les immeubles collectifs [19]. Toutefois, ils ne sont pas applicables dans toutes les maisons unifamiliales en raison des spécificités techniques requises au niveau des canalisations. Ces systèmes sont effectivement pertinents uniquement pour des canalisations verticales assez grandes, c'est-à-dire supérieures à 1 mètre [16]. Il a été prouvé qu'un équilibre optimum peut être calculé entre la longueur de la canalisation et la performance de l'échangeur [16], [28]. De fait, un trop long tube permet des améliorations marginales tandis qu'un tube plus court à une meilleure efficacité par unité de longueur [28]. Ainsi, un calcul d'optimisation doit être effectué en prenant en considération la taille, l'efficacité et le prix du DWHR.

Une autre spécificité technique importante est la verticalité du système qui peut, si elle n'est pas respectée, provoquer la rupture de l'effet du film tombant. De fait, Manouchehri et al [40] ont démontré que l'inclinaison d'un DWHR vertical entraîne une perte d'efficacité importante puisque le transfert de chaleur est impacté négativement. Dans cette étude, les résultats exposent qu'une inclinaison de 2 degrés diminue l'efficacité de maximum 4%, ce qui est donc négligeable. Néanmoins, pour les angles supérieurs à 2 degrés, l'efficacité est clairement impactée. Étant donné la nature instable de l'effet du film tombant, il est difficile de prédire précisément l'impact sur l'efficacité pour un angle donné. Mais, à titre d'exemple, un angle de 15 degrés engendre une diminution de 20 à 40% de l'efficacité [40].

En ce qui concerne les différents DWHR verticaux présents sur le marché, deux dispositifs se différencient : les tubes concentriques et les tubes hélicoïdaux.

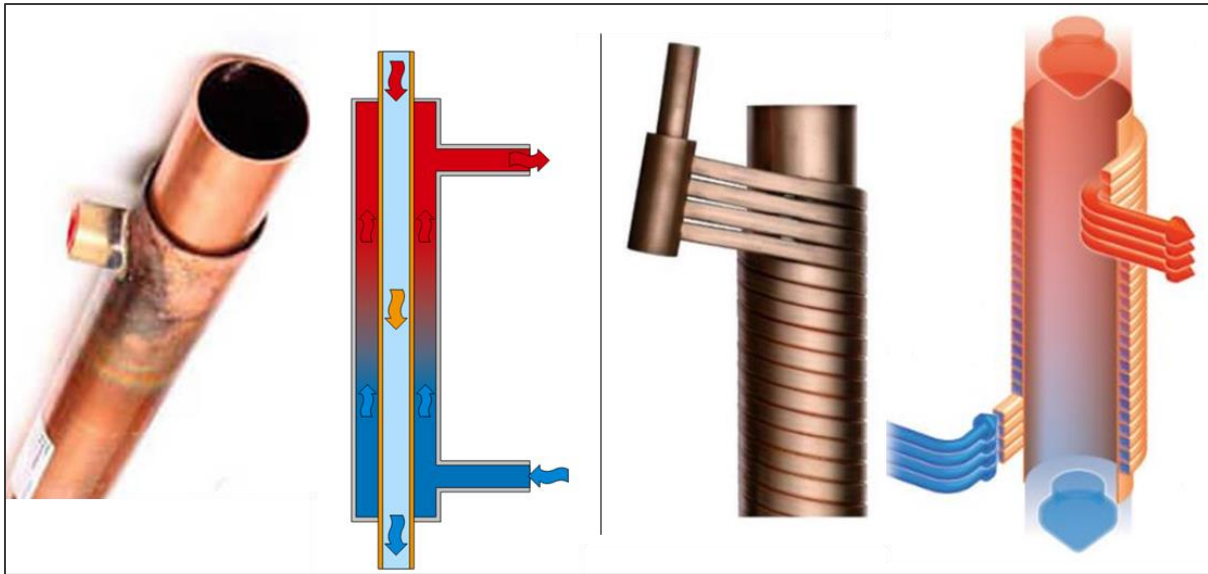


Figure 10: Illustration des deux types de DWHR verticaux : les tubes concentriques à gauche [21], [60] et les tubes hélicoïdaux à droite [52], [65]

- **Tubes concentriques**

Les tuyaux concentriques présentent la configuration la plus simple d'un échangeur de chaleur (Figure 10). Ils sont constitués d'un tuyau de faible diamètre et d'un autre, de plus grand diamètre, entourant le premier [36]. En raison de sa simplicité, la surface d'échange de chaleur n'est pas optimale ce qui engendre un rendement inférieur à 60% [16], [36]. Néanmoins, ce DWHR est un généralement constitué d'un échangeur à contre-courant.

Cette catégorie de DWHR verticaux est représentée par au moins 5 produits sur le marché européen (Tableau 4). À titre d'exemple le produit *Showersave* du fabricant *Q-blue b.v.*, illustré à la Figure 9, est un DWHR à tube concentrique dont l'efficacité varie entre 40 et 60% en fonction de la configuration et de la taille du système. Sur le marché européen des DWHR, les tubes concentriques sont majoritairement présents par rapport aux tubes hélicoïdaux.

- **Tubes hélicoïdaux ou échangeurs à film gravitationnel**

Les tubes hélicoïdaux ou échangeurs à film gravitationnel (« *Falling film DWHR* ») sont les systèmes les plus performants. Depuis 1980, il existe au moins une dizaine de brevets qui améliorent sans cesse l'efficacité de ces tubes hélicoïdaux [16]. En effet, d'après [16] par [24], la première génération des échangeurs à film gravitationnel est constituée de systèmes à un seul serpentin d'eau froide autour de la canalisation des eaux grises. Bien que l'eau froide soit injectée à contre-courant par rapport aux eaux grises, le serpentin unique entraîne beaucoup de pertes de pressions. Ensuite, pour la seconde génération, les fabricants ont donc remédié à ces pertes de pressions en multipliant le nombre de serpentins disposés en parallèle. Néanmoins, l'eau n'était pas injectée à contre-courant. Ainsi, la version actuelle regroupe les avantages au niveau du nombre de serpentins et de l'injection d'eau froide, cela constitue la 3ème génération [16], [24]. D'autres améliorations techniques ont permis la prévalence de ces systèmes, comme la diminution du diamètre de la spirale par rapport à la canalisation pour augmenter l'efficacité du DWHR. En outre, les tubes de la spirale ont une forme cubique c'est-à-dire que les côtés sont aplatis pour augmenter la surface d'échange avec la canalisation [16], [33], [36].

L'étude de Zaloum et al [28] en 2007 a comparé huit tubes hélicoïdaux de différentes générations. Le constat d'une meilleure efficacité pour la troisième génération est clair. En plus de cela, il a été constaté que plus les tubes hélicoïdaux sont proches de la canalisation, plus l'efficacité augmente, car l'air n'est pas un bon conducteur thermique. De même, un enroulement plus serré des tubes de la spirale permet un échange de chaleur plus important [28].

Le degré d'efficacité de ces tubes hélicoïdaux se situe entre 60 et 70%. Dans la base de données créée par l'auteur de ce travail, cinq DWHR à tubes hélicoïdaux ont été répertoriés. Cette technologie a été surtout développée au Canada dans des entreprises telles que *RenewABILITY*, *EcoInnovation*, *Watercycles Energy recovery inc.* ... À titre d'exemple le produit *Power-Pipe* de la firme *RenewABILITY* est illustré à la Figure 10.

ii. DWHR à orientation horizontale

Les DWHR à orientation horizontale sont encore peu développés actuellement en raison de leur efficacité moindre, de leur prix, de leur durée de vie moins importante et de leur besoin d'entretien important. Néanmoins, ces systèmes sont progressivement sujets à des publications scientifiques [22], [37]–[39]. De fait, l'intérêt pour ces dispositifs est grandissant puisque leur facilité d'installation permet leur mise en œuvre dans tous les cas de figure sans contrainte d'emplacement, contrairement aux DWHR verticaux. Cela est particulièrement intéressant dans le cas de logements situés au rez-de-chaussée, de bâtiments en rénovation, de bâtiments existants ou de bâtiments ne présentant pas de canalisations verticales assez longues [38]. Toutefois, à l'heure actuelle, le degré d'efficacité est généralement inférieur à 50% [16], [39]. Du point de vue technologique, ces systèmes sont généralement constitués d'un échangeur à courants-croisés.

La faible efficacité des DWHR horizontaux a été démontrée de nombreuses fois comme l'explique Kordana et al [22]. Cependant, les scientifiques tentent, par leurs expériences, d'améliorer cette efficacité. Par exemple, l'étude [38] a montré qu'il était possible d'obtenir une efficacité plus élevée en augmentant le nombre de boucles et la taille du DWHR. Néanmoins, dans ce cas certains problèmes s'opposent à la mise en œuvre de ces systèmes, à savoir le volume plus important du DWHR, l'encrassement plus présent, plus de pertes de pression... Un autre exemple, illustré par l'étude de Kordana et al [22], démontre que l'efficacité d'un DWHR horizontal peut être améliorée en ajoutant un déflecteur qui force la direction des eaux de drainage et augmente le temps de séjour de ces eaux dans le DWHR.

En plus d'une efficacité moindre, ces DWHR nécessitent généralement entretien important, car ils s'encrassent plus rapidement que les échangeurs tubulaires [38]. Ces interventions de maintenance constituent généralement un nettoyage manuel régulier, mais elles peuvent être limitées par la présence d'un système de nettoyage automatique.

De manière générale, ces systèmes sont plus complexes que les systèmes tubulaires, ce qui induit un prix unitaire plus élevé. En outre, la durée de vie peut également être impactée par cette complexité.

Plusieurs systèmes de DWHR horizontaux se distinguent, à savoir le DWHR horizontal intégré dans le caniveau, le DWHR horizontal sous la douche et le DWHR horizontal intégré au bac de douche.

- **DWHR horizontal intégré dans le caniveau**

Le premier système de DWHR est une intégration complète de l'échangeur dans le caniveau de douche (Figure 11). Ce système s'insère parfaitement dans les douches italiennes dont la popularité ne cesse de s'accroître ou, par exemple, dans les vestiaires sportifs.

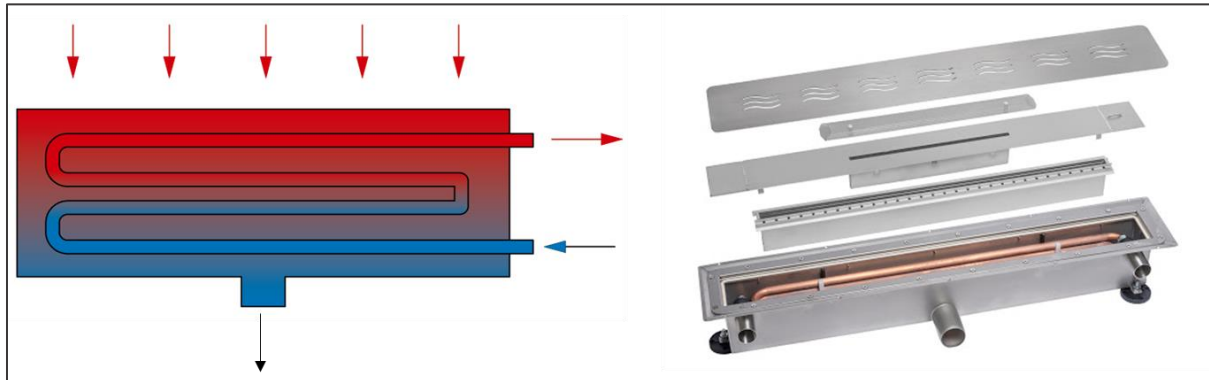


Figure 11: DWHR horizontal intégré dans le caniveau : schéma (à gauche) [21] et ReQup-Floor (à droite) [66]

Concernant les aspects techniques, l'efficacité de ces systèmes varie entre 30 à 50% en fonction du débit, de la configuration et du produit. La maintenance est annoncée par les fabricants comme aisée puisque tout le système est démontable. Il suffit donc de le nettoyer à la main à l'aide d'une brosse et d'un détergent à base de savon tout en évitant les composés abrasifs, chlorés et acides [66]. Cette simplicité d'entretien et de composition permet aux DWHR horizontaux intégrés dans les caniveaux de présenter une durée de vie équivalente à celle d'une douche, selon certains fabricants, ou bien celle du cuivre (30 ans) selon d'autres.

Quant au prix, il est assez élevé étant donné la taille et l'esthétique nécessaire au dispositif. De fait, ces DWHR sont directement à la vue des occupants, ce qui oblige les fabricants à rendre le système esthétique. Par conséquent, les prix fluctuent entre 1.000 à 1.700 euros. À titre d'exemple, le produit *ReQup-Floor* de *Q-Blue* s'intègre parfaitement dans les douches italiennes (Figure 11).

- **DWHR horizontal sous la douche**

Les DWHR horizontaux directement en dessous de la douche sont très faciles à installer et ne requièrent généralement pas l'aide d'un professionnel. Ces systèmes conviennent à tout type de douches et de bâtiments. À titre d'exemple, les fabricants *KP1* et *EHTech* se sont associés pour créer un DWHR horizontal qui fait partie intégrante du plancher des vides ventilés, ce système se nomme « *Milliwatt Ôbox* » [67]. Ainsi, les possibilités de ce type de DWHR sont importantes, l'installation peut également se faire sous une baignoire. Néanmoins, lorsque ces systèmes sont intégrés dans la dalle ou dans une chape, il est très difficile d'effectuer un entretien voire un remplacement.

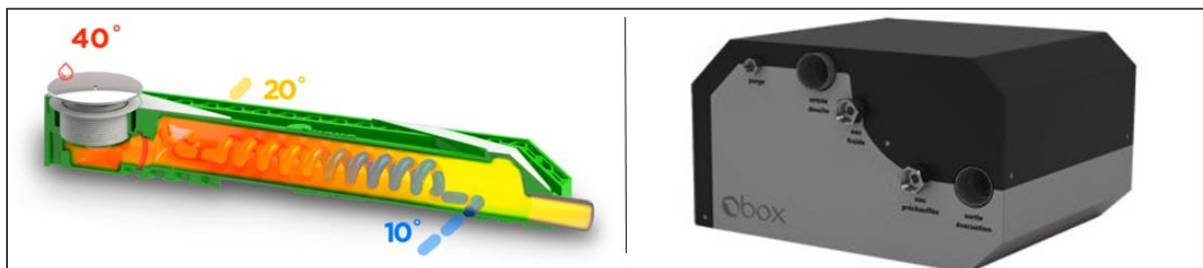


Figure 12: DWHR horizontal sous la douche : système Zypho [68] (à gauche) et système Obox [69] (à droite)

Concernant l'entretien, certains produits comme *Zypho* (Figure 12) de l'entreprise portugaise *Eidt s.a.*, nécessitent un drain de douche ayant une capacité de filtration assez élevée et un siphon afin d'éviter l'obstruction du DWHR en aval [68]. Ces systèmes requièrent peu d'entretien si ce n'est un nettoyage périodique à l'aide d'une brosse et d'un détergent savonneux [68]. En revanche, pour d'autres systèmes comme le produit *Obox*, de l'entreprise française *EHTech*, les filtres en amont sont facultatifs. De fait, ce système est équipé d'un système de nettoyage automatique hebdomadaire qui enlève les dépôts amenés par les eaux grises [59].

Bien que ce système de nettoyage automatique permette d'éviter l'intervention humaine, la durée de vie du DWHR en est impactée. En effet, selon Monsieur Durou, président de la société *EHTech*, le système *Obox* pourrait durer plus de 20 ans. Cependant, le nettoyage automatique nécessite une batterie dont la durée de vie s'élève à 15 ans, réduisant *de facto* la durée de vie du système.

L'efficacité des DWHR horizontaux sous la douche semble très variable en fonction du produit. Le système *Obox* présente des rendements très élevés à savoir de 50 à 70% en fonction de la configuration [59]. Tandis que les autres systèmes ont des rendements plus faibles qui se situent entre 25 et 50%.

En ce qui concerne le prix, les produits assez complexes tels que *Eko* et *Obox* affichent un prix d'environ 850 euros. Quant aux produits plus simples comme le dispositif *Zypho*, le prix est relativement bas à savoir entre 200 et 400 euros en fonction de la gamme (Tableau 4).

- **DWHR horizontal intégré dans le bac de douche**

L'efficacité des DWHR horizontaux intégrés dans le bac de douche (Figure 13) varie entre 45 et 50% selon les produits pour un débit de 9,2 l/min. Au niveau de l'entretien, les consignes prescrites sont les mêmes que pour la première catégorie de DWHR horizontaux, à savoir un récurage périodique au niveau du drain. De plus, l'utilisation d'un détergent savonneux permet d'éliminer les dépôts de particules organiques, de cheveux...



Figure 13: DWHR horizontal intégré dans le bac de douche: *EcoShower Tray* de l'entreprise *Wagner Solar* [70]

Étant donné l'aspect esthétique et l'intégration du système dans le bac de douche, le prix de cette technologie est assez élevé. À titre d'exemple, le produit *Recoh-Tray* de l'entreprise *Hei-Tech* présente un coût de 2.300 euros, dont 1.000 euros correspondent au bac de douche (Figure 13).

2.1.4. Conclusion des DWHR

Le Tableau 4 présente un résumé de la base de données des fabricants confectionnée pour l'équipe d'*Energiepark*. Ce tableau permet de visualiser les différentes technologies existantes et leur prix. Néanmoins, la base de données, plus complète, présente davantage d'informations techniques spécifiques à chaque système.

Tableau 4: Liste des fabricants en fonction des différentes technologies pour les DWHR

Orientation	Technologie	Écoulement	Fabricant	Produit	Prix
Verticale	Tube hélicoïdal	Contre-courant	<i>Eidt s.a</i>	<i>Zypho pipe</i>	400-1.000 €
			<i>Power-pipe</i>	<i>Power-pipe</i>	
			<i>Norellagg</i>	<i>Power-pipe</i>	
			<i>RenewABILITY</i>	<i>Power-pipe</i>	
			<i>EcolInnovation</i>	<i>ThermoDrain</i>	
Verticale	Tube concentrique	Contre-courant	<i>Wagner Solar GmbH</i>	<i>ECOShower pipe</i>	500-900 €
			<i>Bries Energietechnik</i>	<i>Douchpijp</i>	
			<i>Q-blue b.v.</i>	<i>Recoh-Vert</i>	
			<i>Q-blue b.v.</i>	<i>Showersave</i>	
			<i>Recoup</i>	<i>Recoup pipe</i>	
Horizontale	Échangeur dans le caniveau de douche	Courants croisés	<i>Wagner Solar GmbH</i>	<i>EcoShower drain</i>	1.000 -1.700 €
			<i>Hei-Tech</i>	<i>Recoh-Drain</i>	
			<i>Q-blue b.v.</i>	<i>ReQup-Floor</i>	
			<i>Bries Energietechnik</i>	<i>Douchegoot</i>	
			<i>Recoup</i>	<i>Recoup drain</i>	
			<i>Joulia Switzerland</i>	<i>Joulia-Inline</i>	
Horizontale	Échangeur sous la douche	Contre-courant	<i>Wiselement</i>	<i>Ekô</i>	800-900 €
			<i>EHTech</i>	<i>Obox</i>	
			<i>Sakal</i>	<i>Nela</i>	
			<i>Eidt s.a</i>	<i>Zypho (30 ou 40)</i>	
Horizontale	Échangeur intégré dans le bac de douche	Courants croisés	<i>Wagner Solar GmbH</i>	<i>EcoShower tray</i>	1.000 - 2.700 €
			<i>Hei-Tech</i>	<i>Recoh-Tray</i>	
			<i>Bries Energietechnik</i>	<i>Douchebak</i>	
			<i>Recoup</i>	<i>Recoup tray</i>	

Les systèmes individuels de récupération de chaleur sont intéressants, car ils n'utilisent pas d'énergie (sauf certains pour le nettoyage automatique), et leur durée de vie est généralement élevée, à savoir de 15 à 30 ans, étant donné l'absence de pièces mobiles [62]. Néanmoins, contrairement aux systèmes combinés avec une récupération active de la chaleur, les DWHR ne couvrent pas totalement les besoins en chaleur pour l'eau chaude sanitaire, car les calories extraites par l'échangeur de chaleur passif ne sont pas suffisantes. De fait, le taux de couverture de l'eau chaude sanitaire est d'environ 10 à 30% [61]. Le degré d'efficacité de ces systèmes varie principalement en fonction du type de configuration (mitigeur, chauffe-eau ou mixte), du type d'écoulement (co-courant, contre-courant ou courants croisés), de l'orientation du DWHR (horizontale ou verticale) et du débit, à savoir un débit plus faible sera plus intéressant [33], [35], [44]–[46].

Selon les fabricants, l'argument principal en faveur des DWHR qui résulte de leurs spécificités, est le temps de retour sur investissement très faible en fonction des économies de chauffage réalisées et du coût (entre 200 et 1.500 euros par éléments) [27], [33], [38], [45], [62]. Mais, comme cela va être démontré dans la partie pratique (page 45), ce résultat dépend fortement du vecteur énergétique utilisé pour préparer l'ECS [27], [31], [32], [35], [45], [46].

La sélection d'un système DWHR particulier se fera sur base de la prise en considération des spécificités techniques du bâtiment. De manière générale, le choix s'oriente plus facilement vers les DWHR verticaux étant donné le prix assez faible pour une efficacité élevée. Cependant, en présence d'un bâtiment existant, la mise en œuvre des DWHR verticaux est plus difficile puisqu'ils nécessitent une descente d'eau parfaitement verticale d'au moins un mètre [16], [40]. Si ces conditions ne sont pas respectées, l'efficacité du système peut considérablement diminuer. Par exemple, si la chute d'eau du bâtiment est assez grande, mais qu'elle dévie de 15° par rapport à la verticale l'efficacité est fortement impactée à savoir de 20 à 40%. Dans ce cas-ci, un DWHR horizontal devra être privilégié. C'est également le cas dans les maisons dont la douche est au rez-de-chaussée et ne disposant pas de caves. Cependant, si la maison n'est pas encore construite, il y a une plus grande liberté de choix.

Dans ce travail, les DWHR ont été présentés exclusivement pour les eaux de drainage d'une maison unifamiliale. Toutefois, il existe des systèmes similaires plus adaptés aux débits importants des résidences tels que la gamme *Recoh-Multivert* de l'entreprise *Hei-Tech* qui consiste à plusieurs DWHR verticaux installés en parallèle. De plus, certains des dispositifs présentés peuvent être utilisés pour la totalité des eaux grises (lourdes et légères). Toutefois, les coûts et la maintenance sont généralement plus élevés par rapport au gain énergétique [59].

2.2. Systèmes combinés de récupération de la chaleur des eaux grises

Les systèmes combinés de récupération de chaleur à partir des eaux grises ont pour objectif de répondre à la quasi-totalité des besoins en eau chaude sanitaire d'un bâtiment. Pour ce faire, ces systèmes se composent de trois éléments importants (Figure 14) :

- **La cuve de collecte des eaux grises**

Cette cuve collecte toutes les eaux grises, qu'elles soient lourdes ou légères. Pour ce faire, un réseau séparatif des eaux grises et eaux noires doit impérativement être réalisé [21], [71]. Bien que les eaux grises soient collectées, l'écoulement des eaux usées reste similaire à une situation normale. De fait, les eaux grises n'entrent pas dans le système de récupération de chaleur, mais un échangeur est simplement installé dans cette cuve [64].

- **La pompe à chaleur**

La pompe à chaleur permet de récupérer les calories contenues dans les eaux grises de manière active. C'est le fluide caloporteur canalisé dans une boucle fermée qui récupère les calories des eaux grises grâce à un échangeur de chaleur en inox, c'est-à-dire à forte inertie [64]. Les eaux grises sont donc considérées comme la source froide de la pompe à chaleur eau/eau. À l'aide d'électricité, la pompe à chaleur va fournir de l'énergie côté condenseur, donc au niveau du ballon de stockage de l'eau chaude sanitaire. En période estivale, la réversibilité de certaines pompes à chaleur permet un refroidissement du bâtiment [64].

- **Le ballon de stockage**

Dans le ballon de stockage, l'eau chaude sanitaire va être préchauffée ou totalement chauffée par la pompe à chaleur. En effet, les systèmes combinés de récupération de la chaleur des eaux grises permettent de chauffer la quasi-totalité de l'eau chaude sanitaire en fonction du dispositif et de la consommation. Certains systèmes peuvent même être intégrés au chauffage. Toutefois, un appoint devra être nécessaire si l'ensemble des besoins n'est pas couvert.

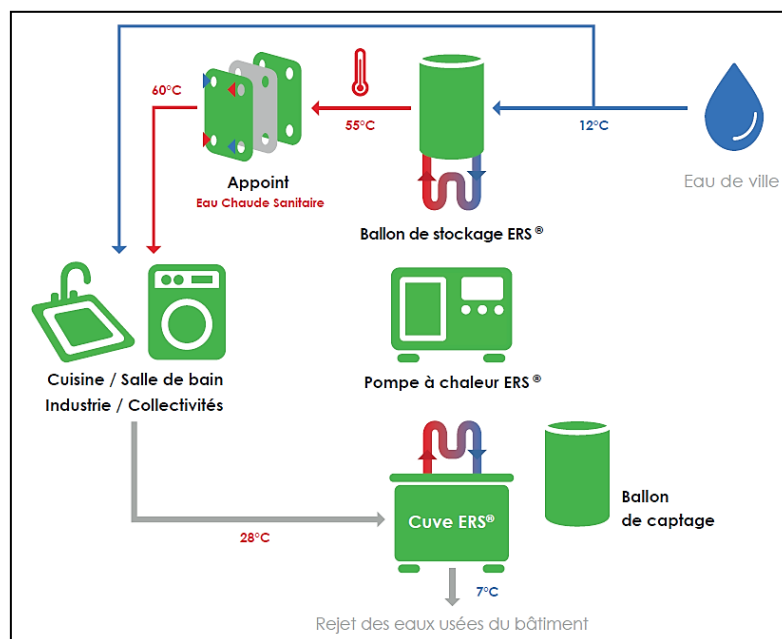


Figure 14: Système de récupération de chaleur combiné des eaux grises - ERS de Biofluides Environnement [72]

En ce qui concerne les applications possibles, étant donné le volume important requis d'eaux grises, ces systèmes sont conçus pour des hôtels, des piscines, des résidences, des logements collectifs... [72]

Au regard du Tableau 5, peu de technologies sont présentes sur le marché pour les systèmes combinés de récupération de la chaleur des eaux grises. De fait, la complexité et le coût de ces systèmes repoussent les investisseurs dont la réduction de la consommation d'énergie primaire n'est pas leur premier intérêt. Par exemple, certaines technologies ont directement été abandonnées au stade de prototype comme le produit *Pontos Heatcycle* de la firme belge *Hansgrohe*. D'autres n'ont simplement pas pu prévaloir sur le marché, c'est le cas des produits *Thermocycle WRG* de l'entreprise autrichienne *Forstner*.

Certaines technologies ont tout de même fleuri dans un bon nombre de projets. C'est par exemple le cas du *Energy Recovery System* de la société française *Biofluides Environnement* (Figure 14) qui a installé 50 dispositifs depuis 2006, dont trois au Grand-Duché de Luxembourg [72]. Ce système permet de couvrir jusqu'à 100% des besoins en ECS tout en réduisant de 40 à 75% de la consommation d'énergie primaire [61], [72]. Il présente beaucoup d'avantages, notamment sa facilité d'installation (système « prêt à raccorder ») et sa maintenance à distance et automatique. Cependant, l'emprise au sol de ce système peut poser des problèmes dans les petits bâtiments puisqu'il requiert un local technique de 15 à 20 m² [71]. Cette technologie nécessite une demande en ECS élevée, c'est pourquoi elle est adaptée aux immeubles résidentiels, aux centres sportifs, aux piscines... Par exemple, l'ERS compact, qui est le plus petit dispositif disponible, a été conçu pour des immeubles de 10 à 40 logements [71]. En effet, l'étude [29] a démontré à l'aide de leur prototype que les économies d'énergies pouvaient alors être élevées, à savoir plus de 50%. Cependant, les auteurs ont mis en avant le nombre de personnes et la consommation d'ECS comme étant les facteurs essentiels à cette technologie [29].

Les autres dispositifs, comme les systèmes *PAC Facteur 7'* de *Solaronics chauffage* et *Aquacond 44* de *Menerga*, fonctionnent similairement au système ERS. Il est tout de même important de souligner que dans ce type de technologie, les eaux grises ont une température plus faible que pour les DWHR (entre 25 et 28°C). C'est pourquoi il est nécessaire de fournir de l'énergie électrique par l'utilisation d'une pompe à chaleur.

Enfin, au niveau du prix, ces technologies peuvent répondre à une grande variabilité de projets, ce qui engendre beaucoup de spécificités techniques propres à ceux-ci. Ainsi, aucun prix unitaire n'est disponible et fiable [61].

Tableau 5: Liste des fabricants pour les systèmes combinés sur les eaux grises

Technologie	Fabricant	Produit	Prix
Échangeur + Pompe à chaleur	<i>Biofluides Environnement</i>	<i>Energy Recycling System Compact</i>	/
	<i>Solaronics Chauffage</i>	<i>PAC Facteur 7'</i>	
	<i>Menerga</i>	<i>Aquacond 44</i>	
	<i>ETT-HVAC</i>	<i>Aquacool</i>	

2.3. Systèmes combinés de récupération de la chaleur des eaux usées

En ce qui concerne les systèmes combinés à partir des eaux usées, la température plus faible que pour les eaux grises (entre 14 et 18°C) n'empêche pas d'être tout de même intéressante. Bien que l'installation de ce type de système dans une maison individuelle n'est pas rentable [17], il présente des avantages en cas de débits plus importants et constants. En effet, à l'échelle d'un quartier, d'une école, d'un hall sportif, d'une industrie..., la valorisation calorifique des eaux usées est pertinente quant à sa rentabilité énergétique qui peut s'élever à 40% [16]. Toutefois, les coûts de telles technologies sont encore importants. Par ailleurs, outre le débit et la température, d'autres paramètres importants entrent en ligne de compte pour définir le potentiel énergétique des eaux usées, à savoir leur qualité, l'existence de conduites d'égouts, mais également les besoins thermiques des utilisateurs [36].

Selon la simulation de Durrenmatt et Wanner dans le logiciel *Tempest* [49], les facteurs sensibles sont : la conductivité thermique du sol, la température des eaux usées, la distance entre la canalisation de l'égout et le sol non perturbé ou à l'état naturel. De plus, pour que ces systèmes soient correctement mis en œuvre, Durrenmatt et Wanner préconisent d'analyser des conditions spécifiques comme « *les propriétés du réseau d'égouts, les variations diurnes et saisonnières du rejet et de la température des eaux usées, les restrictions légales imposées sur la température des eaux usées en aval, ainsi que la demande et l'offre d'énergie disponible pour le chauffage ou le refroidissement* » [49].

Les variations saisonnières des eaux usées ont fait l'objet de plusieurs études [36], [51]. L'étude italienne [51] a montré que l'oscillation des températures des eaux usées est moins marquée que celle de l'air, ce qui augmente l'intérêt de cette technologie notamment dans les climats tempérés. En été, la température moyenne des eaux usées varie de 18 à 20°C et de 10 à 12°C en hiver [36].

Ces systèmes se composent d'un échangeur de chaleur qui peut être à plaque ou tubulaire associé à une pompe à chaleur. L'emplacement de l'échangeur permet de distinguer deux groupes : les échangeurs de chaleur dans les conduits d'égouttage et les puits humides ou échangeurs de chaleur modulaires [73].

- **Les échangeurs de chaleur dans les conduits d'égouttage**

Ces systèmes représentent la technologie conventionnelle de récupération de la chaleur des eaux usées, c'est pourquoi elle est présente en nombre sur le marché (Tableau 6) [49]. Les échangeurs peuvent se distinguer en 3 catégories : les échangeurs à plaque, à tube interne et à tube externe.

Le système suisse *Rabtherm* (Figure 15), dont l'échangeur est à tube interne, est le plus développé et le plus présent sur le marché [17]. Néanmoins, le système *PKS-Thermpipe* de l'entreprise *FRANK der Vosprung* utilise une technologie plus sophistiquée puisque l'échangeur de chaleur à tube externe, présent sous forme de tuyaux de polyéthylène entourant les conduites d'égouts, bénéficie non seulement des calories provenant des eaux usées, mais également du sol [48].

Contrairement aux deux exemples ci-dessus, certains échangeurs de chaleur exclusivement à plaque ou à tube interne, comme la technologie *TubeWin* de la société *HUBER* [6], [48], peuvent simplement se poser dans les conduites d'égouttage existantes afin de limiter les travaux. Les faiblesses de ce système résultent essentiellement des caractéristiques des conduites d'égouts existantes, c'est-à-dire de la courbe des conduites, de la longueur de la ligne droite..., et du débit des eaux usées [48], [73]. De fait, si l'échangeur n'est pas entièrement immergé, son efficacité peut fortement décroître [49]. En outre, la formation d'un biofilm ou bien le dépôt de sédiments peut considérablement diminuer les performances de l'échangeur [17], [49].

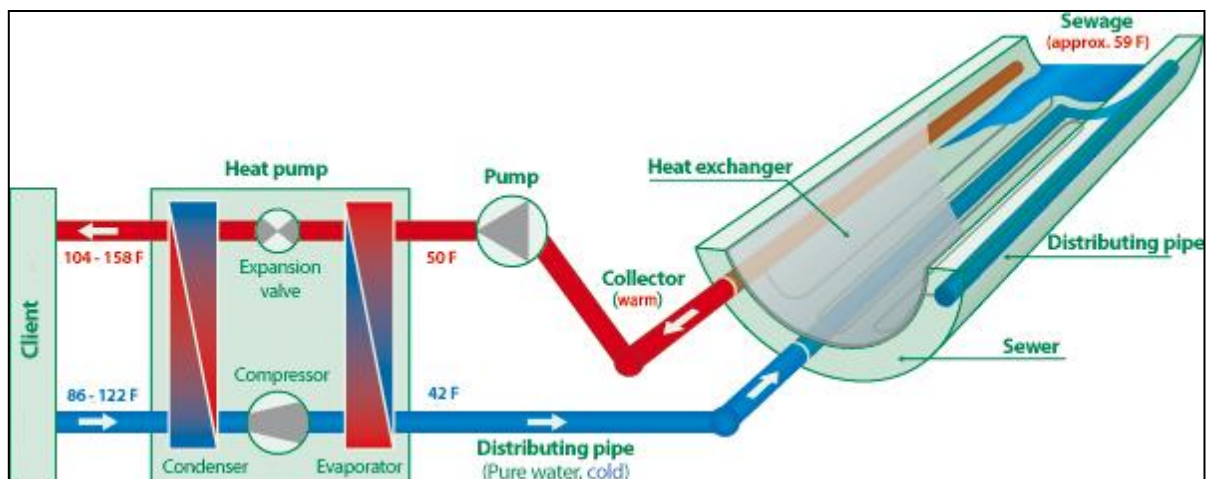


Figure 15: Système de récupération de chaleur combiné à partir des eaux usées – Rabtherm Energy Systems [74]

De manière générale, une attention particulière doit être portée à l'emplacement de l'échangeur de chaleur dans l'égout pour avoir un débit et une température optimale. De plus, étant donné les pertes thermiques, l'emplacement doit être pertinent par rapport aux bâtiments demandeurs de chaleur [17].

Cette technologie constitue un système durable et fiable dans le temps. Sa grande capacité de stockage de la chaleur permet d'obtenir 1 à 2 kW par mètre de canalisation [36].

- **Les échangeurs de chaleur modulaires**

Dans le cas des échangeurs de chaleur modulaires, également appelés les puits humides, les eaux usées sont pompées de l'égout vers l'échangeur de chaleur présent, soit dans un puits humide adjacent ou soit dans un local technique externe au réseau d'égouttage [48], [49]. Ces systèmes sont notamment représentés par les technologies *ThermWin* de la société *Huber* (Figure 16) et *SHARC* de *Sharc Energy System*.

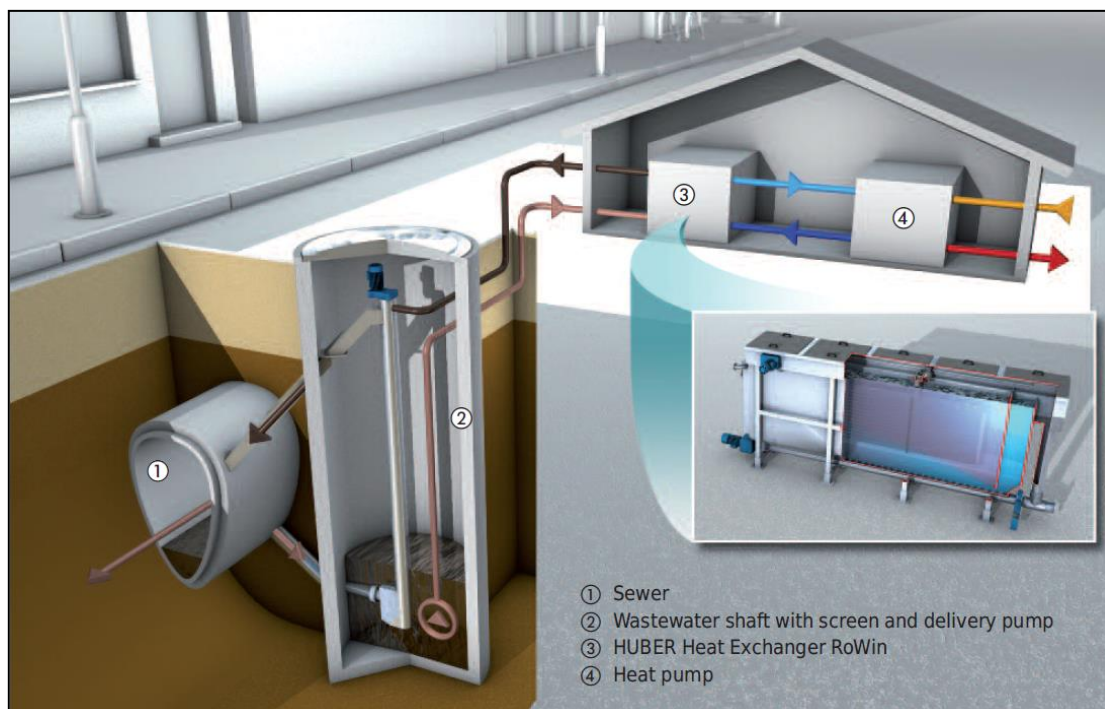


Figure 16: Système combiné de récupération de la chaleur à partir des eaux usées - ThermWin de HUBER SE [75]

Cette technologie est plus complexe que la précédente, mais permet de limiter l'encrassement de l'échangeur de chaleur. Toutefois, la filtration et le pompage des eaux usées engendrent des coûts supplémentaires assez conséquents [49]. La mise en œuvre de ce système est limitée par certains facteurs comme le débit, la température et l'occupation du sol [48].

En ce qui concerne le coût de ces technologies, selon Mazhar et al [16], les échangeurs modulaires ont un coût d'environ 850 à 1.900 euros par kilowattheure. Tandis que le prix unitaire des échangeurs dans les canalisations équivaut à plus de 5.600 euros [16].

Spriet et Hendrick [50] ont évalué la pertinence de ces systèmes au sein de la ville de Bruxelles. Selon leur étude, 35% de la ville serait éligible à une telle technologie, mais, étant donné le prix élevé, le chauffage au gaz reste plus avantageux. La conclusion qu'ils ont dégagée est : « *le chauffage par ces types de systèmes est plus coûteux que les systèmes de chaudières à gaz, mais avec une consommation accrue, la compétitivité de ces systèmes s'améliore* » [50]. Dürrenmat et Wanner [49] mettent également en exergue les facteurs d'influences sur la compétitivité économique de ces systèmes comme le prix de l'énergie (gaz, électricité...), la distance entre le système de récupération et les besoins en chaleur et, la disponibilité d'autres sources d'énergie alternatives [16], [49].

Généralement, ces systèmes présentent des économies monétaires et énergétiques importantes. Néanmoins, la législation et les spécificités techniques concernant les stations d'épuration empêchent le développement de cette technologie dans tous les égouts [49]. En effet, si la récupération de chaleur entraîne une perte thermique trop importante des eaux usées, c'est-à-dire en dessous de 10°C [16], [36], [49], le processus de nitrification dans les stations d'épuration est très largement impacté [16]. Selon Mazhar et al. [16] : « *exploiter la chaleur au-delà de cette limite irait à l'encontre du concept de réduction de l'empreinte carbone, car davantage d'énergie supplémentaire serait requise aux dernières étapes du processus de traitement* [des eaux usées dans les stations d'épuration] ». C'est pourquoi l'étude [49] tente de quantifier les effets de la récupération de chaleur sur la température des eaux usées à l'aide d'une simulation sur le logiciel *Tempest*.

Tableau 6: Liste des fabricants en fonction des technologies pour les systèmes combinés sur les eaux usées

Technologie	Fabricant	Produit	Prix [16]
Échangeurs modulaires	Huber	ThermWin	850 -1.900 € par kW
	Sharc energy systems	Sharc	
Échangeurs dans la canalisation	Huber	TubeWin	> 5.600 €
	Rabtherm	Rabtherm	
	Frank der Vorsprung	PKS-Thermpipe	
	Kasag	Kasag sewer	
	Brandenburger	BB Heatliner	
	Socea, Heijmans, Frank	Hydrea-thermpipe	

3. Contraintes aux systèmes de récupération de chaleur

Cette section est destinée à mettre en avant les principaux facteurs influençant négativement l'utilisation des systèmes de récupération de la chaleur des eaux grises et des eaux usées.

- **Investissement important**

Bien que la rentabilité des systèmes de récupération soit démontrée par de nombreuses études, l'investissement initial peut rester très important. C'est pour cette raison que peu d'investisseurs présentent de l'intérêt à ces technologies coûteuses [30].

- **Risques d'encrassement et d'impuretés**

Comme représenté dans le Tableau 3, les eaux usées peuvent être composées de nombreux agents biologiques, de détergents... Ces composants représentent des inconvénients en termes de maintenance et de performance. En effet, les risques de ces agents biologiques et détergents sont l'encrassement et la formation d'un film sur la surface de l'échange thermique [16], [19]. Ainsi, il y aura une plus grande inertie thermique et une résistance au transfert de chaleur ce qui a pour conséquence une baisse de la performance [17], [19]. Cela nécessitera donc une maintenance plus importante qui n'est généralement pas rentable à petite échelle [16]. Cette contrainte se retrouve davantage lors de l'exploitation des eaux grises lourdes et des eaux usées étant donné leur charge importante.

- **Variation de débit**

La dépendance importante de l'efficacité des systèmes de récupération de chaleur au débit peut présenter un obstacle. Étant donné qu'il est difficile de prédire les rejets d'eaux grises, déterminer précisément l'efficacité d'un système de récupération de chaleur n'est pas possible [30]. De plus, un débit trop faible de l'eau de distribution peut entraîner un débit équivalent au niveau des eaux grises. Ces pertes de pression peuvent être gérables dans le récupérateur de chaleur jusqu'à une certaine limite. Pour augmenter ce débit, il faudrait utiliser des pompes, ce qui va à l'encontre de l'efficacité énergétique. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lors d'un débit important, l'extraction de chaleur doit se faire rapidement à l'aide d'un échangeur de chaleur rapide [16].

- **Intermittence de l'offre et la demande**

Les risques d'incompatibilités entre l'offre et la demande engendrent la nécessité d'un stockage qu'il soit passif ou actif. Généralement, les débits d'eaux grises sont importants durant une courte période. Tandis que la demande est variable puisqu'elle dépend de l'utilisateur [16].

- **Espace requis pour les systèmes**

Cette contrainte concerne davantage les applications résidentielles qu'industrielles, où les espaces disponibles à l'intérieur ne sont pas aussi limités. Dans le cas de dispositifs présents dans les égouts, l'espace est également restreint [16]. Les DWHR représentent des systèmes assez compacts, mais les systèmes de récupération de la chaleur des eaux grises demandent une surface au sol importante. Par exemple, le système *ERS* de *Biofluides Environnement* nécessite entre 15 à 25 m² [72].

- **Séparation des eaux usées**

Actuellement, la plupart des bâtiments ne sont pas équipés d'un système de séparation des eaux grises et des eaux noires [16], [36]. La récupération de chaleur sur les eaux grises n'est par conséquent soit pas possible soit limitée à de très petits segments de canalisation [16].

4. Synthèse de la partie théorique

Selon Mazhar et al [16], les 3 systèmes sont matures, mais en raison des obstacles identifiés dans la section précédente, ils sont peut-être présents dans la vie de tous les jours. Selon les auteurs, deux éléments vont permettre la hausse de la popularité de ces systèmes à savoir, les nouvelles technologies de stockage de la chaleur et la fluctuation importante des prix de l'énergie.

En ce qui concerne le choix de la technologie pour le projet du lotissement résidentiel, il est évident que les 16 maisons unifamiliales du projet ne fournissent pas assez d'eaux usées pour permettre la récupération de chaleur dans les égouts. Par contre, la récupération de chaleur combinée sur les eaux grises peut être envisageable. Cette possibilité a été étudiée de près en collaboration avec l'équipe d'*Energiepark* et des fabricants. Par exemple, le système *ERS* semble très performant et le fait que cette technologie ait déjà été installée au Grand-Duché de Luxembourg est attrayant. Toutefois, le volume quotidien d'eau grise et les pertes thermiques dues à la configuration du projet (la collecte des eaux grises sur une grande distance) ne permettent pas l'implémentation d'un tel système.

En effet, selon Monsieur Sobocinsky, ancien commercial de *Biofluides Environnement*, le système *ERS* prend tout son sens dans les immeubles à partir de 10 à 40 logements équipés d'une canalisation centrale gravitaire qui récupère toutes les eaux grises. De fait, dans ce cas, les eaux grises collectées auront une température d'environ 28 à 30°C. Néanmoins, le projet du lotissement résidentiel ne présente pas les spécificités d'un tel immeuble. L'acheminement des eaux grises du projet, de chaque maison jusqu'au local technique, sera réalisé par une canalisation enterrée qui constitue un lieu de déperditions thermiques et de consommation énergétique (pour les pompes) trop important. Selon Monsieur Sobocinsky, la température d'arrivée des eaux grises à la cuve collectrice serait d'environ 13°C, ce qui n'est pas assez élevé pour cette technologie. De plus, l'utilisation de pompe pour amener ces eaux grises ne serait pas pertinente dans le contexte de l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Cet avis est également partagé par Monsieur Desbonnets, de l'entreprise *Solaronics Chauffage*, qui estime que le lotissement résidentiel est trop petit pour le produit *PAC Facteur 7'*. De fait, selon lui, la taille du projet présente des besoins journaliers en ECS trop faibles et un profil de puisage atypique. Pour que le système *PAC Facteur 7'* fonctionne correctement, il faudrait, selon lui, un minimum de 50 logements ou 4.000 litres de besoins journaliers en ECS.

Ainsi, les systèmes individuels de récupération de la chaleur à partir des eaux grises (DWHR) restent la dernière possibilité. Le choix doit donc porter sur la configuration, le type d'échangeur et l'orientation. Étant donné que le projet est toujours en phase de conception, une grande liberté est offerte quant au choix à effectuer. Évidemment, ce choix va être effectué de manière à être optimum en prenant en considération l'efficacité, le prix, l'entretien, la place requise...

Du point de vue de la configuration, c'est la configuration mixte qui a été retenue puisqu'elle présente la plus grande efficacité. Concernant le type d'échangeur, le choix va incontestablement s'orienter vers un échangeur de chaleur à contre-courant en raison de son meilleur rendement. Enfin, à propos de l'orientation, la disposition verticale est idéale. Cependant, le choix de l'emplacement de la douche est attribué aux occupants des maisons. En outre, les maisons ne présenteront pas de caves. Ainsi, si la douche est à l'étage, l'orientation verticale sera privilégiée. Sinon, un dispositif horizontal sera utilisé.

Ce choix sera réalisé, par le biais de simulations énergétiques, économiques et environnementales, dans la section suivante à savoir, la partie pratique.

IV. PARTIE PRATIQUE

Dans le contexte de la recherche d'une autonomie et d'une efficacité énergétique maximale du lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg, la partie pratique de ce mémoire se concentre essentiellement sur la récupération de la chaleur fatale des eaux grises de la douche, c'est-à-dire sur les DWHR. De fait, la partie pratique a pour finalité la détermination des économies d'énergie, de la rentabilité économique, de la pertinence environnementale de l'implémentation d'un DWHR pour différents préparateurs d'ECS et scénarios. La comparaison de l'association d'un DWHR avec divers préparateurs d'ECS a pour objectif de se rapporter aux maisons ne présentant pas de pompes à chaleur. Cela permettra également d'identifier le potentiel des DWHR à plus grande échelle.

Pour cela, l'analyse des articles scientifiques identifiés précédemment permettra la constitution d'un état de l'art selon les 3 aspects de l'étude : économique, énergétique et environnemental. Ensuite, des hypothèses devront être formulées sur base de différentes données afin de simuler les effets d'un DWHR. Ces données, provenant surtout de statistiques nationales et d'articles scientifiques, correspondent à la consommation énergétique liée aux douches pour un ménage luxembourgeois, aux coûts des technologies, aux coûts de l'énergie... Dans ce travail, la nécessité d'établir des hypothèses découle de l'absence d'informations et de mesures concernant la consommation réelle de l'ECS des habitants du lotissement résidentiel. En effet, étant donné que le projet est à la phase de conception, aucune mesure ne peut définir la consommation énergétique des ménages pour la douche. Pour cela, plusieurs scénarios seront établis dans la section correspondant aux hypothèses.

Une fois les hypothèses définies, les flux énergétiques seront simulés afin d'identifier les gains d'énergie liés à l'installation d'un DWHR pour un chauffe-eau électrique, un chauffe-eau au gaz et une pompe à chaleur. Ces gains énergétiques seront aussi présentés sous forme de gains monétaires par la détermination de la valeur actuelle nette (VAN), du taux de rentabilité interne (TRI) et du temps de retour sur investissement (TR) du projet pour toute la durée de vie du DWHR. Les performances environnementales seront également étudiées afin de déterminer la quantité d'énergie primaire et les émissions de CO₂ évitée grâce à l'implémentation d'un DWHR.

Enfin, une étude de la sensibilité de certains paramètres permettra de mettre en évidence les facteurs limitants de la simulation du DWHR selon les 3 dimensions de l'étude.

1. Analyse bibliographique

Cette section est consacrée à une analyse approfondie de certaines recherches scientifiques identifiées dans la partie théorique concernant la pertinence des DWHR selon les 3 dimensions de l'étude. En effet, l'analyse bibliographique se compose d'articles de la revue de la littérature spécifiques aux simulations de la partie pratique, c'est-à-dire : définir des hypothèses de simulation plausibles, étudier la rentabilité économique d'un DWHR et, analyser la pertinence énergétique et environnementale d'un DWHR. Dans le Tableau 7, les recommandations et les observations des articles scientifiques seront mises en lumière pour comparer les simulations de ce travail.

Du **point de vue énergétique**, les études se basent principalement sur les systèmes verticaux qui, à ce jour, présentent l'efficacité de transfert de chaleur la plus élevée, et donc de meilleures économies d'énergie. Selon Mazur et Slyš [34], l'utilisation d'un DWHR vertical réduit la demande énergétique de 23 à 31%. Pour les simulations de cette partie, l'étude menée par Manouchehri et le professeur Collins [47] démontre que les pertes par convection, évaporation et conduction, à travers la paroi de

l'échangeur de chaleur, n'affectent que faiblement l'efficacité énergétique du DWHR. Une autre étude des mêmes protagonistes [44] a démontré que plus le débit des eaux de drainage augmente, plus les performances du DWHR diminuent. C'est-à-dire qu'un débit plus fort entraîne des économies énergétiques plus faibles. De fait, toutes les études présentent que le débit du pommeau de douche et la durée de la douche influencent indubitablement les économies d'énergie. Par ailleurs, les études [33], [76] ont également démontré l'influence de la configuration du DWHR à savoir une liaison unique au mitigeur, une liaison unique au ballon de stockage d'ECS ou une liaison mixte. Comme présenté dans la partie théorique, la liaison mixte démontre les performances les plus élevées.

Les **aspects économiques** de l'implémentation d'un DWHR ont été très étudiés à travers le monde puisque la garantie de bons résultats financiers est nécessaire pour convaincre certains investisseurs [25], [27], [46], [31]–[35], [37], [38], [45]. La convergence des résultats est très marquée pour beaucoup d'aspects. En effet, Zaloum et al. [27] ont identifié depuis 2007 que le temps de retour sur investissement d'un DWHR était plus court avec un chauffe-eau électrique (5 ans) qu'avec un chauffe-eau au gaz (9 ans). Cette conclusion a été partagée par plusieurs études [31]–[33], [37], [45], [46].

Kordana et Slyš [33] ont évalué le TR d'un DHWR avec un chauffe-eau électrique selon différentes hypothèses des données de consommation. Ces valeurs oscillent entre 2,5 et 10 ans. Par contre, dans le cas d'un chauffe-eau au gaz, le TR peut être 4,7 fois plus élevé [45]. Certes, les résultats des études sont fortement dépendants des hypothèses émises. Toutefois, ces conclusions semblent toutes converger vers la même idée : le vecteur énergétique utilisé pour la préparation de l'ECS impacte nettement le temps de retour sur investissement d'un DWHR à l'avantage du chauffe-eau électrique. Selon les chercheurs, la raison à cela se trouve au niveau du prix de l'énergie : le gaz présente généralement un prix beaucoup plus faible [45], [46]. Par conséquent, étant donné le prix plus élevé pour l'électricité, les économies d'énergie électrique vont être traduites par une économie monétaire plus importante que pour le gaz. À titre d'exemple, les études [34], [37] démontrent des économies monétaires entre 2.500 et 3.000 euros après 20 ans d'utilisation d'un DHWR en cas de chauffe-eau électrique.

Outre le vecteur énergétique du préparateur d'ECS, le taux d'occupation, et donc le volume d'eau grise généré, est un facteur essentiel à la rentabilité économique d'un DWHR [31], [33], [45]. Garcia [45] conclut que pour qu'un DWHR associé à un chauffe-eau au gaz atteigne la même rentabilité économique qu'avec le chauffe-eau électrique, il faudrait 14 personnes au lieu de 3 dans le ménage.

Bien que cela soit souvent sous-entendu par le terme « *économie d'énergie* », l'**aspect environnemental** est très peu abordé dans les articles scientifiques. Toutefois, l'étude américaine [37] a réalisé une simulation de Monte-Carlo selon les données moyennes de consommation d'ECS d'un ménage américain. Dans cette simulation, les émissions annuellement évitées de CO₂ s'élèvent à 0,3 tonne pour le chauffe-eau au gaz et 1,5 tonne pour le chauffe-eau électrique. Quant à l'étude [25], Mazur indique que la quantité d'émissions de CO₂ évitée oscille de 50 à 112 kgCO₂/habitant/an.

Ce travail apporte donc une analyse scientifique complémentaire aux études susmentionnées puisque la rentabilité économique et, les performances énergétiques et environnementales seront étudiées pour différents préparateurs d'ECS à savoir, une pompe à chaleur de type eau-eau, un chauffe-eau au gaz et un chauffe-eau électrique. L'objectif est d'évaluer la pertinence de la solution retenue pour le projet du lotissement résidentiel (pompe à chaleur eau-eau) par rapport aux autres situations. Néanmoins, au-delà de cette simulation, la comparaison entre les différents vecteurs énergétiques utilisés apporte des résultats complémentaires par rapport aux études précédentes.

Tableau 7: Analyse bibliographique des études scientifiques concernant les dimensions énergétiques, économiques et environnementales de l'installation d'un DWHR

Référence	Nom des auteurs	Date	Système	Aspect	Objectif	Résultats
[32]	Sabina Kordana et Daniel Słyś	2017	DWHR vertical	Économique	Étudier la rentabilité d'un DWHR (étude de cas en Pologne).	La rentabilité économique est plus élevée pour le préparateur d'ECS électrique par rapport au gaz.
[33]	Sabina Kordana et Daniel Słyś	2014	DWHR vertical	Économique	Analyser financièrement l'implémentation d'un DWHR dans un bâtiment résidentiel.	Le TR se situe entre 2,5 et 10 ans avec un chauffe-eau électrique.
[37]	Scott Bartkowiak, Ryan Fisk, Andrew Funk, Jonathan Hair et Steven J. Skerlos	2010	DWHR horizontal	Économique, environnemental, énergétique	Calculer la quantité d'énergie et les émissions de CO ₂ évitées grâce à un DWHR horizontal équipé d'un échangeur à plaques.	L'étude montre que pour un chauffe-eau électrique les économies s'élèvent à 170 \$/an et 1,5 tCO ₂ /an évitée, et pour un chauffe-eau au gaz, les économies sont de 70 \$/an et 0,3 tCO ₂ /an.
[31]	Aleksandra Mazur	2018	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer l'efficacité financière d'un DWHR dans un hôtel.	La rentabilité économique augmente avec le taux d'occupation. Le préparateur d'ECS électrique permet une meilleure rentabilité.
[45]	Jose Daniel Garcia	2016	DWHR vertical	Économique, énergétique	Analyser le potentiel des DWHR pour un seul ménage et pour des logements multiples.	La rentabilité pour un chauffe-eau électrique est entre 5 et 6 ans pour un ménage de 3-4 personnes. Pour le chauffe-eau au gaz, cette valeur est 4,7 fois plus élevée.
[46]	Chris Frankowski	2013	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer les performances d'un DWHR au niveau économique et énergétique.	La rentabilité est plus élevée avec un chauffe-eau électrique. Le chauffe-eau au gaz aurait la même rentabilité s'il y avait 14 personnes dans la maison.
[38]	Aonghus McNabola et Killian Shields	2013	DWHR horizontal	Économique, énergétique	Créer et analyser un système DWHR horizontal pour les douches du secteur résidentiel.	L'étude montre que le DWHR horizontal a des résultats satisfaisants et que le TR avec un chauffe-eau électrique pour un ménage de 3 personnes est de 5 ans.
[34]	Aleksandra Mazur et Daniel Słyś	2018	DWHR vertical	Économique, énergétique	Étudier la possibilité technique et économique de l'installation d'un DWHR selon différentes configurations.	L'utilisation d'un DWHR dans une maison unifamiliale réduit la demande énergétique annuelle pour l'ECS de 23 à 31 %. La rentabilité peut s'élever à 2.500 € après 20ans.
[35]	Sabina Kordana	2018	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer le potentiel économique d'un système DWHR vertical.	La rentabilité d'un tel investissement dépend des paramètres de fonctionnement de l'installation et du type de vecteur énergétique.
[27]	Charles Zaloum, John Gusdorf et Anil Parekh	2007	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer expérimentalement les performances d'un DWHR au Centre canadien des technologies résidentielles.	Le TR est de 9 ans avec un chauffe-eau au gaz sur 30ans et de 5 ans pour le chauffe-eau électrique.
[47]	Ramin Manouchehri et Michael R. Collins	2016	DWHR vertical	Énergétique	Étudier à l'aide d'essais expérimentaux l'influence des températures d'entrées dans un DWHR sur son efficacité.	Les pertes par évaporation, conduction et convection par la paroi n'entraînent pas de grands changements d'efficacité.
[44]	Ivan Beentjes, Ramin Manouchehri et Michael R. Collins	2014	DWHR vertical	Énergétique	Examiner expérimentalement « l'effet du mouillage du côté du drain » sur l'efficacité d'un DWHR à orientation verticale.	Selon l'étude, l'augmentation du débit entraîne une diminution de l'efficacité du DWHR.
[25]	Aleksandra Mazur	2018	DWHR vertical	Énergétique, économique, environnemental	Étudier l'impact d'un DWHR vertical sur les coûts d'exploitation, les émissions de CO ₂ et sur la consommation d'énergie.	Les économies monétaires sont de 20 à 30% grâce au DWHR. Les émissions de CO ₂ sont réduites de 50 à 112kgCO ₂ /an/habitant.

2. Matériel et méthode

Cette section consiste à la définition des hypothèses des simulations énergétiques, économiques et environnementales de l'utilisation d'un DWHR. Cette étude sera effectuée pour différents préparateurs d'ECS à savoir, un chauffe-eau au gaz, électrique et une pompe à chaleur eau-eau.

La première étape consistera à définir les données techniques de l'étude par la détermination d'hypothèses. Par exemple, la taille d'un ménage luxembourgeois moyen vivant dans une maison unifamiliale devra être définie. Les caractéristiques de la douche devront être établies suivant les hypothèses des études scientifiques. Puis, concernant le DWHR et les préparateurs d'eau chaude sanitaire, les données techniques seront déterminées.

Ensuite, dans le but de réaliser les simulations économiques, le coût des vecteurs énergétiques, à savoir l'électricité et le gaz vont être identifiés. De plus, le pourcentage de l'évolution de ces coûts va être déterminé. Le taux d'actualisation va également être fixé pour pouvoir déterminer la valeur actuelle nette sur toute la durée de vie DWHR.

Enfin, la pertinence environnementale sera étudiée en fonction de la consommation d'énergie primaire et des émissions de CO₂. Ainsi, les facteurs de conversion de l'énergie primaire et le facteur d'émission de CO₂ seront définis pour chaque vecteur énergétique.

2.1. Données techniques et énergétiques

2.1.1. *Caractéristiques du ménage type*

i. Nombre d'habitants

En ce qui concerne la définition du ménage type, les publications du STATEC ont été largement consultées. Dans une publication du *Recensement de la population* publiée par le STATEC et l'*Université du Luxembourg*, Peltier et al [77] ont affirmé que la taille d'un ménage moyen luxembourgeois, en 2011, était, en moyenne, de 2,41 personne. De plus, selon leur étude, 45% de la population luxembourgeoise est constituée de ménages de 3 à 4 personnes, cette statistique excluant la part de la population vivant dans des ménages collectifs tels que les maisons de retraite, les prisons... Ainsi, pour les maisons unifamiliales, le nombre moyen d'habitants est de 3 [77].

Étant donné que le projet du lotissement résidentiel présente des maisons unifamiliales à 2 étages d'une surface variant de 168 à 254 m² (Tableau 24, page I), la probabilité que la composition des ménages habitant les maisons soit de 3 à 4 personnes est élevée. La taille du ménage de référence pour l'étude de rentabilité sera donc fixée à **3 habitants**.

ii. *Durée de la douche*

Dans le contexte de l'étude de rentabilité, trois scénarios vont être étudiés sur le comportement des ménages, à savoir :

- Le ménage au comportement économe
- Le ménage au comportement moyen
- Le ménage au comportement dissipateur

Le comportement vis-à-vis de la consommation d'ECS est un facteur déterminant dans cette étude étant donné la grande influence que cela peut avoir, la durée de la douche variant fortement en fonction des attitudes du ménage.

La Figure 17 montre la courbe des fréquences de la durée de la douche selon les observations de l'étude de Gerin [21]. Cette courbe indique que 50% des douches durent entre 4 et 8 min. En effet, le deuxième quartile se situe à 6,9 min par douche.

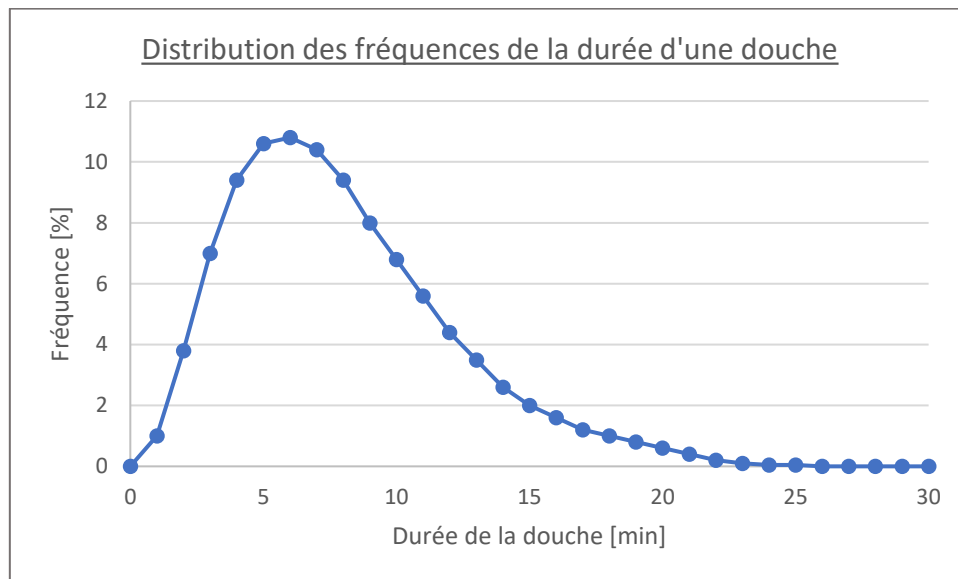


Figure 17: Distribution des fréquences de la douche selon [21]

Généralement, une douche classique a une durée d'environ 8 min [16], [32], [76] tandis qu'une douche économique sera de 5 à 6 min. Pour le comportement du ménage dissipateur, une durée de 10 minutes sera estimée, bien que certaines douches puissent durer plus de 15 min [19]. Le Tableau 8 représente les différentes valeurs utilisées dans la littérature scientifique pour simuler la durée d'une douche. Pour beaucoup d'études, plusieurs scénarios sont identifiés afin d'étudier la sensibilité de ce paramètre.

Tableau 8: Valeurs de la durée d'une douche étudiées dans la littérature scientifique

Durée de la douche [min/hab/jour]	3,5	4	5	6	7	8	8,5	9	12
Références bibliographiques	[32]	[25], [34]	[76]	[32], [34]	[25]	[32], [76]	[32], [45]	[25], [34]	[76]

Ainsi, dans ce travail, les ménages **économe**, **classique** et **dissipateur** seront représentés respectivement par une durée de douche de **6**, **8** et **10** minutes.

En ce qui concerne la fréquence de lavage, ce travail considère qu'une personne se lave tous les jours à l'aide de la douche. Contrairement à certaines études, comme l'étude [78] présentée par [16], qui déterminent qu'une personne se lave 0,7 fois par jour.

2.1.1. Caractéristiques de la douche

Les caractéristiques de la douche, soit le débit et les différentes températures, sont établies dans cette subdivision. Comme il est difficile de définir un scénario moyen pour le débit et les différentes températures de douche, plusieurs possibilités seront étudiées sur base des données de la littérature scientifique.

i. Débit de la douche

Le débit de la douche est un facteur capital qui dépend essentiellement du type de pommeau de douche et de l'ancienneté du système. Par exemple, Zaloum et al. [28] ont identifié différents débits selon les installations : un faible écoulement (6,5 l/min), un écoulement moyen (9 l/min), une vieille installation (15 l/min) et un écoulement fort (18 l/min). De nos jours, la tendance est aux pommeaux de douche qui imitent l'écoulement de la pluie, ce qui nécessite un débit élevé de 15 à 23 l/min [19].

Le Tableau 9 montre les différentes valeurs de débit étudiées dans les publications scientifiques. Ces valeurs correspondent soit à divers scénarios ou soit aux exigences des normes d'évaluation des performances d'un DWHR. En effet, d'une part, certains scénarios comme dans l'étude [19] définissent un débit faible (6 l/min), un débit moyen (8 l/min) et un débit élevé (12 l/min). D'autre part, certaines études se réfèrent aux exigences des normes d'évaluation des performances d'un DWHR. Par exemple, la norme « *B55.1-15 Méthode d'essai pour mesurer l'efficacité et la perte de pression des récupérateurs de chaleur des eaux de drainage* » du *Canadian Standards Association* impose une évaluation pour 6 débits de douche à savoir 5,5 ; 7 ; 9 ; 10 ; 12 et 14 l/min [47].

Tableau 9: Valeurs des débits d'une douche étudiés dans la littérature scientifique

Débit d'une douche [l/min]	5	6	6,5	7	8	9	9,5	10	12
Références bibliographiques	[33]	[32]	[28]	[33], [76]	[32], [45]	[25], [33], [34]	[31], [38], [46]	[46]	[16], [19]

En ce qui concerne les fabricants européens, la majorité d'entre eux fournissent les valeurs de performances pour différents débits soit, 5,8 ; 9,2 et 12,5 l/min. Ces débits résultent principalement des certifications de l'entreprise *KIWA* basées sur la norme *NEN 7120*.

Étant donné que les performances des DWHR sont disponibles en fonction de ces débits, l'étude de rentabilité de ce travail sera basée sur ces valeurs. En outre, les données de débit seront calquées sur les scénarios identifiés précédemment.

En effet, le ménage au comportement **économe** est représenté par une durée de la douche de **6 minutes** et d'un débit de **5,8 l/min**, ce qui induit **35 litres** d'eau par douche.

Le ménage **moyen** présente une durée de la douche de **8 minutes** et un débit de **9,2 l/min**. Le volume d'eau utilisé pour la douche est donc d'environ **74 litres**, ce qui représente correctement une douche moyenne [32], [45].

Quant au ménage **dissipateur**, la durée de la douche est de **10 minutes** et le débit de **12,5 l/min**. Ce comportement implique une forte utilisation de l'eau, à savoir **125 litres** par douche.

ii. Température de l'eau de drainage

La température de l'eau de drainage dépend évidemment du confort exigé par chacun. L'eau chaude sanitaire chauffée à 55°C par le préparateur circule jusque dans le mitigeur de la douche pour être mélangée à une quantité d'eau de ville selon l'envie de l'utilisateur. Cette eau mixée peut avoir différentes températures suivant les références scientifiques (Tableau 10).

Les normes semblent être de bons moyens de fixer des valeurs de référence qui font déjà l'objet d'un consensus. Ainsi, la norme néerlandaise *NEN 7120* sur la performance énergétique des bâtiments a fixé la température des eaux de drainage à 40°C et de l'eau de ville à 10°C [21], [47] pour les conditions

de test des performances du DWHR. Par ailleurs, la norme canadienne « B55.1-15 », a également défini la température des eaux de drainage à 40°C, mais la différence se situe au niveau de l'eau de ville qui est de 12°C. En effet, selon cette norme, la différence entre les deux températures doit être de 28°C [38], [47]. Dans ce travail, la valeur de **40°C** sera retenue, mais il est intéressant de comparer les résultats avec 38°C puisque cela correspond à 28°C supérieurs à la température théorique de l'eau de ville.

Tableau 10: Valeurs de la température moyenne des eaux de drainage dans la littérature scientifique

Température des eaux de drainage	36 °C	38 °C	39 °C	40 °C	42 °C
Références bibliographiques	[46]	[19], [35]	[25], [31]	[19], [34], [47]	[19], [33]

iii. Température de l'eau de ville

En ce qui concerne la température de l'eau de ville, les valeurs habituellement utilisées dans la littérature scientifique varient de 8 [25] à 16 °C [62]. Ces valeurs présentent un écart assez important bien que la plupart des articles utilisent 10 ou 12°C.

Pour déterminer la température moyenne de l'eau de ville au Grand-Duché de Luxembourg, une simulation *TRNSYS* a été effectuée en utilisant le fichier *Meteonorm* de la ville de Trèves en Allemagne. En effet, bien que les données proviennent d'un autre pays, elles sont très représentatives puisque seulement 70 km sépare la ville de Trèves au lieu du lotissement résidentiel. Néanmoins, le fichier *Meteonorm* accessible pour *TRNSYS* date de 2004, ce qui peut présenter un problème de pertinence quant à l'ancienneté des données.

La variation de la température de l'eau de ville durant une année a été simulée par le biais du logiciel *TRNSYS* (Figure 18). Pour ce faire, la sortie « *main water stream* » du type 15-6 a été utilisée dans *TRNSYS*.

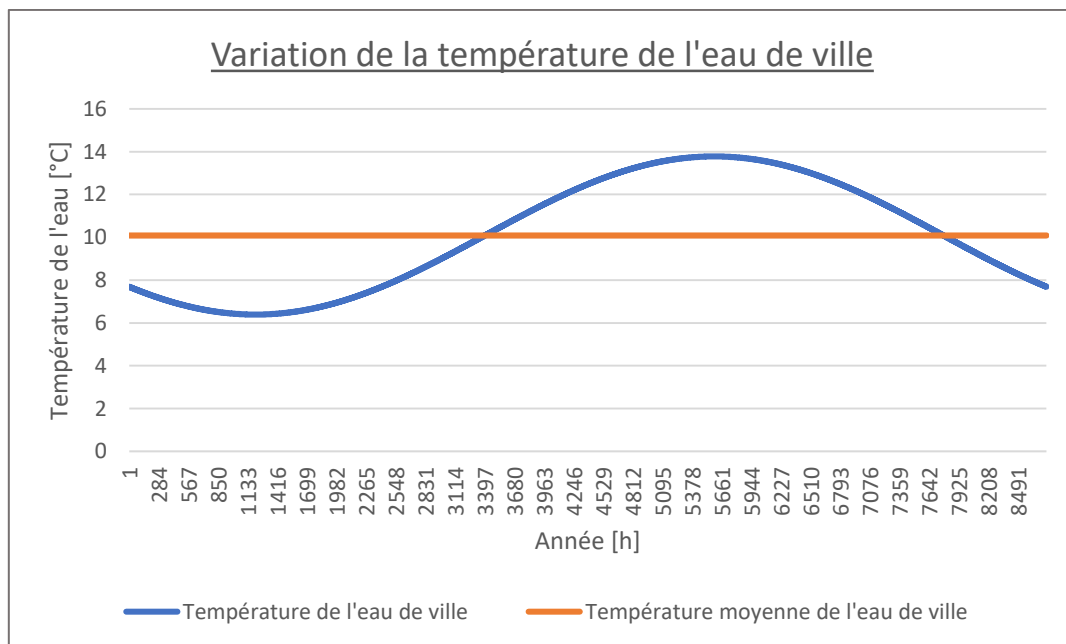


Figure 18: Résultats de la simulation *TRNSYS* pour définir la température moyenne de l'eau de ville

Ainsi, la température moyenne de l'eau de ville obtenue à travers la simulation est de 10,08°C et l'écart-type est de 2,61. Dans cette étude, la valeur de **10°C** pour l'eau de la ville est donc retenue.

iv. Autre facteur

Certains auteurs prennent en compte un coefficient représentant les pertes de l'eau chaude par évaporation et à travers la cabine qui dépend notamment du type de douche comme cela a été identifié par Gerin [21]. Le pourcentage de pertes équivaut généralement à 5% du volume de l'eau, le coefficient (α) s'élève donc à 95% [31], [34].

2.1.2. Caractéristiques de la technologie sélectionnée

Les spécificités techniques du projet n'étant pas définitives, un modèle particulier de DWHR a dû être sélectionné à titre indicatif afin de rendre plus concrète cette partie pratique et d'accroître la pertinence des simulations. Pour rappel, les valeurs de performances utilisées dans ce travail ne découlent pas de mesures expérimentales effectuées par l'auteur, mais elles correspondent aux données annoncées par les fabricants. Ces données sont considérées comme fiables puisqu'elles ont été certifiées par un organisme tel que le KIWA. De plus, les simulations de ce travail sont statiques, car le temps de réchauffage du DWHR dû à l'inertie thermique des matériaux n'est pas considéré.

En ce qui concerne la sélection du produit le plus adapté, deux dispositifs sont étudiés puisqu'ils présentent un rapport efficacité-prix important. Ces dispositifs correspondent à des DWHR à tubes concentriques dont l'orientation est verticale (page 30). L'écoulement de l'eau de ville est à contre-courant de l'écoulement de l'eau de drainage ce qui permet une efficacité énergétique importante. D'un côté, le produit *Zypho Pipe 65* de l'entreprise portugaise *Eidt s.a.* a été examiné. Ce produit démontre une grande efficacité et surtout un prix très attractif de 515 euros. D'un autre côté le produit *Recoh-Vert 21-V3* de la société néerlandaise *Q-Blue b.v* présente une plus grande efficacité pour un prix de 800 euros. En outre, les deux produits ont une durée de vie de **30ans**, cette valeur sera donc retenue pour la durée des simulations.

La courbe d'efficacité en fonction du débit pour chaque dispositif est représentée à la Figure 19. L'écart entre l'efficacité des produits *Zypho Pipe 65* et *Recoh-Vert 21-V3* s'accroît en fonction du débit. En effet, pour un débit de 5,8 l/min, la variation entre ces valeurs est seulement de 2,7%. Tandis, que la variation entre les efficacités à un débit de 12,5 est de 7%.

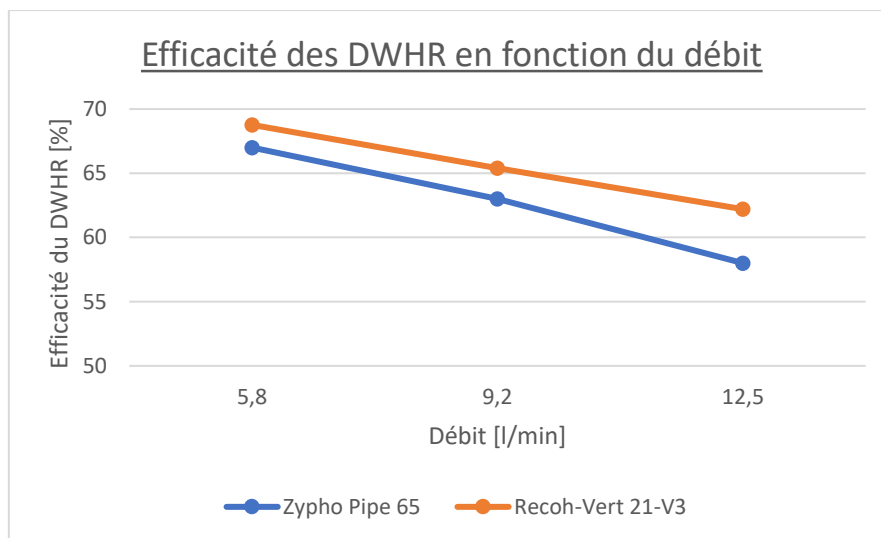


Figure 19: Efficacité des DWHR en fonction du débit

Bien que la comparaison de l'efficacité des produits soit légèrement en faveur du dispositif *Recoh-Vert 21-V3*, la comparaison de l'investissement initial est largement dominée par le produit *Zypho Pipe 65*.

De fait, la différence des coûts des dispositifs s'élève à 35%. Ainsi, afin d'identifier le produit le plus adapté au projet, des simulations vont être réalisées pour définir les économies d'énergie, la rentabilité économique et l'impact environnemental (page 60).

2.1.3. Caractéristiques des préparateurs d'eau chaude sanitaire

Bien que le projet du lotissement résidentiel utilise des pompes à chaleur eau-eau pour chauffer l'ECS, l'auteur de ce travail a voulu comparer l'intérêt des DWHR en fonction de différents préparateurs d'ECS utilisant divers vecteurs énergétiques.

De 2011 à 2017, le type de combustible utilisé par les ménages luxembourgeois a évolué en faveur du gaz naturel au détriment des combustibles liquides tels que le fioul. En effet, en 2017, le chauffage au gaz naturel représente 64,5% des ménages luxembourgeois tandis que cette valeur est de 27,3% pour les combustibles liquides [STATEC-Document interne]. Ensuite, le chauffage à l'électricité constitue une faible part des ménages luxembourgeois, mais cette valeur augmente chaque année, surement dû à l'essor des pompes à chaleur [79, STATEC-Document interne].

Bien que ces données se réfèrent au chauffage de manière générale, ce travail considère que le type de combustible utilisé pour les préparateurs d'ECS reste globalement le même. Ainsi, ce travail se base sur 3 types de préparateurs d'ECS à savoir, le chauffe-eau électrique, le chauffe-eau au gaz et la pompe à chaleur. Tous les préparateurs étudiés présenteront un ballon de stockage de l'eau chaude sanitaire de 200 litres, ce qui correspond à un ménage de 3 à 4 personnes.

Le projet présente la particularité d'utiliser des **pompes à chaleur de type eau-eau** reliées au réseau de chaleur à 35°C et au ballon d'eau chaude sanitaire. Le rôle exclusif de cette pompe à chaleur est de chauffer l'ECS à 55°C. Étant donné que le chauffage est à basse température (35°C), seule l'eau chaude sanitaire est chauffée par cette pompe à chaleur. C'est pourquoi la pompe à chaleur est dite « *booster* ». Pour le projet du lotissement résidentiel, l'auteur de ce travail a sélectionné la pompe à chaleur booster eau-eau WWB21 de l'entreprise *Alpha Innotec*. Le coefficient de performance de la pompe à chaleur s'élève à **4,4** avec une puissance de 2 kW, ce qui permet de chauffer, l'ECS de 20 à 70°C à partir d'une source de chaleur de 18 à 42°C. Le prix indicatif de cette pompe à chaleur est de 4.200 euros + 800 euros d'accessoires d'installation [80]. Afin de pouvoir comparer avec les autres préparateurs d'ECS, le coût d'un ballon de stockage de 200 l doit être inclus, cela correspond environ à 500 euros [81]. Le coût global de la pompe à chaleur revient donc à **5.600 euros**.

Ensuite, le **chauffe-eau électrique** consiste en un système à accumulation inclus dans un ballon d'ECS de 200 l. Le coût de ce dispositif varie de **660 à 1.200 euros** [81], [82]. Généralement, l'efficacité de ces préparateurs est très élevée à savoir de **90 à pratiquement 100%** [32], [35].

Quant au **chauffe-eau au gaz** sélectionné, c'est un système à accumulation dont le prix varie entre 650 et 1.800 euros [83]. Le coût total en prenant en considération le ballon d'ECS de 200 litres est de **1.700 euros** [81]. L'efficacité rapportée par la littérature scientifique est de **80 à 85%** pour ce type de préparateur [32], [35]. Le Tableau 11 : Résumé des données des préparateurs d'ECS indique les valeurs utilisées pour l'étude économique.

Tableau 11 : Résumé des données des préparateurs d'ECS

Préparateur d'ECS	Efficacité	COP	Prix indicatif
Pompe à chaleur eau/eau	/	4,4	5.600 €
Chauffe-eau électrique	95 %	/	900 €
Chauffe-eau au gaz	80 %	/	1.700 €

2.2. Données économiques

2.2.1. Coût de l'énergie

Afin d'établir les économies monétaires que représente le DWHR, le coût de chaque vecteur énergétique doit être défini selon les données luxembourgeoises.

En ce qui concerne l'électricité, selon la *Commission européenne*, le coût de l'électricité était de 0,169 euro du kWh au Grand-Duché de Luxembourg pour le deuxième semestre de 2018 [84]. C'est également la même tendance qui est observée par l'*Institut Luxembourgeois de Régulation* [85]. En revanche, le *STATEC* émet une valeur légèrement plus faible, à savoir 0,165 euro du kWh pour cette même période [86]. La valeur de 0,169 euro du kWh sera retenue pour les calculs de ce travail.

Par rapport au coût du gaz, la *Commission européenne* et le *STATEC* attribuent la valeur de 0,043 euro du kWh pour 2018 [84], [87].

2.2.2. Évolution des coûts de l'énergie

Puisque l'étude est réalisée sur une durée de 30 ans, la prise en considération de l'évolution des coûts de l'énergie est importante. Cependant, cette évolution des coûts est difficilement prévisible puisqu'elle dépend de nombreux facteurs. C'est pourquoi, selon le professeur Kheiri, cette étude de rentabilité doit être fondée sur des hypothèses plausibles ou, en tout cas, non sous-évaluées.

Afin d'estimer l'augmentation annuelle des coûts de l'énergie pour les 30 prochaines années, le professeur Kheiri affirme qu'il faut observer l'évolution des coûts des 5 dernières années. En effet, selon lui, il n'est pas nécessaire d'examiner la variation du prix de l'énergie au-delà de cette période. Pour la simple raison que ce n'est pas représentatif de l'évolution actuelle des prix puisqu'ils fluctuent fortement en fonction des contextes géopolitiques.

Tout d'abord, l'évolution du prix de l'énergie durant les 12 derniers mois, noté « *P1* », doit être établie. Pour cela, la formule suivante est utilisée :

Équation 3: Évolution du prix de l'énergie pendant 1 an

$$P1 = \frac{(Prix_{année_n})}{(Prix_{année_{n-1}})}$$

Ensuite, l'évolution du prix de l'énergie durant les deux dernières années, « *P2* », est calculée par :

Équation 4: Évolution du prix de l'énergie sur deux années

$$P2 = \frac{(Prix_{année_n})}{(Prix_{année_{n-2}})}$$

Enfin, P3, P4 et P5 sont également définis de la même manière. Ainsi, la détermination de l'évolution durant les 5 dernières années permettra d'identifier l'augmentation la plus forte (Tableau 12). Cette valeur plus élevée sera retenue comme étant l'évolution du prix de l'énergie pour la durée de l'étude.

L'évolution du prix de l'électricité, dans la littérature scientifique, varie habituellement de 1 à 4%. Tandis que pour l'évolution du coût du gaz, la valeur oscille entre 1 à 5% [31], [32], [34], [35], [76]. D'après le professeur Kheiri, les hypothèses établies par la méthode de ce travail ne sont pas sous-évaluées. Ainsi, par les résultats obtenus dans le Tableau 12, **l'augmentation annuelle des coûts de l'électricité et du gaz** est respectivement **1,10%** et **1,05%**.

Tableau 12: Détermination de l'évolution du prix de l'énergie selon les valeurs de STATEC [86], [87]

Année	Électricité		Gaz	
	Coût	Évolution par rapport à 2018	Coût	Évolution par rapport à 2018
2018	0,169 €	/	0,043 €	/
2017	0,154 €	1,10 %	0,041 €	1,05 %
2016	0,164 €	1,03 %	0,043 €	1,00 %
2015	0,170 €	0,99 %	0,048 €	0,90 %
2014	0,166 €	1,02 %	0,052 €	0,83 %
2013	0,157 €	1,08 %	0,059 €	0,73 %

2.2.3. Taux d'actualisation

Le taux d'actualisation est un paramètre important à toute étude économique puisqu'il permet, selon Lebègue [7], de confronter des valeurs monétaires pour différentes périodes de temps. Selon lui, le taux d'actualisation se définit comme « *un taux de substitution entre le futur et le présent ; il traduit la valeur du temps pour une entreprise ou une collectivité* » [7].

Dans les publications scientifiques, ce taux est généralement fixé à 5% [31], [32], [34], [35], [46], [76]. Néanmoins, le taux d'actualisation peut être plus bas que cette valeur. À titre d'exemple, Lebègue avance une valeur de 4% pour le taux d'actualisation des investissements publics de France [7]. En Allemagne, ce taux d'actualisation s'élève seulement à 3% [88].

Afin de permettre une comparaison plus étroite avec les publications scientifiques, le **taux d'actualisation** de ce travail, noté « *i* », est donc de **5%**.

2.3. Données environnementales

2.3.1. Facteur d'énergie primaire

Les facteurs d'énergie primaire, appelés également facteurs de dépense en énergie primaire, représentent la part d'énergie primaire requise pour délivrer 1 kWh d'énergie finale. Ainsi, cette notion permet de prendre en compte les pertes énergétiques durant la production d'énergie.

Ces facteurs sont propres à chaque pays étant donné les technologies utilisées. D'après le « *Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation* », pour produire 1 kWh d'électricité au Grand-Duché de Luxembourg, il faut 2,66 kWh d'énergie primaire [89]. La raison de ce facteur important s'explique par l'utilisation d'énergie fossile pour produire l'électricité, environ 34% du mix national [90]. En ce qui concerne le gaz, les pertes sont moins importantes puisque le facteur est seulement de 1,12, cela s'explique par les technologies utilisées mais aussi par les décisions politiques [1], [89]. Bien que ces données soient vieilles, Monsieur Scholzen explique qu'il n'y a pas d'indications officielles plus récentes. Il ajoute cependant que le facteur de conversion pour l'électricité sera bientôt revu à la baisse étant donné la part grandissante des énergies renouvelables au Grand-Duché de Luxembourg.

2.3.2. Facteur d'émissions de CO₂ par type d'énergie

Afin d'identifier la réduction des émissions de CO₂ dû à l'utilisation d'un DWHR, les facteurs d'émission de CO₂ sont définis pour chaque type d'énergie selon le mix énergétique luxembourgeois.

En ce qui concerne l'électricité, au Grand-Duché de Luxembourg, le facteur d'émission de CO₂ attribué par le *Règlement Grand-ducal* depuis 2007 s'élève à 651 grammes par kWh d'électricité [89]. Cette valeur, toujours utilisée pour les passeports énergétiques, correspond au mix énergétique luxembourgeois d'avant 2007. Ce n'est donc pas très représentatif des émissions de CO₂ actuelles. Pour obtenir des données récentes, les publications de la *Commission européenne*, des fournisseurs d'électricité et de l'*Institut Luxembourgeois de Régulation* doivent être examinées.

Au regard des données européennes, en 2016, chaque kWh d'énergie électrique émet, au Grand-Duché de Luxembourg, 219,3 grammes de CO₂ [91]. Cette valeur présente une diminution de 66% par rapport au *Règlement Grand-Ducal*. En effet, le professeur Scholzen affirme qu'étant donné la part croissante des énergies renouvelables au Grand-Duché de Luxembourg et dans les pays voisins fournisseurs d'électricité, ce facteur d'émission est plus faible à l'heure actuelle. De plus, il ajoute que la politique d'achat des fournisseurs d'électricité vers une électricité verte accentue cette différence avec la valeur du *Règlement Grand-Ducal*.

Au regard de l'étiquetage de l'électricité du fournisseur *Enovos* (Figure 31, page VI), l'électricité fournie au ménage a un impact environnemental nul, c'est le mix du produit. Tandis que le mix énergétique du fournisseur a un impact environnemental de 210 g_{CO2}/kWh et le mix national est de 224 g_{CO2}/kWh. La raison de la différence importante entre l'impact du produit et du mix national est, selon le professeur Scholzen, engendré par une ruse lors de la consolidation des chiffres puisque *Enovos* envoie l'électricité propre issue de l'hydroélectricité aux ménages, et l'électricité non propre aux industries. Ainsi, le mix du produit envoyé aux ménages a une valeur nulle [92]. En comparaison, l'étiquetage de l'électricité du fournisseur *Eida s.a.* (Figure 32, page VII), montre que le mix du produit et le mix du fournisseur sont nuls puisque cette société fournit de l'électricité 100% verte issue de l'énergie éolienne [93]. Sur cette fiche datant de 2018, le mix national est de 215 g_{CO2}/kWh. Cela signifie que l'impact environnemental du mix énergétique luxembourgeois pour l'électricité est en diminution étant donné leur politique environnementale forte.

Dans le « *Règlement ILR/E19/31 du 8 juillet 2019 portant publication de la composition et de l'impact environnemental du mix national pour l'année 2018 - Secteur électricité* » de l'*Institut Luxembourgeois de Régulation*, le mix national, composé à 55,5% d'énergies renouvelables, a une valeur de 215 g_{CO2}/kWh [90].

Dans ce travail, la valeur du mix national de 2018, à savoir 215g de CO₂ par kWh d'énergie finale, sera prise en considération pour les calculs des impacts environnementaux.

Quant au facteur d'émission de CO₂ pour le gaz, le *règlement Grand-Ducal* annonce un facteur de 246g de CO₂ par kWh d'énergie finale.

2.4. Formules

2.4.1. Calculs énergétiques

Tout d'abord, le premier calcul consiste à définir les **besoins thermiques utiles requis annuellement pour la douche sans système de récupération de la chaleur** (Équation 5) :

Équation 5: Énergie requise annuellement pour chauffer l'eau de la douche du ménage sans DWHR

$$E_{\text{douche sans DWHR}} = \frac{(Q \times t) \times \rho \times c \times (T_{\text{mixte}} - T_{\text{froide}})}{3.600} \times 365 \times n$$

Où :

E_{douche} : est l'énergie utile nécessaire annuellement pour la douche du ménage [kWh/an]

Q : est le débit de la douche [l/min]

t : est la durée de la douche [min]

ρ : est la masse volumique de l'eau [kg/l]

c : est la chaleur massique de l'eau [kJ/kg.K]

T_{mixte} : est la température mixte ou bien la température de l'eau de drainage [K]

T_{froide} : est la température froide [K]

n : est le nombre de personnes dans le ménage [/]

Ensuite, il faut définir les **besoins thermiques utiles requis pour la douche avec un DWHR** afin d'identifier les économies d'énergie d'un tel système.

Pour cela, il faut, en premier lieu, calculer l'accroissement de la température de l'eau de ville à l'aide de la formule d'un échangeur de chaleur (Équation 6) [34] :

Équation 6: Accroissement de la température de l'eau de ville selon [34]

$$\Delta T_{\text{froide}} = T_{\text{froide out}} - T_{\text{froide in}} = \varepsilon \times (T_{\text{mixte}} \times \alpha - T_{\text{froide in}})$$

Où :

$T_{\text{froide out}}$: est la température de l'eau de ville préchauffée [°C]

$T_{\text{froide in}}$: est la température de l'eau de ville froide [°C]

ε : est l'efficacité du DWHR [%]

T_{mixte} : est la température de l'eau de drainage [°C]

α : est le coefficient de pertes de l'eau de drainage [%]

En deuxième lieu, il faut définir les besoins thermiques utiles de la douche avec un DWHR ($E_{\text{douche avec DWHR}}$) qui peuvent être déterminés en remplaçant la température froide de l'Équation 5 par « $T_{\text{froide out}}$ » de l'Équation 6.

Pour finir, les économies d'énergie utile, en kilowatt-heure, sont définies en faisant la soustraction entre les besoins thermiques utiles requis pour la douche sans DWHR et ceux avec DWHR. L'efficacité du système peut également être calculée par l'inverse du rapport entre $E_{\text{douche sans DWHR}}/E_{\text{douche avec DWHR}}$.

Par la suite, la **quantité d'énergie finale** doit être déterminée selon l'efficacité ou le coefficient de performance de chaque préparateur d'ECS.

Pour définir la quantité d'énergie électrique absorbée par la pompe à chaleur, il faut diviser l'énergie utile requise pour l'ECS de la douche par le coefficient de performance de la pompe.

Pour les chauffe-eaux au gaz et électrique, l'énergie finale consommée est définie par l'Équation 7 :

Équation 7: Définition de l'énergie consommée par les préparateurs d'ECS en fonction de leur efficacité

$$E_{consommée} = E_{douche} \times (1 + 1 \times \eta)$$

Où :

$E_{consommée}$: est la quantité d'énergie finale consommée par le préparateur d'ECS [kWh]

E_{douche} : est la quantité d'énergie utile requise pour l'ECS de la douche [kWh]

η : est l'efficacité des préparateurs d'ECS [%]

2.4.2. Calculs économiques

Pour la partie économique, l'objectif de ces calculs est d'identifier la valeur actuelle nette du projet après une durée de 30 ans. En outre, le temps de retour sur investissement et le taux de rentabilité interne vont également être définis. Ces calculs permettront d'identifier la rentabilité économique d'une douche équipée d'un DWHR.

En ce qui concerne la détermination des **revenus du projet** de l'utilisation d'un DWHR, partant du principe qu'« une recette peut correspondre à une dépense évitée grâce à l'investissement réalisé » [8], ils sont définis par le coût de l'énergie évitée grâce au DWHR. En effet, la part d'énergie évitée par l'implémentation du DWHR est multipliée par son coût monétaire pour déterminer les recettes. Puisque le prix de l'énergie évolue chaque année, le coût de l'année « n » est calculé par l'Équation 8. Ainsi, les recettes sont déterminées de cette manière pour toute la durée de vie du système.

Équation 8: Détermination du coût de l'énergie de l'année « n » [8]

$$\text{Coût énergie année}_n = \text{coût énergie année}_{n-1} \times (1 + y)$$

Où :

y est l'augmentation annuelle du coût de l'énergie [%/an]

De la même manière, les **dépenses du projet** sont définies par la multiplication de l'énergie finale requise pour la douche avec DWHR et le coût de l'énergie actualisé selon l'Équation 8.

Ensuite, il faut définir le **facteur d'actualisation**, également intitulé « *Present Worth Factor* », qui évolue chaque année, par l'Équation 9 :

Équation 9: Détermination du facteur d'actualisation [8]

$$PWF = (1 + i)^{-k}$$

Où :

PWF est le « *Present Worth Factor* » [/]

i est le taux d'actualisation [%]

k est la valeur de l'année de calcul [/]

Enfin, la **valeur actuelle nette** peut être déterminée par l'Équation 10 :

Équation 10: Détermination de la valeur actuelle nette [8]

$$VAN = \left[\sum_{k=1}^m PWF_{i,k} \times (R_k - D_k) \right] - I$$

Où :

VAN est la valeur actuelle nette [€]

m est le nombre total des années du projet [/]

PWF est le facteur d'actualisation [/]

i est taux d'actualisation [%]

R_k est la recette pour l'année k [€]

D_k est la dépense pour l'année k [€]

I est l'investissement initial du DWHR [€]

Pour ce qui est du **temps de retour sur investissement**, il se trouve lorsque la valeur actuelle nette change de signe, c'est-à-dire quand la VAN devient positive. Quant au **taux de rentabilité interne**, c'est le taux d'actualisation pour lequel la valeur actuelle nette est nulle [8]. Ainsi pour définir le TRI, le logiciel *Excel* permet, grâce à la fonction « *valeur cible* », de chercher quel est le taux d'actualisation qui rend la valeur actuelle nette nulle.

2.4.3. Calculs environnementaux

Afin de déterminer les économies d'énergie primaire et des émissions de CO₂, les calculs environnementaux consistent simplement à multiplier les facteurs de conversion de l'énergie primaire et d'émission de CO₂ par l'énergie finale avec et sans DWHR. Ainsi, la différence entre les valeurs avec DWHR et les valeurs sans DWHR correspondent aux économies effectuées.

Équation 11: Détermination de l'énergie primaire à partir de l'énergie finale consommée [1]

$$E_p = f_{p,x} \times Q_x$$

Où :

E_p est l'énergie primaire consommée [kWhp]

F_{p,x} est le facteur d'énergie primaire rapporté à l'énergie finale [kWhp/kWh]

Q_x est l'énergie finale consommée [kWh]

Équation 12: Détermination des émissions de CO₂ à partir de l'énergie finale consommée [1]

$$Em_{CO_2} = f_{CO_2,x} \times Q_x$$

Où :

Em_{CO₂} est la quantité d'émission de CO₂ [g_{CO₂}]

F_{CO₂,x} est le facteur d'émission de CO₂ rapporté à l'énergie finale [g_{CO₂}/kWh]

Q_x est l'énergie finale consommée [kWh]

3. Résultats

De manière globale, cette section met en application les hypothèses et les formules élaborées précédemment afin d'étudier les économies d'énergie, la rentabilité économique et la pertinence environnementale d'un DWHR.

Au préalable, deux DWHR vont être comparés sur base de la consommation énergétique, des émissions de CO₂ et de la rentabilité économique afin de sélectionner le « meilleur » produit pour effectuer les simulations. Ces simulations couvriront les trois domaines d'étude à savoir : énergétique, économique et environnemental.

Tout d'abord, la consommation énergétique d'un tel système va être étudiée en tenant compte du comportement de chaque ménage et des préparateurs d'eau chaude sanitaire. Cette consommation énergétique sera toujours comparée à une situation ne présentant pas de DWHR afin d'identifier les économies potentielles.

Ensuite, la rentabilité économique va être étudiée sur base de la valeur actuelle nette (VAN), du taux de rentabilité interne (TRI) et du temps de retour sur investissement (TR) pour chaque préparateur d'ECS et chaque ménage.

Enfin, l'impact environnemental des préparateurs d'ECS associés à un DWHR va être comparé à une situation normale par la détermination des émissions de CO₂ et de l'énergie primaire évités.

3.1. Sélection du récupérateur de chaleur pour les eaux de drainage

Comme identifié dans la partie hypothèse, les produits *Zypho Pipe 65* et *Recoh-Vert 21-V3* présentent des caractéristiques techniques intéressantes. D'une part, le produit *Zypho Pipe 65* montre de bonnes performances comparées au reste du marché des DWHR et, surtout, un investissement initial assez faible d'une valeur de 515 euros. D'autre part, le dispositif *Recoh-Vert 21-V3* présente un coût de 800 euros, mais son efficacité est la plus élevée du marché des DWHR.

Ces deux produits ont servi de base pour effectuer des simulations visant à déterminer leur efficacité énergétique, environnementale et économique. Ces simulations sont fondées sur différents scénarios comportementaux pour des systèmes intégrés à une pompe à chaleur comme système de production de l'ECS.

En ce qui concerne les résultats de ces simulations, la Figure 20 représente la consommation d'électricité nécessaire pour fournir l'ECS des douches durant une période de 30 ans selon les deux produits. La consommation énergétique est plus élevée pour le produit *Zypho Pipe 65* étant donnée l'efficacité moindre qu'il présente. La variation de la consommation énergétique constatée entre les deux produits dépend du comportement des ménages puisqu'un écart de 5% est observé pour le ménage économe et des écarts de 6 et 9% correspondent aux ménages moyen et dissipateur. Ainsi, l'utilisation du *Recoh-Vert 21-V3* durant 30 ans permet d'économiser 33, 94 et 281 kWh_{électrique} de plus que son concurrent en fonction des ménages ce qui équivaut, par rapport au prix moyen de l'électricité durant 30 ans, à 7, 19 et 56 euros. Ces petites économies proviennent de la faible consommation d'énergie de la pompe à chaleur. À titre d'exemple, les mêmes économies pour le chauffe-eau électrique s'élèvent à 146, 396, 1.117 euros sur 30 ans.

Cette même observation peut être constatée pour les émissions de CO₂ présentes sur l'axe vertical secondaire de la même figure. Les émissions de CO₂ évitées démontrent des pourcentages similaires aux économies d'énergie, cela équivaut donc à 153, 431, 1.281 kg de CO₂ évité durant 30 ans selon le comportement du ménage.

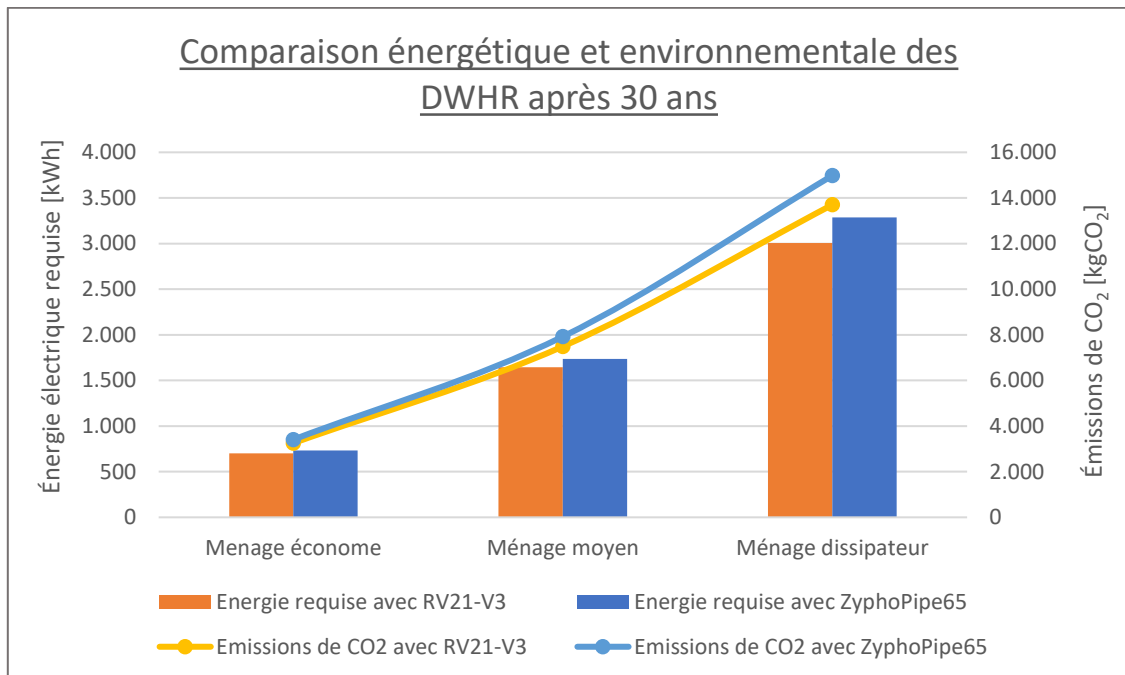


Figure 20: Simulation énergétique et environnementale des DWHR associés à une pompe à chaleur sur 30 ans

Pour ce qui est de la comparaison économique illustrée par la Figure 21, les variations de la valeur actuelle nette et du taux de rentabilité interne après 30 ans sont davantage marquées que pour la consommation énergétique et pour les émissions de CO₂.

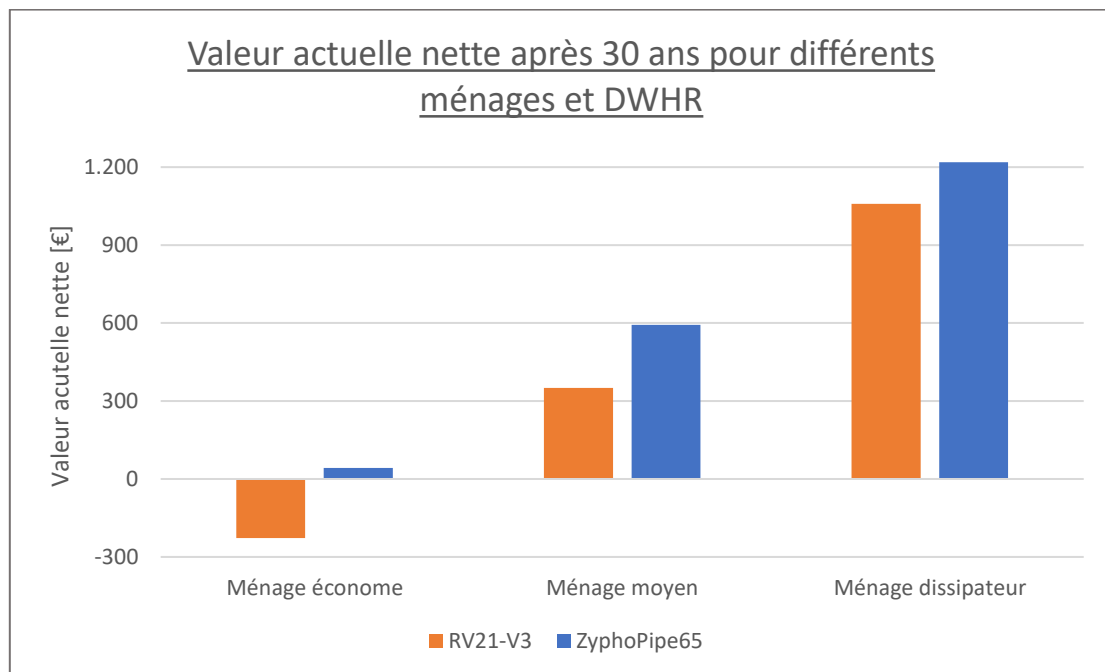


Figure 21: Valeur actuelle nette pour des DWHR associés à une pompe à chaleur sur 30 ans pour différents ménages

Le ménage économe présente une VAN de -227,5 € et un TRI de 2,5% pour le produit *Recoh-Vert 21-V3* tandis que ces valeurs sont 42,5 € et 5,7% pour l'autre DWHR. En ce qui concerne le ménage moyen, la VAN évolue de 350,9 à 593,7 € et le TRI de 8,3 à 13%. Par contre, plus le comportement est dissipateur, plus l'écart des valeurs entre les deux DWHR est faible. De fait, pour le ménage dissipateur la VAN pour le dispositif *Recoh-Vert 21-V3* est de 1.059,1 € et le TRI est 14,1% tandis que pour le produit *Zypho Pipe 65* ces valeurs sont 1.218,5 € et 20,3%. Cela s'explique par le fait que le produit *Recoh-Vert 21-V3* présente une meilleure efficacité qui, en cas de forte consommation énergétique, permet des économies considérables. Ainsi, bien que l'investissement initial de ce produit impact négativement sa valeur actuelle nette, les économies énergétiques plus importantes que pour le dispositif *Zypho Pipe 65* permettent de réduire l'écart en leur VAN.

La conclusion de la sélection du récupérateur de chaleur à partir des eaux de drainage se compose de deux volets.

D'une part, l'implémentation d'un DWHR peut avoir pour objectif de réduire la facture énergétique du client. Cet objectif sera donc rempli par un DWHR présentant une rentabilité économique importante. Dans ce cas, le produit *Zypho Pipe 65* est le récupérateur de chaleur le plus approprié pour ce client.

D'autre part, l'implémentation d'un DWHR peut être destinée à réduire la consommation énergétique du client dans le but de diminuer son empreinte carbone. Dans ce cas, l'efficacité énergétique du DWHR sera plus importante que sa rentabilité économique. Le produit *Recoh-Vert 21-V3* sera choisi pour ce cas de figure.

Dans le contexte de ce travail, l'objectif fondamental du projet du lotissement résidentiel est l'efficacité et l'autosuffisance énergétiques. Par conséquent, les économies d'énergie et d'émissions de CO₂ supplantent la rentabilité monétaire, dans la mesure du raisonnable. Cette étude rejoint la conclusion de Mazur [25] : « *Le facteur économique est le critère le plus souvent pris en compte lors de la sélection d'un système de chauffage particulier par un investisseur individuel, y compris les coûts encourus pour la construction des installations, moins souvent les coûts d'exploitation, mais en tenant compte de la situation économique actuelle dans le monde et de la pollution progressive de l'environnement naturel, il convient avant tout de garder à l'esprit les considérations écologiques* ».

Les simulations des 3 aspects de l'étude se baseront uniquement sur le produit ***Recoh-Vert 21-V3***.

3.2. Étude énergétique

Au regard de la quantité d'énergie utile nécessaire pour l'ECS des douches, cette étape consiste à mettre en exergue le potentiel d'économie d'énergie d'un DWHR. De fait, le pouvoir de récupération calorifique des DWHR permet des économies énergétiques, et donc budgétaires, importantes. Ce potentiel d'économie d'énergie est donc étudié dans cette partie en fonction du débit et de la durée de la douche, des scénarios établis et des préparateurs d'ECS.

Tout d'abord, la Figure 22 présente les résultats de **l'énergie utile annuellement évitée** pour la préparation de l'ECS grâce à l'implémentation d'un DWHR.

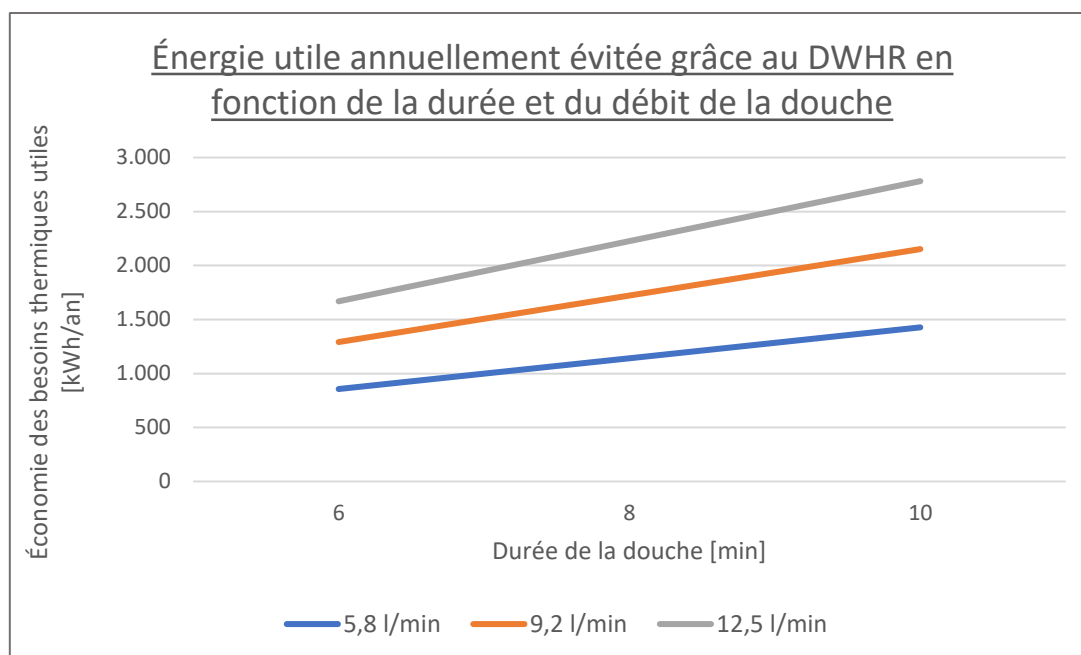


Figure 22: Énergie annuellement évitée grâce au DWHR en fonction de la durée et du débit de la douche

Ensuite, les **économies d'énergie utile** réalisées à l'aide d'un DWHR sont examinées selon les scénarios définis préalablement dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Résumé des caractéristiques comportementales des ménages

Type de ménage	Durée de la douche [min]	Débit de la douche [l/min]	Nombre d'occupants [/]	Température eau de ville [°C]	Température eau de drainage [°C]
Ménage économe	6	5,8	3	10	40
Ménage moyen	8	9,2	3	10	40
Ménage dissipateur	10	12,5	3	10	40

La Figure 23 montre les économies énergétiques en fonction du comportement des ménages en présence et en l'absence d'un DWHR. Ces économies pour les ménages économe, moyen et dissipateur s'élèvent respectivement à 856, 1.722 et 2.781 kWh/an. Ainsi, une diminution moyenne de 61% de la consommation énergétique est observée par rapport à la situation sans DWHR.

Ensuite, outre le comportement du ménage, **l'influence du préparateur d'ECS sur la consommation énergétique** est étudiée. En prenant l'exemple d'un comportement moyen, la Figure 24 examine la consommation énergétique requise pour l'ECS de la douche auprès de 3 préparateurs d'ECS en présence et en absence d'un DWHR.

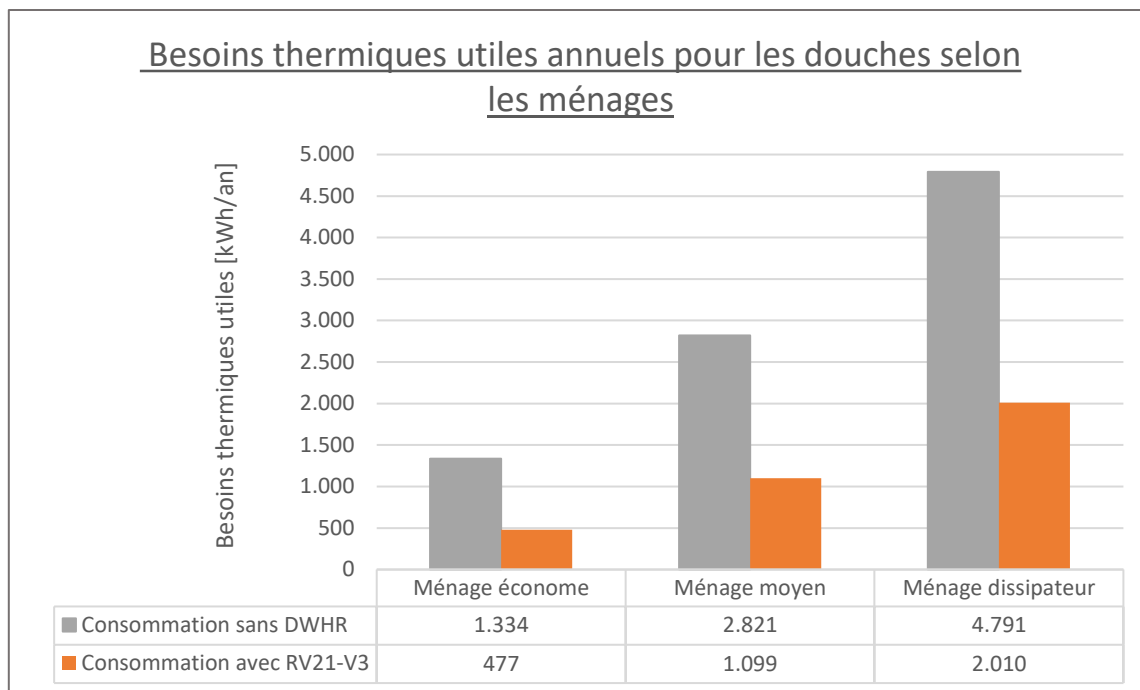


Figure 23: Besoins énergétiques annuels des ménages en fonction de leur comportement en présence et en absence du DWHR

Ainsi, cette Figure 24 illustre la consommation énergétique en fonction de l'efficacité des préparateurs d'ECS pour un ménage moyen. Dans ce scénario, l'impact du DWHR est démontré par une diminution de 61% de la consommation énergétique, quel que soit le préparateur d'ECS. À titre d'exemple, la consommation énergétique pour le chauffe-eau au gaz qui était initialement 3.385 kWh/an, est de 1.319 kWh/an avec DWHR.

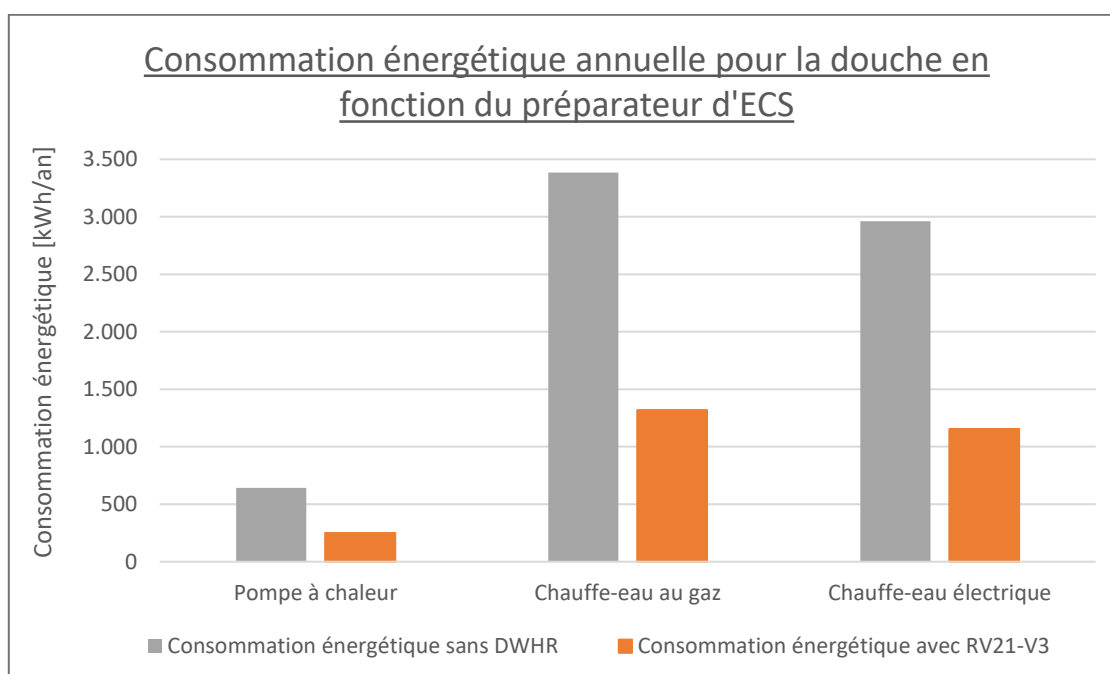


Figure 24: Consommation énergétique annuelle pour la douche en fonction des préparateurs d'ECS pour un ménage moyen

3.3. Étude économique

Dans ce travail, la rentabilité économique d'un système DWHR a été étudiée selon les trois scénarios comportementaux et selon les différents préparateurs d'ECS. Pour ce qui est des hypothèses, le Tableau 14 constitue un récapitulatif des données économiques établies dans ce travail.

Tableau 14: Résumé des données économiques pour l'étude de rentabilité

Résumé des données économiques	
Durée du projet	30 ans
Coût de l'électricité	0,169 €/kWh
Augmentation du coût de l'électricité	1,10 %/an
Coût du gaz	0,043 €/kWh
Augmentation du coût du gaz	1,05 %/an
Taux d'actualisation	5 %
Coût du DWHR	800 €

Dans un premier temps, la rentabilité économique est focalisée uniquement sur le dispositif DWHR dont l'investissement et le coût de l'énergie sont pris en considération. Cette rentabilité économique est exprimée par la valeur actuelle nette, le taux de rentabilité interne et le temps de retour sur investissement.

Ensuite, dans un deuxième temps, la comparaison économique des préparateurs d'ECS est examinée en prenant également en considération l'investissement initial du chauffe-eau.

3.3.1. Rentabilité d'un système DWHR pour divers préparateurs d'ECS

Avant d'étudier la rentabilité économique d'un DWHR en fonction des préparateurs d'ECS, il est important de démontrer l'influence importante du débit et de la durée de la douche. En effet, l'intérêt de l'utilisation de scénarios comportementaux est considérable puisque la valeur actuelle nette est très dépendante des données de consommation d'ECS comme l'illustre la Figure 25 avec pompe à chaleur en exemple. En résumé, plus la durée de la douche est longue et plus la douche est gourmande en eau chaude sanitaire, plus l'investissement d'un DWHR sera rentable.

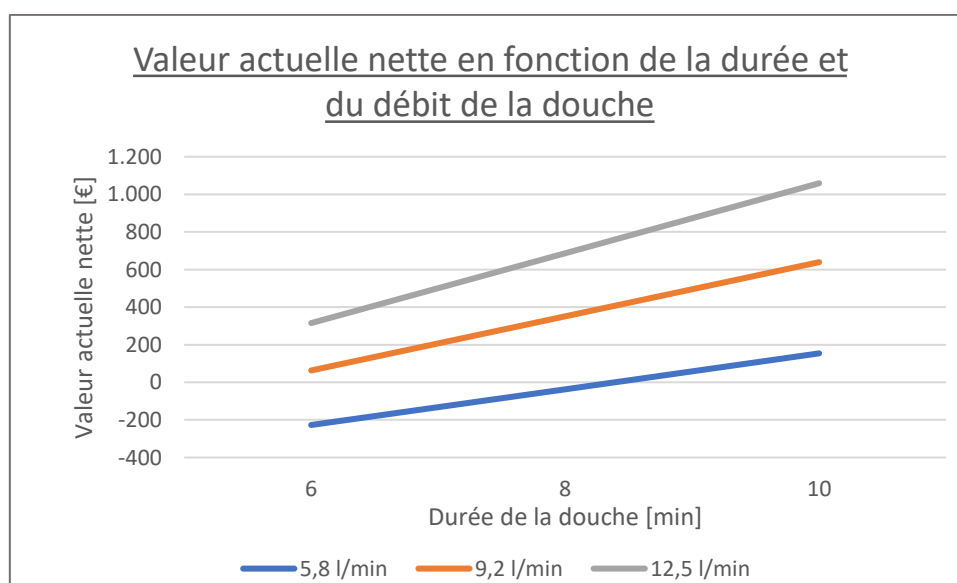


Figure 25: Évolution de la valeur actuelle nette en fonction de la durée et du débit de la douche

La Figure 26 montre l'évolution de la VAN sur la durée du projet **avec une pompe à chaleur** et en fonction du comportement des ménages. Cette valeur varie fortement en fonction du comportement du ménage comme expliqué précédemment. En effet, le comportement économe ne présente pas de rentabilité économique après 30 ans, car sa valeur actuelle nette est de -227 euros. Concernant les valeurs actuelles nettes des ménages moyens et dissipateurs, elles s'élèvent respectivement à 351 € et 1.059 €. Sur cette figure, le temps de retour sur investissement est implicitement présenté puisqu'il correspond à l'année où la valeur actuelle nette change de signe. De fait, pour le comportement moyen le temps de retour sur investissement est défini vers 17 ans et pour le ménage dissipateur entre 9 et 10 ans. En ce qui concerne le taux de rentabilité interne, les valeurs des comportements économe, moyen et dissipateur correspondent respectivement à 2, 8 et 14%.

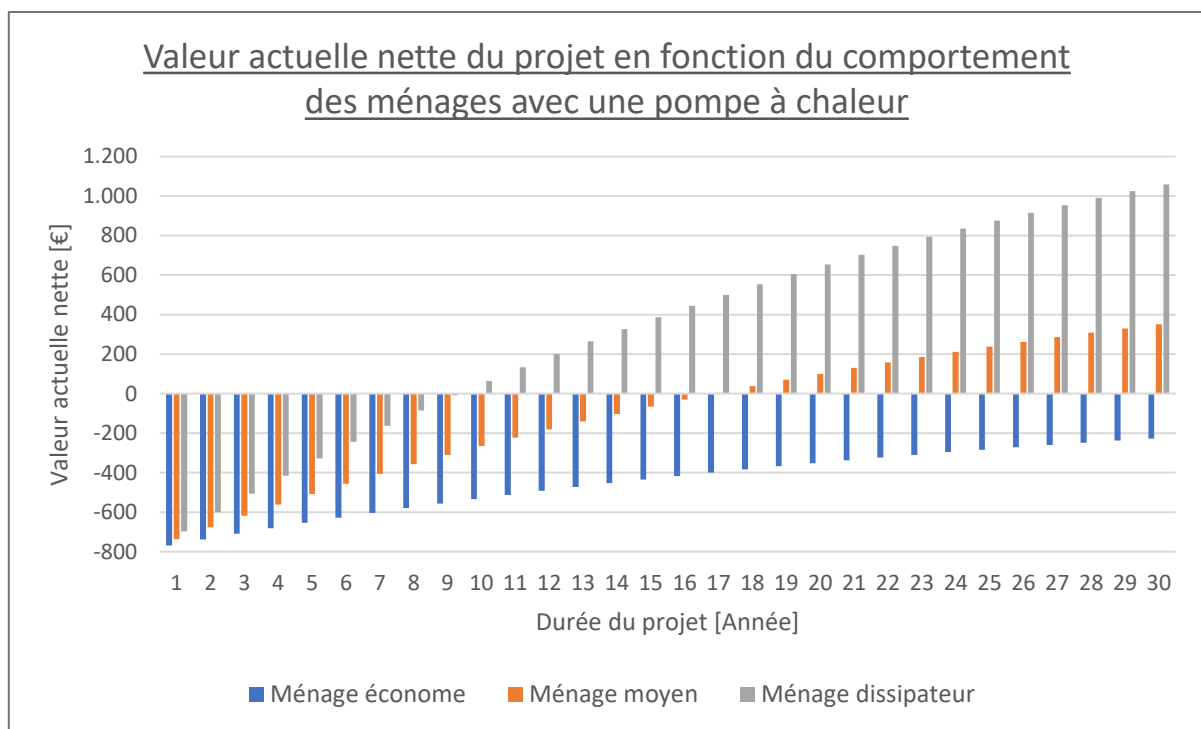


Figure 26: Valeur actuelle nette en fonction du comportement des ménages avec une pompe à chaleur

En ce qui concerne le **chauffe-eau au gaz**, l'évolution de la valeur actuelle nette est exprimée par la Figure 27. Le ménage économe ne présente toujours pas de rentabilité économique puisque sa valeur actuelle nette reste négative (-48 € après 30 ans) et son taux de rentabilité interne est de 4%. Le ménage moyen, avec un TR situé entre 11 et 12 ans, montre une valeur actuelle nette de 712 € et un taux de rentabilité interne de 11%. Quant au ménage dissipateur, la VAN de 1.642 € et le TRI de 19% engendrent un temps de retour sur investissement situé entre 6 et 7 ans.

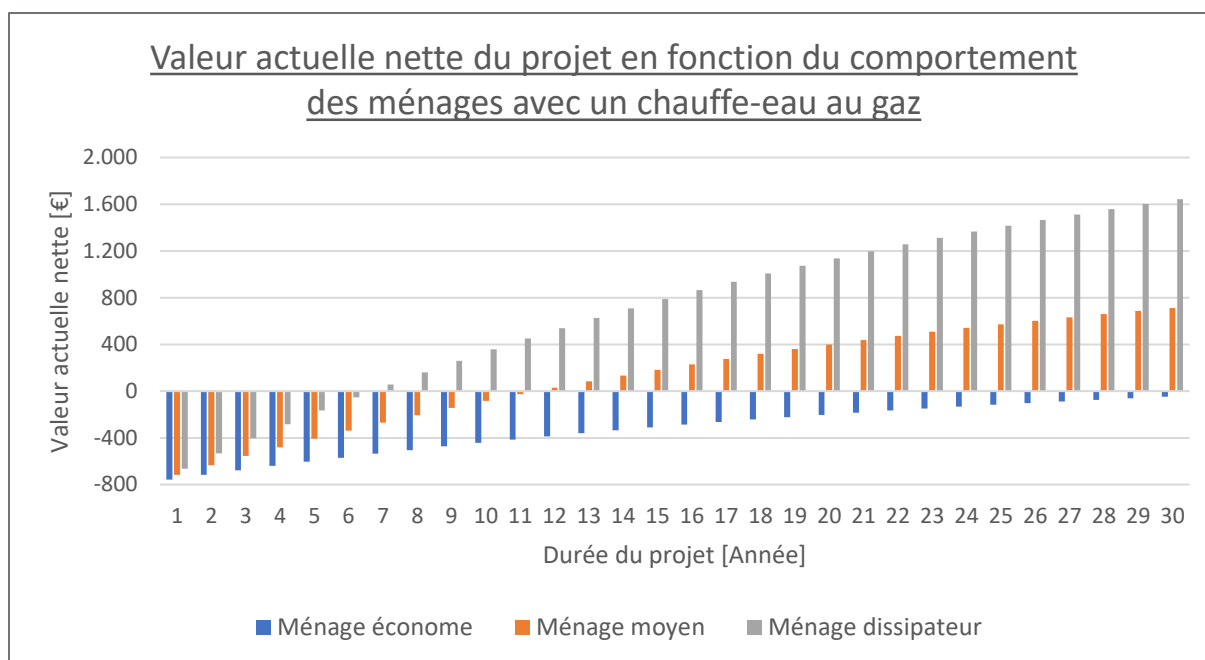


Figure 27: Valeur actuelle nette en fonction du comportement des ménages avec un chauffe-eau au gaz

La Figure 28 représente l'évolution de la valeur actuelle nette pour **un chauffe-eau électrique**. Dans cette situation les trois ménages sont rentables puisque la VAN change rapidement de signe, c'est-à-dire que le temps de retour sur investissement est court. De fait, le temps de retour sur investissement du ménage économe est situé près de la 6^{ème} année. La valeur du temps de retour sur investissement du comportement moyen se trouve entre la 2^{ème} et 3^{ème} année, tandis que pour le ménage dissipateur cette valeur est légèrement inférieure à 2 années. Concernant la valeur actuelle nette et le taux de rentabilité interne, le comportement économe démontre des valeurs de 1.845 € et 20%; le ménage moyen 4.517 € et 39% alors que le ménage dissipateur 7.789 € et 63%.

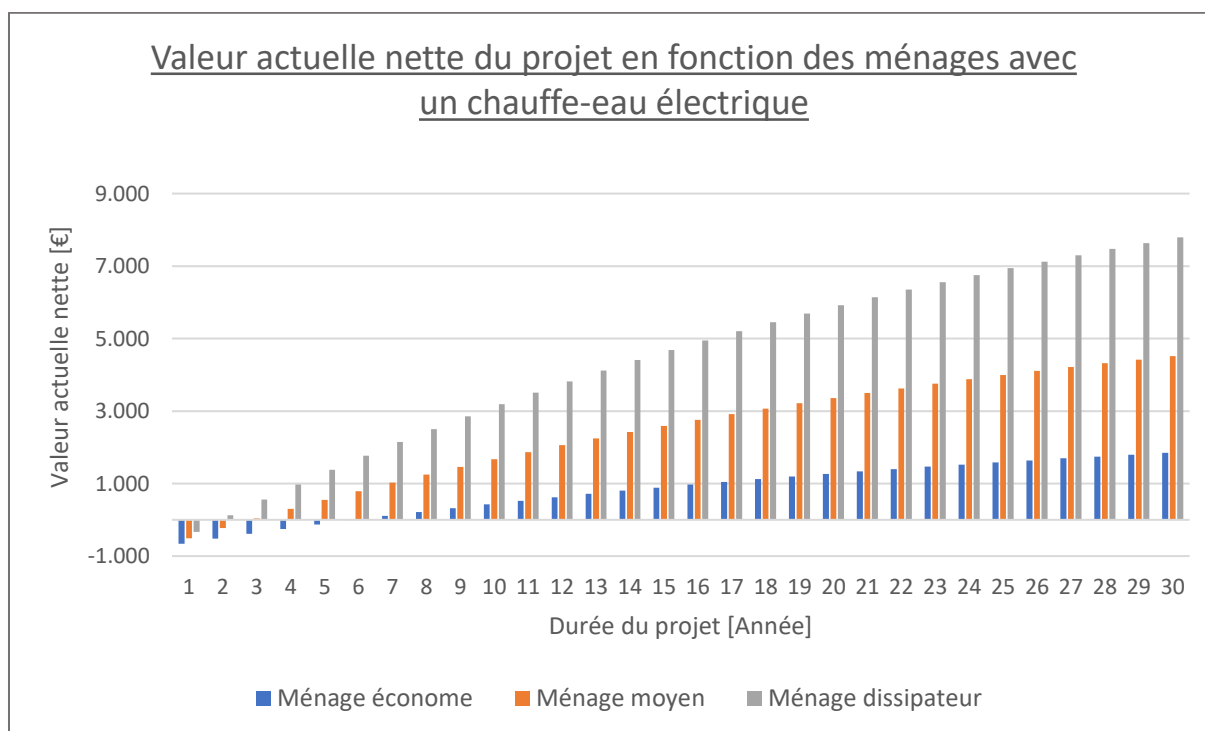


Figure 28: Valeur actuelle nette en fonction du comportement des ménages avec un chauffe-eau électrique

Ces graphiques permettent de comprendre la rentabilité économique de l'implémentation d'un DWHR. L'objectif de cette sous-section était, d'une part de comparer l'impact des trois scénarios sur la rentabilité économique d'un tel projet, et d'autre part de comparer la rentabilité économique selon les divers préparateurs d'ECS.

3.3.2. Comparaison économique des préparateurs d'ECS

Le point précédent a mis en évidence l'impact du comportement des ménages et du préparateur d'ECS sur la rentabilité économique. Cependant, pour permettre la comparaison économique entre les préparateurs d'ECS, il est nécessaire de prendre également en considération l'investissement initial du préparateur. Par exemple, la pompe à chaleur eau/eau du projet de lotissement résidentiel présente un coût de 5.600 €, ce qui n'est pas négligeable.

Ainsi, pour la deuxième approche de l'étude de rentabilité économique, la Figure 29 illustre la comparaison économique des préparateurs d'ECS prenant en compte le coût de l'investissement initial et le coût de l'énergie. En revanche, les coûts d'entretien ne sont pas considérés.

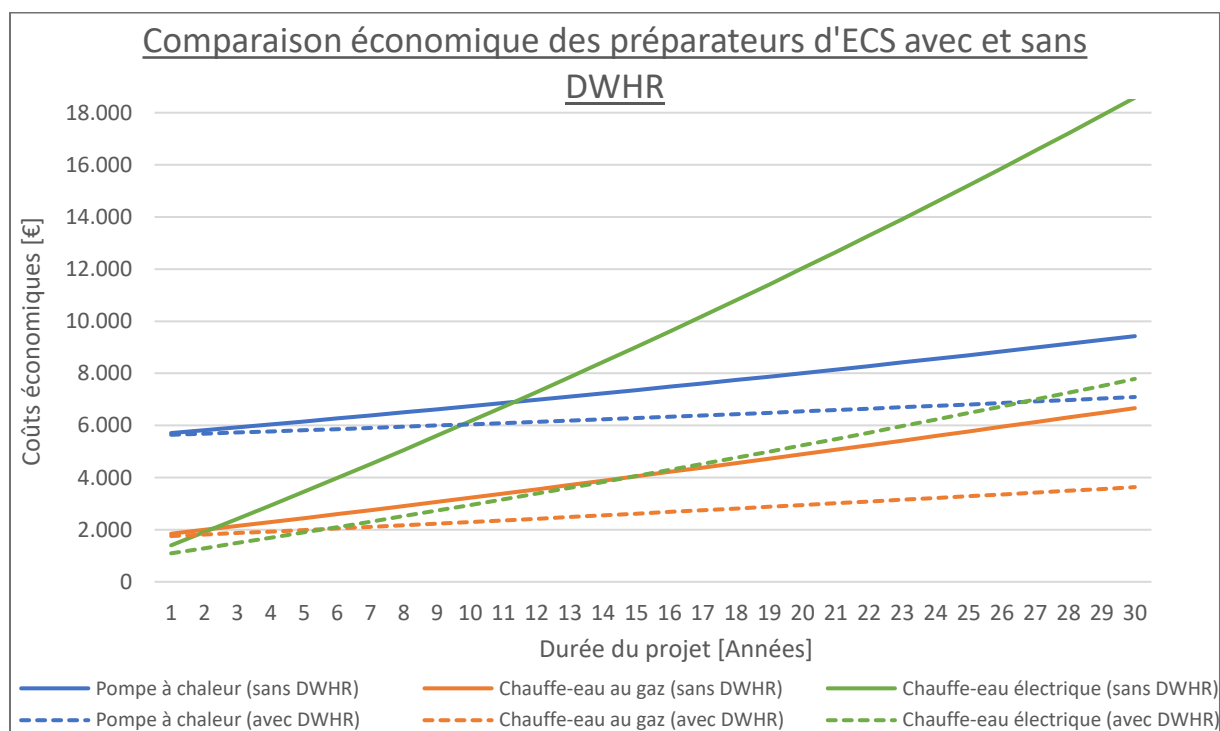


Figure 29: Comparaison économique des préparateurs d'ECS avec et sans DWHR

Cette figure présente les coûts liés aux trois types de préparateurs d'ECS pour une durée de 30 ans. Les traits en pointillés représentent l'investissement initial et les coûts énergétiques en présence d'un DWHR, alors que les traits pleins représentent ces mêmes coûts en l'absence d'un DWHR.

La pompe à chaleur eau/eau avec un coût initial de 5.600 euros à un prix final de 9.426 euros sans DWHR et 7.090 euros avec DWHR. L'implémentation du DWHR, en prenant l'investissement de la pompe à chaleur en considération, correspond à une réduction de 25% des coûts. Pour le chauffe-eau au gaz, dont le prix initial est de 1.700 euros, la diminution du coût monétaire grâce au DWHR est de 45%. Quant au chauffe-eau électrique, malgré le faible coût originel de 900 euros, le montant final est de 18.576 euros sans DWHR et 7.787 euros avec DWHR, ce qui correspond à une réduction de 58%.

3.4. Étude environnementale

L'aspect environnemental, souvent négligé, est un point important dans l'étude technico-économique de ce travail puisqu'il peut démontrer l'intérêt de certaines technologies. En effet, les résultats de l'étude de la rentabilité économique peuvent occulter les externalités négatives du comportement du ménage ou du préparateur d'ECS.

Dans le contexte de l'étude environnementale, seul un ménage de trois personnes au comportement moyen est examiné c'est-à-dire pour un débit de douche de 9,2 l/min et une durée de 8 minutes par personne.

3.4.1. Comparaison des émissions de CO₂

La comparaison des émissions de CO₂ permet de mesurer la réduction drastique des externalités négatives faites à l'environnement (Figure 30). Ainsi, les préparateurs d'ECS peuvent être comparés sur base des rejets de CO₂ afin d'établir la technologie la plus propre.

Tous les préparateurs d'ECS présentent la même réduction des émissions de CO₂ dû à la présence d'un DWHR soit, pour ce scénario, une réduction de 61% comme illustrée sur la Figure 30. Toutefois, la quantité d'émissions de CO₂ est très différente en fonction de la technologie utilisée comme l'illustre cette figure.

Pour un ménage moyen, la présence d'un DWHR permet d'éviter 84 kg de CO₂ par an pour une pompe à chaleur eau-eau, ce qui correspond à 2,5 tonnes de CO₂ au bout de 30 années (Figure 30). Pour le chauffe-eau au gaz, sur une durée de 30ans, environ 15,2 tonnes des émissions de CO₂ sont déjouées grâce à l'utilisation d'un DWHR, c'est-à-dire que 508 kg de CO₂ sont annuellement évités. À propos du chauffe-eau électrique, le récupérateur de chaleur permet de préserver l'environnement de 388 kg de CO₂ par an, ce qui revient à 11,6 tonnes pour la durée du DWHR.

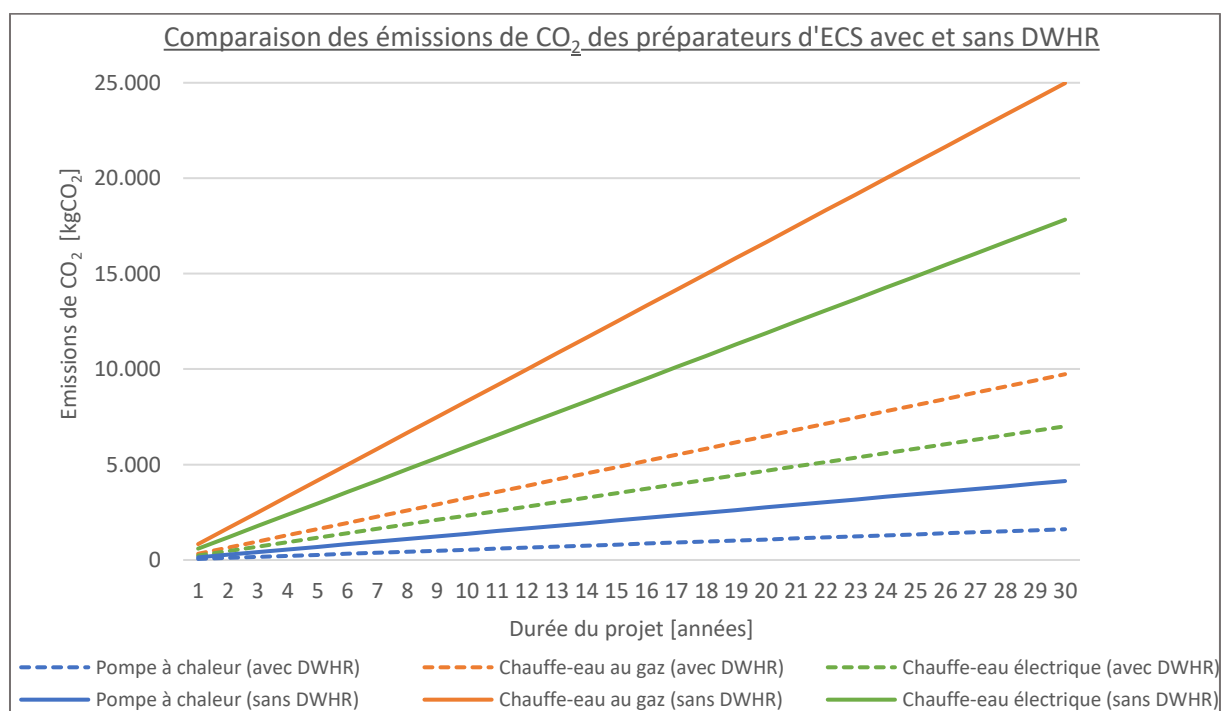


Figure 30: Comparaison des émissions de CO₂ émises par les préparateurs d'ECS avec et sans DWHR

Ensuite, pour ce qui est du ménage économe, les émissions de CO₂ évitées durant 30 ans s'élèvent à 1,3 tonne pour la pompe à chaleur, à 7,6 tonnes pour le chauffe-eau au gaz et 5,8 tonnes pour le chauffe-eau électrique.

Enfin, pour le ménage dissipateur, l'association d'un DWHR à la pompe à chaleur permet d'éviter 4,2 tonnes de CO₂. Pour ce qui est du chauffe-eau au gaz, les économies s'élèvent à 24,6 tonnes de CO₂ après 30 ans d'utilisation. Tandis, qu'avec le chauffe-eau électrique 18,8 tonnes de CO₂ sont évitées.

3.4.2. Comparaison de la consommation d'énergie primaire

Outre les émissions de CO₂, la consommation de l'énergie primaire est un facteur déterminant pour mesurer les bienfaits d'un DWHR sur l'environnement. Le Tableau 15 présente donc la consommation d'énergie primaire durant les 30 années du projet selon les préparateurs d'ECS, en fonction des scénarios comportementaux et de la présence d'un DWHR.

De manière générale, la réduction de l'énergie primaire suit la réduction de la consommation énergétique. Le ménage économe présente donc une réduction de 64% ce qui permet des économies considérables après 30 ans. Les économies pour la pompe à chaleur s'élèvent à 15.532 kWhp, pour le chauffe-eau au gaz la valeur est de 34.531 kWhp et 71.760 kWhp pour le chauffe-eau électrique. Le ménage moyen montre des économies d'énergie primaire de 31.227, 69.421, 144.267 kWhp pour les différents préparateurs d'ECS. La plus grande quantité d'énergie primaire évitée est présentée par le ménage dissipateur dont les valeurs sont 50.439, 112.135, 233.029 kWhp.

Tableau 15: Consommation de l'énergie primaire selon le préparateur d'ECS, le ménage et la présence du DWHR

Préparateur ECS	Comportement du ménage	Présence du DWHR	Consommation en énergie primaire durant 30 ans [kWhp]	Énergie primaire évitée [kWhp]
Pompe à chaleur	Ménage économe	Avec DWHR	8.656	15.532
		Sans DWHR	24.188	
	Ménage moyen	Avec DWHR	19.931	31.227
		Sans DWHR	51.158	
	Ménage dissipateur	Avec DWHR	36.445	50.439
		Sans DWHR	86.884	
Chauffe-eau au gaz	Ménage économe	Avec DWHR	19.244	34.531
		Sans DWHR	53.775	
	Ménage moyen	Avec DWHR	44.310	69.421
		Sans DWHR	113.731	
	Ménage dissipateur	Avec DWHR	81.023	112.135
		Sans DWHR	193.158	
Chauffe-eau électrique	Ménage économe	Avec DWHR	39.992	71.760
		Sans DWHR	111.752	
	Ménage moyen	Avec DWHR	92.081	144.267
		Sans DWHR	236.348	
	Ménage dissipateur	Avec DWHR	168.377	233.029
		Sans DWHR	401.406	

3.1. Analyse de la sensibilité des paramètres

Les études de l'économie énergétique, de la rentabilité économique, et de la pertinence environnementale ont démontré que les résultats sont très dépendants du comportement du ménage, pour ce qui est du débit et de la durée de la douche, et du vecteur énergétique utilisé pour le préparateur d'ECS. Néanmoins, cette section a pour objectif de démontrer l'influence que d'autres paramètres peuvent présenter sur les économies monétaires, énergétiques et d'émissions polluantes après 30 ans.

3.1.1. Taux d'occupation

Un des paramètres essentiels aux performances d'un DWHR est le taux d'occupation. Cette influence a déjà été démontrée pour le cas d'un hôtel dans l'étude de Mazur [31]. Le Tableau 16 illustre l'influence du taux d'occupation, après 30 ans, sur les économies d'énergie, la valeur actuelle nette et les émissions de CO₂ selon les divers préparateurs d'ECS.

Cette simulation a été réalisée pour des ménages comportant une seule douche, même dans le cas de 5 occupants. Toutefois, certains DWHR peuvent être reliés à deux douches en même temps puisque leur débit maximal le permet. À titre d'exemple, le dispositif *Zypho Pipe 65* accepte un débit maximal de 25 l/min, cela signifie que deux douches de 12,5 l/min peuvent être reliées à ce DWHR. Cette spécificité n'est donc pas prise en compte dans cette simulation.

Tableau 16: Analyse de la sensibilité du taux d'occupation sur les trois domaines d'étude après 30 ans

Nombre d'occupants	Type de ménage	Pompe à chaleur			Chauffe-eau au gaz			Chauffe-eau électrique		
		Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]
1	Économe	1.946	-609	233	10.277	-549	1.409	8.992	82	1.077
	Moyen	3.913	-416	548	20.661	-296	3.244	18.079	972	2.481
	Dissipateur	6.321	-180	1.002	33.373	14	5.932	29.202	2.063	4.536
2	Économe	3.893	-418	466	20.554	-299	2.818	17.985	963	2.155
	Moyen	7.826	-33	1.095	41.322	208	6.488	36.157	2.745	4.962
	Dissipateur	12.641	439	2.003	66.747	828	11.864	58.403	4.926	9.073
3	Économe	5.839	-227	700	30.831	-48	4.227	26.977	1.845	3.232
	Moyen	11.739	351	1.643	61.984	712	9.732	54.236	4.517	7.443
	Dissipateur	18.962	1.059	3.005	100.120	1.642	17.796	87.605	7.789	13.609
4	Économe	7.786	-36	933	41.108	203	5.636	35.9697	2.726	4.310
	Moyen	15.652	735	2.191	82.645	1.216	12.976	72.314	6.290	9.924
	Dissipateur	25.283	1.679	4.006	133.494	2.457	23.728	116.807	10.652	18.146
5	Économe	9.732	154	1.166	51.385	454	7.045	44.962	3.608	5.387
	Moyen	19.566	1.118	2.739	103.306	1.720	16.221	90.393	8.062	12.404
	Dissipateur	31.604	2.298	5.008	166.867	3.271	29.660	146.009	13.515	22.682

3.1.2. Durée du projet

Les résultats de l'analyse de la sensibilité de la durée de vie pour un ménage moyen présents dans le Tableau 17 ont été simulés selon 3 scénarios à savoir une durée de vie de 15 ans, de 30 ans et de 45 ans. Ces valeurs correspondent aux durées de vie généralement annoncée par les fabricants. Néanmoins, dans le cas de la simulation pour 45 ans, les préparateurs d'ECS sont supposés présenter la même durée de vie.

Tableau 17: Analyse de la sensibilité de la durée de vie selon les 3 aspects de l'étude pour un ménage moyen

Préparateur d'ECS	Durée de vie du DWHR								
		15 ans			30 ans			45 ans	
	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]
Pompe à chaleur	5.870	-65	805	11.739	351	1.611	17.609	587	2.416
Chauffe-eau au gaz	30.992	183	4.866	61.984	712	9.732	92.975	999	14.598
Chauffe-eau électrique	27.118	2.594	3.721	54.236	4.517	7.443	81.354	5.608	11.164

3.1.3. Températures d'entrée dans le DWHR

i. Température de l'eau de drainage

La température de l'eau de drainage est fortement dépendante du confort souhaité par les occupants du ménage. C'est pourquoi il est difficile de déterminer une valeur moyenne pour ce facteur. Généralement, cette valeur oscille entre 36°C et 42°C.

Selon la norme néerlandaise *NEN 7120*, la température de l'eau de drainage doit être de 40°C pour réaliser les tests d'évaluation des performances d'un DWHR. En revanche, la norme canadienne, intitulée « *B55.1-15 Méthode d'essai pour mesurer l'efficacité et la perte de pression des récupérateurs de chaleur des eaux de drainage* », indique que la différence de température entre l'eau de drainage et de l'eau de ville doit être de 28°C. Ainsi, les valeurs présentent dans la littérature scientifique sont généralement 38°C et 40°C voire plus rarement, 42°C.

Tableau 18: Analyse de la sensibilité de la température des eaux de drainage selon les 3 aspects d'étude pour un ménage moyen

Préparateur ECS	Température de l'eau de drainage								
		38°C			40°C			42°C	
	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	VAN [€]	CO ₂ évité [kg]
Pompe à chaleur	10.943	273	1.507	11.739	351	1.611	12.536	429	1.715
Chauffe-eau au gaz	57.778	610	9.102	61.984	712	9.732	66.190	815	10.363
Chauffe-eau électrique	50.555	4.156	6.960	54.236	4.517	7.443	57.916	4.878	7.925

ii. Température de l'eau de ville

Dans la simulation de la température de l'eau de ville via le logiciel *TRNSYS* (Figure 18, page 51), la variation saisonnière est très marquée. En outre, les articles scientifiques de la revue de la littérature ne concordent pas sur une valeur moyenne de la température de l'eau de ville puisqu'elle dépend fortement de différents facteurs, notamment de la situation géographique. De la même manière, les normes néerlandaise *NEN 7120* et canadienne *B55.1-15* présentent des valeurs différentes à savoir respectivement 10 et 12°C.

Ainsi, le Tableau 19 présente l'influence de la température de l'eau de ville sur les économies d'énergie, la valeur actuelle nette et la quantité de CO₂ évitée après 30 ans pour un ménage moyen.

Tableau 19: Analyse de la sensibilité de la température de l'eau de ville selon les 3 aspects d'étude pour un ménage moyen

Préparateur ECS	Température de l'eau de ville								
	Énergie évitée [kWh]	8°C VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	10°C VAN [€]	CO ₂ évité [kg]	Énergie évitée [kWh]	12°C VAN [€]	CO ₂ évité [kg]
Pompe à chaleur	12.578	433	1.706	11.739	351	1.611	10.901	269	1.516
Chauffe-eau au gaz	66.411	820	10.309	61.984	712	9.732	57.556	604	9.156
Chauffe-eau électrique	58.110	4.897	7.883	54.236	4.517	7.443	50.362	4.137	7.002

3.1.1. Données économiques

i. Taux d'actualisation

L'influence du taux d'actualisation qui s'exerce uniquement sur la rentabilité économique est étudiée pour un ménage moyen dans le Tableau 20. La valeur du taux d'actualisation est généralement de 5% dans les articles scientifiques analysés. Toutefois, cette valeur peut être inférieure comme dans les écrits de Lebègue [7] ou de Montmarquette et Scott [88]. La valeur de 7% n'a jamais été observée par l'auteur, mais l'étude de celle-ci permet d'identifier l'influence de l'augmentation du taux d'actualisation sur la rentabilité économique du projet traduite par la valeur actuelle nette, le taux de rentabilité interne et le temps de retour.

Tableau 20: Analyse de la sensibilité du taux d'actualisation sur la rentabilité économique après 30 ans pour un ménage moyen

Préparateur d'ECS	Taux d'actualisation								
	VAN [€]	3% TRI [%]	TR [ans]	VAN [€]	5% TRI [%]	TR [ans]	VAN [€]	7% TRI [%]	TR [ans]
Pompe à chaleur	690	8	14	351	8	16-17	116	8	22
Chauffe-eau au gaz	1.148	11	10	712	11	11-12	409	11	13-14
Chauffe-eau électrique	6.082	65	1-2	4.517	65	1-2	3.434	65	1-2

ii. Augmentation du coût de l'énergie

Dans ce travail, l'augmentation du coût de l'énergie a été déterminée par la méthode du professeur Kheiri. Les valeurs qui en résultent correspondent approximativement à 1% d'augmentation. Cependant, l'augmentation dans la littérature scientifique varie entre 1 et 4% pour l'électricité et 1 à 5% pour le gaz. Ainsi, dans cette analyse de sensibilité, l'influence du coût de l'énergie est étudiée de façon à identifier l'impact d'une forte augmentation comme dans les articles scientifiques. L'impact du coût de l'énergie est observable uniquement sur la rentabilité économique, c'est pourquoi les résultats de la valeur actuelle nette, du taux de rentabilité interne et du temps de retour sur investissement sont représentés dans le Tableau 21 pour un ménage moyen durant 30 années.

Tableau 21: Analyse de la sensibilité de l'augmentation du coût de l'énergie sur la rentabilité économique après 30 ans pour un ménage moyen

Préparateur d'ECS	Augmentation du coût de l'énergie								
	Pas d'augmentation			1%			2%		
	VAN [€]	TRI [%]	TR [ans]	VAN [€]	TRI [%]	TR [ans]	VAN [€]	TRI [%]	TR [ans]
Pompe à chaleur	217	7	19	351	8	16-17	481	9	15-16
Chauffe-eau au gaz	576	11	12-13	712	11	11-12	863	15	10-11
Chauffe-eau électrique	3.561	36	3-4	4.517	65	1-2	5.116	40	2-3

V. DISCUSSION

Cette section a pour objectif d'interpréter les résultats des parties théoriques et pratiques au regard des objectifs de ce travail et des études scientifiques de la revue de la littérature.

D'une part, les éléments clés de la partie théorique seront rappelés dans cette section afin d'exposer la méthode de sélection de la technologie la plus adaptée à l'étude de cas de ce travail.

D'autre part, concernant la partie pratique, les résultats des simulations présentés précédemment seront discutés et comparés aux conclusions des études examinées dans l'analyse bibliographique. Chaque aspect couvert par ce travail (énergétique, économique et environnemental) va être étudié afin de déterminer les facteurs essentiels à l'économie d'énergie, à la rentabilité économique et à la pertinence environnementale. De plus, les résultats de l'analyse de la sensibilité de certains paramètres seront examinés.

1. Partie théorique

La partie théorique de ce travail avait pour objectif, dans le contexte d'un lotissement résidentiel, d'identifier la faisabilité et les contraintes techniques des trois systèmes de récupération de la chaleur c'est-à-dire le système individuel à partir des eaux grises, le système combiné à partir des eaux grises et le système combiné à partir des eaux usées.

Pour cela, ce travail a d'abord étudié la consommation d'eau chaude sanitaire et les rejets d'eaux usées. De manière générale, plusieurs facteurs déterminent la variabilité de la consommation d'eau comme la situation géographique, le nombre d'occupants dans un ménage, le prix de l'eau... [36], [45], [57]. Cette variabilité de la consommation de l'eau entraîne la fluctuation des rejets d'eaux usées. Concernant la consommation de l'eau chaude sanitaire, le travail a démontré qu'elle s'effectue au niveau de différents postes de consommation selon des horaires et des températures différents. Les rejets d'eaux usées présentent donc de l'eau chaude sanitaire dégradée dont la composition, le débit et le potentiel de récupération énergétique sont variables. De fait, les eaux grises qui résultent de la cuisine et de la salle de bain consistent à de l'eau dont la qualité est faiblement altérée et la température est élevée (30 à 40°C) [35], [36]. En revanche, les eaux usées se composent d'une concentration élevée d'impuretés et d'une température faible (14 à 18°C) [16], [36], [58].

Pour ce qui est de la sélection du système de récupération de la chaleur, ce travail a présenté les différentes technologies existantes en identifiant, de manière générale, les qualités et les contraintes de chacune. Puis, ces technologies ont été confrontées aux réalités du projet du lotissement résidentiel dont la configuration sous forme de lotissement ne permet pas d'exploiter le haut potentiel des systèmes combinés. De fait, cette configuration induit de pertes thermiques élevées. En outre, la quantité journalière d'eaux usées est insuffisante pour permettre l'utilisation de ces technologies. Ainsi, la partie théorique a permis de sélectionner le système de récupération de la chaleur des eaux grises. Enfin, le présent travail considère que la récupération de la chaleur présente le plus haut potentiel au niveau des eaux de drainage de la douche puisque les autres postes de consommation de l'ECS montrent des désavantages comme l'encrassement, le temps de puisage...

2. Partie pratique

La partie pratique de ce travail consiste à plusieurs simulations afin d'étudier la pertinence énergétique, économique et environnementale d'un DWHR selon différents scénarios et préparateurs d'ECS sur base d'hypothèses représentatives du Grand-Duché de Luxembourg.

La première étape des simulations a été de définir la consommation énergétique pour l'eau chaude sanitaire destinée à la douche. Puisqu'aucun pourcentage de la consommation d'ECS liée à la douche n'a été trouvé par rapport à la consommation pour l'ECS totale, ce travail considère différents scénarios de consommation énergétique. Ainsi, les scénarios économe (35 litres par douche), moyen (74 litres par douche) et dissipateur (125 litres par douche) ont été définis selon les analyses des articles scientifiques, pour la simple raison d'obtenir des résultats caractéristiques de l'ensemble de la population. L'objectif global de cette partie est de démontrer l'intérêt de l'utilisation d'un DWHR selon différentes caractéristiques des ménages comme le préparateur d'ECS, l'écoulement du pommeau de douche, le nombre d'occupants... Ainsi, en démontrant cet intérêt pour les dimensions énergétiques, économiques et environnementales, ce travail veut prouver l'utilisation possible de cette technologie à grande échelle pour améliorer l'efficacité énergétique du secteur résidentiel.

2.1. Dimension énergétique

La **première simulation** concernant le domaine énergétique (point IV.3.2, page 62) a permis d'établir les économies d'énergie liées à l'utilisation d'un DWHR. Dans ce cas, seule l'énergie utile requise par le ménage pour chauffer l'eau de la douche a été simulée, c'est-à-dire que l'énergie consommée par le préparateur d'ECS n'a pas été calculée. Cette simulation comporte deux parties, la première a pour objectif de démontrer l'intérêt des scénarios comportementaux (Figure 22, page 63). La seconde consiste à l'analyse des économies énergétiques selon les trois scénarios définis (Figure 23, page 64).

Dans la première partie, la Figure 22 présente les économies d'énergie annuellement réalisées grâce à un DWHR en fonction de la **durée de la douche** et du débit de celle-ci. L'influence importante de la durée de la douche sur les économies d'énergie est incontestable. Selon Gerin [21], d'un point de vue dynamique, la durée de la douche impacte considérablement l'efficacité du DWHR. De fait, le temps de réchauffage du DWHR, qui dépend de son inertie thermique, affecte son efficacité. Ainsi, son efficacité maximale sera atteinte seulement après un certain temps [21]. Néanmoins, ce travail se base sur des simulations statiques qui attestent tout de même l'impact de la durée de la douche. En effet, les économies d'énergie pour une durée de douche de 10 minutes démontrent une augmentation de 25% par rapport à celle de 8 minutes et de 67% pour la douche de 6 minutes. Il ne faut toutefois pas oublier le fait que, malgré les économies d'énergie plus importantes, la consommation énergétique est également beaucoup plus grande pour la douche de 10 minutes.

De la même manière que pour la durée de la douche, le **débit d'écoulement de l'eau** a une certaine influence sur les économies d'énergie puisque la douche de 12,5 l/min démontre une économie de 95% supérieure à celle de 5,8 l/min et 30% par rapport à celle de 9,2 l/min. La Figure 22 met donc en lumière l'importance d'établir des scénarios comportementaux pour les simulations de ce travail. En effet, les économies d'énergie diffèrent de manière trop importante en fonction du comportement des ménages. Par conséquent, il y a un intérêt fort à utiliser les scénarios comportementaux dans les simulations au lieu d'un seul scénario composé de valeurs moyennes. De plus, la plupart des fabricants promettent une rentabilité généralement associée au cas le plus favorable comme cela sera démontré plus tard.

Dans la seconde partie, la Figure 23 illustre les résultats des économies énergétiques annuelles en fonction du **comportement de chaque ménage**. Comme pour la Figure 22, les résultats indiquent que l'utilisation d'un DWHR garantit une réduction importante de la consommation énergétique. En effet, pour le **ménage économe**, une diminution de **64%** de la demande énergétique en ECS pour la douche par rapport à la demande initiale est observée. Pour les **ménages moyen et dissipateur**, les valeurs équivalent respectivement à **61** et **58%**. La diminution plus importante pour le ménage économe provient de la meilleure efficacité du DWHR vis-à-vis d'un débit plus faible (68,8% pour 5,8l/min ; 65,4% pour 9,2 l/min et 62,2 pour 12,5l/min). La différence entre les pourcentages de la diminution énergétique et l'efficacité du DWHR peut s'expliquer par le coefficient ($\alpha=95\%$) qui tient compte des pertes (5%) de l'ECS par évaporation, fuites... dans la douche. Dans ce travail, comme l'a démontré l'étude [34], la quantité d'énergie économisée est proportionnelle à la quantité d'eau consommée. De fait, les économies d'énergie réalisée par le ménage économe représentent seulement la moitié des économies du ménage moyen et moins du tiers du ménage dissipateur.

La **deuxième simulation** de la partie énergétique, illustrée à la Figure 24 (page 64), étudie les économies d'énergie pour un ménage moyen en fonction du **vecteur énergétique utilisé** par le préparateur d'ECS. Les économies de l'énergie finale pour ce scénario s'élèvent à 61% de la consommation énergétique initiale, comme démontré précédemment pour le ménage moyen. Ces économies annuelles d'énergie finale correspondent à 391 kWh pour la pompe à chaleur, 2.066 kWh pour le chauffe-eau au gaz et 1.679 kWh pour le chauffe-eau électrique. Ces valeurs démontrent l'importance d'un DWHR, surtout pour une période de 30ans puisque les économies seront considérables. En outre, cela prouve que le chauffe-eau au gaz constitue le préparateur d'ECS le plus énergivore. Concernant ce préparateur, étant donné que 1 m³ de gaz équivaut à 10 kWh, le DWHR permet une économie annuelle de 207 m³ de gaz pour le ménage moyen, ce qui revient à environ 6.200 m³ après 30 ans. Ainsi, la part d'énergie économisée ne dépend pas du préparateur d'ECS, mais plutôt du comportement du ménage puisque les économies d'énergie correspondent aux valeurs identifiées précédemment à savoir, 64, 61 et 58% pour les ménages économes, moyens et dissipateurs.

Bien que les préparateurs d'ECS n'influencent pas la part d'énergie économisée par le DWHR, la consommation énergétique finale est quant à elle très affectée. De fait, la consommation de la pompe à chaleur est très faible par rapport aux chauffe-eaux électrique et au gaz étant donné son coefficient de performance élevé. Un facteur de 4,6 sépare la consommation de la pompe à chaleur à celle du chauffe-eau électrique, tandis que le facteur pour le chauffe-eau au gaz est de 5,3. Cela implique que, pour la même part d'économie énergétique la quantité d'énergie finale annuellement évitée est beaucoup plus élevée pour les chauffe-eaux au gaz et électrique que la pompe à chaleur.

En outre, l'utilisation d'un DWHR représente également un avantage financier important. Les économies d'énergie pour un ménage moyen associé à une pompe à chaleur constituent un coût évité de 2.335 euros après 30 ans en prenant en considération le prix actualisé de l'électricité. Pour le chauffe-eau électrique, ces économies équivalent à 10.019 euros. Par contre, pour le chauffe-eau au gaz, les économies s'élèvent seulement à 3.031 euros en raison du coût de l'énergie plus faible.

Les études [34], [44] confirment les conclusions de la partie énergétique de ce travail. Néanmoins, les résultats de ce travail sont plus élevés puisque les performances du DWHR et des préparateurs d'ECS y sont plus importantes. La quantité d'énergie évitée augmente donc proportionnellement avec la consommation de l'eau comme illustrée à la Figure 22. Ainsi, il est aisé de comprendre la pertinence

de l'application d'un tel système dans un hôtel, un centre sportif, une piscine, un immeuble résidentiel...

2.1. Dimension économique

Les résultats de la dimension énergétique ont démontré que les économies d'énergie grâce à un DWHR sont importantes. En outre, il a été également prouvé que les économies monétaires peuvent être considérables lorsque l'on tient compte du coût de l'énergie. Cette sous-section a pour objectif d'approfondir l'étude économique de l'implémentation d'un DWHR. Pour cela, la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rentabilité interne (TRI) et le temps de retour (TR) ont été calculés.

Tout d'abord, de la même manière que pour le domaine énergétique, la Figure 25 (page 65) présente l'évolution de la **valeur actuelle nette en fonction de la quantité d'eau chaude sanitaire consommée**, c'est-à-dire en fonction de la durée et du débit de la douche. Il en résulte qu'une consommation élevée en ECS induit une valeur actuelle nette élevée. En effet, dans ce travail, les recettes des simulations économiques correspondent aux dépenses évitées. Autrement dit, le montant de l'économie d'énergie correspond à la recette de ce projet. C'est pourquoi la Figure 22, qui illustre la quantité d'énergie évitée en fonction de la consommation d'ECS, indique des résultats similaires à la Figure 25.

Ensuite, **la première partie de l'étude de la rentabilité économique** consiste à définir la VAN, le TRI et le TR pour chaque préparateur d'ECS en fonction du **comportement des ménages**. Les résultats des Figure 26, Figure 27 et Figure 28 sont résumés dans le Tableau 22 afin de faciliter leur lecture. Ce tableau montre de manière évidente que plus la VAN ou le TRI sont élevés, plus le TR est faible. En outre, une VAN négative implique que le projet n'est pas rentable pour la durée déterminée.

Tableau 22: Résumé des résultats obtenus dans le point IV.3.3.1, page 65

Préparateur d'ECS	Type de ménage	VAN [€]	TRI [%]	TR [années]
Pompe à chaleur	Ménage économe	-228	2%	-
	Ménage moyen	351	8%	±17
	Ménage dissipateur	1.059	14%	9-10
Chauffe-eau au gaz	Ménage économe	-48	4%	-
	Ménage moyen	712	15%	11-12
	Ménage dissipateur	1.643	19%	6-7
Chauffe-eau électrique	Ménage économe	1.845	20%	6-7
	Ménage moyen	4.517	39%	2-3
	Ménage dissipateur	7.789	63%	1-2

Ainsi, pour le ménage au comportement économe, l'implémentation d'un DWHR n'est rentable que dans le cas du chauffe-eau électrique, puisque la VAN du projet est positive. Dans ce cas, après 30 ans, les économies réalisées par le ménage équivalent à 1.845 € et le TRI est 4 fois supérieur au taux d'actualisation défini dans les hypothèses.

Pour le ménage moyen, les résultats des simulations de l'utilisation d'un DWHR présentent une rentabilité économique, quel que soit le préparateur d'ECS. Néanmoins, les paramètres de rentabilité économique sont très variables en fonction du vecteur énergétique utilisé. Par exemple, la VAN pour la pompe à chaleur est 13 fois moins élevée que pour le chauffe-eau électrique. Ainsi, le

ménage moyen présente des économies monétaires importantes. Cela se traduit par un TR de 17 ans pour la pompe à chaleur et de 2,5 années pour le chauffe-eau électrique.

Quant au ménage dissipateur, son comportement est très favorable à la rentabilité économique d'un DWHR. De fait, sa consommation accrue en ECS permet d'obtenir un taux de rentabilité interne de 14% pour la pompe à chaleur, 19% pour le chauffe-eau au gaz et 63% pour le chauffe-eau électrique. Cela signifie que dans la dernière situation, l'implémentation d'un DWHR permet de gagner annuellement 0,63 fois l'investissement initial, pour obtenir après 30 ans, 7.789 euros d'économie. Ainsi, dans la situation la plus rentable, à savoir le chauffe-eau électrique, le temps de retour sur investissement est situé entre la première et la deuxième année.

Cette simulation économique témoigne de l'importance des scénarios comportementaux des ménages sur la rentabilité d'un DWHR. Le ménage dissipateur présente évidemment une rentabilité économique très importante en comparaison des autres ménages. Il est également intéressant de constater la rentabilité du ménage moyen pour les chauffe-eaux au gaz et électrique. En revanche, le ménage économe expose des résultats favorables uniquement pour le chauffe-eau électrique.

Pour ce qui est de **l'incidence des préparateurs d'ECS** sur la rentabilité économique du DWHR, cela résulte principalement de l'efficacité des systèmes et du vecteur énergétique utilisé. D'une part, l'efficacité du système est tenue responsable de cette influence puisqu'une faible consommation énergétique initiale, sans DWHR, induit de faibles économies énergétiques ainsi que financières. C'est le cas de la pompe à chaleur dont le coefficient de performance élevé (4,4) permet une consommation énergétique 4,6 fois inférieure au chauffe-eau électrique. D'autre part, le vecteur énergétique utilisé influence clairement la rentabilité économique d'un DWHR en raison du coût variable de l'énergie. En effet, bien que le chauffe-eau au gaz consomme 1,14 fois plus d'énergie que le chauffe-eau électrique, les économies monétaires sont toutefois inférieures à celles réalisées avec le chauffe-eau électrique en raison du coût du gaz (0,043 €/kWh) qui est 4 fois plus petit que celui de l'électricité (0,169 €/kWh).

Ainsi, le chauffe-eau électrique, dont l'efficacité inférieure à la pompe à chaleur et le coût de l'électricité plus élevé que le gaz, permet les économies monétaires les plus importantes même pour une consommation en ECS faible. Après 30 ans, la VAN pour ce préparateur oscille entre 1.845 et 7.789 € et le TR se situe entre 7 et 1 an en fonction du type de ménage. Suit alors le chauffe-eau au gaz, qui présente une bonne rentabilité sauf dans le cas du ménage économe. Quant à la pompe à chaleur, sa rentabilité est assez faible pour les ménages moyen et dissipateur, tandis qu'elle est inexistante pour le ménage économe pour la durée déterminée.

La **deuxième partie de l'étude de rentabilité économique** prend en compte l'investissement initial du préparateur d'ECS et le coût annuel de sa consommation énergétique comme l'illustre la Figure 29 (page 68). Sans l'utilisation d'un DWHR, le chauffe-eau électrique est le préparateur le plus coûteux étant donné les coûts d'exploitation importants, puisque ce système consomme énormément d'énergie. À titre d'exemple, après 30 ans, le coût total d'utilisation d'un chauffe-eau électrique est le double du coût de la pompe à chaleur et 64% plus élevé par rapport au chauffe-eau au gaz. Le deuxième préparateur le plus coûteux est la pompe à chaleur, non en raison d'importants coûts d'exploitation, mais plutôt d'un investissement initial conséquent.

L'utilisation d'un DWHR permet cependant des économies monétaires respectives de 25, 45 et 58% pour la pompe à chaleur, le chauffe-eau au gaz et le chauffe-eau électrique. Cette réduction très importante des coûts permet au chauffe-eau électrique de diminuer fortement l'écart qu'il

présente avec la pompe à chaleur (Figure 29). De fait, la différence entre ces préparateurs était, sans DWHR, de 7.972 euros. Mais, l'utilisation du DWHR permet de réduire cet écart à 288 euros. Cela renforce l'idée qu'un DWHR associé à un chauffe-eau électrique est très pertinent d'un point de vue économique, puisqu'elle permet une rentabilité importante. Le chauffe-eau au gaz est le préparateur d'ECS exposant les coûts les plus faibles. De fait, il présente un investissement initial faible (mais tout de même plus élevé que le chauffe-eau électrique), et surtout des coûts d'exploitation très bas dus au prix du gaz. C'est pourquoi, après 30 ans, ce préparateur a un coût total équivalent à la moitié des autres, comme illustré sur la Figure 29.

Au regard de la **littérature scientifique**, les conclusions des chercheurs convergent toutes vers les mêmes résultats que ce travail, à savoir que le chauffe-eau électrique présente la meilleure rentabilité pour l'implémentation d'un DWHR [27], [31]–[33], [35], [45], [46].

La raison qui émane généralement des publications scientifiques pour expliquer la supériorité du chauffe-eau électrique est la différence importante du coût de l'énergie [32], [35], [45], [46], [52]. Dans ce travail, la différence entre ces coûts est très forte puisqu'un facteur de 4 sépare les prix unitaires du gaz et de l'électricité, tandis que pour certaines études ce facteur est plus faible. De fait, dans l'étude [52], le facteur séparant les coûts de l'énergie est de 1,5 et, malgré ce faible écart, la rentabilité économique du chauffe-eau au gaz est fortement impactée.

En ce qui concerne le temps de retour sur investissement, Kordana et Slyš [33] affirment dans leur étude que : *« plus la consommation d'eau est élevée, plus la période d'amortissement est courte, ce qui confirme que les conditions particulièrement favorables à l'utilisation de l'unité DWHR peuvent être trouvées dans les bâtiments ayant une forte demande en eau chaude »*. Cette affirmation a également été observée dans ce travail puisque l'installation d'un DWHR chez le ménage dissipateur présente toujours la meilleure TR. Selon la même étude, le temps de retour sur investissement pour un DWHR associé à un chauffe-eau électrique se situe entre 2,5 et 10 ans en fonction des différentes variantes [33]. Au regard du Tableau 22, le bâtiment équipé d'un chauffe-eau électrique présente un TR oscillant entre 1 et 7 ans, ce qui concorde avec l'étude [33]. Cela correspond également à l'étude [45] qui indique que le TR pour un chauffe-eau gaz est 4,7 fois plus élevé que pour le chauffe-eau électrique. Ce facteur de 4,7 est respecté pour le chauffe-eau au gaz puisque le TR pour le ménage moyen passe de 11,5 à 2,5 ans et pour le ménage dissipateur la valeur de 6,5 devient 1,5. Alors que les résultats de la simulation pour le ménage économe ne présentent pas de temps de retour sur investissement pour la durée du projet. De manière générale, les résultats de la rentabilité économique correspondent aux conclusions des études reprises dans le tableau 7 (page 47).

Les fabricants de DWHR affichent généralement un TR inférieur à 5 années dans leurs annonces. Les résultats de ce travail montrent que seuls les ménages moyen et dissipateur équipés d'un chauffe-eau électrique atteignent cette rentabilité. De plus, pour le produit *Recoh-vert 21-V3*, le fabricant annonce une économie annuelle de 200 à 300 m³ de gaz grâce à l'utilisation d'un DWHR [94]. Ces économies annuelles correspondent aux résultats présentés par le ménage moyen et le ménage dissipateur pour le chauffe-eau au gaz. Ainsi, de manière générale, les fabricants affichent une rentabilité économique très alléchante par rapport à leur produit, ces valeurs correspondent souvent au cas le plus favorable des simulations.

2.2. Dimension environnementale

La troisième dimension couverte par ce travail, la dimension environnementale, est généralement omise dans les études scientifiques qui considèrent qu'elle est implicitement couverte par la réduction de l'énergie. Ce travail porte cependant une attention particulière à cet aspect puisque le projet du lotissement résidentiel s'inscrit dans le développement durable et la rationalisation de l'énergie. C'est la raison pour laquelle le produit *Recoh-Vert 21-V3*, plus performant, mais moins rentable économiquement, a été sélectionné au détriment du produit *Zypho Pipe 65*. Ainsi, cette sous-section présente les résultats de la partie IV.3.4 (page 69) qui compare l'utilisation d'énergie primaire et les émissions de CO₂ en présence et en l'absence d'un DWHR. De manière générale, les réductions des émissions de CO₂ et de l'énergie primaire démontrent les mêmes pourcentages que pour la consommation énergétique. En effet, les ménages **économe**, **moyen** et **dissipateur** présentent respectivement, grâce à l'utilisation du DWHR, une diminution des externalités négatives faites à l'environnement de **64**, **61** et **58**%.

En ce qui concerne la **comparaison des émissions de CO₂**, l'étude de Bartkowiak et al [37] a défini la réduction annuelle des émissions de CO₂ grâce à l'utilisation d'un DWHR pour un ménage américain moyen. Les résultats indiquent qu'un DWHR permet de réduire 300 kg de CO₂/an pour l'association avec un chauffe-eau au gaz et 1,5 tonne de CO₂/an pour le chauffe-eau électrique. Dans le présent travail, les émissions de CO₂ annuellement évitées s'élèvent de 253 (ménage économe) à 851 kg (ménage dissipateur) de CO₂/an pour le chauffe-eau au gaz. Quant au chauffe-eau électrique, cette valeur oscille de 194 à 628 kg. Les résultats ne concordent donc pas avec l'étude américaine [37]. Cette variance peut s'expliquer par la consommation énergétique plus élevée des ménages américains. En outre, les facteurs d'émissions de CO₂ sont très variables en fonction du mix des sources énergétiques. De fait, l'étude [25] présente des résultats similaires à ce travail sauf pour le chauffe-eau au gaz.

La Figure 30 montre que l'utilisation d'un DWHR combinée à un chauffe-eau au gaz présente la plus grande réduction des émissions de CO₂, soit environ 15,5 tonnes de CO₂ pour le ménage moyen pour la durée de 30 ans. Cependant, le chauffe-eau au gaz surpasse les autres préparateurs au niveau des émissions de CO₂ en raison de sa grande consommation énergétique et du facteur d'émission de CO₂ légèrement supérieur pour ce vecteur énergétique. Le chauffe-eau électrique émet quant à lui 30% d'émission CO₂ de moins que le chauffe-eau au gaz, c'est donc le deuxième préparateur d'ECS le plus émetteur de CO₂. Finalement, la pompe à chaleur représente le préparateur d'ECS le plus propre, car ses émissions de CO₂ sont réellement faibles, à savoir 6 fois moindres que le chauffe-eau au gaz.

L'utilisation d'un DWHR permet d'éviter une quantité de CO₂ considérable. Pour le ménage économe, 1,25 à 5,80 tonnes de CO₂ peuvent être évitées sur une période de 30 ans. Ces valeurs correspondent de 2,52 à 11,64 tonnes pour le ménage moyen et 4,16 à 18,84 tonnes pour le ménage dissipateur. À titre d'information, 1 tonne de CO₂ équivaut à l'utilisation de la pompe à chaleur de ce travail durant 8 ans pour un ménage moyen sans DWHR ou bien 2 ans dans le cas d'un chauffe-eau électrique. Les récupérateurs de chaleur à partir des eaux grises démontrent donc un potentiel de réduction des émissions de CO₂ incontestable.

À propos des **économies d'énergie primaire**, le Tableau 15 illustre les réductions importantes liées à l'utilisation d'un DWHR. Par contre, c'est le chauffe-eau électrique qui est cette fois le plus gros consommateur d'énergie primaire, suivi du chauffe-eau au gaz, et enfin de la pompe à chaleur. Le chauffe-eau électrique, bien qu'il consomme moins d'énergie finale que le chauffe-eau au gaz,

nécessite plus d'énergie primaire puisque la production d'un kilowatt-heure électrique entraîne la consommation de 2,66 kWh d'énergie primaire dus aux pertes de production et de distribution.

2.3. Analyse de la sensibilité des paramètres

Une fois que la consommation énergétique, la rentabilité économique et la pertinence environnementale de l'utilisation d'un DWHR ont été démontrées, l'analyse de la sensibilité des paramètres a pour objectif d'identifier les facteurs déterminants des trois dimensions de l'étude. De fait, cette analyse de la sensibilité, dont les résultats se trouvent à la sous-section IV.3.1 (page 71), consiste à identifier l'incidence de la variation de certains paramètres sur les trois dimensions.

2.3.1. *Taux d'occupation*

Toutes les simulations ont été effectuées sur l'hypothèse de ménages composés de 3 personnes, que ces ménages se comportent de manière économe, moyenne ou dissipatrice. Néanmoins, dans la réalité, cette valeur est très variable et dépend notamment du type de maison. Le projet du lotissement résidentiel porte sur un lotissement de 16 maisons unifamiliales dont les surfaces sont variables et permettent d'accueillir des ménages de 1 à 5 personnes. L'influence du taux d'occupation des ménages va donc être étudiée au niveau des économies d'énergie, de la valeur actuelle nette et des émissions de CO₂.

Le Tableau 16 (page 71) présente les résultats de cette analyse pour un taux d'occupation variant de 1 à 5 personnes. Par rapport à la situation initiale (3 occupants), le ménage d'un seul occupant présente des résultats correspondant logiquement au tiers de la situation initiale **en ce qui concerne l'énergie et les émissions de CO₂ évitées**. De la même manière, le ménage de 2 occupants présente une réduction d'un facteur de 1,5. Pour ce qui est des ménages de 4 et 5 personnes, les valeurs sont plus élevées de respectivement 1,33 et 1,67. Ainsi, les résultats évoluent linéairement en fonction du nombre de personnes. En effet, un nombre plus élevé d'occupants entraîne inévitablement une plus grande consommation d'ECS, ce qui, comme déjà expliqué, est favorable à l'utilisation d'un DWHR

Du point de vue de la **rentabilité économique** (Tableau 16), l'analyse des résultats a été réalisée selon les différents types de préparateurs d'ECS. Les résultats de l'analyse de sensibilité pour la pompe à chaleur montrent que le ménage économe est seulement rentable à partir de 5 personnes. Pour le ménage moyen, la rentabilité économique est acquise dès qu'il y a 3 personnes dans le ménage, tandis qu'il ne faut que 2 personnes pour le ménage dissipateur.

En ce qui concerne le chauffe-eau au gaz, le ménage dissipateur présente une rentabilité pour tous les taux d'occupation analysés. Pour le ménage moyen, seul le ménage composé d'un occupant unique ne démontre pas de rentabilité économique. Néanmoins, pour le ménage économe, la rentabilité économique est atteinte uniquement pour 4 et 5 occupants.

Quant au chauffe-eau électrique, l'utilisation d'un DWHR présente une rentabilité économique pour n'importe quel ménage et taux d'occupation. La valeur actuelle nette après 30 ans est très importante dans le cas de 5 occupants, par exemple pour le ménage dissipateur, elle vaut 22.682 €.

Ainsi, comme l'indique l'étude [33], l'investissement dans un DWHR présente généralement très peu de risques d'échec économique de l'investissement lorsqu'il y a une grande utilisation de l'ECS comme pour le ménage dissipateur. Concernant le chauffe-eau au gaz, l'étude canadienne de Frankowski [46] affirme que ce préparateur d'ECS peut présenter une rentabilité économique similaire au chauffe-eau électrique seulement si le taux d'occupation est de 14 personnes ou que le prix du gaz augmente

fortement. Dans ce travail, le taux d'occupation doit être de 10 à 11 personnes pour que le chauffe-eau au gaz démontre la même rentabilité que le chauffe-eau électrique en situation initiale (3 occupants). Pour le cas de la pompe à chaleur, le taux d'occupation devrait être de 14 personnes afin d'exprimer des résultats similaires.

2.3.2. *Durée du projet*

Dans ce travail, la durée de vie des simulations correspond à la durée de vie du DWHR annoncée par le fabricant à savoir, 30 ans. Néanmoins, certaines études considèrent une durée plus courte. L'étude [33] utilise la période de garantie du produit, 10 ans, pour déterminer la durée de vie des simulations.

Le Tableau 17 (page 72), dont les données correspondent au cas d'un ménage moyen, montre l'incidence importante de la durée de vie sur les trois dimensions de l'étude. Dans le cas d'une durée de vie plus courte, comme 15 ans, l'énergie et les émissions de CO₂ évitée sont très impactées réduisant donc la pertinence de l'utilisation d'un DWHR. De plus, toutes les situations où le temps de retour sur investissement est situé après 15 ans démontrent une absence de rentabilité économique, ce qui est généralement le cas pour le ménage économe. À l'inverse, une durée de vie plus élevée, par exemple 45 ans, amène le ménage économe à être davantage rentable, sauf dans le cas de la pompe à chaleur.

2.3.3. *Température d'entrée de l'eau dans le DWHR*

i. *Température de l'eau de drainage*

La température de l'eau de drainage est un paramètre difficile à déterminer puisque la sensation de confort thermique de l'être humain est personnelle. Dans ce travail, la température de l'eau de drainage est 40°C comme pour les tests de performance d'un DWHR de la norme *NEN 7120*.

Le Tableau 18 (page 72) illustre les résultats de l'analyse de la sensibilité de ce paramètre pour un ménage moyen. Lorsque la température de l'eau de drainage diminue de 2°C, les économies d'énergie et les émissions de CO₂ évitées sont impactées de 6-7% par rapport à la situation normale. Pour ce qui est de la VAN, l'influence de la diminution de la température est plus élevée pour la pompe à chaleur (-29%) que pour le chauffe-eau au gaz (-17%) et électrique (-9%).

Lorsque la température de l'eau de drainage augmente de 2°C, les valeurs de l'énergie et des émissions de CO₂ évitées augmentent de 6%, quel que soit le préparateur. En outre, la VAN augmente dans les mêmes proportions que précédemment, l'augmentation est plus importante pour la pompe à chaleur. Ainsi, les scénarios considérant une température de l'eau de drainage élevée démontrent de meilleurs résultats comme l'affirme l'étude [47].

ii. *Température de l'eau de ville*

Les valeurs de la température de l'eau de ville utilisée dans les études scientifiques varient fortement en fonction de la situation géographique. Néanmoins, comme le démontre le Tableau 19 (page 73), l'influence de cette température est importante sur les résultats. De fait, lorsque la température de l'eau de ville est de 8°C, une augmentation de 6 à 7% de la valeur initiale affecte les économies d'énergie et les émissions de CO₂. Tandis, qu'une température de 12°C impacte négativement de 7 à 8% ces mêmes résultats. Pour la rentabilité économique, elle est impactée plus fortement de la même manière que pour la température des eaux de drainage.

Par conséquent, comme identifiée par l'étude [42], l'efficacité du DWHR augmente lorsque la température de l'eau de ville baisse. L'observation menée par l'étude [37] affirme que l'efficacité des DWHR est meilleure pour les climats froids. Néanmoins, cette étude ne mentionne pas que c'est la

température de l'eau de ville (et non le climat) qui fait la différence. La conclusion de ce travail concernant les températures d'entrée de l'eau dans un DWHR est qu'il s'agit d'un fait thermodynamique : plus l'écart entre la température de l'eau de ville et de l'eau de drainage est élevé, plus le DWHR est efficace.

2.3.4. Données économiques

L'analyse de la sensibilité des données économiques démontre que seule la rentabilité économique est affectée par la variation de ces paramètres, c'est pourquoi le Tableau 20 (page 73) et le Tableau 21 (page 74) présentent les résultats pour la VAN, le TRI et le TR.

i. Taux d'actualisation

Le taux d'actualisation a un impact considérable sur la rentabilité économique puisqu'il est responsable de la courbure de l'évolution de la VAN sur les Figure 26, Figure 27 et Figure 28. Dans le Tableau 20 (page 73), les taux d'actualisation de 3, 5 et 7% sont étudiés en fonction des préparateurs d'ECS pour le ménage moyen. La première constatation peut provenir de l'invariabilité du TRI face aux changements du taux d'actualisation. Cela peut s'expliquer par le fait que le TRI représente également le taux d'actualisation dans le cas où la VAN est nulle.

Pour ce qui est de la **diminution du taux d'actualisation à 3%**, les résultats de la valeur actuelle nette augmentent fortement à savoir, de 96% pour la pompe à chaleur, de 61% pour le chauffe-eau au gaz et de 35% pour le chauffe-eau électrique. A contrario, l'**augmentation du taux d'actualisation à 7%** diminue les résultats de la VAN de 63, 43 et 24% pour la pompe à chaleur, le chauffe-eau au gaz et le chauffe-eau électrique. Dans les deux cas, le TR est faiblement impacté.

Ainsi, le taux d'actualisation a un impact important sur les résultats de la rentabilité économique. Dans ce travail, le taux d'actualisation est assez élevé par rapport à celui de l'Allemagne pour les investissements publics qui est de 3% [7] ou celui de la France qui est de 4% [88].

ii. Coût de l'énergie

Le coût de l'énergie de ce travail correspond aux valeurs du Grand-Duché de Luxembourg de 2018 où l'électricité présente un prix de 0,169 €/kWh et le gaz 0,043 €/kWh. Étant donné que le coût du gaz est quasiment 4 fois plus faible que pour l'électricité, l'association d'un DWHR avec un chauffe-eau au gaz, malgré la consommation énergétique importante, est moins rentable qu'avec un chauffe-eau électrique. L'étude [46] affirme que pour que l'utilisation d'un DWHR soit aussi rentable avec un chauffe-eau au gaz qu'avec l'électrique, le prix du gaz devrait atteindre des valeurs historiques. Dans ce travail, la VAN présentée par le DWHR avec un chauffe-eau électrique pour un ménage moyen après 30 ans est de 4.517 €. Pour que l'association avec un chauffe-eau au gaz atteigne cette même valeur, le prix du gaz devrait être de 0,151 €/kWh. De fait, étant donné la consommation plus élevée du chauffe-eau au gaz, le prix du gaz doit être plus faible que l'électricité pour que l'implémentation d'un DWHR atteigne la même rentabilité. Au regard des statistiques nationales, le gaz n'a jamais présenté un tel coût [87]. Comme expliqué dans la revue de la littérature, une augmentation du coût de l'énergie entraîne indubitablement des recettes plus importantes et donc, une meilleure rentabilité [16], [52].

En ce qui concerne l'augmentation du coût de l'énergie, les valeurs de 1,1% pour l'électricité et 1,05% pour le gaz ont été définies. Le Tableau 21 (page 74) montre l'influence de cette augmentation sur les résultats. De manière générale, si la valeur de l'augmentation du coût de l'énergie est de 1%, les résultats de la VAN diminuent respectivement de 37%, 20% et 13% pour la pompe à chaleur, le chauffe-

eau au gaz et le chauffe-eau électrique. À l'inverse, une augmentation du prix de l'énergie de 2% entraîne une augmentation de la VAN avec les mêmes pourcentages. Quant au TRI et au TR, les valeurs suivent la même tendance, mais de manière plus douce. Cette valeur de l'augmentation est donc primordiale dans cette étude, mais selon le professeur Kheiri, la méthode utilisée ne sous-évalue pas cette valeur.

VI. CAS D'ÉTUDE : PROJET D'UN LOTISSEMENT RÉSIDENTIEL

Cette section a pour objectif d'évaluer l'intérêt d'utiliser des DWHR dans le cadre du projet d'un lotissement résidentiel de la société *Energiepark*. Les analyses et conclusions des sections théoriques et pratiques seront revues pour tenir compte des contraintes spécifiques liées à ce projet. Pour rappel, le lotissement se compose de 16 logements unifamiliaux reliés à un réseau de chaleur, et équipés de pompes à chaleur. Ces contraintes ont été imposées par l'équipe d'*Energiepark* dans une optique d'efficacité énergétique. Le Tableau 24 (page I) présente les données métriques correspondant aux différentes parcelles et maisons ainsi que les données théoriques de consommation du chauffage et de l'ECS. Concernant les sources de chaleur, une pompe à chaleur géothermique d'un coefficient de performance théorique de 4,6 permet de fournir, via un réseau de chaleur, toutes les maisons du lotissement en eaux chaudes à 35°C. Ensuite, au niveau de chaque maison, une pompe à chaleur booster eau-eau est installée pour augmenter la température de l'eau de 35 à 55°C. Pour les calculs préliminaires au projet, le coefficient de performance théorique de cette pompe à chaleur est de 4. Contrairement à la valeur de 4,4 utilisée dans ce travail qui provient des données fournies par le fabricant de la pompe à chaleur sélectionnée pour les simulations.

L'implémentation d'un récupérateur de chaleur des eaux usées s'inscrit dans le contexte de la recherche d'une autonomie et d'une efficacité énergétique maximale du projet. Comme exposé dans la partie théorique, seule la technologie d'un récupérateur de chaleur individuel est possible dans le cas de ce projet. En effet, les systèmes combinés sont incompatibles avec la quantité de rejets d'eaux usées et la configuration du lotissement.

Le choix du DWHR s'est porté sur le produit *Recoh-Vert 21-V3* qui présente de meilleurs résultats du point de vue énergétique et environnemental. Cependant, la décision finale relative au choix du produit restera la responsabilité de l'équipe d'*Energiepark* qui pourrait remettre cette sélection en cause pour des raisons économiques qui pourraient être influencées par des conditions particulières intéressantes faites par les fabricants en raison du nombre d'unités concernées.

Dans la partie pratique IV (page 45), une pompe à chaleur booster de type eau-eau présentant un COP de 4,4 a été comparée au chauffe-eau au gaz et au chauffe-eau électrique. Les simulations de ces dispositifs associés à un DWHR ont permis d'identifier l'intérêt de ces 3 préparateurs. Il en ressort que l'association d'un DWHR avec une pompe à chaleur ne présente pas de rentabilité économique importante vis-à-vis des autres préparateurs d'ECS. Toutefois, les performances énergétiques et environnementales de cette association sont supérieures aux autres préparateurs.

Tableau 23: Simulation de l'association d'un DWHR avec la pompe à chaleur du projet après 30 ans

Type de ménage	Énergétique		Économique			Environnemental	
	Énergie finale utilisée [kWh]	Énergie finale évitée [kWh]	VAN [€]	TRI [%]	TR [années]	Quantité de CO ₂ évité [kgCO ₂]	Énergie primaire évitée [kWhp]
Ménage économe	3.580	6.423	-170	3	-	1.381	17.086
Ménage moyen	8.242	12.913	466	9	14-15	2.832	34.349
Ménage dissipateur	15.071	20.858	1.245	16	8-9	4.574	55.483

Le Tableau 23 présente les résultats de la simulation de la pompe à chaleur du projet, avec un COP de 4, sur une durée de 30 ans. À propos de la rentabilité économique, de la même manière qu'expliquée précédemment, cette association n'est pas rentable sur une telle durée pour un ménage économe. Pour le ménage moyen, cette simulation démontre une rentabilité faible tandis que pour le ménage dissipateur l'investissement est plus rentable. Cependant, hormis l'aspect économique, les quantités d'énergie finale, d'énergie primaire et d'émissions de CO₂ évitées sont importantes, ce qui justifie l'intérêt de l'implémentation d'un DWHR associé à la pompe à chaleur pour le projet.

Au regard des données théoriques de la consommation des maisons du projet de lotissement (Tableau 24), la moyenne des besoins thermiques utiles requis pour l'ECS totale correspond à 5.484 kWh/an. Si l'on se réfère aux différents scénarios comportementaux, le ménage économe consomme 1.334 kWh/an pour l'ECS de la douche, ce qui constitue 24% des besoins pour l'ECS totale des maisons. Le scénario moyen quant à lui requiert 2.821 kWh/an, ce qui revient à 50% des besoins énergétiques pour l'ECS totale. Pour ce qui est du scénario dissipateur, les 4.991 kWh annuellement requis correspondent à 87% de la consommation totale. Les données théoriques pour le projet semblent donc se baser sur un ménage proche du **comportement moyen** où environ 50% de l'ECS est destiné à la douche.

Ainsi, si l'on considère le ménage moyen, les 5.484 kWh d'énergie thermique utile requis pour l'ECS totale se partagent en 2.821 kWh destinés à l'ECS de la douche et 2.663 kWh pour les autres utilisations de l'ECS. L'association d'un DWHR pour ce type de ménage permet 61% d'économie d'énergie thermique, ce qui réduit 2.821 à 1.099 kWh d'énergie thermique utile pour l'ECS de la douche. Par conséquent, le DWHR **réduit 31% de la demande d'énergie thermique utile de l'ECS totale** puisque la valeur de 5.484 kWh devient 3.762 kWh. Pour ce qui est des besoins thermiques pour l'ECS et le chauffage, ils s'élèvent en moyenne à 10.311 (Tableau 24). L'utilisation du DWHR permet donc de réduire cette valeur de 16%. Ainsi, l'impact de l'utilisation d'un DWHR sur un ménage du projet se traduit par une **réduction de 16% des besoins thermiques utiles totaux**. L'utilisation d'un récupérateur de chaleur individuel à partir des eaux grises consiste donc en un petit dispositif peu cher, mais qui permet d'augmenter de manière intéressante l'autonomie énergétique du projet d'*Energiepark*.

Du point de vue environnemental, l'utilisation du DWHR par un ménage moyen associé à la pompe à chaleur permet d'éviter 2.832 kg de CO₂ et 34.349 kWhp durant les 30 années de la simulation (Tableau 23). En simulant cette association pour les 16 maisons unifamiliales, 45 tonnes d'émissions de CO₂ et 550 MWh d'énergie primaire seront évités sur la période de 30 ans.

Du point de vue du **Grand-Duché de Luxembourg**, en 2017, le STATEC a recensé 236.700 ménages consommant 23.712 TJ, dont 12.337 TJ de gaz et 3.494 TJ d'électricité [11]. Les émissions de gaz à effet de serre liées à ces ménages correspondent à 1.116 kt de CO₂équivalent [STATEC - Document interne]. Dans ce même document, le STATEC a dénombré que 64,5% des ménages se chauffent au gaz et 5,8% se chauffent à l'électricité. Puisque la part des pompes à chaleur n'est pas indiquée dans ce document, le présent travail considère que 20% des ménages se chauffant à l'électricité utilisent une pompe à chaleur ayant un COP de 4, donc 1,16% des ménages, puisque c'est la tendance observée par Peltier [79]. Les simulations vont donc se baser sur 70% des ménages luxembourgeois puisque les combustibles utilisés peuvent être simulés par ce travail (64,5% avec un chauffe-eau au gaz, 4,64% avec un chauffe-eau électrique et 1,16% avec une pompe à chaleur). Ainsi, si 70% des ménages luxembourgeois sont équipés d'un DWHR équivalent au produit de ce travail, les réductions d'énergie finale s'élèvent à **9%** du gaz consommé par tous les ménages luxembourgeois et **2%** pour l'électricité. Tandis que la réduction des émissions de CO₂ totale rejetées par les ménages est de **7%**.

VII. CONCLUSION

Cette étude, à travers les recherches bibliographiques de la partie théorique et des simulations de la partie pratique, a mis en exergue la pertinence des récupérateurs de chaleur, et de manière plus approfondie, des DWHR, pour améliorer l'efficacité énergétique du secteur résidentiel. De fait, quel que soit le scénario utilisé, les simulations de ce travail montrent des résultats toujours favorables à l'économie d'énergie, et par conséquent, à la réduction des émissions de CO₂ liées à cette consommation énergétique. En revanche, une partie des résultats de l'analyse économique de ce travail n'est pas favorable à l'utilisation d'un DWHR dans le contexte des maisons unifamiliales.

Ce travail démontre que l'implémentation d'un récupérateur de la chaleur des eaux usées constitue avant tout, pour le secteur résidentiel, une démarche énergétique et écologique plutôt qu'économique. De fait, les résultats des **dimensions énergétiques et environnementales** mettent en évidence une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ de 64, 61 et 58% pour les scénarios économes, moyens et dissipateurs. L'étude prouve donc qu'un DWHR, ne nécessitant aucune énergie, permet d'améliorer de manière importante l'efficacité énergétique des bâtiments au niveau de l'eau chaude sanitaire liée à la douche pour un investissement modéré.

En ce qui concerne la **dimension économique**, l'utilisation d'un tel système n'est intéressante que si combiné à un chauffe-eau électrique, en raison d'une consommation accrue en électricité et des coûts d'exploitation élevés. Pour ce préparateur d'ECS, la valeur actuelle nette du projet après 30 ans équivaut de 1.845 €, pour le ménage économe, à 7.789 € pour le ménage dissipateur (de 3 personnes). Cette VAN peut même atteindre 22.682 € dans le cas d'un ménage dissipateur composé de 5 occupants. La rentabilité économique est par contre assez faible dans le cas d'un DWHR associé à une pompe à chaleur ou à un chauffe-eau au gaz, le ménage dissipateur (susceptible de faire les économies les plus importantes) ne présente qu'une VAN oscillant de 1.000 à 1.600 € après 30ans. De plus, dans ce cas, un ménage économe ou un taux d'occupation faible n'entraîne pas de retour sur investissement pour la durée du projet. Ainsi, pour l'utilisation d'un DWHR, bien qu'une consommation importante en ECS engendre inévitablement un retour sur investissement plus court, comme annoncé par les fabricants, ce type de comportement n'est pas recommandable. En effet, pour une maison unifamiliale, le recours à un DWHR doit être pensé en priorité avec un esprit d'économie d'énergie puisque consommer davantage dans le but d'augmenter la rentabilité économique du système n'est pas pertinent. Par contre, par les simulations d'un ménage dissipateur, ce travail prouve l'intérêt grandissant de cette technologie dans les bâtiments où la consommation d'ECS est élevée comme les hôpitaux, les hôtels, les centres sportifs, les piscines... et les industries. Dans ce cas, l'argument financier des récupérateurs de chaleur peut par contre être clairement mis en avant.

Outre ces constatations, ce travail a également mis en lumière les **paramètres sensibles** qui influencent l'efficacité de ce type de solution : la consommation d'ECS, déterminée par le taux d'occupation, le débit de la douche et la durée de la douche, est directement responsable de l'efficacité énergétique, économique et environnementale des DWHR. Ensuite, la consommation énergétique destinée à la production d'ECS de la douche est déterminée notamment par la consommation d'ECS, par le vecteur énergétique du préparateur d'ECS, par l'efficacité du préparateur et par les paramètres de températures à l'entrée du DWHR. Enfin, les résultats des simulations peuvent être affectés par d'autres hypothèses imposées dans ce travail. À titre d'exemple, une durée de vie de 30 ans est généralement annoncée par les fabricants. Cette valeur semble pertinente dans le cas d'un DWHR vertical sommaire tel qu'utilisé dans cette étude puisqu'il ne contient aucune pièce mobile ou

électronique et il n'est pas facilement accessible par les utilisateurs de la douche. En revanche, certains DWHR, principalement à orientation horizontale, se complexifient par l'utilisation de technologies électroniques, comme le lavage automatique, et par l'intégration totale du système dans la douche. Dans ce dernier cas, la technologie avancée peut engendrer une durée de vie plus courte que 30 ans, ce qui impacte nettement la pertinence des DWHR.

Les résultats de la revue de la **littérature scientifique** concernant la comparaison des chauffe-eaux au gaz et électrique concordent avec les recherches antérieures. En outre, les simulations de DWHR combinés à une pompe à chaleur constituent une thématique innovante puisque très peu d'études traitent ce préparateur d'ECS. Or, cette technologie prend de l'ampleur au niveau résidentiel en raison de ses performances énergétiques intéressantes. Il faut toutefois noter que la pompe à chaleur simulée dans ce travail annonce un COP de 4,4 pour la préparation de l'ECS, ce qui semble légèrement surévalué. La conséquence de cette surévaluation se répercute négativement sur la rentabilité économique puisque la pompe à chaleur a une consommation énergétique plus faible. Pour le projet d'*Energiepark*, le coefficient de performance théorique pour l'ECS est de 4.

Les données du projet du lotissement résidentiel de la société *Energiepark* ont été simulées dans l'**étude de cas** de ce travail suivant la même approche que celle de la partie pratique. Les résultats des simulations démontrent que la consommation énergétique pour l'ECS destinée aux douches est (très) faible en raison de l'association de la pompe à chaleur au DWHR. De fait, la pompe à chaleur requiert peu d'énergie, mais l'association d'un DWHR permet de réduire encore de 16% les besoins thermiques utiles simulés pour le chauffage et l'ECS du projet. Les émissions de CO₂ sont également très faibles puisqu'elles sont 4,2 fois moins importantes que pour le chauffe-eau électrique et 5,5 fois moins importantes que pour le chauffe-eau au gaz. Par contre, les résultats économiques présentent un temps de retour sur investissement assez long et la valeur actuelle nette après 30 ans est faible. En conséquence, les résultats de l'analyse de l'implémentation d'un DWHR pour un projet de lotissement résidentiel correspondent aux attentes d'*Energiepark* puisque l'efficacité énergétique des maisons unifamiliales est améliorée, ce qui accroît l'autonomie énergétique désirée. Le niveau de rentabilité économique faible ne devrait pas constituer un frein au développement de cette technologie dans le projet puisque l'intention d'*Energiepark* derrière l'installation de récupérateurs de chaleur n'était a priori pas de générer un maximum de profits.

À l'échelle nationale, ce travail a également permis d'identifier la pertinence de cette technologie pour atteindre l'objectif de réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique défini dans le *Plan National intégré en matière d'Énergie et de Climat* du Grand-Duché du Luxembourg. En effet, ce travail démontre l'impact de l'utilisation potentielle d'un DWHR par 70% des ménages luxembourgeois, qui se traduirait par une réduction de 2% de la consommation d'électricité et par une réduction de 9% pour la consommation de gaz. D'un point de vue environnemental, 9% des émissions totales de CO₂ générées par le secteur résidentiel seraient ainsi évitées grâce à l'utilisation des DWHR. La récupération de la chaleur des eaux usées est donc probablement une des stratégies à mettre en œuvre afin de réduire l'empreinte carbone des ménages voire des industries.

Ainsi ce travail a permis de démontrer la pertinence énergétique, environnementale et dans une moindre mesure économique des récupérateurs de la chaleur des eaux usées, qui constituent une source de chaleur fatale de plus en plus importante généralement omise dans le secteur résidentiel. Les récupérateurs de la chaleur des eaux usées constituent donc une réponse efficace dans la recherche perpétuelle d'une efficacité énergétique maximale pour le secteur résidentiel.

V. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. Scholzen, « Energy efficiency of buildings », Luxembourg, 2019.
- [2] J. Hansen, « Sustainable Water and Ressources Management », Luxembourg, 2019.
- [3] Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, *Directive 2012/27/UE du Parlement Européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/CE et 2010/30/UE et abrogeant les directives 2004/8/CE et 2006/32/CE*. Eur-lex, 2012, p. 1-56.
- [4] S. Maas, « Energy Efficiency of Buildings », Luxembourg, 2020.
- [5] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, « La chaleur fatale », Angers, 2017.
- [6] Alto Step, « Étude des opportunités en énergies renouvelables et réseaux communs », Mérignac, oct. 2017.
- [7] D. Lebègue, « Révision du taux d'actualisation des investissements publics », janv. 2005.
- [8] A. Kheiri, « Analyse Technico-Economique des Systèmes Energétiques (ENVT 0072-1) », Nancy, 2020.
- [9] M. Taylor, « Technology Roadmap Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment », Paris, 2011.
- [10] Y. Saheb, « Energy Transition of the EU Building Stock - Unleashing the 4th Industrial Revolution in Europe », 2016.
- [11] STATEC, « Consommation finale d'énergie selon les différentes utilisations et par forme d'énergie 2000 - 2018 », *Le portail de statistiques Grand-Duché de Luxembourg*, 15-nov-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableViewHTML.aspx?ReportId=12773&IF_Language=fra&MainTheme=1&FldrName=4&RFPPath=51#WDS_row_summary_0_0. [Consulté le: 18-mai-2020].
- [12] Belga, « Vers la fin du tourisme à la pompe ? Le Luxembourg augmentera le prix des carburants en 2020 », *RTBF*, 16-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://www.rtf.be/info/societe/detail_le-luxembourg-augmentera-le-prix-des-carburants-en-2020-au-grand-dam-des-frontaliers?id=10390103. [Consulté le: 05-juin-2020].
- [13] Portail de l'environnement, « Le plan national intégré en matière d'énergie et de climat (PNEC) », 09-déc-2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://environnement.public.lu/fr/actualites/2019/12/pnec.html>. [Consulté le: 09-juin-2020].
- [14] P. Capros, L. Mantzos, V. Papandreou, et N. Tasios, « European energy and transport », Luxembourg, avr. 2008.
- [15] Myenergy, « Le certificat de performance énergétique pour bâtiments ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.myenergy.lu/fr/particuliers/lois-et-reglements/passeport-energetique>. [Consulté le: 28-avr-2020].
- [16] A. Mazhar, S. Liu, et A. Shukla, « A Key Review of Non-Industrial Greywater Heat Harnessing », *Energies*, vol. 11, n° 2, p. 386, févr. 2018.
- [17] J. Dedecker, « Récupération de la chaleur issue des eaux usées », Bruxelles, 2017.
- [18] Passive House Institute, « Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard », Darmstadt, août 2016.
- [19] O. Gerin et B. Bleys, « Les économies d'énergie dans les installations d'eau chaude », 2017.

- [20] F. Meggers et H. Leibundgut, « The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump », *Energy Build.*, vol. 43, p. 879-886, déc. 2011.
- [21] O. Gerin, « Récupérateurs de chaleur des eaux usées », Bruxelles, 2017.
- [22] K. Pochwat, S. Kordana, M. Starzec, et D. Słyś, « Comparison of two-prototype near-horizontal Drain Water Heat Recovery units on the basis of effectiveness », *Energy*, vol. 173, p. 1196-1207, avr. 2019.
- [23] D. Czarniecki, V. Pisarev, J. Dziopak, et D. Słyś, « Analiza techniczna i finansowa instalacji do odzysku ciepła ze ścieków w budynkach wielorodzinnych », *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i Ochr. środowiska*, vol. 4, p. 132-148, 2014.
- [24] J. Wallin et J. Claesson, « Investigating the efficiency of a vertical inline drain water heat recovery heat exchanger in a system boosted with a heat pump », *Energy Build.*, vol. 80, p. 7-16, sept. 2014.
- [25] A. Mazur, « The impact of using of a DWHR heat exchanger on operating costs for a hot water preparation system and the amount of carbon dioxide emissions entering the atmosphere », *E3S Web Conf.*, vol. 45, n° 00052, p. 1-8, juill. 2018.
- [26] Comité scientifique et technique des industries climatiques (COSTIC), « Les besoins d'eau chaude sanitaire en habitat individuel et collectif », mai 2016.
- [27] C. Zaloum, J. Gusdorf, et A. Parekh, « Performance Evaluation of Drain Water Heat Recovery Technology at the Canadian Centre for Housing Technology Sustainable Buildings and Communities Natural Resources Canada Ottawa », Ottawa, janv. 2007.
- [28] C. Zaloum, M. Lafrance, et J. Gusdorf, « Drain Water Heat Recovery Characterization and Modeling », Ottawa, 2007.
- [29] J. Paduchowska, A. Żabnieńska-Góra, et I. Polarczyk, « Energy-saving analysis of grey water heat recovery systems for student dormitory », *E3S Web Conf.*, vol. 116, n° 00056, p. 1-7, 2019.
- [30] S. Kordana, K. Pochwat, D. Słyś, et M. Starzec, « Opportunities and threats of implementing drain water heat recovery units in Poland », *Resources*, vol. 8, n° 2, 2019.
- [31] A. Mazur, « An assessment of the financial efficiency of a heat recovery system from graywater in a hotel », *E3S Web Conf.*, vol. 45, n° 51, p. 1-8, 2018.
- [32] S. Kordana et D. Słyś, « Analysis of profitability of using a heat recovery system from grey water discharged from the shower (case study of Poland) », *E3S Web Conf.*, vol. 22, n° 85, p. 1-8, 2017.
- [33] D. Słyś et S. Kordana, « Financial analysis of the implementation of a Drain Water Heat Recovery unit in residential housing », *Energy Build.*, vol. 71, p. 1-11, mars 2014.
- [34] A. Mazur et D. Słyś, « Possibility of heat recovery from gray water in residential building », *Sel. Sci. Pap. - J. Civ. Eng.*, vol. 12, n° 2, p. 155-162, janv. 2018.
- [35] S. Kordana, « An assessment of the potential for shower water heat recovery », *E3S Web Conf.*, vol. 45, n° 34, p. 1-8, juill. 2018.
- [36] K. Niewitecka, « Possibilities of heat energy recovery from greywater systems », EDP Sciences, Warsaw, 2018.
- [37] S. Bartkowiak, R. Fisk, A. Funk, J. Hair, et S. J. Skerlos, « Residential drain water heat recovery systems: Modeling, analysis, and implementation », *J. Green Build.*, vol. 5, n° 3, p. 85-94, août 2010.
- [38] A. McNabola et K. Shields, « Efficient drain water heat recovery in horizontal domestic shower

- drains », *Energy Build.*, vol. 59, p. 44-49, avr. 2013.
- [39] Sudana, Ardita, G. Baliarta, et Sudirman, « Drain water heat recovery horizontal for energy conservation and reduction of CO2 emissions », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1450, n° 012097, p. 1-8, févr. 2020.
 - [40] R. Manouchehri, C. J. Banister, et M. R. Collins, « Impact of small tilt angles on the performance of falling film drain water heat recovery systems », *Energy Build.*, vol. 102, p. 181-186, sept. 2015.
 - [41] M. R. Collins, G. W. E. Van Decker, et J. Murray, « Characteristic effectiveness curves for falling-film drain water heat recovery systems », *HVAC R Res.*, vol. 19, n° 6, p. 649-662, août 2013.
 - [42] M. Ramadan, T. Lemenand, et M. Khaled, « Recovering heat from hot drain water—Experimental evaluation, parametric analysis and new calculation procedure », *Energy Build.*, vol. 128, p. 575-582, sept. 2016.
 - [43] T. Gabor, V. Dan, I. N. Badila, A. E. Tiuc, et I. M. Sur, « Improving the energy efficiency of residential buildings by using a drain water heat recovery system », *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 16, n° 7, p. 1631-1636, juill. 2017.
 - [44] I. Beentjes, R. Manouchehri, et M. R. Collins, « An investigation of drain-side wetting on the performance of falling film drain water heat recovery systems », *Energy Build.*, vol. 82, p. 660-667, oct. 2014.
 - [45] J. D. Garcia, « Characterization of greywater heat exchangers and the potential of implementation for energy savings », 2016.
 - [46] C. Frankowski, « Drain water heat recovery : a review of performance, economics, practical issues and applications », British Columbia, mai 2013.
 - [47] R. Manouchehri et M. R. Collins, « An experimental analysis of the impact of temperature on falling film drain water heat recovery system effectiveness », *Energy Build.*, vol. 130, p. 1-7, oct. 2016.
 - [48] R. Ostapczuk et D. Railsback, « Assessment of sewage heat recovery technology and applicability to the Milwaukee Metropolitan Sewerage District », Milwaukee, août 2013.
 - [49] D. J. Dürrenmatt et O. Wanner, « A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers », *Water Res.*, vol. 48, n° 1, p. 548-558, janv. 2014.
 - [50] J. Spriet et P. Hendrick, « Wastewater as a heat source for individual residence heating: A techno-economic feasibility study in the brussels capital region », *J. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, vol. 5, n° 3, p. 289-308, sept. 2017.
 - [51] S. S. Cipolla et M. Maglionico, « Heat recovery from urban wastewater: Analysis of the variability of flow rate and temperature », *Energy Build.*, vol. 69, p. 122-130, févr. 2014.
 - [52] G. A. del Amo et A. A. López, « Drain water heat recovery in a residential building », Gävle, 2015.
 - [53] L. Ni *et al.*, « Feasibility study of a localized residential grey water energy-recovery system », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 39, p. 53-62, juin 2012.
 - [54] Parlement européen, « Eau potable dans l'UE : meilleure qualité et meilleur accès », *Parlement européen*, 19-oct-2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20181011STO15887/eau-potable-dans-l-ue-meilleure-qualite-et-meilleur-acces>. [Consulté le: 29-avr-2020].
 - [55] R. Hendron et C. Engebrecht, « Building America Research Benchmark Definition », Colorado, janv. 2010.

- [56] W. B. DeOreo, P. Mayer, B. Dziegielewski, et J. Kiefer, « Residential End Uses of Water, Version 2 », Denver, avr. 2016.
- [57] K. O'toole, B. Jorgensen, et M. Graymore, « Household water use behavior: An integrated model », *J. Environ. Manage.*, vol. 91, p. 227-236, sept. 2009.
- [58] Sharc Energy System inc., « Piranha thermal energy recovery system », 2017.
- [59] EHTech, « Obox: récupérateur de chaleur sur eaux grises », 2019.
- [60] Showersave, « Showersave - Installation Manual », 2016.
- [61] Alto Step, « Productions renouvelables d'Eau Chaude Sanitaire », Mérignac, oct. 2017.
- [62] Sénova, « Les systèmes de demain : la récupération de chaleur sur les eaux grises des douches », 05-août-2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://construction.senova.fr/conseils-techniques/les-systemes-de-demain-la-recuperation-de-chaleur-sur-les-eaux-grises-des-douches/>. [Consulté le: 19-févr-2020].
- [63] Y. Jannot, « Introduction aux échangeurs de chaleur ».
- [64] Cahiers Techniques du Bâtiment, « Eaux grises: Une source potentielle de chaleur à récupérer », *Dossier*, 01-mars-2011. .
- [65] RenewABILITY Energy inc, « Powerpipe: drain water heat recovery systems », 2009. .
- [66] Gaïa Green, « ReQup®-Floor », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.gaiagreen.net/requp-floor/>. [Consulté le: 08-mai-2020].
- [67] KP1, « Placher Milliwatt Ôbox: plancher producteur d'eau chaude », 2015.
- [68] Zypho, « Technical Specifications: iZi 30 High Flow and iZi 40 Eco Shower », 2020.
- [69] EHTech, « Obox wastewater heat recovery systems », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ehtech.fr/home>. [Consulté le: 08-mai-2020].
- [70] ALOAQUA, « Wagner Solar ECOSHOWER: Shower Tray ». [En ligne]. Disponible sur: <https://aloaqua.wordpress.com/wagner-solar-shower-tray-ecoshower/>. [Consulté le: 08-mai-2020].
- [71] M.-A. Heyde, « Un système français breveté de récupération d'énergie présente dans les eaux usées grises », *Neomag*, vol. 19, p. 18-20, déc. 2018.
- [72] Biofluides Environnement, « La solution leader pour recycler la chaleur des eaux usées grises ».
- [73] M. Harvey, « "Get it while it's hot" - Sewage heat technology assessment ».
- [74] Rabtherm Energy Systems, « Products - Solutions », 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.rabtherm.com/en/produkte.html?jjj=1582556320843>. [Consulté le: 24-févr-2020].
- [75] HUBER SE, « Heat recovery from wastewater - HUBER ThermWin ».
- [76] A. Stec, A. Mazur, et D. Słyś, « Evaluating the financial efficiency of energy and water saving installations in passive house », *E3S Web Conf.*, vol. 22, p. 9, 2017.
- [77] F. Peltier, A. Heinz, et G. Thill, « La situation du logement: imeubles d'habitation, ménages, propriétaires et locataires », Luxembourg, 2013.
- [78] J. L. Vavrin, « A Quantitative Study of the Viability of Greywater Heat Recovery (GWHR): GWHR Implemented in Barracks and Dining Facilities », Champaign, juin 2011.
- [79] F. Peltier, « Regards sur les bâtiments achevés en 2013 », Luxembourg, déc. 2015.
- [80] Alpha Innotec, « Liste des prix et des types Suisse », Aclens, 2018.

- [81] Prix pose, « Prix d'un chauffe eau électrique », 23-janv-2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.prix-pose.com/chauffe-eau-electrique/>. [Consulté le: 16-mai-2020].
- [82] Travaux.com, « Prix de l'installation et du remplacement d'un chauffe-eau ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.travaux.com/plomberie/guide-des-prix/prix-linstallation-du-remplacement-chauffe-eau>. [Consulté le: 16-mai-2020].
- [83] Prix Pose, « Prix d'un chauffe eau gaz », 23-janv-2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.prix-pose.com/chauffe-eau-gaz/>. [Consulté le: 15-mai-2020].
- [84] European Commission, « EU energy in figures », Luxembourg, 2019.
- [85] Institut Luxembourgeois de Régulation, « Chiffres clés du marché de l'électricité: Année 2018 - Partie I », Luxembourg, juill. 2019.
- [86] STATEC, « Structure du prix de l'électricité (en EUR par kWh) 2008 - 2018 », *Les portails des statistiques - Grand Duché de Luxembourg*, 20-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableViewHTML.aspx?ReportId=12783&IF_Language=fra&MainTheme=1&FldrName=4&RFPPath=53. [Consulté le: 15-mai-2020].
- [87] STATEC, « Prix moyen de l'énergie dans le secteur du chauffage domestique (en EUR per kWh) 2008 - 2018 », *Le portail des statistiques - Grand-Duché de Luxembourg*, 20-juin-2019. [En ligne]. Disponible sur: https://statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableViewHTML.aspx?ReportId=12788&IF_Language=fra&MainTheme=1&FldrName=4&RFPPath=53. [Consulté le: 15-mai-2020].
- [88] C. Montmarquette et I. Scott, « Taux d'actualisation pour l'évaluation des investissements publics au Québec », Montréal, mai 2007.
- [89] S. C. de Législation, *Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation*. MEMORIAL Journal Officiel du Grand-Duché de Luxembourg, 2007, p. 1-108.
- [90] Institut Luxembourgeois de Régulation, « Institut Luxembourgeois de Régulation - Règlement ILR/E19/31 du 8 juillet 2019 portant publication de la composition et de l'impact environnemental du mix national pour l'année 2018 - Secteur électricité. », *Journal officiel du Grand-Duché de Luxembourg*, 12-juill-2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://legilux.public.lu/eli/etat/leg/rilr/2019/07/08/a488/jo>. [Consulté le: 20-mai-2020].
- [91] European Environment Agency, « CO2 emission intensity », 2018. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European Union \(current composition\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European Union (current composition)%22%5D%7D%7D). [Consulté le: 23-déc-2019].
- [92] Enovos, « Etiquetage de l'électricité 2017 », 2018.
- [93] Eida sa, « Etiquetage de l'électricité 2018 », Beckerich, 2019.
- [94] Gaïa Green, « Récupérateur de chaleur pour douche - Recoh®-Vert ».

VI. ANNEXES

1. Annexe 1 : Caractéristiques techniques du projet du lotissement résidentiel au Grand-Duché de Luxembourg

Tableau 24: Caractéristiques techniques des maisons unifamiliales du projet du lotissement résidentiel

LOT	Superficie du terrain m ²	Surface de plancher net m ²	Forme du toit	Chaleur spécifique pour chauffage kWh/m ² *a	Chaleur spécifique pour ECS in kWh/m ² *a	Besoin en chaleur pour chauffage kWh/a	Besoin en chaleur pour ECS kWh/a	Demande totale de chaleur kWh/a	Exigence de puissance calorifique in kW
LOT1	676	240	inclinaison 30/44	22	25	5.280	6.000	11.280	8
LOT2	640	254	inclinaison 30/45	22	25	5.588	6.350	11.938	8
LOT3	425	240	inclinaison 30/45	22	25	5.280	6.000	11.280	8
LOT4	386	240	inclinaison 30/45	22	25	5.280	6.000	11.280	8
LOT5	567	240	inclinaison 30/45	22	25	5.280	6.000	11.280	8
LOT6	293	228	inclinaison 30/45	22	25	5.016	5.700	10.716	7
LOT7	357	240	inclinaison 30/45	22	25	5.280	6.000	11.280	8
LOT8	426	222	inclinaison 30/45	22	25	4.884	5.550	10.434	7
LOT9	221	192	inclinaison 30/45	22	25	4.224	4.800	9.024	6
LOT10	223	192	inclinaison 30/45	22	25	4.224	4.800	9.024	6
LOT11	363	222	inclinaison 30/45	22	25	4.884	5.550	10.434	7
LOT12	402	200	inclinaison 30/45	22	25	4.400	5.000	9.400	6
LOT13	427	200	inclinaison 30/45	22	25	4.400	5.000	9.400	6
LOT14	393	216	inclinaison 30/45	22	25	4.752	5.400	10.152	7
LOT15	205	168	inclinaison 30/45	22	25	3.696	4.200	7.896	5
LOT16	419	216	inclinaison 30/45	22	25	4.752	5.400	10.152	7
Valeurs moyennes	401	219	-	22	25	4.826	5.484	10.311	7

2. Annexe 2 : Résumé de la revue de la littérature

Ce tableau est le résultat de la revue littéraire réalisé dans le cadre de ce travail. Il peut présenter certaines parties textes simplement traduites de l'anglais au français, cela correspond généralement aux titres.

Tableau 25: Résumé de la revue de la littérature des articles scientifiques utilisés dans ce travail

Référence	Noms des auteurs	Date	Système	Aspect	Objectif	Résultats
[29]	Joanna Paduchowska, Alina Żabnieńska-Góra et Iwona Polarczyk	2019	Combiné sur eaux grises	Économique, énergétique	Analyser les économies d'énergie des systèmes de récupération de chaleur des eaux grises de deux dortoirs d'étudiants à Wrocław.	Les résultats garantissent que le système DWHR permet d'économiser 53% de l'énergie dans ces bâtiments.
[48]	Rob Ostapczuk et David Railsback	2013	Combiné sur eaux usées	Économique, énergétique	Réaliser une évaluation des technologies de récupération de la chaleur des eaux usées pour le district de Milwaukee.	Les systèmes modulaires sont limités par le débit des eaux usées, la température et la surface disponible. Les systèmes au sein même des égouts sont restreints par l'égout existant, la longueur des canalisations droites, la pente et le débit des eaux usées.
[49]	David J. Durrenmatt et Oskar Wanner	2014	Combiné sur eaux usées	Énergétique	Calculer les températures à l'entrée et à la sortie des égouts pour évaluer l'impact d'un récupérateur de chaleur sur eaux usées.	Les facteurs limitants sont la température, la conductivité thermique du sol naturel, la distance séparant l'égout et le sol.
[50]	Jan Spriet et Patrick Hendrick	2017	Combiné sur eaux usées	Économique, énergétique et environnemental	Étudier le potentiel de récupération de chaleur des eaux usées de Bruxelles.	Les résultats indiquent une puissance de chauffage minimale de la pompe à chaleur de 6,3 kW pour une température d'eau chaude de 45 °C. Environ 35% des bâtiments sont éligible pour la Région de Bruxelles-Capitale.
[51]	Sara Simona Cipolla et Marco Maglionico	2014	Combiné sur eaux usées	Énergétique	Examiner la variabilité du débit et de la température dans les systèmes d'égouts à Bologne (Italie).	La variation journalière des débits est plus marquée que pour les températures. Au niveau saisonnier, c'est plus marqué pour les températures.
[19]	O. Gerin et B. Bleys	2017	DWHR	Économique, énergétique	Étudier la récupération de la chaleur des eaux usées.	Les besoins d'ECS varient en fonction de la saison : consommation d'ECS 14% au-dessus de la moyenne en février et 19% en dessous de la moyenne en juillet. L'utilisation des DWHR doit se concentrer seulement sur les douches.
[37]	Scott Bartkowiak, Ryan Fisk, Andrew Funk, Jonathan Hair et Steven J. Skerlos	2010	DWHR horizontal	Économique, environnemental et énergétique	Calculer la quantité d'énergie et les émissions de CO ₂ évitées grâce à un DWHR horizontal équipé d'un échangeur à plaques.	Selon le comportement moyen d'un américain, les résultats de l'association avec un DWHR pour un chauffe-eau électrique, s'élèvent à 160 dollars et 1,5 tonne de CO ₂ évitée. Pour un chauffe-eau au gaz, ces économies sont de 74 dollars et 0,3 tonne de CO ₂ évitées.

[38]	Aonghus McNabola et Killian Shields	2013	DWHR horizontal	Économique, énergétique	Créer et analyser un système DWHR horizontal pour les douches du secteur résidentiel.	L'étude montre que l'efficacité du DWHR horizontal peut être améliorée, mais la taille du dispositif devient beaucoup trop importante. Le TR avec un chauffe-eau électrique pour un ménage de 3 personnes est de 5 ans.
[22]	Kamil Pochwat, Sabina Kordana, Mariusz Starzec et Daniel Słyś	2019	DWHR horizontal	Économique, énergétique	Améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur horizontaux pour le secteur résidentiel.	Le système DHWR horizontal peut être amélioré par l'utilisation d'un déflecteur.
[39]	Sudirman, Sudana, Ardita et Baliarta	2020	DWHR horizontal	Énergétique, économique, environnemental	Analyser le système de la récupération individuelle de chaleur à orientation horizontale.	Les résultats de l'étude montrent que malgré la faible efficacité du DWHR horizontal, 25,54 %, cette technologie peut être utilisée à grande échelle pour réduire les émissions de CO ₂ .
[31]	Aleksandra Mazur	2018	DWHR vertical	Économique	Évaluer l'efficacité financière d'un DWHR dans un hôtel.	La rentabilité économique augmente avec le taux d'occupation. Le préparateur d'ECS électrique permet une meilleure rentabilité.
[32]	Sabina Kordana et Daniel Słyś	2017	DWHR vertical	Économique	Étudier la rentabilité d'un DWHR (étude de cas de la Pologne).	La rentabilité économique est plus élevée pour le préparateur électrique par rapport au chauffe-eau au gaz.
[33]	Sabina Kordana et Daniel Słyś	2014	DWHR vertical	Économique	Analyser financièrement l'implémentation d'un DWHR dans un bâtiment résidentiel.	Le TR se situe entre 2,5 et 10 ans avec un chauffe-eau électrique. Il dépend du débit de la douche, de la durée et de la configuration du DWHR.
[45]	Jose Daniel Garcia	2016	DWHR vertical	Économique, énergétique	Analyser le potentiel des DWHR pour un seul ménage et pour des logements multiples.	Les paramètres sensibles de l'étude sont l'utilisation d'ECS, le nombre de personnes, le prix de l'énergie... Le chauffe-eau au gaz, étant donné son faible coût, implique une rentabilité faible, le TR est 4,7 fois plus élevé que pour un chauffe-eau électrique. Le TR pour un ménage moyen de 3-4 personnes équipé d'un chauffe-eau électrique se situe entre 5 et 6 ans.
[46]	Chris Frankowski	2013	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer les performances d'un DWHR au niveau économique et énergétique.	La rentabilité est plus élevée avec un chauffe-eau électrique, car les coûts sont beaucoup plus élevés. Le chauffe-eau au gaz aurait la même rentabilité s'il y avait 14 personnes dans la maison ou bien si le prix du gaz revenait à un prix élevé.
[34]	Aleksandra Mazur et Daniel Słyś	2018	DWHR vertical	Économique, énergétique	Étudier la possibilité technique et économique de l'installation d'un DWHR selon différentes configurations.	L'utilisation d'un système de récupération de chaleur dans une maison individuelle réduit la demande énergétique annuelle pour l'ECS de 23 à 31 %.
[35]	Sabina Kordana	2018	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer le potentiel économique d'un système DWHR vertical.	La rentabilité économique d'un DWHR dépend des paramètres de fonctionnement de l'installation et du vecteur énergétique.

[47]	Ramin Manouchehri et Michael R. Collins	2016	DWHR vertical	Énergétique	Étudier à l'aide d'essais expérimentaux l'influence des températures d'entrées dans un DWHR sur l'efficacité d'un DWHR vertical.	Les pertes par évaporation, conduction et convection à travers la paroi n'entraînent pas de grands changements d'efficacité.
[27]	Charles Zaloum, John Gusdorf et Anil Parekh	2007	DWHR vertical	Économique, énergétique	Évaluer expérimentalement les performances d'un DWHR au Centre canadien des technologies résidentielles.	Le TR est de 9 ans avec un chauffe-eau au gaz pour une période de 30 ans. Tandis, que pour le chauffe-eau électrique, il est de 5 ans.
[41]	Michael R. Collins, Gerald W. E. Van decker et Joel Murray	2013	DWHR vertical	Énergétique	Examiner expérimentalement les performances d'un DWHR pour divers débits.	Les performances mesurées et calculées correspondent aux performances théoriques. Néanmoins, il y a une zone de transition entre le débit de 5 l/min et 10 l/min.
[28]	Charles Zaloum, Maxime Lafrance et John Gusdorf	2007	DWHR vertical	Économique, énergétique	Mesurer expérimentalement les performances d'un DWHR afin d'identifier les économies d'énergie potentielles.	Le constat est qu'il y a un équilibre optimal entre la performance et la taille de l'échangeur vertical : les tuyaux longs et n'ajoutent que des avantages marginaux aux performances et les tuyaux plus courts donnent les meilleurs résultats par mètre.
[40]	Ramin Manouchehri, Carsen J. Banister et Michael R. Collins	2015	DWHR vertical	Énergétique	Mesurer l'impact de l'inclinaison du DWHR vertical sur ses performances.	Les performances diminuent lorsque l'angle du DWHR augmente par rapport à la verticale. Les résultats montrent qu'un angle de 2° entraîne une baisse de performance de 4%. Pour les angles supérieurs à 2°, la rupture de l'effet du film tombant engendre des pertes d'efficacité importantes.
[43]	Timea Gabor, Viorel Dan, Iulian-Nicolae Badila, Ancuta-Elena Tiuc et Ioana Monica Sur	2017	DWHR vertical	Énergétique	Étudier les améliorations potentielles de l'utilisation d'un DWHR selon différents scénarios pour le secteur résidentiel.	Un DWHR permet de récupérer une grande partie de la chaleur disponible, surtout dans les bâtiments où la consommation d'ECS est plus élevée.
[44]	Ivan Beentjes, Ramin Manouchehri et Michael R. Collins	2014	DWHR vertical	Énergétique	Examiner expérimentalement « l'effet du mouillage du côté du drain » sur l'efficacité d'un DWHR à orientation verticale.	Selon l'étude, plus le débit augmente, plus l'efficacité du DWHR diminue. Les résultats démontrent qu'il existe un débit critique en dessous duquel les performances d'un tuyau de DWHR ne peuvent être extrapolées.
[42]	Ramadan Mohamad, Lemenand Thierry et Khaled Mahmoud	2016	DWHR vertical	Énergétique	Étudier une procédure expérimentale pour déterminer l'efficacité des DWHR verticaux.	L'efficacité du DWHR diminue lorsque la température de l'eau de ville augmente. Le pourcentage de débit d'eau perdu peut être de 15%.
[24]	Jörgen Wallin et Joachim Claesson	2014	DWHR vertical	Énergétique	Étudier expérimentalement les performances d'un DWHR vertical à l'aide d'une unité d'essai où l'air est remplacé par de l'eau en association avec une pompe à chaleur.	Les résultats montrent que l'unité d'essai a une grande résistance thermique, ce qui diminue l'efficacité du DWHR. Le taux de couverture est de 25%.

[25]	Aleksandra Mazur	2018	DWHR vertical	Énergétique, économique, environnemental	Étudier l'impact d'un DWHR vertical sur les coûts d'exploitation, les émissions de CO ₂ et sur la consommation d'énergie.	Les économies monétaires du projet montrent une réduction de 20 à 30% grâce à l'utilisation du DWHR. L'étude a également montré qu'une réduction de 50 à 112kgCO ₂ /an était réalisable par habitant.
[16]	A. Mazhar, S. Liu et A. Shukla	2018	Tous	Énergétique	Exposer les technologies d'exploitation de la chaleur des eaux usées.	La conclusion dit que les 3 systèmes sont à maturité, mais pas encore très présents sur le marché, car il y a des obstacles. Sauf qu'avec la fluctuation des prix et les avancées en termes de stockage de chaleur, cela devient de plus en plus pertinent.
[52]	Asier Gavilán del Amo et Ana Alonso López	2015	Tous	Économique, environnemental et énergétique	Étudier le potentiel de réduction d'un DWHR au niveau de la consommation d'énergie et des émissions de CO ₂ tout en étant rentable économiquement pour un bâtiment existant.	Le faible prix du chauffage urbain en Suède implique que pour être rentable il faut au moins 4 personnes dans le ménage pour un DWHR.
[36]	Kaja Niewitecka	2018	Tous	Énergétique	Étudier les systèmes de récupération de la chaleur des eaux usées comme alternative renouvelable.	Les économies sont importantes sur le préchauffage de l'ECS. Le TR des coûts dépend du bâtiment et du type de préparateur d'ECS.
[30]	Sabina Kordana, Kamil Pochwat, Daniel Słyś et Mariusz Starzec	2019	Tous	Économique et environnemental	Analyser les contraintes et les avantages au développement des systèmes de récupération de la chaleur des eaux usées.	Le développement des récupérateurs de chaleur est menacé par le manque d'acceptation des utilisateurs. Il faut donc encourager la promotion de ceux-ci au niveau résidentiel.

3. Annexe 3 : Fiche d'étiquetage de l'électricité des fournisseurs

La fiche d'étiquetage de l'électricité permet d'identifier l'impact environnemental de la production électrique en fonction de la composition des sources d'énergie utilisées.

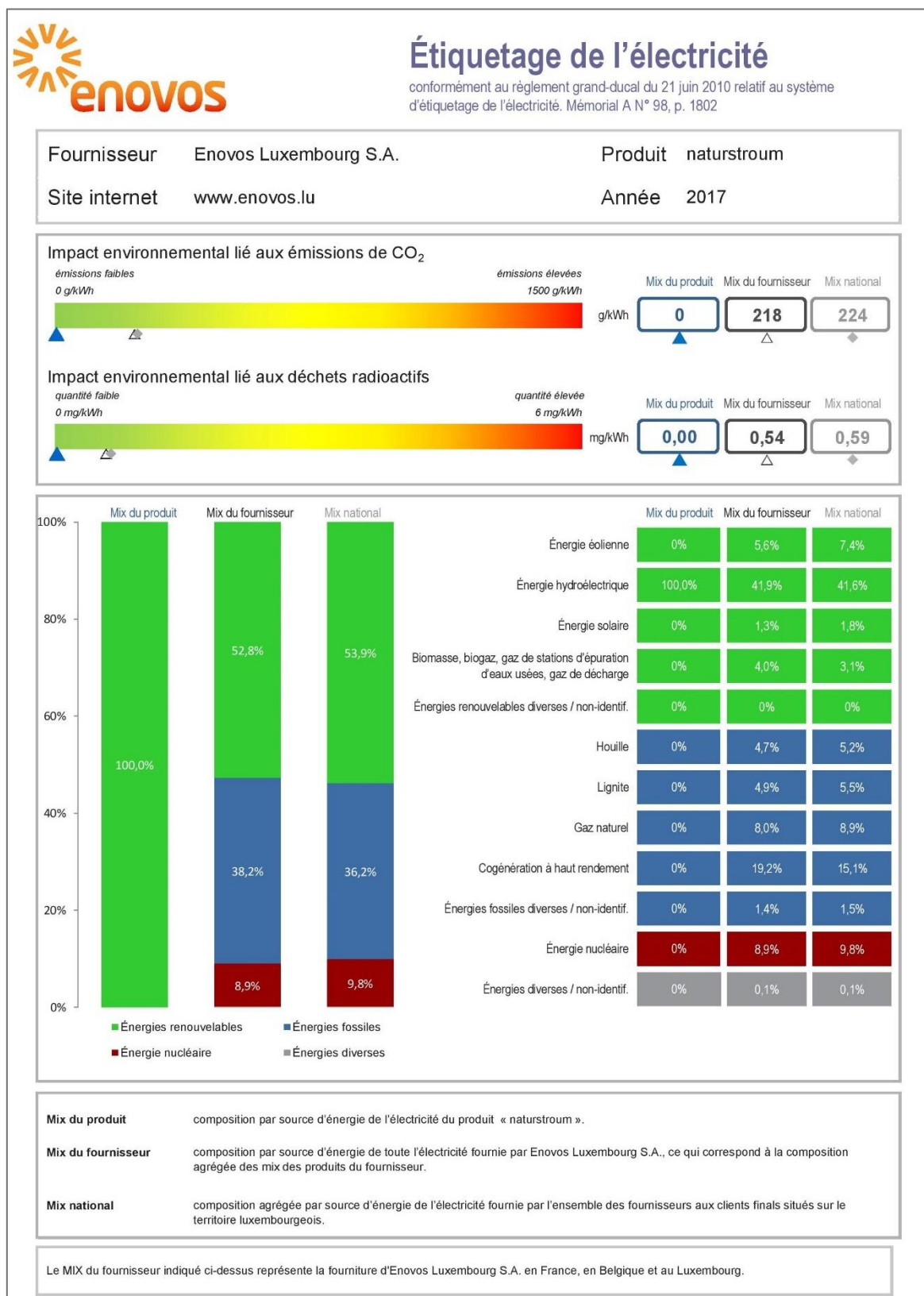
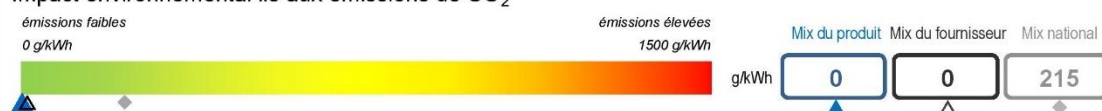


Figure 31: Fiche d'étiquetage de l'électricité du fournisseur Enovos [92]

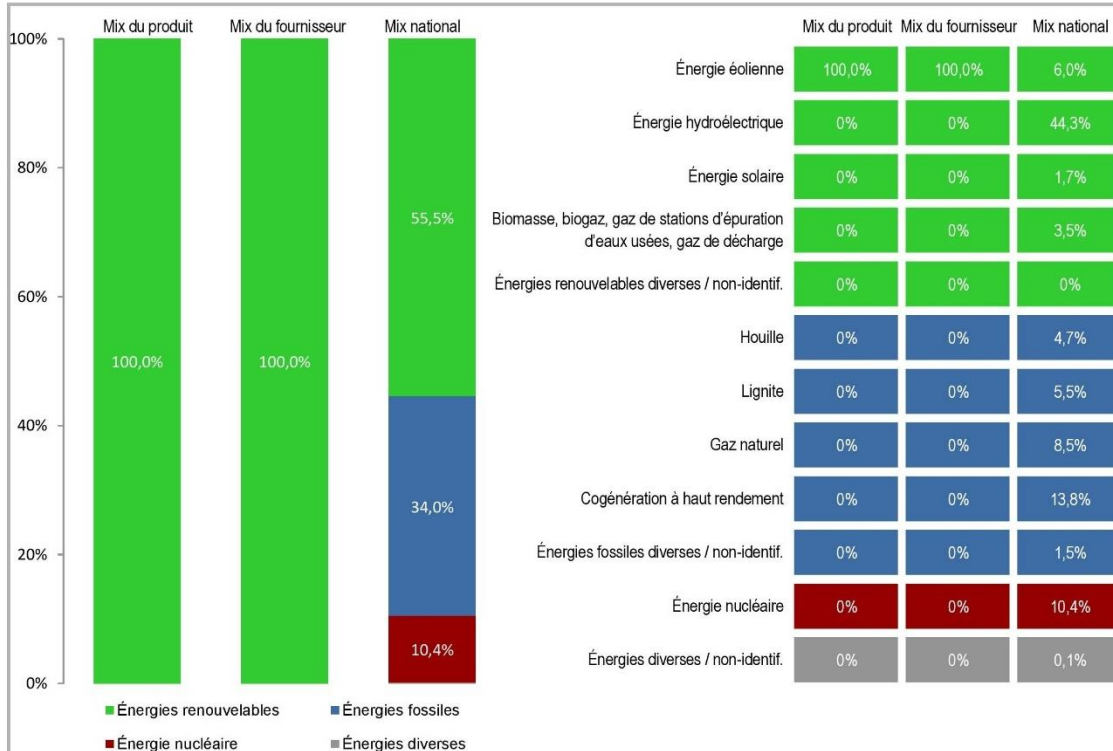
Fournisseur EIDA SA
Site internet www.eida.lu

Produit GREEN
Année 2018

Impact environnemental lié aux émissions de CO₂



Impact environnemental lié aux déchets radioactifs



Mix du produit composition par source d'énergie de l'électricité du produit « GREEN ».

Mix du fournisseur composition par source d'énergie de toute l'électricité fournie par EIDA SA, ce qui correspond à la composition agrégée des mix des produits du fournisseur.

Mix national composition agrégée par source d'énergie de l'électricité fournie par l'ensemble des fournisseurs aux clients finals situés sur le territoire luxembourgeois.

Eida-Infoline : +352 26 47 47
E-mail : info@eida.lu

Figure 32: Fiche d'étiquetage de l'électricité du fournisseur d'électricité verte Eida s.a. [93]