



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech

Rapport intermédiaire du 15 décembre 2025

LCA-PAC

Ecobilan paramétré des pompes à chaleur pour la décarbonation des bâtiments



Prestataire de subvention :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.recherche-energetique.ch

Cofinancement : Canton de Vaud (DGE-DIREN), Services Industriels de Genève (SIG)

Bénéficiaires de la subvention :

Haute École d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)
Institut des Énergies (IE)
Route de Cheseaux 1, CH-1401 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Auteur(s) :

Sébastien Lasvaux, HEIG-VD | IE sebastien.lasvaux@heig-vd.ch
Mija Frossard, HEIG-VD | IE mija.frossard@heig-vd.ch
Gauthier Demonchy, HEIG-VD | IE gauthier.demonchy@heig-vd.ch
Enrico Da Riva, HEIG-VD | IE enrico.dariva@heig-vd.ch
Lucas Vonlanthen, HEIG-VD | IE lucas.vonlanthen@heig-vd.ch
Alexis Duret, HEIG-VD | IE alexis.duret@heig-vd.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502882-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.

Résumé

L'objectif du projet LCA-PAC est d'approfondir les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie des pompes à chaleur (PAC) utilisées dans les bâtiments. Croisant collecte de données in-situ sur les caractéristiques des PAC en fonctionnement et modèle paramétré d'écobilan tenant compte des paramètres influents et variables, il contribue à améliorer l'évaluation des stratégies de décarbonation du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire du parc existant. Appliqués à différentes échelles d'analyse et selon différents horizons temporels (retours d'expérience ex-post et vision plus prospective), cette étude permet de déterminer les gains écologiques effectifs d'une installation spécifique en prenant en compte les effets d'échelle, les taux de fuites de réfrigérant, les actions de maintenance, la consommation d'électricité selon différentes configurations de PAC, sources froides et typologies de bâtiments pour aller vers le zéro net dans le cycle de vie des bâtiments d'ici 2050.

Zusammenfassung

Das Ziel des LCA-PAC-Projekts ist es, die Treibhausgasemissionen (THG) über den gesamten Lebenszyklus von Wärmepumpen in Gebäuden zu untersuchen. Durch die Kombination von In-situ-Datenerhebung über die Eigenschaften von Wärmepumpen im Betrieb und einem parametrisierten Ökobilanzmodell, das Einflussparameter und Variablen berücksichtigt, trägt das Projekt dazu bei, die Bewertung von Strategien zur Dekarbonisierung von Heizung und Warmwasserbereitung in bestehenden Gebäuden zu verbessern. Unter Berücksichtigung von Skaleneffekten, Kältemittelleckraten, Wartungsmaßnahmen und Stromverbrauch bei verschiedenen WP-Konfigurationen, kalten Quellen und Gebäudetypologien ermöglicht diese Studie die Ermittlung der tatsächlichen ökologischen Gewinne einer bestimmten Anlage, um bis 2050 eine Netto-Nullbilanz im Lebenszyklus von Gebäuden zu erreichen.

Summary

The aim of the LCA-PAC project is to investigate greenhouse gas (GHG) emissions over the life cycle of heat pumps (PAC) used in buildings. Combining in-situ data collection on the characteristics of heat pumps in operation and a parameterized life cycle assessment model that considers influential and variable parameters, it helps to improve the assessment of decarbonization strategies for heating and domestic hot water production in existing buildings. Applied at different scales of analysis and over different time horizons (ex-post feedback and prospective vision), this study makes it possible to determine the effective eco-efficiency gains of a specific installation, taking into account scale effects, refrigerant leakage rates, maintenance actions and electricity consumption according to different heat pump configurations, cooling sources and building typologies, in order to move towards net zero in the building life cycle by 2050.



Table des matières

Résumé.....	3
Zusammenfassung.....	3
Summary	3
Table des matières	4
Liste des illustrations	5
Liste des tableaux	6
Liste des abréviations.....	7
1 Introduction.....	8
2 Organisation et plan de travail	9
2.1. Objectifs du projet.....	9
2.2. Organisation du projet	10
2.3. Articulation des WP avec les différentes échelles (sous-projets).....	11
3 Travaux effectués et résultats.....	12
3.1. Sous-projet 1 : Dimensionnement et performance des pompes à chaleur	12
3.1.1. Collecte de données et méthode.....	14
3.1.2. Travaux réalisés et résultats obtenus.....	14
3.2. Sous-projet 2 : Modèle d'écobilan paramétré de PAC	18
3.2.1. Collecte de données et méthodes	18
3.2.2. Travaux réalisés et résultats obtenus.....	19
3.3. Sous-projet 3 : Intégration des PAC dans les bâtiments.....	28
3.3.1. Description de la plateforme de simulation.....	28
3.3.2. Collecte de données et méthodes	30
3.3.3. Travaux réalisés et résultats.....	32
4 Evaluation des résultats obtenus et travaux à venir	33
4.1. Sous-projet 1 : dimensionnement et performance des pompes à chaleur.....	33
4.2. Sous-projet 2 : modèle d'écobilan paramétré de PAC	34
4.1. Sous-projet 3 : intégration des PAC dans les bâtiments	35
5 Coopération nationale et internationale.....	36
6 Publications et autres communications	36
7 Bibliographie.....	37
Annexe 1 : background et revue de littérature.....	38
Annexe 2 : mesures HEIG-VD de formation de TFA à partir d'une émission de réfrigérant HFO (sous-projet 1).....	45
Annexe 3 : hypothèses de modélisation de l'écobilan de la pompe à chaleur air-eau KBOB (sous-projet 2).....	48

Annexe 4 : plate-forme de simulation énergétique et d'évaluation de l'empreinte carbone des PAC dans les bâtiments (sous-projet 3)	49
Workflow	49
Sélection des bâtiments d'étude	52
Rénovation de l'enveloppe	53
Trajectoires et production de chaleur	55

Liste des illustrations

Figure 1 : Organisation et responsabilités des différents membres du projet LCA-PAC	11
Figure 2 : Schéma de l'organisation des WP et de leurs liens avec les sous-projets.....	12
Figure 3 : Schéma de principe d'une PAC avec les différents niveaux de température	13
Figure 4 : Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant (A2W35) pour une PAC air/eau établie à partir de données mesurées par le centre d'essai des pompes à chaleur de la Haute Ecole OST	15
Figure 5: Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant pour une PAC air/eau (A2W35 R410A & R407C) établie à partir des données mesurées par le centre d'essai des pompes à chaleur de OST	15
Figure 6 : Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et charge en réfrigérant, PAC air/eau (R410A & R407C) établie à partir des données de mesures du centre d'essai des pompes à chaleur de la Haute Ecole OST	16
Figure 7 : Relation entre le ratio charge sur puissance de chauffe ($\text{charge}/Q_{\text{chaud}}$) et le COP établie à partir des données mesurées par le centre d'essai des pompes à chaleur de la Haute Ecole OST....	16
Figure 8 : Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant pour une PAC air/eau et des configurations split et normal établie à partir des données du centre d'essai des pompes à chaleur de OST	17
Figure 9 : Schéma du périmètre de l'écobilan d'une pompe à chaleur et des différentes étapes prises en compte	19
Figure 10 : Contributions relatives des différents procédés dans l'écobilan de la fabrication de la PAC air-eau 7 kW (KBOB 2022 version 7.0)	20
Figure 11 : Ecart relatif pour les indicateurs KBOB entre l'écobilan de référence de la PAC air-eau 15 kW (Kägi et al 2021) et l'écobilan déterminé par le modèle paramétré ajusté	24
Figure 12 : Décomposition des émissions de GES sur les différentes étapes du cycle de vie	25
Figure 13 : Sensibilité des émissions de GES pour différentes puissances de PAC air-eau selon le type de fluide (avec scellement en usine, DDV de 20 ans, mix consommateur CH, COPA 4.4)	26
Figure 14 : Evolution des GES émis sur la phase d'exploitation en fonction du COP pour différents mix électrique (PAC Air-eau, 15 kW, HFC (R410A) avec scellement en usine, DDV de 20 ans)	27
Figure 15 : Architecture de la plateforme de simulation de trajectoires de rénovation	29
Figure 16 : Logique d'étude à l'échelle du bâtiment : génération des scénario et KPI annuels	31
Figure 17 : Relation entre COP et masse de fluide frigorigène ajoutée (Da Riva, 2024)	39
Figure 18 : Architecture des modèles et flux de données (LCA-PAC)	49
Figure 19 : Coûts de la mesure pour l'économie d'un kWh sur la durée de vie [3]	54



Figure 20 : Coûts spécifiques par surface d'élément concerné [3] [4]	55
Figure 21 : Schématisation de la plateforme de simulation sur une année [3]	56
Figure 22 : Trajectoire « voie royale » : rénovations de l'enveloppe, puis installation de la PAC, avec simulation et KPI annuels.	57
Figure 23 : Trajectoire « Reduce Now » : installation de la PAC, puis rénovations de l'enveloppe, avec simulation et KPI annuels.	58
Figure 24 : Trajectoire « Switch Complet » : rénovations de l'enveloppe et installation de la PAC la même année, avec simulation et KPI annuels.	59
Figure 25 : Trajectoire « monovalence progressive » : PAC en bivalence, puis rénovations et bascule en monovalent, avec simulation et KPI annuels.	60
Figure 26 : Logique d'étude à l'échelle du bâtiment : génération des scénarios et KPI annuels.	61
Figure 27 : Comparaison lois d'eau optimisées high-flow et low-flow du bâtiment TypoReno G3 issu du projet TDROP [3]	62
Figure 28 : Émissions annuelles de CO ₂ e par m ² en fonction de la demande de chauffage par m ² de producteur de chaleur fossile au gaz, d'une PAC air-eau et d'une PAC eau-sol, avec ou sans PV, et lecture des trajectoires « Reduce Now » et « Voie Royale »	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ecobilan avant et après correction du taux de fuite de fabrication et d'élimination de la données KBOB Pompe à chaleur air-eau 7 kW	21
Tableau 2 : Règles d'extrapolation de la masse de la PAC en fonction de sa puissance	21
Tableau 3 : Règles d'extrapolation de la masse de la PAC en fonction de sa puissance	22
Tableau 4 : Taux de fuite en fonction du type de scellement	22
Tableau 5 : Liste des paramètres techniques et d'exploitations	22
Tableau 6 : Récapitulatif du jeu de données introduit dans le modèle paramétré	25
Tableau 7 : Sujets d'étude retenus	52
Tableau 8 : Matrice d'applicabilité des mesures de rénovation par typologie de bâtiment	54



Liste des abréviations

ACV	Analyse de Cycle de Vie
BIV	Bivalence
CED NRE	Consommation d'énergie non renouvelable
COP	Coefficient de Performance
COPA	COP annuel
DGE	Direction Générale de l'Environnement (Vaud)
DIREN	Direction de l'Énergie (Vaud)
ECS	Eau Chaude Sanitaire
eCCC-Bât	Code des Coûts de Construction par Éléments Bâtiment
EnDK	Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie
FOS	Fossile
FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen (Association Professionnelle des Pompes à Chaleur)
GES	Gaz à effet de serre
GWP	Global Warming Potential (synonyme de PRP ou PRG)
GSP	Groupement Suisse des Pompes à Chaleur
HFC	Hydrofluorocarbures
HFO	HydroFluoroOléfines
KPI	Key Performance Indicators / Indicateurs Clés de Performance
LCA-PAC	Écobilan paramétré des pompes à chaleur pour la décarbonation des bâtiments
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OST	Ostschweizer Fachhochschule (Haute Ecole Spécialisée de Suisse Orientale)
PAC	Pompe à chaleur
PFAS	Substances Per- et Polyfluoroalkylées
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
SIG	Services Industriels de Genève
SRE	Surface de Référence Energétique
TFA	Acide Trifluoroacétique
UBP	Umweltbelastungspunkte (Écopoints)
WP	Work Packages
WPZ	Wärmepumpen-Testzentrum (Centre d'essai des pompes à chaleur)

1 Introduction

Avec plus de 300 000 bâtiments équipés de pompes à chaleur (PAC) en Suisse (soit 18% du parc selon l'OFS en 2024), les pompes à chaleur commencent à jouer et vont jouer un rôle de plus en plus central dans la décarbonation du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire d'ici 2050 dans la voie vers l'atteinte de zéro net émissions de GES. De nombreux plans cantonaux et de la Confédération envisagent un déploiement significatif des PAC [1]. Par exemple, le plan chaleur du canton de VD (DGE, 2021) prévoit un déploiement massif des pompes à chaleur à horizon 2035, utilisant différentes sources froides comme la géothermie, l'aérothermie, les rejets thermiques, les lacs ou la nappe, avec à terme près de 45% de la chaleur fournie à l'échelle cantonale¹.

Le projet LCA-PAC vise à lever plusieurs barrières et manque de précision quant à l'évaluation de l'empreinte carbone des pompes à chaleur en travaillant sur une approche multi-échelle depuis la machine thermique (et ses composants et niveau de charge de réfrigérants) jusqu'à son intégration dans le parc bâti selon différentes trajectoires de décarbonation (rénovation de l'existant notamment) et selon différentes sources froides (air-eau, saumure-eau etc.).

Le contexte scientifique et technique et les motivations de ce projet décrites plus en détails en Annexe 1 de ce rapport annuel ont permis de dégager les limites et problématiques suivantes :

- La pompe à chaleur est une technologie majeure pour la décarbonation du parc bâti mais reste mise en œuvre dans des contextes de bâtiments très différents ce qui influence son empreinte carbone (risque de « *performance gap carbone* »)
- Besoin d'aller vers des modèles paramétrés d'écobilan pour une meilleure évaluation des différents fonctionnements in-situ dans les bâtiments
- Les données d'écobilan actuelles (recommandation KBOB/eco-bau/IPB 2009/1:2022) sur cette technologie restent trop génériques ; les règles d'extrapolation ne sont pas spécifiées par puissance ou selon la typologie de bâtiment
- Le choix du réfrigérant utilisé dans les PAC (fluide de synthèse (HFC, HFO) et naturels (p.ex. butane, propane)) n'est également pas un paramètre différenciant de l'écobilan même si des travaux menés à l'étranger montrent le rôle non négligeable que peuvent jouer les réfrigérants sur les émissions de GES
- Peu ou pas de retour d'expériences in-situ sur la question de la maintenance (taux de fuites même si les livrets d'entretien sont obligatoires à tenir à jour par les installateurs selon l'OFEV, durée de vie plus faible en pratique que les 20 ans utilisée en planification, etc.)
- Intérêt de coupler l'empreinte carbone des PAC sur la fabrication et maintenance avec l'empreinte carbone de la consommation électrique en fonctionnement. Des aspects saisonniers (chauffage en hiver, recharge de sondes géothermiques en été) peuvent amener à un profil carbone singulier pour l'électricité avec une empreinte carbone plus élevée en hiver lorsque la PAC assure les besoins de chaud et à contrario un profil moins carboné en été dans le cas de recharge estival de PAC sur sondes géothermique
- Intérêt d'étudier une large palette de situation concrète d'implémentation de PAC dans le parc de bâtiments et notamment pour différentes trajectoires de décarbonation posant la question des dimensionnements des PAC selon le timing d'intégration (avant rénovation, après une rénovation partielle ou après une rénovation complète / dans du neuf...).

Sur la base de ces limites, le plan de travail LCA-PAC est défini puis mis en œuvre selon trois sous-projets permettant d'adopter une démarche originale de l'échelle de la pompe à chaleur jusqu'à son intégration dans les bâtiments avec une évaluation transversale par écobilan de la performance globale du système et de la production de chaleur.

¹ <https://www.vd.ch/themes/environnement/energie/energies-renouvelables-bois-hydraulique-geothermie-profonde-energies-eolienne-et-solaire/perspectives-chaleur>

2 Organisation et plan de travail

2.1. Objectifs du projet

Le projet LCA-PAC vise à développer une méthodologie d'écobilan paramétrée pour caractériser, à différentes échelles (de la machine thermique jusqu'à son intégration dans les bâtiments), les émissions de GES et autres impacts environnementaux associés. Il vise à répondre à la question de recherche générale suivante :

« Comment évaluer les émissions de GES directes et indirectes de trajectoires de décarbonation de bâtiments intégrant des pompes à chaleur en distinguant les différentes pratiques actuelles aux différentes échelles (de la conception de la machine jusqu'à sa mise en œuvre in-situ dans un parc de bâtiments visant l'atteinte du zéro nette en 2050) ? »

Ce projet s'inscrit dans des initiatives récentes qui viennent d'être publiées en 2025 comme l'étude de l'ETHZ dans Nature Communications montrant les problèmes d'efficacité en pratique des pompes à chaleur avec 20% des PAC qui sont en Suisse et en Europe mal installées [2]. Bien souvent, ces surdimensionnements ou problèmes de mise en œuvre engendrent une augmentation de la puissance de la machine ou un mauvais réglage de sa courbe de chauffe engendrant surconsommation de matériaux, réfrigérants ou d'électricité. Ce qui conduit in fine à augmenter l'empreinte carbone associée à la production de chaleur par les pompes à chaleur. C'est justement sur cet angle précis et de manière complémentaire à l'étude de l'ETHZ que le projet OFEN LCA-PAC se positionne. Il propose une approche globale d'évaluation de l'empreinte carbone en analysant les différents problèmes identifiés depuis la machine et ses questions de surdimensionnements de ses composants et de sa charge de réfrigérant jusqu'aux problématiques d'intégration et de dimensionnement des PAC dans les bâtiments (mise en œuvre, surdimensionnement et surtout variabilité de fonctionnement in-situ sur la consommation électrique, le COP ou les fuites de réfrigérants par exemple).

Sous-projet 1 : Dimensionnement et performance des pompes à chaleur

Ce volet se concentre sur l'expertise technique des PAC, des technologies, et des fluides frigorigènes.

- **Objectif spécifique** : Fournir une base de données technique permettant d'étudier le lien entre le COP et différents paramètres de la machine (charge spécifique en fluide frigorigène, taille des échangeurs) et collecter des données sur les taux de fuite in-situ de réfrigérants pendant le fonctionnement de la PAC. Ce travail permet d'identifier des optimums environnementaux à l'échelle de la PAC pour réduire son empreinte carbone sur tout son cycle de vie (fabrication et dimensionnement des composants comme les échangeurs, choix du fluide, taux de fuite...) et en vérifiant les conditions de maintien d'une bonne efficacité (COP).
- **Résultat attendu** : Établissement de règles empiriques pour estimer par exemple la charge de fluide et le taux de fuite en fonction de la technologie (air/eau, sol/eau, monobloc/split) servant de données ou règles de calcul en entrée du modèle de calcul d'écobilan paramétré dans le sous-projet 2 à l'échelle de la PAC.

Sous-projet 2 : Modèle d'écobilan paramétré de PAC

Ce sous-projet part des données d'écobilan disponibles en Suisse et propose des modèles paramétrés utilisables pour évaluer différentes variantes de pompes à chaleur (en lien avec le sous-projet 1) ou différentes trajectoires de décarbonation de bâtiments (en lien avec le sous-projet 3).

- **Objectif spécifique** : Développer un modèle d'écobilan paramétré et flexible, capable d'ajuster l'écobilan aux conditions de fonctionnement de la PAC. Le modèle intègre les résultats du sous-projet 1 et les modèles d'écobilan disponibles dans la KBOB (études Carbotech et HSLU

notamment) tout en les améliorant. Mener une analyse spécifique sur l'influence du mix électrique sur l'empreinte carbone de la chaleur fournie par les PAC.

- Résultat attendu : Un modèle validé permettant de différencier de l'écobilan selon les paramètres clés des PAC (COP, PRG du réfrigérant, mix électrique), et servant de base pour les études de cas à l'échelle bâtiment et la plateforme de simulation du sous-projet 3.

Sous-projet 3 : Intégration des PAC dans les bâtiments

Ce volet vise à appliquer et à valoriser les données, modèles et résultats obtenus dans les parties précédentes (sous-projets 1 et 2) dans des études de cas simulés et/ou ex-post. Ce sous-projet nécessite toutefois un développement préalable substantiel et spécifique pour simuler la performance énergétique d'un bâtiment sur son enveloppe et son installation de production de chaleur avant d'évaluer l'empreinte carbone de l'intégration des PAC.

- Objectif spécifique : Simuler l'intégration technique et énergétique des PAC dans différents types de bâtiments et scénarios de décarbonation pour calculer l'empreinte carbone des PAC intégrées aux bâtiments. Le travail se concentre sur des études de cas de bâtiments (rénovation, neuf, bivalence) et à l'échelle parc (écobilan de trajectoire de décarbonation à l'horizon 2050).
- Résultat attendu : Simulation des besoins d'un bâtiment, définition des leviers d'action les plus performants pour minimiser les impacts environnementaux à l'échelle du bâtiment (combinaison isolation/PAC/système de distribution) et formulation de recommandations concrètes pour les autorités de planification et les professionnels du bâtiment en vue d'atteindre les objectifs Net-Zéro de la Stratégie énergétique 2050.

2.2. Organisation du projet

Le projet est conduit par l'Institut des Énergies (IE) de la HEIG-VD et ses trois équipes de recherches distinctes :

- Pompes à chaleur : Enrico Da Riva, Lucas Vonlanthen – expertise sur les performances, technologies et fluides frigorigènes.
- Écobilan des bâtiments et systèmes énergétiques : Sébastien Lasvaux, Mija Frossard, Gauthier Demonchy, développement du modèle paramétré et intégration environnementale.
- Intégration bâtiment-système : Alexis Duret – analyse de l'intégration technique et énergétique des PAC dans différents contextes bâtis.

Le projet s'appuie par ailleurs sur un réseau solide de partenaires de terrain et de cofinancement :

- SIG et SIG-éco21 (GE) : soutien confirmé, participation à la collecte de données de PAC en exploitation et cofinancement partiel.
- Groupement Suisse des Pompes à Chaleur (GSP/FWS) : appui technique et diffusion des résultats auprès des professionnels.
- État de Vaud (DGE | DIREN) : soutien de principe pour l'exploitation des résultats à des fins de planification énergétique cantonale.
- Ville de Zurich (Amt für Hochbau) : contact en cours pour l'accès à des cas d'étude supplémentaires.
- Fabricants de PAC : discussions en cours pour la mise à disposition de données techniques et de retours d'expérience.

Les équipes de recherche impliquées de la HEIG-VD s'occupent chacune d'un sous-projet propre à leur échelle d'analyse et à leurs compétences, de la PAC à l'échelle du bâtiment, en passant par l'évaluation transversale par écobilan de l'échelle PAC à l'échelle bâtiment (Figure 1).

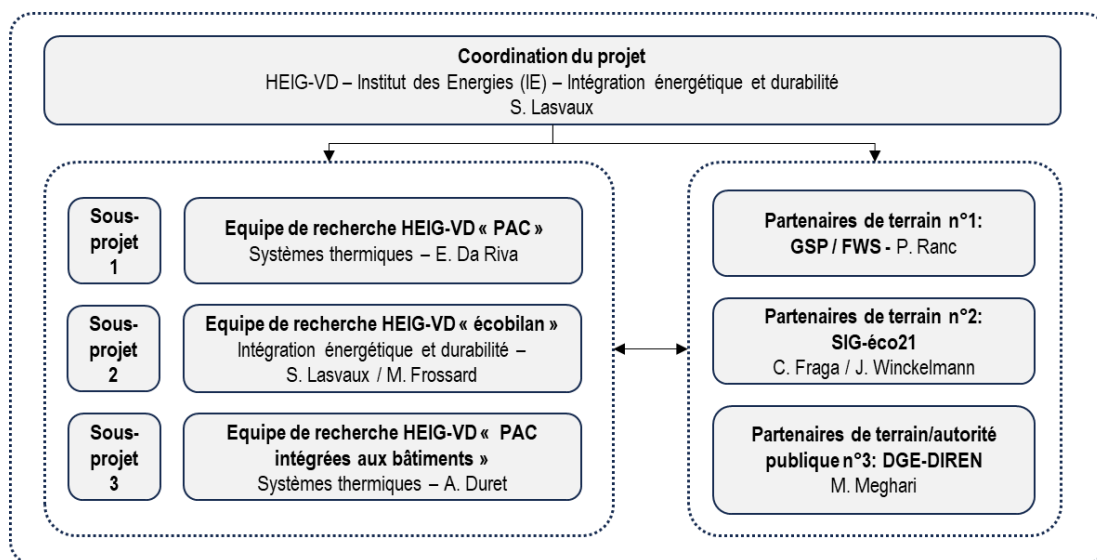


Figure 1 : Organisation et responsabilités des différents membres du projet LCA-PAC.

La coordination du projet comprend une séance annuelle avec le comité de suivi à mi-année (la première a eu lieu en Juillet 2025) et la remise chaque fin d'année d'un rapport annuel de suivi détaillant l'avancement scientifique et technique (objet de ce rapport annuel 2025). Finalement, chaque sous-projet est coordonné par une équipe de la HEIG-VD qui suit mensuellement l'avancement du travail. Des séances de coordination entre sous-projets sont également prévues chaque deux mois.

2.3. Articulation des WP avec les différentes échelles (sous-projets)

Le projet est structuré en sept *Work Packages* (WP). En dehors des WP 1 et WP 7 de coordination et de dissémination, les autres WP sont centrés sur la collecte de données (WP 2), la méthodologie et le développement (WP 3) et les études de cas à différentes échelles (WP 4, WP 5 et WP 6). Les sous-projets sont concernés par plusieurs WP transverses et par l'application à des cas d'études à leur échelle d'analyse. Les WP et leurs liens avec les sous-projets sont indiqués dans la Figure 2.

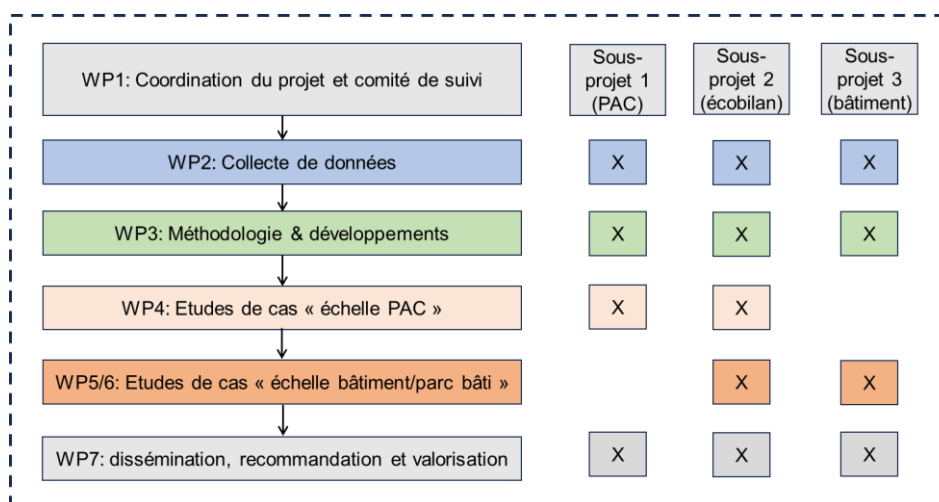


Figure 2 : Schéma de l'organisation des WP et de leurs liens avec les sous-projets

3 Travaux effectués et résultats

Les travaux effectués et les résultats sont présentés par sous-projet dans les sous-chapitres suivants.

Table 1: Synthèse des travaux réalisés en 2025

	Sous-projet	WP rattachés	Sous-chapitre et annexes
1	échelle PAC	WP2, W3, WP4	§ 3.1 et annexe 2
2	Modèle de calcul d'écobilan	WP2, W3, WP4, WP5/6	§ 3.2 et annexe 3
3	Intégration des PAC dans les bâtiments	WP2, W3, WP5/6	§ 3.3 et annexe 4

3.1. Sous-projet 1 : Dimensionnement et performance des pompes à chaleur

La pompe à chaleur est aujourd'hui perçue comme une technologie de chauffage écologique, mais son bon dimensionnement joue un rôle déterminant dans son impact environnemental global, notamment en raison des fluides frigorigènes qu'elle contient. Une PAC est une machine qui, en consommant de l'électricité, est capable de faire passer de la chaleur d'un niveau de température à un autre. Ces deux niveaux de température sont appelés des sources thermiques. Pour capter de l'énergie de ces sources ou en rejeter, il faut des échangeurs de chaleur. Ces éléments fonctionnent avec une différence (delta) de température : plus ce delta est faible, plus la surface d'échange doit être grande, et donc le volume doit être important. Ce delta T a un impact direct sur l'efficacité énergétique de la pompe à chaleur. La situation de gauche de la Figure 3 présente une machine avec de grands échangeurs de chaleur. Les deltas T sont faibles, ce qui permet de rapprocher les températures d'évaporation et de condensation, et donc d'améliorer le coefficient de performance (COP). À l'inverse, la machine de droite possède de

petits échangeurs. Les grands deltas T demandent à la machine de travailler davantage, ce qui dégrade le COP. Cependant, des petits échangeurs signifient également des volumes moindres, et donc moins de fluide frigorigène. Ce qui limite l'impact environnemental en cas de fuite.

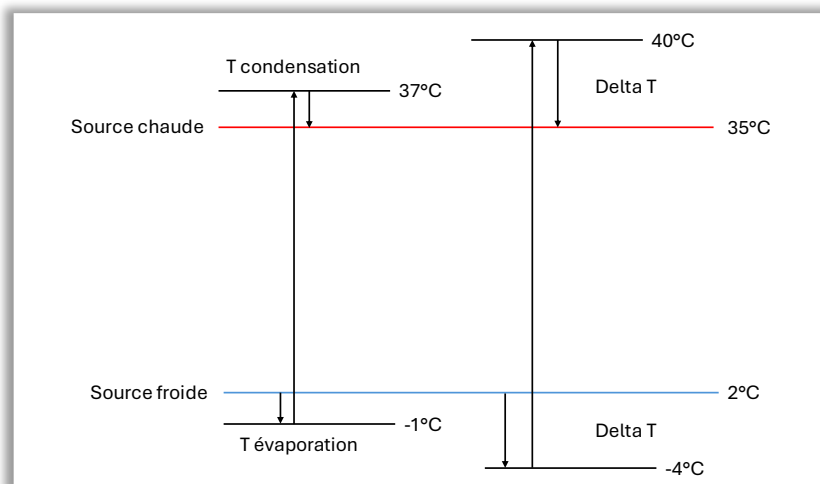


Figure 3 : Schéma de principe d'une PAC avec les différents niveaux de température

Une fois les échangeurs sélectionnés, le remplissage d'une machine définit son COP. Pour tout volume de machine il existe une charge optimale. Cette charge peut être facilement mesurée mais elle est difficile à calculer à l'avance (cf. Figure 17 dans l'Annexe 1 sur les problématiques associées aux pompes à chaleur utilisées dans les bâtiments).

Tout l'enjeu de ce sous-projet 1 est donc de préciser les conditions optimales de fonctionnement d'une PAC permettant de minimiser son impact environnemental en tenant compte de son dimensionnement, du niveau de charge du réfrigérant et bien sûr de son COP. Ce rapport présente un état de la technique grâce à l'analyse de données de centaines de PAC en Suisse. Plus précisément, la relation entre puissance et charge de fluide et l'impact de la charge à puissance donnée sur le COP est présenté selon une approche empirique utilisant des données sur des PAC du marché.

Deux questions de recherche principales guident ce sous-projet :

- Comment le choix de réfrigérant, la taille des échangeurs, la répartition de charge de réfrigérant entre les composants d'une PAC influence le COP ?
- Quelles sont les conditions optimales de conception et de fonctionnement (taux de fuites) d'une PAC permettant de minimiser son écobilan sur tout le cycle de vie (en lien avec le sous-projet 2) ?

Deux questions de recherche principales guident ce sous-projet 2 centré sur la paramétrisation de l'écobilan des pompes à chaleur :

- Quelles sont les paramètres influents dans l'écobilan des PAC et quel est le bon niveau de décomposition du modèle de calcul d'écobilan pour différencier les différentes performances des PAC et fournir des données plus ajustées aux leviers d'action des planificateurs ?
- Quelle est l'influence du calcul d'écobilan de l'électricité consommée par les PAC dans le cadre de trajectoire de décarbonation (question de recherche en synergie avec le sous-projet 3 à l'échelle bâtiment) ?

Deux questions de recherche principales guident ce sous-projet 3 centré sur la notion de trajectoire temporelle (et prospective) de décarbonation :

- Quelle est le niveau de décarbonation réellement atteignable pour un parc de bâtiments, par rapport à la décarbonation planifiée par les politiques cantonales et fédérales ?
- Quel est le séquençage optimal pour la décarbonation entre la rénovation de l'enveloppe et le *fuel switch* intégral ou progressif (bivalence transitoire), compte tenu de contraintes opérationnelles telles que les budgets (carbone et financier) disponibles ?

3.1.1. Collecte de données et méthode

Ce chapitre présente un état des lieux du marché suisse des pompes à chaleurs à travers l'analyse des résultats de tests menés par la Haute Ecole de Suisse Orientale (OST)². Il s'agit de données publiques du Wärmepumpen-Testzentrum (WPZ) qui réalise des essais normalisés permettant d'attribuer les étiquettes énergétiques aux PAC commercialisées en Suisse. Plus de 200 machines domestiques ont été considérées, réparties entre systèmes air/eau et sol/eau. Les essais sont effectués sous conditions standardisées A2/W35 pour les PAC air/eau et B0/W35 pour les PAC sol/eau, assurant une comparabilité suffisante entre produits. Dans cette étude, l'accent est mis sur les machines de puissance ≤ 15 kW, représentatives du marché résidentiel et majoritaires dans les données d'OST.

Cette analyse statistique permet d'évaluer les pratiques actuelles des fabricants de PAC en matière de :

- Charge de fluide par puissance thermique ;
- Différence de dimensionnement en fonction du type de fluide frigorigène ;
- Variation de charge en fonction de la technologie de machine ;
- Evolution du COP en fonction de la charge par kW de chaleur.

3.1.2. Travaux réalisés et résultats obtenus

a) Charge en fluide et influence du type de PAC

Les points de données d'OST pour les PAC air/eau sont présentés à la Figure 4. Ils représentent graphiquement les charges de fluides selon la puissance thermique et le type de fluide. Une première observation est la forte dispersion de la charge de fluide frigorigène pour une même puissance nominale. Deux PAC de même puissance thermique peuvent contenir des quantités de fluide frigorigène très différentes, avec des écarts pouvant aller jusqu'à un facteur cinq.

² Ostschweizer Fachhochschule: Prüfergebnisse Luft/Wasser-Wärmepumpen basierend auf der EN 14511 und EN 14825, disponible au lien suivant: <https://www.ost.ch/de/forschung-und-dienstleistungen/technik/systemtechnik/ies/wpz/pruefresultate-waermepumpen>

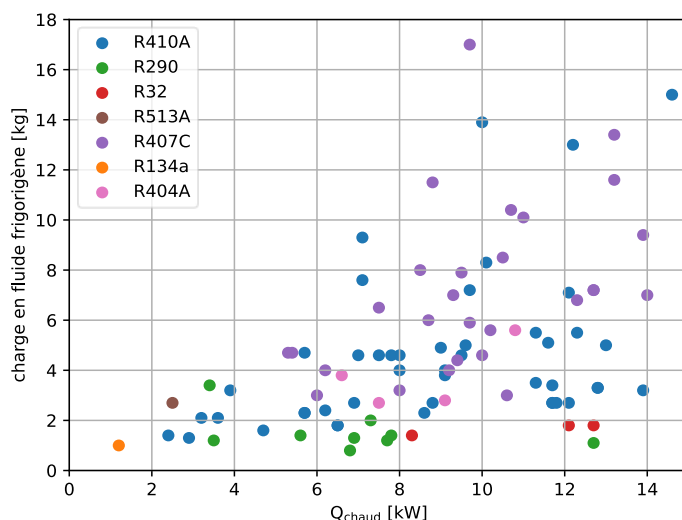


Figure 4 : Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant (A2W35) pour une PAC air/eau établie à partir de données mesurées par le centre d'essai des pompes à chaleur de la Haute Ecole OST

Une analyse par type de fluide met en évidence différentes tendances. Le propane (R290, points verts) ainsi que le R32 (points rouges) sont des fluides inflammables, avec des normes de sécurité strictes notamment quand la charge dépasse 5 kg. Cela explique pourquoi tous les points correspondant à ces machines se trouvent avec des niveaux de charge plutôt stables entre 1 et 4 kg de fluide quelle que soit la puissance thermique. Quant au R32, avec seulement 3 points, ce n'est pas suffisant pour l'analyse. Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de se focaliser sur les fluides non inflammables, plus particulièrement le R410A et le R407C, qui sont majoritaires dans le jeu de données. Ils sont présentés en Figure 5 avec une régression linéaire et les tendances minimales et maximales estimatives. On peut observer une tendance à l'augmentation de la charge de fluide en fonction de la puissance avec un facteur multiplicatif de 0,6. Toutefois, le R^2 de cette régression est faible (0,2) et la dispersion croissante indique une forte variabilité dans ce dimensionnement parmi les modèles du marché.

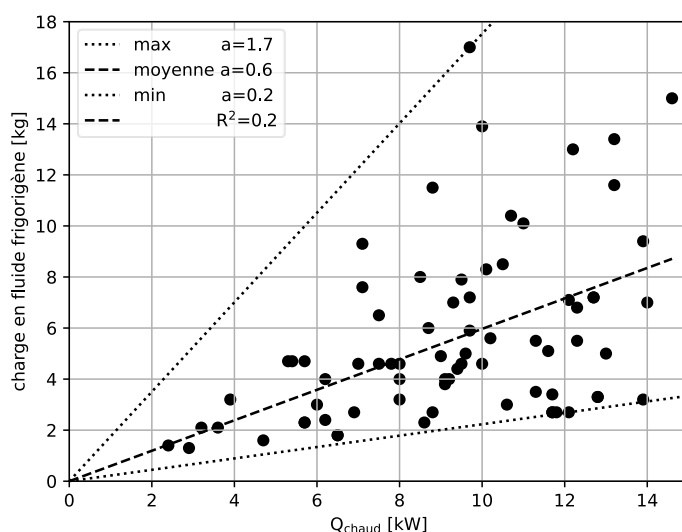


Figure 5: Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant pour une PAC air/eau (A2W35 R410A & R407C) établie à partir des données mesurées par le centre d'essai des pompes à chaleur de OST

Ces mêmes tendances ont été appliquées au jeu de données des PAC Sol/Eau et comparées à celles précédentes des PAC Air/Eau en Figure 6. Malgré des variabilités élevées dans les deux jeux de

données, on peut observer que les PAC Sol/Eau se distinguent par une charge de fluide globalement moins élevée que les PAC Air/Eau, en moyenne d'un facteur 2.

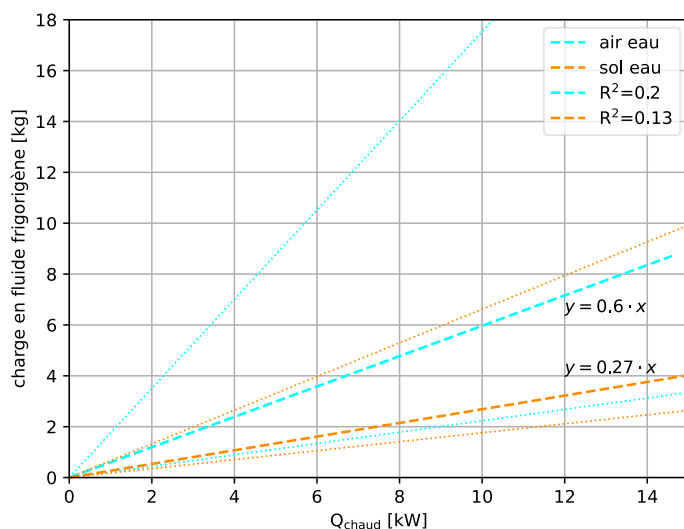


Figure 6 : Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et charge en réfrigérant, PAC air/eau (R410A & R407C) établie à partir des données de mesures du centre d'essai des pompes à chaleur de la Haute Ecole OST

b) Corrélation entre efficacité (COP) et charge de fluide

La Figure 7 présente le COP des PAC air/eau aux conditions nominales A2W35 en fonction de la charge de fluide frigorigène spécifique [kg/kW]. Une forte variabilité peut être observée. Par exemple, pour le R410A et un COP de 4, certaines machines ont besoin de 0.25 kg/kW de réfrigérant alors que d'autres ont besoin de 0.8 kg/kW soit plus de 3 fois plus. En supposant des PAC de 10 kW et pour un même COP, l'une fonctionnerait donc avec 2.5 kg de fluide quand l'autre serait à 8 kg. Malgré une tendance pour les données du R410A (points bleus), et dans une moindre mesure pour le R407C (points violets), il n'est pas possible de vérifier, pour toutes les PAC, que plus les échangeurs sont grands (Charge/ Q_{chaud} qui augmente), plus le COP est amélioré. D, d'autres aspects influencent les choix de dimensionnement.

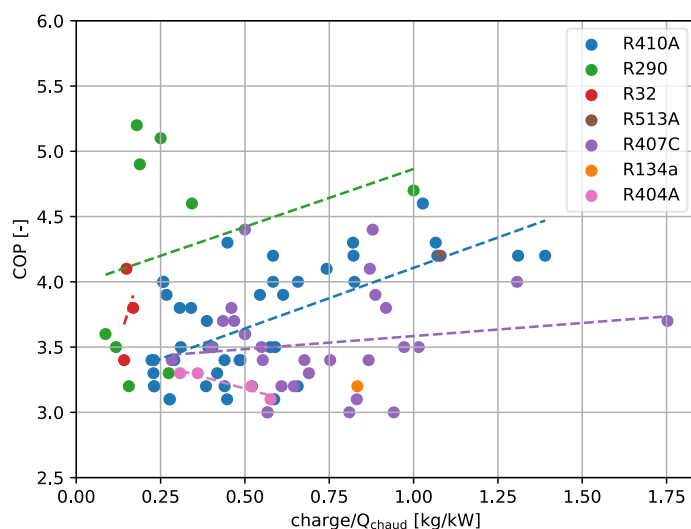


Figure 7 : Relation entre le ratio charge sur puissance de chauffe (charge/ Q_{chaud}) et le COP établie à partir des données mesurées par le centre d'essai des pompes à chaleur de la Haute Ecole OST

c) Impact du type d'installation (Split vs. Monobloc)

Les machines de type split et les machines monoblocs se distinguent par les liaisons du circuit frigorifique. Les modèles split nécessitent une liaison frigorifique réalisée sur site, ce qui augmente la probabilité de fuites par rapport aux machines monobloc, dont le circuit frigorifique est entièrement scellé en usine sous des conditions de qualité contrôlées. La figure suivante présente la relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant pour ces deux configurations.

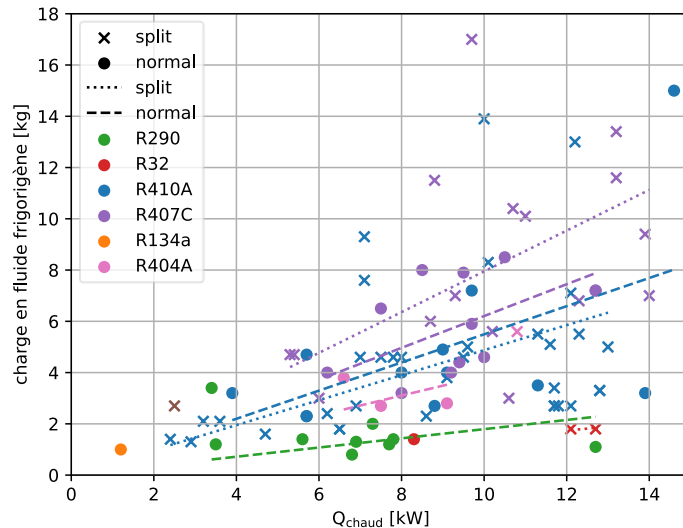


Figure 8 : Relation entre la puissance de chauffe (Q_{chaud}) et la charge en réfrigérant pour une PAC air/eau et des configurations split et normal établie à partir des données du centre d'essai des pompes à chaleur de OST

Au sein des données d'OST, aucune différence notable n'a été observée entre les machines « split » et les versions « monobloc » en termes de charge spécifique de fluide frigorigène (Figure 8). Cette observation ne confirme donc pas l'idée selon laquelle le volume de fluide dans les conduites reliant les unités des machines split entraînerait une augmentation significative de la charge totale.

d) Bilan des liens entre les paramètres de fonctionnement de la PAC (sur observation empirique)

Sur la base de ces analyses, les règles empiriques suivantes ont été dérivées pour estimer la charge de fluide des PAC, données utilisées comme base dans le modèle d'écobilan paramétré développé au point suivant. L'ajustement affine de type $ax+b$ est privilégié pour ne pas introduire une tendance croissante artificielle dans les relations que nous recherchons. Les relations suivantes ont été déterminées pour lier la charge de fluide et la puissance de PAC ayant des fluides frigorigènes R410 et Propane :

- PAC Air/Eau (R410A) : $m_{\text{charge}} = 0.398 \times P - 0,147$
- PAC Sol/Eau (R410A) : $m_{\text{charge}} = 0.179 \times P + 0.3454$
- PAC Air/Eau (Propane) : $m_{\text{charge}} = 0.2 \times P$

Elles sont utilisées dans le modèle d'écobilan paramétré développé dans le sous-projet 2.

3.2. Sous-projet 2 : Modèle d'écobilan paramétré de PAC

Cette partie du projet vise à analyser l'ensemble des contributions de l'impact environnemental de la PAC afin de réaliser une analyse de cycle de vie représentative de différentes pompes à chaleur et contexte d'intégration dans les bâtiments. Elle intègre les résultats de la partie précédente (relations entre : COP, charge de fluide, puissance) pour définir un modèle d'écobilan paramétré.

Deux questions de recherche principales guident ce sous-projet centré sur la paramétrisation de l'écobilan des pompes à chaleur :

- Quelles sont les paramètres influents dans l'écobilan des PAC et quel est le bon niveau de décomposition du modèle de calcul d'écobilan pour différencier les différentes performances des PAC et fournir des données plus ajustées aux leviers d'action des planificateurs ?
- Quelle est l'influence du calcul d'écobilan de l'électricité consommée par les PAC dans le cadre de trajectoire de décarbonation (question de recherche en synergie avec le sous-projet 3 à l'échelle bâtiment) ?

3.2.1. Collecte de données et méthodes

Le travail mené dans ce volet du projet a pour objectif principal de développer un modèle d'écobilan paramétré des PAC, permettant de représenter plus fidèlement leurs impacts environnementaux dans des conditions d'usage variées renseignées par l'utilisateur.

L'évaluation environnementale actuelle des PAC repose majoritairement sur les données issues de la base de données d'écobilan KBOB, qui constitue la référence nationale pour la Suisse. Cette base, bien qu'exhaustive sur les matériaux de construction, se limite, sur la technique du bâtiment, à quelques configurations standards en ce qui concerne les PAC, principalement une PAC air-eau et saumure-eau de 7 kW utilisant un réfrigérant R410A. L'utilisateur (planificateur de bâtiment) ne peut donc pas évaluer en termes d'écobilan l'influence de la diversité technologique des PAC du marché. Or, les performances énergétiques et les émissions associées d'une PAC peuvent varier fortement selon plusieurs paramètres :

- la technologie (air-eau, eau-eau, saumure-eau) ;
- la puissance nominale de la machine ;
- le fluide frigorigène utilisé et son potentiel de réchauffement global (PRG) ;
- le type de scellement (en usine ou sur site) ;
- la durée de vie et les conditions d'entretien ;
- la provenance de l'électricité alimentant la PAC.

L'objectif est donc de réaliser un modèle paramétré permettant d'ajuster ces variables et d'obtenir, pour chaque configuration, une évaluation représentative de l'impact environnemental. Ce modèle a vocation à être intégré ultérieurement dans un calculateur utilisable par les acteurs du bâtiment et les experts mandatés par l'OFEN.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Structurer un modèle d'ACV paramétré basé sur les données KBOB/UVEK corrigées ;
- Valider la cohérence du modèle par comparaison avec les données de référence disponibles ;
- Identifier et formaliser les paramètres clés influençant les résultats d'écobilan ;
- Préparer son intégration dans un outil automatisé et sa connexion aux bases d'ACV bâtiment existantes

L'écobilan a été défini afin de couvrir l'ensemble du cycle de vie des pompes à chaleur étudiées. Cette approche permet d'englober toutes les étapes du système, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la gestion des déchets en fin de vie, garantissant ainsi une vision complète des impacts environnementaux.

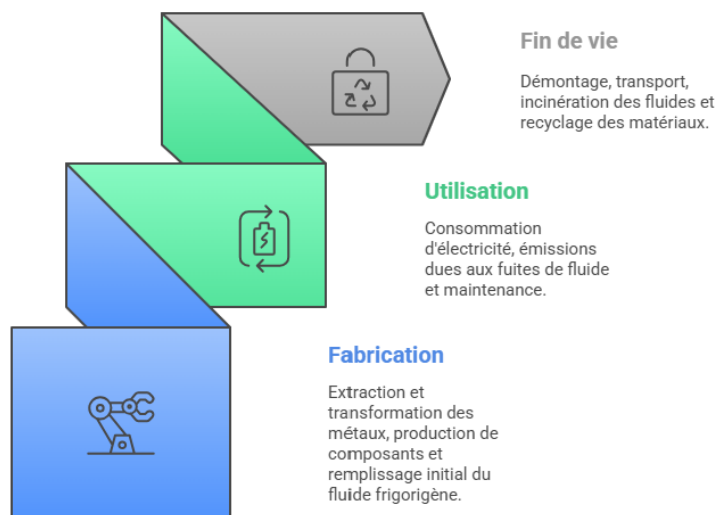


Figure 9 : Schéma du périmètre de l'écobilan d'une pompe à chaleur et des différentes étapes prises en compte

Le modèle paramétré d'écobilan permet de calculer deux types d'écobilan :

- l'écobilan d'une PAC sur les étapes de fabrication et d'élimination en repartant des données et modèle d'écobilan « exact » établis sur des PAC de puissance 7kW (donnée KBOB³), 15 kW et 50 kW (donnée uniquement disponible dans la base de données UVEK 2022 (nouvellement appelée BAFU 2025⁴) dans la dernière étude d'écobilan de PAC pour la KBOB [3]. Ces données de référence d'écobilan de PAC sont ensuite à paramétrer pour une plage de puissance pour calculer les écobilans de PAC d'une autre puissance. L'approche actuelle (KBOB 2022 version 7.0) consistant à utiliser un ratio d'écobilan par kg de PAC et à ajuster l'écobilan d'une PAC à partir de son poids (cf. fiche technique)⁵. Dans ce projet, l'unité fonctionnelle sera mise à jour en définissant un écobilan par kW de PAC qui sera calculé à partir de régression linéaire reliant les différents paramètres de la machine dont son poids.
- L'écobilan par kWh de chaleur utile⁶ (chauffage et/ou ECS) d'un bâtiment neuf ou existant en ajoutant à l'écobilan de la fabrication et élimination de la machine (PAC) une demande de chaleur et un COP pour calculer son impact de fonctionnement pendant l'utilisation du bâtiment auquel s'ajoute également les pertes de réfrigérant en parallèle pendant sa durée de vie.

3.2.2. Travaux réalisés et résultats obtenus

a) Analyses de contributions initiales de l'écobilan d'une PAC air-eau

³ Données KBOB ID 31.017, 31.019 par unité de PAC 7 kW et ID 31.018, 31.020 par kg de PAC

⁴ Lien vers la base de données d'arrière-plan de la KBOB BAFU 2025 : <https://nexus.openlca.org/database/BAFU>

⁵ Ce modèle paramétré pour les pompes à chaleur va plus loin que les ajustements de données prévues dans l'étude financée par l'OFEV (toujours en cours par la HSLU à fin 2025). Voir le rapport Domingo Irigoyen et al (2025) mentionné en Annexe 1 de ce rapport annuel ou sur le site de la HSLU : <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=6246>

⁶ Données KBOB, onglet « Énergie », exprimés par kWh de chaleur utile consommée de PAC (ID 44.0xx) pour différentes configurations de mix électrique, de COP (bâtiment ancien ou neuf) et de sources froides (air-eau, saumure-eau).

En raison du manque d'informations sur les résultats décomposés de la PAC air-eau dans l'étude Kägi et al 2021, une analyse de contribution initiale a été faite pour bien visualiser comment se répartissent les impacts environnementaux selon la KBOB.

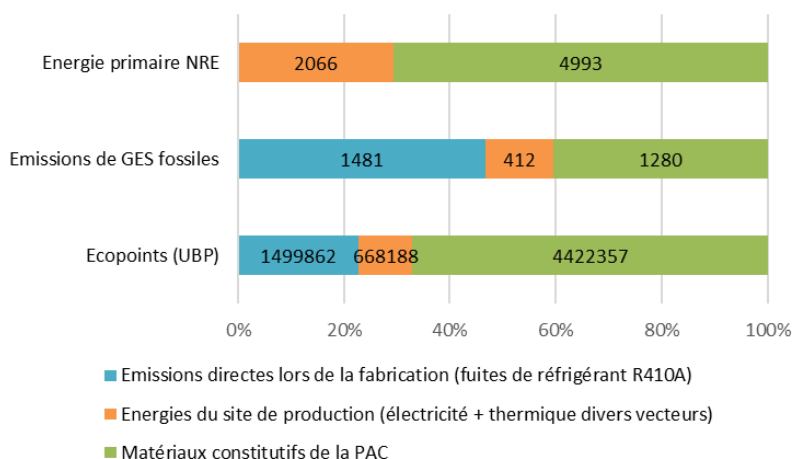


Figure 10 : Contributions relatives des différents procédés dans l'écobilan de la fabrication de la PAC air-eau 7 kW (KBOB 2022 version 7.0)

Ces résultats montrent une forte contribution des émissions directes de réfrigérants lors de la fabrication pour les émissions de GES (près de 50%) ainsi que pour les écopoints (près de 20%). En dehors des fuites de réfrigérants, c'est sans surprise l'impact des différents matériaux constitutifs de la PAC qui dominent suivis des énergies thermiques et électriques nécessaires à l'assemblage de la machine en usine.

Le premier enseignement de ce résultat analysant uniquement la donnée existante KBOB est de voir qu'un levier d'action important (choix du réfrigérant, ici le R410A) n'est pas paramétrable pour les utilisateurs des données d'écobilans dans le secteur du bâtiment. Pourtant, sur deux indicateurs d'écobilan, ils influencent grandement le résultat à l'échelle de la PAC. Ce résultat préliminaire renforce l'intérêt de différencier grâce à un modèle paramétré, des solutions du marché si celles-ci conduisent à des différences en termes d'empreinte carbone notamment.

b) Correction des taux de fuites dans les données d'inventaires UVEK

En marge des premières analyses conduisant précédemment à été identifié une erreur (double comptage) sur la quantité de fuites de fluide frigorigène en phase de fabrication et d'élimination. Cette erreur a aussi été confirmée par le réalisateur de l'étude précédente (Kägi et al 2021) ainsi que par le responsable de la plateforme d'écobilan KBOB. A ce stade, un travail de correction de l'écobilan de référence a été entrepris par le projet LCA-PAC en corrigeant les taux de fuites [4] et [3] comme suit :

- Fabrication : 3 % (contre 22 % précédemment)
- Élimination : 19 % (contre 11 % précédemment)

L'écobilan de la pompe à chaleur 7 kW air-eau a été recalculé et une diminution moyenne de 19 % des émissions de GES et une baisse d'environ 10 % des écopoints UBP par rapport aux données KBOB avant correction a été observé (cf. tableau suivant).

Tableau 1 : Ecobilan avant et après correction du taux de fuite de fabrication et d'élimination de la données KBOB Pompe à chaleur air-eau 7 kW

	Emissions de GES [kgCO ₂ eq]			Ecopoints UBP'21 [Pts]			Energie primaire non renouvelable [kWh]		
	KBOB actuelle	KBOB corrigée	% diff	KBOB actuelle	KBOB corrigée	% diff	KBOB actuelle	KBOB corrigée	% diff
Fabrication	3'180	1'897	-40%	660'000	5'305'939	-20%	7'070	7'070	0%
Elimination	824	1'364	+65%	845'000	1'390'156	+65%	57	59	+4%
Total	4'004	3'261	-19%	7'445'000	6'696'095	-10%	7'127	7'129	79%

Dans la suite, les paramétrages de taux de fuite de fabrication et d'élimination seront reparamétrés pour évaluer leurs influences sur les résultats.

c) Modèle paramétré et règles d'extrapolation des données collectées

Une fois l'étude initiale de la donnée KBOB terminée et la donnée corrigée, le modèle paramétré a été défini.

Dans un premier temps, le modèle doit couvrir des plages de puissance allant de 5 à 35 kW (limite haute pour des PAC air-eau, mais le but est de considérer des puissances de PAC adaptés à des bâtiments multifamiliaux donc d'aller jusqu'à 50-100 kW dans un deuxième temps.

Pour cela, des règles d'extrapolation ont été établies pour remplacer des informations manquantes ou non connus lorsqu'un ecobilan de PAC doit être calculée pour un réfrigérant et une puissance donnée.

Ces règles d'extrapolation permettent de relier la puissance de la PAC (paramètre souvent connu) et des paramètres moins évidents à connaître pour l'utilisateur ou le contexte de l'étude :

- la masse de fluide frigorigène ;
- la quantité de matériaux constitutifs de la PAC (métaux, plastiques, isolants) ;
- la masse totale de la PAC.

A partir des résultats obtenus dans le sous-projet précédent (cf. § 3.1.2), il est possible de déterminer empiriquement la charge de réfrigérant en fonction de la puissance de la PAC. Le tableau suivant rappelle les relations linéaires établies.

Tableau 2 : Règles d'extrapolation de la masse de la PAC en fonction de sa puissance

Type	Masse de réfrigérant [kg]
Air/Eau (R410A)	$m_{charge} = 0.398 \times P - 0,147$
Sol/Eau (R410A)	$m_{charge} = 0.179 \times P + 0.3454$

Pour la relation masse de la PAC et sa puissance, l'étude OFEN SYGREN [5] a été considérée⁷. Elle fournit des règles d'extrapolation utiles si l'utilisateur ne connaît pas précisément la masse de la

⁷ et validées par confrontation avec des catalogues de fabricants (Viessmann, Daikin, Hoval, etc.).

machine. Si ce paramètre est connu, la règle d'extrapolation n'est pas utilisée. Le tableau suivant présente les règles d'extrapolation.

Tableau 3 : Règles d'extrapolation de la masse de la PAC en fonction de sa puissance

Type	Puissance [kW]	Masse [kg]
Air-Eau	$P_{PAC} < 20$ kW	$m_{PAC} = 16.042 \times P_{PAC} + 91.787$
	$20 < P_{PAC} < 35$ kW	$m_{PAC} = 8.2224 \times P_{PAC} + 256.51$
Saumure-Eau	$P_{PAC} < 20$ kW	$m_{PAC} = 4.7327 \times P_{PAC} + 113.4$
	$20 < P_{PAC} < 40$ kW	$m_{PAC} = 5.0043 \times P_{PAC} + 161.43$
	$40 < P_{PAC} < 100$ kW	$m_{PAC} = 6.7531 \times P_{PAC} + 107.52$
	$P_{PAC} > 100$ kW	$m_{PAC} = 4.6322 \times P_{PAC} + 361.39$

Le modèle intègre également les différents taux de fuites en fonction du type de scellement réalisé sur site (Tableau 4) dans le cas où l'utilisateur souhaite différencier le taux de fuite en fonction du type de scellement du circuit.

Tableau 4 : Taux de fuite en fonction du type de scellement

Type de scellement	Fuite fabrication	Fuite annuelle	Fuite élimination
En usine	2 %	3,8 %	3,8 %
Sur site (« split »)	5 %	6 %	6 %
Non connu	3 %	2%	2 %

Ces valeurs influencent directement les émissions de GES directes, et permettent une distinction claire entre les PAC monoblocs et split, très répandues sur le marché résidentiel.

d) Paramètres du modèle paramétré

Deux grands ensembles de paramètres sont définis :

Tableau 5 : Liste des paramètres techniques et d'exploitations

Type de paramètre	Paramètres
Caractéristiques du système PAC (fabrication + élimination)	fluide frigorigène Matériaux de la PAC puissance nominale type de scellement
Exploitation de la PAC (utilisation)	COP durée de vie mix électrique taux de fuite heures annuelles d'utilisation charge partielle

Le modèle calcule automatiquement les impacts environnementaux selon les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 (1) \quad I_{elec} &= \frac{E_{utile}}{COP} * I_{mix\ elec} \\
 (2) \quad I_{fuites_usage} &= \tau_{fuite} \times m_{fluide} \times I_{fluide} \times DDV \\
 (3) \quad I_{Globale} &= I_{fabrication} + I_{Elimination} + I_{Elec} + I_{fuites_usage} \\
 (4) \quad E_{utile} &= t_{fonc} \times P \times DDV
 \end{aligned}$$

Où :

$I_{mix\ elec}$: Impact du mix électrique	[kgCO ₂ -eq/kWh]	I_{fuites_usage} : Impact des fuites de fluides en exploitation	[kg CO ₂ -eq]
E_{utile} : Chaleur utile produite pendant un an	[kWh]	τ_{fuite} : Taux de fuite annuel en exploitation	[-]
COP : Coefficient de performance	[-]	m_{fluide} : Charge de fluide initiale	[kg]
I_{elec} : Impact de la consommation d'électricité	[kg CO ₂ -eq]	I_{fluide} : Impact de l'émission du fluide dans l'air	[kg CO ₂ -eq /kg]
DDV : Durée de vie	[an]	P : Puissance de la PAC	[kW]
$I_{fabrication}$: Impact de l'étape de fabrication	[kg CO ₂ -eq]	$I_{Elimination}$: Impact de l'étape d'élimination	[kg CO ₂ -eq]
t_{fonc} : Temps de fonctionnement annuel	[h]		

Pour information, les différents paramètres (matières premières, réfrigérant, énergie de fabrication, processus d'élimination...) rentrant dans le calcul de l'écobilan de la PAC air-eau de la KBOB sont indiqués en Annexe 2.

e) Evaluation de la précision du modèle pour le cas d'une PAC air-eau 15 kW

Ce cas est choisi pour vérifier la précision du modèle dans le cas de figure où l'utilisateur actuel de la KBOB ne connaît que la source froide (air), la puissance (15 kW) et le type de réfrigérant (ici R410A pour ne pas créer de distorsion avec celui de la donnée KBOB 7kW). Pour le reste des paramètres, on suppose ne pas avoir plus d'informations. Pour le calcul de l'écobilan paramétré de la PAC air-eau 15 kW, l'ensemble des règles d'extrapolation est donc utilisé.

La Figure 11 présente les résultats de l'écobilan d'une PAC de 15 kW avec d'un côté le calcul « exact » déterminé sur une PAC 15 kW par Kägi et al 2021 (« modèle de référence ») et de l'autre l'estimation du modèle paramétré (« modèle ajusté »).

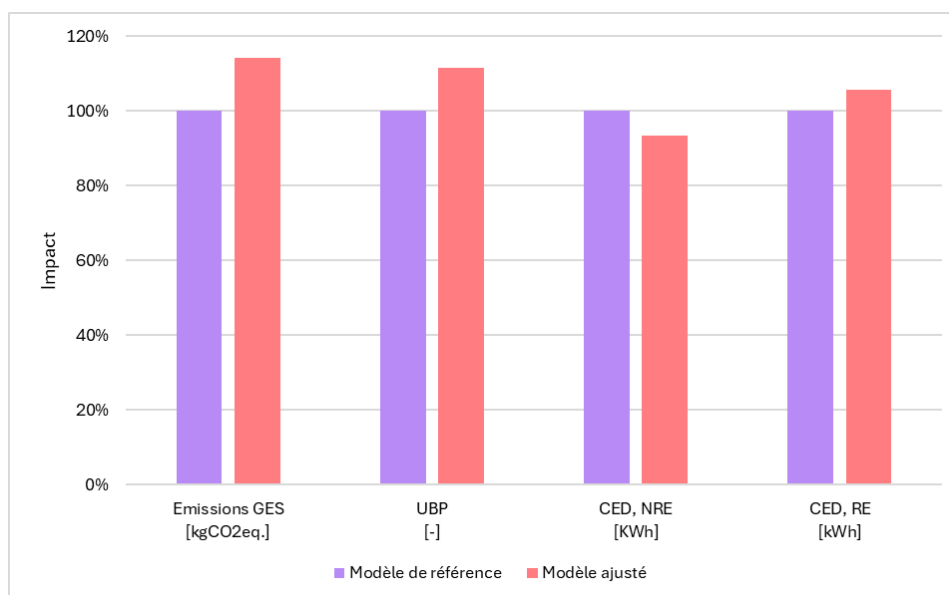


Figure 11 : Ecart relatif pour les indicateurs KBOB entre l'écobilan de référence de la PAC air-eau 15 kW (Kägi et al 2021) et l'écobilan déterminé par le modèle paramétré ajusté

Les émissions de GES du modèle paramétré (« modèle ajusté ») sont de +14 %, tandis que les écopoints (UBP'21) sont de +10% et l'énergie primaire non renouvelable de -7% environ par rapport à l'écobilan « exact » de l'étude Kägi et al 2021 [3].

Les écarts obtenus restent raisonnables et s'expliquent par des paramètres extrapolés présentant également un écart par rapport aux données collectées dans le modèle de référence. Par exemple, une valeur un peu plus élevée de charge de réfrigérant est à noter dans le modèle ajusté que dans l'écobilan de référence de la PAC 15 kW (5,8 kg contre 4,5 kg) soit +29 % d'écart, tandis que pour la masse des matériaux c'est l'inverse avec -33%.

f) Applications du modèle paramétré à l'échelle « PAC »

Le modèle paramétré peut désormais être utilisé pour simuler différentes PAC notamment une fois que les résultats du sous-projet 1 seront disponibles sur la variante de conception de PAC « optimale » avec une charge adéquate de réfrigérant pour obtenir un bon compromis entre le COP (et l'écobilan associé au fonctionnement de la machine via sa consommation électrique) et l'écobilan associé à la fabrication de la machine (y.c. les fuites associées de réfrigérants pendant sa durée de vie).

g) Application du modèle paramétré à l'échelle « bâtiment » (approche KBOB)

Les analyses préliminaires sur la donnée KBOB au début de ce chapitre ont permis de mieux comprendre les principaux contributeurs de l'écobilan de la PAC et l'influence du réfrigérant notamment. Les règles d'extrapolation permettent d'estimer l'écobilan, pour une puissance comprise entre 5 et 35 kW, avec une précision acceptable au niveau de l'écobilan de la PAC pour une puissance donnée (exemple ci-dessus avec 15 kW).

Pour tester l'application du modèle sur un cas d'écobilan du kWh de chaleur utile d'un bâtiment selon l'approche « simplifiée » de la KBOB (par opposition à l'approche proposée dans le sous-projet 3 du projet LCA-PAC visant à évaluer un périmètre plus complet et de manière complète), le but est de montrer comment le modèle paramétré peut différencier des PAC en pratique. Les données qui ont été considérées dans le modèle paramétré sont récapitulées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Récapitulatif du jeu de données introduit dans le modèle paramétré

Paramètre	Choix pour la modélisation	Valeur introduite dans le modèle
I_{fluide}	R410A (HFC)	1923 (kgCO ₂ eq/kg)
	R290 (Naturel)	4 (kgCO ₂ eq/kg)
$I_{mix\ elec}$	Mix consommateur CH	0,125 (kgCO ₂ eq/kWh)
	Mix de produits des énergies renouvelables CH	0,016 (kgCO ₂ eq/kWh)
DDV	Par défaut selon KBOB avec choix possible pour l'utilisateur	Choix par défaut : 20 ans Choix possibles : 15-25 ans
COP	Selon bâtiment (neuf ou rénové) et technologie de PAC	Valeur comprise entre 2 et 5.5
τ_{fuite}	Selon scellement	Valeur possible : 0,02 , 0,038 ou 0,06

Cas de base :

Pompe à chaleur air-eau d'une puissance thermique de 15 kW, fonctionnant avec un réfrigérant de type HFC (R410A). L'appareil est scellé en usine, ce qui implique des fuites initiales au scellement estimées à 2 % de la charge de fluide frigorigène. La durée de vie totale de l'installation est fixée à 20 ans. Durant son exploitation, un taux de fuites annuelles de 4 % est retenu. La production de chaleur est calculée sur la base d'un temps de fonctionnement annuel de 2 100 heures, en utilisant le mix électrique consommateur suisse (CH).

L'installation est considérée comme étant réalisée dans un bâtiment neuf avec un COPA de 4.4 et permet au total de fournir 630 000 kWh de chaleur utile sur l'ensemble de sa période d'exploitation.

La figure suivante présente les résultats obtenus pour 630'000 kWh de chaleur fournie sur 20 ans.

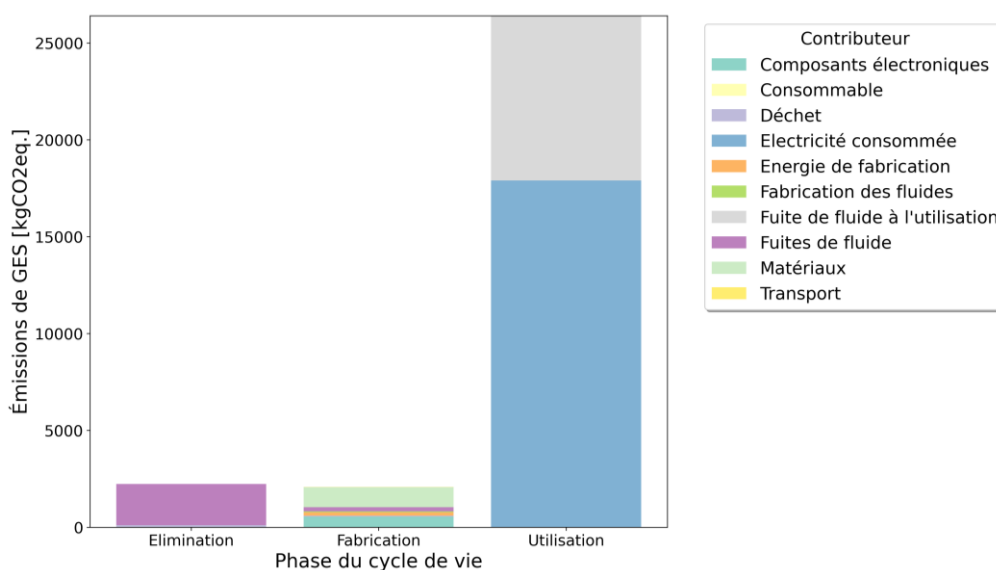


Figure 12 : Décomposition des émissions de GES sur les différentes étapes du cycle de vie

L'analyse des contributions de la Figure 12 montre que :

- sans surprise, la phase d'utilisation domine largement avec 85 % des émissions de GES dont un tiers lié aux fuites de réfrigérant et deux tiers liés à la consommation d'électricité ;
- la fabrication de la PAC contribue pour 8%, principalement liée à la production des métaux (acier, cuivre, aluminium) et des fuites initiales de fluide frigorigène ;
- l'élimination contribue pour 7% dans cet exemple.

Sur la base de cette première application du modèle, il est possible de faire varier les paramètres associés aux contributions relatives les plus élevées.

Il s'agit dans l'ordre du :

- contenu carbone du mix électrique.
- coefficient de performance (COP), qui détermine la consommation électrique annuelle ;
- fluide frigorigène utilisé, via son PRG et du taux de fuite à l'utilisation ;

L'influence du contenu carbone de l'électricité et de COP sont des résultats connus et les données d'écobilans de la KBOB et le calculateur actuel d'écobilan de PAC permet de distinguer ces différents cas d'usage⁸.

En revanche, les résultats montrent que les fuites de réfrigérant peuvent être importantes après ces deux premiers paramètres. Il est alors possible de différencier des PAC selon le choix du réfrigérant. Par exemple, le remplacement du R410A par des fluides à faible PRG tels que le R290 (propane) permet de réduire les émissions liées à la fabrication de 10% à 17%, à l'élimination de 93% à 97% et les émissions indirectes de 32% soit en moyenne 35% de GES évités sur l'ensemble du cycle de vie (voir Figure 13). Les PAC utilisant des fluides naturels, en supposant que le COP reste identique, présentent ainsi un potentiel supplémentaire de réduction des émissions de GES.

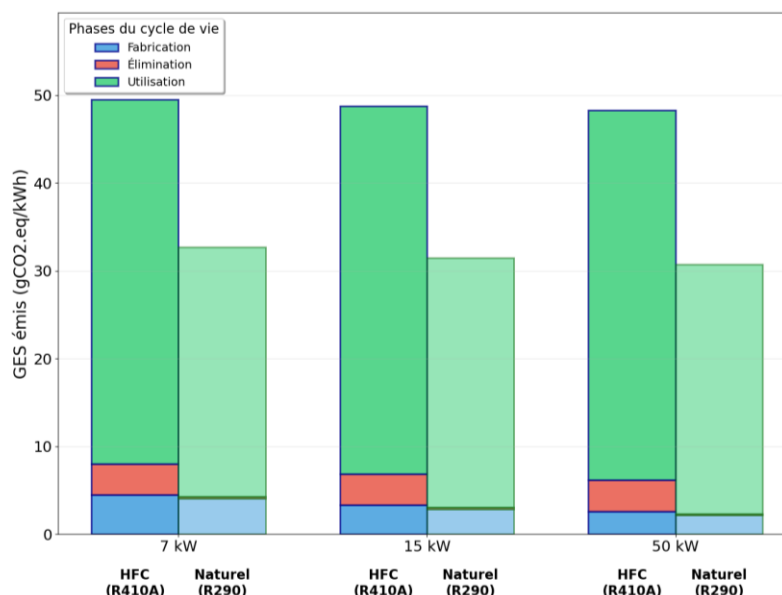


Figure 13 : Sensibilité des émissions de GES pour différentes puissances de PAC air-eau selon le type de fluide (avec scellement en usine, DDV de 20 ans, mix consommateur CH, COPA 4.4)

Les fuites de réfrigérants constituent donc un levier d'action.

⁸ KBOB Wärmepumpenrechner disponible au lien suivant :
https://rechner.pawis.ch/HTMLWaermepumpen24_de_v1/Oekobilanzrechner_Waermepumpen_2024_deutsch_v1_UVEK2022.html

Concernant la performance énergétique, chaque point de COP supplémentaire se traduit par une réduction des émissions indirectes significatives (voir Figure 14). L'influence du mix électrique est également significative d'autant plus si le COP de la PAC est faible. Le passage du mix consommateur suisse à un mix renouvelable certifié entraîne une baisse de 69% des émissions de GES émis en phase d'exploitation avec un COP de 2.5 et de 54 % lorsque le COP est de 5.5.

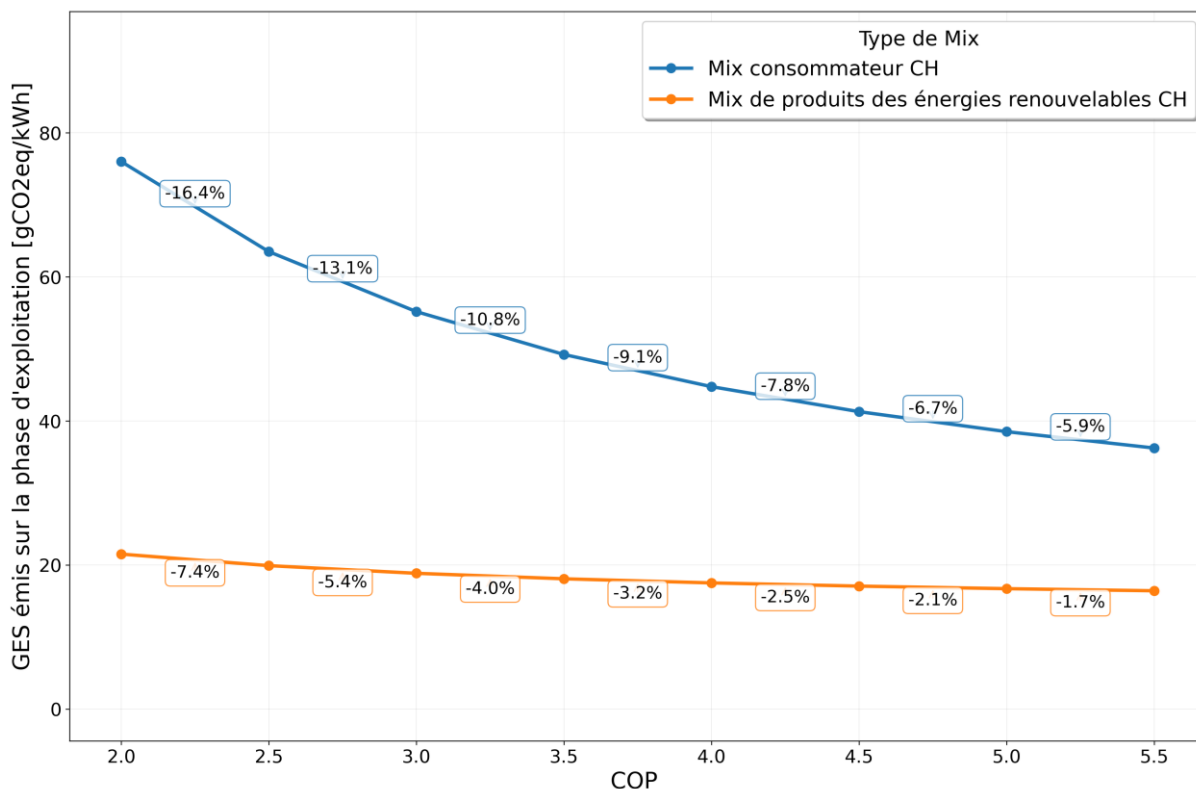


Figure 14 : Evolution des GES émis sur la phase d'exploitation en fonction du COP pour différents mix électrique (PAC Air-eau, 15 kW, HFC (R410A) avec scellement en usine, DDV de 20 ans).

3.3. Sous-projet 3 : Intégration des PAC dans les bâtiments

Cette sous partie présente le cadre de modélisation de l'ensemble « bâtiment et système de production/distribution/émission de chaleur » sous la forme d'une plateforme de simulation. Elle permettra d'évaluer et d'analyser les performances énergétiques, puis environnementales et financières sur un horizon de long terme (p.ex. 2050 et l'atteinte du zéro net d'émissions de GES), de trajectoires de décarbonation qui combinent le phasage des rénovations de l'enveloppe et le remplacement des systèmes de production de chaleur fossiles par des PAC (chauffage et eau chaude sanitaire). Le modèle d'écobilan paramétré du sous-projet 2 sera utilisé et complété sur le mix électrique notamment pour réaliser l'évaluation globale des émissions directes et indirectes de bâtiments multifamiliaux.

Deux questions de recherche principales guident ce sous-projet centré sur la notion de trajectoire temporelle (et prospective) de décarbonation :

- Quelle est le niveau de décarbonation réellement atteignable pour un parc de bâtiments, par rapport à la décarbonation planifiée par les politiques cantonales et fédérales ?
- Quel est le séquençage optimal pour la décarbonation entre la rénovation de l'enveloppe et le *fuel switch* intégral ou progressif (bivalence transitoire), compte tenu de contraintes opérationnelles telles que les budgets (carbone et financier) disponibles ?

Afin de répondre à ces questions de recherche, une plateforme de simulation modulaire a été conceptualisée et ses premiers développements en Python ont été entamés fin 2025. Ce cadre repose sur l'intégration d'un modèle de simulation thermique dynamique de l'enveloppe, d'un modèle de production et distribution d'ECS, ainsi que des profils d'usage et données météo conformes aux normes SIA. Les besoins énergétiques sont simulés sur une année avec un pas de temps horaire, permettant une estimation cohérente de la demande en chaleur et en ECS. Plusieurs années d'exploitation sont simulées selon les mesures de rénovation choisies, puis assemblées pour former des trajectoires interannuelles. La plateforme est conçue pour faciliter la propagation d'une multitude de valeurs au sein des paramètres du modèle « bâtiment-système », permettant ainsi d'évaluer et d'analyser de manière systématique plusieurs centaines de trajectoires de décarbonation possibles. Chaque scénario est évalué selon trois dimensions : performance énergétique, coûts d'investissement et d'exploitation, et émissions de GES. L'approche temporelle permet d'identifier non seulement les interventions les plus performantes, mais aussi leurs phasages optimaux. La fiabilité des résultats est garantie par la modélisation intégrative et réaliste des interactions dynamiques qui existe entre les échelles les plus petites et les plus grandes d'un bâtiment (de la PAC au mix électrique national, en passant par l'enveloppe et les systèmes).

3.3.1. Description de la plateforme de simulation

La plateforme de simulation est structurée en huit modules décrits dans la Figure 15. À partir des données d'entrées recueillies dans le module 1 (caractéristiques du bâtiment et installations techniques, données météo, scénarios d'usage), les autres modules simulent la demande et la distribution de chauffage (selon le modèle R5C1 de l'ISO 13790), ainsi que la production/distribution/consommation d'ECS. Elle évalue aussi la production de chaleur côté PAC et chaudière, puis agrège des indicateurs énergétiques, environnementaux et économiques. Cette approche intégrative de la PAC jusqu'à l'émetteur en passant par la distribution, en prenant les besoins suites à des travaux de rénovation d'enveloppe, permet d'évaluer comment une hypothèse locale se répercute sur la performance de l'ensemble du bâtiment. Par exemple, une optimisation de la courbe de chauffe en abaissant T_{aller} et T_{retour} pourrait augmenter le COP de la PAC, réduire la puissance appelée et modifier les pertes de distribution. Ce cadre commun permet d'évaluer les interactions entre les leviers sur le système de chaleur et les leviers de rénovation d'enveloppe, en y incluant une composante temporelle de trajectoires et de phasage des travaux.

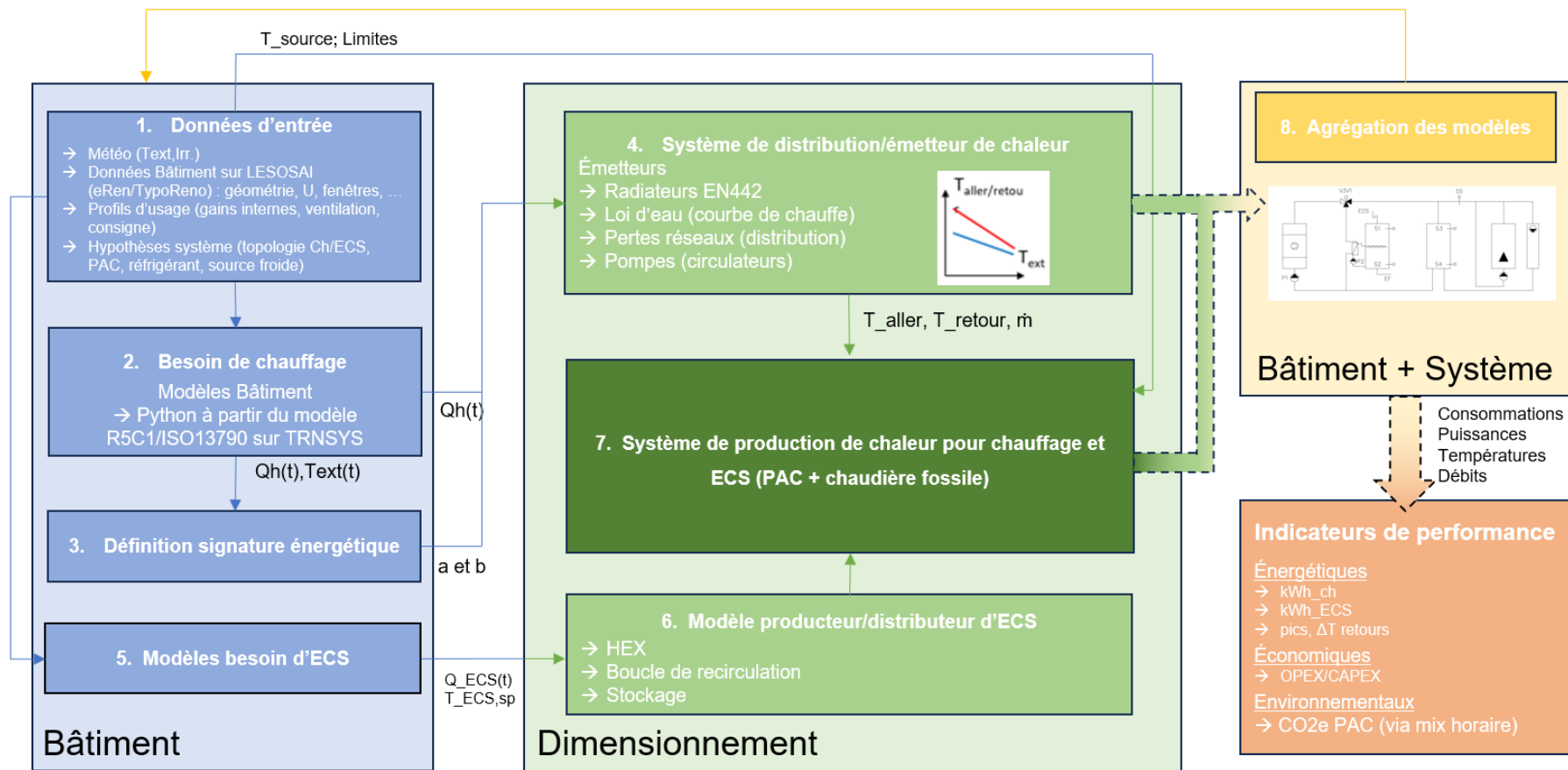


Figure 15 : Architecture de la plateforme de simulation de trajectoires de rénovation



La résolution temporelle de référence est le pas horaire. Ce choix est justifié par un juste équilibre entre la précision du modèle de 5R1C pour évaluer correctement la dynamique des phénomènes mis en jeu, la complexité des calculs, et la disponibilité des données d'entrées à l'échelle horaire. À chaque pas horaire, les modules sont exécutés dans un ordre déterminé, les états internes sont mis à jour et des contrôles transverses vérifient simultanément la fermeture des bilans d'énergie, le respect des bornes physiques et l'alignement temporel. Ce chaînage garantit que chaque module reçoit un jeu de données cohérent et produit des sorties compatibles avec les modules suivants. Toute modification locale de la géométrie du bâtiment, de son enveloppe thermique, des besoins d'ECS ou des performances de la PAC se propage ainsi immédiatement dans les états internes et reconfigure les équilibres thermiques, hydrauliques et énergétiques du système. Une description détaillée du *workflow* de la plateforme, module par module, est fournie en Workflow afin de documenter précisément l'architecture opérationnelle de la simulation.

En ce qui concerne les outils et librairies utilisées, la plateforme est programmée en Python. Elle vise à être exploitée *via* une API et une interface en ligne de commande pour exécuter un grand nombre de simulations (ensemble de scénarios et analyses de type Monte Carlo). Les entrées Excel ou CSV sont normalisées et pilotées par des fichiers de configuration. Les sorties sont produites en JSON et Parquet, avec des rapports Quarto dynamiques autogénérés. L'architecture en couches superposées couvre interfaces, orchestration, infrastructure, domaine et modèles par module, et une suite de tests automatisés garantit la stabilité du code et des interfaces.

3.3.2. Collecte de données et méthodes

a) Données des bâtiments d'étude

L'analyse à l'échelle du bâtiment s'appuie sur un ensemble de typologies multifamiliales représentatives du parc bâti romand, principalement issues des corpus eRen [6] et TypoReno [7]. Ces typologies choisies couvrent une diversité de géométries et de périodes constructives tout en restant cohérentes avec les caractéristiques dominantes du parc existant. Dans le cadre de l'étude, seul un à deux bâtiments ont été retenus parmi les cas de référence décrit en Sélection des bâtiments d'étude. Ainsi, le bâtiment eRen 5 et eRen 4 ont été choisis pour leur représentativité d'une configuration multifamiliale standard et pour la disponibilité des données d'enveloppe du bâtiment des différents scénarios de rénovation modélisés sur LESOSAI et décrit en Annexe C (cf. 0).

b) Scénarios de rénovation d'enveloppe

La rénovation de l'enveloppe est modélisée sous forme de scénarios combinant différentes mesures sur les principaux postes de déperdition (toitures, façades, fenêtres, planchers bas) et, le cas échéant, sur les émetteurs. Pour chaque typologie de bâtiment, un sous-ensemble de combinaisons jugées techniquement pertinentes et réalistes constitue le jeu de scénarios retenu. Les caractéristiques principales de l'enveloppe sont extraites et structurées à partir de modélisations préalablement réalisées avec LESOSAI. Le détail des mesures, leur domaine d'applicabilité par typologie ainsi que les hypothèses de coûts correspondantes sont documentés en Rénovation de l'enveloppe.

c) Système de production de chaleur

Le système de production de chaleur est représenté par trois configurations :

- La configuration initiale du bâtiment : une chaudière fossile monovalente ;
- Une pompe à chaleur air/eau ;
- Un système bivalent parallèle où la chaudière à gaz initialement en place fonctionne en appoint d'une PAC air/eau. La chaudière à gaz est progressivement effacée de la production de chaleur à mesure que les interventions sur l'enveloppe diminuent les besoins.

Pour chaque système, la plateforme de simulation calcule à pas horaire les facteurs de charge, les puissances délivrées, les consommations d'électricité et de combustible ainsi que les indicateurs de performance associés (COP, rendement, part de couverture des besoins). Des variantes technologiques ou de pilotage peuvent être mobilisées en analyses de sensibilité afin d'éprouver la

robustesse des conclusions. Le détail des architectures étudiées, des hypothèses de dimensionnement et des règles de commande est présenté en Trajectoires et production de chaleur.

d) Trajectoires de décarbonation

Une trajectoire est un scénario de résolution annuelle qui correspond à une séquence de décisions de rénovation sur une période de 20 ans. Pour chaque année, on décrit l'état de l'enveloppe thermique et le système de production de chaleur en service, à quelle date a lieu la rénovation de la toiture, des façades, des fenêtres ou des planchers, le changement d'émetteurs de chaleur, et la substitution du générateur fossile par une PAC, avec ou sans bivalence transitoire. L'horizon de temps de 20 ans a été sélectionné car il est adapté pour évaluer dès aujourd'hui l'alignement de stratégies de rénovation incluant des PAC (d'une durée de vie moyenne de 20 ans) avec les objectifs fédéraux et cantonaux de décarbonation en 2050 (dans 25 à 20 ans).

Les trajectoires sont illustrées en Figure 16 pour différentes philosophies de rénovation.

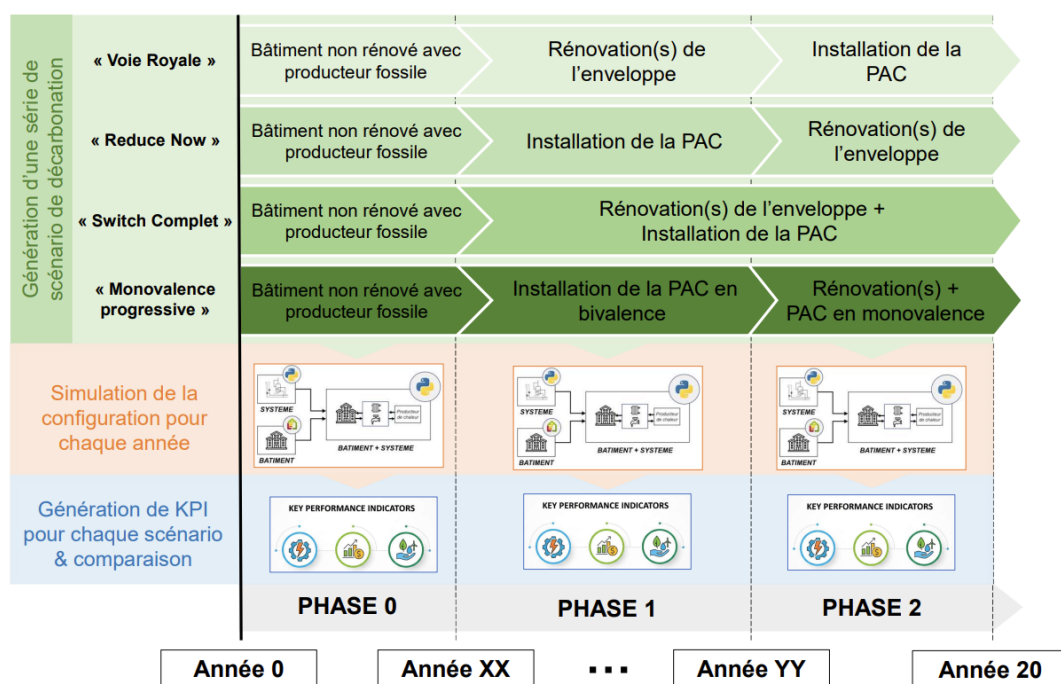


Figure 16 : Logique d'étude à l'échelle du bâtiment : génération des scénarios et KPI annuels

Ces trajectoires sont construites en combinant les possibilités selon trois catégories indépendantes de variables :

- **La philosophie de rénovation** : détermine l'ordre des décisions de rénovation entre les interventions touchant l'enveloppe et le changement de producteur de chaleur, ou bien les deux en même temps, ainsi que le remplacement intégral ou progressif du producteur fossile initiale (bivalence).
 - Voie Royale : Rénovation d'enveloppe puis [PAC ou BIV]
 - Reduce Now : [PAC ou BIV] puis Rénovation d'enveloppe
 - Full Switch : rénovation d'enveloppe + [PAC ou BIV]
 - Monovalence progressive : BIV puis Rénovation d'enveloppe + PAC
- **Le phasage temporel des interventions** : détermine à quels moments sont réalisées les interventions durant la période de 20 ans.
 - Après 5 ans, 10 ans ou 15 ans

- **Les types de travaux** : détermine quelles combinaisons de travaux touchant l'enveloppe et les émetteurs sont réalisées au moment de l'intervention.
 - Toiture [✓/X], Façades [✓/X], Plancher [✓/X], Fenêtres [✓/X], Emetteurs [✓/X]

La combinatoire totale représente au maximum 672 trajectoires de rénovation possibles. Ce nombre peut être revu à la baisse en excluant les interventions d'enveloppe qui ne peuvent pas être réalisées à cause des spécificités architecturales d'un bâtiment. La logique de construction des trajectoires, les familles considérées et les analyses de robustesse associées sont détaillées en Trajectoires et production de chaleur.

e) Analyse des résultats

Les plusieurs centaines de trajectoires de rénovation réalistes constituent une base de données dont l'analyse permet d'identifier les interventions et les phasages temporels qui ont le plus de probabilité d'être optimaux en termes de décarbonation et de coûts. Des indicateurs de performances peuvent être évalués pour chaque trajectoire individuelle en calculant ses bénéfices potentiels par rapport à un scénario de référence où le bâtiment n'est pas rénové pendant les 20 ans. L'étude peut être élargie à d'autres typologies de bâtiment et conditions météo suisses pour identifier des « bascules » dans les scénarios optimaux.

3.3.3. Travaux réalisés et résultats

L'essentiel des travaux réalisés en 2025 a porté sur la définition du cahier des charges de la plate-forme de simulation qui a été présenté dans les parties précédentes ainsi qu'en annexe. Il n'y a pas encore de résultats au sens de modèle développé ou de cas d'étude simulés car il faut justement encore développer le modèle de simulation.

4 Evaluation des résultats obtenus et travaux à venir

Les trois tableaux suivants résument les différentes activités prévues au sein de chaque sous-projet et indiquent le % d'avancement en relation avec les travaux 2025 réalisés. Les travaux à venir (2026 et 2027) sont également indiqués.

4.1. Sous-projet 1 : dimensionnement et performance des pompes à chaleur

L'année 2025 a permis d'avancer sur la collecte de données in-situ notamment en tirant partie d'une base de données de mesures de réfrigérants et de COP de pompes à chaleur de la Haute Ecole OST.

Table 2: Evaluation des résultats obtenus en 2025 pour le sous-projet « échelle PAC » et activités planifiées

WP rattachés	Avancement	Description des activités
WP2 (Collecte de données)	100%	Collecte et analyse des données de charges de réfrigérants de terrain (issues d'OST)
	100%	Test expérimentaux (dans les labos de la HEIG-VD) confirmant la dégradation rapide en atmosphère en TFA d'un mélange de fluides de synthèse de nouvelle génération et contenant un HFO cf. annexe 2
	80%	Collecte de données sur les fuites de réfrigérants (littérature)
	20%	Poursuite du travail de recherche de données de terrain sur les fuites de réfrigérants en pratique avec les partenaires du projet (GSP notamment)
	0%	Collecte et analyse de données de charges de réfrigérants sur d'autres technologies de PAC que celles analysées en 2025
WP3 (Méthodologie et dev./analyses)	50%	Analyses de l'influence du taux de remplissage en fluide frigorigène sur le COP d'une PAC de référence
	20%	Analyse de la répartition de la charge de fluide frigorigène entre les différents composants d'une PAC de référence
	10%	Analyse de l'impact de la taille des échangeurs sur le COP et la charge de fluide pour une PAC de référence
WP3 (étude de cas « échelle PAC »)	0%	Préparation des données de la PAC « optimisée » selon résultats WP2 pour l'écobilan comparatif (« bill of materials »)
	0%	Ecobilan comparatif (approche d'écoconception) optimisant la charge de réfrigérant, le dimensionnement de la machine par rapport à une PAC standard (exemple de celle utilisée dans la plateforme d'écobilan KBOB) – en lien avec sous-projet 2

4.2. Sous-projet 2 : modèle d'écobilan paramétré de PAC

Les résultats obtenus en 2025 permettent de calculer des données d'écobilans correspondant à diverses configurations de PAC. Elles peuvent être mises à disposition des utilisateurs dans un format identique à celui de la liste KBOB pour en faciliter l'usage dans la pratique en lien avec le WP Dissémination des résultats.

Le tableau suivant résume les activités planifiées et indiquent le % d'avancement selon que les travaux ont été entamés en 2025 ou pas encore (travaux à venir).

Table 3: Evaluation des résultats obtenus en 2025 pour le sous-projet « modèle paramétré d'écobilan » et activités planifiées

WP rattachés	Avancement	Description des activités
WP2 (Collecte de données)	90%	Collecte des données de la littérature et du sous-projet 1 (charge de réfrigérant, règles d'extrapolation...), projets OFEN précédents (SYGREN) etc.
	100%	Reprise des modèles de calcul et hypothèses des écobilans de PAC de la KBOB (Kägi et al 2024)
	0%	Mise à jour des données d'arrière-plan pour le modèle paramétré d'écobilan de PAC (de UVEK 2021 à BAFU 2025) et facteur de caractérisation à modifier pour l'indicateur d'écopoints UBP'21 pour les réfrigérants HFO qui se dégradent en PFAS (?)
	0%	Mise à jour et collecte de données horaires sur les émissions de GES du mix électrique suisse (outil EcoDynElec financés par les projets OFEN précédents (EcoDynBat et S-DSM))
	0%	Collecte et analyse de données de charges de réfrigérants sur d'autres technologies de PAC que celles analysées en 2025
WP3 (Méthodologie et dev./analyses)	80%	Cahier des charges du modèle paramétré sur périmètre données d'écobilan KBOB (i.e., unité fonctionnelle par unité de PAC (onglet « Technique du bâtiment » et par kWh de chaleur utile distribué à différentes configurations de bâtiments (onglet « Energie »))
WP4 (étude de cas « échelle PAC »)	50%	Etudes de cas sur les pompes à chaleur « type » de la KBOB : pompe air-eau et validation du modèle paramètre version 2025 et
	0%	Ecobilan comparatif (approche d'écoconception) optimisant la charge de réfrigérant, le dimensionnement de la machine par rapport à une PAC standard (exemple de celle utilisée dans la plateforme d'écobilan KBOB) – en lien avec sous-projet 1
WP5 (étude de cas « échelle bâtiment »)	25%	Etudes de cas sur les pompes à chaleur « type » de la KBOB par chaleur utile

Les prochains développements du sous-projet 1 seront intégrés au modèle paramétré d'écobilan, en fonction de la pertinence et représentativité des résultats obtenus.

Le modèle paramétré pourra permettre dès 2026 de proposer des valeurs plus précises d'écobilan de PAC conformes aux référentiels suisses (KBOB, SIA) dans un nouveau contexte réglementaire

notamment à Genève de besoin en données d'écobilan complémentaires pour mieux évaluer et différencier les concepts de bâtiments et rénovations bas carbone⁹

Une réflexion sera alors menée dans le WP7 Dissémination pour porter les résultats du sous-projet 2 dans la pratique via la mise à disposition de données complémentaires pour la KBOB/Autre instance ou d'un calculateur plus précis et paramétrable pour les écobilans de PAC par unité et chaleur utile.

4.1. Sous-projet 3 : intégration des PAC dans les bâtiments

La méthodologie développée en 2025 pour la plateforme de simulation permet de formaliser depuis l'acquisition des données jusqu'au calcul énergétique et de traduire ensuite les résultats en termes d'écobilan et de coûts financiers en passant par les différentes étapes de calcul. Une attention particulière a été portée à la modularité des calculs ce qui a amené à partir sur un développement d'une plate-forme de simulation en Python.

Le tableau suivant résume les activités planifiées et indiquent le % d'avancement selon que les travaux ont été entamés en 2025 ou pas encore (travaux à venir). Le tableau n'est volontairement pas aussi complet que les deux sous-projets précédents. En effet, le gros du travail passe par la mise en place d'une plate-forme de simulation et qui bénéficie d'une description détaillée en Annexe 4. Seules les principales activités à venir sont décrites dans la suite sous le tableau des tâches.

Table 4: Evaluation des résultats obtenus en 2025 pour le sous-projet « intégration des PAC dans les bâtiments » et activités planifiées

WP rattachés	Avancement	Description des activités
WP2 (Collecte de données)	90%	Collecte des données sur les différents éléments de la plate-forme de simulation sur les aspects énergétiques et écobilan
	50%	Collecte des données sur les aspects financiers
	0%	Reprise des modèles de calcul et données pertinentes du sous-projet 2 de LCA-PAC
WP3 (Méthodologie et dev./implémentation)	80%	Cahier des charges de la plate-forme de simulation
	20%	Développement (mise en œuvre en Python)
WP5 (étude de cas « échelle bâtiment »)	0%	<i>Selon description ci-dessous (dans le texte sous le tableau)</i>
WP6 (étude de cas « échelle parc »)	0%	<i>Selon description ci-dessous (dans le texte sous le tableau)</i>

Les suites des activités du sous-projet 3 sont décrites selon les phases suivantes :

- Application de la méthode à l'évaluation d'un bâtiment existant sous forme d'archétype (typologie eRen-5), le cas le plus documenté et représentatif de bâtiments multifamiliaux en

⁹ A ce sujet, voir le nouveau guide publié par le canton de Genève en novembre 2025 sur la mise en application du calcul d'empreinte carbone réglementaire des bâtiments : <https://www.ge.ch/document/guide-constructions-renovations-bas-carbone>

Suisse Romande. Cette étape vise la validation méthodologique : bilans énergétiques équilibrés, stabilité des calculs, cohérence des indicateurs et paramétrage des valeurs de références (coûts unitaires, facteurs GES).

- Ajustement des combinaisons et paramètres constitutifs des scénarios de rénovations et identification des variabilités sur les résultats de l'analyse d'eRen5.
- Application de la démarche aux autres typologies, en généralisant des hypothèses transversales pour assurer la comparabilité inter-bâtiments.
- Analyses de sensibilité et d'incertitude pour identifier la robustesse des mesures de rénovation. Cette étape inclue la variabilité des solutions techniques, l'échantillonnage par Monte Carlo sur des paramètres clés et l'étude de données climatiques et de mix électriques futurs.

À terme la démarche pourra être appliquée à un parc immobilier hétérogène (p.ex. portefeuille d'un bailleur institutionnel) avec une vision prospective. Ce travail permet d'identifier des trajectoires de décarbonation optimales sous contraintes techniques (typologie, distributions existantes), budgétaires (CAPEX par période, fonds de rénovation, période d'intervention) et opérationnelles (phasage des chantiers, disponibilité des occupants).

Dans ce contexte, la plateforme pourrait, au-delà du calcul d'empreinte carbone des solutions de PAC intégrées dans les bâtiments, servir un outil d'aide à la décision multicritère (énergie, coûts actualisés, GES, taux de couverture des besoins), produisant des feuilles de route par actif et à l'échelle d'un portefeuille. Les plans d'action structureraient les étapes successives optimales : rénovation de l'enveloppe et des émetteurs, remplacement intégral (monovalence) ou progressif (bivalence) par une PAC. En complément, l'outil pourrait quantifier l'impact des PAC sur la charge du réseau électrique afin d'anticiper les contraintes réseau et les besoins de pilotage.

5 Coopération nationale et internationale

A ce stade la coopération au niveau national est assurée par la présence dans le groupe de suivi de personnes issues de différentes expertises utiles au projet (cantons, services industriels, association faitière des pompes à chaleur).

La HEIG-VD participe également aux travaux de la plate-forme de données d'écobilan dans le secteur de la construction KBOB et des collaborations seront envisagées pour diffuser de nouvelles données et calculateurs d'écobilans sur les pompes à chaleur dans le cadre de la dissémination du projet.

Au niveau des collaborateurs impliqués, une doctorante qui va démarrer début 2026 une thèse en collaboration entre la HEIG-VD et l'ETHZ sera impliquée dans le projet LCA-PAC et notamment sur la mise en œuvre opérationnelle de la plate-forme de simulation des PAC.

6 Publications et autres communications

Les publications et la valorisation du projet sont prévues dans une deuxième partie du projet.

7 Bibliographie

- [1] EnDK, « Politique du bâtiment 2050+ ». Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://endk.ch/wp-content/uploads/2025/07/Gebaeudepolitik_2050-PLUS_FR_20220826.pdf
- [2] T. Brudermueller, U. Potthoff, E. Fleisch, F. Wortmann, et T. Staake, « Estimation of energy efficiency of heat pumps in residential buildings using real operation data », *Nature Communications*, vol. 16, n° 1, p. 2834, mars 2025, doi: 10.1038/s41467-025-58014-y.
- [3] T. Kägi *et al.*, « Life cycle inventories of heating systems », 2021.
- [4] HAMOT, Louise ; Boennec, « Refrigerants environmental impacts », Scribd. Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scribd.com/document/523847084/200924-Refrigerant-20BP-20ELE-20UK>
- [5] Davide Bionda, Gianrico Settembrini, et Silvia Domingo, « SYGREN - Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik », Hochschule Luzern – Näher dran. Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hslu.ch/de-ch/hochschule-luzern/forschung/projekte/detail/?pid=3675>
- [6] L. Riquet *et al.*, « eRen - Rénovation énergétique Approche globale pour l'enveloppe du bâtiment ».
- [7] Stefanie Schwab, « TypoRENO ». Consulté le: 7 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/culture/patrimoine_bati/fichiers_pdf/DMS_TypoRENO_VD_00_methodologie.pdf
- [8] SFOE, « T-DROP. Abaissement de la température de distribution de chaleur pour l'intégration d'énergies renouvelables et la décarbonation des immeubles multifamiliaux dans des quartiers denses ». Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=72898&Load=true>
- [9] VOGEL, Benedikt, « EFFIWAG Efficiency potential of replacing the heating emitter regarding supply security ». Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=73608&Load=true>
- [10] Société suisse des ingénieurs et des architectes, « Code des coûts de construction Bâtiment eCCC-Bât », Home. Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.crb.ch/fr/normes-standards/codes-des-couts-de-construction/code-des-couts-de-construction-batiment-eccc-bat-1>
- [11] Office Fédéral de Statistique, « Indice suisse des prix de la construction en avril 2024 - GNP Diffusion », Office fédéral de la statistique. Consulté le: 3 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bfs.admin.ch/news/de/2024-0182>
- [12] E. Romano, C. Fraga, et P. Hollmuller, « CO2 emission savings of heat-pumps in the residential sector. Case study for multifamily buildings in Geneva », juin 2020.

Annexe 1 : background et revue de littérature

Cette revue de la littérature a été réalisée dans le cadre de la préparation du projet afin d'identifier les limites des travaux de R&D actuels sur l'évaluation de l'empreinte carbone des pompes à chaleur dans le parc bâti en Suisse. Les références bibliographiques n'ont pas toutes été synchronisées avec le corps du rapport annuel mais la liste complète est disponible à la fin de cette annexe.

La pompe à chaleur, une technologie majeure pour la décarbonation du parc bâti mais des données d'écobilan restant « trop génériques » par rapport aux différentes configurations de PAC installées

Avec plus de 300 000 bâtiments équipés de pompes à chaleur (PAC) en Suisse (soit 18% du parc selon l'OFS en 2024), les pompes à chaleur commencent à jouer et vont jouer un rôle plus en plus central dans la décarbonation du chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire d'ici 2050 dans la voie vers le zéro net. De nombreux plans cantonaux et de la Confédération envisagent un déploiement massif des PAC (enDK 2022). Par exemple, le plan chaleur du canton de VD (DGE, 2021) prévoit un déploiement massif des pompes à chaleur à horizon 2035, utilisant différentes sources froides comme la géothermie, l'aérothermie, les rejets thermiques, les lacs ou la nappe, avec à terme près de 45% de la chaleur fournie à l'échelle cantonale¹⁰.

Cependant, les données d'écobilan disponibles en Suisse pour évaluer le « poids carbone » de cette technologie restent relativement forfaitaires malgré une actualisation récente (Kägi et al, 2021 ; Bionda et al, 2021 ; KBOB, 2022 ; Sandmeier, 2024). Par exemple, dans la dernière version de la recommandation KBOB/eco-bau/IPB 2009/1:2022 des données d'écobilan dans la construction, seules deux données sur des pompes à chaleur air-eau ou saumure-eau sont fournies pour une seule unité de puissance (7 kW) ou autrement ramené par kg de PAC. Ainsi, les effets taille ne sont pas encore bien pris en compte même si les résultats du projet OFEN SYGREN (Bionda et al, 2021) ont permis d'établir trois autres valeurs de puissance pour deux types de sources froides : 20kW et 200 kW pour la PAC saumure-eau et 100 kW pour la PAC air-eau (Sandmeier, 2024)¹¹. Toutefois, la détermination de ces nouvelles données se basent sur la matérialisation d'une PAC air-eau 7 kW extrapolé par kg en fonction de la masse de la PAC et intègrent aussi forfaitairement un fluide frigorigène et ses taux de fuites. Il n'est, par exemple, pas possible d'obtenir des valeurs pour différentes technologies du marché ou différentes installations (PAC avec unité extérieure « split »). Le type de fluides frigorigènes introduit dans le circuit ne peut pas être paramétré (gaz fluorés fortement émissif en GES comme le R32 vs. faiblement émissif en GES comme le propane) et les taux de fuite associés lors du fonctionnement de la PAC, eux même dépendant du type d'installation (scellement en usine ou sur chantier pour les variantes de type « split »). Pourtant, une étude anglaise rappelle la part significative que les taux de fuites peuvent représenter en cumulé sur la durée de vie de la PAC (Hamot et al, 2020) tandis que le choix du fluide frigorigène au départ reste un levier d'action facilement actionnable pour les planificateurs de bâtiments. En outre, les taux de fuite dépendent de conditions d'usage qui peuvent différer d'une PAC à une autre, d'où le besoin de retours d'expériences sur des PAC en fonctionnement.

Les données d'écobilan actuelles oublient plusieurs points clés de fonctionnement des PAC

Les données d'écobilan ne sont pas suffisamment représentatives des particularités de dimensionnement et de fonctionnement des PAC dans la pratique avec une diversité de fluides frigorigènes utilisables. Il existe des fluides fluorés comme le R-32, le R134-a le R-410A, des fluides naturels comme le propane ou le butane ou d'autres fluides comme les hydrofluorooléfinés (HFO). Les

¹⁰ <https://www.vd.ch/themes/environnement/energie/energies-renouvelables-bois-hydraulique-geothermie-profonde-energies-eolienne-et-solaire/perspectives-chaleur>

¹¹ Cette référence a été mise à jour en décembre 2025 dans le cadre du rapport intermédiaire pour le compte de l'OFEV, voir Domingo Irigoyen et al (2025)

premiers (fluide fluorés) ont l'inconvénient d'avoir des potentiels de réchauffement climatique (PRG) très élevés variant entre 675 pour le R-32 à 2088 pour le R-410A. Ainsi, le contexte réglementaire est en train d'évoluer et va limiter dès 2027 les valeurs de PRG dans le cadre d'un nouveau règlement européen et sa déclinaison suisse et interdire certains fluides comme le R-410A (Ordonnance ORRChim annexe 2.10 et futur règlement F-gas européen). Les retours d'expériences d'experts du domaine et d'installateurs font état aussi de taux de fuites variables, de différences de scellement du fluide frigo entre une PAC scellée en usine vs. d'une PAC avec unité extérieure scellée sur chantier. Un autre effet concerne le type d'installation (ex PAC sol/eau, PAC air/eau 'monobloc', PAC air/eau 'split', etc.) avec dans le cas des PAC avec unité extérieure « split » un effet combiné des précédents paramètres (fluide frigorigène p.ex. R-32 fortement émissif en GES, taux de fuite élevée en raison d'un scellement sur site pas forcément aussi bien réalisé qu'en usine).

Un autre point clé concerne le lien entre l'amélioration du COP selon les conditions standard de test, que cherchent à optimiser les fabricants pour avoir une meilleure étiquette énergétique, et la quantité de chargement de réfrigérants. Cela entraîne souvent des tailles d'échangeur élevée dans les PAC du marché actuelles nécessitant une augmentation de la charge de fluide frigorigène. Sur le graphique suivant de Enrico Da Riva de la HEIG-VD à partir de mesures d'une PAC eau glycolée-eau R410A sur le banc d'essai de la HEIG-VD, on peut voir la relation entre l'amélioration du COP et la quantité de réfrigérant. On peut voir qu'au départ l'augmentation du fluide frigorigène améliore notablement le COP (~environ +10%) tandis qu'au bout d'un moment continuer d'augmenter le fluide frigorigène n'améliore plus le COP. Il est donc important de bien optimiser ce couple {COP + fluide frigorigène} d'un point de vue globale c'est-à-dire en vérifiant l'écobilan de la fabrication, de la maintenance et de la consommation électrique globale afin de vérifier l'optimum sur le plan des émissions de GES par kWh utile de la PAC.

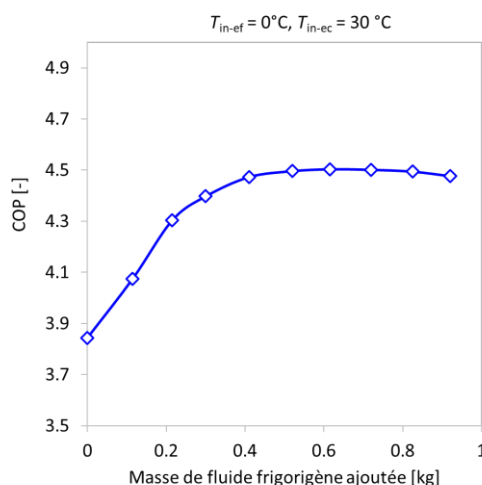


Figure 17 : Relation entre COP et masse de fluide frigorigène ajoutée (Da Riva, 2024)

Un autre point mérite également attention : ils concernent les problèmes de surdimensionnement des pompes à chaleur. Sur près de 600 nouveaux bâtiments multifamiliaux, une récente étude OFEN OptiPower portée par la HES de Rapperswil (OST) et l'Université de Genève a montré que le surdimensionnement médian atteint près de 40% tandis que certains systèmes peuvent être surdimensionnés jusqu'à 80% dans quelques bâtiments (Bosshard et al, 2023). La situation est encore plus accentuée pour les immeubles de bureaux avec des surdimensionnements de plus de 200 à 300%. Au-delà des quantités de fluides frigorigènes qui sont plus importantes dans des PAC de puissance plus élevée et donc qui entraînent plus de fuites en valeurs « absolues », ces surdimensionnements entraînent actuellement dans de nombreux bâtiments des cycles courts avec beaucoup de marches/arrêts et des COP saisonniers en baisse ce qui nécessite des variateurs de fréquence (inverter). A la longue, cela peut contribuer à des remplacements prématurés du compresseur et donc un remplacement complet de la PAC, aboutissant à une durée de vie effective plus courte que celle espérée en planification (20 ans dans les calculs d'écobilan ou de coûts financiers).

Evolution réglementaire en cours (F-gas) pour les fluides frigorigènes des PAC

Les nouvelles PAC disponibles sur le marché ou les travaux en laboratoire sur les performances de PAC avec des échangeurs de chaleur à faible charge de réfrigérants (Cavillini et al, 2010 ; Da Riva et al, 2010) montrent qu'il existe aujourd'hui un panel plus large de pompes à chaleur, intégrant des fluides frigorigènes naturels donc moins nocifs pour le climat. Ces évolutions technologiques sont aussi la conséquence d'une évolution réglementaire en cours dans le cadre du règlement F-gas européen No 517/2014 (UE, 2014) et son amendement récent de mars 2023 repris par la Suisse à travers l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). Certains fluides frigorigènes de type HFC comme le R-410A – au pouvoir de réchauffement global de 2088 (OFEV, 2020) – et très couramment mis en œuvre jusqu'à maintenant dans les pompes à chaleur de bâtiments seront interdits. Ce fluide est, d'ailleurs, pris en compte dans l'écobilan de la « pompe à chaleur air-eau 7 kW » de la recommandation KBOB/eco-bau/IPB 2009/1:2022.

Suite à l'amendement du 30.03.2023 de la «F-gas regulation» No 517/2014 européenne, les fluides frigorigènes avec GWP > 150 seront interdits à partir du 01.01.2025. Les fluides de synthèse de type HFC utilisés jusqu'à présent dans les PACs (principalement R410A, GWP = 2088) ne pourront plus être mis en œuvre, dans le but d'orienter le marché vers des fluides à faible/nul GWP, tels que les réfrigérants naturels (notamment propane) ou la nouvelle génération de fluides de synthèse HFO. Pour anticiper cette nouvelle réglementation, certains fabricants ou travaux académiques proposent déjà des alternatives de PAC avec des fluides frigorigènes naturels (quelques hydrocarbures comme le R290 propane, les HFO et le CO2 qui ont des PRG₁₀₀ beaucoup plus faible p.ex. 3 dans le cas de propane)¹² mais qui posent aussi des questions de sécurité (pour les hydrocarbures car inflammable), de transfert d'impact (pour les HFO) ou de performance (pour le CO2 p.ex. en chauffage, voir les travaux à ce sujet de Byrne et al (2017)). Cependant, dans l'amendement de la F-gas regulation de mars 2023, la limite de GWP > 150 est augmentée à GWP > 750 dans le cas spécifique des conditionneurs d'air et PAC de type « split » (c.-à-d. machines composées d'une unité extérieure et d'une unité intérieure, reliées entre elles par un circuit de fluide frigorigènes qui traverse la paroi du bâtiment). Cette dérogation vise à protéger provisoirement le marché des conditionneurs d'air dans les pays de sud d'Europe, où l'utilisation de splits air/air R32 (GWP = 675) peut se justifier par l'absence d'un circuit de distribution de froid, mais risque de créer un « effet d'aubaine » pour l'installation des PAC split air/eau. La présence du circuit frigorifique reliant les unités intérieure et extérieure, réalisé sur place et pas en usine, risque d'augmenter, par rapport à une installation PAC air/eau R410A classique, les fuites directes de fluide dans l'atmosphère, ce qui pourrait complètement contrebalancer l'effet visé de réduction des émissions de GES.

Décarboner le parc de bâtiments passe par une somme de mesures et une évaluation précise de chacune d'elle

Comme on vient de le mentionner, les différentes technologies de PAC ne peuvent pas être différenciées ni avec les données d'écobilan disponibles dans la liste KBOB ni avec les calculateurs existants dérivés de cette KBOB (BfU, 2024). Pourtant, l'état de l'art précédent souligne l'importance d'évaluer cette technologie correctement pour identifier les bons leviers d'actions et discriminer les situations vertueuses de celles qui le sont moins d'un point de vue p.ex. émissions de GES en utilisant un écobilan global c'est-à-dire en intégrant la fabrication et la maintenance de la PAC ainsi que son fonctionnement (consommation électrique).

Cette limite actuelle (écobilan des PAC pas assez paramétrable) peut alors poser un problème de l'évaluation juste et précise des leviers de décarbonation à l'échelle d'un bâtiment ou d'un parc de

¹²

https://offre.viessmann.ch/vitocal-250-a.html?utm_source=google&utm_medium=&utm_campaign=20971685510_ch_global_b2c_heat-pump_leadgen-2024-perfmax&utm_term=&utm_content=&utm_adgroup=&gad_source=1&qclid=CjwKCAiAuYuvBhApEiwAzq_YIS2vyTJEnwvEy-gNaQnk6oqEv7mQebMuRj2bn-IRF0aAN2dS7tTFQRoCsZQQAvD_BwE

bâtiments, où il n'existe pas une mesure unique de décarbonation comme vient de le montrer le projet OFEN « Net zero GHG emissions, Bottom-up (Research question F2) » dans lequel est impliqué la HEIG-VD (Priore et al, 2024). C'est bien l'addition d'un ensemble de mesures notamment sur la technique du bâtiment qui permet de minimiser l'empreinte carbone globale d'un bâtiment et dans lequel le choix d'un producteur de chaleur dit « renouvelable » comme la PAC doit être correctement pris en compte selon sa configuration effective ce qui n'est pas le cas actuellement.

Besoin d'aller vers des modèles paramétrés d'écobilan pour une meilleure évaluation des bâtiments « zéro net » compatibles : le cas des pompes à chaleur

Pour améliorer la situation, développer des modèles paramétrés d'écobilan sur des systèmes de PAC peut alors être intéressant. Des travaux précédents, conduits à l'étranger, ont déjà démontré l'intérêt des modèles d'écobilan paramétrés pour d'autres systèmes énergétiques de type ENR (éolien, géothermie, PV) (INCER-ACV, 2024 ; Besseau et al, 2023 ; Douziech et al, 2021 ; Padey et al 2013). Un modèle paramétré est une équation ou un ensemble d'équations qui relie un certain nombre de paramètres d'entrée variables aux activités d'arrière-plan d'une base de données d'écobilan associée au cycle de vie d'un système par le biais de relations mathématiques. Il est alors possible de paramétrer à moindre effort un système énergétique en se focalisant sur les paramètres les plus influents et en tenant compte lorsque nécessaire des leviers d'actions des planificateurs ou des fabricants et qui peuvent au départ être des données incertaines (ce qui est le cas p.ex. des fuites de réfrigérants) ou variable (ce qui est le cas du type de réfrigérants utilisés ou du COP en fonctionnement réel de la PAC). Un modèle paramétré peut donc aboutir à un modèle simplifié se focalisant sur le nombre de paramètres minimum pour l'indicateur évalué (p.ex. les émissions de GES). Ce type de travaux a abouti récemment à une librairie Python open-source « lca_algebraic » (Jolivet et al, 2021) qui a été appliquée à différentes technologies de panneaux solaires photovoltaïque. Ces modèles ont été reliés à la base de données d'arrière-plan suisse UVEK et au logiciel d'écobilan open-source Brightway2 également développé en Suisse (Frischknecht et al 2023 ; MaJour_PV, 2024 ; Mutel, 2017). Ces modèles paramétrés, si appliqués aux pompes à chaleur, peuvent ensuite faciliter d'une part la production de données d'écobilan par les fabricants livrant le marché suisse, mais aussi pour les utilisateurs/planificateurs, pour disposer de données robustes et représentatives du contexte d'application de chaque configuration de PAC. Ce travail peut à terme être facilité par la mise à disposition des modèles au moyen d'un configurateur/calculateur web pour s'affranchir des valeurs « figés » d'écobilan de la liste KBOB (KBOB, 2022) et des limites des calculateurs actuels de PAC dérivés de la KBOB (BfU, 2024). Au-delà de ces récents développements, de simples modèles paramétrés dans des configurateurs Excel ou web permettrait aussi de déjà améliorer la situation.

Peu de retours d'expériences sur la maintenance des PAC en fonctionnement

Au-delà de la paramétrisation de l'écobilan d'une PAC, la prise en compte de données de terrain sur certaines étapes clés du cycle de vie comme la mise en œuvre (charge initiale de fluide frigorigène si pas effectuée en usine) et la maintenance (rechargement de fluides frigorigènes pour compenser les fuites) n'est pas vraiment documentée. Les retours d'expériences se sont essentiellement concentrés jusqu'à maintenant sur la question de l'énergie pendant le fonctionnement de la PAC (consommation d'électricité et COP), donc sur les émissions « directes » de GES associées à la consommation d'énergie (Calane et al, 2021). Peu ou pas de retour d'expériences in-situ sur la question des taux de fuites n'a été documentés, même si les livrets d'entretien sont obligatoires à tenir à jour par les installateurs (OFEV, 2024). La donnée d'écobilan « pompe à chaleur air-eau 7 kW » de la liste KBOB se base ainsi sur un taux de fuite estimé à 2%/an basé sur l'étude Kägi et al (2021) elle-même basée sur l'inventaire national des émissions de GES suisse qui utilise lui-même une estimation pour ce taux de fuite (FOEN, 2020). Pourtant, cette source comme d'autres de la littérature ne s'accordent pas sur le % de taux de fuite, la valeur pouvant varier de 2% à 6% par an (Marinelli et al, 2019 ; Yang et al, 2021). De même, la durée de vie de la PAC dépendante du contexte d'utilisation peut varier d'une petite dizaine d'années jusqu'à près de 25 ans voire 35 ans selon les différentes sources existantes

répertoriées dans le projet OFEN DUREE (Lasvaux et al 2020 ; Goulouti et al 2021) ou dans une revue critique récente spécifique aux pompes à chaleur utilisées dans le résidentiel (Marinelli et al, 2019).

Des retours d'expériences ex-post sur l'empreinte carbone effective des PAC en fonctionnement sur leur cycle de vie complet sont donc utiles i.e., tenant compte de l'impact effectif lié de sa maintenance/remplacement prématuré (fréquence de rechargement du fluide frigo et remplacement prématuré du compresseur et donc de la PAC).

Intérêt de coupler l'empreinte carbone des PAC sur la fabrication et maintenance avec l'empreinte carbone de la consommation électrique en fonctionnement

La question des émissions de GES du kWh électrique consommé par la PAC reste centrale également. Même si le sujet de l'écobilan de la fabrication et de la maintenance des PAC mérite une meilleure paramétrisation, il ne faut pas oublier qu'une partie importante des émissions de GES par kWh utile d'une PAC reste liée à sa consommation électrique et au contenu carbone associé. Des aspects saisonniers (chauffage en hiver, recharge de sondes géothermiques en été) peuvent amener à un profil carbone singulier pour l'électricité avec une empreinte carbone plus élevée en hiver lorsque la PAC assure les besoins de chaud et à contrario un profil moins carboné en été dans le cas de recharge estival de PAC sur sondes géothermique ; les besoins d'ECS étant plus répartis sur l'année.

En fonction de la méthode de calcul considérée pour le contenu carbone de l'électricité ou du type de fournisseur d'électricité, le contenu carbone du kWh utile fourni par une PAC peut alors grandement varier au sein de l'année mais également dans une vision prospective entre la situation actuelle d'une PAC en 2024 dans un bâtiment vs. une projection à horizon 2035 et 2050 ce qui nécessite de documenter les résultats sur des études de cas représentatives.

Intérêt d'étudier une large palette de situation concrète d'implémentation de PAC dans le parc de bâtiments et de type de sources froides

Au-delà du contenu carbone de l'électricité consommée par les PAC, de nombreuses configurations existent dans les bâtiments pour les PAC. Une partie des bâtiments sont à rénover dans le cadre d'un fuel shift et chacun d'eux comportent différentes courbes de charge thermique, et niveau de performance de l'enveloppe, influence des occupants sur les besoins de chaud (chauffage, ECS). La PAC peut être installée en stand-alone ou en bivalence avec une chaudière gaz pour limiter la puissance de la PAC et couvrir 70-80% des besoins de chaleur, le reste restant couvert par la chaudière fossile existante (Calane et al, 2021 ; Brischoux et al 2023). Ou sinon de considérer de nouvelles possibilités de PAC haute température.

Les PAC selon la source froide (air ou géothermie : nappe ou terrain) vont également avoir des performances différentes (COP). Les PAC dans un climat qui évolue vont également fonctionner au fur et à mesure l'été pour le rafraîchissement. Dans le cas de PAC sur sondes géothermiques où la source froide est le terrain ou la nappe, la question de la recharge l'été devient essentiel pour rafraîchir les bâtiments mais aussi du même coup pour améliorer le COP saisonnier l'hiver (en évitant une perte d'efficacité à long terme du système, le sol se refroidissant au fur et à mesure que la PAC puise son énergie pour répondre à la demande hivernale de chauffage et ECS). Dans ce cas, il peut être intéressant d'étudier l'écobilan complet des émissions GES de ce système de PAC sur sondes avec une recharge du terrain en été avec une électricité « peu carbonée » en moyenne (Lédée et al, 2023)) pour gagner en efficacité en hiver et donc limiter la consommation d'électricité « plus carbonée » l'hiver. Toutes ces configurations de PAC intégrées au parc bâti vont plus ou moins moduler l'empreinte carbone du kWh de chaleur consommée dans ces bâtiments. D'où le besoin de disposer de bâtiments avec du suivi en monitoring pour évaluer les émissions de GES effectives in-situ, en complément de l'analyse des carnets d'entretien/maintenance et d'adopter une vision sur le cycle de vie complet en ne négligeant aucun paramètre sensible.

Synthèse

Approfondir l'écobilan des PAC installées dans les bâtiments à la fois sur leur empreinte matérielle et d'émissions de fluides frigorigènes ainsi que sur leur fonctionnement (consommation électrique) est donc essentiel dans la mesure où cette technologie est vouée à prendre de l'essor à l'échelle du parc du bâtiments. De manière analogue à l'optimisation énergie grise-énergie de fonctionnement pour un bâtiment, le même raisonnement doit s'appliquer aux PAC utilisées dans les bâtiments afin de mieux cerner ces potentiels « trade-offs ».

Références bibliographiques

Besseau R, Tannous S, Douziech M, Jolivet R, Prieur-Vernat A, Clavreul J, Payeur M, Sauze M, Blanc I, Pérez-López P (2023) An open-source parameterized life cycle model to assess the environmental performance of silicon-based photovoltaic systems, *Progress in Photovoltaics*, 31:908–920.

BfU (2024) Wärmepumpenrechner, [Oekobilanzrechner Wärmepumpen 2024 deutsch v1 UVEK2022 \(umweltchemie.ch\)](#)

Bionda D, Settembrini G, Domingo S (2021). BFE Projekt SYGREN: Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik, Schlussbericht, 118 p.

Bosshard I, Troxler M, Guliyeva A, Kelevitz K, Haller M, Meier C, Werro M, Wemhöner C, Novoa-Herzog R, Hollmüller P. 2023. OptiPower: Untersuchung der optimalen Auslegung der Leistung von Heiz- und Kühlsystemen für Wohn- und Verwaltungsgebäude, September 2023, 138 p.

Brischoux P, Hollmüller P, Jobard X, Duret A (2023) T-DROP: Lowering of heat distribution temperatures, for integration of renewables and decarbonization of multifamily buildings in dense districts, Interim report dated 15 December 2023, 26 p.

Calame N, Cuivillier G, Rognon F, Montero D. O, Brischoux P, Callegari S, Hollmüller P, Frage C, Rüetschi M (2021) AirBiVal: Développement et optimisation de concepts hybrides de pompes à chaleur sur l'air pour des immeubles résidentiels collectifs, Rapport final, 30 septembre 2021, Office Fédéral de l'Énergie, 143 p.

Cavallini A, Da Riva E, Del Col D (2010). Performance of a large capacity propane heat pump with low charge heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, 33 (2010), 242-250.

Da Riva E, Del Col E, Cavallini A (2010). Modelling of performance and charge in minichannel heat exchangers, IIR 2nd Workshop on Refrigerant Charge Reduction, KTH, Stockholm, Sweden, 2010.

Da Riva E (2019) Pompes à chaleur transcritiques au CO₂ pour la production d'ECS, Congrès des professionnels romands de la pompe à chaleur, Lausanne, mars 2019

Da Riva (2024) Relation entre COP et masse de fluide frigorigène ajoutée, fichier de calcul et présentation interne HEIG-VD

Direction Générale de l'Environnement (DGE) – Vaud : Perspectives chaleur, Lausanne, Juillet 2021

Douziech, M., Ravier, G., Jolivet, R., Pérez-López, P., & Blanc, I. (2021). How Far Can Life Cycle Assessment Be Simplified? A Protocol to Generate Simple and Accurate Models for the Assessment of Energy Systems and Its Application to Heat Production from Enhanced Geothermal Systems. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7571-7582. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06751>

Conférences des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK), "Politique du bâtiment 2050+ - Document stratégique," Berne, 2022

FOEN (2020) Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2018: National Inventory Report, 660 p.

Frischknecht R (2023). Database protocol, FOEN LCI data DQRv2, 105 p.

Goulouti K, Favre D, Giorgi M, Padey P, Galimshina A, Habert G, Lasvaux S. 2021. Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution, *Data in Brief*, Volume 36, June 2021, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107062>

Hamot L, Dugdale H, Boennec O (2020) Refrigerants & Environmental Impacts : a best practice guide, 56 p

Jolivet, R., Clavreul, J., Brière, R., Besseau, R., Prieur Vernat, A., Sauze, M., Blanc, I., Douziech, M., & Pérez-López, P. (2021). lca_algebraic : A library bringing symbolic calculus to LCA for comprehensive sensitivity analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(12), 2457-2471. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01993-z>

Kägi T., Waldburger L., Kern C., Roberts G., Zschokke M., Conte F. and Weber L. (2021) *Life cycle inventories of heating systems; Heat from natural gas, biomethane, district heating, electric heating, heat pumps, PVT, wood, cogeneration*. Carbotech AG, Basel and Zürich, Switzerland

INCER-ACV, 2024, webservice de calcul des impacts environnementaux de la filière photovoltaïque et leur incertitude associée, lien : <https://viewer.webservice-energy.org/incer-acv/app/>

KBOB, ecobau and IPB (2022) KBOB-Recommendation 2009/1:2022: Données des écobilans dans la construction. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und

- Logistik, retrieved from: https://www.kbob.admin.ch/kbob/it/home/publikationen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html
- Lasvaux S, Giorgi M, Lesage J, Wagner G, Favre D, Padey P, Périsset B, Goulouti K, Farsi M, Volland B, Galimshina A, Hollberg A, Habert G (2020) DUREE Project : Analysis of lifetimes of building elements in the literature and in renovation practices and sensitivity analyses on building LCA & LCC, Final project, 202 p.
- Lédée F, Padey P, Goulouti K, Lasvaux S, Beloin-Saint-Pierre D. 2023. EcoDynElec: Open Python package to create historical profiles of environmental impacts from regional electricity mixes, *SoftwareX*, Volume 23, July 2023, 101485, doi.org/10.1016/j.softx.2023.101485
- MaJour_PV_2020 (2024) Mise à jour de l'ACV du PV en France, Rapport d'étude provisoire, ARMINES-MINES ParisTech, Comet Traitements SA SOREN, Envie 2E Midi-Pyrénées, treeze et SOREN, 49 p.
- Marinelli S, Lolli F, Gamberini R, Rimini B (2019) Life Cycle Thinking (LCT) applied to residential heat pump systems: A critical review, *Energy & Buildings*, Volume 185, February 2019, pages 210.223
- Mutel, C. (2017). *Brightway : An open source framework for Life Cycle Assessment*. The Journal of Open Source Software, 2(12), 236. <https://doi.org/10.21105/joss.00236>
- OFEV (2020) Vue d'ensemble des principaux fluides frigorigènes (état septembre 2020), accessible en ligne : https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/chemikalien/fachinfo-daten/uebersicht_ueberdiewichtigstenkaeltemittel.pdf.download.pdf/liste_des_principauxfluidesfrigorigenes.pdf
- Padey, P., Girard, R., le Boulch, D., & Blanc, I. (2013). From LCAs to Simplified Models : A Generic Methodology Applied to Wind Power Electricity. *Environmental Science & Technology*, 47(3), 1231-1238. <https://doi.org/10.1021/es303435e>
- Priore Y, Habert G, Jusselme T, Zwicky D, Anselmina Cau S, Lasvaux S, Frossard M, Favre D, Zhang X. (2024) Net-zero GHG emissions in the building area: Bottom-up approach (research question F2), Final report dated 01 March 2024, commissioned by the Swiss Federal Office of Energy (SOFE), 108 p.
- Règlement (UE) n°517/2014 du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relatif aux gaz à effet de serre fluorés et abrogeant le règlement (CE) n ° 842/2006 Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32014R0517>
- Sandmeier E. P. (2024) Hochschule Luzern PDF Document «Elemente für den Bereich D - Technik Gebäude mit Abdeckung durch die KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich 2022» FOEN project «neue Ökobilanzdaten Gebäudetechnik»
- Domingo Irigoyen S., Settembrini G., Lehmann C., Primas A., Walch M. 2025. Ergänzung der Ökobilanzdaten für Gebäudetechnik, Zwischenbericht – Kurzübersicht Datensätze, December 2025, 12 p.
- E. P. (2024) Hochschule Luzern PDF Document «Elemente für den Bereich D - Technik Gebäude mit Abdeckung durch die KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich 2022» FOEN project «neue Ökobilanzdaten Gebäudetechnik»
- Schneider, S, Brischoux, P, Holmuller, P. 2022. Hourly CO2 emission assessment of a 5 MWth centralized groundwater HP district heating system in Geneva. In: 22. Status-Seminar - SustainDesign: user friendly and resilient design with appropriate technology. Aarau.
- SIG-éco21 (2024) Programme de subvention éco21, pompe à chaleur air-eau, accessible en ligne : <https://ge-energie.ch/pompe-chaleur-air-eau>
- UE (2014) Règlement européen « F-gas » N° 517/2014, Journal Officiel, 20 mai 2014, accessible en ligne : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>
- Yang C, Seo S, Takata N, Thu K, Miyazaki T (2021) The life cycle climate performance evaluation of low-GWP refrigerants for domestic heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, Volume 121, January 2021, Pages 33-42

Annexe 2 : mesures HEIG-VD de formation de TFA à partir d'une émission de réfrigérant HFO (sous-projet 1)

Objectif

L'objectif de cette analyse était d'étudier la formation de TFA au fil du temps à l'aide de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). L'échantillon a été comparé à une référence de TFA pur afin de confirmer son profil spectral.

Analyse FTIR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique utilisée pour identifier les structures moléculaires sur la base de leur absorption de la lumière infrarouge. L'instrument mesure l'absorption à différentes longueurs d'onde, produisant un spectre qui sert d'empreinte moléculaire de l'échantillon. Les principales bandes d'absorption correspondent à des groupes fonctionnels spécifiques, ce qui permet d'identifier les contaminants potentiels.

Méthode

Appareil : Nicolet FT-IR, Thermo Fisher Scientific Inc.

- Mode : background ATR sur un film d'eau propre.
- Plage : 4000–650 cm^{-1} .
- Résolution : 4 cm^{-1} .
- Balayages : 32.
- Nettoyez entre les cycles à l'eau, puis à l'éthanol ou à l'isopropanol, et enfin séchez jusqu'à obtenir un fond plat.

Les HFO se décomposent en d'autres sous-produits lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il en résulte différents composés, dont les TFA, solubles dans l'eau. L'objectif de cette expérience est d'observer ce phénomène.

Pour cela, du R449A a été « flashé » dans de l'eau distillée contenue dans une bouteille en verre transparent. Le R449A est un mélange de différents fluides frigorigènes : 24.3 % R32 HFC ; 24.7 % R125 ; 25.3 % R1234yf ; 25.7% R134a. Trois d'entre eux sont des HFC et le R1234yf est le HFO en question. L'objectif est de mesurer la décomposition de l'HFO mais il est possible que les HFCs aient également une influence. Ici, le terme *flashing* désigne une détente directe dans l'eau. Une extrémité d'un tube est reliée à la bouteille de fluide, tandis que l'autre est immergée sous l'eau. Lorsque le robinet de la bouteille est ouvert, des bulles de fluide frigorigène (phase vapeur) traversent l'eau et remontent à la surface. Le récipient est maintenu à la pression atmosphérique et à la température ambiante (environ 20 °C).

Le *flashing* est réalisé pendant 15 minutes, après quoi le tube est retiré et le récipient refermé à l'aide d'un bouchon. Le récipient est étanche, mais non hermétique. Il est ensuite placé dans une zone exposée à la lumière du soleil.

Deux échantillons ont été produits :

Essai 1 : faible débit de fluide, environ une bulle par seconde.

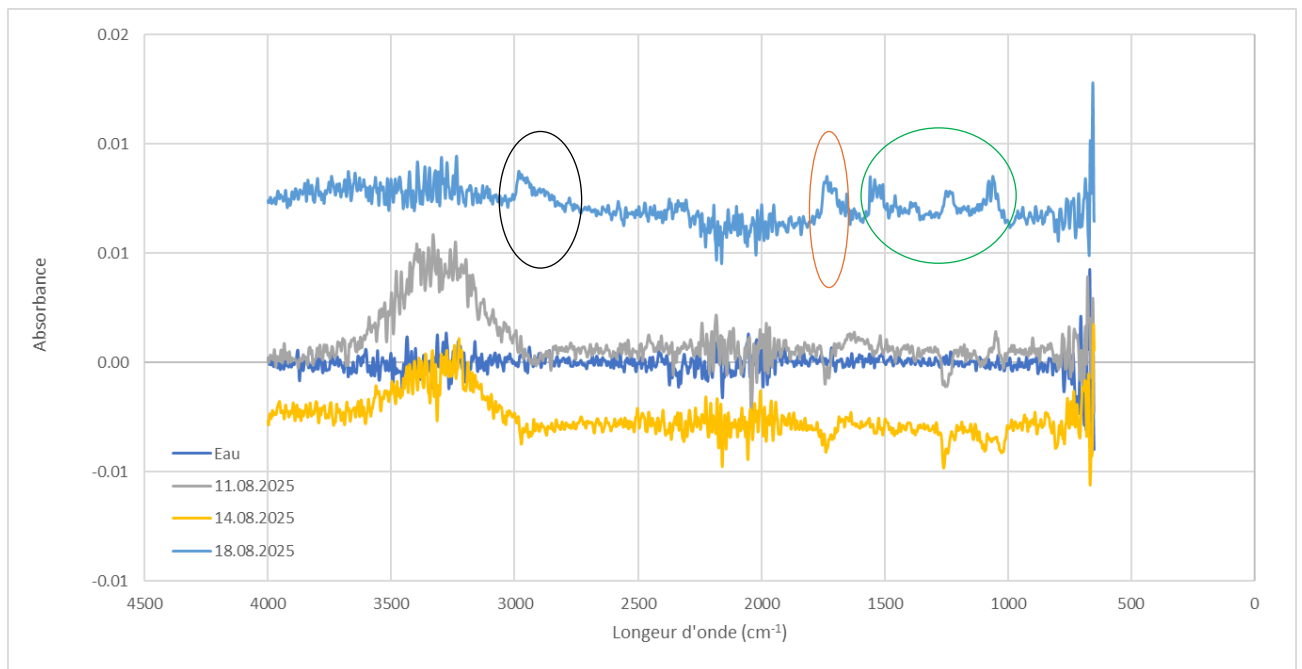
Essai 2 : débit modéré, environ une bulle toutes les demi-secondes.

Les bouteilles ont été ouvertes afin de prélever un échantillon pour analyse puis immédiatement refermé.

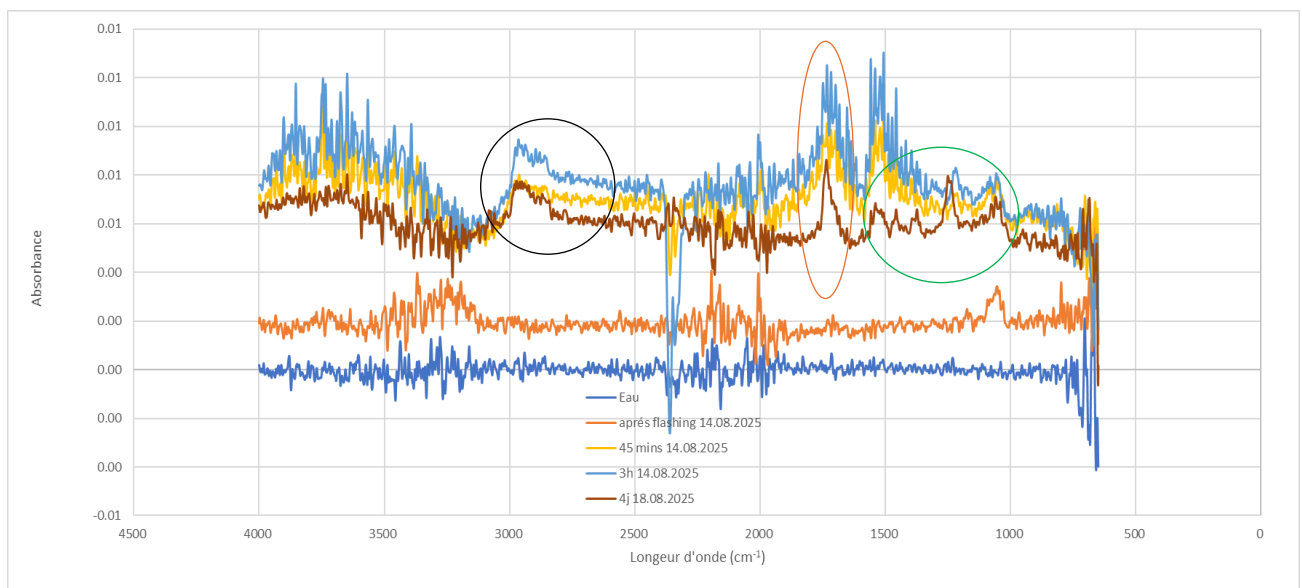
Résultats et observations

- Après *flashing* : le spectre ressemble presque à de l'eau, très peu de signal.

- 30 min et 45 min : quelques caractéristiques commencent à apparaître au-dessus de la ligne de base, mais elles restent modestes
- Plus de 3 h : absorbance nettement plus forte, avec des pics structurés, en particulier entre 1800 et 1000 cm^{-1} → c'est là que les signaux TFA devraient se trouver.
- Vibrations qui confirment la présence de TFA :
 - $\text{C}=\text{O}$ (acid carbonyl) $\approx 1780\text{-}1760 \text{ cm}^{-1}$
 - $\text{C-F} \approx 1250\text{-}1100 \text{ cm}^{-1}$
 - $\text{O-H} \approx 3000\text{-}2500 \text{ cm}^{-1}$



Essai 1



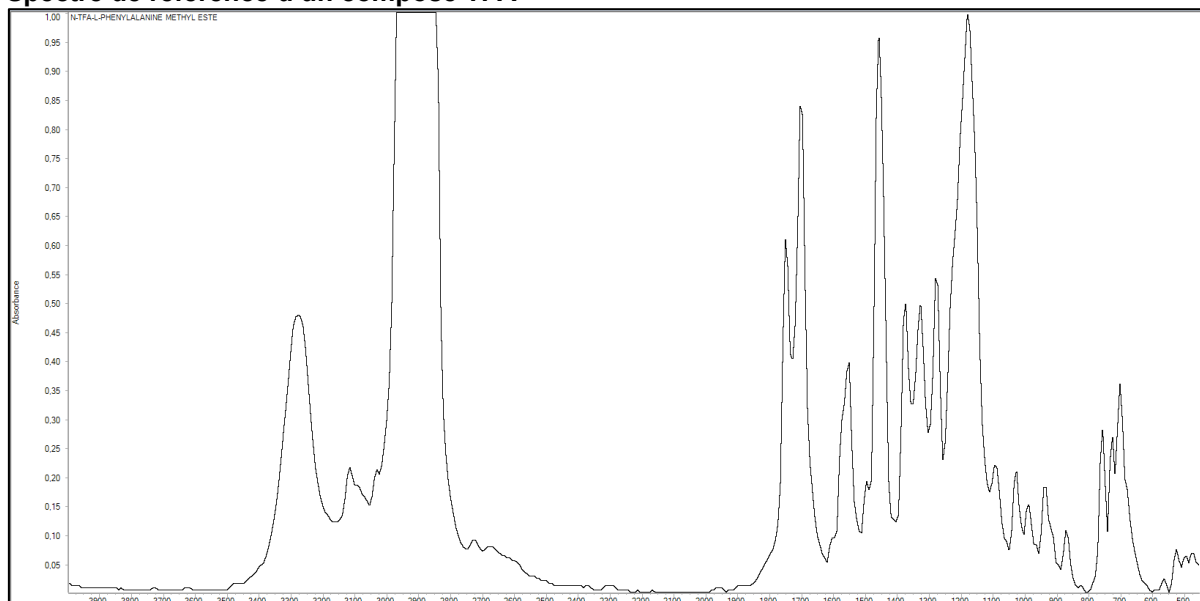
Essai 2

Conclusions

Une augmentation des groupes fonctionnels TFA liés au signal est visible au fil du temps, ce qui correspond à la dégradation continue du R1234yf en TFA dans l'eau.

Les pics liés au TFA ont également été confirmés à l'aide d'un spectre de référence d'un composé TFA (voir spectre ci-dessous)

Spectre de référence d'un composé TFA



Créé par.: Thermo Fisher Scientific Inc.

Extrait de librairie : Sigma Biological Sample Library

Spectre : N-TFA-L-PHENYLALANINE METHYL ESTE



Annexe 3 : hypothèses de modélisation de l'écobilan de la pompe à chaleur air-eau KBOB (sous-projet 2)

La modélisation des différents composants de la pompe à chaleur air-eau (base de données KBOB version 7.0) est présenté dans le tableau suivant :

Catégorie	Utilisation	Données UVEK	Unité
Matériaux	Isolation des tubes	Tube insulation, elastomere, at plant/DE U	kg
	Laine de roche	Rock wool, at plant/CH U	kg
	Cuivre	Copper, at regional storage/RER U	kg
	Polychlorure de vinyle	Polyvinylchloride, bulk polymerised, at plant/RER U	kg
	Aluminium	aluminium, primary, at plant/kg/RER U	kg
	Acier faiblement allié	Steel, low-alloyed, at plant/RER U	kg
Composants électroniques	Composants électroniques	Electronic component, unspecified, at plant/GLO U	kg
Fabrication des fluides	R32 (50% dans R410A)	Trifluoromethane, at plant/GLO U	kg
	R152 (hyp : 50% dans R410A)	1,1-difluoroethane, HFC-152a, at plant/kg/US U	kg
	R290 (Propane)	propane/ butane, at refinery/kg/RER U	kg
Energie de fabrication		electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid/kWh/ENTSO U	kWh
		heat, biomethane, at industrial furnace 1MW/CH U	kWh
		heat, mixed chips from forest, at furnace 1000kW/MJ/CH U	kWh
		natural gas, burned in industrial furnace 1MWth/MJ/CH U	kWh
		light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/MJ/RER U	kWh
Consommable	Huile lubrifiante (consommable)	Lubricating oil, at plant/RER U	kg
Transport	Transport des matériaux (camion)	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average/tkm/CH U	tkm
	Transport des matériaux (train)	transport, freight, rail/tkm/RER U	tkm

Catégorie	Utilisation	Données UVEK	Unité
Déchet	Déchets de production	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration/kg/CH U	kg
	Recyclage matériaux de la PAC	Disposal, industrial devices, to WEEE treatment/CH U	kg
	Incinération des fluides	Disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration/CH U	kg
Fuites fluide	Emissions dans l'air de R32	Methane, difluoro-,HFC-32	kg
	Emissions dans l'air de R125	Ethane, pentafluoro-,HFC-125	kg
	Emissions dans l'air de R290	Propane	kg

Annexe 4 : plate-forme de simulation énergétique et d'évaluation de l'empreinte carbone des PAC dans les bâtiments (sous-projet 3)

Workflow

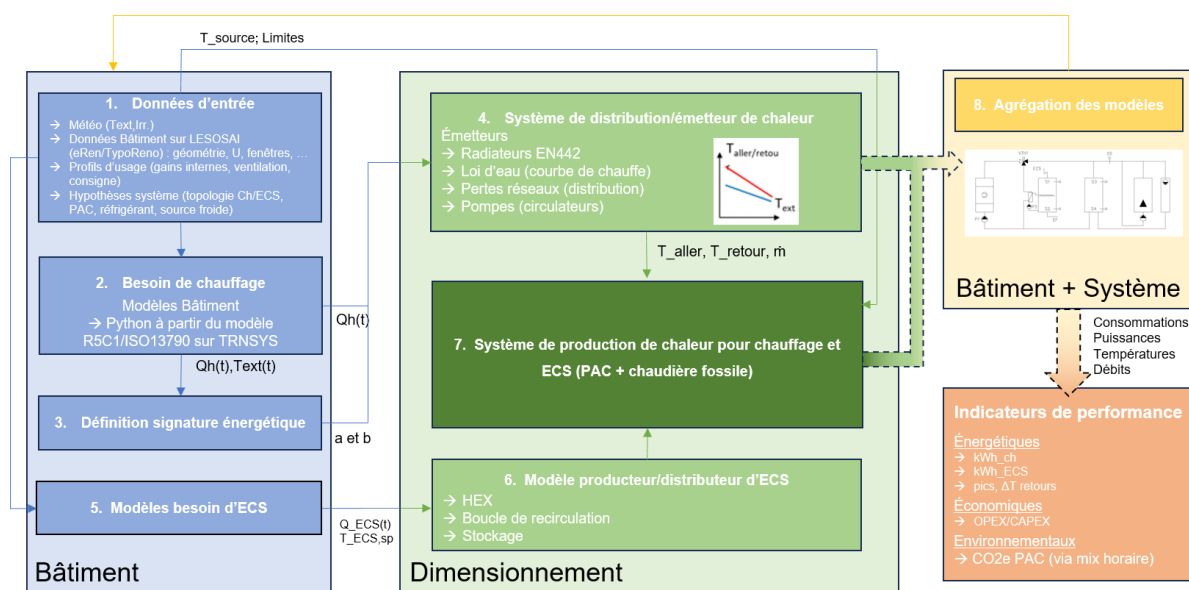


Figure 18 : Architecture des modèles et flux de données (LCA-PAC)

Le schéma du workflow (Figure 18) synthétise la chaîne de calcul LCA-PAC à l'échelle du bâtiment, depuis les données d'entrée (météorologie, géométrie et propriétés thermo-physiques, profils d'usage, hypothèses systèmes) jusqu'aux indicateurs de sortie (énergie, coûts, impacts environnementaux). Son

intérêt est d'orchestrer des modules qui interagissent à chaque pas horaire, avec des flux de données normalisés. Concrètement, un écart dans un module se répercute immédiatement sur les autres : si les émetteurs ne fournissent pas la puissance requise, la température intérieure baisse ; si la PAC passe en priorité ECS, elle ne fournira plus de chauffage au bâtiment ; tout déficit est rattrapé dans les pas suivants selon les lois de commande. Cette intégration temporelle garantit la cohérence des interfaces et la comparabilité entre scénarios.

Chaque module du workflow possède un objectif distinct avec un jeu d'entrées (variables), des paramètres (constantes de configuration), des sorties et un ensemble de stratégies de modélisation. Lorsque plusieurs stratégies existent, les options les plus sobres sont privilégiées pour l'exploration initiale, puis des options plus détaillées sont activées de manière ciblée lorsque cela améliore la pertinence décisionnelle.

Cette figure sert de plan de lecture pour la suite : les sous-sections suivantes décrivent brièvement, module par module, le rôle de chaque module, ses interfaces et ses conventions d'échange.

Module 1 : Données d'entrée

Ce module collecte, harmonise et documente toutes les données nécessaires aux modèles aval, en garantissant une cohérence temporelle horaire et une traçabilité complète (sources, versions, unités, plages de validité).

Il regroupe, en priorité, la météorologie horaire, les caractéristiques de l'enveloppe thermique du bâtiment (peut être extraite d'un modèle LESOSAI pour chaque rénovation étudiée), les profils d'usage, les éléments ECS ainsi que les hypothèses des systèmes de production de chaleur (type de PAC, appoint, degré de bivalence, configuration chauffage/ECS). Des profils standardisés sont utilisés par défaut (occupation du bâtiment, soutirage ECS, ...) et peuvent être remplacés par des mesures lorsque disponibles.

En sortie, le module fournit un jeu de données horaire et de paramètres (p.ex. caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment) prêt à l'emploi, structuré dans un format tabulaire commun. L'objectif est de livrer des entrées interopérables et reproductibles pour l'ensemble des modules du système.

Module 2 : Besoin de chauffage

Ce module estime la demande horaire de chauffage nécessaire pour maintenir la consigne intérieure, en prenant en compte l'inertie thermique du bâtiment ainsi que l'effet des pertes thermique (transmission, ventilation/infiltration) et des gains internes et solaires. Le modèle retenu est un modèle dynamique type R5C1 (ISO 13790) implémenté en Python. Le modèle offre ainsi un compromis intéressant entre une estimation réaliste des besoins de chauffage et une rapidité d'exécution. Il nécessite aussi relativement peu de paramètres d'entrée.

Module 3 : Définition de la signature énergétique

Le module 3 a pour objectif d'établir la signature énergétique du bâtiment, c'est-à-dire la relation (linéaire) entre la demande de chauffage et la température extérieure. Elle estime les paramètres a (pente) et b (charge indépendante de T_{ext}), ainsi que le seuil d'activation du chauffage. Le calcul s'appuie sur les séries horaires issues des modules en amont. Les paramètres obtenus permettent de calculer une loi d'eau optimale dans le module 4 et servent de référence de validation. Par ailleurs, la signature énergétique permet aussi de dimensionner les installations techniques (par exemple PAC en monovalence et bivalence avec appoint fossile).

Module 4 : Système de distribution/émission de chaleur

Ce module garantit que la puissance thermique requise par le bâtiment pour couvrir les besoins de chauffage est effectivement délivrée aux espaces. Il calcule les conditions hydrauliques et thermiques du circuit, à savoir les températures aller et retour et le débit massique, en intégrant les caractéristiques des émetteurs de chaleur. Il permet aussi d'optimiser la courbe de chauffe afin de maximiser l'efficacité du producteur de chaleur. Dans le cas d'une PAC, cela se traduit par une courbe de chauffe qui maximise le débit dans le circuit de distribution de chaleur afin de minimiser la température de départ. Cette marge d'ajustement de la courbe de chauffe est rendue possible par le fait que les radiateurs sont très souvent surdimensionnés (en particulier en intersaison et/ou suite à des mesures de rénovation). Cette fonctionnalité permet aussi d'évaluer l'impact de l'installation de radiateurs supplémentaire sur la courbe de chauffe et in fine sur le dimensionnement et l'efficacité du producteur de chaleur.

Module 5 : Modèle Besoin d'ECS

À pas horaire, le module estime la charge d'eau chaude sanitaire requise pour porter l'eau froide du réseau à la température requise au point de puisage. En première intention, un modèle analytique sans stockage calcule la puissance instantanée à partir des profils de soutirage, de la température d'eau froide et des consignes (SIA 385/2 et 385/1), fournissant des profils de charge ECS directement exploitables par le module 6. Par défaut, les profils horaires SIA ajustés sont appliqués ; lorsque des mesures de soutirage fiables sont disponibles, elles prévalent. Afin de gérer l'incertitude sur les profils réels et les volumes de besoin d'ECS, des analyses de sensibilité quantifieront l'impact de ces variations sur le dimensionnement et les performances du système.

Module 6 : Système de production/distribution d'ECS

Le module convertit la demande d'ECS horaire en conditions réelles de fonctionnement de la chaîne ECS (ballon de stockage, échangeur, recirculation, pompe) afin de dimensionner les composants et de déterminer la charge thermique et les niveaux de températures effectifs à fournir par le producteur (module 7). À chaque pas horaire, il calcule les températures caractéristiques, les pertes et les consommations auxiliaires.

Dans un premier temps, un modèle simplifié mais réaliste est employé. Si la précision l'exige, il peut être enrichi de sous modèles plus détaillés, par exemple un ballon stratifié multi-nœuds ou une recirculation paramétrée finement. Enfin, pour traiter l'incertitude sur les profils et volumes réels de soutirage, des analyses de sensibilité sont prévues afin de quantifier l'effet de ces variations sur le dimensionnement et les performances du système.

Module 7 : Système de production de chaleur pour le chauffage et l'ECS (PAC et/ou Fossile)

Ce module intègre un modèle numérique du producteur de chaleur et assure à pas horaire, la couverture des besoins de chauffage et d'ECS. Trois architectures sont traitées : chaudière fossile seule (gaz), PAC monovalente, et PAC bivalente avec appoint gaz. La consigne de fonctionnement est fixée par les demandes amont : le module 4 fournit la loi d'eau chauffage via T_{aller} , T_{retour} et le débit massique, tandis que le module 6 impose un profil des besoins de chaleur effectifs. Ainsi, à chaque pas horaire, les charges de chauffage et d'ECS sont établies, puis le module 7 détermine l'état de marche de chaque générateur selon l'architecture de production de chaleur retenue.

Les sorties de ce module comprennent les puissances thermiques effectivement délivrées, les consommations électriques et de combustible, le COP PAC et les indicateurs de couverture. Par défaut, pour un système bivalent, la PAC est dimensionnée à 50% de la puissance pic pour viser entre 80 et 90% de couverture annuelle des besoins de chaleur. Les performances PAC sont évaluées soit via des cartes de performances de constructeur, soit à l'aide d'un modèle simplifié basé sur un cycle de Carnot. L'intégration avec le module 4 permet d'abaisser les températures (aller/retour) pour optimiser le COP PAC ou le rendement chaudière, tout en quantifiant pertes et auxiliaires pour l'agrégation finale.

Module 8 : Agrégation des modèles

Ce module centralise les sorties des modules 2 à 7, puis les agrège en bilans journaliers et annuels pour offrir une lecture synthétique du système complet (bâtiment + système) pour chaque scénario. Elle produit des indicateurs énergétiques (consommations électriques et combustibles, productions utiles, pertes, heure de fonctionnement), des indicateurs économiques (évaluation OPEX/CAPEX simplifiée à partir de coûts unitaires) et des indicateurs environnementaux (ACV de la consommation énergétique et rénovation du système).

L'agrégateur produit les Indices Clés de Performance (ICP) qui servent à la comparaison inter scénarios et à la décision. Ils couvrent les performances énergétiques et opérationnelles (COP PAC et rendement chaudière), les parts de couverture PAC comparées à celles de l'appoint, les puissances crête, la part de non-couverture Q_{unmet} , les coûts d'exploitation et d'investissement et les émissions de CO_{2e}, avec une présentation en valeurs absolues et normalisées par m² SRE et pour chaque scénario annuel. Il vérifie la couverture de charge avec un seuil minimal de 97 % et signale les saturations, puis assemble les métadonnées sources, facteurs d'émission, hypothèses économiques et versions pour garantir la traçabilité, la comparabilité et la reproductibilité des résultats.

Sélection des bâtiments d'étude

L'analyse cible en priorité dix typologies multifamiliales représentatives du parc bâti romand 1901-1988. Elles ont été présélectionnées à partir des cas eRen [6] et de TypoReno [7], afin de couvrir une diversité de géométries, d'implantations et de densités tout en conservant un poids significatif dans la SRE régionale. Selon le rapport intermédiaire FlexiRenove [8], les cinq bâtiments retenus sont des cas représentatifs de cinq typologies qui, à elles seules, totalisent près de 50 % de la SRE du canton de Genève. Le projet eRen [6] fournit une méthodologie rigoureuse de rénovation de l'enveloppe et un corpus de cas types finement paramétrés mobilisables pour la simulation. Le projet T-DROP [8] analyse l'abaissement des températures de distribution comme levier d'intégration des énergies renouvelables et de décarbonation des immeubles multifamiliaux, et met à disposition jeux de données et recommandations techniques. L'analyse à l'échelle du bâtiment portera a priori sur un à deux bâtiments.

Bâtiment	Localisation	Année de construction	Nombre de logements	SRE [m ²]	Surface au sol [m ²]
eRen 4	Lausanne	1960	18	1475	324
eRen 5	Genève	1970	27	2811	308
eRen 7	Fribourg	1975	65	5056	379
eRen 8	Genève	1971	40	3539	370
eRen 10	Genève	1988	58	5215	890
TypoRenoF3	Lausanne	1935	34	2529	353
TypoRenoG3	Lausanne	1939	25	2445	380
TypoRenoG4	Lausanne	1932	15	1585	361
TypoRenoH4	Lausanne	1964	51	4849	910
TypoRenol2	Lausanne	1964	82	8004	656

Tableau 7 : Sujets d'étude retenus

Sur le plan méthodologique, le choix de ces dix cas (Tableau 7) s'appuie sur la disponibilité des caractéristiques d'enveloppe thermique existante précise. Ces caractéristiques sont disponibles via des modèles énergétiques LESOSAI homogènes. Pour certaines typologies, en particulier eRen [6], des scénarios de rénovation sont déjà paramétrés, c'est-à-dire que des variantes de rénovation préconfigurées fournissent les caractéristiques d'enveloppe et les autres paramètres pertinents utilisés en entrée du modèle Python (cf.). Cette base est complétée par une grille de coûts associée aux mesures de rénovation, prise comme référence pour l'analyse économique. L'ensemble garantit la cohérence des entrées et la comparabilité inter-scénarios, et la continuité avec les travaux antérieurs permet de quantifier de manière rigoureuse les impacts énergétiques, environnementaux et économiques des combinaisons « rénovation + système », tout en offrant un socle extensible à d'autres typologies ou variantes spécifiques lorsque requis.

Rénovation de l'enveloppe

L'analyse de rénovation retient quatre interventions majeures couvrant les principaux postes de déperditions des bâtiments existants :

A | Combles ou toitures : amélioration de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air pour limiter les pertes par le haut ;

B | Façades : renforcement de l'isolation des murs extérieurs et prise en compte des particularités architecturales (balcons, décrochements, stores) ;

C | Fenêtres : remplacement des vitrages par des doubles ou triples vitrages performants avec cadres adaptés, afin de réduire les pertes par transmission et améliorer le confort thermique ;

D | Plancher bas : isolation des dalles sur espaces non chauffés quand cela n'était pas fait (caves, parking, affectations particulières) pour limiter les déperditions vers le sol et améliorer la performance globale de l'enveloppe ;

E | Émetteurs : adaptation et, si nécessaire, augmentation de la surface d'émission (remplacement/ajout de radiateurs ou passage à des émetteurs basse température) pour abaisser les températures de départ et de retour.

Isoler toitures, façades, fenêtres et plancher bas réduit la demande de chauffage et abaisse les températures de distribution, ce qui facilite l'usage de systèmes basse température comme les PAC air-eau. À l'inverse, un bâtiment non rénové se raccorde plus facilement à un réseau de chaleur, capable de fournir des températures plus élevées. Installer une PAC sur un bâtiment non rénové reste plus contraignant, mais c'est envisageable en bivalence avec une chaudière, surtout si l'on abaisse la courbe de chauffe et que l'on adapte ou augmente la surface des émetteurs.

En effet, le scénario E va précisément dans ce sens : le renforcement des émetteurs permet de viser des températures de départ de l'ordre de 30 à 40 °C, d'améliorer le COP d'une PAC et, selon les cas, de générer des gains d'énergie et d'émissions pertinents, y compris sans assainissement complet de l'enveloppe. C'est la logique mise en évidence par une étude mandatée par l'OFEN [9], qui modélise cinq bâtiments et compare le remplacement de radiateurs traditionnels par des émetteurs basse température à différentes combinaisons d'assainissement, avec des résultats en termes de baisse de température de départ, hausse du COP et analyse coûts-bénéfices sur 30 ans.

Toutes les combinaisons de rénovation (jusqu'à 32) ne sont pas transposables à l'ensemble des typologies : l'applicabilité dépend des caractéristiques constructives ou encore des contraintes patrimoniales. La sélection des scénarios de rénovation simulés sera donc conditionnée par la typologie et la cohérence technique des interventions envisagées.

	NR	A	B	C	D
eRen4	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	FAUX
eRen5	VRAI	FAUX	VRAI	VRAI	VRAI
eRen7	VRAI	VRAI	FAUX	VRAI	VRAI
eRen8	VRAI	FAUX	VRAI	VRAI	FAUX
eRen10	VRAI	FAUX	FAUX	VRAI	VRAI
I2	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
H4	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
G3	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
G4	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI	VRAI
F3	VRAI	FAUX	VRAI	VRAI	VRAI

Tableau 8 : Matrice d'applicabilité des mesures de rénovation par typologie de bâtiment

Enfin, une évaluation économique préliminaire menée dans le cadre du projet T-DROP [8] fournit une estimation des coûts par mesure, rapportés au kWh économisé sur la durée de vie. L'évaluation des coûts de mise en œuvre des scénarios a été réalisée selon la méthode du Code des coûts de construction du bâtiment (eCCC-Bât), établi par le Centre de Rationalisation du Bâtiment (CRB) et conforme à la norme SN 506 511[10]. À noter que, pour actualiser les coûts estimés en 2016 du projet eRen [6] un indice de correction est établi à partir des données de l'Office fédéral de la statistique (OFS) [11]. La Figure 19 associée illustre la répartition des coûts par type d'intervention et par typologie.

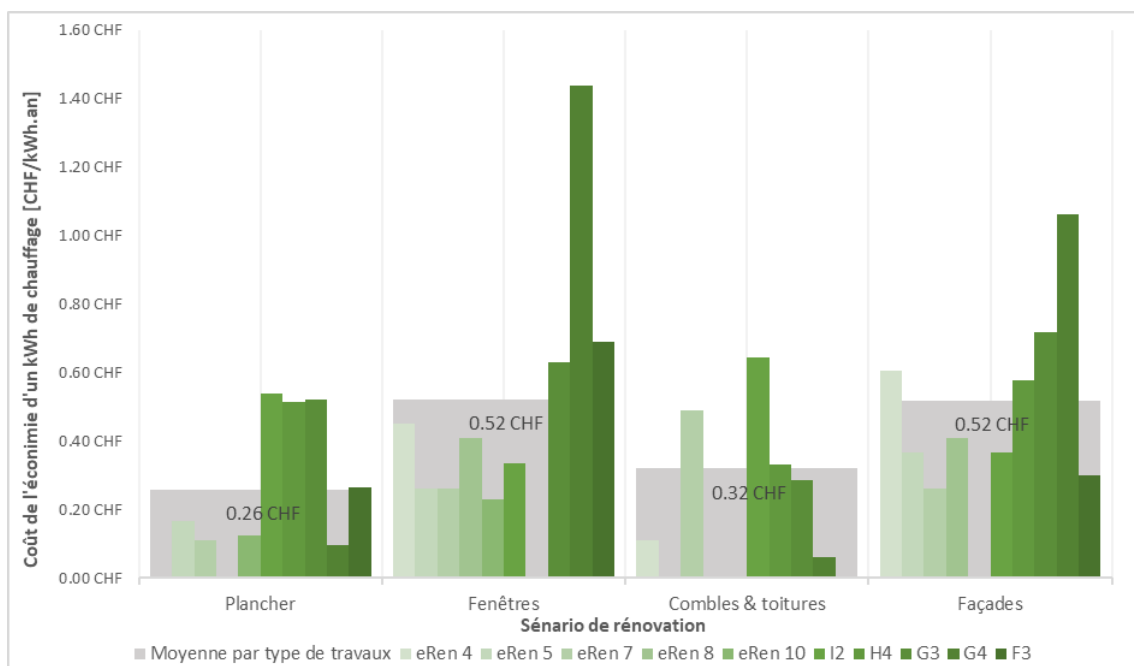


Figure 19 : Coûts de la mesure pour l'économie d'un kWh sur la durée de vie [3]

La Figure 19 compare ensuite les coûts spécifiques par surface d'élément entre T-DROP [8] et les références Effiwag [9]. Les coûts T-DROP [8] apparaissent globalement plus élevés, avec des écarts pouvant atteindre un facteur 3 pour façades et planchers, en raison d'un échantillon réduit centré sur des immeubles multifamiliaux, de méthodes d'intervention variées et de contraintes architecturales hétérogènes. Ces valeurs servent d'ordres de grandeur et doivent être recalibrées bâtiment par bâtiment avant arbitrage.

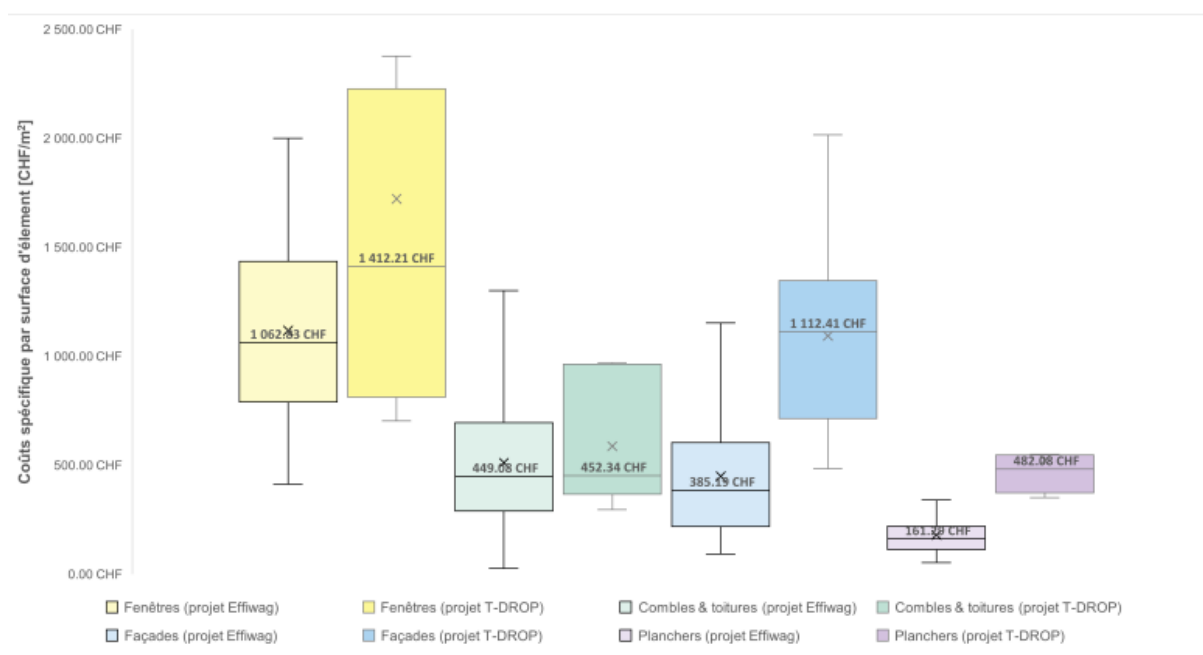


Figure 20 : Coûts spécifiques par surface d'élément concerné [3] [4]

Trajectoires et production de chaleur

Cette annexe présente de manière détaillée la construction des trajectoires de décarbonation et la modélisation des systèmes de production de chaleur utilisés dans l'analyse. Elle décrit les séquences décisionnelles envisagées sur 20 ans, les configurations de production considérées et les logiques de phasage qui structurent les différentes familles de trajectoires. Sont également documentés les mécanismes d'interaction entre rénovations de l'enveloppe et performances des générateurs, ainsi que les principes d'échantillonnage et les méthodes mobilisées pour évaluer la robustesse des résultats. L'ensemble du contenu fournit ainsi le socle opérationnel et méthodologique complétant la synthèse présentée dans la partie d) du rapport.

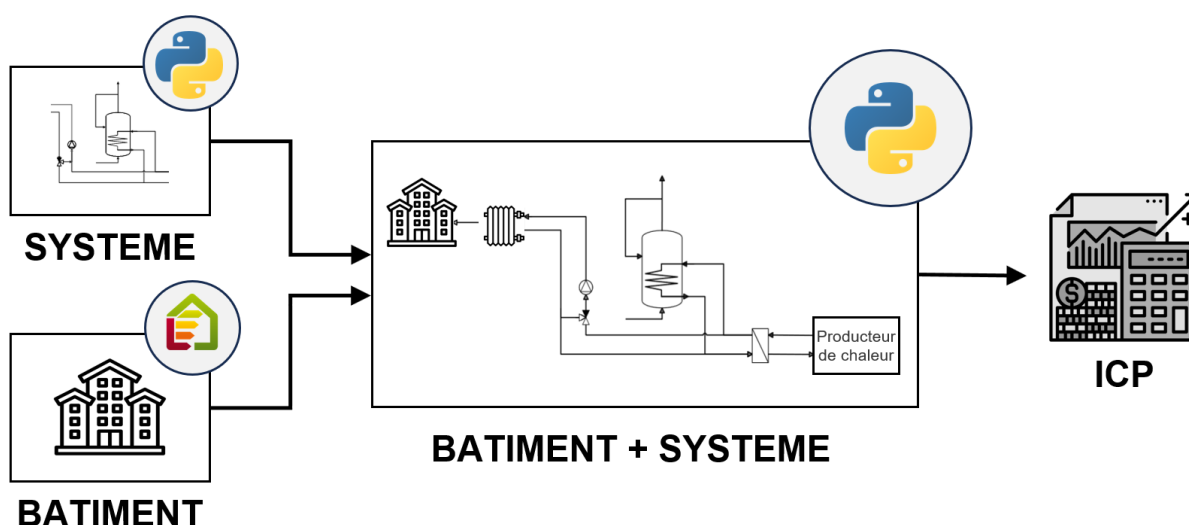


Figure 21 : Schématisation de la plateforme de simulation sur une année [3]

La partie système, représentée dans la Figure 21, désigne les trois configurations de production de chaleur modélisées dans le modèle python :

- Une chaudière à gaz monovalente dimensionnée pour couvrir environ 97% des besoins crêtes ;
- Une pompe à chaleur air/eau dimensionnée pour couvrir environ 97% des besoins crêtes ;
- Un système bivalent parallèle avec une PAC air/eau calibrée pour couvrir 50 % des besoins crêtes et un appoint (chaudière à gaz) qui doit permettre de couvrir le reste des besoins en chaleur.

Des variantes technologiques ou de pilotage pourront être mobilisées en analyses de sensibilité pour éprouver la robustesse des conclusions.

Ainsi, il existe au total 96 combinaisons « système + enveloppe » envisageables par bâtiment pour chaque année. Pour structurer l'exploration sur 20 ans, ces configurations sont regroupées en quatre familles de trajectoires correspondant à des phasages réalistes, détaillées ci-après. L'évaluation annuelle des indicateurs clés de performance permet ensuite d'identifier les trajectoires réalisables les plus performantes au regard des hypothèses financières et des objectifs de décarbonation fixés en amont.

« Voie Royale »

Trajectoire en deux temps : d'abord la rénovation de l'enveloppe, puis l'installation d'un générateur décarboné dimensionné sur le bâtiment rénové (cf. Figure 22).

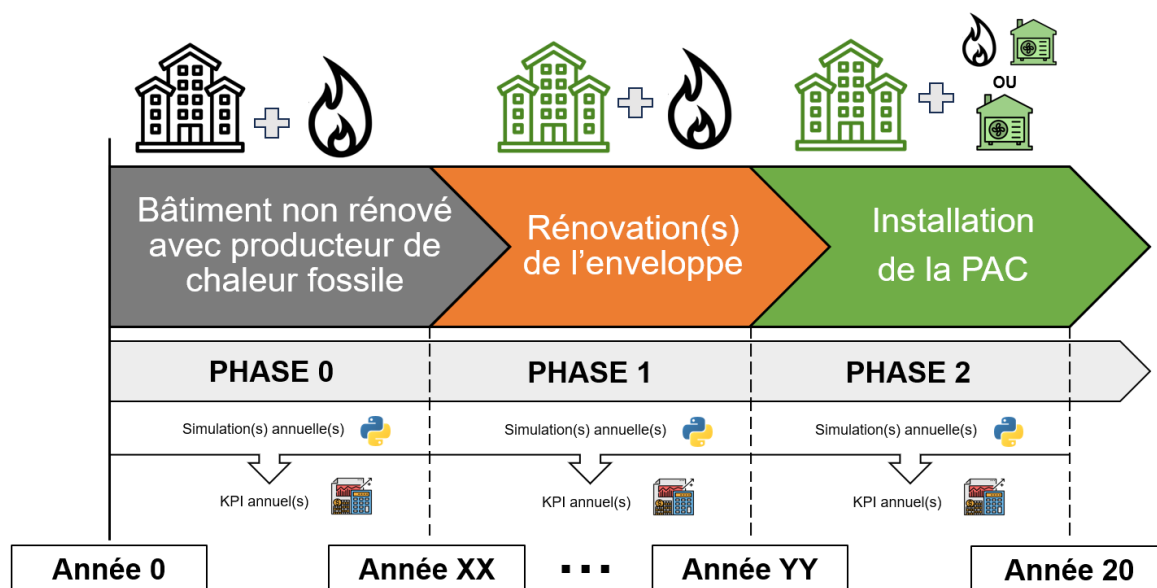


Figure 22 : Trajectoire « voie royale » : rénovations de l'enveloppe, puis installation de la PAC, avec simulation et KPI annuels.

- Phase 1 : Après X années, l'enveloppe est rénovée tandis que le générateur fossile existant est maintenu. Cette intervention abaisse la demande de chauffage et permettrait de réduire les températures de distribution [4] pour la phase 2.
- Phase 2 : Après Y – X années, une pompe à chaleur air eau au propane est installée et dimensionnée sur la demande post-rénovation. Deux configurations sont envisagées : monovalente, ou bivalente en parallèle en conservant la chaudière gaz comme appoint. La charge ECS, peu sensible à la rénovation de l'enveloppe, reste inchangée ; l'essentiel de l'ajustement concerne donc le chauffage.

Cette trajectoire minimise le risque de surdimensionnement du producteur décarboné, maximise le rendement saisonnier en permettant des températures de départ plus basses, et facilite le réglage d'une courbe de chauffe adaptée au nouveau profil de besoin.

« Reduce Now »

Trajectoire en deux temps : installation immédiate d'un générateur décarboné, puis rénovation de l'enveloppe (Figure 23).

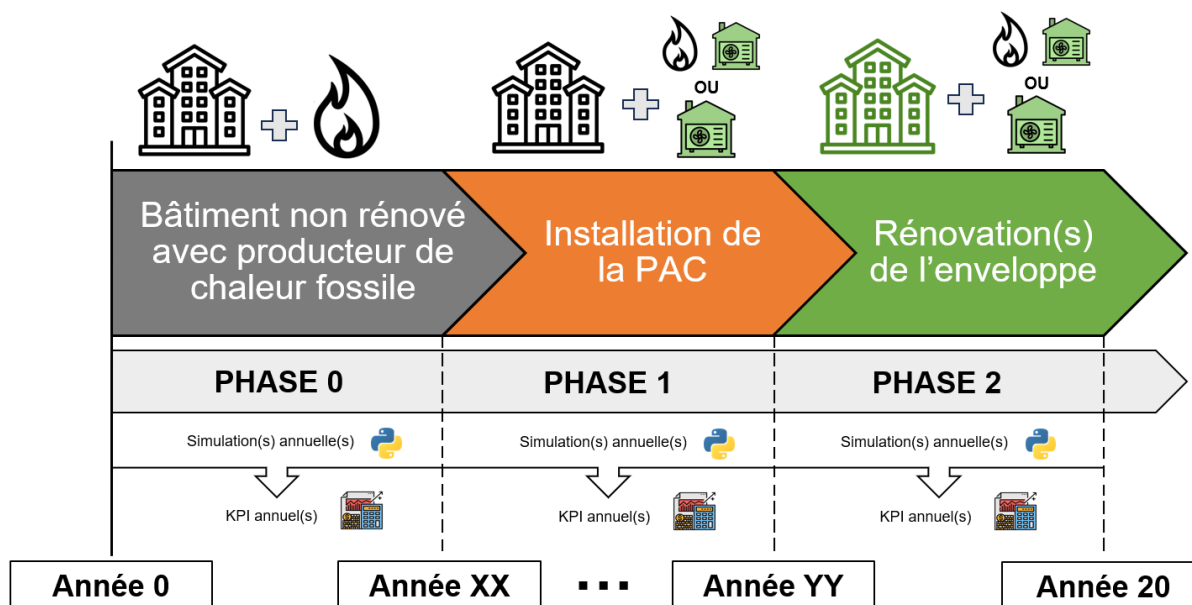


Figure 23 : Trajectoire « Reduce Now » : installation de la PAC, puis rénovations de l'enveloppe, avec simulation et KPI annuels.

- Phase 1 : À l'année X, une PAC air eau au propane est installée sur le bâtiment non rénové soit en monovalence, soit en parallèle avec la chaudière gaz en appoint qui a été conservée.
- Phase 2 : À l'année Y, l'enveloppe est rénovée. La demande de chauffage diminue, ce qui permettrait ainsi d'abaisser la température de distribution et d'améliorer le COP de la PAC. La courbe de chauffe est recalibrée et le rôle de l'appoint pourrait être réduit.

Cette trajectoire vise une réduction rapide des émissions en anticipant le fuel switch, au prix éventuel d'une efficacité initialement plus faible. La rénovation ultérieure consoliderait les gains en permettant potentiellement des régimes plus bas et un fonctionnement plus performant du système.

« Switch Complet »

Cette trajectoire regroupe, la même année, la rénovation de l'enveloppe et l'installation d'un système de production de chaleur décarboné (Figure 24).

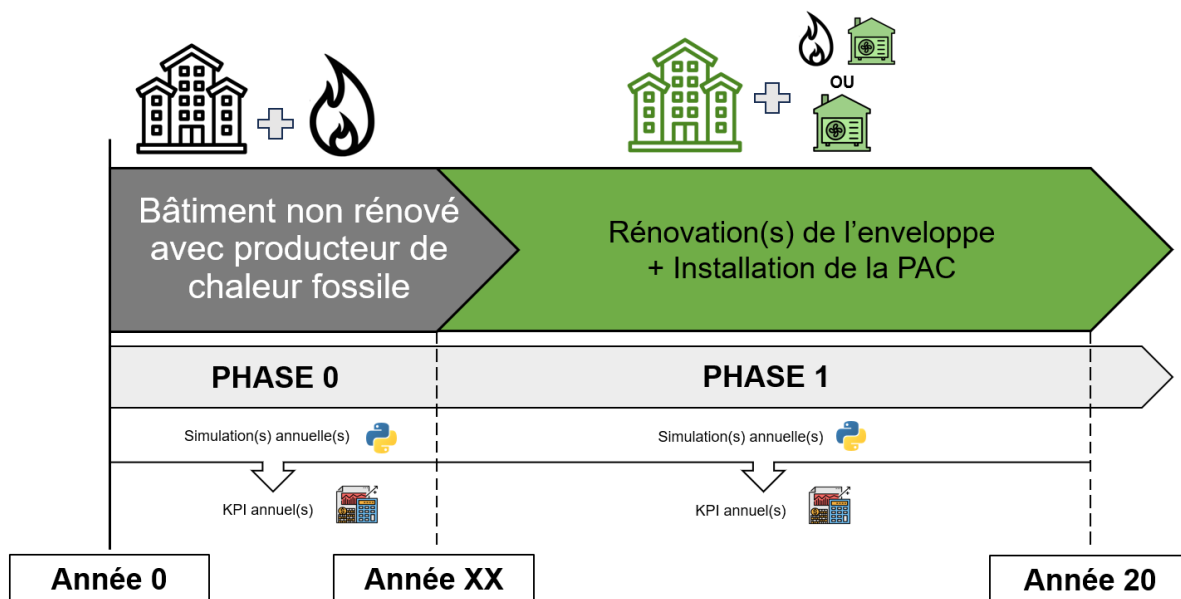


Figure 24 : Trajectoire « Switch Complet » : rénovations de l'enveloppe et installation de la PAC la même année, avec simulation et KPI annuels.

- Phase 1 : À l'année X, l'enveloppe est rénovée et une PAC air eau au propane est mise en service, soit en monovalence, soit en bivalence parallèle avec maintien de la chaudière gaz en appoint. Le dimensionnement et la loi d'eau sont établis sur la base des besoins après rénovation. Les températures d'émission sont abaissées autant que le réseau et les émetteurs le permettent, avec réglage de la courbe de chauffe et, si prévu, adaptation des émetteurs.

Le couplage des travaux limite le risque de surdimensionnement du producteur décarboné, accélère la réduction des émissions et stabilise les performances dès la première année post-intervention, au prix d'un pic d'investissement concentré. Les KPI annuels permettent de comparer cette option aux trajectoires séquentielles.

« Monovalence Progressive »

La « Monovalence progressive » décrit une trajectoire en deux temps qui organise le passage vers une PAC monovalente tout en réduisant immédiatement les émissions (Figure 25).

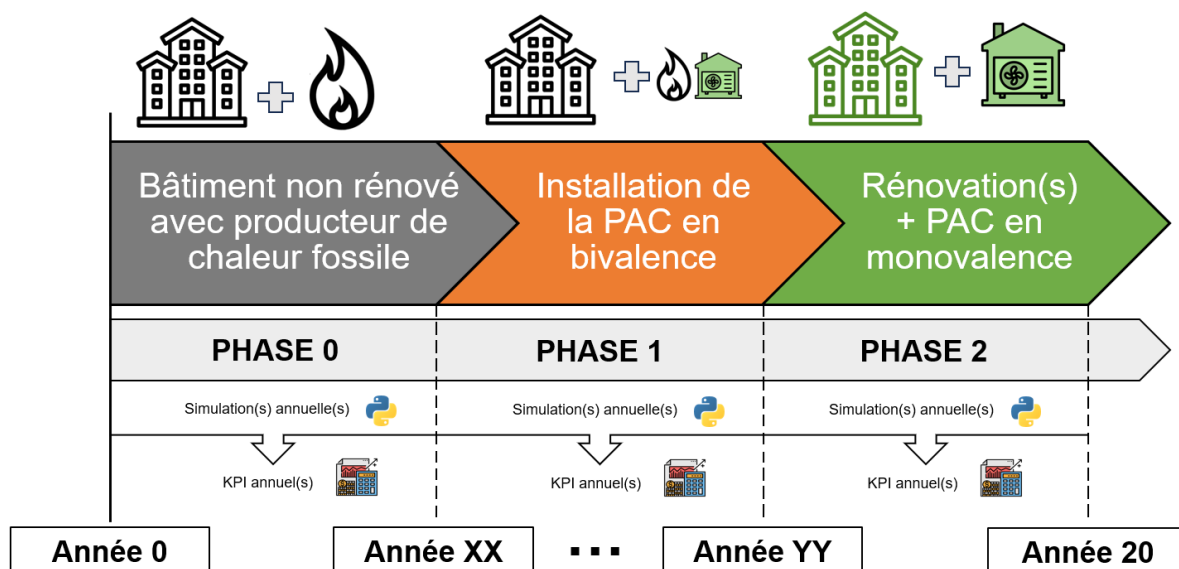


Figure 25 : Trajectoire « monovalence progressive » : PAC en bivalence, puis rénovations et bascule en monovalent, avec simulation et KPI annuels.

- Phase 1 : Une PAC air eau est d'abord installée en bivalence parallèle avec la chaudière existante. La PAC est typiquement dimensionnée à une fraction de la puissance de pointe afin de couvrir 80 à 90 % des besoins annuels, la chaudière couvrant les besoins restants lorsque la PAC atteint sa puissance maximale comme modélisé par le module 7. La loi d'eau est abaissée autant que possible selon les contraintes hydrauliques et la capacité des émetteurs décrites par le module 4. Cette étape permet un fuel switch partiel rapide, l'acquisition de données d'exploitation simulée et l'ajustement fin des paramètres de pilotage avant d'engager une monovalence et des rénovations.
- Phase 2 : Après rénovation ciblée de l'enveloppe et, potentiellement, adaptation ou augmentation de la surface d'émetteurs, la configuration évolue vers une PAC monovalente. Le recalage s'effectue sur la signature énergétique post-rénovation a, b, seuil de chauffe, avec optimisation conjointe de la loi d'eau et du ΔT réseau pour minimiser T_{aller} et la température de retour.

Cette trajectoire est pertinente lorsque le bâtiment n'est pas immédiatement compatible avec une PAC seule ou lorsque le phasage financier impose un lissage des CAPEX. Elle réduit le risque de surdimensionnement et capitalise sur un retour d'expérience opérationnel entre X et Y années.

Une variante de cette trajectoire consiste à sélectionner les rénovations de sorte que la demande de chauffage passe sous la capacité calorifique maximale de la PAC au point de dimensionnement. Cette approche optimiserait les dépenses d'investissement et abaisserait le coût d'abattement, exprimé en CHF par kg de CO₂e évité.

Stratégie d'échantillonnage et robustesse des résultats

La structuration en familles de trajectoires (cf. Figure 26) permet de comparer des enchaînements d'actions plausibles et d'isoler l'effet du séquençage sur les indicateurs sur une période de 20 ans. Elle offre un cadre ordonné pour confronter, à granularité annuelle, des choix de rénovation et de remplacement de générateur qui interagissent entre eux.

Compte tenu de l'ampleur combinatoire, l'exploration est réduite dans un premier temps à un portefeuille de 51 trajectoires représentatives par scénario d'enveloppe. La sélection s'appuie sur des critères de

couverture des typologies, de faisabilité technique, de disponibilité des données et de diversité des phasages. Cette réduction garantit des comparaisons énergie-coûts-CO₂e cohérentes à granularité homogène, avec des ICP calculés et normalisés selon les mêmes conventions. Les trajectoires les plus performantes seront affinées, et les jalons temporels X et Y seront ensuite ajustés en fonction des hypothèses fixées tels que les contraintes budgétaires et les objectifs de décarbonation.

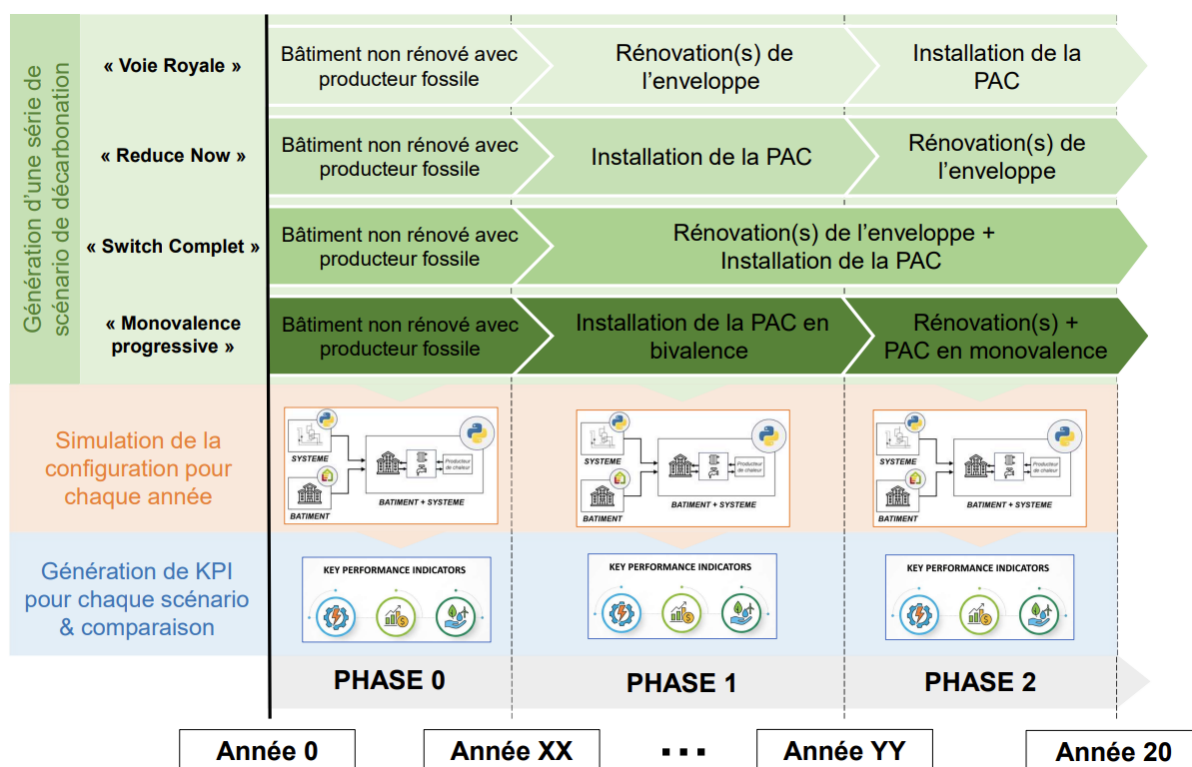


Figure 26 : Logique d'étude à l'échelle du bâtiment : génération des scénarios et KPI annuels.

La robustesse est recherchée par deux leviers complémentaires. D'une part, des analyses de sensibilité déterministes explorent l'effet de variations contrôlées des paramètres structurants, par exemple la part de charge couverte par la PAC, les besoins de chauffage et d'ECS, les pertes, la surface d'émetteurs, ainsi que des hypothèses économiques et de facteurs d'émission. D'autre part, un échantillonnage stochastique de type Monte Carlo propage les incertitudes en affectant des distributions aux entrées, ce qui fournit des intervalles de confiance et teste la stabilité des classements des trajectoires. L'ensemble des simulations est journalisé avec provenance versionnée, ce qui assure la traçabilité et facilite la réplique inter-typologies.

Par ailleurs, le changement de producteur de chaleur modifie l'optimum hydraulique et thermique. Une PAC voit ses performances croître lorsque les températures d'émission baissent, puisqu'un écart de température plus faible entre source et condensation améliore son COP. Pour délivrer la même puissance thermique à des températures de départ et de retour plus basses, deux leviers existent côté distribution : augmenter le débit massique ou accroître la surface d'émetteurs. Ce second levier correspond au scénario E, dont l'objectif est d'abaisser durablement la loi d'eau en adaptant le parc d'émetteurs afin de rendre la PAC plus performante à régime basse température.

La Figure 27 illustre ce compromis sur le cas TypoReno G3 du projet T-DROP en comparant deux lois d'eau optimisées, high-flow et low-flow. Le mode high-flow abaisse davantage T_{aller}/T_{retour} et améliore le COP de la PAC, mais requiert plus d'électricité de pompage ; le mode low-flow réduit l'énergie des pompes au prix de températures plus élevées et d'un COP moindre. Le modèle python quantifie ces effets à pas horaire et arbitre sur des indicateurs annuels intégrés comme le COP de la PAC, les consommations auxiliaires, les coûts et émissions de CO₂e spécifiques.

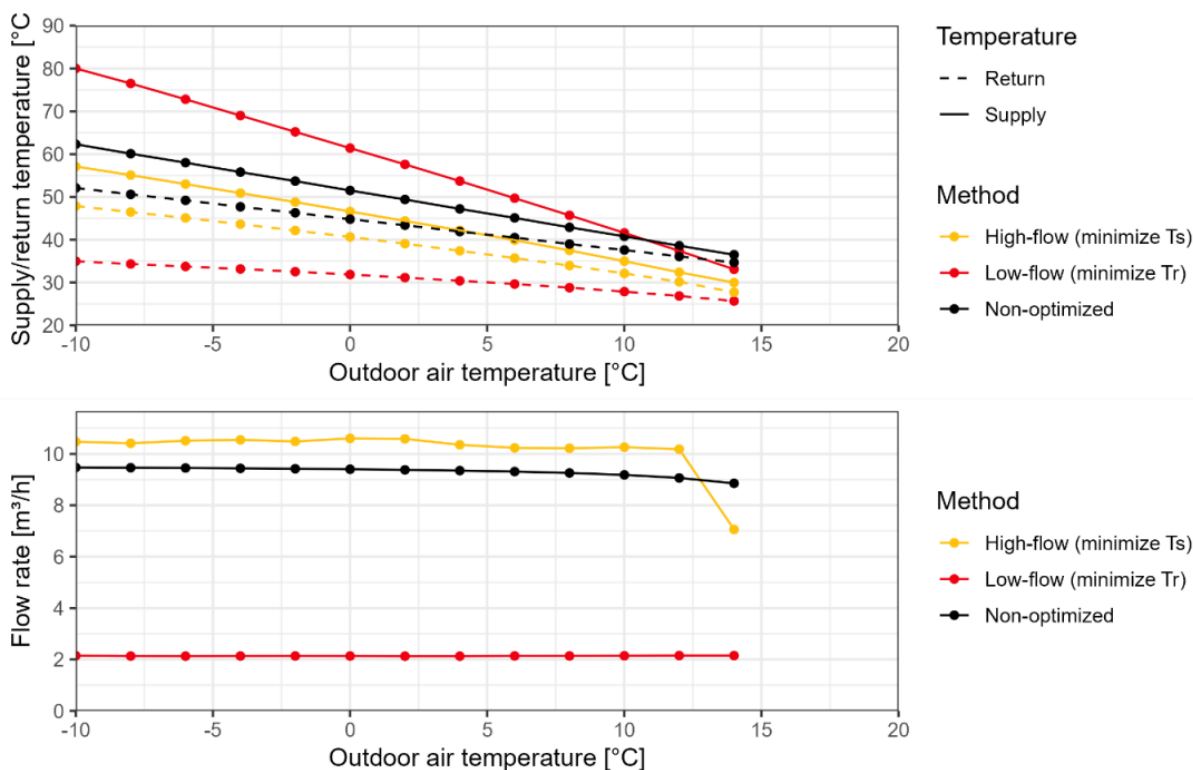


Figure 27 : Comparaison lois d'eau optimisées high-flow et low-flow du bâtiment TypoReno G3 issu du projet TDROP [3]

Les trajectoires sont établies à partir d'objectifs et de contraintes opérationnelles réalistes, incluant le budget d'investissement par période, les charges d'exploitation attendues, les cibles d'émissions, la faisabilité technique et le phasage des chantiers ; où la durée de chaque intervention sur l'enveloppe ou le système est arbitrairement fixé à une année. Elles sont ensuite comparées sur 20 ans selon l'énergie, les coûts actualisés et l'abattement de CO_2e , avec calcul du coût d'abattement en CHF par kgCO_2e évité.

D'après une étude publiée à la 13th IEA Heat Pump Conference 2020 [12], menée dans le cadre d'un cas d'étude sur des immeubles multifamiliaux à Genève, il ressort une relation quasi linéaire entre l'empreinte carbone surfacique Cbld [$\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$] et la demande de chaleur Qdem [kWh/m^2] (Figure 28). À Qdem constant, remplacer une chaudière gaz par une PAC abaisse Cbld . À système inchangé, la rénovation abaisse Qdem . Sur la figure, les flèches vertes illustrent la trajectoire « Reduce Now », les rouges la « Voie Royale ». Ce cadrage aide à arbitrer, sous contrainte budgétaire, entre baisse de la demande et changement de producteur pour minimiser les émissions.

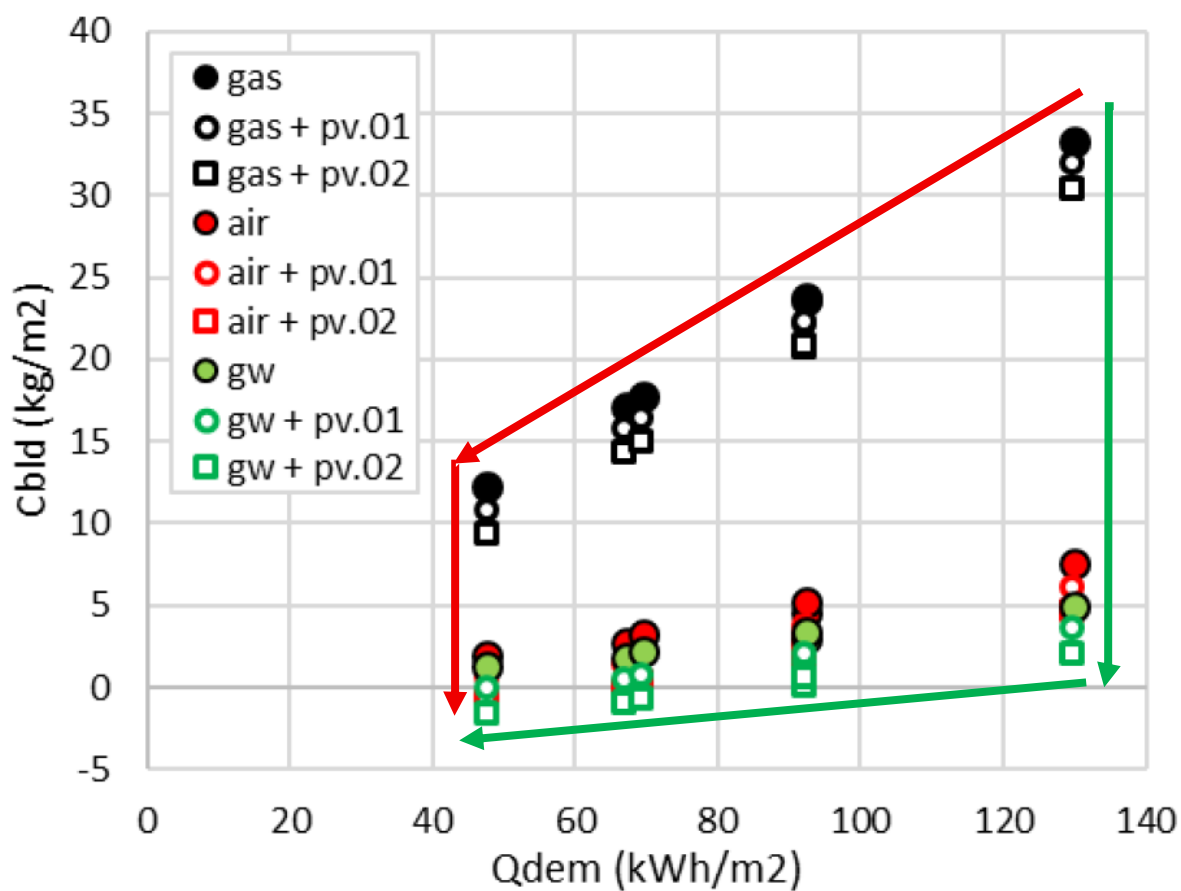


Figure 28 : Émissions annuelles de CO₂e par m² en fonction de la demande de chauffage par m² de producteur de chaleur fossile au gaz, d'une PAC air-eau et d'une PAC eau-sol, avec ou sans PV, et lecture des trajectoires « Reduce Now » et « Voie Royale »