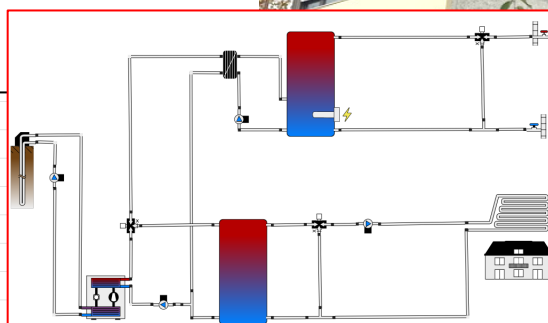
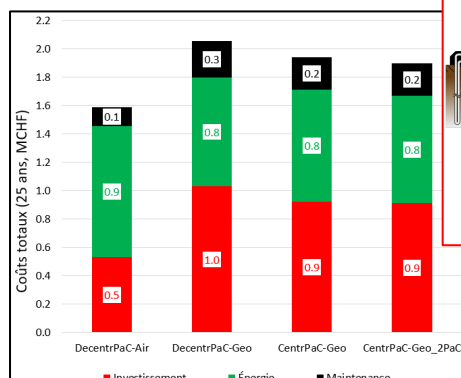
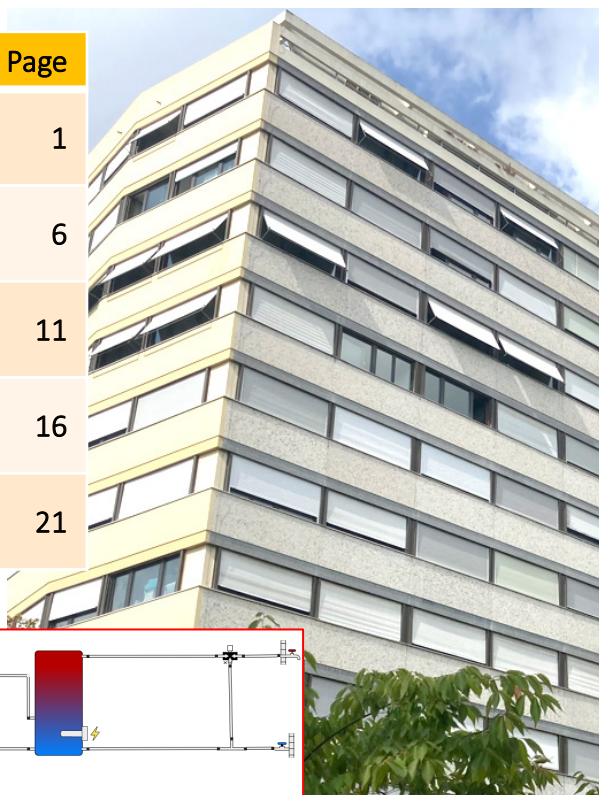


# Solutions de pompes à chaleur pour la décarbonation des bâtiments existants - Cinq études de cas

Cinq bâtiments existants, archétypes de la Suisse, ont été sélectionnés et analysés dans le but de comparer différentes solutions basées sur des pompes à chaleur pour le remplacement des systèmes de chauffage fossiles. En collaboration avec le partenaire de mise en œuvre Scheco AG, les résultats ont été résumés dans des fiches d'information. Ces fiches peuvent aider les propriétaires de bâtiments, les planificateurs et les autorités publiques à choisir parmi les différentes options.

Factsheet	Page
Factsheet 1 - Ancien immeuble des années 1940	1
Factsheet 2 - Immeuble d'appartements des années 1960	6
Factsheet 3 - Immeubles de grande hauteur des années 1960	11
Factsheet 4 - Immeuble d'appartements des années 1970	16
Factsheet 5 - Complexe de 5 immeubles d'habitation	21



# Systèmes de pompes à chaleur pour immeubles multifamiliaux existants

## Étude de cas 1 - Ancien immeuble des années 1940

### CARACTÉRISTIQUES

Situé au centre-ville de Lausanne, cet immeuble d'habitation se caractérise par une utilisation mixte (commerces au rez-de-chaussée et appartements dans les étages). Il dispose de cinq étages résidentiels avec 24 appartements au total. Sous le toit en croupe recouvert de tuiles, il y a un grenier non chauffé. Les murs en blocs de béton creux de 35 cm d'épaisseur, recouverts d'enduit, soutiennent les dalles des étages. La façade du rez-de-chaussée est revêtue de panneaux de pierre artificielle. Les fenêtres ont été remplacées. Seuls les cadres des fenêtres des magasins du rez-de-chaussée sont d'origine. Les fenêtres sont encadrées d'éléments en pierre artificielle texturée. Les dalles de ciment des loggias reposent sur les murs extérieurs solides. Les parapets sont maçonnés et enduits, et garnis de balustrades en fer. Le système de production de chaleur, installé au sous-sol du bâtiment, se compose d'une chaudière au fioul qui produit la chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. La chaleur pour le chauffage des locaux est émise dans les pièces chauffées par des radiateurs. Le bâtiment est situé à proximité d'un réseau de chauffage urbain existant.



Année de construction	1939
Emplacement	Lausanne (canton Vaud)
Surface de référence énergétique	2445 m <sup>2</sup>
Catégorie de bâtiment (SIA 380/1)	Résidentiel (85%), Commercial (15%)
Demande de chauffage des locaux (Ch.) calculée	230 MWh/a (94 kWh/m <sup>2</sup> a)
Demande d'eau chaude sanitaire (ECS) calculée	66 MWh/a (27 kWh/m <sup>2</sup> a)
Production de chaleur	Chaudière au fioul
Émission de chaleur	Radiateurs

#### Grenier/Toit

Quatre appartements mansardés sous le toit en croupe

#### Mur extérieur

Blocs de béton creux enduits (env. 35 cm)

#### Extérieur

Loggia encastrée, plafond en béton, balustrade en maçonnerie enduite avec main courante en fer

#### Appartements

Cinq étages sont alloués à des appartements (20 appartements)

#### Commerces

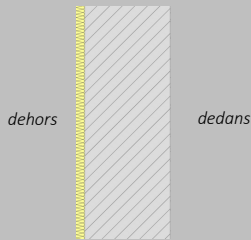
Rez-de-chaussée occupé par des commerces



## Mur extérieur (appartements)

U avant rénovation: 1.22 W/m²K

U après rénovation: 0.65 W/m²K



Enduit isolant minéral (40 mm)

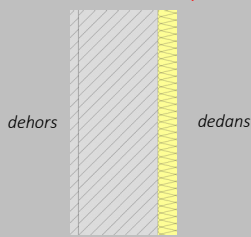
Blocs creux de ciment (340 mm)

Plâtre de gypse (7 mm)

## Paroi extérieure (socle)

U avant rénovation: 1.19 W/m²K

U après rénovation: 0.26 W/m²K



Dalle en pierre artificielle (40 mm)

Blocs creux de ciment (340 mm)

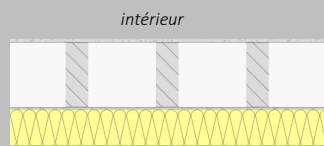
Isolation (90 mm)

Pare-vapeur

## Plafond de la cave

U avant rénovation: 0.98 W/m²K

U après rénovation: 0.22 W/m²K



Carreaux (12 mm)

Plafond hourdis (210 mm)

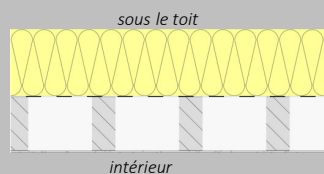
Plâtre de gypse (7 mm)

Isolation (120 mm)

## Sous le toit

U avant rénovation: 1.01 W/m²K

U après rénovation: 0.14 W/m²K



Isolation (200 mm)

Pare-vapeur

Plafond hourdis (160 mm)

Plâtre de gypse (7 mm)

## Fenêtres des appartements

U<sub>g</sub> avant rénovation: 1.1 W/m²K

U<sub>f</sub> avant rénovation: 2.0 W/m²K

g avant rénovation: 0.55

U<sub>g</sub> après rénovation: 0.6 W/m²K

U<sub>f</sub> après rénovation: 1.1 W/m²K

g après rénovation: 0.67

## ENVELOPPE DU BÂTIMENT - Stratégie de rénovation

Les caractéristiques architecturales de la façade, des loggias, de l'angle ouvert du bâtiment et de l'attique en retrait rendent difficile la mise en place d'une isolation extérieure sans pertes architecturales. La stratégie de rénovation choisie pour les murs extérieurs sous la forme d'un enduit isolant permet de préserver les qualités architecturales. Pour compenser cela, le sous-toit et le plafond de la cave sont isolés au maximum et les fenêtres sont remplacées.

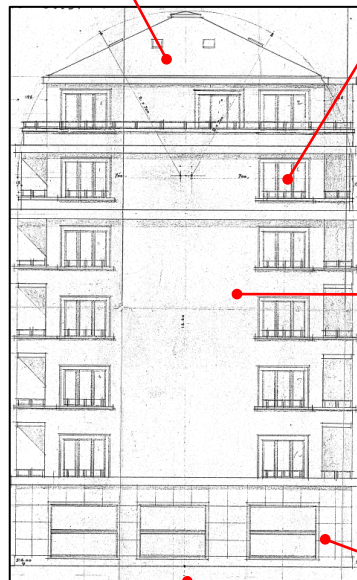
La structure existante du sous-toit sera isolée avec 200 mm d'isolant pour une valeur U totale après rénovation de 0.14 W/m²K. Le plafond de la cave sera isolé (couche de 120 mm) afin d'atteindre une valeur U de 0.22 W/m²K.

Le mur extérieur des appartements sera recouvert d'un enduit isolant minéral supplémentaire de 40 mm, tandis que les murs extérieurs du socle seront isolés à l'intérieur (90 mm). Toutes les fenêtres seront remplacées par des fenêtres à trois carreaux avec cadre en bois.

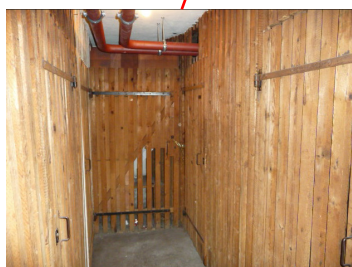
### Sous le toit\*



### Fenêtres des appartements\*



### Mur extérieur des appartements\*



### Plafond des caves\*



### Socle mural extérieur\*

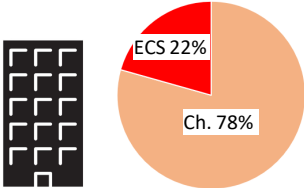
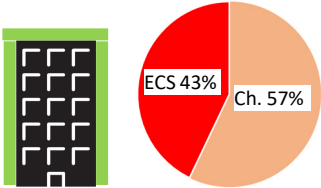
\*Situation actuelle (avant rénovation)

CONCEPT DE PRODUCTION DE CHALEUR - Définition des variantes

Afin de réduire les émissions directes de CO<sub>2</sub> du système de production de chaleur existant pour le chauffage des locaux (Ch.) et la préparation de l’eau chaude sanitaire (ECS), deux variantes ont été étudiées :

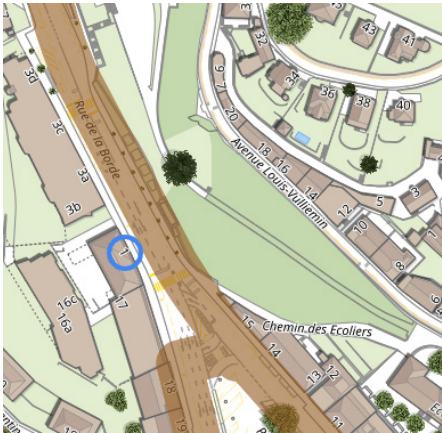
- Chauffage urbain (ChU) : le réseau de chauffage urbain existant est utilisé pour fournir de la chaleur au bâtiment pour le chauffage et la préparation d’ECS ;
- Pompe à chaleur air-eau (PaC-Air) : Une pompe à chaleur air-eau assure la production de chaleur pour le Ch. et l’ECS.

La variante « PaC-Air » n’a été envisagée qu’en cas de rénovation de l’enveloppe du bâtiment. Dans toutes les variantes, le remplacement des radiateurs existants par de nouveaux radiateurs est envisagé. La température de distribution a été réglée en fonction de l’état de l’enveloppe du bâtiment. Étant donné que le forage de sondes géothermiques n’est pas autorisé dans cette zone, les pompes à chaleur géothermiques n’ont pas été considérées comme une variante dans cette analyse. Des détails sur les différentes variantes de production de chaleur sont décrits dans l’annexe. Le choix des variantes est le résultat d’une discussion préalable avec les partenaires CVC.

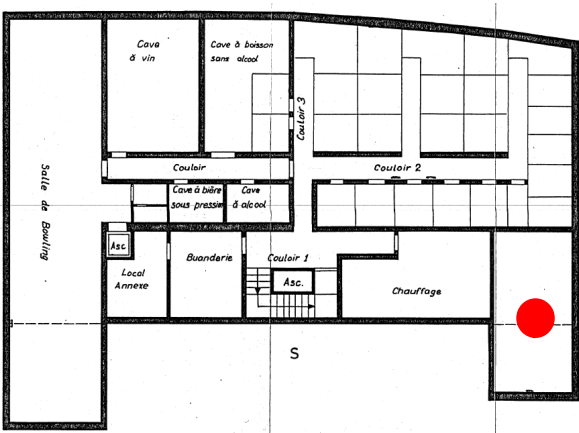
	Enveloppe du bâtiment non rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 94 / 27	Enveloppe du bâtiment rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 36 / 27	
			
Variante de production de chaleur	ChU	PaC-Air	ChU
COP <sub>nom</sub> / Capacité HP <sub>max</sub> (à A2/W35)*	-	3.9 / 93 kW (38 W/m²)	-
Puissance de chauffage urbain	150 kW (61 W/m²)	-	70 kW (29 W/m²)
Volume de stockage pour ECS / Ch.	2500 l / -	2500 l / 3500 l	2500 l / -
Demande d’électricité (kWh/m²a)**	-	19	-
Demande d’énergie du réseau de chauffage urbain (kWh/m²a)	122	-	65

\* données provenant de fiches techniques de pompes à chaleur réelles.

\*\* Demande d’électricité du système de chauffage (pompes à chaleur + pompes de circulation)



Le bâtiment (entouré en bleu) est situé à côté d’un réseau de chauffage urbain existant. Pour cette raison, il a été décidé de considérer le chauffage urbain comme une variante de chauffage possible pour le bâtiment analysé. Toutes les hypothèses (par exemple, les températures, les tarifs, etc.) sont basées sur les données disponibles sur le site web du fournisseur d’énergie.



Un aspect crucial pour la variante « PaC-Air » est le positionnement de l’aéroréfrigérant pour la pompe à chaleur. En raison de la structure du toit et de la position du bâtiment, l’installation extérieure ou le positionnement de l’unité sur le toit n’est pas possible. En collaboration avec les partenaires CVC, il a été décidé d’installer le composant à l’intérieur de la pièce de la cave où se trouve le réservoir d’huile (point rouge). Une telle solution a déjà été installée dans des bâtiments similaires et représente la meilleure option pour le bâtiment analysé.

### Hypothèses

- Subventions financières non prises en compte ;
- Les frais de remplacement des radiateurs existants ne sont pas inclus ;
- Seule la consommation d'électricité du système de chauffage est incluse dans les coûts d'électricité ;
- Prix constant de l'électricité de 0.25 CHF/kWh ;
- 1 %/a des coûts d'invest. pour l'entretien ;
- Analyse temporelle sur 25 ans.

### Coûts d'investissement des variantes

Enveloppe du bâtiment non rénovée (système de chauffage seulement)

- ChU: 140 kCHF (57 CHF/m²)

Enveloppe du bâtiment remise à neuf (système de chauffage et enveloppe du bâtiment)

- PaC-Air: 2.7 MCHF (1092 CHF/m²)
- ChU: 2.3 MCHF (956 CHF/m²)

### Coûts de l'électricité / de l'énergie (par an)

Enveloppe du bâtiment non rénovée

- ChU: 41.8 kCHF (17 CHF/m²)

Enveloppe du bâtiment rénovée

- PaC-Air: 11.5 kCHF (5 CHF/m²)
- ChU: 22.2 kCHF (9 CHF/m²)

### Graphique radar pour la comparaison des variantes :

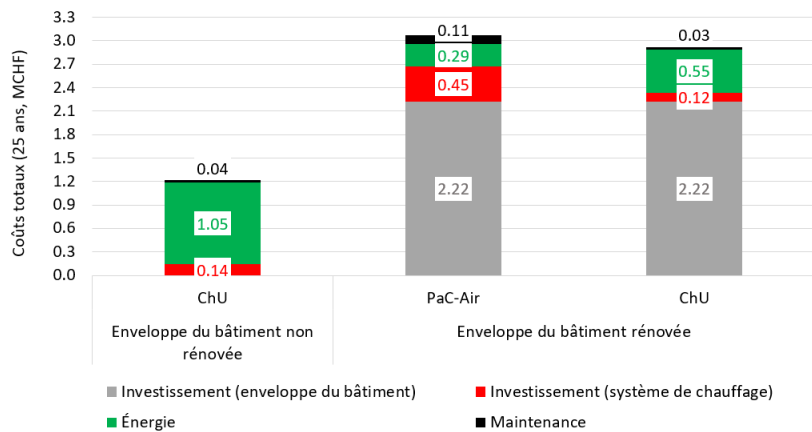
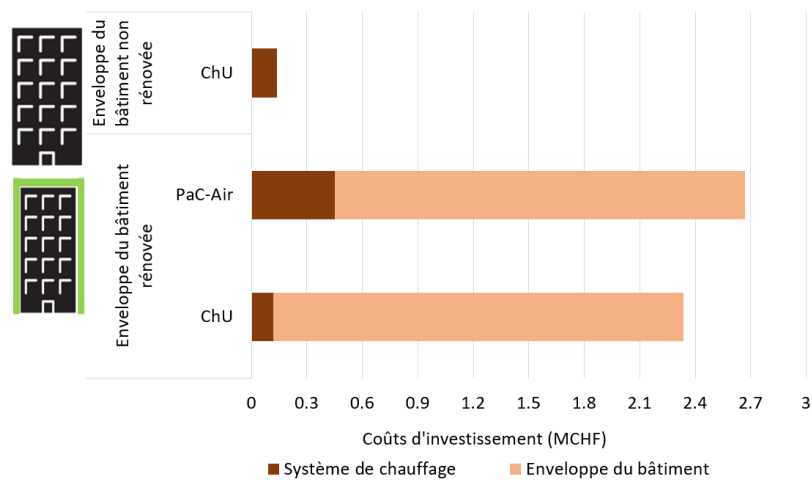
La variante « ChU » est celle dont les coûts d'investissement initiaux sont les plus bas (140 kCHF) et les coûts énergétiques les plus élevés (env. 42 kCHF). Étant donné que la variante « ChU » ne nécessite que l'installation d'un échangeur de chaleur dans la chaufferie, l'encombrement est beaucoup plus faible que la variante « PaC-Air », où des composants supplémentaires sont nécessaires (une pompe à chaleur, des ballons de stockage, un aérorefroidisseur, etc.).

## ANALYSE ÉCONOMIQUE

Pour comparer toutes les variantes analysées, une analyse économique sur 25 ans a été réalisée. Le premier graphique ci-dessous montre pour chaque variante les coûts totaux d'investissement, tandis que le deuxième graphique montre les coûts totaux (sur 25 ans) pour l'investissement, l'énergie et la maintenance.

Si l'on considère la variante « ChU », les coûts d'investissement pour le système de chauffage sont légèrement plus élevés (+16 %) en cas de non-rénovation de l'enveloppe du bâtiment. Dans le cas d'une enveloppe de bâtiment rénovée, les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment représentent environ 85 à 95 % des coûts d'investissement totaux. Il est important de souligner que les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment sont basés sur des hypothèses approximatives et sont soumis à de grandes incertitudes.

Sur 25 ans, les deux variantes « PaC-Air » et « ChU » (avec enveloppe du bâtiment rénovée) ont des coûts totaux similaires avec env. 3 MCHF.



## RECOMMANDATION

À l'emplacement du bâtiment analysé dans cette étude de cas, pour le cas non rénové, seul le raccordement à un chauffage urbain a été pris en compte pour faire passer la production de chaleur d'une énergie fossile à une énergie renouvelable. Dans le cas d'une rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment, la demande de chauffage du bâtiment et les coûts énergétiques du système de chauffage sont réduits, même si les coûts totaux sont plus élevés. Un avantage supplémentaire de la réhabilitation de l'enveloppe du bâtiment sera un confort thermique accru pour les habitants. Les coûts d'investissement supérieurs de la variante « PaC-Air » sont en partie compensés par ses coûts énergétiques inférieurs à ceux de la variante « ChU », avec des coûts totaux comparables pour les deux variantes. Le chauffage urbain se caractérise par un encombrement réduit et une faible complexité du système par rapport aux systèmes de chauffage basés sur des pompes à chaleur. De plus, la pièce où se trouve la citerne de fioul pourrait être libérée pour d'autres utilisations. Il est important de souligner que les évaluations des coûts sont fondées sur des hypothèses approximatives qui sont sujettes à de grandes incertitudes.

Annexe

Simulation de bâtiment – Intrants et hypothèses

Afin d’évaluer la demande annuelle de chauffage des locaux du bâtiment, l’outil de simulation dynamique multizone IDA ICE (Indoor Climate and Energy) a été utilisé. Les deux cas (c.-à-d. avec et sans remise à neuf de l’enveloppe du bâtiment) ont été modélisés et simulés. Les données climatiques de Pully (SIA 2028) ont été sélectionnées, tandis que les données de la norme nationale SIA 2024 ont été utilisées pour la modélisation des gains de chaleur internes du bâtiment (personnes, lumière et appareils). Une température de consigne de 22°C avec un système de chauffage « idéal » a été choisie. Un taux d’infiltration d’air constant de 0.5 h<sup>-1</sup> a été supposé pour l’ensemble du bâtiment. Étant donné qu’il n’existe pas d’informations détaillées sur la demande d’ECS pour le bâtiment, des hypothèses ont été formulées sur la base des normes nationales et de l’expérience.

Analyse économique – Intrants et hypothèses

Pour comparer les différentes variantes, une analyse économique a été effectuée. L’évaluation des coûts d’investissement (pour chaque variante de chauffage et pour la rénovation de l’enveloppe du bâtiment) a été réalisée avec les contributions des partenaires CVC et des architectes. Dans les coûts d’investissement pour le système de chauffage, le coût du remplacement des radiateurs n’a pas été pris en compte. L’analyse économique a été effectuée en supposant une durée de vie de 25 ans. Un prix constant de l’électricité de 0.25 CHF/kWh et un coût d’entretien de 1 %/an des coûts d’investissement ont été envisagés. Dans l’évaluation des coûts d’électricité, la consommation d’électricité pour l’éclairage et les appareils du bâtiment n’a pas été prise en compte. Les subventions financières (pour la rénovation de l’enveloppe du bâtiment ou l’installation de systèmes de pompes à chaleur) n’ont pas été prises en compte.

Simulation des variantes – Description et commandes

Les différentes variantes de production de chaleur ont été modélisées à l’aide du logiciel POLYSUN. Les différentes variantes, définies et modélisées en collaboration avec les partenaires CVC, sont représentées schématiquement sur la droite.

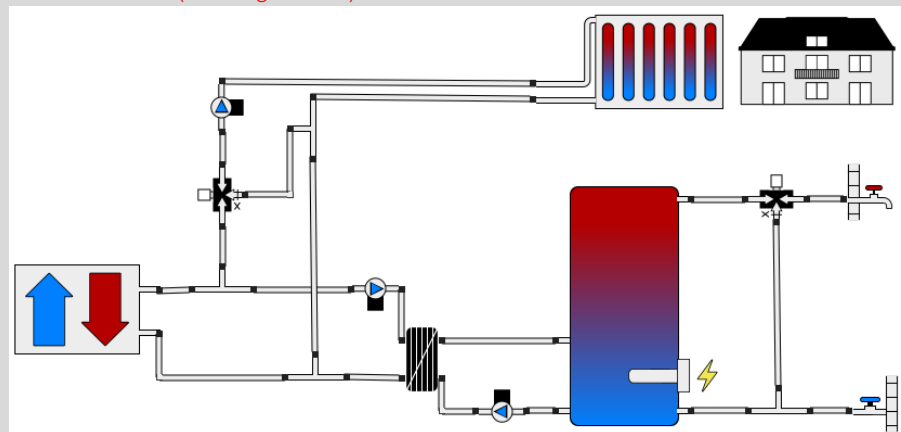
La variante « PaC-Air » est équipée de deux stocks pour l’ECS (2500 l) et le chauffage des locaux (3500 l). Le système de chauffage est équipé d’une vanne à trois voies afin d’activer la pompe à chaleur pour le chauffage des locaux ou la préparation de l’ECS (l’ECS a toujours la priorité sur le chauffage des locaux).

La température de distribution pour le chauffage des locaux est basée sur une courbe de chauffe en fonction de la température extérieure (55°C pour une température extérieure de -8°C).

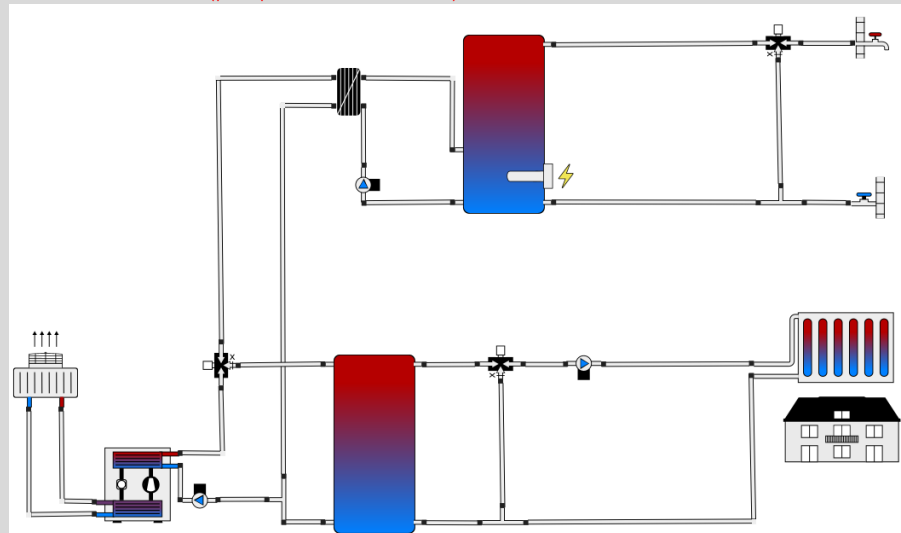
La variante « ChU » ne dispose que d’un stockage pour l’ECS d’un volume de 2500 l.

Schémas des variantes de production de chaleur

Variante « ChU » (chauffage urbain)



Variante « PaC-Air » (pompe à chaleur air-eau)





# Systèmes de pompes à chaleur pour immeubles multifamiliaux existants

## Étude de cas 2 - Immeuble d'appartements des années 1960

### CARACTÉRISTIQUES

Cet immeuble d'habitation est situé dans la banlieue de Lausanne, dans un grand espace vert, et fait partie d'un ensemble de bâtiments résidentiels des années d'après-guerre. L'immeuble compte dix-huit appartements (quatre appartements par étage) dont deux appartements situés au rez-de-chaussée. L'escalier se trouve sur le côté nord-est et est largement vitré avec du simple vitrage dans des cadres métalliques. Le grenier sous le toit en croupe est inutilisé et non chauffé. Les murs extérieurs de 30 cm d'épaisseur, recouverts d'enduit, se composent d'un support extérieur porteur en maçonnerie, d'une couche d'air et d'une coque intérieure en maçonnerie. Certaines des fenêtres de l'époque de la construction ont été conservées et se composent de cadres en bois avec double vitrage simple. Les stores enrouleurs avec caissons de stores intérieurs servent de protection solaire. Le système de production de chaleur se compose d'une chaudière au fioul qui produit de la chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. La chaleur pour le chauffage des locaux est émise dans les pièces chauffées par des radiateurs.



### APERÇU



Année de construction	1960
Emplacement	Lausanne (canton Vaud)
Surface de référence énergétique	1475 m <sup>2</sup>
Catégorie de bâtiment (SIA 380/1)	Résidentiel
Demande de chauffage des locaux (Ch.) calculée	133 MWh/a (90 kWh/m <sup>2</sup> a)
Demande d'eau chaude sanitaire (ECS) calculée	40 MWh/a (27 kWh/m <sup>2</sup> a)
Production de chaleur	Chaudière au fioul
Émission de chaleur	Radiateurs

#### Toit

Toit en croupe avec couverture en tuiles et débord de toit

#### Plafond de l'étage supérieur

Plafond hourdis

#### Encadrement de fenêtre

Pierre moulée

#### Plafond des étages

Plafond hourdis

#### Fenêtre

Cadre en bois, double vitrage

#### Protection solaire

Stores enrouleurs avec caisson intérieur

#### Mur extérieur

Maçonnerie en brique enduite, couche d'air et coque de parement intérieure (environ 30 cm d'épaisseur)

#### Espace extérieur

Loggia, dalle de béton reposant sur les murs extérieurs, parapet en maçonnerie enduite

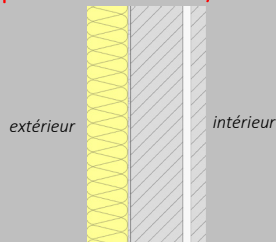
#### Plafond de la cave

Plafond hourdis

## Mur extérieur (appartements)

U avant rénovation: 0.65 W/m²K

U après rénovation: 0.16 W/m²K



Couche isolante (160 mm)

Plâtre (10 mm)

Maçonnerie en brique creuse (200 mm)

Couche d'air (30 mm)

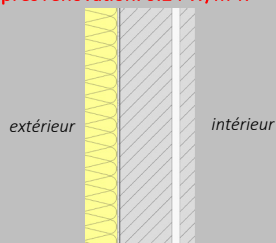
Maçonnerie en brique (60 mm)

Plâtre de gypse (7 mm)

## Mur extérieur (balcons)

U avant rénovation: 0.65 W/m²K

U après rénovation: 0.24 W/m²K



Couche isolante (100 mm)

Plâtre (10 mm)

Maçonnerie en brique creuse (200 mm)

Couche d'air (30 mm)

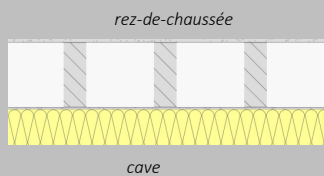
Maçonnerie en brique (60 mm)

Plâtre de gypse (7 mm)

## Plafond de la cave

U avant rénovation: 1.06 W/m²K

U après rénovation: 0.31 W/m²K



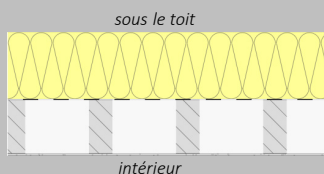
Isolation (120 mm)

Plafond hourdis avec poutres en béton (250 mm)

## Sous le toit

U avant rénovation: 0.3 W/m²K

U après rénovation: 0.11 W/m²K



Isolation (260 mm)

Pare-vapeur

Isolation 100 mm (retirée)

Plafond hourdis avec poutres en béton (210 mm)

Plâtre de gypse (7 mm)

## Fenêtres des appartements

U<sub>g</sub> avant rénovation: 1.1 W/m²K

U<sub>f</sub> avant rénovation: 1.9 W/m²K

g avant rénovation: 0.75

U<sub>g</sub> après rénovation: 1.0 W/m²K

U<sub>f</sub> après rénovation: 1.1 W/m²K

g après rénovation: 0.6

## ENVELOPPE DU BÂTIMENT - Stratégie de rénovation

L'architecture du bâtiment permet une isolation par l'extérieur tout en conservant ses caractéristiques. Les cadres en pierre artificielle caractéristiques des fenêtres sont remplacés par des éléments isolés en béton de fibre de verre.

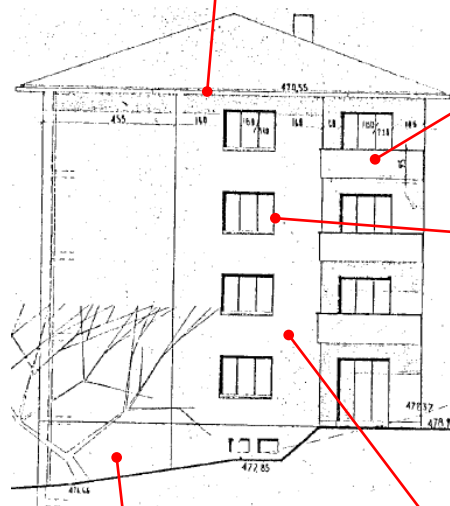
La couche d'isolation existante du toit sera retirée et remplacée par une nouvelle couche d'isolation de 260 mm pour une valeur U totale après rénovation de 0.11 W/m²K. Le mur extérieur des appartements sera équipé d'une couche d'isolation supplémentaire de 160 mm à l'extérieur, tandis que les murs extérieurs des balcons seront isolés à l'extérieur avec une couche de 100 mm. Toutes les fenêtres seront remplacées par des fenêtres à double vitrage avec cadre en bois.

Le rez-de-chaussée du bâtiment étant occupé par des locaux techniques et des appartements, le plafond de la cave sera isolé avec une couche de 120 mm pour atteindre une valeur U de 0.31 W/m²K.

Sous le toit\*



Balcons\*



Fenêtres des appartements\*



Étage cave / appartements au rez-de-chaussée\*



Mur extérieur\*

\* Situation actuelle (avant rénovation)



CONCEPT DE PRODUCTION DE CHALEUR - Définition des variantes

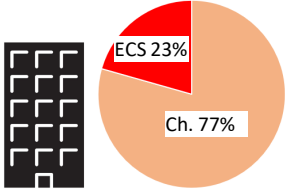
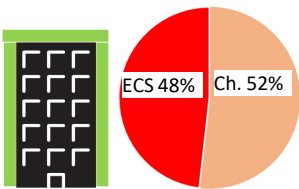
Afin de réduire les émissions directes de CO<sub>2</sub> du système de production de chaleur existant pour le chauffage des locaux (Ch.) et la préparation de l’eau chaude sanitaire (ECS), deux variantes ont été étudiées :

- Pompe à chaleur air-eau (PaC-Air) : Une pompe à chaleur air-eau assure la production d’ECS et le chauffage ;
- Pompe à chaleur sol-eau (PaC-Geo) : Une pompe à chaleur sur sondes géothermiques assure la production d’ECS et le chauffage.

Les deux variantes ont été prises en compte pour les deux statuts de l’enveloppe du bâtiment (c.-à-d. non remis à neuf et remis à neuf).

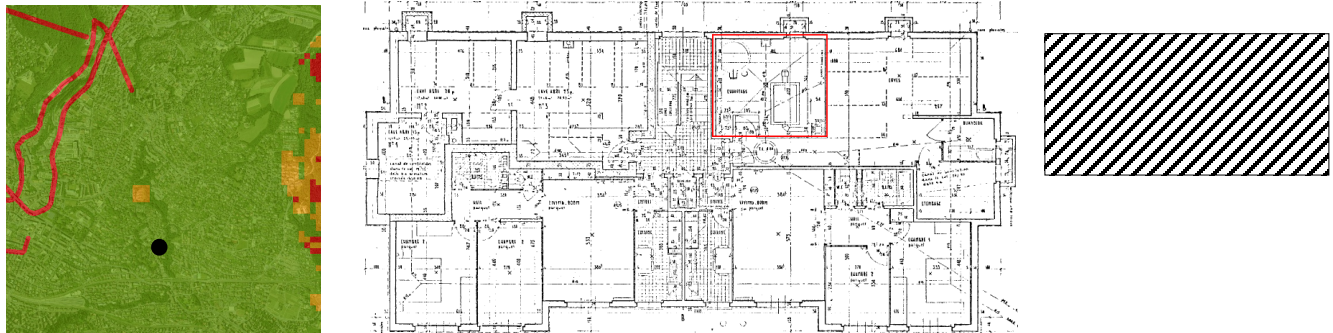
Pour toutes les variantes, le remplacement des radiateurs existants par de nouveaux radiateurs est envisagé et la température de distribution pour le chauffage a été réglée en fonction de l’état de l’enveloppe du bâtiment.

Étant donné qu’il n’y a pas de réseau de chauffage urbain dans cette zone, cette option n’a pas été considérée comme une variante dans cette analyse. Des détails sur les différentes variantes de production de chaleur sont décrits dans l’annexe. Le choix des variantes est le résultat d’une discussion préalable avec les partenaires CVC.

	Enveloppe du bâtiment non-rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 90 / 27		Enveloppe du bâtiment rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 29 / 27	
				
Variante de production de chaleur	PaC-Air	PaC-Geo	PaC-Air	PaC-Geo
COP <sub>nom</sub> / Capacité <sub>nom</sub> pompe à chaleur*	4.2 / 2 x 39 kW (à A2/W35)	4.3 / 67 kW (à B0/W35)	4.2 / 30 kW (à A2/W35)	4.3 / 36 kW (à B0/W35)
Sondes géothermiques	-	8 x 240 m	-	4 x 240 m
Volume de stockage pour ECS / Ch.	1000 l / 2000 l	1000 l / 2000 l	1000 l / 1500 l	1000 l / 1500 l
Demande d’électricité (kWh/m²a)**	43	36	18	14

\* données issues de fiches techniques de pompes à chaleur réelles proposées par un partenaire CVC

\*\* Demande d’électricité du système de chauffage (pompes à chaleur + pompes de circulation)



Le bâtiment (point noir) est situé dans une zone (zone verte sur la photo) où le forage au sol est autorisé. Pour cette raison, il a été décidé de considérer les pompes à chaleur géothermiques comme une variante de production de chaleur possible.

Un aspect crucial pour les variantes « PaC-Air » et « PaC-Geo » est le positionnement de l’aéroréfrigérant de la pompe à chaleur (pour « PaC-Air ») et des sondes géothermiques (pour « PaC-Geo »). En collaboration avec le partenaire CVC, il a été décidé d’installer ces composants à l’extérieur (zone hachurée) dans un espace vert où il y a suffisamment d’espace disponible pour ces composants. De cette façon, les unités extérieures se trouveront à côté du local technique où les unités internes seront installées dans la cave (encadré rouge).

## Hypothèses

- Subventions financières non prises en compte ;
- Les frais de remplacement des radiateurs existants ne sont pas inclus ;
- Seule la consommation d'électricité du système de chauffage est incluse dans les coûts d'électricité ;
- Prix constant de l'électricité de 0.25 CHF/kWh ;
- 1 %/a des coûts d'invest. pour l'entretien ;
- Durée de vie de la pompe à chaleur : 25 ans ;
- Analyse temporelle sur 25 ans.

## Coûts d'investissement des variantes

Enveloppe du bâtiment non rénovée (système de chauffage seulement)

- PaC-Air: 270 kCHF (183 CHF/m<sup>2</sup>)
- PaC-Geo: 390 kCHF (264 CHF/m<sup>2</sup>)

Enveloppe du bâtiment remise à neuf (système de chauffage et enveloppe du bâtiment)

- PaC-Air: 1.52 MCHF (1030 CHF/m<sup>2</sup>)
- PaC-Geo: 1.60 MCHF (1085 CHF/m<sup>2</sup>)

## Coûts de l'électricité / de l'énergie (par an)

Enveloppe du bâtiment non rénovée

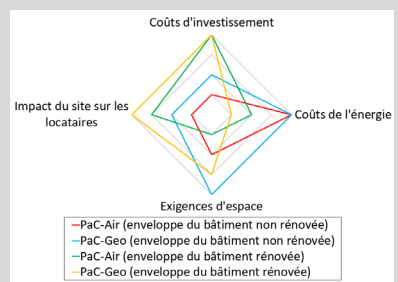
- PaC-Air: 16 kCHF (11 CHF/m<sup>2</sup>)
- PaC-Geo: 13 kCHF (9 CHF/m<sup>2</sup>)

Enveloppe du bâtiment rénovée

- PaC-Air: 6 kCHF (4 CHF/m<sup>2</sup>)
- PaC-Geo: 5 kCHF (3 CHF/m<sup>2</sup>)

## Graphique radar pour la comparaison des variantes :

La variante « PaC-Air » (pour enveloppe du bâtiment non rénovée) est la variante avec les coûts d'investissement initiaux les plus bas et les coûts énergétiques les plus élevés. Étant donné que les variantes « PaC-Air » ne nécessitent que l'installation des unités externes à l'extérieur du bâtiment, l'encombrement est inférieur à celui de la variante « PaC-Geo », où des sondes géo. sont nécessaires.



## RECOMMANDATION

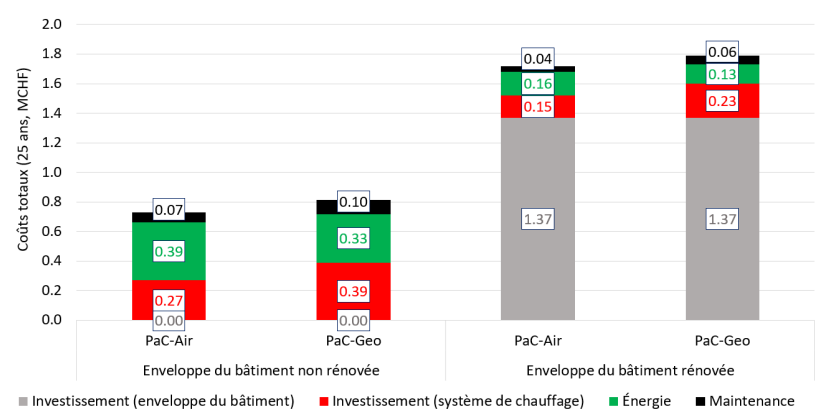
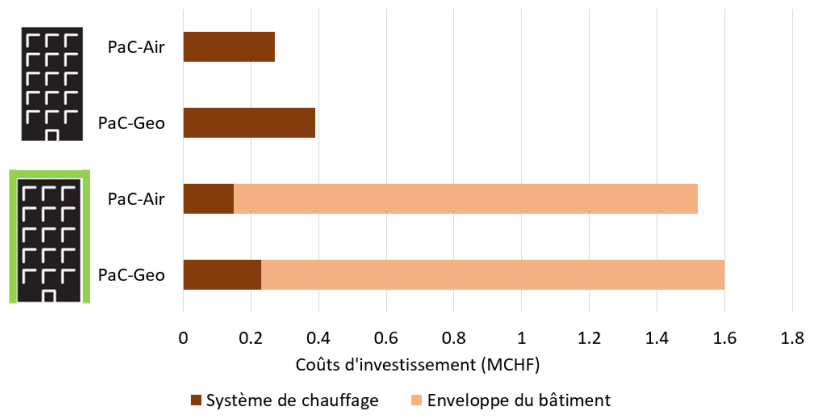
Que l'enveloppe du bâtiment soit rénovée ou non, les variantes « PaC-Air » et « PaC-Geo » ont des coûts totaux comparables. Dans le cas d'une rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment, la demande de chauffage du bâtiment et les coûts énergétiques du système de chauffage sont réduits, même si les coûts totaux sont plus élevés. D'autres avantages de la rénovation de l'enveloppe du bâtiment seront un confort thermique accru pour les habitants et une diminution de la demande d'électricité de la pompe à chaleur pendant l'hiver, lorsque les prix de l'électricité devraient être plus élevés à l'avenir. Les coûts d'investissement plus élevés de la variante « PaC-Geo » sont en partie compensés par ses coûts énergétiques inférieurs à ceux de la variante « PaC-Air », avec des coûts totaux comparables pour les deux variantes. Si l'on tient compte de la charge du réseau électrique et des coûts de l'électricité achetée, le COP plus élevé pour la variante « PaC-Geo » apporte d'autres avantages par rapport à la variante « PaC-Air », car la demande d'électricité est plus faible en hiver. Cependant, la variante « PaC-Air » se caractérise par un encombrement réduit et une faible complexité du système par rapport au système de chauffage basé sur une pompe à chaleur géothermique. Il est important de souligner que les évaluations des coûts sont fondées sur des hypothèses approximatives qui sont sujettes à de grandes incertitudes.

## ANALYSE ÉCONOMIQUE

Pour comparer toutes les variantes analysées, une analyse économique sur 25 ans a été réalisée. Le premier graphique ci-dessous montre pour chaque variante les coûts totaux d'investissement, tandis que le deuxième graphique montre les coûts totaux (sur 25 ans) pour l'investissement, l'énergie et la maintenance.

Si l'enveloppe du bâtiment n'est pas rénovée, les coûts d'investissement pour le système de chauffage sont plus élevés (environ 40 % plus élevés) par rapport au cas où l'enveloppe du bâtiment est rénovée. Dans le cas d'une enveloppe de bâtiment rénovée, les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment représentent environ 85 à 90 % des coûts d'investissement totaux. Les coûts d'investissement pour la remise à neuf de l'enveloppe du bâtiment sont basés sur des hypothèses approximatives et sont soumis à de grandes incertitudes.

Sur 25 ans, les variantes « PaC-Air » et « PaC-Geo » ont des coûts totaux comparables avec environ 0.8 MCHF (si l'enveloppe du bâtiment n'est pas rénovée) et 1.8 MCHF (avec enveloppe du bâtiment rénovée).



# Annexe

## Simulation de bâtiment – Intrants et hypothèses

Pour évaluer la demande annuelle de chauffage des locaux du bâtiment, l'outil de simulation dynamique multizone IDA ICE (Indoor Climate and Energy) a été utilisé. Les deux cas (c.-à-d. avec et sans remise à neuf de l'enveloppe du bâtiment) ont été modélisés et simulés. Les données climatiques de Pully (SIA 2028) ont été sélectionnées, tandis que les données de la norme nationale SIA 2024 ont été utilisées pour la modélisation des gains de chaleur internes du bâtiment (personnes, lumière et appareils). Une température de consigne de 22°C avec un système de chauffage « idéal » a été choisie. Un taux d'infiltration d'air constant de 0.5 h<sup>-1</sup> a été supposé pour l'ensemble du bâtiment. Étant donné qu'il n'existe pas d'informations détaillées sur la demande d'ECS pour le bâtiment, des hypothèses ont été formulées sur la base des normes nationales et de l'expérience.

## Analyse économique – Intrants et hypothèses

Pour comparer les différentes variantes, une analyse économique a été effectuée. L'évaluation des coûts d'investissement (pour chaque variante de chauffage et pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment) a été réalisée avec les contributions des partenaires CVC et des architectes. Dans les coûts d'investissement pour le système de chauffage, le coût de remplacement des radiateurs n'a pas été pris en compte. L'analyse économique a été effectuée en supposant une durée de vie de 25 ans. Un prix constant de l'électricité de 0.25 CHF/kWh et un coût d'entretien de 1 %/an des coûts d'investissement ont été envisagés. Dans l'évaluation des coûts d'électricité, la consommation d'électricité pour l'éclairage et les appareils du bâtiment n'a pas été prise en compte. Les subventions financières (pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment ou l'installation de systèmes de pompes à chaleur) n'ont pas été prises en compte.

## Simulation des variantes – Description et commandes

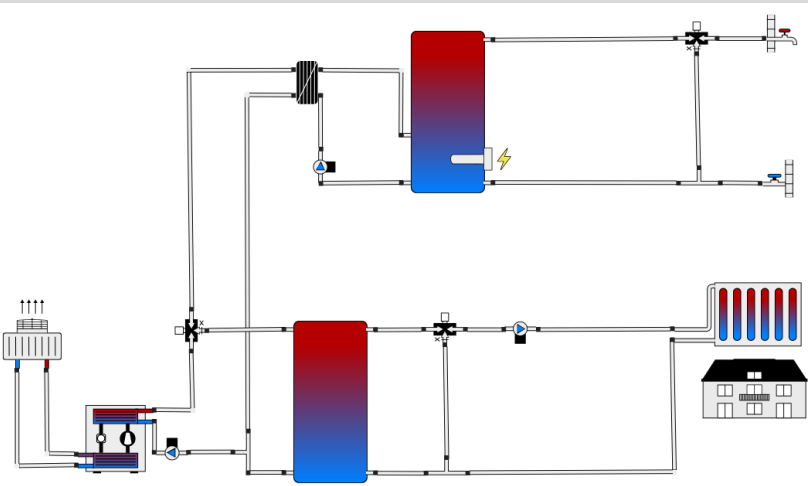
Les différentes variantes de production de chaleur ont été modélisées dans le logiciel POLYSUN. Les différentes variantes, définies et modélisées en collaboration avec les partenaires CVC, sont représentées schématiquement sur la droite.

Le système est équipé d'un stockage pour ECS de 1000 l et d'un second stockage pour le chauffage des locaux de 2000 l (1500 l en cas d'enveloppe du bâtiment rénovée). Le système de chauffage est équipé d'une vanne à trois voies pour activer la pompe à chaleur pour le chauffage des locaux ou la préparation de l'ECS (l'ECS a toujours la priorité sur le chauffage des locaux).

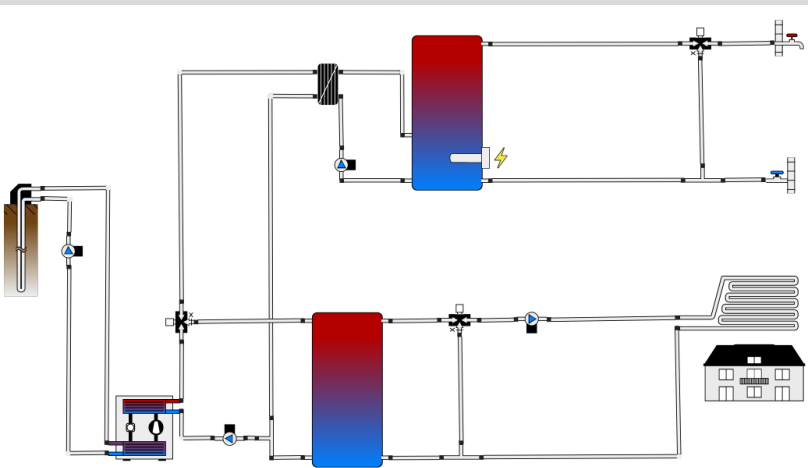
La température de distribution pour le chauffage des locaux est basée sur une courbe de chauffe en fonction de la température extérieure (40°C pour une température extérieure de -8 °C en cas d'enveloppe du bâtiment rénovée). La température de distribution est augmentée de 20 K en cas d'enveloppe du bâtiment non rénovée.

### Schémas des variantes de production de chaleur

Variante « PaC-Air » (pompe à chaleur air-eau)



Variante « PaC-Geo » (pompe à chaleur sol-eau)





## Systèmes de pompes à chaleur pour immeubles multifamiliaux existants

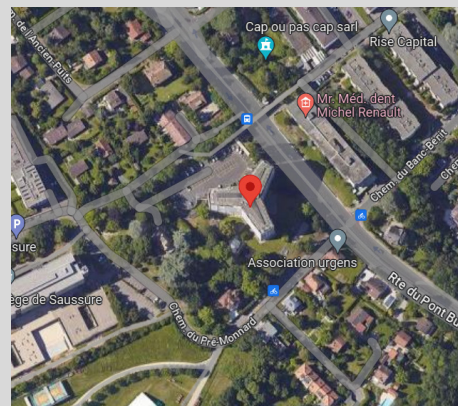
## Étude de cas 3 - Immeubles de grande hauteur des années 1960

## CARACTÉRISTIQUES

Cet immeuble situé dans la commune de Lancy (canton de Genève) est une tour d'habitation des années 1960, haute de 41 m et caractérisée par une forme atypique et un usage mixte. Il compte 14 bureaux (aux deux premiers étages) et 105 appartements (dans les 8 étages supérieurs). Une bibliothèque publique est située au rez-de-chaussée. Les murs-rideaux (fenêtres et parapets) en construction métallique du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>e</sup> étage ont déjà été remplacés ces dernières années, ainsi que la façade vitrée de la bibliothèque. Le système de production de chaleur, installé au sous-sol du bâtiment, se compose de deux chaudières à gaz à condensation (2x 609 kW) qui produisent la chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. Les deux chaudières sont reliées à un grand réservoir de stockage. À partir du ballon de stockage, la chaleur est distribuée à l'ensemble du bâtiment par l'intermédiaire de trois répartiteurs principaux. Le système est équipé de deux ballons supplémentaires pour l'eau chaude sanitaire (2x 1 m<sup>3</sup>). La chaleur pour le chauffage des locaux est émise dans les pièces chauffées par des radiateurs monotubes installés sous les fenêtres.



APERCU



Année de construction	1963
Emplacement	Lancy (canton Genève)
Surface de référence énergétique	13860 m <sup>2</sup>
Catégorie de bâtiment (SIA 380/1)	Résidentiel (86%), Administration (14%)
Demande de chauffage des locaux (Ch.) calculée	1005 MWh/a (72 kWh/m <sup>2</sup> a)
Demande d'eau chaude sanitaire (ECS) calculée	261 MWh/a (19 kWh/m <sup>2</sup> a)
Production de chaleur	Chaudière gaz à condensation
Émission de chaleur	Radiateurs

## Toit

Toit plat en béton avec isolation, étanchéité au bitume, recouvert de gravier

## Attique

Mur extérieur

Fenêtres en bois-métal et garde-corps de fenêtre en béton préfabriqué.

## Appartements

Huit étages sont alloués aux appartements

## Bureaux

**Bureau**  
Premier et deuxièmes étages occupés par des bureaux

### Usage mixte

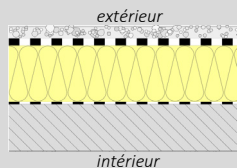
Bibliothèque publique située au rez-de-chaussée



## Toit

U avant rénovation: 0.72 W/m²K

U après rénovation: 0.14 W/m²K

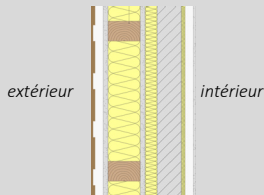


Gravier (50 mm)  
 Etanchéité (30 mm)  
 Isolation EPS (240 mm)  
 Pare-vapeur (10 mm)  
 Béton (200 mm)  
 Plâtre (5 mm)

## Mur extérieur

U avant rénovation: 0.98 W/m²K

U après rénovation: 0.14 W/m²K

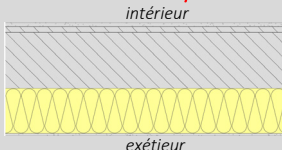


Bardage (20 mm)  
 Sous-structure (40 mm)  
 Pare-vent (0 mm)  
 Fermacell (25 mm)  
 Isolation laine minérale / structure bois (160 mm)  
 Fermacell (25 mm)  
 Isolation laine minérale (60 mm)  
 Béton (120 mm)  
 Isolation laine minérale (20 mm)  
 Air (40 mm)  
 Plâtre (15 mm)

## Sol contre l'environnement

U avant rénovation: 2.10 W/m²K

U après rénovation: 0.18 W/m²K



Parquet (15 mm)  
 Chape en ciment (20 mm)  
 Béton (200 mm)  
 Isolation laine minérale (160 mm)  
 Plâtre (10 mm)

## Sol contre non chauffé

U avant rénovation: 2.10 W/m²K

U après rénovation: 0.18 W/m²K



Tapis (10 mm)  
 Chape en ciment (60 mm)  
 Isolation EPS (40 mm)  
 Béton (200 mm)  
 Isolation laine minérale (120 mm)  
 Plâtre (10 mm)

## Fenêtres des appartements

U<sub>w</sub> avant la rénovation: 2.9 W/m²K

g avant la rénovation: 0.8

U<sub>w</sub> après rénovation: 1.1 W/m²K

g après rénovation: 0.5

# ENVELOPPE DU BÂTIMENT - Stratégie de rénovation

Au cours des dernières années, seuls les deux premiers étages ont été rénovés avec le remplacement du revêtement du mur-rideau. Afin de réduire la demande énergétique du bâtiment, le toit, les garde-corps et les murs des niveaux 3 à 8 ainsi que les sols contre des pièces non chauffées ou l'extérieur doivent être rénovés. La structure existante de la toiture sera isolée en outre avec 240 mm d'EPS (protégé par une couche d'étanchéité) et recouverte de gravier pour une valeur U totale après rénovation de 0.14 W/m²K. Le mur extérieur sera amélioré avec un module préfabriqué supplémentaire composé d'une structure en bois et d'une isolation totale d'environ 220 mm de laine minérale, encapsulée dans des panneaux de fibres de gypse Fermacell pour l'ignifugation, et intégrant de nouvelles fenêtres avec une valeur U de 1.1 W/m²K. Les sols contre des pièces non chauffées ou l'extérieur seront en outre isolés avec de la laine minérale (120 mm et 160 mm, respectivement) pour atteindre une valeur U de 0.18 W/m²K. Les constructions de l'enveloppe avant (uniquement les couches en noir) et après la rénovation (toutes les couches) sont indiquées dans la colonne de gauche.

Toit\*



Mur extérieur des appartements\*



Fenêtres des appartements\*



Plafond contre non chauffé\*



Sol contre l'environnement\*

\*Situation actuelle (avant rénovation)

CONCEPT DE PRODUCTION DE CHALEUR - Définition des variantes

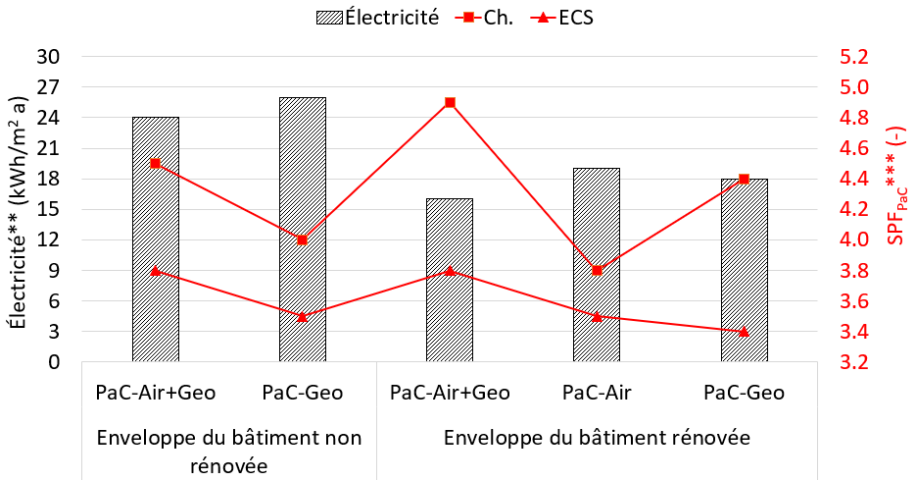
Afin de réduire les émissions directes de CO<sub>2</sub> du système de production de chaleur existant pour le chauffage des locaux (Ch.) et la préparation de l’eau chaude sanitaire (ECS), trois variantes ont été étudiées :

- Pompe à chaleur air+sol eau (PaC-Air+Geo) : Le chauffage et l’ECS sont assurés par deux pompes à chaleur distinctes. En tant que source de chaleur, un aérorefroidisseur est installé en série avec les sondes géothermiques. L’aérorefroidisseur peut servir en été pour la régénération des sondes géothermiques ;
- Pompe à chaleur air-eau (PaC-Air) : Le chauffage et l’ECS sont assurés par deux pompes à chaleur air-eau ;
- Pompe à chaleur sol-eau (PaC-Geo) : Le chauffage et l’ECS sont assurés par deux pompes à chaleur sol-eau.

Les deux variantes « PaC-Air+Geo » et « PaC-Geo » ont été définies pour deux cas : l’enveloppe du bâtiment non rénovée et la remise à neuf selon la stratégie de rénovation. La variante « PaC-Air » n’a été envisagée qu’en cas de rénovation de l’enveloppe du bâtiment. Dans toutes les variantes, le remplacement des radiateurs existants par de nouveaux radiateurs a été envisagé et la température de l’eau d’alimentation a été réglée en fonction de l’état de l’enveloppe du bâtiment. Pour toutes les variantes, une pompe à chaleur utilisant du CO<sub>2</sub> (R744) comme réfrigérant a été envisagée. Ce réfrigérant présente de nombreux aspects positifs (faible toxicité, réfrigérant naturel, GWP = 1), mais la température de retour (c’est-à-dire la température d’entrée dans le condenseur) doit être suffisamment basse (égale ou inférieure à 35°C) pour que la pompe à chaleur puisse fonctionner efficacement.

Le chauffage urbain n’a pas été considéré comme une variante de production de chaleur dans cette analyse, car situé en dehors du périmètre de ce projet. Les détails des différentes variantes de production de chaleur sont décrits en annexe.

	Enveloppe du bâtiment non rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 72 / 19		Enveloppe du bâtiment rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 42 / 19		
Variante de production de chaleur	PaC-Air+Geo	PaC-Geo	PaC-Air+Geo	PaC-Air	PaC-Geo
COP pompe à chaleur*	3.0 (à B0/W60)	3.0 (à B0/W60)	3.3 (à B0/W55)	2.2 (à A-4/W55)	3.3 (à B0/W55)
Capacité de la pompe à chaleur*	2 x 260 kW (37 W/m²)	2 x 260 kW (37 W/m²)	2 x 175 kW (25 W/m²)	2 x 175 kW (25 W/m²)	2 x 175 kW (25 W/m²)
Sondes géothermiques	40 x 300 m (0.9 m/m²)	100 x 300m (2.2 m/m²)	30 x 300 m (0.6 m/m²)	-	50 x 300 m (1.1 m/m²)
Aérorefroidisseur	500 kW (36 W/m²)	-	240 kW (17 W/m²)	240 kW (17 W/m²)	-
Demande d’électricité (kWh/m²a)**	24	26	16	19	18



\* données provenant de fiches techniques de pompes à chaleur réelles

\*\* Demande d’électricité du système de chauffage (pompes à chaleur + pompes de circulation)

\*\*\* Facteur de performance saisonnier de la pompe à chaleur ( $Q_{cond}/Q_{el,comp}$ )



Hypothèses

- Subventions financières non prises en compte ;
- Les coûts de remplacement des radiateurs existants sont inclus dans l'analyse (541 kCHF) ;
- Seule la consommation d'électricité du système de chauffage est incluse dans les coûts d'électricité ;
- Durée de vie de la pompe à chaleur : 25 ans
- Prix constant de l'électricité de 0.25 CHF/kWh ;
- 1 %/a des coûts d'invest. pour l'entretien;
- Analyse temporelle sur 25 ans.

Coûts d'investissement des variantes

Enveloppe du bâtiment non rénovée (système de chauffage seulement)

- PaC-Air+Geo: 2.9 MCHF (212 CHF/m²)
- PaC-Geo: 4.2 MCHF (306 CHF/m²)

Enveloppe du bâtiment remise à neuf (système de chauffage et enveloppe du bâtiment)

- PaC-Air+Geo: 13.3 MCHF (962 CHF/m²)
- PaC-Air: 12.7 MCHF (919 CHF/m²)
- PaC-Geo: 13.6 MCHF (984 CHF/m²)

Coûts de l'électricité (par an)

Enveloppe du bâtiment non rénovée

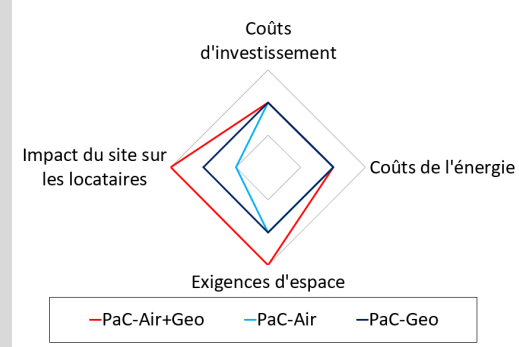
- PaC-Air+Geo: 82 kCHF (5.9 CHF/m²)
- PaC-Geo: 89 kCHF (6.4 CHF/m²)

Enveloppe du bâtiment rénovée

- PaC-Air+Geo: 56 kCHF (4.1 CHF/m²)
- PaC-Air: 65 kCHF (4.7 CHF/m²)
- PaC-Geo: 62 kCHF (4.4 CHF/m²)

Graphique radar pour la comparaison des variantes (Cas : enveloppe du bâtiment rénovée):

Étant donné que les coûts sont soumis à de grandes incertitudes et que la différence de coûts est inférieure à 15 %, les trois variantes ont la même échelle de points dans le graphique radar. La variante « PaC-Air » a le moins d'impact sur le site sur les locataires par rapport aux deux autres variantes puisqu'il n'est pas nécessaire de forer des sondes.



RECOMMANDATION

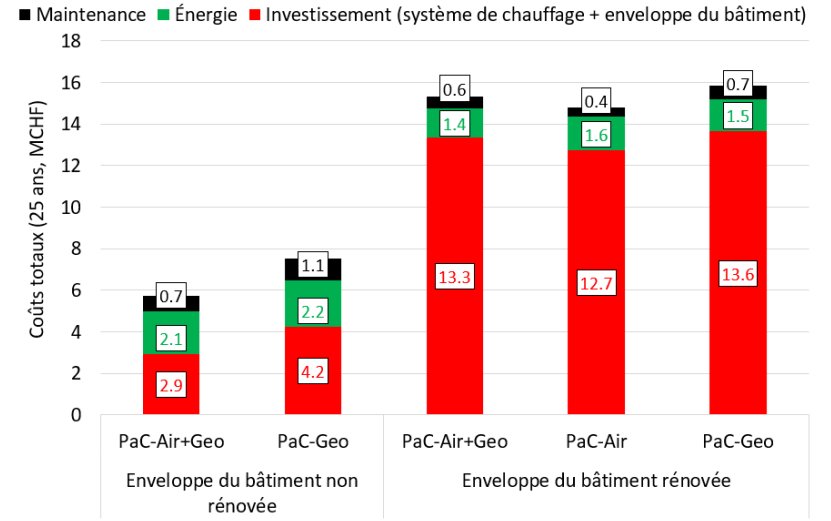
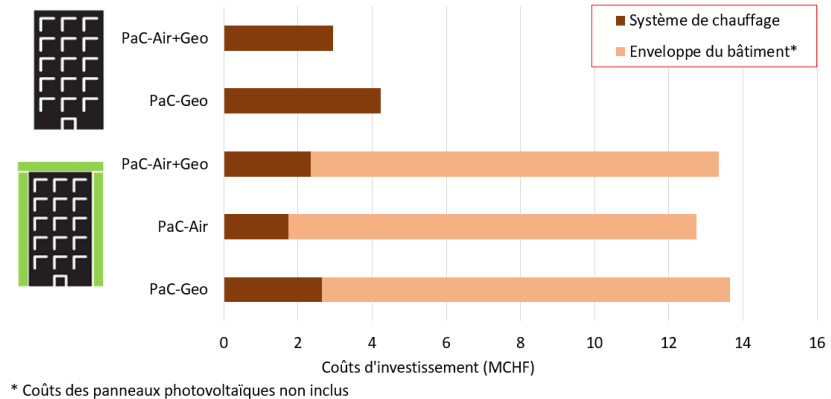
Dans le cas où l'enveloppe du bâtiment n'est pas rénovée, la variante « PaC-Air+Geo » représente l'option financière la plus attrayante, comme le montrent les schémas ci-dessus. En cas de rénovation de l'enveloppe du bâtiment, les coûts totaux estimés sur 25 ans sont très similaires pour les trois variantes analysées. Dans le cas d'une rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment, la demande de chaleur du bâtiment et les coûts énergétiques du système de chauffage sont réduits, même si les coûts totaux sont plus élevés. D'autres avantages de la rénovation de l'enveloppe du bâtiment seront un confort thermique accru pour les habitants et une diminution de la demande d'électricité de la pompe à chaleur pendant l'hiver, lorsque les prix de l'électricité devraient être plus élevés à l'avenir. Il est important de souligner que les évaluations des coûts sont fondées sur des hypothèses approximatives qui sont sujettes à de grandes incertitudes.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Afin de comparer toutes les variantes analysées, une analyse économique sur 25 ans a été réalisée. Le premier graphique ci-dessous montre les coûts d'investissement totaux pour chaque variante, tandis que le deuxième graphique montre les coûts totaux (sur 25 ans) pour l'investissement, l'énergie et la maintenance.

Comme prévu, si l'enveloppe du bâtiment n'est pas rénovée, les coûts d'investissement pour le système de chauffage sont plus élevés en raison des pompes à chaleur plus grandes et du plus grand nombre de sondes géothermiques nécessaires. Dans le cas de l'enveloppe du bâtiment rénovée, les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment représentent environ 80 à 85 % des coûts d'investissement totaux. Il est important de souligner qu'ici, les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment sont basés sur des hypothèses approximatives et sont soumis à de grandes incertitudes.

Sur 25 ans, la variante « PaC-Air+Geo » (en cas d'enveloppe de bâtiment non rénovée) a les coûts totaux les plus bas avec 5.7 MCHF.



Simulation de bâtiment – Intrants et hypothèses

Pour évaluer la demande annuelle de chauffage des locaux du bâtiment, l’outil de simulation dynamique multizone IDA ICE (Indoor Climate and Energy) a été utilisé. Les deux cas (c.-à-d. avec et sans remise à neuf de l’enveloppe du bâtiment) ont été modélisés et simulés. Les données climatiques de Genève-Cointrin (SIA 2028) ont été sélectionnées, tandis que les données de la norme nationale SIA 2024 ont été utilisées pour la modélisation des gains de chaleur internes du bâtiment (personnes, lumière et appareils). Une température de consigne de 22°C avec un système de chauffage « idéal » a été choisie. Un taux d’infiltration d’air constant de 0.5 h<sup>-1</sup> a été supposé pour l’ensemble du bâtiment. Étant donné qu’il n’existe pas d’informations détaillées sur la demande d’ECS pour le bâtiment, des hypothèses ont été formulées sur la base des normes nationales et de l’expérience.

Simulation des variantes – Description et commandes

Les variantes de production de chaleur ont été modélisées avec le logiciel POLYSUN, en collaboration avec les partenaires CVC. En raison des limites de la modélisation, des simplifications ont été apportées, notamment le nombre de pompes à chaleur (une dans le modèle au lieu de deux en réalité) et le nombre de stockages pour l’ECS (un dans le modèle au lieu de deux). Les pompes à chaleur sont également modélisées avec du CO<sub>2</sub> comme réfrigérant.

Dans les trois variantes simulées, une pompe à chaleur fournit de la chaleur pour le chauffage et l’ECS. Une pompe à chaleur de 10 kW couvre les pertes de circulation. Le système est équipé de deux accumulateurs (ECS : 8 m<sup>3</sup>, chauffage : 6 m<sup>3</sup>). La variante « PaC-Air+Geo » inclut un aérorefroidisseur pour la régénération des sondes géothermiques. Chaque accumulateur possède des capteurs pour contrôler l’allumage et l’arrêt des pompes à chaleur. La température de distribution pour le chauffage est de 55°C par -5 °C extérieur, augmentée de 10 K si l’enveloppe du bâtiment n’est pas rénovée.

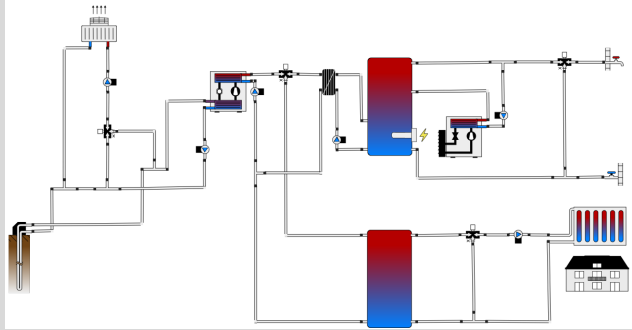
Analyse économique – Intrants et hypothèses

Pour comparer les différentes variantes, une analyse économique a été effectuée. L’évaluation des coûts d’investissement (pour chaque variante de chauffage et pour la rénovation de l’enveloppe du bâtiment) a été réalisée avec les contributions des partenaires CVC et des architectes. L’analyse économique a été effectuée en supposant une durée de vie de 25 ans. Un prix constant de l’électricité de 0.25 CHF/kWh et un coût d’entretien de 1 %/a des coûts d’investissement ont été envisagés. Dans l’évaluation des coûts d’électricité, la consommation d’électricité pour l’éclairage et les appareils du bâtiment n’a pas été prise en compte.

Les subventions financières (pour la rénovation de l’enveloppe du bâtiment ou l’installation de systèmes de pompes à chaleur) n’ont pas été prises en compte.

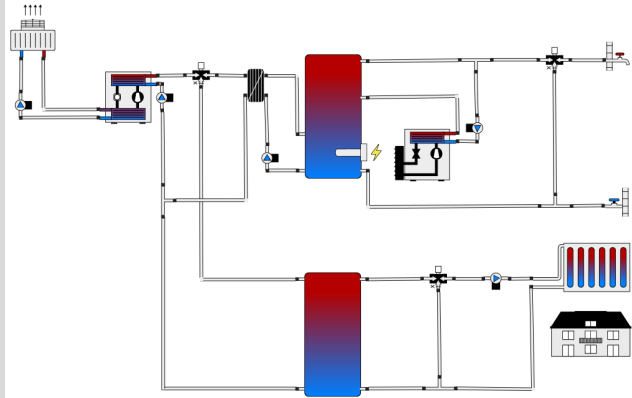
Schémas des variantes de production de chaleur

Variante « PaC-Air+Geo » (pompe à chaleur air+sol - eau)

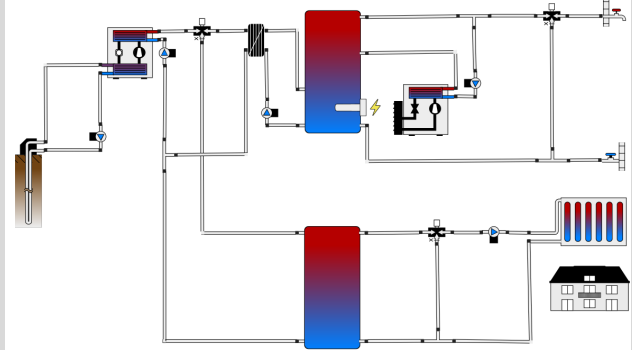


Dans cette variante, la chaleur peut être extraite de l’air ambiant (avec un aérorefroidisseur) et/ou du sol. Les deux principaux avantages d’un tel système sont la réduction des coûts d’investissement pour les sondes au sol et la possibilité d’utiliser l’air ambiant comme source de chaleur, surtout en été lorsque la température extérieure est plus élevée. De plus, l’aérorefroidisseur peut être utilisé pour régénérer les sondes géothermiques. Lorsque la température ambiante est supérieure à la température de sortie de la saumure du champ de sonde au sol, la boucle de régénération peut être activée et la chaleur de l’air peut être libérée dans les sondes au sol.

Variante « PaC-Air » (pompe à chaleur air-eau)



Variante « PaC-Geo » (pompe à chaleur sol-eau)



En raison de l’extraction de chaleur pendant la saison hivernale, la température du sol diminue au fil des ans. Selon la norme nationale SIA 384/6, une simulation de 50 ans est nécessaire pour calculer la température minimale moyenne du fluide caloporteur (qui doit être supérieure à -1,5 °C). Grâce au logiciel POLYSUN, il a été possible de dimensionner la longueur et le nombre de sondes de sol pour les variantes « PaC-Air+Geo » et « PaC-Geo » afin de répondre aux exigences des normes.

# Systèmes de pompes à chaleur pour immeubles multifamiliaux existants

## Étude de cas 4 - Immeuble d'appartements des années 1970

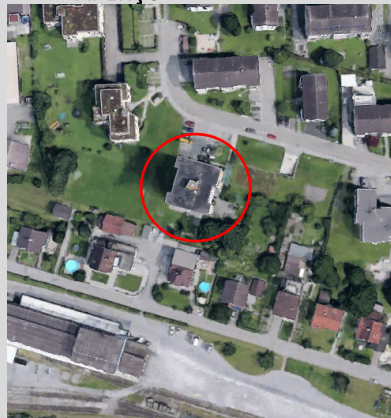
### CARACTÉRISTIQUES

Le bâtiment est situé dans la campagne du canton de Saint-Gall et, avec ses dix étages, représente un immeuble de grande hauteur typique des années 1970. L'immeuble compte trente appartements (trois appartements par étage) avec balcons à l'est et à l'ouest.

Le toit et les murs extérieurs sont en béton armé avec une couche d'isolation de 6 cm et 2 cm, respectivement. Les fenêtres sont constituées de cadres en bois avec double vitrage pour une valeur U totale de 1.4 W/m<sup>2</sup>K. Les stores enrouleurs avec caissons de stores intérieurs servent de protection solaire.

Le système de production de chaleur se compose d'une chaudière au fioul d'une puissance de 240 kW qui produit de la chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. La chaleur pour le chauffage des locaux est émise par des radiateurs.

### APERÇU



Année de construction	1971
Emplacement	Uznach (canton St. Gallen)
Surface de référence énergétique	3150 m <sup>2</sup>
Catégorie de bâtiment (SIA 380/1)	Résidentiel
Demande de chauffage des locaux (Ch.) calculée	276 MWh/a (88 kWh/m <sup>2</sup> a)
Demande d'eau chaude sanitaire (ECS) calculée	60 MWh/a (19 kWh/m <sup>2</sup> a)
Production de chaleur	Chaudière au fioul
Émission de chaleur	Radiateurs



#### Toit

Toit plat en béton avec 6 cm d'isolation et une feuille de PVC comme revêtement de toit

#### Fenêtre

Cadre en bois, double vitrage

#### Protection solaire

Stores enrouleurs avec caisson intérieur

#### Mur extérieur

Construction en béton armé avec 2 cm d'isolation

#### Espace extérieur

Loggia à l'Est et à l'Ouest



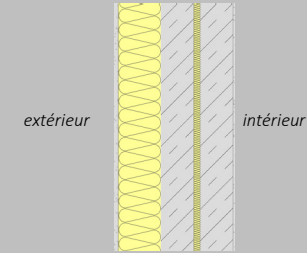
ENVELOPPE DU BÂTIMENT - Stratégie de rénovation

Afin de réduire la demande de chauffage du bâtiment, les surfaces extérieures existantes (c'est-à-dire le toit, les murs et les fenêtres) doivent être rénovées. La simplicité du bâtiment permet une isolation par l'extérieur tout en conservant les caractéristiques.

Sur le toit extérieur, la couche d'isolation existante (de 60 mm) sera retirée et remplacée par une couche d'isolation plus épaisse de 100 mm afin de diminuer la valeur U de la construction.

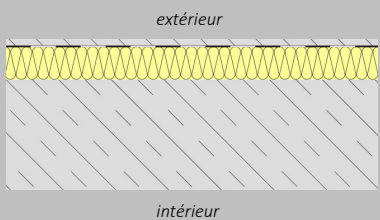
Comme les murs extérieurs sont construits avec une structure sandwich (béton/isolation/béton), la couche d'isolation existante sera maintenue. De plus, une nouvelle couche isolante de 120 mm sera placée à l'extérieur du mur pour atteindre une valeur U de 0.28 W/m²K. Toutes les fenêtres seront remplacées par des fenêtres à double vitrage avec un cadre en bois, avec une valeur U qui passera de 1.4 W/m²K à 0.9 W/m²K.

Mur extérieur  
U avant la rénovation: 1.32 W/m²K  
U après rénovation: 0.28 W/m²K



Plâtre (10 mm)  
Isolation (120 mm)  
Béton armé (100 mm)  
Isolation (20 mm)  
Béton armé (100 mm)  
Plâtre (10 mm)

Toit extérieur  
U avant la rénovation: 0.46 W/m²K  
U après rénovation: 0.19 W/m²K



Tuiles  
Film PVC  
Isolation (60 mm) (retirée)  
Isolation (100 mm)  
Béton armé (250 mm)

Fenêtres  
U<sub>g</sub> avant la rénovation: 1.5 W/m²K  
U<sub>f</sub> avant la rénovation: 1.2 W/m²K  
g avant la rénovation: 0.80  
U<sub>g</sub> après rénovation: 0.7 W/m²K  
U<sub>f</sub> après rénovation: 2.0 W/m²K  
g après rénovation: 0.45

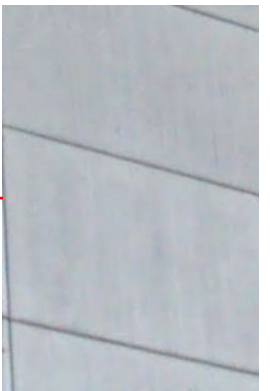
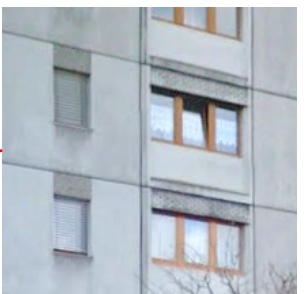
Toit\*



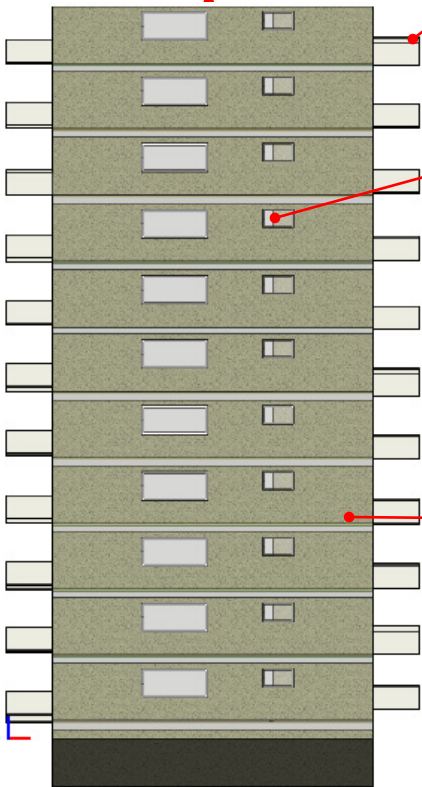
Loggia\*



Fenêtres des appartements\*



Mur extérieur\*



\*Situation actuelle (avant rénovation)

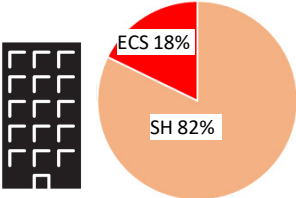
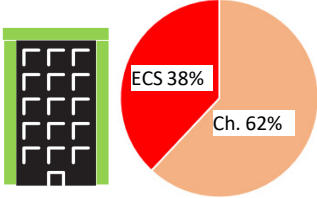
CONCEPT DE PRODUCTION DE CHALEUR - Définition des variantes

Afin de réduire les émissions directes de CO<sub>2</sub> du système de production de chaleur existant pour le chauffage des locaux (Ch.) et la préparation de l’eau chaude sanitaire (ECS), deux variantes ont été étudiées :

- Pompe à chaleur air-eau (PaC-Air) : Le chauffage et l’ECS sont assurés par une pompe à chaleur air-eau ;
- Pompe à chaleur sol-eau (PaC-Geo) : Le chauffage et l’ECS sont assurés par une pompe à chaleur sol-eau.

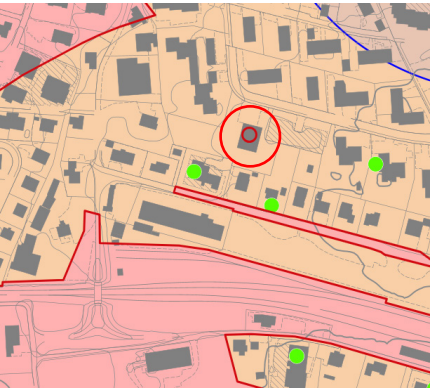
La variante « PaC-Air » n’a été pris en compte que dans le cas où l’enveloppe du bâtiment est remise à neuf, tandis que la variante « PaC-Geo » a été prise en compte pour les deux statuts de l’enveloppe du bâtiment (c’est-à-dire non remis à neuf et remis à neuf).

Dans toutes les variantes, les radiateurs existants sont remplacés par de nouveaux radiateurs et la température de distribution est réglée en fonction de l’état de l’enveloppe du bâtiment. Étant donné qu’il n’y a pas de réseau de chauffage urbain dans cette zone, cette option n’a pas été considérée comme une variante dans cette analyse. Des détails sur les différentes variantes de production de chaleur sont décrits dans l’annexe. Le choix des variantes est le résultat d’une discussion préalable avec les partenaires CVC.

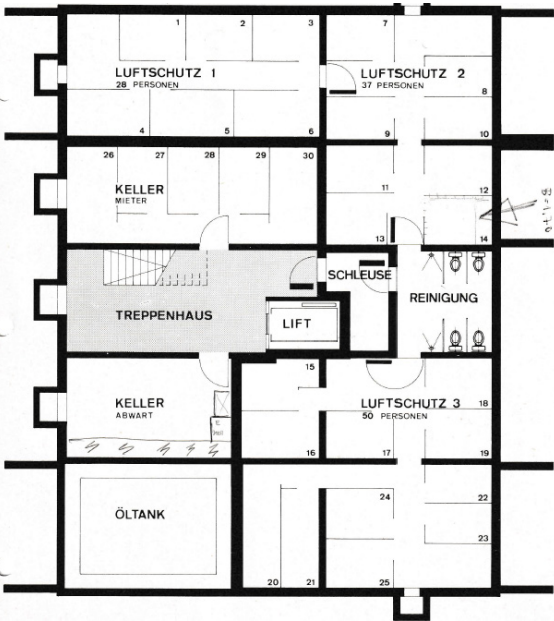
	Enveloppe du bâtiment non rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 88 / 19	Enveloppe du bâtiment rénovée Ch. / ECS [kWh/m²a]: 31 / 19	
			
Variante de production de chaleur	PaC-Geo	PaC-Geo	PaC-Air
COP <sub>nom</sub> / Capacité <sub>nom</sub> pompe à chaleur*	4.7 / 100 kW (à B0/W35)	4.7 / 64 kW (à B0/W35)	4.2 / 71 kW (à A2/W35)
Sondes géothermiques	18 x 200 m	9 x 200 m	-
Volume de stockage pour ECS / Ch.	2000 l / 3500 l	2000 l / 3500 l	2000 l / 3500 l
Demande d’électricité (kWh/m²a)**	33.5	13.3	14.2

\* données issues de fiches techniques de pompes à chaleur réelles proposées par un partenaire CVC

\*\* Demande d’électricité du système de chauffage (pompes à chaleur + pompes de circulation)



Le bâtiment (entouré en rouge) est situé dans une zone (zone orange sur l’image) où le forage de sondes géothermiques est en principe autorisé moyennant une clarification hydrogéologique préalable. Des sondes géothermiques sont déjà présentes dans la zone (points verts). Pour cette raison, il a été décidé de considérer les pompes à chaleur géothermiques comme une variante de chauffage possible pour le bâtiment à l’étude.



Un aspect crucial pour la variante « PaC-Air » est le positionnement de l’aéroréfrigérant, qui est installé à l’extérieur du bâtiment. En collaboration avec un partenaire CVC, il a été décidé d’installer ce composant dans un espace vert où il y a suffisamment d’espace disponible pour de tels composants (voir point noir). De cette façon, les unités externes se trouveront à côté du local technique où les unités internes de la pompe à chaleur seront installées.



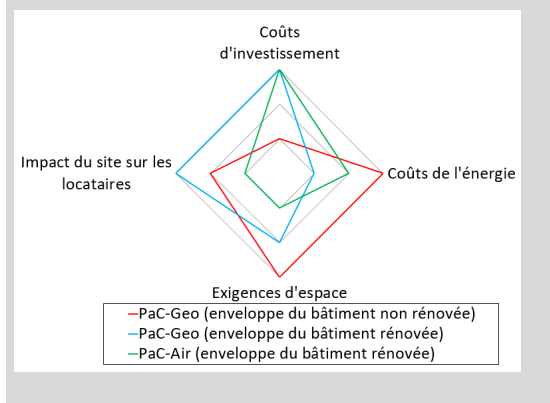
- Hypothèses**
- Subventions financières non prises en compte ;
  - Les frais de remplacement des radiateurs existants ne sont pas inclus ;
  - Seule la consommation d'électricité du système de chauffage est incluse dans les coûts d'électricité ;
  - Prix constant de l'électricité de 0.25 CHF/kWh ;
  - 1 %/a des coûts d'invest. pour l'entretien ;
  - Durée de vie de la pompe à chaleur : 25 ans ;
  - Analyse temporelle sur 25 ans.

- Coûts d'investissement des variantes**
- Enveloppe du bâtiment non rénovée (système de chauffage seulement)
- PaC-Geo: 540 kCHF (171 CHF/m<sup>2</sup>)
- Enveloppe du bâtiment remise à neuf (système de chauffage et enveloppe du bâtiment)
- PaC-Geo: 3.5 MCHF (1108 CHF/m<sup>2</sup>)
  - PaC-Air: 3.3 MCHF (1063 CHF/m<sup>2</sup>)

- Coûts de l'électricité / de l'énergie (par an)**
- Enveloppe du bâtiment non rénovée
- PaC-Geo: 26 kCHF (8 CHF/m<sup>2</sup>)
- Enveloppe du bâtiment rénovée
- PaC-Geo: 10 kCHF (3 CHF/m<sup>2</sup>)
  - PaC-Air: 11 kCHF (4 CHF/m<sup>2</sup>)

**Graphique radar pour la comparaison des variantes :**

La variante « PaC-Geo » pour l'enveloppe du bâtiment non rénovée est la variante dont les coûts d'investissement initiaux sont les plus bas et les coûts énergétiques les plus élevés. Étant donné que les variantes « PaC-Air » ne nécessitent que l'installation des unités extérieures à l'extérieur du bâtiment, l'encombrement est inférieur à celui des variantes « PaC-Geo », où des sondes de sol sont nécessaires.



## RECOMMANDATION

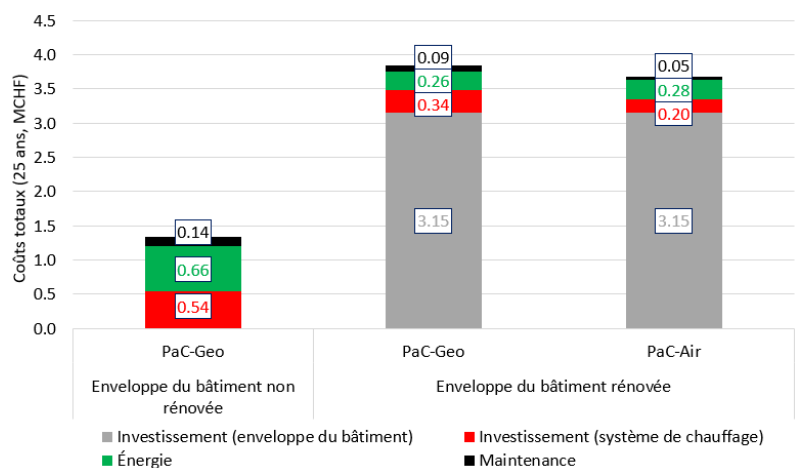
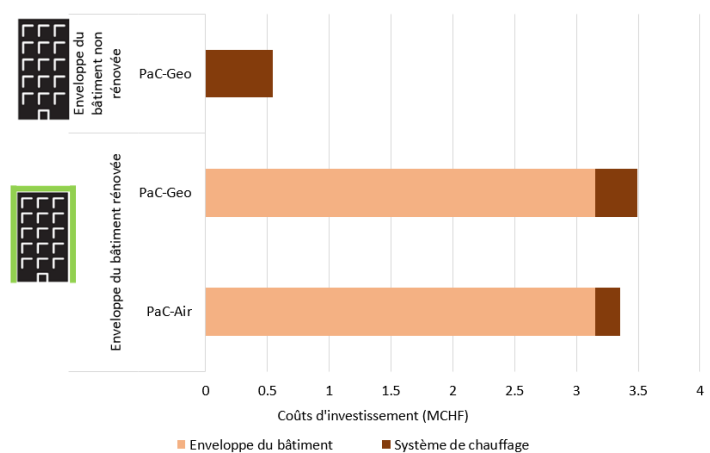
À l'emplacement du bâtiment qui a été analysé dans cette étude de cas, pour le cas non rénové, seul un système PaC-Geo est techniquement réalisable lorsque la production de chaleur passe d'une énergie fossile à une énergie renouvelable. Dans le cas d'une rénovation énergétique de l'enveloppe du bâtiment, la demande de chauffage du bâtiment et les coûts énergétiques du système de chauffage sont réduits, même si les coûts totaux sont plus élevés. D'autres avantages de la rénovation de l'enveloppe du bâtiment seront un confort thermique accru pour les habitants et une diminution de la demande d'électricité de la pompe à chaleur pendant l'hiver, lorsque les prix de l'électricité devraient être plus élevés à l'avenir. Les coûts d'investissement plus élevés de la variante « PaC-Geo » sont en partie compensés par ses coûts énergétiques inférieurs à ceux de la variante « PaC-Air », d'où des coûts totaux comparables pour les deux variantes. Si l'on tient compte de la charge du réseau électrique et des coûts de l'électricité achetée, le COP plus élevé de la PaC-Geo présente l'avantage supplémentaire d'impliquer une demande d'électricité inférieure en hiver par rapport à la PaC-Air. Il est important de souligner que les évaluations des coûts sont fondées sur des hypothèses approximatives qui sont sujettes à des grandes incertitudes.

## ANALYSE ÉCONOMIQUE

Une analyse économique sur 25 ans a été réalisée pour toutes les variantes. Le premier graphique ci-dessous montre pour chaque variante les coûts totaux d'investissement, tandis que le deuxième graphique montre les coûts totaux (sur 25 ans) pour l'investissement, l'énergie et la maintenance.

Si l'enveloppe du bâtiment n'est pas rénovée, les coûts d'investissement pour le système de chauffage sont plus élevés par rapport au cas où l'enveloppe du bâtiment est rénovée. Dans le cas d'une rénovation de l'enveloppe du bâtiment, les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment représentent environ 90 à 95 % des coûts d'investissement totaux. Il est important de souligner qu'ici, les coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe du bâtiment sont basés sur des hypothèses approximatives et sont soumis à de grandes incertitudes.

Sur 25 ans, les variantes « PaC-Air » et « PaC-Geo » ont des coûts totaux similaires (environ 3.8 MCHF) en cas de rénovation de l'enveloppe du bâtiment.





Simulation de bâtiment – Intrants et hypothèses

Pour évaluer la demande annuelle de chauffage des locaux du bâtiment, l’outil de simulation dynamique multizone IDA ICE (Indoor Climate and Energy) a été utilisé. Les deux cas (c.-à-d. avec et sans remise à neuf de l’enveloppe du bâtiment) ont été modélisés et simulés. Les données climatiques de Zurich (SIA 2028) ont été sélectionnées, tandis que les données de la norme nationale SIA 2024 ont été utilisées pour la modélisation des gains de chaleur internes du bâtiment (personnes, lumière et appareils). Une température de consigne de 22°C avec un système de chauffage « idéal » a été choisie. Un taux d’infiltration d’air constant de 0.5 h<sup>-1</sup> a été supposé pour l’ensemble du bâtiment. Étant donné qu’il n’existe pas d’informations détaillées sur la demande d’ECS pour le bâtiment, des hypothèses ont été formulées sur la base des normes nationales et de l’expérience.

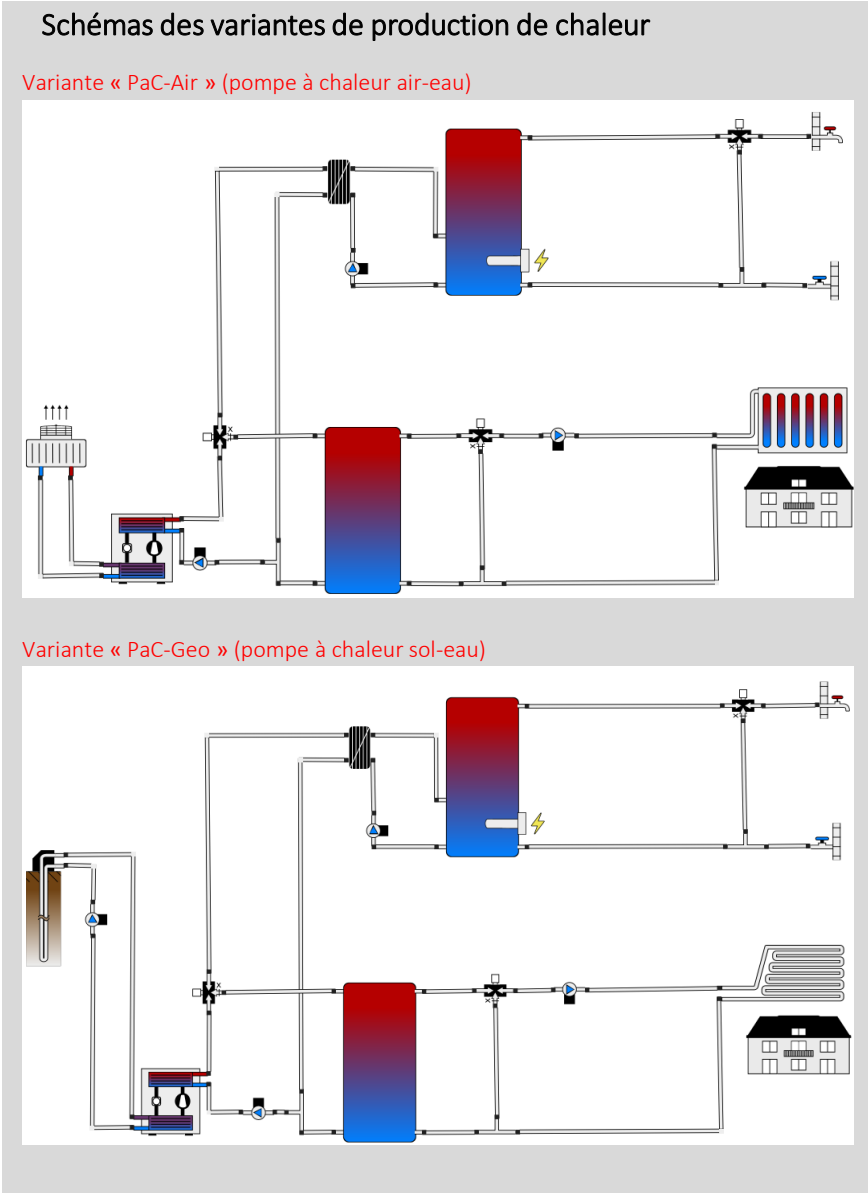
Analyse économique – Intrants et hypothèses

L’évaluation des coûts d’investissement pour chaque variante de chauffage et pour la rénovation de l’enveloppe du bâtiment a été réalisée avec la contribution des partenaires CVC et des architectes. Dans les coûts d’investissement pour le système de chauffage, le coût du remplacement des radiateurs n’a pas été pris en compte. L’analyse économique a été effectuée en supposant une durée de vie de 25 ans. Un prix constant de l’électricité de 0.25 CHF/kWh et un coût d’entretien de 1 %/an des coûts d’investissement ont été envisagés. Dans l’évaluation des coûts d’électricité, la consommation d’électricité pour l’éclairage et les appareils du bâtiment n’a pas été prise en compte. Les subventions financières (pour la rénovation de l’enveloppe du bâtiment ou l’installation de systèmes de pompes à chaleur) n’ont pas été prises en compte.

Simulation des variantes – Description et commandes

Les différentes variantes de production de chaleur ont été modélisées à l’aide du logiciel POLYSUN. Les différentes variantes, définies et modélisées en collaboration avec les partenaires CVC, sont représentées schématiquement sur la droite. Le système est équipé d’un stockage pour l’ECS de 2000 l et d’un deuxième stockage pour le chauffage des locaux de 3500 l. Chaque stockage est équipé de capteurs de température pour contrôler l’allumage et l’arrêt de la pompe à chaleur. Le système de chauffage est équipé d’une vanne à trois voies pour activer la pompe à chaleur pour le chauffage des locaux ou la préparation de l’ECS (l’ECS a toujours la priorité sur le chauffage des locaux).

La température de distribution pour le chauffage des locaux est basée sur une courbe de chauffe en fonction de la température extérieure (40°C pour une température extérieure de -8 °C en cas d’enveloppe du bâtiment rénovée). La température de distribution est augmentée de 20 K en cas d’enveloppe du bâtiment non rénovée.

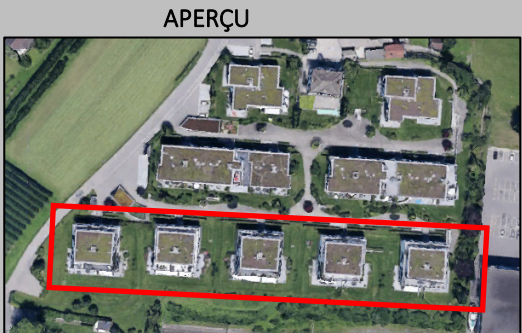
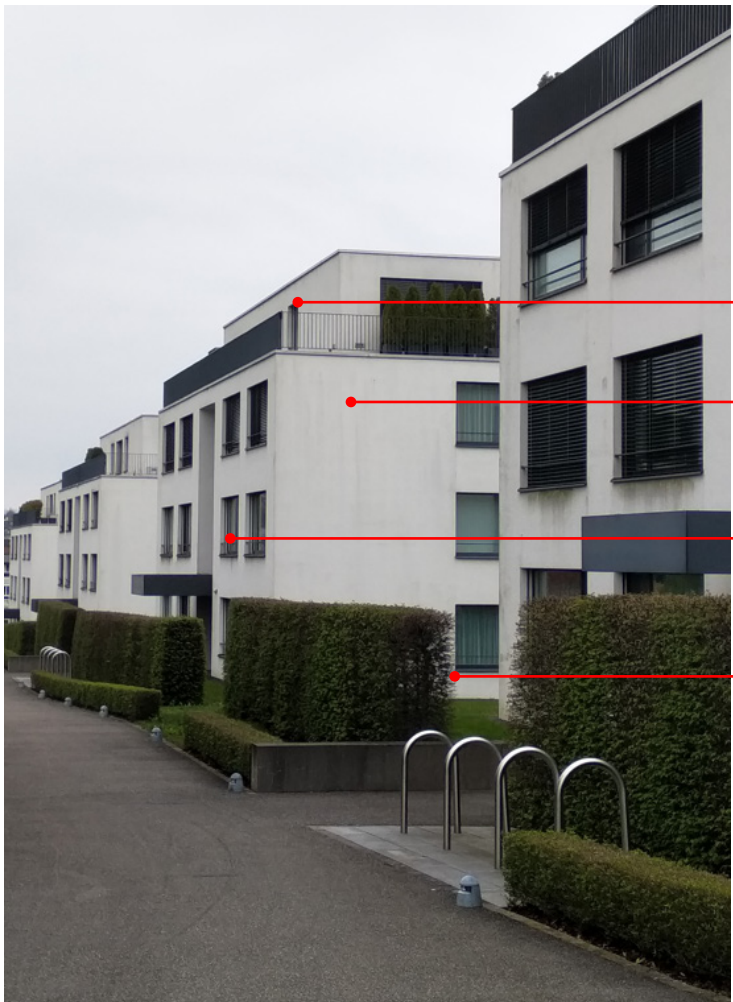


# Systèmes de pompes à chaleur pour immeubles multifamiliaux existants

## Étude de cas 5 - Complexe de 5 immeubles d'habitation

### CARACTÉRISTIQUES

Ce complexe de cinq immeubles d'habitation, situé dans la commune de Stäfa (canton de Zurich), est une construction des années 2000. Chacun des cinq bâtiments est caractérisé par trois niveaux plus un attique (7 appartements par immeuble, 35 au total pour l'ensemble du complexe). Chaque logement dispose d'un coin salon vitré sur le côté sud. L'enveloppe du bâtiment est en bon état avec des murs extérieurs isolés avec 14 cm d'EPS et des fenêtres à double vitrage avec des stores vénitiens extérieurs. Le complexe immobilier est chauffé par des systèmes décentralisés (installés au sous-sol de chacun des cinq bâtiments), chacun composé d'une chaudière à gaz (41 kW) qui produit de l'énergie pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire. La chaleur nécessaire au chauffage des locaux est fournie aux pièces chauffées par le biais d'un chauffage par le sol. Chaque local technique est équipé d'une cuve de stockage de 400 l pour l'eau chaude sanitaire.

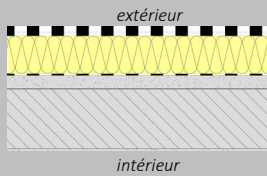


Année de construction	2006
Emplacement	Stäfa (canton Zürich)
Surface de référence énergétique	6285 m²
Catégorie de bâtiment (SIA 380/1)	Résidentiel
Demande de chauffage des locaux (Ch.) calculée	220 MWh/a (35 kWh/m²a)
Demande d'eau chaude sanitaire (ECS) calculée	119 MWh/a (19 kWh/m²a)
Production de chaleur	Chaudière à gaz
Émission de chaleur	Chauffage au sol

- Attique
- Mur extérieur
  - Murs en maçonnerie de brique avec isolation extérieure
- Fenêtres extérieures
  - Fenêtres à double vitrage avec stores vénitiens extérieurs
- Appartements
  - Deux appartements pour chaque étage (sept appartements pour chaque bâtiment)

## Toit

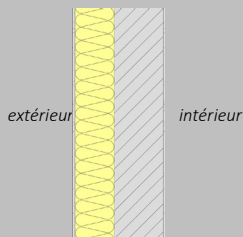
U-valeur: 0.19 W/m²K



Couche de drainage  
Couche de séparation  
Etanchéité bitumineuse (10 mm)  
Panneau de mousse rigide PU (140 mm)  
Pare-vapeur (5 mm)  
Couverture de pente (50 mm)  
Béton armé (220 mm)  
Plâtre intérieur (10 mm)

## Mur extérieur

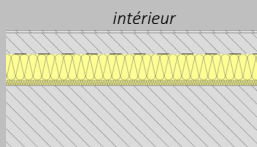
U: 0.23 W/m²K



Plâtre (10 mm)  
Isolation EPS (140 mm)  
Maçonnerie en brique (175 mm)  
Plâtre (10 mm)

## Sol contre non chauffé

U: 0.20 W/m²K



Revêtement de sol (10 mm)  
Chape en ciment (80 mm)  
Film PE  
Mousse dure PUR (100 mm)  
Panneau de fibres minérales (20 mm)  
Béton armé (250 mm)

## Fenêtres des appartements

$U_g$ : 1.0 W/m²K

$U_f$ : 3.0 W/m²K

Ratio de cadre: 11%

$g$ : 0.62

## ENVELOPPE DU BÂTIMENT

Ce complexe de cinq immeubles d'habitation a été construit en 2006 et est donc relativement nouveau. Étant donné que l'enveloppe du bâtiment est en bon état et énergétiquement efficace, la stratégie de rénovation de l'enveloppe du bâtiment n'a pas été prise en compte.

Chacun des cinq immeubles d'habitation se compose de trois étages et d'un attique pour un total de sept appartements. Du côté sud, chaque appartement dispose d'un grand coin salon vitré. Le toit plat est en béton armé isolé avec 14 cm de panneau de mousse rigide PU avec une valeur U de 0.19 W/m²K. Les murs extérieurs, en maçonnerie de brique isolée avec 14 cm d'EPS, ont une valeur U de 0.23 W/m²K. Le sol contre les pièces non chauffées, en béton armé isolé avec du PUR et des panneaux de fibres minérales (100 mm et 20 mm, respectivement), affiche une valeur U de 0.20 W/m²K. Toutes les constructions principales sont décrites sur la gauche. Les fenêtres à double vitrage des appartements, équipées de stores vénitiens extérieurs, présentent une valeur U de 1.22 W/m²K.

### Fenêtres des appartements



### Coin salon vitré



Escalier et mur extérieur



Plafond contre non chauffé

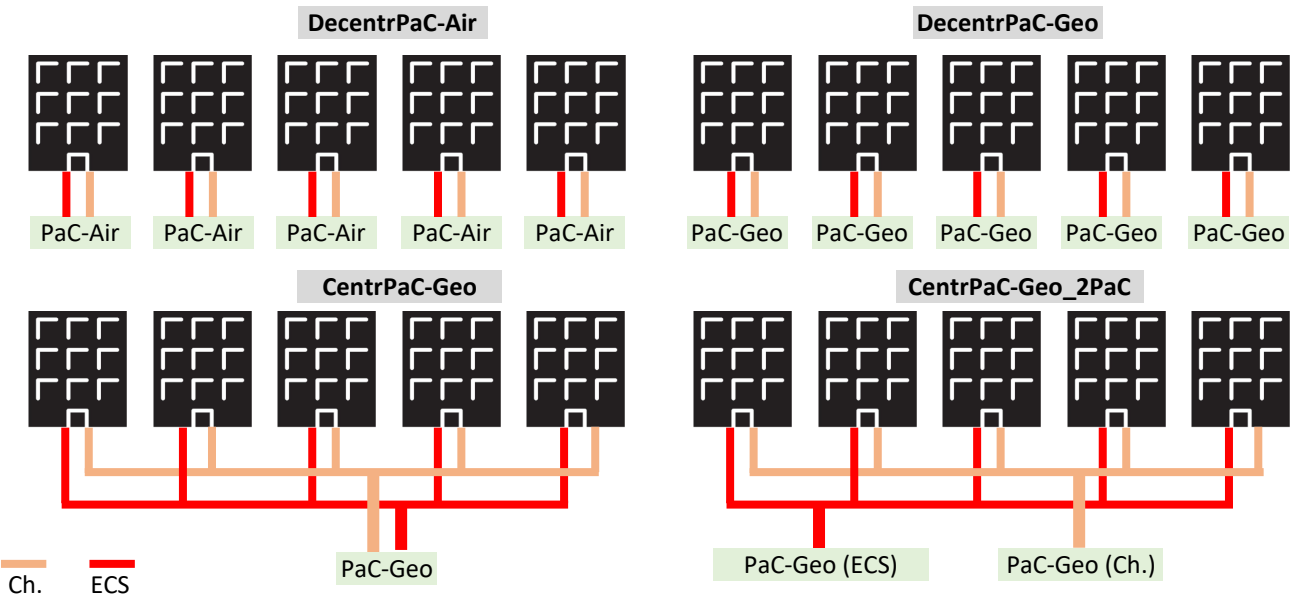


# CONCEPT DE PRODUCTION DE CHALEUR - Définition des variantes

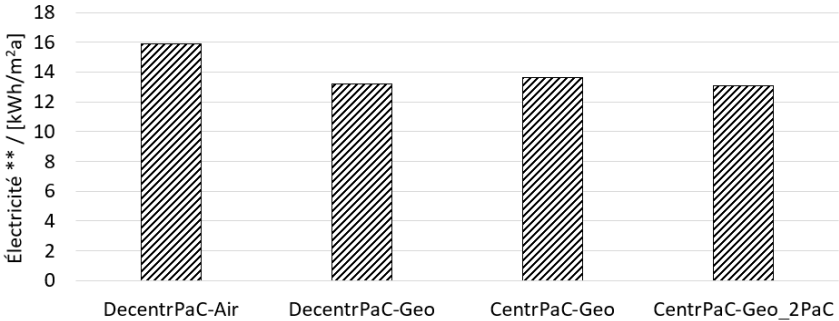
Afin de réduire les émissions directes de CO<sub>2</sub> du système de chauffage existant pour le chauffage des locaux (Ch.) et la préparation de l’eau chaude sanitaire (ECS), quatre variantes ont été étudiées :

- Pompe à chaleur air-eau décentralisée (DecentrPaC-Air) : Chaque bâtiment est équipé d’une pompe à chaleur pour couvrir ses besoins en chauffage et en ECS. Étant donné que le complexe est composé de cinq immeubles d’habitation, cinq pompes à chaleur distinctes sont envisagées.
- Pompe à chaleur sol-eau décentralisée (DecentrPaC-Geo) : Chaque bâtiment dispose d’une pompe à chaleur et d’un champ de sondes géothermiques pour couvrir ses besoins en chauffage et en ECS.
- Pompe à chaleur sol-eau centralisée (CentrPaC-Geo) : Une seule pompe à chaleur et un seul champ de sondes géothermiques desservent l’ensemble du complexe pour le chauffage des locaux et la production d’ECS.
- Pompe à chaleur sol-eau centralisée avec deux pompes à chaleur (CentrPaC-Geo\_2PaC) : Variante de la précédente, avec deux pompes à chaleur : une pour le chauffage des locaux et une pour l’ECS.

Dans toutes les variantes, la distribution de chaleur existante (chauffage au sol) est prise en compte. Le chauffage urbain n’étant pas prévu à court terme, il n’a pas été considéré dans cette analyse. Les détails sur les différentes variantes de production de chaleur sont présentés en annexe. Le choix des variantes résulte d’une concertation préalable avec les partenaires CVC.



Variante de production de chaleur	DecentrPaC-Air	DecentrPaC-Geo	CentrPaC-Geo	CentrPaC-Geo_2PaC
COP pompe à chaleur*	3.4 (à A2/W35)	4.2 (à B0/W35)	4.0 (à B0/W35)	Ch.: 3.9 (à B0/W35) ECS: 3.9 (à B0/W35)
Capacité totale de la pompe à chaleur*	5 x 43 kW (34 W/m²)	5 x 43 kW (34 W/m²)	2 x 112 kW (36 W/m²)	Ch.: 177 kW (28 W/m²) ECS: 47 kW (7 W/m²)
Sondes géothermiques	-	30 x 200 m (0.9 m/m²)	30 x 200 m (0.9 m/m²)	30 x 200 m (0.9 m/m²)
SPF <sub>PAC</sub>	3.5	4.3	4.1	Chauffage: 4.7 ECS: 3.6
Demande d’électricité (kWh/m²a)**	16	13	14	13



\*données provenant de fiches techniques de PAC réelles

\*\* Demande d’électricité du système de chauffage (pompes à chaleur + pompes de circulation) pour les cinq immeubles d’habitation

## Hypothèses

- Subventions financières non prises en compte ;
- Seule la consommation d'électricité du système de chauffage est incluse dans les coûts d'électricité ;
- Prix constant de l'électricité de 0.37 CHF/kWh ;
- 1 %/a des coûts d'invest. pour l'entretien ;
- Analyse temporelle sur 25 ans.

## Coûts d'investissement

Enveloppe du bâtiment non rénovée (système de chauffage seulement)

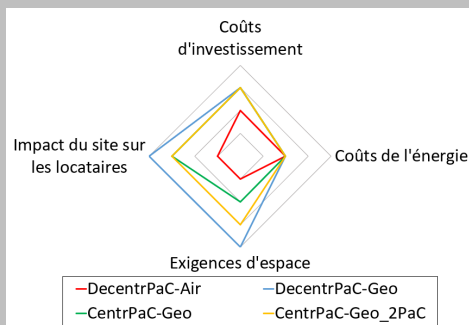
- DecentrPaC-Air: 530 kCHF (84 CHF/m<sup>2</sup>)
- DecentrPaC-Geo: 1030 kCHF (164 CHF/m<sup>2</sup>)
- CentrPaC-Geo: 920 kCHF (146 CHF/m<sup>2</sup>)
- CentrPaC-Geo\_2PaC: 910 kCHF (145 CHF/m<sup>2</sup>)

## Coûts de l'électricité (par an)

- DecentrPaC-Air: 37 kCHF (6 CHF/m<sup>2</sup>)
- DecentrPaC-Geo: 31 kCHF (5 CHF/m<sup>2</sup>)
- CentrPaC-Geo: 32 kCHF (5 CHF/m<sup>2</sup>)
- CentrPaC-Geo\_2PaC: 30 kCHF (5 CHF/m<sup>2</sup>)

## Graphique radar pour la comparaison des variantes :

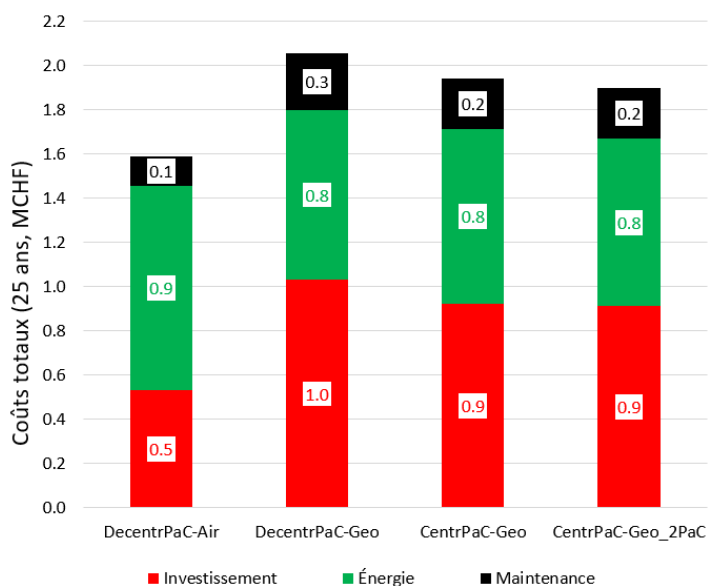
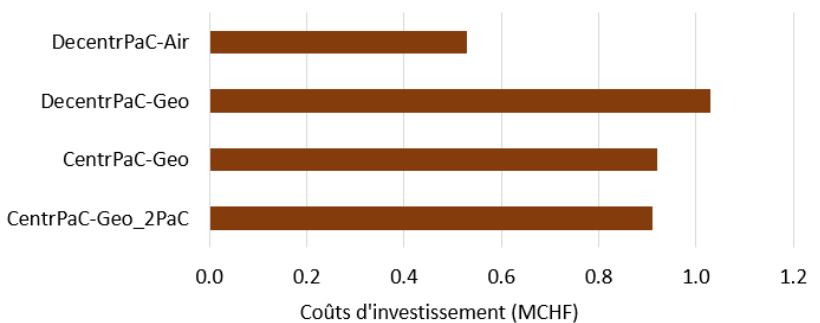
La variante « DecentrPaC-Air » est celle dont les coûts d'investissement initiaux sont les plus bas (84 CHF/m<sup>2</sup>) et les coûts énergétiques les plus élevés (6 CHF/m<sup>2</sup>). Étant donné qu'il n'est pas nécessaire de forer des sondes géothermiques, la variante « DecentrPaC-Air » a le plus faible impact sur le site sur les locataires par rapport aux autres variantes. Pour l'évaluation qualitative de l'espace nécessaire, il a été tenu compte de l'espace nécessaire dans le jardin (pour les sondes géothermiques) et dans la cave pour l'équipement de production de chaleur. En raison des cinq champs de sondes au sol et des cinq pompes à chaleur installés dans les caves des bâtiments, le « CentrPaC-Geo\_2PaC » présente les exigences d'espace les plus élevées.



## ANALYSE ÉCONOMIQUE

Afin de comparer toutes les variantes analysées, une analyse économique sur 25 ans a été réalisée. Le premier graphique ci-dessous montre pour chaque variante les coûts totaux d'investissement, tandis que le deuxième graphique montre les coûts totaux (sur 25 ans) pour l'investissement, l'énergie et la maintenance. Il est important de souligner que les coûts d'investissement sont basés sur des hypothèses approximatives et sont soumis à de grandes incertitudes. La variante « DecentrPaC-Geo », avec un coût d'investissement total d'environ 1 MCHF, présente les coûts d'investissement les plus élevés, tandis que les deux variantes avec des solutions centralisées ont un coût d'investissement total légèrement inférieur (environ 900 kCHF).

Sur 25 ans, la variante « DecentrPaC-Air » a les coûts totaux les plus bas avec 1.6 MCHF, soit 23 % de moins que la variante « DecentrPaC-Geo » (2.1 MCHF).



## RECOMMANDATION

Les schémas ci-dessus montrent que la variante de la pompe à chaleur air-eau décentralisée « DecentrPaC-Air » représente l'option financière la plus attrayante par rapport aux trois autres variantes analysées. Comme indiqué dans le graphique radar, la variante « DecentrPaC-Air » a les coûts d'investissement et l'impact sur le site les plus faibles pour les locataires car le forage de sondes géothermiques n'est pas nécessaire. Les unités externes des pompes à chaleur pourraient être placées sur le côté de chaque bâtiment afin de maintenir la surface de toit disponible pour l'installation (éventuelle) de panneaux photovoltaïques. D'autre part, une pompe à chaleur sol-eau diminuerait les pics de demande d'électricité pendant l'hiver et cet aspect représenterait un avantage pour la charge du réseau électrique et les coûts de l'électricité. On peut s'attendre à ce qu'à l'avenir, pendant l'hiver, les prix de l'électricité soient plus élevés. En comparant les variantes avec pompe à chaleur sol-eau, on peut affirmer que la solution centralisée avec sondes géothermiques est financièrement plus attrayante (par rapport à « DecentrPaC-Geo »), mais l'emplacement des grandes pompes à chaleur au sous-sol du complexe immobilier pourrait représenter un obstacle à prendre en compte. Il est important de souligner que les évaluations des coûts sont fondées sur des hypothèses approximatives qui sont sujettes à de grandes incertitudes.

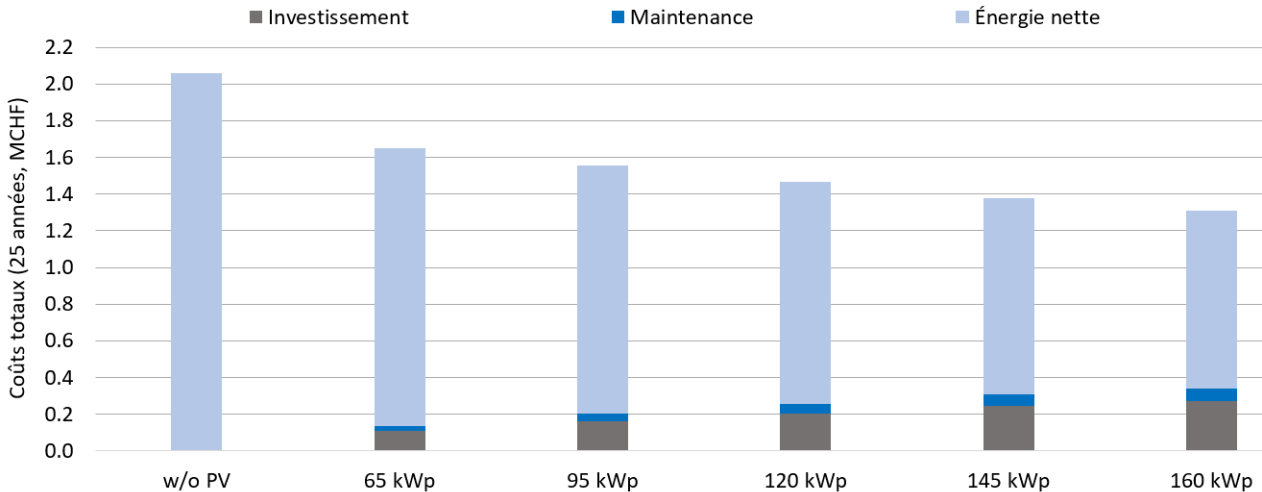
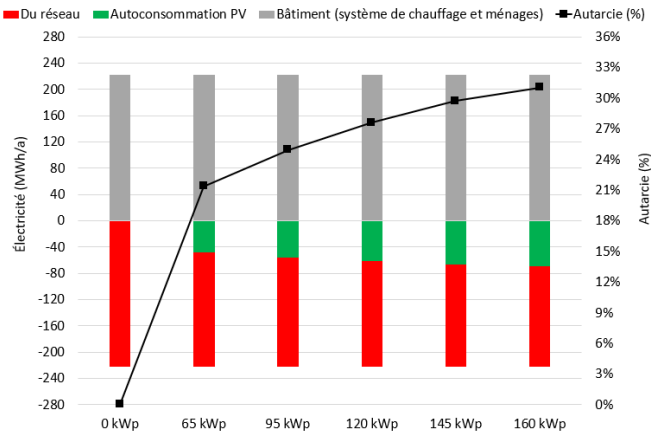
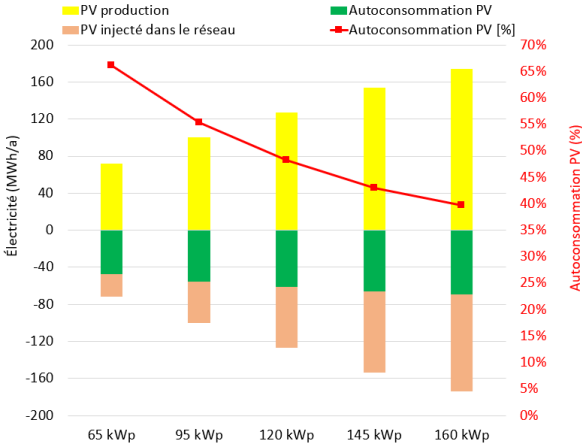
Hypothèses

- Subventions financières non prises en compte ;
- La consommation d’électricité du système de chauffage (variante « DecentrPaC-Air ») et des ménages est incluse dans la demande d’électricité ;
- Demande annuelle d’électricité : 222 MWh/a (système de chauffage : 100 MWh/a, ménages : 122 MWh/a) ;
- Un prix de l’électricité constant (0.37 CHF/kWh) et un tarif d’injection PV (0.17 CHF/kWh) ont été retenus ;
- 1 %/a des coûts d’investissement pour l’entretien ;
- Analyse temporelle sur 25 ans ;
- Pas de temps de simulation : 1 heure ;
- Des coûts d’investissement de 1700 CHF/kWp ont été pris en compte dans toutes les variantes ;
- Panneaux photovoltaïques installés uniquement sur le toit des combles des cinq bâtiments (orientation : sud, inclinaison : 30°) dans toutes les variantes.

Variante PV	Surface photovoltaïque totale [m²]	Nombre de modules
Sans PV	-	-
65 kW <sub>p</sub>	92	54
95 kW <sub>p</sub>	128	75
120 kW <sub>p</sub>	162	95
145 kW <sub>p</sub>	197	115
160 kW <sub>p</sub>	223	130

ÉTUDE PV – Définition des variantes et analyse

Différentes variantes photovoltaïques ont été définies et comparées afin de trouver l’option financière la plus attrayante pour le complexe immobilier analysé. Toutes les hypothèses principales de l’étude sont énumérées à gauche. Dans toutes les variantes photovoltaïques analysées, la variante de chauffage « DecentrPaC-Air » a été prise en compte. Cinq variantes PV différentes (de 65 kWp à 160 kWp de puissance PV totale installée) ont été définies et comparées au cas sans système PV. La variante « 160 kWp » représente le cas dans lequel toute la surface des cinq toits des attiques est équipée de panneaux photovoltaïques. Les deux schémas ci-dessous montrent pour chaque variante le bilan électrique de l’installation photovoltaïque et du bâtiment. Avec la variante « 160 kWp », l’installation photovoltaïque produit environ 170 MWh/a, soit 23 % de moins que la demande totale annuelle d’électricité du bâtiment (c’est-à-dire 222 MWh/a). Avec l’augmentation de la taille du système photovoltaïque, il y a une réduction de la demande d’électricité du réseau (jusqu’à une valeur de 150 MWh/a dans le cas de « 160 kWp ») et une augmentation du degré d’autarcie jusqu’à la valeur maximale de 31 %. La variante « 65 kWp » a une autoconsommation photovoltaïque de 66 %. Cette valeur diminue à 40 % dans le cas de la variante « 160 kWp ». Afin de comparer économiquement les différentes variantes, on a supposé un prix de l’électricité constant et un tarif d’injection photovoltaïque constant (37 cts./kWh et 17 cts./kWh, respectivement) pour calculer l’énergie nette (c’est-à-dire la différence entre le coût de l’électricité achetée et le gain d’électricité injectée dans le réseau). Le dernier schéma ci-dessous montre que l’option financière la plus attrayante est la variante « 160 kWp », qui permet d’atteindre une réduction des coûts totaux de 36 % (par rapport à l’option sans PV).





# Annexe

## Simulation de bâtiment – Intrants et hypothèses

Afin d'évaluer la demande annuelle de chauffage des locaux du bâtiment, l'outil de simulation dynamique multizone IDA ICE (Indoor Climate and Energy) a été utilisé. Les données climatiques de Zurich (SIA 2028) ont été sélectionnées, tandis que les données de la norme nationale SIA 2024 ont été utilisées pour la modélisation des gains de chaleur internes du bâtiment (personnes, lumière et appareils). Une température de consigne de 22°C avec un système de chauffage « idéal » a été choisie. Un taux d'infiltration d'air constant de 0.5 h<sup>-1</sup> a été supposé pour l'ensemble du bâtiment. Étant donné qu'il n'existe pas d'informations détaillées sur la demande d'ECS pour le bâtiment, des hypothèses ont été formulées sur la base des normes nationales et de l'expérience.

## Simulation des variantes – Description et commandes

Les différentes variantes de chauffage ont été modélisées à l'aide du logiciel POLYSUN. Les différentes variantes de chauffage, définies et modélisées en collaboration avec les partenaires CVC, sont représentées schématiquement sur la droite. Il est important d'indiquer qu'en raison des limites de la modélisation de l'outil utilisé, des simplifications ont été nécessaires afin de modéliser toutes les variantes proposées. Dans les deux premières variantes (c'est-à-dire « DecentrPaC-Air » et « DecentrPaC-Geo »), le système de chauffage est équipé d'un accumulateur pour l'ECS (1000 l) et le chauffage des locaux (2000 l), tandis que dans les deux autres variantes, les accumulateurs sont plus grands (5 m<sup>3</sup> pour l'ECS et 10 m<sup>3</sup> pour le chauffage) car le système dessert l'ensemble du complexe de bâtiments.

La température de distribution pour le chauffage des locaux est basée sur une courbe de chauffe en fonction de la température extérieure (40 °C pour une température extérieure de -8 °C).

Contrairement aux trois premières variantes, la dernière variante (c'est-à-dire « CentrPaC-Geo\_2PaC ») est la seule dans laquelle deux PAC distinctes sont utilisés pour l'ECS et le chauffage. Les variantes avec sondes géo. ont été dimensionnées (longueur et nombre de sondes) afin de répondre aux exigences de la norme SIA 384/6.

## Analyse économique – Intrants et hypothèses

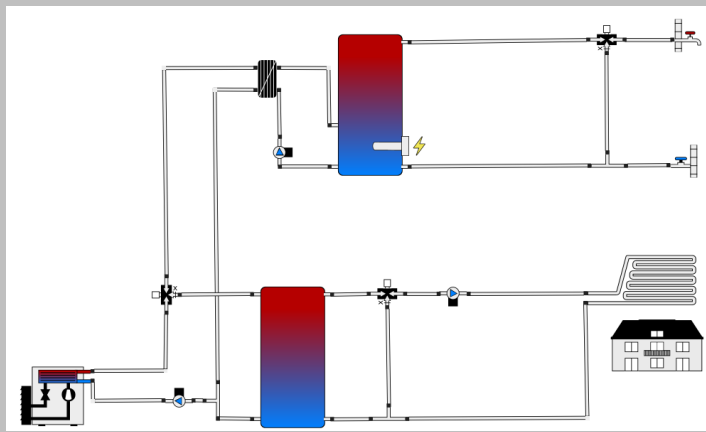
Afin de comparer les différentes variantes, une analyse économique a été effectuée. L'évaluation des coûts d'investissement a été réalisée avec les contributions des partenaires CVC et des architectes.

L'analyse économique a été effectuée en supposant une durée de vie de 25 ans. Un prix constant de l'électricité de 0.37 CHF/kWh et un coût d'entretien de 1 %/an des coûts d'investissement ont été envisagés. Dans l'évaluation des coûts d'électricité, la consommation d'électricité pour l'éclairage et les appareils du bâtiment n'a été prise en compte que dans l'étude PV.

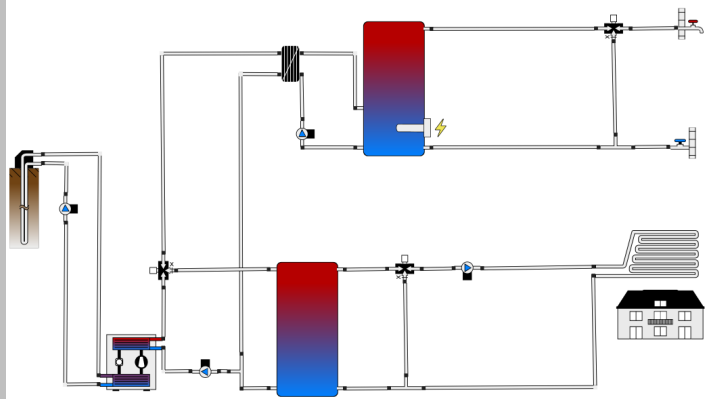
Les subventions financières (pour le photovoltaïque ou l'installation de systèmes de pompes à chaleur) n'ont pas été prises en compte.

## Schémas des variantes de production de chaleur

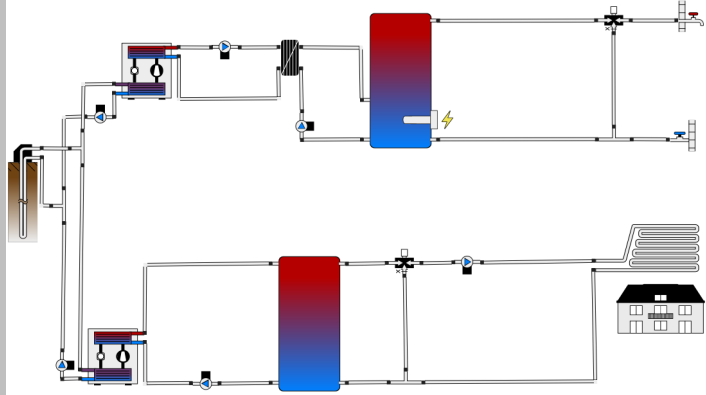
Variante « DecentrPaC-Air » \*



Variante « DecentrPaC-Geo » \*\*



Variante « CentrPaC-Geo\_2PaC »



\* Dans cette variante, chaque système de chauffage dessert un seul bâtiment. Cela signifie que, afin de simuler le système pour l'ensemble du complexe de construction, cinq de ces systèmes doivent être pris en compte. La même condition s'applique à la deuxième variante « DecentrPaC-Geo ».

\*\* Ce modèle pourrait également être utilisé pour la simulation de la variante « CentrPaC-Geo » (non représentée ici) car la disposition est similaire. Dans ce cas, le modèle a été réadapté (c'est-à-dire la longueur des tuyaux, la demande de chauffage/ECS, les volumes de stockage, la puissance des HP, etc.) afin de tenir compte du fait que le système dessert l'ensemble du complexe immobilier.