

Rapport final, 12 juin 2019

Rapport "PAC air-eau"

Remplacement de chaudières classiques à mazout, à gaz ou électrique en milieu urbain : scénarii de remplacement, analyse des coûts et des contraintes

Auteurs

Guillaume Massard – BG Ingénieurs Conseils SA (personne de contact)

Hugo Varela – BG Ingénieurs Conseils SA

Samuel Charmillot – BG Ingénieurs Conseils SA

Sylvain Vitali – BG Ingénieurs Conseils SA

Avec la collaboration de :

Matthias Rüetschi – ECO21, SIG

Eric Perdrisat – ECO21, SIG

Maxime Freymond – GSP

Jean-Pierre Staremborg – Gremion et Staremborg SA

Rene Aeby – Waterkotte Schweiz AG

Jonathan Andriol – Losinger Marazzi

Olivia Blanco – PGI Engineering

Jean-Christophe Hadorn – BG Ingénieurs Conseils SA

**La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.**

Adresse

SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie OFEN
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Adresse postale: CH-3003 Berne
Infoline 0848 444 444, www.infoline.suisseenergie.ch
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.suisseenergie.ch, twitter.com/energieschweiz

Lexique

COP	Coefficient of performance (coefficient de performance)
COPa	Coefficient de performance annuelle
CVSE	Chauffage, ventilation, sanitaire, électricité
GC	Génie civil
ECS	Eau chaude sanitaire
GSP	Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur
IDC	Indice de dépense de chaleur [MJ/m ²]
MCR	Mesure / contrôle - commande / régulation
MO	Maitre d'ouvrage
OFEN	Office fédéral de l'énergie
PAC	Pompe à chaleur
PCC	Plan climat cantonal
PVT	Photovoltaïque et Thermique
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SIG	Services industriels de Genève
SRE	Surface de référence énergétique [m ²]

Contenu

1	Résumé du rapport / Abstract	10
2	Introduction	11
2.1	Contexte	11
2.2	Défis liés au remplacement d'une chaudière à mazout, à gaz, ou électrique par une PAC air-eau	12
2.2.1	Défis liés à l'investissement	12
2.2.2	Défis liés au confort.....	12
2.2.3	Défis liés à l'intégration au bâti et bâtiments classés.....	13
2.2.4	Défis liés au bruit produit par les PAC air-eau	13
3	Notions techniques fondamentales sur les PAC air-eau	14
3.1	Descriptif de la PAC air-eau.....	14
3.2	Choix du mode de fonctionnement du systèmes PAC	15
3.3	Faisabilité technique étudiée	16
4	Études de cas de références	16
4.1	Choix des études de cas.....	16
4.2	Diversité technique des cas de figure	17
4.3	Modèles d'affaires	17
4.4	Comparaison à l'aide d'indicateurs	18
5	Étude de cas n°1 :	18
5.1	Description du projet	18
5.2	Données disponibles.....	19
5.3	Modèle technique sélectionné	20
5.4	Modèle financier sélectionné	21
5.5	Analyse de l'implantation, de l'intégration et du bruit.....	22
5.5.1	Implantation des PAC en toiture	22
5.5.2	Intégration des PAC au patrimoine bâti	22
5.5.3	Bruit admis dans le périmètre du site.....	23
5.6	Analyse des coûts	23

5.6.1	Investissement brut pour le remplacement du système	24
5.6.2	Surcoût d'investissement dû au système.....	24
5.6.3	Production d'eau chaude sanitaire.....	25
5.6.4	Régulation et raccordement électrique	25
5.6.5	Honoraires, études et frais	25
5.6.6	Récapitulatif des coûts des travaux	26
5.6.7	Aides et subventions au financement	26
5.6.8	Frais financiers et annuités	26
5.6.9	Achat du combustible : électricité et gaz.....	26
5.6.10	Frais d'entretien et d'opération.....	27
5.6.11	Prix de revient de la chaleur issue des PAC.....	28
5.6.12	Estimation de la marge pour la vente d'énergie.....	28
5.6.13	Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé.....	29
5.7	Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile	30
5.8	Conclusion de l'analyse économique.....	32
6	Étude de cas n°2 :	33
6.1	Description du projet	33
6.2	Données disponibles.....	33
6.3	Modèle technique sélectionné	34
6.4	Modèle financier sélectionné	35
6.5	Analyse de l'implantation	36
6.5.1	Implantation des PAC en toiture	36
6.5.2	Intégration des PAC au patrimoine bâti	36
6.5.3	Bruit admis dans le périmètre du site.....	36
6.6	Analyse du cycle de coût	37
6.6.1	Investissement brut pour le remplacement du système	37
6.6.2	Surcout d'investissement dû au système PAC	38
6.6.3	Production d'eau chaude sanitaire.....	38
6.6.4	Régulation et raccordement électrique	38
6.6.5	Honoraires, études et frais	39
6.6.6	Récapitulatif des coûts des travaux	39

6.6.7	Aides et subventions au financement	39
6.6.8	Frais financiers et annuités	40
6.6.9	Achat du combustible : électricité et gaz.....	40
6.6.10	Frais d'entretien et d'opération.....	41
6.6.11	Prix de revient de la chaleur issue des PAC.....	41
6.6.12	Estimation de la marge pour la vente d'énergie.....	42
6.6.13	Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé.....	42
6.7	Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile	44
6.8	Conclusion de l'analyse économique.....	46
7	Étude de cas N°3 :	47
7.1	Description du projet	47
7.2	Données disponibles.....	48
7.3	Modèle technique sélectionné	49
7.4	Modèle financier sélectionné	55
7.5	Analyse de l'implantation	55
7.5.1	Implantation des monoblocs en toiture	55
7.5.2	Intégration des PAC au patrimoine bâti	56
7.5.3	Bruit admis dans le périmètre du site.....	56
7.6	Analyse du cycle de coût	56
7.6.1	Investissement brut pour le remplacement du système	57
7.6.2	Surcout d'investissement dû au système.....	57
7.6.3	Production d'eau chaude sanitaire.....	58
7.6.4	Régulation et raccordement électrique	58
7.6.5	Honoraires, études et frais	58
7.6.6	Récapitulatif des coûts des travaux	58
7.6.7	Aides et subventions au financement	59
7.6.8	Frais financiers et annuités	59
7.6.9	Achat du combustible : électricité et gaz.....	60
7.6.10	Frais d'entretien et d'opération.....	60
7.6.11	Prix de revient de la chaleur issue des PAC.....	61
7.6.12	Estimation de la marge pour la vente d'énergie.....	61

7.6.13	Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé.....	62
7.7	Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile	63
7.8	Conclusion de l'analyse économique.....	65
8	Étude de cas N°4 :	66
8.1	Description du projet	66
8.2	Données disponibles.....	66
8.3	Modèle technique sélectionné	67
8.4	Modèle financier sélectionné	67
8.5	Analyse de l'implantation	68
8.5.1	Implantation des PAC en toiture	68
8.5.2	Intégration des PAC au patrimoine bâti	68
8.5.3	Bruit admis dans le périmètre du site.....	68
8.6	Analyse du cycle de coût	68
8.6.1	Investissement brut pour le remplacement du système	69
8.6.2	Surcoût d'investissement dû au système.....	69
8.6.3	Production d'eau chaude sanitaire.....	70
8.6.4	Régulation et raccordement électrique	70
8.6.5	Honoraires, études et frais	70
8.6.6	Récapitulatif des coûts des travaux	70
8.6.7	Aides et subventions au financement	71
8.6.8	Frais financiers et annuités	71
8.6.9	Achat du combustible : électricité et gaz.....	71
8.6.10	Frais d'entretien et d'opération.....	72
8.6.11	Prix de revient de la chaleur issue des PAC.....	72
8.6.12	Estimation de la marge pour la vente d'énergie.....	72
8.6.13	Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé.....	73
8.7	Scénario avec un champ solaire photovoltaïque	75
8.8	Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile	77
8.9	Conclusion de l'analyse économique.....	79
9	Méthodologie d'analyse technico-économique	80
9.1	Structure opérationnelle.....	80

9.1.1	Le modèle d'auto-investissement.....	80
9.1.2	Le modèle de semi-investissement.....	80
9.1.3	Le modèle de contracting.....	81
9.2	Analyse économique.....	81
9.2.1	Méthode d'analyse des coûts initiaux	81
9.2.2	Période d'analyse.....	82
9.2.3	Maintenance et remplacement.....	82
9.2.4	Le taux d'actualisation.....	83
9.2.5	L'Inflation	83
9.2.6	Limites du système	83
9.2.7	Catégories de coûts	83
9.2.8	Plan d'amortissement.....	84
10	Conclusion.....	85
10.1	Contrainte acoustique et bâtiment classé.....	85
10.2	Comparatif des scénarios PAC air-eau étudiés.....	85
10.2.1	Aspects d'intégration architecturale	86
10.2.2	Aspects sonores et vibrations	86
10.2.3	Modèle de PAC air-eau.....	86
10.2.4	Prix d'achat des combustibles et de l'électricité.....	86
10.2.5	Prix de vente de l'énergie thermique.....	86
10.2.6	Temps de retour brut et rentabilité	87
10.3	Comparatif avec variantes techniques.....	87
10.4	Choix de l'utilisation des systèmes PAC air-eau.....	88

1 Résumé du rapport / Abstract

Afin d'atteindre les objectifs fédéraux de réduction de la consommation de combustibles fossiles, le remplacement des chaudières classiques, au gaz, au mazout ou électriques, par des systèmes reposant sur des énergies renouvelables doit être encouragé. Cette problématique s'applique particulièrement aux immeubles résidentiels de moyenne taille (multifamiliaux), dans un milieu où les alternatives énergétiques sont peu nombreuses. Les pompes à chaleur de type air-eau ("PAC air eau") de grande capacité peuvent alors constituer l'unique système disponible de production de chaleur renouvelable. L'analyse du cycle des coûts de cette solution technique vise à proposer aux propriétaires ou gestionnaires de l'immeuble une méthode d'arbitrage évolutive permettant de mieux prendre en compte l'impact des coûts différés dans leur choix d'investissement.

Le présent rapport repose sur la description de cas d'études concrets, pour souligner les défis techniques et financiers, ainsi que les solutions mises en œuvre pour faciliter l'implantation de PAC air-eau. Les concepts énergétiques et le choix des modèles de fonctionnement sont introduits pour fournir des exemples de faisabilité technique. Les cas d'étude sélectionnés abordent l'installation de PAC air-eau en toiture, ou dans des locaux techniques cloisonnés. Les méthodes de limitation du bruit généré par les machines sont listées et des préconisations techniques d'intégration dans le patrimoine bâti sont suggérées.

L'analyse du cycle des coûts utilise une méthode de séparation des dépenses par CFC. Les surcoûts d'un système PAC air-eau, par rapport à une solution classique, s'équilibrent en partie à l'aide de subventions à l'investissement, mais aussi grâce à la réduction substantielle des dépenses en frais énergétiques. Les frais financiers, basés sur des hypothèses de durée d'amortissement et de taux d'intérêt des prêts bancaires, participent au calcul des annuités, qui influent alors sur le prix de revient de la chaleur. Le calcul du temps de retour brut sur investissement constitue une première comparaison avec une solution de chaudière classique. Cependant, l'interprétation de la rentabilité d'un projet d'investissement repose sur une analyse du cycle de coûts sur 20 ans, dans laquelle les coefficients d'actualisation, d'inflation et d'indexation du prix des ressources jouent un rôle prépondérant. Les coûts et frais opérationnels, administratifs, de maintenance et de remplacement des équipements, ajoutent des variables au calcul de rentabilité qui ne sont connues qu'à travers l'expérience de cas d'étude concrets. Les résultats des calculs de rentabilité révèlent la pertinence du système de production de chaleur renouvelable, à l'aide de PAC air-eau de grande capacité.

Le rapport conclut finalement que la rentabilité d'un investissement pour une PAC air-eau reste aujourd'hui inférieure à celle pour une chaudière classique, bien que les deux solutions techniques soient rentables après une période de fonctionnement entre 8 et 16 ans. Ce résultat s'explique par les annuités plus élevées pour le système renouvelable, qui prennent alors plus de poids dans le calcul, du fait de l'influence du coefficient d'actualisation. L'amélioration de la rentabilité des PAC air-eau doit passer par un changement du paradigme technique et économique actuel, c'est-à-dire une réduction des coûts d'investissement pour les solutions renouvelables, l'accès à des subventions et des aides à la performances énergétique, et une hausse du prix des combustibles fossiles. Le présent rapport permet donc de mettre en lumière le rôle de chaque critère dans le modèle d'investissement pour le remplacement d'une chaudière classique, et fournit au lecteur une méthode de calcul pour évaluer la performance de son futur projet.

2 Introduction

2.1 Contexte

La Confédération a pour objectif d'abaisser de 20% les émissions totales de gaz à effet de serre à l'horizon 2020 (par rapport au niveau de 1990), en visant notamment une diminution de 40% des émissions de CO₂ issu du secteur du bâtiment. Afin de promouvoir les énergies renouvelables dans les systèmes de chauffage, des instruments ont été mis en place au niveau fédéral, notamment le Programme Bâtiments.

Cependant, ces mesures ne seront pas suffisantes pour atteindre les taux d'émissions escomptés. En 2014, on observait une réduction des émissions totales de CO₂ de 9% par rapport à 1990 et les émissions liées au secteur des bâtiments avaient diminué de 30%. C'est pour ces raisons que l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN) souhaite continuer à promouvoir l'utilisation raisonnée de systèmes énergétiques fiables, renouvelables et rentables. Les pompes à chaleur [PAC] peuvent alors intégrer cette catégorie de systèmes, en fonction des caractéristiques du site d'implantation.

Dans l'environnement bâti et pour le cas de rénovations de bâtiments, la Confédération et les cantons mettent en place des programmes de soutien afin de sortir des énergies fossiles. Plusieurs technologies et scénarii de substitution sont encouragés : réseaux de chaleur à distance, chaudières à bois (copeaux ou pellets), valorisation de rejets de chaleur, sondes géothermiques, PAC sur nappes phréatiques, ou PAC air-eau qui sont de plus en plus utilisées lorsque les scénarii précédents ne sont pas adaptés.

L'installation de PAC air-eau de grande capacité dans des immeubles résidentiels apparaît aujourd'hui comme une alternative au renouvellement de chaudières à mazout ou au gaz. Les PAC air-eau présentent certaines contraintes, peuvent engendrer des nuisances et impacter l'image des bâtiments. Cependant, cette alternative représente une opportunité notamment lorsqu'une ancienne chaudière à mazout ou à gaz d'une installation existante tombe en panne et que le propriétaire doit trouver une solution de remplacement dans des délais très courts. Actuellement, il n'y a que peu d'expérience de comparaisons technique et économique de différents scénarii de PAC air-eau sur l'ensemble du cycle de vie d'un système énergétique.

Ce rapport technique et économique a pour but d'étudier un cas bien particulier : la recherche d'un système de production de chaleur renouvelable dans un milieu où toutes autres alternatives énergétiques ne peuvent être exploitées. Le cas d'étude sélectionné est celui du remplacement d'une chaudière fossile classique (gaz ou mazout) ou une chaudière électrique par une, ou plusieurs, PAC air-eau, dans des immeubles résidentiels de moyenne taille (multifamilial), et son implantation dans un bâtiment existant et occupé.

Une construction est un bien dont la particularité est sa longue durée de vie. Ainsi, un bâtiment en fin de vie aura coûté plus dans sa phase d'utilisation qu'à l'investissement, d'où l'importance de prendre en compte toutes les dimensions de l'utilisation d'un ouvrage dès sa conception. La norme ISO 15686-5 propose ainsi un cadrage et une méthode de calcul de l'approche en coût global.

Il s'agit donc d'explicitier plus clairement les conséquences des décisions d'investissement sur un horizon de temps couvrant le cycle de vie d'un ouvrage et ainsi servir d'outil d'aide à la décision dans le choix de renouvellement d'un système énergétique. La maîtrise du coût global est ainsi un enjeu de développement durable.

Au-delà de la simple quantification monétaire des coûts différés, cette approche offre aux acteurs de l'immobilier et de la construction un éclairage supplémentaire à la prise de décision au sens où elle vient en complément d'autres processus d'évaluation (comme l'étude des impacts environnementaux, l'analyse des risques de toutes natures ou encore l'évaluation de la qualité d'usage de l'ouvrage).

2.2 Défis liés au remplacement d'une chaudière à mazout, à gaz, ou électrique par une PAC air-eau

2.2.1 Défis liés à l'investissement

Le premier défi de la technologie des PAC est d'afficher une rentabilité plus élevée que celle des chaudières classiques. Or, pour une puissance thermique équivalente, les pompes à chaleur disponibles sur le marché suisse sont plus coûteuses à l'investissement que les différents types de chaudières à mazout. Cependant, en prenant en considération le total des coûts annuels (dont coûts d'investissement, coûts d'exploitation énergétique, coûts d'entretien et coûts d'opération), la tendance est totalement inversée et des études récentes ont conclu que les pompes à chaleur sélectionnées sur le marché local sont ainsi plus rentables que des chaudières fossiles classiques (Rapport "Prix des pompes à chaleur air-eau", SuisseEnergie 2015). Toutefois, l'importance du montant d'investissement reste le premier critère psychologique qui influe sur la décision du propriétaire du bâtiment.

2.2.2 Défis liés au confort

Un deuxième critère à ne pas négliger est l'importance de la notion de confort pour l'utilisateur final. En effet, les chaudières classiques sont connues pour fonctionner à haute température, avec des temps de réactivité très rapides, modulables et faciles à prendre en main par l'occupant. Les systèmes à basse température (50°C ou moins) et haut rendement, comme ceux par PAC air-eau, ont souvent plus d'inertie et moins de "réserve" de puissance. En outre, les politiques publiques affichent ouvertement que l'efficacité énergétique des bâtiments passera par la rationalisation des émetteurs de chaleur, à des niveaux de températures correctes¹. Les diffuseurs de chaleur devront donc fonctionner à des températures plus basses, tout en s'assurant de la présence de l'utilisateur afin de ne pas gaspiller de l'énergie non nécessaire. Les technologies de chaleur renouvelable pour les bâtiments peuvent alors se heurter aux modes de vie et habitude de confort de chacun. De plus, une certaine crainte sur la fiabilité des systèmes renouvelables existe du fait de leur développement récent, mais surtout de la maturité des systèmes fossiles.

2.2.3 Défis liés à l'intégration au bâti et bâtiments classés

Si la fumée carbonée sortant d'une cheminée est communément acceptée par l'ensemble de la population suisse, la présence d'une PAC ou d'un split sur la toiture, sur la façade ou dans le jardin d'un bâtiment, n'est pas encore acceptée par tous. Les PAC air-eau soutirent leurs calories de l'air extérieur et, de ce fait, au moins une partie de leur système doit être apparent et visible depuis l'extérieur. Bien que les ingénieurs, fournisseurs et architectes tentent autant que possible d'intégrer ces systèmes à l'apparence esthétique du bâti, l'apparence visuelle fera toujours défaut.

¹ "Parc immobilier 2050 – Vision de l'OFEN" – Document disponible sur le site de l'Office Fédéral de l'Energie

Il n'existe pas aujourd'hui en Suisse des recommandations spécifiques d'adaptation esthétique des systèmes de PAC air-eau en toiture. Chaque cas est particulier, et nécessite un travail d'architecture spécifique pour améliorer le rendu esthétique du bâti. La préconisation principale pour l'installation de ces systèmes est donc de respecter les exigences et les recommandations du Service du patrimoine et des sites, et ceci en fonction de la localisation du bâtiment.

Pour les bâtiments anciens et classés au patrimoine, faire appel à un architecte spécialisé peut impacter considérablement les coûts d'investissement, il est donc nécessaire de prévoir ces prestations dès la première phase d'étude.

2.2.4 Défis liés au bruit produit par les PAC air-eau

L'Ordonnance sur la Protection contre le Bruit (OPB), du 15 décembre 1986 (État du 1^{er} avril 2018), définit deux champs d'application de la limitation des émissions sonores produites par des machines techniques extérieures : celui des locaux sensibles à l'intérieur du bâtiment, et celui de la catégorie de secteur exposé au bruit sur lequel est construit le bâtiment accueillant l'installation technique. Les PAC air-eau sont considérées comme des installations fixes nécessaires au bon fonctionnement du bâtiment, au sens de cette ordonnance. Les limitations d'émissions sonores peuvent être effectives grâce à des mesures constructives, d'exploitation et d'orientation de l'installation technique.

Des degrés de sensibilité au bruit sont alors attribués par les autorités cantonales aux zones d'affectation dans les règlements de construction ou les plans d'affectation communaux. Les degrés de sensibilité au bruit traités dans cette étude sont le degré II, qui traitent des lieux d'habitation et de lieux publics, et le degré III, qui traitent des zones d'habitation et artisanales (zones mixtes).

Le groupement des responsables cantonaux de la protection contre le bruit a édité une note d'application à destination des propriétaires, installateurs et planificateurs souhaitant installer des PAC air-eau : cette note se nomme "Cercle bruit, Évaluation acoustique des pompes à chaleur air-eau", datée du 22 novembre 2017, en version 2016, et actuellement en révision. Le principe de précaution est primordial pour aborder le sujet de l'installation des PAC air-eau, le bruit doit être atténué autant que la technique actuelle le permet et que le coût d'une mesure acoustique soit économiquement viable. Pour ce faire, quatre règles sont à suivre :

- Choix d'une PAC avec un niveau acoustique bas
- Emplacement adéquat des parties bruyantes de la PAC

- Mesures d'insonorisation du bruit de toute sorte
- Éventuelle régulation de fonctionnement.

Les limites d'émission des PAC admissibles sont définies dans l'Annexe 6 de l'OPB, concernant le bruit de l'"industrie et métiers". Les valeurs sont représentées dans le tableau suivant :

2 Valeurs limites d'exposition

Degré de sensibilité (art. 43)	Valeur de planification Lr en dB (A)		Valeur limite d'immission Lr en dB (A)		Valeur d'alarme Lr en dB (A)	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Tableau 1 : Valeurs limites d'exposition pour les PAC air-eau, OPB 1986 (version 2018)

Les niveaux de puissance acoustique des machines considérées sont issus des données fournies par le centre de certification des PAC WPZ, ou au minimum, à partir de calculs basés sur la norme EN 14511. Le formulaire "Cercle Bruit" gratuit en ligne est disponible au téléchargement.

Comme toute machine à compression mécanique, les PAC air-eau produisent du bruit et des vibrations. Des mesures d'atténuation du bruit existent, et ont été testées avec succès, telles que : saut-de-loup avec revêtement phono-absorbant pour PAC en sous-sol, écran devant saut-de-loup, amortisseur de bruit dans les conduites d'air, grille anti-pluie amortissant le bruit, amortisseur de bruit à coulisses, capot, paroi antibruit. Toutefois, ces mesures nécessitent des investissements supplémentaires. Rappelons que les chaudières fossiles classiques possèdent elles aussi leur investissement et coûts spécifiques, comme les frais de remplissage d'une cuve, la gestion des condensats, et les coûts de ramonage.

3 Notions techniques fondamentales sur les PAC air-eau

3.1 Descriptif de la PAC air-eau

Une pompe à chaleur air-eau est une machine thermodynamique avec un évaporateur en contact avec l'air extérieur (source froide) et un condenseur relié à l'eau du réseau primaire de chauffage (source chaude). Un ventilateur mécanique force l'échange thermique entre les parois de l'évaporateur et le flux d'air extérieur

Dans un bâtiment, en cas de contraintes spatiales entre les locaux techniques de chaufferie et l'extérieur, des systèmes "Split" peuvent être utilisés, systèmes qui déportent l'évaporateur vers l'extérieur. Deux points critiques sont alors à surveiller : l'emplacement de l'évaporateur, qui brasse une quantité d'air très élevé, et celle du compresseur. Plusieurs types de PAC air-eau peuvent alors être sélectionnées sur le marché suisse :

- monobloc (compacte) extérieure, comme par exemple en toiture
- monobloc intérieur, avec prise d'air gainé en façade
- monobloc intérieur en sous-sol, avec saut de loup
- intégrée à l'intérieur d'un monobloc de ventilation d'extraction
- split en toiture, et PAC intérieure dans les combles
- split au rez-de-chaussée ou en façade, avec PAC intérieure

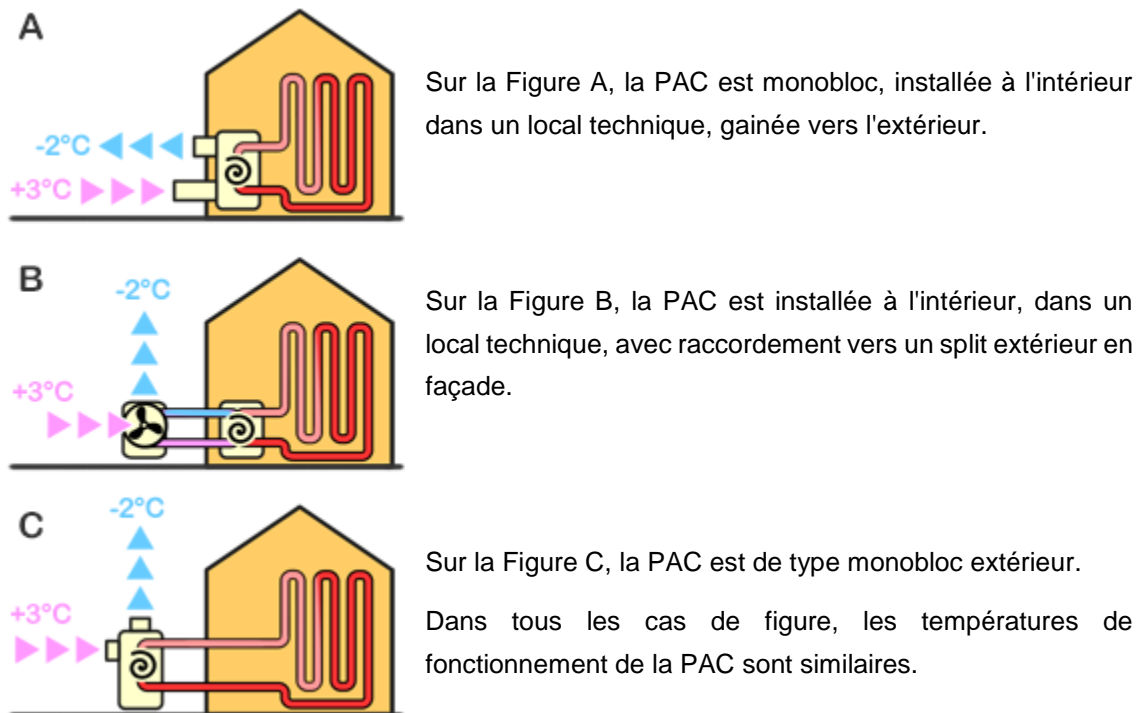


Schéma 1 : Typologies PAC air-eau²

3.2 Choix du mode de fonctionnement du systèmes PAC

Plusieurs concepts énergétiques peuvent être appliqués pour chauffer un immeuble résidentiel avec des PAC air-eau. Trois modes se démarquent et ont prouvé leur robustesse suivant les cas de figures : le mode monovalent mono-énergétique, le mode bivalent parallèle et le mode bivalent alternatif. Ces modes de fonctionnement sont choisis en connaissant les régimes de températures des réseaux de distribution (chauffage et ECS), les courbes d'appel de puissance thermique (monotone de puissance thermique) et la fiabilité des systèmes de production mis en place (risque de pannes à bas régime, meilleur COP en fonction de la puissance, etc...).

² Schéma tiré du site "Energie-Environnement.ch", page : "Les Pompes à chaleur air-eau"

3.3 Faisabilité technique étudiée

Avant de se lancer dans une analyse économique des projets de remplacement de chaudières classiques par des PAC, la faisabilité technique du projet doit être assurée. La preuve qu'un système reposant sur une production de chaleur issue de PAC convient aux activités spécifiques de l'immeuble doit être apportée.

L'un des premiers aspects à vérifier est la disponibilité de la puissance électrique suffisante pour raccorder la PAC, suivant la puissance thermique attendue, avec le COP de dimensionnement théorique. Si des travaux électriques doivent être accomplis, ces derniers provoqueront des surcoûts d'investissement.

La puissance de production thermique de la PAC doit être déterminée avec précision, en fonction des besoins en chauffage et en ECS du site et du mode de fonctionnement (bivalent, monovalent, voir point 2.3). Cette puissance détermine alors la taille de la machine, et donc influe sur son emplacement, son emprise dans un local technique ou à l'extérieur, le bruit produit par ses compresseurs et le poids du support de la machine. Suivant les durées de fonctionnement calculées, le volume des ballons tampons d'accumulation est alors déterminé, et doit être implanté dans le local technique.

En cas de PAC monobloc intérieur, l'air doit être amené depuis une prise d'air extérieur jusqu'à la machine, par un réseau de gaines étanche, ou par un saut de loup, conformément aux normes SIA 382/1 sur le respect des prescriptions de débits, de vibration et de bruit produit par les installations de ventilation. Après avoir traversé l'évaporateur, l'air froid doit être évacué loin des prises d'air neuf du bâtiment ou des ouvrants, afin de ne pas perturber le confort des usagers.

4 Études de cas de références

4.1 Choix des études de cas

Afin de baser cette analyse technico-économique sur des cas d'étude concrets, quatre projets ont été sélectionnés, avec des caractéristiques bien différentes. Trois des ouvrages étudiés se situent sur le canton de Genève, et un sur le canton de Fribourg. Les 3 premiers projets ont été réalisés, alors que le dernier n'a pas été retenu par le maître de l'ouvrage, lui préférant une solution de référence basée sur une énergie fossile. Pour des raisons de confidentialité sur les méthodes d'investissement, et sur les choix décisionnels relatifs aux systèmes d'exploitation, l'adresse exacte de ces sites, ainsi que les noms des propriétaires et des entreprises, seront gardés anonymes. Toutefois, ces sites se distinguent par les caractéristiques suivantes :

1. Bâtiments résidentiels : remplacement du système de production de chaleur uniquement.
2. Bâtiments résidentiels : assainissement de l'enveloppe thermique, remplacement des émetteurs de chaleurs et remplacement du système de production de chaleur.
3. Immeuble résidentiel : assainissement de l'enveloppe thermique, remplacement des émetteurs de chaleurs et remplacement du système de production de chaleur.

4. Bâtiments résidentiels : étude du remplacement de la production de chaleur classique ; abandon de la solution PAC air-eau pour une chaudière classique au gaz.

		Projet n°1	Projet n°2	Projet n°3	Projet n°4
Mode de fonctionnement		Bivalent	Monovalent	Bivalent	Monovalent
Type de PAC		Monobloc	Splits	Module-monobloc	Monobloc
Taux de couverture PAC	%	75%	90%	80%	95%
Puissance PAC	kW	210	36	80	100

Tableau 2 : Récapitulatif des données principales des cas d'étude

Dans tous ces scénarios, des PAC air-eau ont été installées ou prévues dans le but d'augmenter la part d'énergie renouvelable dans le mixe d'énergie thermique des sites.

4.2 Diversité technique des cas de figure

Le premier projet concerne un remplacement d'une chaudière à gaz classique par des PAC monobloc air-eau sur une toiture plate, avec seulement la rénovation de la toiture sur laquelle sont posées les machines. Le reste de l'enveloppe thermique n'a pas été modifiée, et de ce fait, les diffuseurs de chaleur sont restés inchangés (radiateurs hydrauliques).

Les deux projets suivants sont intervenus lors de travaux d'ampleur pour l'assainissement complet de l'enveloppe thermique des bâtiments, avec remplacement des diffuseurs de chaleur, comprenant en supplément des niveaux de surélévation.

Dans le second projet, les PAC air-eau sont des modèles intérieurs installés dans un local technique sous combles, avec "splits" (éléments séparés) sur la toiture plate d'un bâtiment de 3 étages. Le fonctionnement des PAC est en monovalence bi-énergétique, avec un appoint électrique.

Dans le troisième projet, les PAC air-eau sont intégrées aux monoblocs d'extraction d'air des bâtiments, et ont pour but de chauffer les nouveaux étages de la surélévation. Le fonctionnement des PAC est en bivalence, avec un appoint par chaudière mazout.

Le quatrième projet, non-réalisé, devait être semblable au premier projet, avec PAC monobloc en toiture, sans rénovation de l'enveloppe du bâtiment.

4.3 Modèles d'affaires

Les études de cas détaillées dans ce document présentent des modèles d'affaires allant du contracting à l'auto-investissement classique du propriétaire, ou au semi-investissement, avec investissement du propriétaire à hauteur du prix d'une chaudière gaz classique. Les temps de retour sur investissement sont estimés entre 10 et 25 ans suivant les cas de figure.

Puisque le prix de vente de l'énergie thermique produite par les PAC air-eau peut grandement varier, en fonction des différents modèles d'affaires ou de la localisation géographique, cette étude se concentre principalement sur le calcul du coût de revient de la chaleur (appelé aussi coût de production).

4.4 Comparaison à l'aide d'indicateurs

Chaque bâtiment de cette étude peut être considéré comme un prototype singulier, qui possède ses propres contraintes de localisation, d'aménagement et de construction. De plus, les acteurs des projets étudiés (propriétaires, entreprises, direction des travaux, ingénierie) utilisent leurs outils de calculs, de planification et de management, ce qui a tendance à complexifier chaque projet. Afin de pouvoir comparer les résultats de chaque cas d'étude, et d'analyser la rentabilité potentielle des PAC air-eau lors d'un remplacement de chaudière fossile, des indicateurs financiers pertinents doivent être mis en place et répertoriés.

Ces indicateurs permettent de quantifier les données traitées, en ramenant des montants à une unité surfacique, une unité de puissance ou une unité immobilière. Les indicateurs utilisés dans cette étude sont alors :

- L'investissement pour une surface : CHF / m²
- L'investissement pour une puissance donnée : CHF / kW
- La puissance installée pour une surface : kW / m²
- La charge annuelle des coûts d'opération : CHF / an
- Prix de revient de l'énergie thermique produite : cts/kWh
- Prix de vente de l'énergie thermique : cts/kWh
- Marge de sécurité pour les PAC : cts/kWh

La comparaison de ces indicateurs interviendra à la fin de cette étude, une fois que les quatre études de cas auront été analysées, et leur rentabilité calculée.

5 Étude de cas n°1 :

5.1 Description du projet

Ce premier cas d'étude concerne deux bâtiments résidentiels dans le Canton de Genève. Le site comporte deux immeubles, construits dans les années 1970, et qui n'ont pas connu d'assainissement de façade depuis cette époque. La chaufferie du site, où se situe le collecteur-distributeur des réseaux de chauffage, se situe au premier sous-sol de l'un des deux bâtiments, comprenant ensemble, sept allées. Dans ce local technique, deux chaudières gaz identiques, de marque STREBEL, avec brûleurs Cuenod, assuraient la production de chaleur du site.

Les travaux réalisés ont consisté au remplacement d'une des deux chaudières à gaz de 240 kW installée en 1993, par 6 PAC air-eau, monoblocs extérieurs, installées en toiture du bâtiment A, d'une puissance unitaire de 35 kW. Le raccordement hydraulique entre les condenseurs des PAC et la chaufferie se fait par la descente des conduites en façade, à la verticale du local technique. Seule l'isolation de la toiture a été refaite, afin d'installer les nouvelles PAC sur une toiture rénovée.



Photo 1 : Installation des PAC en toiture



Photo 2 : Descente des conduites en façade

Le propriétaire des PAC air-eau est différent du propriétaire du bâtiment et a piloté lui-même les travaux de remplacement de la production de chaleur du site. En signant un accord de contracting avec le propriétaire des bâtiments, il est aujourd'hui en charge de l'approvisionnement en chaleur pour le chauffage et l'eau chaude délivrée aux locataires.

5.2 Données disponibles

Les PAC mises en place sont de marque Alpha Innotec, de type LWA 310, d'une puissance thermique nominale de 35.0 kW, avec un COP de 4.02 dans les conditions A7/W35 (air extérieur à 7°C et eau chaude produite à 35°C). Le fluide frigorigène employé par ces machines est le R404a (GWP = 3'800), avec une charge de 13.0 kg par appareil. Le courant de démarrage de cette machine est égal à 38 A.

Ces immeubles résidentiels, construits sur la rive gauche du canton de Genève, au-dessus de la nappe phréatique potable du Genevois, se situent dans une zone d'interdiction de forage géothermique. De plus, du fait de la nouvelle réglementation OPair 2018, les émissions de NOx et de particules fines sont particulièrement encadrées dans le centre-ville de Genève. De ce fait, il est alors interdit d'installer des chaudières à bois, à copeaux ou à pellets. Les données disponibles sur le portail des SITG de Genève concernant la SRE et l'IDC des bâtiments sont alors les suivantes :

N° Chemin	3	5	7	9	11	13	15	TOTAL
SRE [m ²]	918	953	959	953	914	1433	1433	7563
IDC [MJ/m ² .an]	475	475	475	475	475	474	474	475
Nb preneurs	9	11	9	8	13	13	14	77

Tableau 3 : SRE et IDC par immeuble du bâtiment résidentiel (Source : SITG)

Les 4 premiers numéros d'allée correspondent à l'immeuble A du site, les trois suivants sont eux associés à l'immeuble B. Le nombre de preneurs est le nombre d'appartement par allée.

5.3 Modèle technique sélectionné

Le schéma de principe du montage hydraulique de production et distribution de chaleur est alors le suivant :

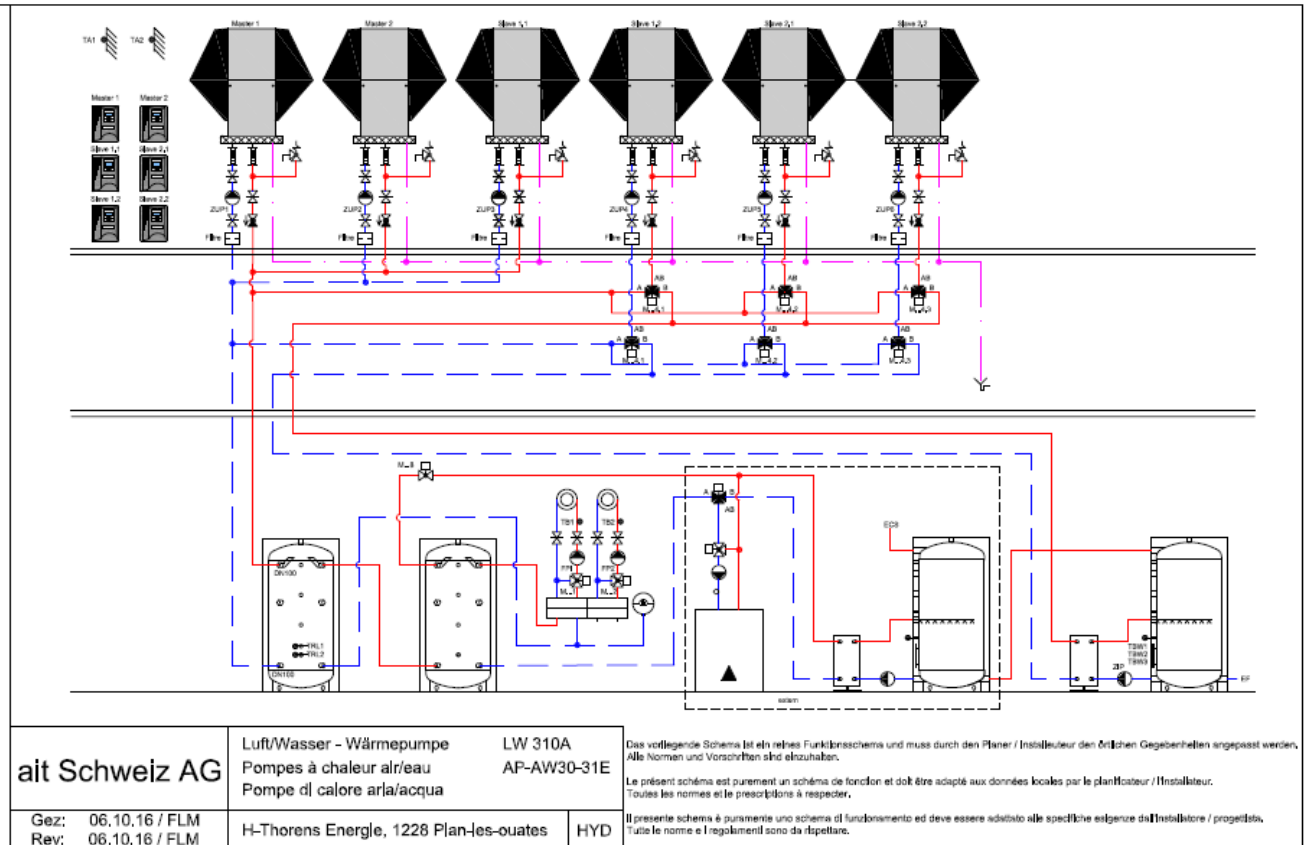


Schéma 2 : Schéma de principe hydraulique de la production et distribution de chaleur

Sur la toiture du site, un ensemble de 6 PAC similaires est en place : 3 unités sont dédiées en priorité à la production d'ECS, 3 autres PAC sont dédiées au chauffage. Quand la demande pour l'ECS s'arrête (température du second ballon ECS atteinte), les 3 PAC du premier groupe peuvent alors fonctionner pour le chauffage. Après plusieurs essais de réglage, un paramétrage commun a été appliqué à ces deux groupes : en cas de demande de chaleur, une seule PAC va s'enclencher, jusqu'à atteindre 100% de la puissance de ses compresseurs, puis une seconde PAC s'enclenchera et ainsi de suite. Cet enclenchement en série évite les problèmes de défaut de haute pression (HP), qui intervenaient avec un réglage en parallèle, lorsque plusieurs machines étaient toutes à la limite basse de fonctionnement (25%). La régulation des machines est gérée par le fournisseur des PAC, l'entreprise Alpha Innotec.

Les PAC du groupe ECS sont configurées pour atteindre une température de départ de 45°C lorsqu'une demande de charge des accumulateurs d'eau chaude est enregistrée. Cependant, si la demande en température est supérieure à ce niveau, le COP des machines est alors fortement réduit. C'est pour cette raison que le cycle anti-légionelles, qui permet d'élever la température des accumulateurs d'eau chaude de 60°C à 65°C pendant une heure, et ce 2 fois par semaine, est assuré par la chaudière à gaz restante.

La chaudière à gaz utilisée dans ce concept énergétique est une des deux chaudières existantes (de 1993), similaire à celle remplacée pour l'installation des 6 PAC air-eau, d'une puissance thermique de 240 kW. Le rôle de cette chaudière est d'assurer l'appoint énergétique pour amener la température de départ des réseaux de chauffage à 70°C et celle du premier ballon ECS à 60°C, en cas de forte demande. De ce fait, le fonctionnement des PAC et de la chaudière gaz est une bivalence parallèle, et ce, toute l'année. Le mode bivalent alternatif n'est pas recommandé si les PAC ou les conduites sont en extérieur en raison du risque de gel ; en effet, l'utilisation de glycol dans le circuit PAC n'est pas souhaitable (prix, entretien, énergie de pompage).

Le suivi de production énergétique de cette installation durant ses premières années de fonctionnement a démontré que le taux de couverture d'énergie thermique attribuable aux PAC air-eau s'élevait à 75% de la production globale du site. Le COPa des PAC a été calculé à 3,0. Cette valeur est en accord avec les résultats attendus, mais les propriétaires des installations techniques ont bon espoir d'optimiser le fonctionnement des installations dans un proche avenir. Les 25% restants sont assurés par la chaudière gaz. Notons que ces 25% ont nécessité un investissement minimum, comprenant le remplacement des circulateurs et des organes hydrauliques de réglage, puisque la chaudière gaz est existante (mais âgée de 1993). Le fait de conserver une unité de production existante a pour conséquence de baisser les coûts d'investissement, et donc le prix de revient de la chaleur produite par l'ensemble du système. L'exploitant espère pouvoir faire fonctionner cette chaudière durant l'entièreté du cycle de vie des PAC, soit pendant 20 ans. Un remplacement du brûleur et une maintenance appliquée seront alors nécessaires.

5.4 Modèle financier sélectionné

Le modèle financier de ce projet respecte celui d'un programme de contracting (sous-traiter la planification, le financement, l'installation et l'exploitation d'installations de production d'énergie). Les propriétaires des installations techniques prennent en charge la majorité des coûts d'investissement, le propriétaire du bâtiment ne paye que le coût d'investissement qu'il aurait dû investir pour une chaudière fossile classique. L'énergie thermique est vendue du propriétaire des installations au propriétaire du bâtiment. Ensuite le propriétaire du bâtiment facture aux locataires les frais d'entretien, les frais d'opération et les coûts d'exploitation (énergie consommée par les PAC et par la chaudière gaz existante). Il est à noter toutefois que le propriétaire des bâtiments a financé entièrement l'investissement pour l'assainissement et l'isolation de la toiture du site.

Chaque PAC est munie de son compteur de production thermique, et de consommation électrique. La vente de la chaleur est réalisée à un tarif situé entre 15 et 18 cts/kWh thermique. Le prix exact ne peut pas nous être communiqué pour des raisons de confidentialité. De ce fait, il a été décidé de fixer le prix de vente de l'énergie thermique à 16 cts/kWh afin d'analyser la rentabilité de ce projet. Dans la chaufferie un compteur électrique sert à mesurer la consommation des pompes de circulation, du brûleur de la chaudière à gaz et des auxiliaires de vanneries.

Le calcul exact du temps de retour sur investissement n'a pas pu être communiqué par les propriétaires de l'installation, mais celui-ci est annoncé supérieur à 10 ans. Les TRI (Taux de rendement Interne, voir analyse économique ci-après), sont assez faibles pour ce type d'installation.

5.5 Analyse de l'implantation, de l'intégration et du bruit

5.5.1 Implantation des PAC en toiture

Pour des raisons de solidité de la toiture plate, et suite aux conseils de l'ingénieur en génie civil mandaté pour étudier la structure porteuse existante du site, les PAC ont été disposées au milieu de la toiture du bâtiment A, sur une même ligne suivant la longueur du bâtiment. Ces PAC sont installées sur des socles bétons, avec une bande acoustique comme couche d'isolation phonique (vibration). Les conduites hydrauliques, sur le réseau primaire vers la chaufferie, côté condenseurs prennent alors l'intégralité de la surface orientée vers le Nord-Ouest du site.



De



Photo 3 : Conduites hydrauliques sur la toiture plate du bâtiment

Photo 4 : Vue depuis la rue de l'immeuble résidentiel

l'autre côté, sur la surface orientée Sud-Est, des gaines d'extraction d'air des commerces et restaurants du rez-de-chaussée sont disposées, avec notamment des tourelles d'extractions mécaniques. Nous notons de ce fait, qu'il n'existe plus de surface disponible pour l'intégration de panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques.

5.5.2 Intégration des PAC au patrimoine bâti

D'un point de vue esthétique, les PAC sont visibles depuis les rues environnantes, dans un quartier industrialisé. Aucune mesure visant à les masquer ou à les intégrer aux mobiliers urbains ou à celui du bâti n'a été mise en place. La remarque principale, suggérée par le propriétaire des installations, est que le paysage de cette commune de Genève est largement industrialisé. De ce fait, l'ensemble des toitures du quartier abrite des installations techniques apparentes, et cela ne semble pas gêner outre mesure les occupants.

5.5.3 Bruit admis dans le périmètre du site

Le modèle LWA 310 des PAC air-eau sélectionnées possède deux compresseurs et un ventilateur qui pulse et aspire un débit d'air extérieur de 7'800 m³/h. La puissance acoustique de cette machine, suivant le calcul ERP / EN 12102 (acceptable dans le formulaire "Cercle Bruit") est $L_{WA} = 64$ dB(A). D'après l'Annexe 6 de l'OPB (version 2018), le secteur où se situe notre projet est une zone résidentielle et commerciale, appartenant à la catégorie III (zone mixte) de sensibilité au bruit. De ce fait, pour rappel, le niveau d'émission sonore mesuré à partir de la fenêtre du local sensible le plus proche, située à 8m de la source d'émission, ne doit pas dépasser 60 dB(A) de jour et 50 dB(A) de nuit. En remplissant le formule de calcul "Cercle bruit", le niveau d'évaluation sonore est calculé à 49 dB(A), ce qui est conforme à la réglementation en vigueur.

En pratique, lors du fonctionnement nocturne d'une PAC, un occupant de l'immeuble s'est plaint des nuisances sonores engendrées. Après tests et mesures, il s'avère que le niveau acoustique était bel et bien dépassé localement. De ce fait, une adaptation du réglage de cette PAC a été appliquée, afin de limiter son fonctionnement sur la plage nocturne entre 23h et 7h.

Dans le projet réalisé, le bruit solidien à travers les dalles de la toiture est amorti par une bande acoustique située entre la PAC et le socle béton. Cette solution suffit à amortir convenablement les vibrations. En cas d'un niveau d'émissions calculé plus élevé (distance trop faible entre émission et réception), l'ajout de caissons acoustiques sur les prises d'air des machines peut être réalisé comme mesure supplémentaire. Si nécessaire dans le futur, le fournisseur des machines propose d'installer des caissons acoustiques qui apporteraient une atténuation de -3 dB(A).

5.6 Analyse des coûts

Cette analyse des coûts du projet se base sur plusieurs données et hypothèses. Afin de préciser la provenance des données, un code couleur est mis en place. Une case blanche représente une valeur vérifiée ou fournie par le propriétaire des installations techniques. Une case orange est une donnée récoltée sur des plateformes publiques, telle que le site des SITG à Genève. Une case vide et bleue est une donnée existante (investissement réalisé), mais non disponible ou confidentielle (non communiquée par le propriétaire ou l'entreprise). Une case vide et blanche est une donnée nulle, c'est-à-dire un investissement non réalisé ou un projet abandonné. Enfin, les cases vertes sont des hypothèses prises afin de calculer la rentabilité économique du projet. Certaines données essentielles (prix de vente de l'énergie, prix d'achat de l'électricité, taux d'emprunt bancaire, etc.) doivent être renseignées dans le calcul afin de donner un résultat concret et comparable entre les cas d'étude. Par la suite, chaque hypothèse sera détaillée, accompagnée de commentaires expliquant les raisons du choix des valeurs sélectionnées.

x	Valeur privée vérifiée
x	Valeur publique
-	Valeur non diffusée
-	Valeur nulle

x	Hypothèse
---	-----------

Tableau 4 : Légende du code couleur de l'analyse économique du cycle des coûts

Ce premier tableau rassemble les données de base du projet. Notons que l'indicateur d'appel de puissance égal à 28 W/m² ne prend en compte que la puissance des PAC, et non celle de la chaudière gaz existante :

A0 : Données techniques du site			
Puissance thermique demandée: Pmax des PAC		210	kW
Surface de référence énergétique : SRE		7 563	m ²
Indice de dépense d'énergie moyen: IDC (3ans)		475	MJ/m ² .an
Consommation d'énergie thermique totale		997 896	kWh/an
Objectif part d'énergie issue de la PAC		75%	énergie totale
Indicateur d'appel de puissance surfacique : Pmax/SRE		28	W/m ²

Remarque : L'IDC sur 3 ans est égal à 132 kWh/m²

5.6.1 Investissement brut pour le remplacement du système

Le coût d'investissement de 348'000 CHF se répartit dans chacune des lignes du tableau, mais les données exactes n'ont pas été diffusées :

A1 : Production de chaleur par les PAC			
Prix des PAC air-eau (machines)		-	CHF HT
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		-	CHF HT
Prix des accumulateurs de chaleur		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		-	CHF HT
Divers, imprévus, autres		-	CHF HT
Total production par PAC		348 500	CHF HT

5.6.2 Surcoût d'investissement dû au système

Aucune mesure d'atténuation de bruit aérien n'a été mise en place, les PAC étant des monoblocs posés directement sur la toiture. Cependant ce modèle peut être équipé d'amortisseurs supplémentaires sur ses prises d'air. Cette solution est actuellement à l'étude pour réduire encore d'avantage le bruit de ces machines, pour le confort de tous les habitants de la zone.

A2 : Surcoûts liés à l'installation des PAC			
Plus value d'installation : grutage sur la toiture		28 696	CHF HT
Adaptation de toiture: maçonnerie, supportage, socles		27 538	CHF HT
Adaptation de l'alimentation en puissance électrique		4 625	CHF HT
Mesures d'atténuation acoustique		-	CHF HT
Mesures de sécurisation de la toiture		-	CHF HT
Mise en conformité concept incendie		-	CHF HT
Ventilation du local technique cloisonné		-	CHF HT
Intégration de la partie visible de la PAC au bâti		-	CHF HT
Total surcoûts		60 859	CHF HT

5.6.3 Production d'eau chaude sanitaire

La production d'ECS étant en partie réalisée par les PAC, la rénovation de la partie sanitaire est comprise dans l'analyse économique du projet. Le coût d'investissement pour la production d'ECS de 38'900 CHF se répartit dans chacune des lignes du tableau, mais les données exactes n'ont pas été diffusées :

A3: Production d'eau chaude sanitaire			
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		-	CHF HT
Echangeur entre le réseau primaire et le réseau ECS		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		-	CHF HT
Divers, autres		-	CHF HT
Total production d'ECS		38 900	CHF HT

5.6.4 Régulation et raccordement électrique

A4: Régulation et tableaux électriques			
Automates de régulation et réglages		18 794	CHF HT
Raccordement électrique		25 058	CHF HT
Compteurs d'énergie		7 430	CHF HT
Tableaux électriques		18 794	CHF HT
Total régulation électrique		70 076	CHF HT

5.6.5 Honoraires, études et frais

Ce poste peut varier suivant la complexité des études préliminaire et des études de faisabilité. Le pourcentage indiqué représente la part de l'investissement total du projet affecté aux coûts d'études et d'honoraires :

A5 : Honoraires, étude et frais			
Honoraires architecte, ingénieurs civil, CVCSE	1.5%	8 000	CHF HT
Honoraires direction des travaux	2.8%	15 000	CHF HT
Etablissement des servitudes (ingénieurs, notaires taxes et redevances)		-	CHF HT
Divers, différence engagée, autres		- 2 085	CHF HT
Total honoraires et frais		20 915	CHF HT

5.6.6 Récapitulatif des coûts des travaux

5.6.7 Aides et subventions au financement

Sur le canton de Genève, le "Programme Bâtiments" stipule que seules les PAC fonctionnant comme chauffage principal sont susceptibles de pouvoir prétendre à une subvention. Celle-ci se partage en une part fixe de 13'000 CHF et une part variable de 200 CHF/kW pour les puissances d'installation supérieures à 50 kW. Le propriétaire n'a pas confirmé avoir reçu ces subventions, de ce fait les cases sont représentées en couleur verte :

A7 : Financement (aides et déductions)			
Impôt préalable sur investissement		-	CHF
Subvention PAC air-eau P>50 kW	Forfait	13 000	CHF
canton de Genève	Variable	42 000	CHF/kW
programme Bâtiments	Total	55 000	CHF
Subvention aux clients	Base	-	CHF/kW
	Total	-	CHF
Total aide au financement		55 000	CHF
Coût de l'ouvrage après déductions des aides		525 772	CHF TTC
Total TTC		580 772	CHF TTC

5.6.8 Frais financiers et annuités

La durée de 20 ans est prise comme hypothèse de calcul pour l'ensemble de cette étude. Cette durée reflète la durée de vie minimale d'une PAC air-eau dans son ensemble (pas seulement compresseur, ou autre composant pris individuellement). Le taux d'intérêt de l'emprunt bancaire a été évalué à 3.5% pour cette étude. En analysant les informations publiques sur les sites internet de grandes banques suisse (UBS, Crédit Suisse, Raiffeisen), les calculateurs en ligne indiquent des taux minimums de 4.5% pour des emprunts de 250'000 CHF. Dans ce cas d'étude n°1, l'emprunt est considéré égal à 525'000 CHF sur 20 ans. De ce fait, il paraît logique de viser un taux d'intérêt bancaire entre 2 et 4%. Afin de se situer dans un cas de figure légèrement défavorable, le taux a été fixé arbitrairement à 3.5%, mais pourrait être renégocié auprès de l'établissement bancaire :

A8 : Frais financiers			
Taux d'intérêt bancaire		3,50%	
Durée d'amortissement (moyen)		20	ans
Annuité en %		7,04%	
Montant investi		580 772	CHF TTC
Annuités: inérêts et amortissement sur l'investissement brut		40 864	CHF/an
		5,5	cts CHF/kWh
Montant investi net après déduction de l'impôt préalable, des aides financières de l'état, et de la participations des clients		525 772	
Annuités: intérêts et amortissements sur investissement net		36 994	CHF/an
		4,9	cts CHF/kWh

5.6.9 Achat du combustible : électricité et gaz

Le propriétaire des PAC air-eau bénéficie d'un tarif réduit sur l'électricité, en vertu de sa consommation annuelle élevée. En cas de puissance élevée, le prix d'achat de l'électricité peut alors être négocié à la baisse. Le prix de l'électricité consommée sur site est supposé égal à 18 cts/kWh,

ce qui est relativement bas par rapport au prix du marché (entre 20 et 22 cts/kWh). Ce prix découle du fait que la consommation électrique du site s'élève au-dessus de 100'000 kWh/an.

Comme précisé dans la description technique du projet, 75% de l'énergie thermique est produite par les PAC avec un COPa de 3.0, et les 25% restants proviennent de la chaudière gaz. Le prix d'achat du gaz naturel est estimé par BG Ingénieurs Conseils à 11.2 cts/kWh comparativement à d'autres ensembles immobiliers en périphérie du site :

B : Achat du combustible			
Consommation de chaleur des clients			997 896 kWh/an
Chaleur via la PAC		75%	748 422 kWh/an
COPa de la PAC			3.00 kWh/an
Electricité consommée par la PAC			249 474 kWh/an
Achat de l'électricité			
	prix unitaire		18 cts/kWh
	consommation annuelle		44 905 CHF/an TTC
Chaleur via la chaudière gaz		25%	249 474 kWh/an
Achat du gaz naturel sur le réseau			
	prix unitaire		11.2 cts/kWh
	consommation annuelle		27 941 CHF/an TTC
Total achat combustible			72 846 CHF/an TTC

5.6.10 Frais d'entretien et d'opération

Pour donner suite à la mise en service des PAC, l'installateur de ces machines fut en charge de leur entretien et de leur réglage durant les deux premières années de fonctionnement. À la fin de cette période, sur demande du propriétaire des bâtiments, les propriétaires des installations ont signé un nouveau contrat de maintenance avec l'entreprise chargée de l'entretien de l'ensemble du site (réseau de distribution). Le prix de la maintenance pour cette installation est supposé égal à 7'500 CHF/an. Le contrat de maintenance a été négocié pour une durée de 3 ans.

Le coût total de 19'500 CHF/an est communiqué par l'assistant du maître de l'ouvrage, qui a la charge du suivi de la performance des machines après travaux. L'ensemble des coûts de remplacement, d'opération, d'assurance, de suivi d'étude et autres frais, ne sont pas connus avec exactitude, mais représente le complément, soit 13'000 CHF/an.

C : Frais d'entretien et d'opération			
Frais d'entretien : contrat de maintenance			7 500 CHF/an HT
Frais d'entretien : remplacement ou réserve			- CHF/an HT
Ramonage			- CHF/an HT
Frais d'opération			- CHF/an HT
Assurances			- CHF/an HT
Suivis de performance des installations			- CHF/an HT
Autres frais			- CHF/an HT
Total frais de maintenance			19 500 CHF/an HT

5.6.11 Prix de revient de la chaleur issue des PAC

Le prix de revient de l'énergie représente le coût supporté pour équilibrer les dépenses et les gains par la production et la vente de l'énergie thermique aux habitants. Le prix d'achat des combustibles représente plus de 50% du prix de revient de la chaleur. Ce prix de revient est un outil primordial qui permet de comparer les différentes variantes technologiques, avant d'intégrer les notions de marges et de temps de retour sur investissement :

D : Prix de revient de la chaleur issue des PAC					
Chaleur vendue aux clients				997 896	kWh/an
Prix de revient de la chaleur brut (sans participations financières extérieures)					
	Annuités		31%	40 864	CHF/an
	Combustible		55%	72 846	CHF/an
	Maintenance		15%	19 500	
	Total			133 210	CHF/an
	Prix de revient de la chaleur			13.3	cts TTC CHF/kWh
Prix de revient de la chaleur net avec participations extérieures					
	Annuités		29%	36 994	CHF/an
	Combustible		56%	72 846	CHF/an
	Maintenance		15%	19 500	CHF/an
	Total			129 340	CHF/an
	Prix de revient de la chaleur			13.0	cts TTC CHF/kWh

5.6.12 Estimation de la marge pour la vente d'énergie

Le temps de retour brut se calcule sans tenir compte d'un emprunt, générant des intérêts à rembourser par annuités, ni le taux d'actualisation et l'indexation des frais annuels. Il s'agit de la division de l'investissement total (Tableau A7) par la différence entre le gain économique par vente d'énergie et les dépenses annuelles sans annuités : Investissement / (Gain - Dépense).

Afin d'harmoniser les conclusions de chaque cas d'étude, nous avons délibérément choisi comme hypothèse un prix de vente de l'énergie à l'utilisateur final à 16 cts/kWh. La différence entre le prix de revient de la chaleur et le prix de vente peut être nommée la marge de la vente d'énergie. Cette marge ne se justifie qu'en prenant en compte les paramètres du chapitre suivant : le taux d'actualisation, les taux d'indexation des combustibles, et le taux d'inflation. L'investissement étant plus élevé pour une solution avec PAC air-eau que pour une chaudière classique au gaz, il péjore la rentabilité du projet. Afin d'accélérer le temps de retour actualisé du projet, une marge peut être additionnée. Cette marge se justifie pour couvrir les fluctuations des valeurs financières des devises, des coûts de main-d'œuvre et d'opération, et des cours des matières premières. La marge ajoute donc de la sécurité au projet en augmentant artificiellement sa rentabilité

E : Marge estimée pour le vendeur d'énergie			
Prix de vente de l'énergie thermique estimé		16.0	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de la part du vendeur d'énergie	13%	2.0	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de sécurité pour production PAC	6%	1.0	cts TTC CHF/kWh
Gain économique par vente d'énergie		159 663.3	CHF/an
Dépenses annuelles sans annuité		92 346.4	CHF/an
Temps de retour brut		7.8	an

5.6.13 Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé

Le tableau suivant rassemble les coefficients d'actualisation des coûts et des prix des combustibles utilisés dans les calculs de cycle des coûts d'un projet d'investissement pour PAC air-eau :

Taux d'inflation en Suisse (moyenne sur 10 ans)	1,0%
Taux d'indexation sur les frais opérationnels	0,5%
Taux d'indexation sur les combustibles	2,0%
Taux d'actualisation	5,0%

Tableau 6 : Taux employés dans l'analyse des coûts

Les valeurs de l'inflation moyenne en Suisse durant les 10 dernières années provient de l'Office Fédéral de la Statistique, suivant le dernier rapport d'octobre 2018. Les taux d'indexation proviennent du document " Manuel de l'Industrie, notions et données d'économie d'énergie", du programme RAVEL. Le taux d'actualisation est supposé égale à 5% de manière arbitraire.

Le graphique suivant représente les coûts d'investissement nécessaires tout au long du cycle de vie du système de production de chaleur, comprenant l'investissement initial, mais également tous les coûts et frais d'exploitation annuels ou extraordinaires (remplacement de pièces) :

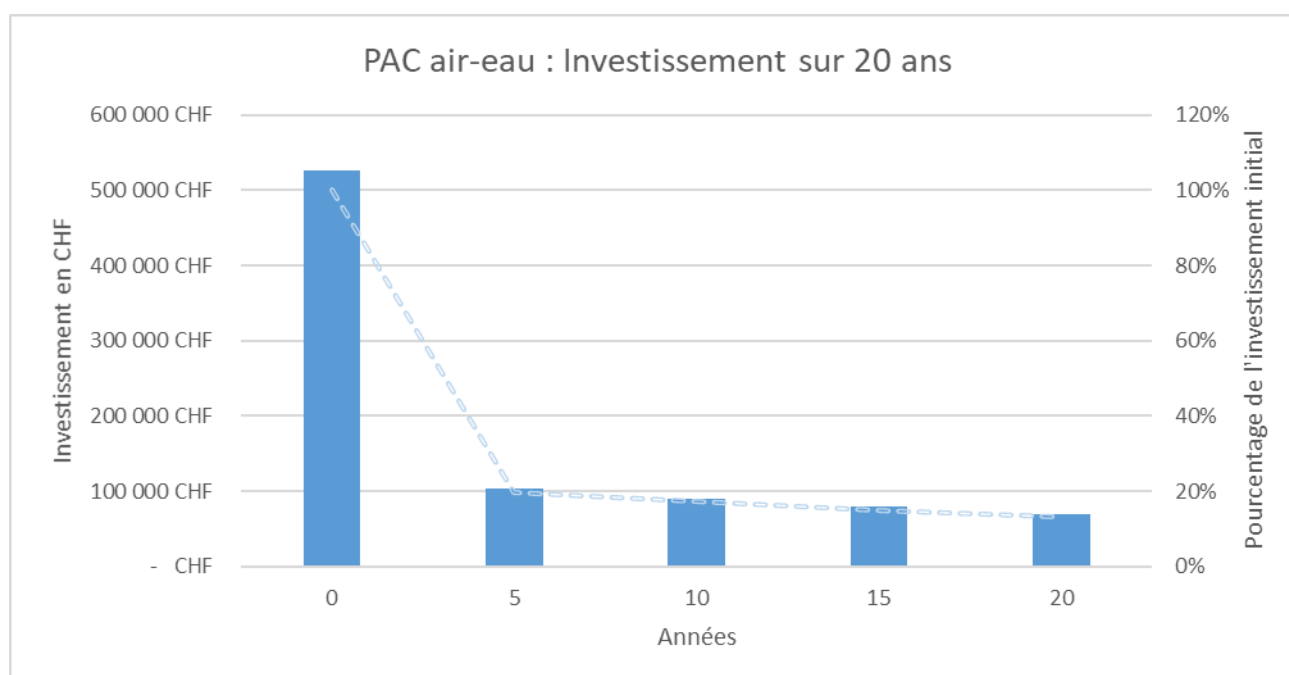


Figure 1 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de PAC air-eau

Afin de pouvoir juger de la rentabilité de ce projet sur un horizon de 20 ans, le calcul de la valeur actualisée est nécessaire sur la période du calcul de cycle des coûts (qui est égale à 20 ans ici). Cette valeur représente la différence entre l'investissement initial et le flux de trésorerie actualisé et additionné chaque année, compte tenu du taux d'actualisation de 5%. À partir du moment où cette valeur de VAN devient positive, le projet devient rentable :

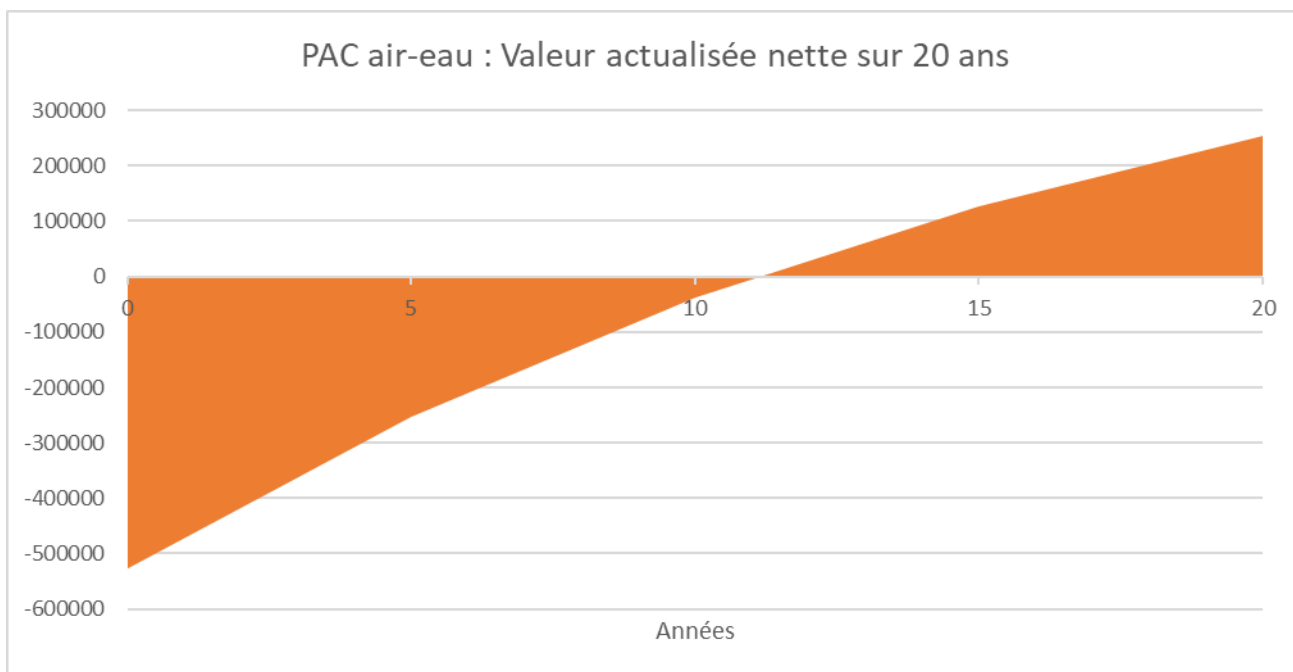


Figure 2 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet avec PAC air-eau

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet est de 11 ans. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est un indicateur important qui permet de mesurer la pertinence d'un projet. Il s'applique sur la série du flux de trésorerie actualisé (liste annuelle des différences entre recette de vente d'énergie actualisée et dépenses en frais d'exploitation actualisés), et ramène l'ensemble de ces résultats sur un rendement annuel appliqué à la durée d'étude. Ici sur 20 ans, ce TRI est égal alors à 5.1 % pour le cas d'étude n°1. L'installation de PAC air-eau, avec un complément de gaz est donc très rentable sur un horizon de 20 ans, avec le remplacement d'une chaudière existante sur deux.

5.7 Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile

Le coût des factures de gaz avant le remplacement et l'installation de PAC air-eau se chiffrait à 111'764 CHF/an. Après travaux d'assainissement de la chaufferie, le coût d'exploitation du nouveau système bivalent parallèle PAC-Chaudière, c'est-à-dire l'addition des coûts pour l'énergie électrique et pour le gaz naturel de la chaudière d'appoint, s'élèvent à 72'846 CHF/an. Une différence de 38'918 CHF/an, soit 35%, peut être calculée en faveur de ce nouveau système renouvelable.

De plus, le bilan environnemental de ces installations doit également entrer en jeu dans cette analyse technico-économique. En effet, avant travaux, la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère

par la seule consommation de gaz était de 287 tCO₂/an. Après installation des PAC, le bilan des émissions est passé à 76 tCO₂/an, soit une diminution de 74%. À noter que ce calcul se base sur une émission de CO₂ de 14.4 g/CO₂/kWh_{électrique} dans le mix énergétique utilisé (origine locale).

La principale différence entre les deux systèmes repose sur le montant d'investissement initial. En effet, pour une puissance de production thermique similaire (210 kW), la solution gaz nécessite un investissement de 172'000 CHF TTC. De ce fait, l'analyse technico-économique de cette variante classique amène aux conclusions sur la rentabilité suivante :

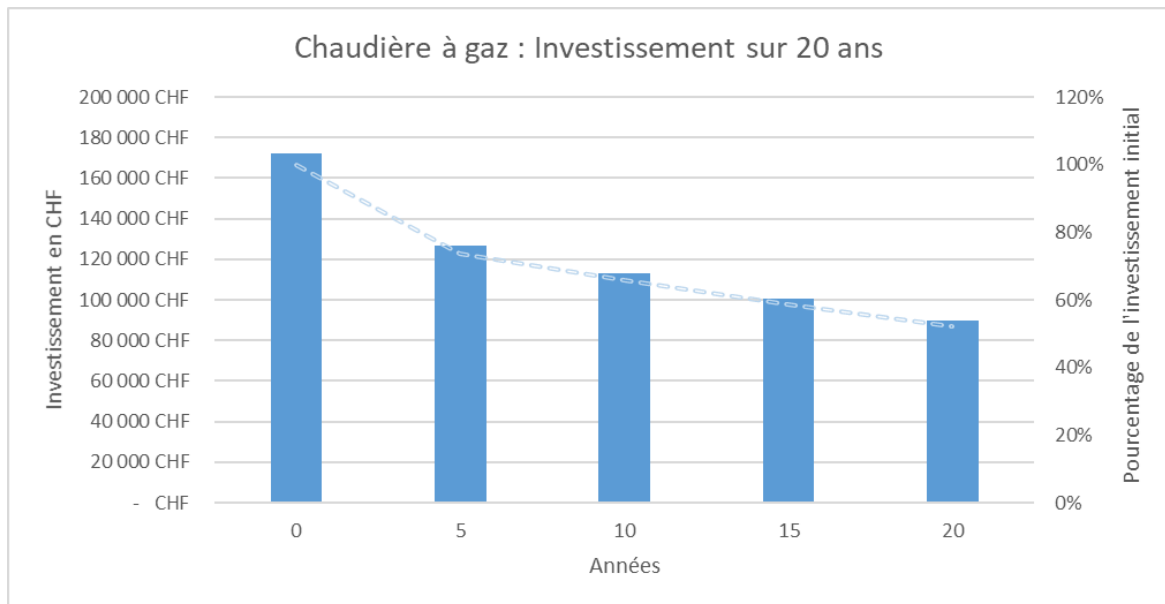


Figure 3 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz

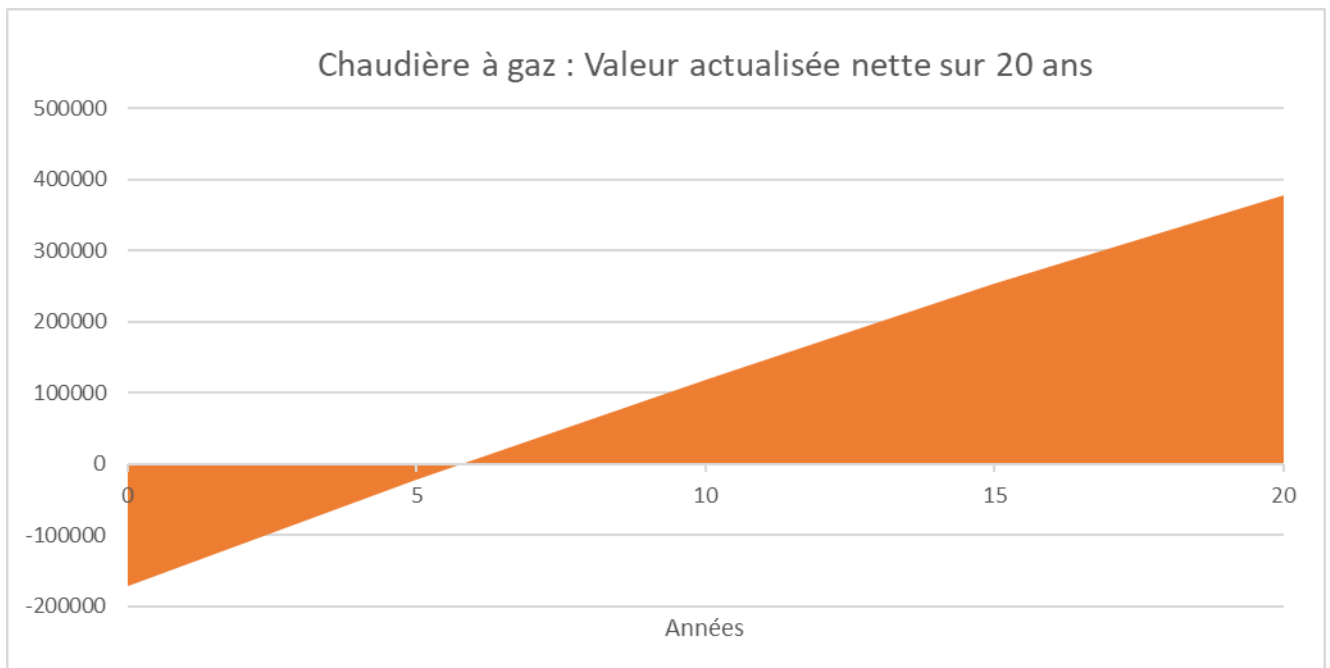


Figure 4 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet est de 6 ans. Après calcul, le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est égal alors à 16.4 %, soit de 10 points supérieurs à celui de la variante avec PAC air-eau.

5.8 Conclusion de l'analyse économique

Cette analyse permet de valider la rentabilité économique d'un projet de PAC air-eau en toiture, en remplacement d'une ancienne chaudière fonctionnant au gaz. Rappelons que dans ce cas d'étude, une chaudière gaz existante est conservée, produisant 25% de l'énergie nécessaire pour le chauffage et l'ECS. Ce maintien en fonctionnement a une grande influence sur le prix de revient de la chaleur, puisque qu'aucun investissement n'est alors nécessaire, mais demande simplement un entretien annuel appliqué et des coûts opérationnels de remplacement plus élevés. Dans ce cas d'étude en contracting, le propriétaire paye les kWh consommés et reporte ces charges énergétiques sur les locataires, sans ajouter une quelconque marge.

En étudiant le projet sur un cycle de vie de 20 ans, selon la norme ISO 15686-5, les deux variantes techniques sont rentables. Cependant, avec les coûts d'installation d'aujourd'hui, une solution utilisant une chaudière classique au gaz est plus rapidement rentable qu'une installation de PAC air-eau en toiture. De plus, le coût d'investissement est 3 fois moins élevé pour la solution au gaz. Cependant, les taxes sur les émissions de gaz à effet de serre et le prix des combustibles fossiles pourraient à l'avenir venir modifier cette conclusion.

Nous pouvons alors supposer que si l'investisseur (ici le propriétaire) n'a pas choisi d'opter pour une chaudière classique au gaz, c'est que celui-ci a suivi une démarche écologiquement responsable, ou bien, s'attend à une variation future du paradigme actuel, c'est-à-dire à la baisse du prix de l'électricité et à la hausse du prix des énergies fossiles et des taxes CO₂.

6 Étude de cas n°2 :

6.1 Description du projet

Ce deuxième cas d'étude concerne un immeuble résidentiel multifamilial situé dans le Canton de Fribourg. Le site comporte un seul bâtiment de 4 niveaux hors-sol, construit dans les années 1980. Sa SRE est égale à 1'663 m², répartie entre le Rez et le 3^{ème} étage. Jusqu'en 2014, le chauffage et la production d'ECS étaient réalisés avec des installations à résistance électrique. En connaissant le facteur primaire du mixe électrique suisse, situé à 2.54 MJ-eq/MJ, un chauffage 100% électrique est bien moins performant qu'un chauffage fossile classique. C'est pour cette raison que le propriétaire de l'immeuble a profité de travaux d'assainissement de l'enveloppe thermique et d'une surélévation d'un étage en 2014 pour remplacer l'intégralité des radiateurs électriques par des radiateurs hydrauliques moyenne température, et les chauffe-eaux électriques par des chauffe-eaux hydrauliques avec appoint par résistance électrique.

Afin de remplacer la production 100% électrique par un système utilisant une ressource renouvelable, 2 PAC air-eau ont été installées dans un local technique sur la toiture du site, d'une puissance unitaire de 18 kW, reliées à des splits extérieurs. Les PAC sont alors reliées à des collecteurs-distributeurs de chaleur séparés, l'un pour les étages allant du rez-de-chaussée au 2^{ème} étage, et le second collecteur, desservant uniquement le nouveau 3^{ème} étage. Cette séparation des machines se justifie par la différence d'inertie thermique des systèmes de chauffage. En effet, les étages existants ont été équipés de radiateurs hydrauliques modernes (moyenne température 45°/30°C), alors que la surélévation du 3^{ème} étage est équipé par du chauffage au sol (basse température 35°/30°C). Une connexion hydraulique entre les réseaux existe, en cas de défaut d'une des PAC, afin d'avoir un niveau minimum de puissance disponible. Le propriétaire de l'immeuble est le seul propriétaire des installations techniques, dont les PAC en toiture font parties. Les charges, coûts d'exploitation et frais généraux sont payés par les occupants de l'immeuble.

6.2 Données disponibles

Les PAC mises en place sont de marque Waterkotte, de type Ai1 QL, d'une puissance thermique nominale de 18.0 kW, avec un COP de 4.8 dans les conditions A7/W35 (air extérieur à 7°C et eau chaude produite à 35°C). Le fluide frigorigène employé par ces machines est le R410 (GWP = 2'087), avec une charge de 7.5 kg par appareil. Le courant de démarrage de cette machine est égal à 13 A.

6.3 Modèle technique sélectionné

Le plan du montage hydraulique en toiture et dans le local technique est le suivant :

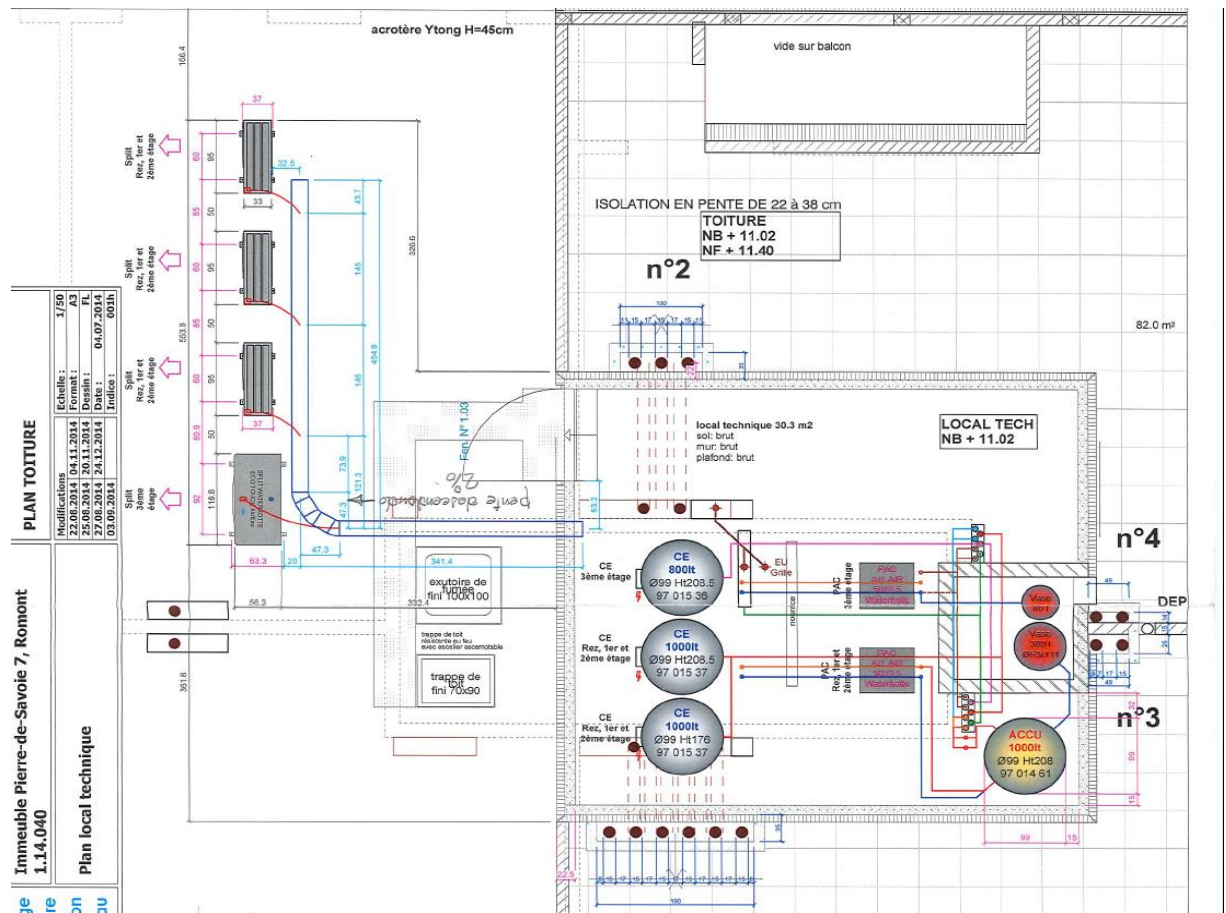


Schéma 3 : Plan des installations techniques en toiture

Sur la toiture du site, un ensemble de 3 splits (3 x 11KW à A 7C° pour W 35C°), double étage, de marque Mitsubishi, de gamme Zubadan, avec inverter, sont connectés à la PAC air-eau desservant le rez-de-chaussée, le 1^{er} et le 2^{ème} étage. Un autre split de marque Waterkotte, de type Eco Touch (1x 13.5Kw à A 7C° pour W 35°C), est lui relié à la PAC desservant la surélévation du 3^{ème} étage. L'enclenchement et le déclenchement des PAC sont indépendants en fonction de chaque secteur, la priorité du niveau de température de sortie est donnée à la production d'ECS. Un ballon accumulateur de 1'000 litres est connecté au collecteur-distributeur de la PAC pour le rez, 1^{er} et 2^{ème} étage. Le second collecteur est lui, relié à de plus petits vases d'accumulation, d'un volume de 80 litres et de 300 litres.

Le 3^{ème} étage en surélévation est chauffé avec du chauffage de sol, coulé en chappe, le régime de température de ce réseau est 35°/30°C. Dans ces conditions de production à basse température, le COP de la PAC peut alors être optimisé. Seule la production d'ECS, pour cet étage nécessitant de l'eau à 60°C dégradera ce COP lors des appels de puissance. Un complément électrique pourra alors être activé, afin de maintenir des valeurs annuelles de COP élevées, 3.5 d'après le fournisseur.

Le mode de fonctionnement de la production de chaleur est donc monovalent car reposant essentiellement sur les PAC, sans appoint d'énergie fossile. La température maximale produite par les PAC était lors de la mise en service des installations fixée à 60°C. Des épingles électriques sont installées dans chaque bouilleur d'ECS afin d'apporter un appoint d'énergie pour élever la température en haut de chaque ballon à 65°C. Cependant, après une année d'utilisation, l'ECS était jugée trop chaude par les utilisateurs. De ce fait, les techniciens de maintenance ont abaissé la température de charge ECS de 60°C à 50°C.



Photo 5 : PAC module Interieur

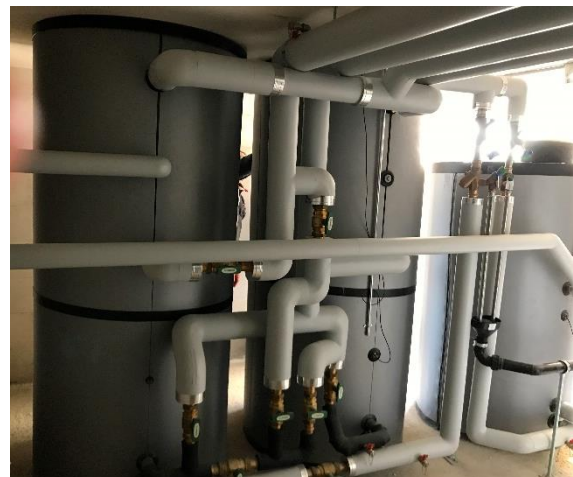


Photo 6 : Ballons tampons ECS

Lors de la mise en service des PAC, le cycle hystérésis d'enclenchement / déclenchement des compresseurs était réglé afin d'atteindre un delta de température de 5K entre la température mesurée au retour du circuit de chauffage (entrée condenseur) et la température de consigne du retour chauffage. À cause d'un très grand nombre de cycles courts, il a été décidé d'augmenter de Delta de température à 10 K.

6.4 Modèle financier sélectionné

Le modèle financier de ce projet est le plus couramment utilisé dans ce type de résidence multifamiliale de moyenne taille : le propriétaire du bâtiment réalise tous les investissements nécessaires à l'assainissement des installations de production de chaleur.

Chaque PAC est munie de son compteur de production thermique, et de consommation électrique. La chaleur n'est pas revendue comme telle aux occupants du site, mais les frais annuels de chauffage sont répercutés sur leurs loyers dans la rubrique "frais généraux-frais de chauffage" qui inclut une répartition du compteur électrique "commun" sur lequel sont connectés les PAC. Un décompte des frais de chauffage par preneur de chaleur est réalisé afin de calculer de manière précise la consommation de chacun. Afin de faciliter la comparaison entre tous les cas d'étude, comme expliqué dans le chapitre 4.4, le prix de vente de l'énergie thermique a été fixé à 16 cts/kWh.

Le calcul exact du temps de retour sur investissement n'a pas pu être communiqué par le propriétaire de l'installation, mais celui-ci est annoncé entre 12 et 15 ans.

6.5 Analyse de l'implantation

6.5.1 Implantation des PAC en toiture

Le local technique a été monté sur la toiture de la surélévation du 3^{ème} étage. Le renforcement de la dalle de toiture a été dimensionné par l'entreprise de Génie Civil lors des travaux d'assainissement de la toiture. Toutefois, aucun surcoût n'a été enregistré pour ajuster la charge des PAC, des ballons d'ECS et d'accumulation de chaleur sur la structure porteuse du bâtiment. En effet, il a été considéré que le poids de ces installations ne représentait pas une charge excessive pour un dimensionnement normale de la dalle béton (moins de 1 t/m²). De ce fait, aucun dispositif structurel n'a été mis en place. De plus, nous pouvons noter qu'aucun panneau solaire photovoltaïque n'a été rajouté sur la toiture plate de la surélévation, alors qu'un espace vide n'est pas encore utilisé. La complémentarité des systèmes PAC et des panneaux PV étant démontrée, cette combinaison pourrait être proposée dans le futur, à la suite d'une étude de faisabilité.

6.5.2 Intégration des PAC au patrimoine bâti

D'un point de vue esthétique, les PAC ne sont pas visibles, car installées dans le local technique cloisonné. Cependant, les splits en toiture, eux sont visibles depuis les autres bâtiments placés de l'autre côté de la rue, mesurant respectivement 5 et 6 étages hors sol. De ce fait, les occupants du dernier étage de ces bâtiments peuvent être en contact visuel avec ces splits. Aucune mesure visant à cacher leur vision ou à les intégrer aux mobiliers urbains, ou à celui du bâti, n'a été mise en place. Il reste à souligner que les immeubles de ce quartier de la ville de Romont sont les plus élevés de cette zone résidentielle, et que la grande majorité des logements des alentours, ne peut pas avoir un accès visuel sur les toitures plates situées à plus de 3 niveaux du sol.



Photos 7 et 8 : Disposition des unités splits en toiture de l'immeuble

6.5.3 Bruit admis dans le périmètre du site

Le modèle Waterkotte Ai1 QL des PAC air-eau sélectionnées n'est pas le modèle le moins bruyant disponible sur le marché suisse. Cependant les machines étant de petite taille, et surtout, cloisonnées dans un local technique sur la toiture du site, le bruit aérien engendré par les compresseurs des PAC ne se fait pas entendre depuis l'extérieur.

La PAC possède 2 compresseurs et 2 modules splits-ventilateur qui pulsent et aspirent chacun un débit d'air extérieur de 6'000 m³/h. La puissance acoustique de cette machine, suivant le calcul ERP / EN 12102 (acceptable dans le formulaire "Cercle Bruit") est $L_{WA} = 39$ dB(A). Le secteur où se situe notre projet est une zone résidentielle, appartenant à la catégorie II (habitation) de sensibilité au bruit selon l'Annexe 6 de l'OPB (version 2018). De ce fait, pour rappel, le niveau d'émission sonore mesuré à partir de la fenêtre du local sensible le plus proche, située à 8m de la source d'émission, ne doit pas dépasser 55 dB(A) de jour et 45 dB(A) de nuit. En remplissant l'outil de calcul "Cercle bruit", le niveau d'évaluation sonore est calculé à 31 dB(A), ce qui est conforme à la réglementation en vigueur.

En ce qui concerne le bruit solidien à travers les dalles de la toiture, une bande acoustique, type "Silent Bloc", située entre la PAC et le socle béton suffit à amortir convenablement les vibrations.

6.6 Analyse du cycle de coût

Dans cette analyse, du fait que l'immeuble a subi un assainissement entier de son enveloppe, et que les deux PAC ont pour but d'apporter de la chaleur à tout l'immeuble, l'ensemble de la surface énergétique du bâtiment résidentiel est considéré. La consommation réelle après travaux n'est pas connue avec exactitude (suivi énergétique en cours). Cependant l'objectif lors des travaux était d'amener l'indice de dépense d'énergie à 350 MJ/m².an. La part d'énergie issue de la PAC est égale à 90%, afin d'optimiser le COPa (3.5 annoncé par l'exploitant), en fonction des conditions climatiques extérieures. Ainsi, les PAC n'élèvent la température du réseau de charge ECS qu'à 50°C, après réglage au bout d'un an de fonctionnement. Le complément pour atteindre 65°C est apporté par des épingles électriques dans les bouilleurs ECS.

A0 : Données techniques du site			
Puissance thermique demandée: Pmax des PAC		36	kW
Surface de référence énergétique : SRE		1 662	m ²
Indice de dépense d'énergie moyen: IDC (3ans)		350	MJ/m ² .an
Consommation d'énergie thermique totale		161 583	kWh/an
Objectif part d'énergie issue de la PAC		90%	énergie totale
Indicateur d'appel de puissance surfacique : Pmax/SRE		22	W/m ²

6.6.1 Investissement brut pour le remplacement du système

Pour ce cas d'étude n°2, les prix de chaque équipement fut communiqué avec précision. Notons que cette liste de prix s'arrête au stockage de chaleur dans les ballons tampons côté distribution pour le chauffage. Le reste de la partie de distribution CVC n'est pas traitée dans le tableau suivant :

A1 : Production de chaleur par les PAC			
Prix des PAC air-eau (machines)		72 993	CHF HT
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		9 811	CHF HT
Prix des accumulateurs de chaleur		2 767	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		1 730	CHF HT
Divers, imprévus, autres		5 460	CHF HT
Total production par PAC		92 761	CHF HT

6.6.2 Surcôt d'investissement dû au système PAC

Les mesures prises en compte sont la construction d'un local technique en toiture, installé sur la superstructure. Notons qu'aucune mesure d'atténuation du bruit n'a été mise en place, à l'exception d'une bande de caoutchouc sous les socles des PAC, type "Silent Bloc", afin d'atténuer la propagation du bruit solidien. Une enveloppe de 12'300 CHF a été estimée par l'entreprise ayant réalisé les travaux d'installation. Cependant, le détail des coûts a dû être estimé, afin de répartir ce montant dans les différentes positions :

A2 : Surcoûts liés à l'installation des PAC			
Plus value d'installation : grutage sur la toiture		4 800	CHF HT
Adaptation de toiture: maçonnerie, supportage, socles		4 000	CHF HT
Adaptation de l'alimentation en puissance électrique		1 500	CHF HT
Mesures d'atténuation acoustique		-	CHF HT
Mesures de sécurisation de la toiture		-	CHF HT
Mise en conformité concept incendie		1 000	CHF HT
Ventilation du local technique cloisonné		1 000	CHF HT
Intégration de la partie visible de la PAC au bâti		-	CHF HT
Total surcoûts		12 300	CHF HT

6.6.3 Production d'eau chaude sanitaire

Du fait que l'ECS est produite par les PAC, avec un appoint électrique, l'ensemble des nouveaux équipements sanitaires, ainsi que la main d'œuvre d'installation, sont compris dans ce tableau :

A3: Production d'eau chaude sanitaire			
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		16 325	CHF HT
Echangeur entre le réseau primaire et le réseau ECS		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		1 580	CHF HT
Divers, autres		1 400	CHF HT
Total production d'ECS		22 305	CHF HT

6.6.4 Régulation et raccordement électrique

Pour ce type de machines, les automates Waterkotte sont directement implantés à l'intérieur du tableau des PAC. Il n'y a pas de surcôt sur cette position, le prix étant compris dans le tableau A1. Les prix des compteurs d'énergie et des tableaux électriques n'étant pas compris dans la prestation de l'entreprise ayant installé les PAC air-eau, les montants liés à ces équipements ont dû être estimés par l'entreprise en charge de l'actuelle maintenance du site :

A4: Régulation et tableaux électriques			
Automates de régulation et réglages		-	CHF HT
Raccordement électrique		4 000	CHF HT
Compteurs d'énergie		2 000	CHF HT
Tableaux électriques		2 500	CHF HT
Total régulation électrique		8 500	CHF HT

6.6.5 Honoraires, études et frais

Ce poste peut varier suivant la complexité des études préliminaire et des études de faisabilité.

A5 : Honoraires, étude et frais			
Honoraires architecte, ingénieurs civil, CVCSE	2.8%	4 000	CHF HT
Honoraires direction des travaux	5.7%	8 000	CHF HT
Etablissement des servitudes (ingénieurs, notaires taxes et redevances)		-	CHF HT
Divers, différence engagée, autres		- 2 085	CHF HT
Total honoraires et frais		9 915	CHF HT

6.6.6 Récapitulatif des coûts des travaux

A6 : Récapitulatif du coût des travaux, y compris honoraires			
A1	Production de chaleur par les PAC		92 761 CHF HT
A2	Surcoûts liés à l'installation des PAC		12 300 CHF HT
A3	Production d'eau chaude sanitaire		22 305 CHF HT
A4	Régulation et tableaux		8 500 CHF HT
A5	Honoraires et frais		9 915 CHF HT
Total travaux, honoraires			145 781 CHF HT
TVA		7.7%	11 225 CHF HT
Total TTC			157 006 CHF TTC

6.6.7 Aides et subventions au financement

Sur le canton de Fribourg, le Programme Bâtiments stipule que seules les PAC fonctionnant comme chauffage principal sont susceptibles de pouvoir prétendre à une subvention. Cette subvention peut être calculée en fonction de la SRE du bâtiment, de la puissance maximale des machines, et de l'option de production d'eau chaude sanitaire. Cependant et dans le cadre de ce projet, novateur pour le canton, une subvention extraordinaire a été attribuée, ce qui a permis la réalisation de ce projet. Sans cela, la subvention envisageable, uniquement basée sur le programme bâtiment, d'environ 13'000 CHF, ne permettait pas un projet viable économiquement. En effet, le temps de retour à la rentabilité était bien supérieur à 20 ans. Une enveloppe de 60'000 CHF fut attribuée par le Canton de Fribourg à ce projet. Le projet comptant également un assainissement complet de la façade, la part attribuée à l'investissement des PAC air-eau est évaluée à 40'000 CHF, après discussion avec le propriétaire de l'immeuble :

A7 : Financement (aides et déductions)			
Impôt préalable sur investissement		-	CHF
Subvention PAC air-eau P>50 kW	Forfait	-	CHF
canton de Fribourg	Variable	-	CHF/kW
programme Bâtiments canton de Fribourg	Total	40 000	CHF
Subvention aux clients	Base	-	CHF/kW
	Total	-	CHF
Total aide au financement		40 000	CHF
Coût de l'ouvrage après déductions des aides		117 006	CHF TTC

6.6.8 Frais financiers et annuités

La durée de 20 ans est prise comme hypothèse de calcul pour l'ensemble de cette étude. Elle reflète la durée de vie minimale d'une PAC air-eau dans son ensemble (pas seulement compresseur, ou autre composant pris individuellement). Afin de respecter une certaine cohérence le long de cette étude, le taux d'intérêt bancaire a été évalué à 3.5%, comme expliqué pour le cas n°1. De plus, soulignons que l'investissement est moins risqué pour une PAC-split que pour une PAC monobloc air-eau en toiture, du fait des aléas climatiques qui affectent l'entièreté de la machine.

A8 : Frais financiers			
Taux d'intérêt bancaire		3.50%	
Durée d'amortissement (moyen)		20	ans
Annuité en %		7.04%	
Montant investi		157 006	CHF TTC
Annuités: intérêts et amortissement sur l'investissement brut		11 047	CHF/an
		7.6	cts CHF/kWh
Montant investi net après déduction de l'impôt préalable, des aides financières de l'état, et de la participations des clients		117 006	
Annuités: intérêts et amortissements sur investissement net		8 233	CHF/an
		5.7	cts CHF/kWh

6.6.9 Achat du combustible : électricité et gaz

Le COP annuel des PAC est annoncé par le fournisseur des machines égale à 4.8, pour des conditions A7/W35. Or, après un an de réglage et d'exploitation, la température produite par les PAC était en moyenne de 50°C. De ce fait, un COPa estimé à 3.5 a été implémenté dans le calcul (suivi énergétique en cours). De plus, 10% de l'énergie nécessaire totale (chauffage et ECS) est fournie par les épingles électriques (appoint et réhausse de température pour ECS et cycle anti-légionelles), ce qui a tendance à améliorer le COPa des PAC, en limitant leur température de production en sortie de condenseur.

Nous considérons dans ce cas d'étude un prix de l'électricité égale à 20.6 cts/kWh (tarif selon le gestionnaire du réseau électrique local), favorable pour des machines thermodynamiques par rapport au prix payé par un consommateur classique de 22 cts/kWh. Ces prix peuvent évoluer dans le temps, sur un cycle de 20 ans, selon la norme ISO 15686-5, ce qui est considéré par la suite par l'indexation des prix des combustibles.

B : Achat du combustible			
Consommation de chaleur des clients		161 583	kWh/an
Chaleur via la PAC	90%	145 425	kWh/an
COPa de la PAC		3.50	kWh/an
Electricité consommée par la PAC		41 550	kWh/an
Achat de l'électricité			
	prix unitaire	20.6	cts/kWh
	consommation annuelle	8 559	CHF/an TTC
Electricité d'appoint pour ECS	10%	16 158	kWh/an
Achat de l'électricité			
	prix unitaire	20.6	cts/kWh
	consommation annuelle	3 329	CHF/an TTC
Total achat combustible		11 888	CHF/an TTC

6.6.10 Frais d'entretien et d'opération

La maintenance de ces installations est assurée durant les premières années par le fournisseur des PAC. L'entreprise CVCS sera amenée par la suite à effectuer des opérations de réglage des réseaux hydrauliques ou de remplacement de matériel.

C : Frais d'entretien et d'opération			
Frais d'entretien : contrat de maintenance fournisseur		560	CHF/an HT
Frais d'entretien : à distance fournisseur		189	CHF/an HT
Ramonage		-	CHF/an HT
Frais d'opération		-	CHF/an HT
Assurances		-	CHF/an HT
Suivis de performance des installations		-	CHF/an HT
Autres frais		-	CHF/an HT
Total frais de maintenance		749	CHF/an HT

Dans ce tableau, les cases bleutées ne sont pas connues avec précision, mais l'enveloppe réservée aux frais d'entretien et d'opération était définie à 800 CHF/an avant la réalisation des travaux. Il serait intéressant de pouvoir consulter après plusieurs années d'exploitation l'évolution de ces coûts, en fonction des renégociations d'assurance ou de maintenance.

6.6.11 Prix de revient de la chaleur issue des PAC

Le prix de revient de l'énergie représente le coût supporté pour équilibrer les dépenses et les gains par la production et la vente de l'énergie thermique aux habitants. L'aide de la subvention cantonale permet d'abaisser le prix de revient de l'énergie thermique de 2 cts/kWh. De plus, notons que sur ce projet, le prix de revient de la chaleur de 14.4 cts/kWh est supérieur de 1.4 cts/kWh par rapport à celui du projet n°1 (soit +10%). Cela s'explique par le fait que l'entièreté de la puissance pour le chauffage est installée lors de ce cas d'étude n°2. De plus, le prix de l'énergie électrique est plus élevé que dans le cas d'étude n°1.

D : Prix de revient de la chaleur issue des PAC				
Chaleur vendue aux clients			145 425	kWh/an
Prix de revient de la chaleur brut (sans participations financières extérieures)				
	Annuités		47%	11 047 CHF/an
	Combustible		50%	11 888 CHF/an
	Maintenance		3%	749 CHF/an
	Total			23 684 CHF/an
	Prix de revient de la chaleur		16.3	cts TTC CHF/kWh
Prix de revient de la chaleur net avec participations extérieures				
	Annuités		39%	8 233 CHF/an
	Combustible		57%	11 888 CHF/an
	Maintenance		4%	749 CHF/an
	Total			20 870 CHF/an
	Prix de revient de la chaleur		14.4	cts TTC CHF/kWh

6.6.12 Estimation de la marge pour la vente d'énergie

Le temps de retour brut se calcule sans tenir compte d'un emprunt, générant des intérêts à rembourser par annuités, ni le taux d'actualisation et l'indexation des frais annuels. Afin de comparer les indicateurs de rentabilités des quatre cas d'étude, le prix de vente de l'énergie pour chaque projet a été fixé de manière théorique à 16 cts/kWh. Comme expliqué dans le cas précédent, la marge vient combler la différence entre ces 16 cts/kWh et le prix de revient de la chaleur pour ce projet. Cette marge est inférieure pour le cas n°2 que pour le cas n°1 :

E : Marge estimée pour le vendeur d'énergie			
Prix de vente de l'énergie thermique estimé		16.0	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de la part du vendeur d'énergie	6%	1.0	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de sécurité pour production PAC	4%	0.6	cts TTC CHF/kWh
Gain économique par vente d'énergie		23 268.0	CHF/an
Dépenses annuelles sans annuité		12 636.9	CHF/an
Temps de retour brut		11.0	an

6.6.13 Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé

Le tableau suivant rassemble les coefficients d'actualisation des coûts et des prix des combustibles utilisés dans les calculs de cycle des coûts d'un projet d'investissement pour PAC air-eau :

Taux d'inflation en Suisse (moyenne sur 10 ans)	1,0%
Taux d'indexation sur les frais opérationnels	0,5%
Taux d'indexation sur les combustibles	2,0%
Taux d'actualisation	5,0%

Tableau 5 : Taux employés dans l'analyse des coûts

Le graphique suivant représente les coûts d'investissement nécessaires tout au long du cycle de vie du système de production de chaleur, comprenant l'investissement initial, mais également tous les coûts et frais d'exploitation annuels ou extraordinaires (remplacement de pièces) :

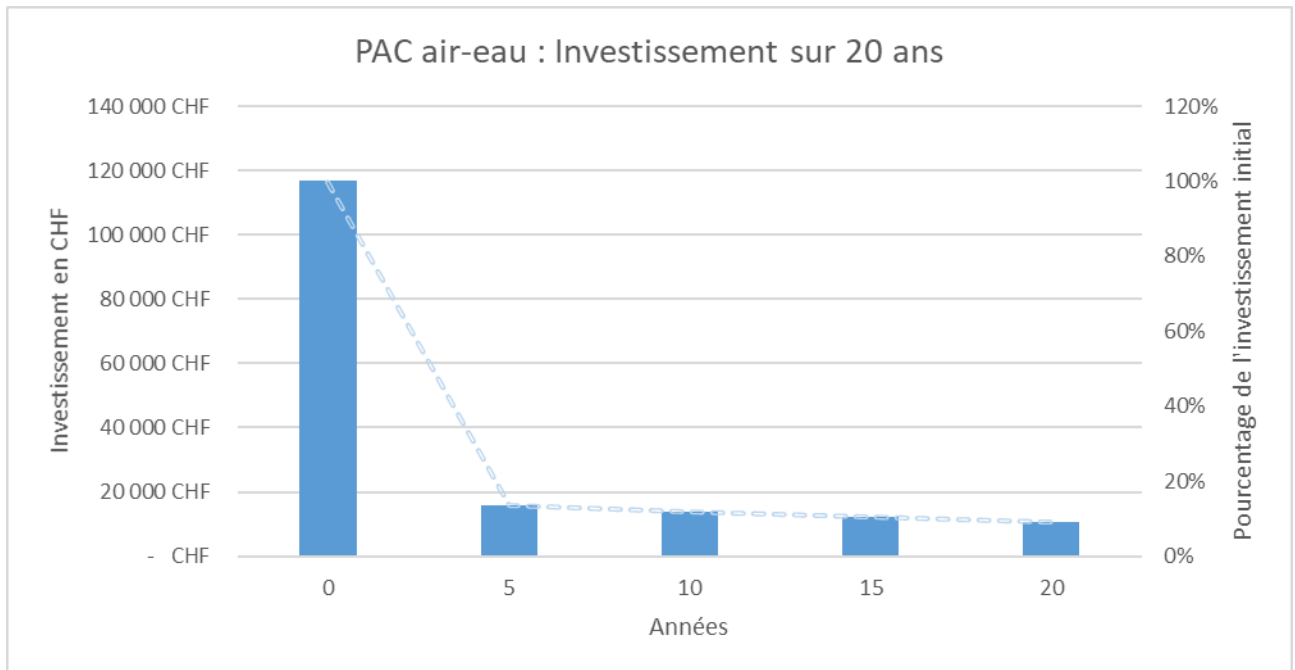


Figure 5 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de PAC air-eau

Afin de pouvoir juger de la rentabilité de ce projet sur un horizon de 20 ans, le calcul de la valeur actualisée est nécessaire sur la période du calcul de cycle des coûts (qui est égale à 20 ans ici). Cette valeur représente la différence entre l'investissement initial et le flux de trésorerie actualisé et additionné chaque année compte tenu du taux d'actualisation. À partir du moment où cette valeur de VAN devient positive, le projet devient rentable :

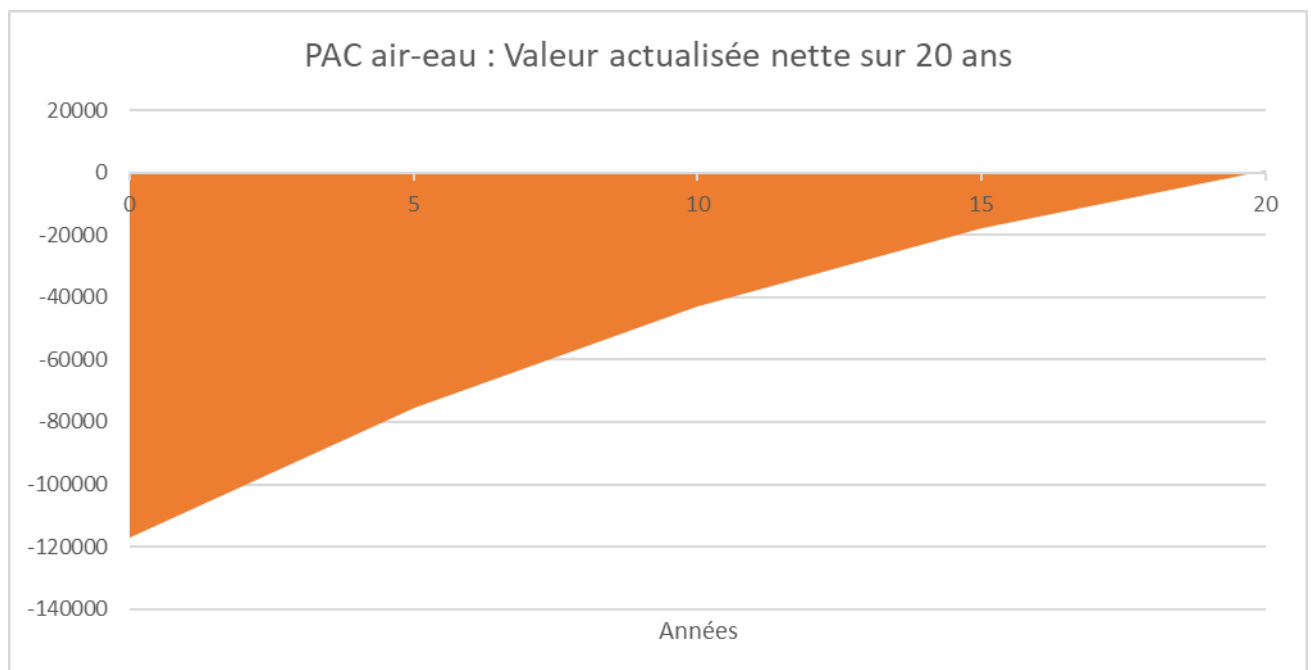


Figure 6 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet avec PAC air-eau

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet est d'environ 20 ans, soit l'ensemble du temps d'étude. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est égal alors à 0.1 %. La rentabilité de ce projet est fortement atténuée par le prix de vente de l'énergie thermique à seulement 16 cts/kWh, par le prix d'achat de l'énergie électrique de 20.6 cts/kWh, des coûts de maintenance et d'opération relativement bas, mais un coût d'investissement élevé pour le niveau de puissance demandé.

Ce temps de retour de 20 ans est essentiellement dû à la subvention extraordinaire de 40'000 CHF pour les PAC air-eau. Notons que sans subventions, le TRI du projet serait alors égal à -3.5%.

6.7 Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile

En considérant un système alternatif classique, avec une chaudière gaz assurant 90% des besoins d'énergie thermique, avec un système électrique d'appoint de 10% pour l'ECS durant l'été ou en cas de coupure de la chaudière gaz, la facture annuelle se chiffre à 17'047 CHF/an. À la différence du cas d'étude 1, la solution classique s'appuie ici que sur une chaudière gaz toute l'année. Un arrêt du fonctionnement de cette chaudière, pour privilégier une épingle électrique quelques mois est recommandable pour assurer le fonctionnement de la chaudière à un niveau de puissance correcte. Notons que le prix du gaz considéré dans ce cas de figure est de 9,5 cts/kWh, celui de l'électricité étant toujours de 20.6 cts/kWh. La solution utilisant les PAC air-eau permet alors d'obtenir une réduction de 5'505 CHF/an sur la facture énergétique du bâtiment, soit une baisse de 32%.

De plus, le bilan environnemental de ces installations doit également entrer en jeu dans l'analyse technico-économique de cette étude. En effet, avec l'option gaz, la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère serait de 55,7 tCO₂/an. Après installation des PAC, le bilan des émissions est passé à 2,4 tCO₂/an, soit une diminution de 96%. À noter que ce calcul se base sur une émission de CO₂ dans la consommation locale d'électricité de 14.4 g/CO₂/kWh électrique.

La principale différence entre les deux systèmes repose sur le montant d'investissement initial. En effet, pour une puissance de production thermique similaire, la solution gaz nécessite un investissement de 59'082 CHF TTC. De ce fait, l'analyse technico-économique de cette variante classique amène aux conclusions sur la rentabilité suivante :

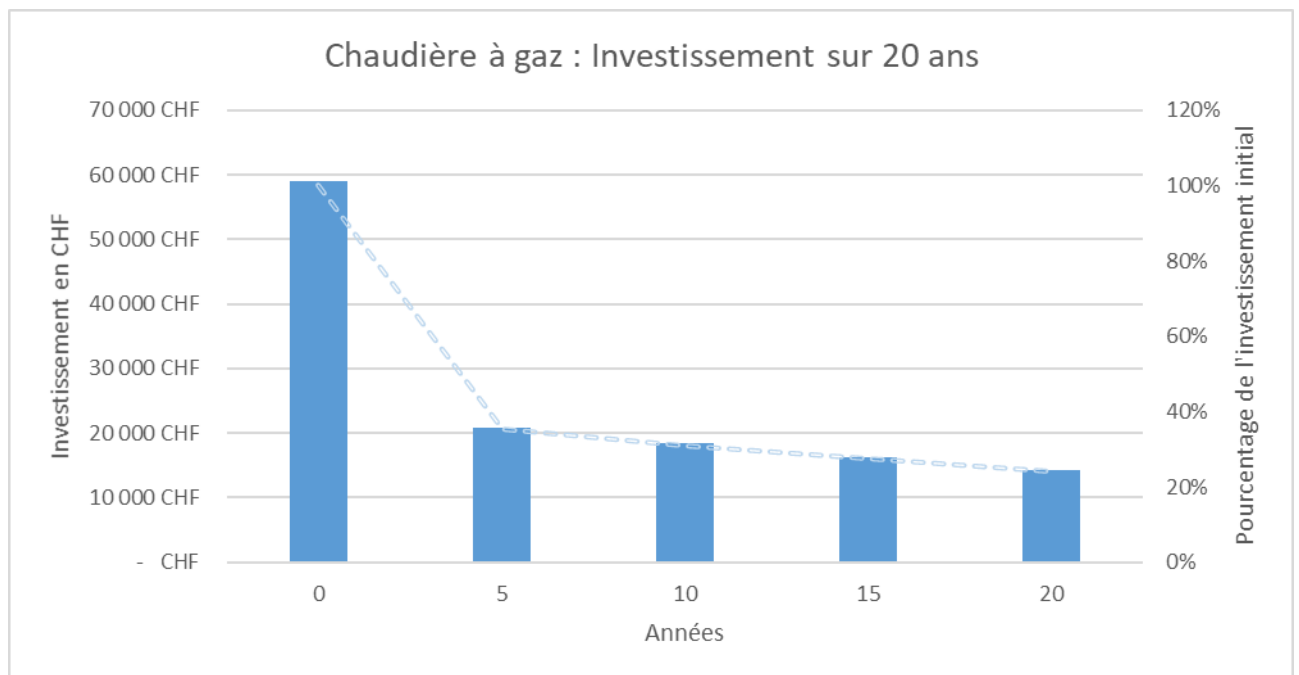


Figure 7 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz

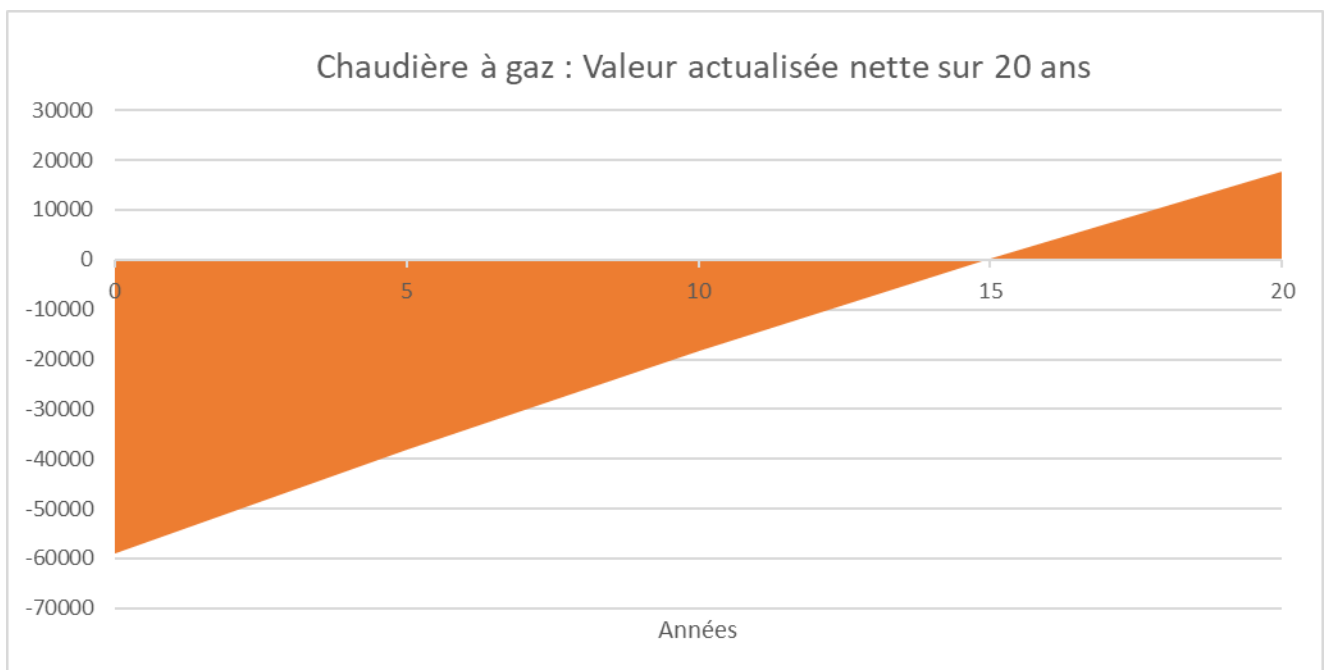


Figure 8 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet est de 14,7 ans. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est égal alors à 2,9 %. Ce montant est inférieur au 16% du projet précédent, et se justifie par un investissement plus important en termes de puissance (100% de la puissance de pointe), et des surcoûts de construction d'une chaufferie en toiture.

6.8 Conclusion de l'analyse économique

Nous pouvons souligner l'importance de la création du local technique, du grutage, et de l'installation complète de la production d'ECS dans le prix de revient de l'énergie thermique produite dans ce projet. De plus, le prix de l'électricité est considéré à 20.6 cts/kWh, alors que celui du gaz est de 9,5 cts/kWh. Dans ces conditions l'énergie fossile devient plus attractive, si les réglementations et taxes carbone ne sont pas plus contraignantes. Le prix d'investissement pour une solution PAC air-eau est toujours plus élevé que pour une solution classique fossile, mais seulement d'un facteur de 2,0 sur ce cas de figure, comparé à celui de 3,1 pour le projet n°1. Cela se justifie par le fait que la chaufferie gaz doit aussi être installée en toiture, et que le réseau ECS devait être entièrement refait à neuf.

Il est également important de souligner que le temps de retour à la rentabilité de 20 ans a été atteint essentiellement grâce à la subvention cantonale extraordinaire de 40'000 CHF. Sans cette subvention le TRI sur 20 ans serait largement négatif. La solution pour obtenir une rentabilité sur 20 ans, sans aucune subvention, aurait alors été de fixer le prix de vente de l'énergie thermique à 18.1 cts/kWh. Mais cette méthode remettrait alors en cause l'attractivité de la technologie PAC. Une augmentation du tarif de vente de l'énergie thermique serait alors directement ajoutée aux charges des locataires. Il en est de même pour les frais d'opération et de maintenance.

Le choix d'une variante technique reposant sur des PAC air-eau s'explique par la volonté du propriétaire de ne pas remplacer un système électrique par un système fossile. En effet, bien que le projet avec PAC soit moins rentable qu'avec une chaudière gaz, le propriétaire a opté pour une production d'énergie thermique en partie renouvelable, afin d'abaisser le bilan carbone de son immeuble résidentiel.

De nouveau, les hypothèses sur les taux d'actualisation, d'inflation et d'indexation possèdent une grande sensibilité sur les résultats du calcul de rentabilité.

7 Étude de cas N°3 :

7.1 Description du projet

Ce troisième cas d'étude concerne une rénovation d'enveloppe thermique de bâtiments résidentiels dans le Canton de Genève. Le site se divise en deux immeubles (n°55/57 et n°59/61/63), construits dans les années 1970, comportant 8 étages pour les n°55/57, et 7 étages pour les n°59/61/63, et accueillant 200 logements. Les travaux ont eu pour but d'assainir complètement l'enveloppe thermique du site, de rajouter deux étages en surélévation (9^{ème}-10^{ème}, et 8^{ème}-9^{ème}), tout en remplaçant les émetteurs de chaleur, les distributions hydrauliques d'eau sanitaire et en ajoutant une ressource renouvelable de production de chaleur, grâce aux PAC air-eau. L'ensemble du site était alimenté en chaleur à partir d'une chaufferie centrale en sous-sol.



Photo 9 : immeuble résidentiel du projet lors de la phase de travaux

Lors des travaux réalisés en 2016, les deux chaudières existantes à mazout, de marque Hoval, la première de type Max 6 d'une puissance de 760 kW datant de 2000, et l'autre, de type Mega 3 d'une puissance de 460 kW datant de 2000, n'ont pas été remplacées et sont aujourd'hui toujours en service, mais les réseaux de distribution ont été assainis : remplacement des circulateurs, mise en place de comptage d'énergie et instrumentation de l'ensemble par un système de régulation moderne, fourniture et pose de robinets thermostatiques sur les radiateurs hydrauliques et d'un répartiteur de frais de chauffage avec émetteur radio pour chaque émetteur.

Cinq monoblocs d'extraction simple flux ont été installés dans des locaux techniques, placés sur la superstructure de la surélévation. Ces machines viennent reprendre l'air vicié, à une température moyenne de 21°C, dans les espaces suivants : cuisines, salles de bains, WC et buanderie. Les débits d'air extrait en jeu s'élèvent à 6'305 m³/h, 5'450 m³/h, 4'500 m³/h, 3'900 m³/h et 3'300 m³/h. Comme le préconise la Loi sur l'Energie du Canton de Genève, au-dessus de 1'000 m³/h d'air ventilé, avec une durée de fonctionnement dépassant les 500 h/an, il existe une obligation de récupération de chaleur sur l'air extrait. Sauf qu'ici, au lieu d'être équipé d'une batterie de récupération, les monoblocs sont équipés de PAC air-eau de récupération de chaleur sur l'air extrait.

Les puissances de production thermique de ces PAC sont respectivement, en fonction du débit d'air extrait : 19 kW, 17 kW, 17 kW, 14 kW et 12 kW.

Les objectifs affichés lors de cet assainissement étaient d'obtenir le label HPE de Genève pour la surélévation, et d'améliorer de 20% la valeur U des surfaces opaques pour l'existant. Ainsi plusieurs critères devaient être atteints, et en particulier d'arriver sous la limite de 60% d'énergie non-renouvelable pour les besoins de chaleur pour le chauffage et l'ECS des deux étages de surélévations. C'est pour cette raison que ces PAC air-eau et des panneaux solaires thermiques ont été ajoutés au mix énergétique du site, en complément de la production principale au mazout.

Le propriétaire de l'immeuble est le seul propriétaire des installations techniques, dont les PAC en toiture font parties. Les charges, coûts d'exploitation et frais généraux sont payés par les occupants de l'immeuble.

7.2 Données disponibles

Les PAC étant montées directement dans les monoblocs d'extraction simple flux, le fournisseur des monoblocs est donc l'installateur certificateur du fonctionnement de ces machines thermodynamiques. Sur ce projet, les monoblocs sont de marque Trane, de type unité intérieure CCEB avec ventilateur à roue libre, moteur EC, échangeur en inox d'une puissance de 12 kW (évaporateur PAC). Les compresseurs des PAC sont de marque Copeland, de type Scroll hermétique, avec comme fluide frigorigène le R134a (GWP = 1'430), avec un COP exprimé dans les conditions A7/W65 (air extérieur à 7°C et eau chaude produite à 65°C). Dans l'ordre des 5 débits de chaque monobloc en voici les caractéristiques :

- 6300 m³/h : Évaporateur : 12.0 kW / Condenseur : 17.1 kW / Charge fluide : 1.7 kg / COP 2.24
- 5500 m³/h : Évaporateur : 12.0 kW / Condenseur : 17.1 kW / Charge fluide : 1.7 kg / COP 2.24
- 4500 m³/h : Évaporateur : 12.5 kW / Condenseur : 18.8 kW / Charge fluide : 1.4 kg / COP 3.14
- 3900 m³/h : Évaporateur : 9.6 kW / Condenseur : 14.0 kW / Charge fluide : 1.7 kg / COP 2.10
- 3300 m³/h : Évaporateur : 8.7 kW / Condenseur : 12.2 kW / Charge fluide : 1.4 kg / COP 2.30

En analysant les données disponibles sur le site des SITG, nous constatons que ces immeubles résidentiels, construits sur la rive droite de Genève, ne présentent pas de contre-indications aux forages géothermiques. Cependant, du fait de la densité des immeubles environnants, et du manque d'espace au sol disponible, la solution utilisant des forages géothermiques n'a pas été retenue. De plus, du fait de la nouvelle réglementation OPair 2018, les émissions de NOx et de particules fines sont particulièrement encadrées dans le centre-ville de Genève. De ce fait, il est alors interdit d'installer des chaudières à bois, à copeaux ou à pellets.

Les chaudières existantes à mazout sont dimensionnées pour couvrir l'ensemble des besoins thermiques du parc immobilier existants. La température d'eau chaude produite est régulée en fonction de la température extérieure, avec un départ maximum de + 80 °C pour -10 °C extérieure. Il existe deux circuits primaires de distribution d'eau chaude, indépendants, permettant l'alimentation des émetteurs terminaux existants (radiateurs), avec une régulation par façade : Nord et Sud.

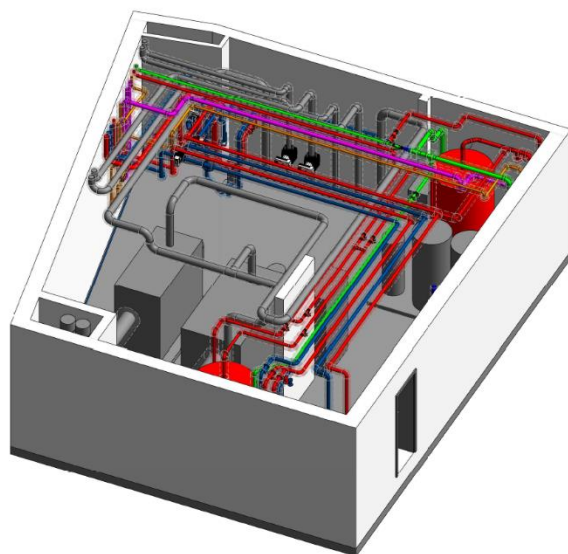


Photo 10 : Chaufferie existante avec chaudières mazout

La SRE du site après travaux est égale à 14'000 m². Les données disponibles sur le portail des SITG de Genève concernant l'IDC des bâtiments donne un indice de 399 MJ/m².an pour l'année 2017 comparé au 590 MJ/m².an de 2013.

7.3 Modèle technique sélectionné

Le schéma de principe du montage hydraulique de production et distribution de chaleur est alors le suivant :

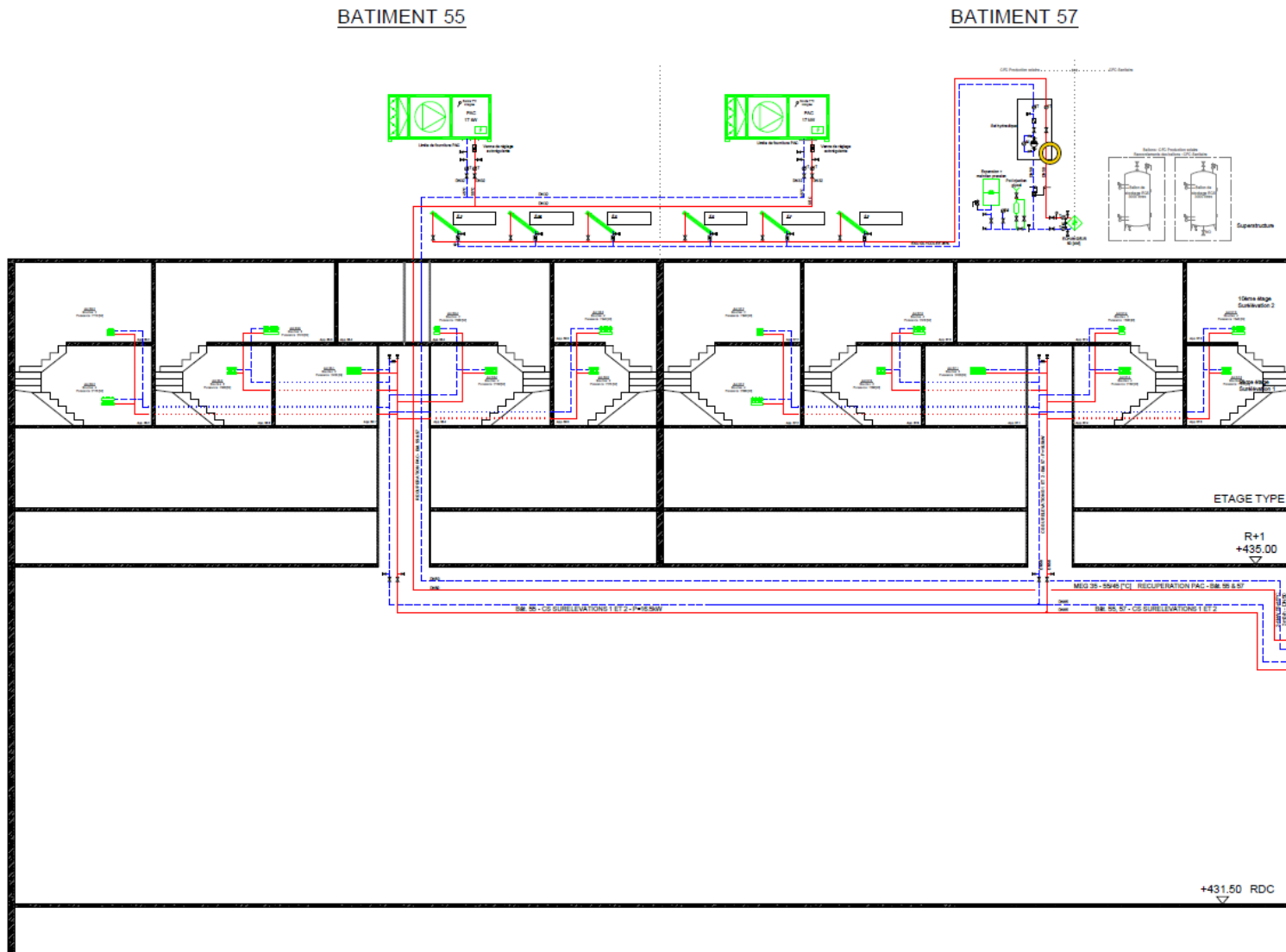


Schéma 4 : Schéma de principe hydraulique des installations de production et de distribution de chaleur – Immeuble 55 / 57

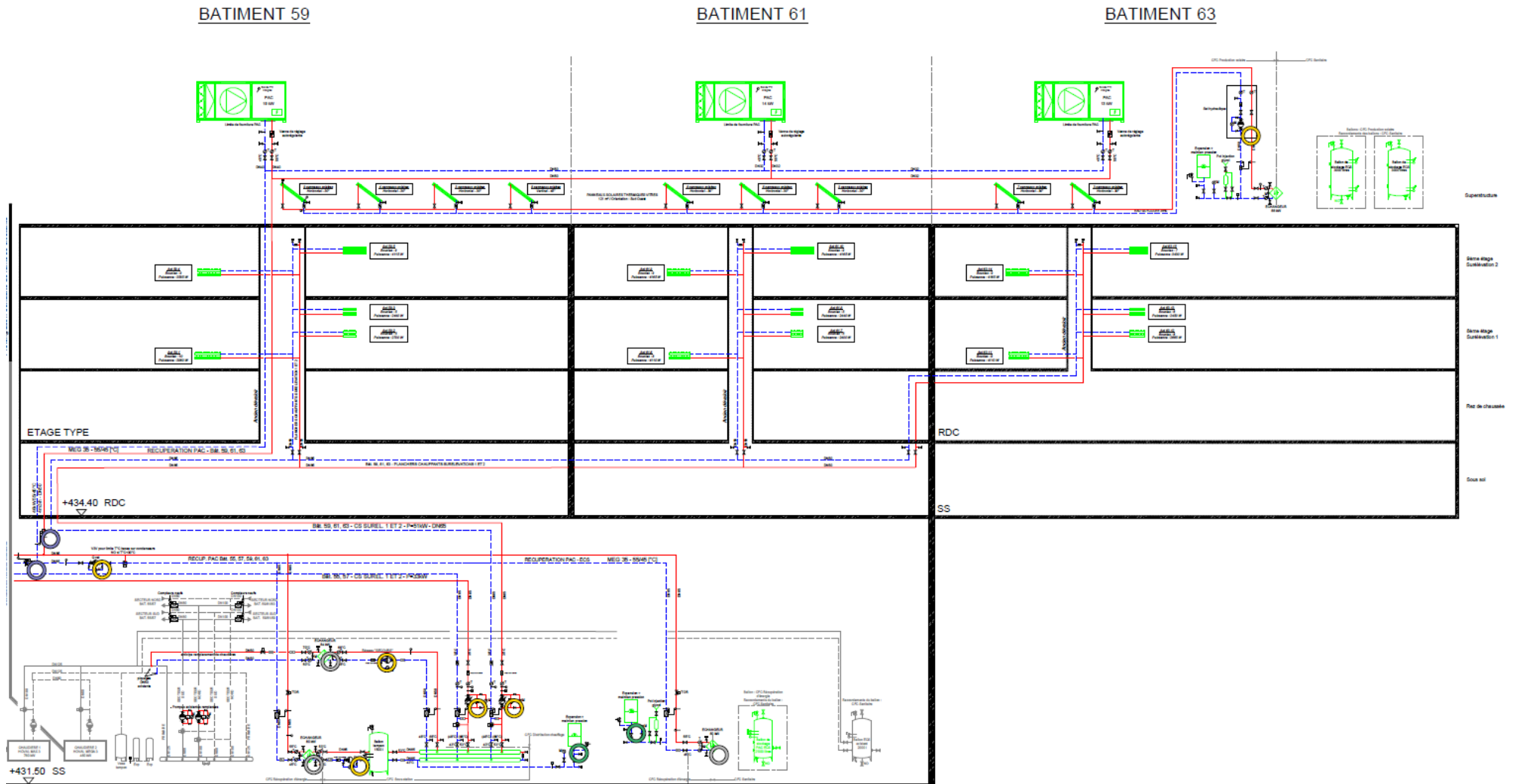


Schéma 5 : Schéma de principe hydraulique des installations de production et de distribution de chaleur - Immeuble 59 / 61 / 63

BATIMENT 55

BATIMENT 57

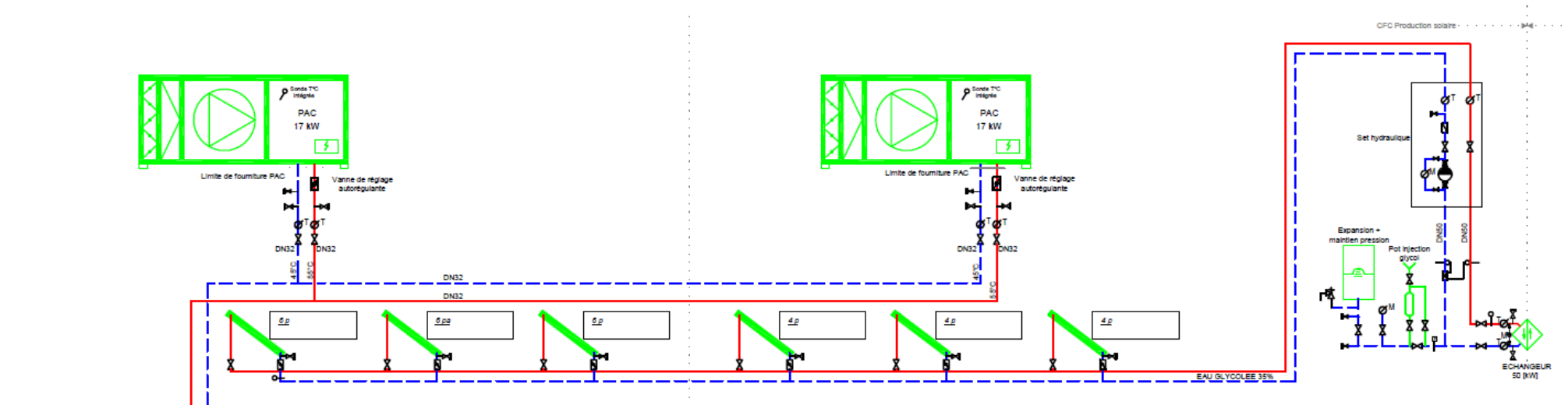


Schéma 6 : Zoom - Schéma de principe monobloc Immeuble 55 / 57

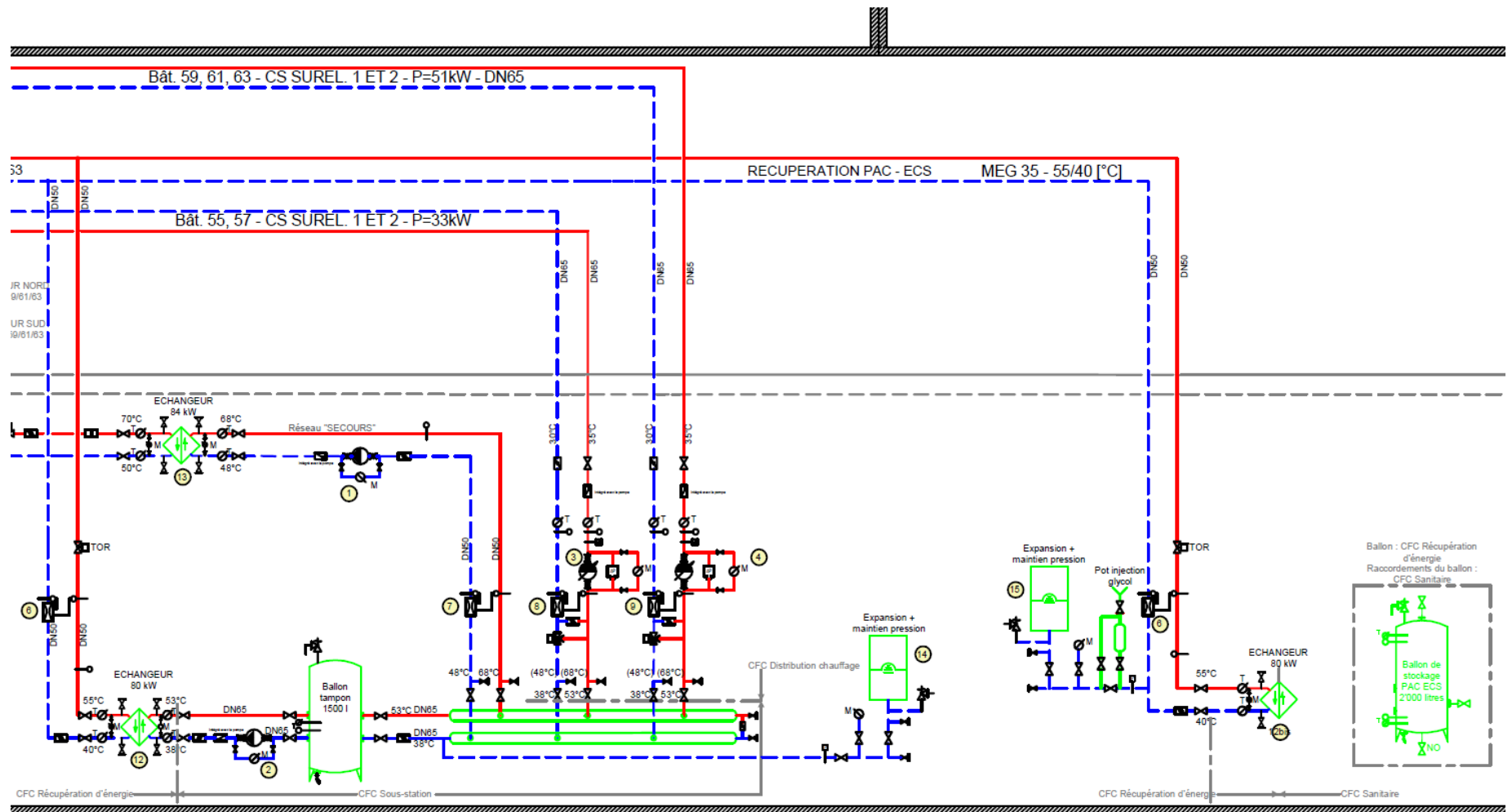


Schéma 7 : Zoom - Schéma de principe raccordement échangeur n°1 n°2 : collecteur de chauffage étages de surélévation ou ECS existant

Le régime de production de chaleur pour les condenseurs de ces cinq PAC est 55°C/45°C. Le réseau est rempli d'eau glycolée à 35% MEG, afin d'éviter les risques de gel, puisque les monoblocs sont installés dans des locaux non-chauffés en toiture. Un raccordement hydraulique entre la superstructure et le local chaufferie au 1^{er} sous-sol se fait en DN 65. Ce réseau est alors connecté à deux échangeurs de chaleur : un premier est relié au collecteur-distributeur de chauffage des étages de surélévation, d'une puissance nominale de 80 kW ; un second échangeur de 80 kW est relié à un des deux ballons ECS de 2'000 litres des étages existants. Des vannes 2 voies tout ou rien (TOR) électromécaniques, orientent le débit de chaleur produit par les PAC vers l'un des deux échangeurs, en fonction de la demande de chaleur. La priorité est donnée à l'échangeur n°1, c'est-à-dire au chauffage basse température des étages de surélévation. Si les étages de surélévation sont suffisamment bien chauffés, l'échangeur n°2 pour l'ECS existant est alors alimenté.

Une surface totale de 121 m² de panneaux solaires thermiques, installés à proximité des monoblocs d'extraction-PAC en toiture vient fournir un complément pour couvrir 30% des besoins de chaleur pour l'ECS.



Photo 11 : Panneaux solaires sur la toiture, devant les locaux techniques pour les monoblocs de ventilation

En hiver, les PAC fournissent en priorité l'énergie nécessaire pour le chauffage de la partie surélevée du bâtiment. La distribution de chaleur se fait par le chauffage de sol (basse température). En été ou en cas de surplus d'énergie en hiver, l'énergie produite par la PAC permet de préchauffer l'ECS. Lorsque la récupération d'énergie sur l'air extrait ne permet pas d'assurer la totalité des besoins en chauffage statique des logements des surélévations, un secours est réalisé à partir d'un réseau dédié depuis les chaudières existantes. Le fonctionnement des PAC et des chaudières à mazout est une bivalence parallèle, et ce, toute l'année.

7.4 Modèle financier sélectionné

Pour ce projet, seul le propriétaire du bâtiment a réalisé tous les investissements nécessaires à l'installation des monoblocs en toiture. La gestion financière du projet étant assuré par un assistant à maîtrise d'ouvrage externe, il n'est pas possible de savoir si le propriétaire a dû emprunter un certain montant pour réaliser ces travaux. Afin de simplifier l'analyse financière, nous considérons de manière arbitraire, que l'investissement fut réalisé grâce à un emprunt bancaire avec un taux d'intérêt de 3.5% sur 20 ans.

Chaque PAC est munie de son compteur de production thermique, et de consommation électrique. La chaleur n'est pas revendue comme telle aux occupants du site, mais les frais annuels de chauffage sont répercutés sur leurs loyers dans la rubrique "frais généraux-frais de chauffage". Un décompte des frais de chauffage par preneur de chaleur est réalisé afin de calculer de manière précise la consommation de chacun. Afin de continuer sur la même philosophie d'analyse que les deux projets précédents, il a été décidé en concertation avec le maître de l'ouvrage, de présenter les résultats de rentabilité de ce projet avec un prix de vente de l'énergie thermique de 16 cts/kWh.

Le calcul exact du temps de retour sur investissement n'a pas pu être communiqué par le propriétaire de l'installation, mais celui-ci est annoncé supérieur à 10 ans.

7.5 Analyse de l'implantation

7.5.1 Implantation des monoblocs en toiture

Chaque monobloc est installé dans un local technique entièrement cloisonné, sur la toiture du site au dernier étage. Les monoblocs sont posés sur des socles béton avec une bande de caoutchouc isolant entre le socle et la dalle. De plus, le châssis du monobloc est monté sur des pieds réglables anti-vibratiles, avec "Silent-blocs". De ce fait, le bruit solidien est suffisamment atténuer pour ne pas être transmis à travers la dalle vers les étages habités. Ces locaux techniques ont été positionnés au milieu de la toiture plate, afin d'équilibrer le poids des machines sur la structure porteuse.



Photo 12 : Locaux techniques en toiture, en phase de chantier

Du fait du cloisonnement des monoblocs de ventilation sur la superstructure, aucune mesure de sécurité spécifiques aux PAC n'a été mises en place. De ce fait, sur ce projet le surcoût lié à la sécurisation de l'accès à la toiture est considéré nul.

7.5.2 Intégration des PAC au patrimoine bâti

Les monoblocs d'extraction d'air ne sont pas visibles de l'extérieur, mais les monticules que constituent les locaux techniques, le sont. De ce fait, ces cubes bétonnés s'insèrent dans l'apparence quadratique du bâtiment, à toiture plate. Les autres bâtiments sont également des immeubles de moyenne et grande hauteur, allant jusqu'à 10 étages. Aucun autre bâtiment n'a une vision plongeante sur la toiture plate, sur laquelle sont placés les monoblocs de ventilation. De plus, la distance du bâtiment résidentiel avec la façade la plus proche appartenant à un immeuble voisin est estimée à 25 m. L'intégration de ce local technique ne constitue pas une dégradation de l'apparence architecturale du bâti.

7.5.3 Bruit admis dans le périmètre du site

Le module PAC dans chaque monobloc possède un compresseur Scroll Hermétique et un évaporateur monté comme échangeur de récupération à l'intérieur du monobloc. Le ventilateur du monobloc aspire l'air intérieur du bâtiment à une température de 21°C, pour un débit de 6'000 m³/h. Des amortisseurs de bruit, de marque Trox, de dimension 60x45cm pour une longueur de 150 cm, sont installés sur les gaines d'air repris et d'air évacué, avec une épaisseur de baffle de 200 mm, pouvant diminuer le bruit à 250 Hz de 9 dB(A).

Le niveau de puissance rayonné par cette machine, suivant le calcul ERP / EN 12102 (acceptable dans le formulaire "Cercle Bruit") est $L_{WA} = 49.8$ dB(A). Le secteur où se situe notre projet est une zone résidentielle, appartenant à la catégorie II (habitation) de sensibilité au bruit selon l'Annexe 6 de l'OPB (version 2018). De ce fait, pour rappel, le niveau d'émission sonore mesuré à partir de la fenêtre du local sensible le plus proche, située à 8m de la source d'émission, ne doit pas dépasser 55 dB(A) de jour et 45 dB(A) de nuit. En remplissant l'outil de calcul "Cercle bruit", le niveau d'évaluation sonore est calculé à 30.8 dB(A), ce qui est conforme à la réglementation en vigueur.

7.6 Analyse du cycle de coût

Dans cette analyse, seule la surface des étages de surélévation est prise en compte. La part d'énergie thermique totale issue de la PAC pour ces deux niveaux n'est égale qu'à 80%, puisque les panneaux solaires thermiques en toiture et les chaudières mazout au sous-sol fournissent le complément annuel pour couvrir les pics de consommation, la réhausse du régime de température pour produire l'ECS ou le complément dû aux interruptions des PAC volontaires pour optimiser le COPa, ou subies, en fonction des conditions climatiques extérieures.

A0 : Données techniques du site			
Puissance thermique demandée: Pmax des PAC		80	kW
Surface de référence énergétique : SRE surélévation		3 120	m ²
Indice de dépense d'énergie moyen: IDC (3ans)		399	MJ/m ² .an
Consommation d'énergie thermique totale		162 006	kWh/an
Objectif part d'énergie issue de la PAC		80%	énergie totale
Indicateur d'appel de puissance surfacique : Pmax/SRE		26	W/m ²

7.6.1 Investissement brut pour le remplacement du système

Afin de considérer uniquement le prix d'investissement lié aux PAC, par rapport à l'ensemble des coûts CVCRSE, nous avons soustrait au budget de ce chapitre un montant de 126'000.- CHF, qui représente le prix théorique de 5 monoblocs simple flux équivalents aux besoins techniques du projet. En effet, dans ce 3^{ème} cas de figure, les machines de marque Trane sont des monoblocs avec un module PAC intégré. Afin de ne pas répercuter le prix des monoblocs sur le prix du kWh produit par les PAC, nous avons décidé d'isoler cette position.

A1 : Production de chaleur par les PAC			
Prix des PAC air-eau (machines monoblocs)		-	CHF HT
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		-	CHF HT
Prix des accumulateurs de chaleur		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		-	CHF HT
Soustraction prix monobloc équivalent		- 126 000	CHF HT
Total production par PAC		95 200	CHF HT

7.6.2 Surcoût d'investissement dû au système

Les mesures prises en compte sont la construction de cloisonnements autour des monoblocs installés sur la superstructure, ainsi que l'installation d'amortisseur de bruit sur les gaines d'air extrait et d'air repris. De plus, nous précisons que la première ligne concernant le grutage des machines en toiture n'est que la part attribuable au PAC, pourcentage calculé linéairement en fonction du prix des machines installées. Dans le tableau ci-dessous, seul le prix des amortisseurs en gaine est connu avec précision. Le reste des installations a dû être estimé en fonction des coûts payés par le propriétaire. Remarquons que sur les projets étudiés, les maîtres d'ouvrage ou leurs représentants légaux omettent trop souvent de comptabiliser ces coûts dans un tableau spécifique.

A2 : Surcoûts liés à l'installation des PAC			
Plus value d'installation : grutage sur la toiture (part PAC)		4 800	CHF HT
Adaptation de toiture: maçonnerie, supportage, socles		17 600	CHF HT
Adaptation de l'alimentation en puissance électrique		3 000	CHF HT
Mesures d'atténuation acoustique		3 500	CHF HT
Mesures de sécurisation de la toiture		-	CHF HT
Mise en conformité concept incendie		1 500	CHF HT
Ventilation du local technique cloisonné		-	CHF HT
Intégration de la partie visible de la PAC au bâti		-	CHF HT
Total surcoûts		30 400	CHF HT

7.6.3 Production d'eau chaude sanitaire

Cette position est comprise dans le calcul du tableau A1, et ne représente que le raccordement de l'échangeur en chaufferie pour l'apport des PAC à la production de l'ECS de tous les étages du site.

A3: Production d'eau chaude sanitaire : compris dans A1			
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		-	CHF HT
Echangeur entre le réseau primaire et le réseau ECS		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		-	CHF HT
Divers, autres		-	CHF HT
Total production d'ECS		-	CHF HT

7.6.4 Régulation et raccordement électrique

Pour ce type de machines, les automates Trane sont directement implantés à l'intérieur du tableau électrique du monobloc. Il n'y a pas de surcoût sur cette position, le prix étant compris dans le tableau A1. Les compteurs d'énergie, et la ligne tableau électrique, sont situés dans la chaufferie du sous-sol. Le surcoût du raccordement du module PAC, en comparaison avec le raccordement du moto-ventilateur du monobloc, est minime, voire intégré dans son coût global. Les prestations de pose des compteurs d'énergie et des tableaux électriques n'étaient pas prises en charge par l'installateur des PAC/monoblocs, de ce fait ces coûts sont estimés.

A4: Régulation et tableaux électriques			
Automates de régulation: compris dans prix PAC		-	CHF HT
Raccordement électrique		2 000	CHF HT
Compteurs d'énergie		1 500	CHF HT
Tableaux électriques		4 000	CHF HT
Total régulation électrique		7 500	CHF HT

7.6.5 Honoraires, études et frais

Ce poste peut varier suivant la complexité des études préliminaire et des études de faisabilité.

A5 : Honoraires, étude et frais			
Honoraires architecte, ingénieurs civil, CVCSE	2.1%	3 000	CHF HT
Honoraires direction des travaux	4.5%	6 500	CHF HT
Etablissement des servitudes (ingénieurs, notaires taxes et redevances)		-	CHF HT
Divers, différence engagée, autres		1 700	CHF HT
Total honoraires et frais		11 200	CHF HT

7.6.6 Récapitulatif des coûts des travaux

A6 : Récapitulatif du coût des travaux, y compris honoraires			
A1	Production de chaleur par les PAC		95 200 CHF HT
A2	Surcoûts liés à l'installation des PAC		30 400 CHF HT
A3	Production d'eau chaude sanitaire		- CHF HT
A4	Régulation et tableaux		7 500 CHF HT
A5	Honoraires et frais		11 200 CHF HT
Total travaux, honoraires			144 300 CHF HT
TVA		7.7%	11 111 CHF HT
Total TTC			155 411 CHF TTC

7.6.7 Aides et subventions au financement

Sur le canton de Genève, le Programme Bâtiments stipule que seules les PAC fonctionnant comme chauffage principal sont susceptibles de pouvoir prétendre à une subvention. Celle-ci se partage en une part fixe de 13'000 CHF et une part variable de 200 CHF/kW pour les puissances d'installation supérieures à 50 kW.

Dans ce cas d'étude, les PAC comme module de récupération de chaleur ont pour but de chauffer en priorité les deux étages de surélévation, puis dans l'ordre de priorité, de participer à la production de l'ECS pour l'ensemble des étages.

Le propriétaire des installations n'a pas voulu communiquer le montant des subventions allouées à son projet, c'est pourquoi nous nous sommes basés sur les chiffres officiels du "Programme Bâtiment" du Canton de Genève :

A7 : Financement (aides et déductions)			
Impôt préalable sur investissement		-	CHF
Subvention PAC air-eau P>50 kW	Forfait	13 000	CHF
canton de Genève	Variable	16 000	CHF/kW
programme Bâtiments	Total	29 000	CHF
Subvention aux clients	Base	-	CHF/kW
	Total	-	CHF
Total aide au financement		29 000	CHF
Coût de l'ouvrage après déductions des aides		126 411	CHF TTC

7.6.8 Frais financiers et annuités

La durée de 20 ans est prise comme hypothèse de calcul pour l'ensemble de cette étude. Cette durée reflète la durée de vie minimale d'une PAC air-eau dans son ensemble (pas seulement compresseur, ou autre composant pris individuellement). Le taux d'intérêt bancaire a été évalué à 3.5%, comme l'ensemble des projets étudiés.

A8 : Frais financiers			
Taux d'intérêt bancaire		3.50%	
Durée d'amortissement (moyen)		20	ans
Annuité en %		7.04%	
Montant investi		155 411	CHF TTC
Annuités: intérêts et amortissement sur l'investissement brut		10 935	CHF/an
		8.4	cts CHF/kWh
Montant investi net après déduction de l'impôt préalable, des aides financières de l'état, et de la participations des clients		126 411	
Annuités: intérêts et amortissements sur investissement net		8 894	CHF/an
		6.9	cts CHF/kWh

7.6.9 Achat du combustible : électricité et gaz

Le COP annuel des PAC implémentées sur l'air extrait d'un monobloc est supérieur à celui de PAC air-eau classiques, puisque la source froide ne dépend pas directement des conditions climatiques extérieures, mais peut être considérée à une température constante de 21°C. De ce fait, un COPa de 3.5 a été implémenté dans le calcul de l'énergie consommée par les PAC.

De plus, nous considérons dans ce cas d'étude que les 20% restants d'énergie thermique sont produits essentiellement par les chaudières mazout. La chaleur produite par les panneaux solaires est distribuée dans le réseau d'ECS général du site. De ce fait, pour simplifier l'analyse sur les étages de surélévation, nous ne décomptons pas l'énergie solaire dans les coûts de ce projet. Le prix du mazout est de 10.5 cts/kWh, et le prix d'électricité de 20 cts/kWh. Ces prix peuvent évoluer dans le temps, sur un cycle de 20 ans, selon la norme ISO 15686-5, ce qui est considéré par la suite par l'indexation des prix des combustibles :

B : Achat du combustible			
Consommation de chaleur des clients			162 006 kWh/an
Chaleur via la PAC		80%	129 604 kWh/an
COPa de la PAC			3.50
Electricité consommée par la PAC			37 030 kWh/an
Achat de l'électricité			
	prix unitaire		20 cts/kWh
	consommation annuelle		7 406 CHF/an TTC
Chaleur via la chaudière mazout		20%	32 401 kWh/an
Achat du mazout par un distributeur			
	prix unitaire		10.5 cts/kWh
	consommation annuelle		3 402 CHF/an TTC
Total achat combustible			10 808 CHF/an TTC

7.6.10 Frais d'entretien et d'opération

Le propriétaire des bâtiments a mandaté sa propre entreprise de maintenance, alors que le sous-traitant de l'entreprise CVCRSE, ayant réalisé les travaux, avançait un prix de maintenance annuel de 2'500 CHF/an pour la partie liée au PAC.

Dans ce tableau, les cases bleutées ne sont pas connues avec précision, mais l'enveloppe réservée aux frais d'entretien et d'opération était défini à 3'000 CHF/an avant la réalisation des travaux. Il serait intéressant de pouvoir consulter après plusieurs années d'exploitation l'évolution de ces coûts, en fonction des renégociations d'assurance ou de maintenance :

C : Frais d'entretien et d'opération			
Frais d'entretien : contrat de maintenance			2 500 CHF/an HT
Frais d'entretien : remplacement ou réserve			- CHF/an HT
Ramonage			- CHF/an HT
Frais d'opération			- CHF/an HT
Assurances			- CHF/an HT
Suivis de performance des installations			- CHF/an HT
Autres frais			- CHF/an HT
Total frais de maintenance			3 000 CHF/an HT

7.6.11 Prix de revient de la chaleur issue des PAC

Le prix de revient de l'énergie représente le coût supporté pour équilibrer les dépenses et les gains par la production et la vente de l'énergie thermique aux habitants. L'aide de la subvention cantonale permet d'abaisser le prix de revient de l'énergie thermique de 1.3 cts/kWh. De plus, notons que sur ce projet, le prix de revient de la chaleur de 14.0 cts/kWh, égale à 0.4 cts/kWh près à celui du cas d'étude n°2. Cela s'explique par le fait que l'entièreté de la puissance pour le chauffage des deux étages de surélévation est installée avec cette solution technique PAC en module intégré aux monoblocs simple flux d'extraction d'air :

D : Prix de revient de la chaleur issue des PAC				
Chaleur vendue aux clients			162 006	kWh/an
Prix de revient de la chaleur brut (sans participations financières extérieures)				
	Annuités	44%	10 935	CHF/an
	Combustible	44%	10 808	CHF/an
	Maintenance	12%	3 000	
	Total		24 743	CHF/an
	Prix de revient de la chaleur		15.3	cts TTC CHF/kWh
Prix de revient de la chaleur net avec participations extérieures				
	Annuités	39%	8 894	CHF/an
	Combustible	48%	10 808	CHF/an
	Maintenance	13%	3 000	CHF/an
	Total		22 703	CHF/an
	Prix de revient de la chaleur		14.0	cts TTC CHF/kWh

7.6.12 Estimation de la marge pour la vente d'énergie

Le temps de retour brut se calcule sans tenir compte d'un emprunt, générant des intérêts à rembourser par annuités, ni le taux d'actualisation et l'indexation des frais annuels.

Le prix de vente est toujours fixé à 16 cts/kWh, ce qui donne alors un temps de retour brut de 10.4 ans. Notons que la marge de sécurité pour production PAC est identique à celle du cas d'étude n°2, égale à 0.6 cts. Cependant, les temps de retour brut sont différents, ce qui se ressentira sur la rentabilité :

E : Marge estimée pour le vendeur d'énergie				
Prix de vente de l'énergie thermique estimé			16.0	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de la part du vendeur d'énergie		9%	1.4	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de sécurité pour production PAC		4%	0.6	cts TTC CHF/kWh
Gain économique par vente d'énergie			25 920.9	CHF/an
Dépenses annulées sans annuité			13 808.1	CHF/an
Temps de retour brut			10.4	an

7.6.13 Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé

Le tableau suivant rassemble les coefficients d'actualisation des coûts et des prix des combustibles utilisés dans les calculs de cycle des coûts d'un projet d'investissement pour PAC air-eau :

Taux d'inflation en Suisse (moyenne sur 10 ans)	1,0%
Taux d'indexation sur les frais opérationnels	0,5%
Taux d'indexation sur les combustibles	2,0%
Taux d'actualisation	5,0%

Tableau 6 : Taux employés dans l'analyse des coûts

Le graphique suivant représente les coûts d'investissement nécessaires tout au long du cycle de vie du système de production de chaleur, comprenant l'investissement initial, mais également tous les coûts et frais d'exploitation annuels ou extraordinaires (remplacement de pièces) :

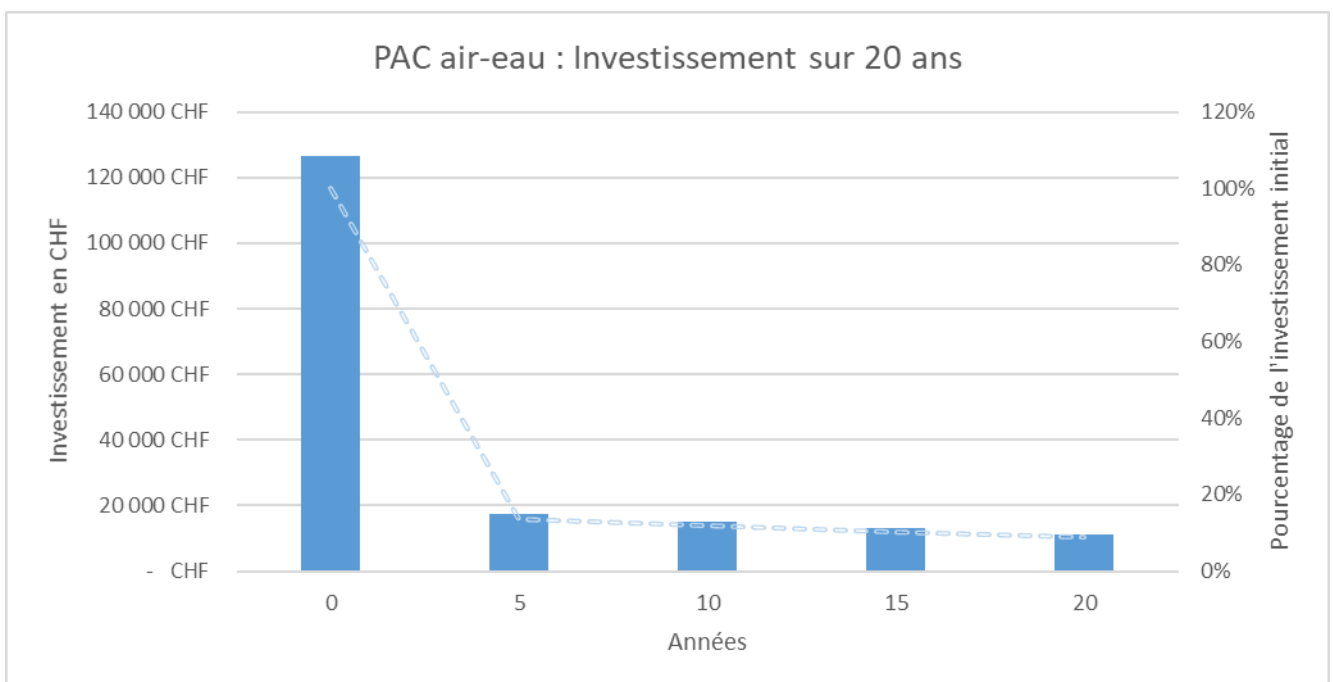


Figure 9 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de PAC air-eau

Afin de pouvoir juger de la rentabilité de ce projet sur un horizon de 20 ans, le calcul de la valeur actualisée est nécessaire sur la période du calcul de cycle des coûts (qui est égale à 20 ans ici). Cette valeur représente la différence entre l'investissement initial et le flux de trésorerie actualisé et additionné chaque année compte tenu du taux d'actualisation. À partir du moment où cette valeur de VAN devient positive, le projet devient rentable :

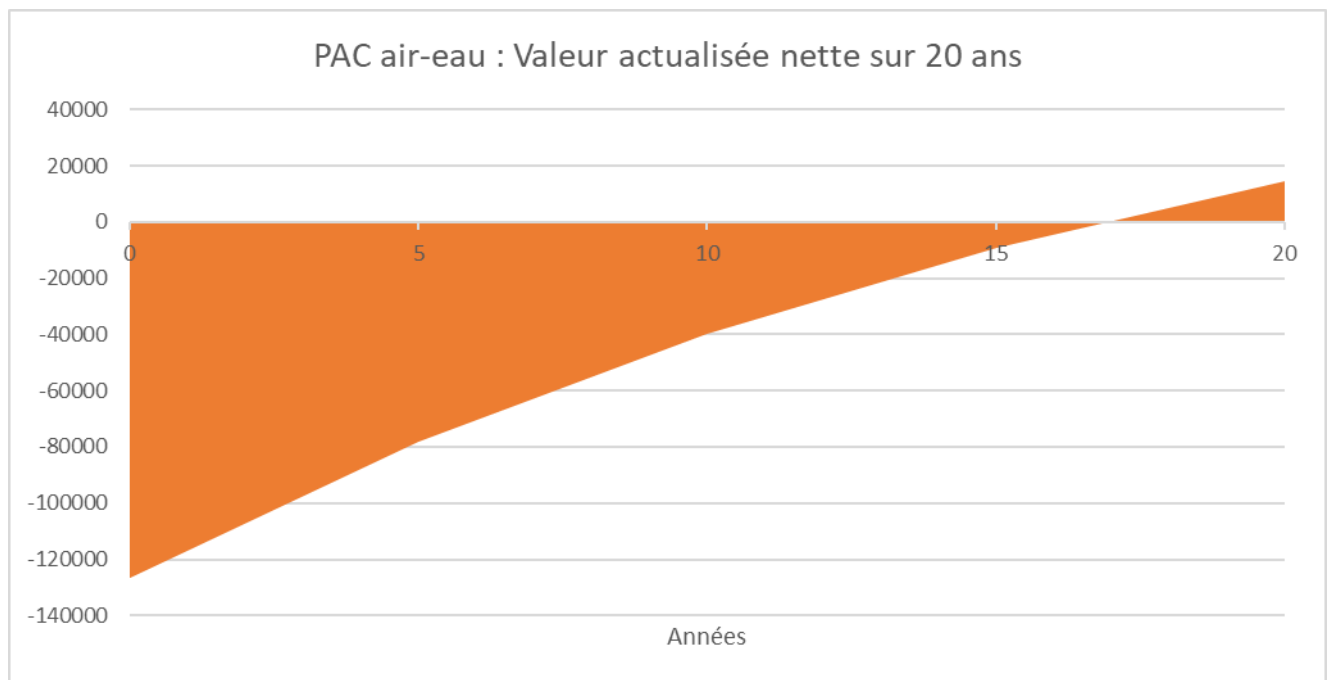


Figure 10 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet avec PAC air-eau

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet est de 16.5 ans. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est égal alors à 1.3 %. Afin d'abaisser le temps de retour à la rentabilité sous les 15 ans, une hausse du prix de revente de l'exploitant pourrait alors être envisagée.

7.7 Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile

Avec 100% de l'énergie thermique issue du gaz naturel, la facture annuelle se chiffre à 15'391 CHF/an. Avec l'installations des PAC intégrées aux monoblocs, le coût d'exploitation énergétique de ce système bivalent parallèle, c'est-à-dire l'addition des coûts pour l'énergie électrique et pour le mazout de la chaudière existante, s'élèvent à 10'808 CHF/an. Une différence de 4'582 CHF/an, soit 30%, peut être calculée en faveur de ce nouveau système renouvelable.

De plus, le bilan environnemental de ces installations doit également entrer en jeu dans cette analyse technico-économique. En effet, avec l'option gaz, la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère serait de 46 tCO₂/an. Après installation des PAC, le bilan des émissions est passé à 10 tCO₂/an, soit une diminution de 78%. À noter que ce calcul se base sur une émission de CO₂ dans la consommation locale d'électricité de 14.4 g/CO₂/kWh électrique.

La principale différence entre les deux systèmes repose sur le montant d'investissement initial. En effet, pour une puissance de production thermique similaire, la solution gaz nécessite un investissement de 56'968 CHF TTC. De ce fait, l'analyse technico-économique de cette variante classique amène aux conclusions sur la rentabilité suivante :

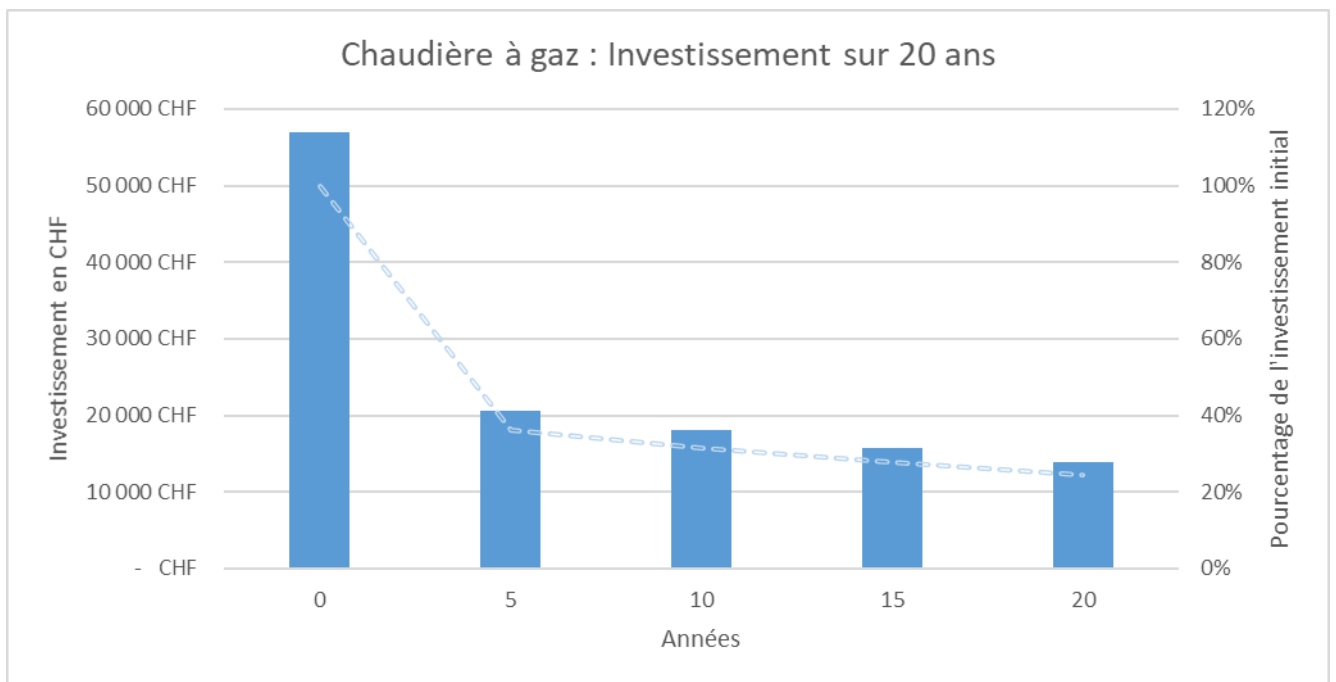


Figure 11 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz

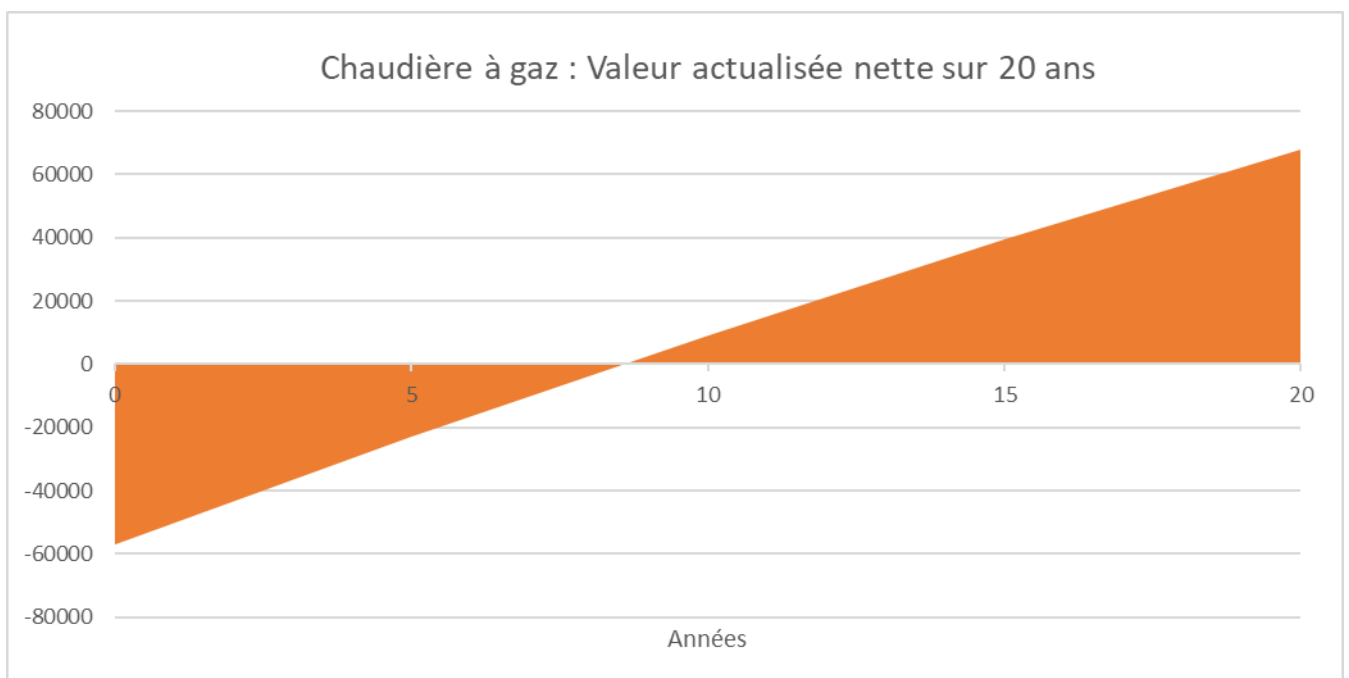


Figure 12 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet est de 9 ans. Le taux de rentabilité interne du projet (TRI) est égal alors à 9.8 %.

7.8 Conclusion de l'analyse économique

Ce cas de figure traite de l'installation d'une moyenne puissance thermique (80 kW), dans le cas particulier de plusieurs modules PAC intégrés à des monoblocs simple flux d'extraction d'air. Bien que le temps de retour brut soit égale à 10.4 ans, nous constatons que la rentabilité économique est supérieure à 16 ans. Cette conclusion est essentiellement liée aux taux d'indexation et d'actualisation choisis, mais souligne bien l'importance du montant d'investissement sur le projet énergétique.

Ce modèle de PAC air-eau installé dans un module de monobloc, mis en place sur la toiture de l'immeuble résidentiel, permet d'abaisser les coûts relatifs à la sécurité, au bruit et à l'aménagement architecturale de la machine. Il permet aussi de coupler une installation nécessaire au confort et à la qualité de l'air intérieur avec une installation de production de chaleur.

Cependant le TRI de ce projet atteint la valeur de 1.3%, alors que la variante gaz classique aurait un TRI de 9.8% sur les 20 ans du cas d'étude.

Rappelons, que la loi sur l'énergie du Canton de Genève oblige en cas de construction d'une surélévation (considérée comme bâtiment neuf) à fournir une énergie thermique pour cette nouvelle surface dont la part non-renouvelable est inférieure à 60% de la valeur limite des besoins de chaleur limites pour le chauffage et l'ECS. De plus, en cas de rénovation de la toiture, des panneaux solaires thermiques doivent être installés afin de couvrir 30% des besoins annuels d'ECS de l'ensemble de l'immeuble. Les choix technologiques de ce projet s'encrent donc parfaitement dans les volontés énergétiques cantonales et prouvent la rentabilité d'un tel système.

Dans ce troisième cas d'étude, la variante technologique utilisant des PAC air-eau devait être mise en place afin de respecter les législations cantonales. De plus, le chauffage des étages existants étant déjà réalisé par une production à base de mazout, les propriétaires des deux immeubles n'ont pas voulu augmenter leur bilan carbone avec une production classique au gaz.

8 Étude de cas N°4 :

8.1 Description du projet

Ce dernier cas d'étude concerne une étude d'assainissement de la production de chaleur pour une immeuble résidentiel à Genève. Le propriétaire de l'immeuble souhaitait comparer une solution comprenant des PAC air-eau couplées à des panneaux photovoltaïques à une solution de référence avec une chaudière gaz à condensation couplée à des panneaux solaires thermiques pour 30% de la production d'ECS. Le souhait principal était d'intégrer la plus grande part possible d'énergie renouvelable dans le mixe énergétique de l'immeuble.

Le projet, développé en 2013, prévoyait l'implantation de 3 PAC monobloc air-eau d'une puissance unitaire de 33 kWth, sur la toiture plate de l'immeuble. Pour des raisons de prix des machines, de disponibilités, mais aussi d'optimisation du rendement de fonctionnement et de fiabilité en cas de panne de compresseur, 3 machines de 33 kWth ont été préférées à une seule machine de 100 kWth. Le champ solaire photovoltaïque devait produire une puissance crête de 80 kWc, soit une surface d'environ 580 m². Le but était alors d'injecter sur le réseau l'électricité produite par le champ solaire photovoltaïque tout en auto-consommant la meilleure part possible.

Le propriétaire de l'immeuble aurait été le seul propriétaire des installations techniques, dont les PAC en toiture faisaient parties. Les charges, coûts d'exploitation et frais généraux auraient été payés par les occupants de l'immeuble.

Finalement, la solution comprenant des PAC air-eau n'a pas été retenue par le propriétaire de l'immeuble pour trois raisons : le manque de retour d'expérience d'une solution avec PAC air-eau en toiture en 2013, le désagrément acoustique probable engendré par les vibrations et le flux d'air soufflé, mais aussi du fait du coût des panneaux photovoltaïques en 2013, alors 2,5 fois plus élevé qu'en 2019. Pour l'ensemble de ces raisons, le propriétaire a préféré ne pas courir le risque d'investir dans un système cher, peu fiable et bruyant.

8.2 Données disponibles

Pour l'immeuble résidentiel, la demande de chauffage était estimée à 19 kWh/m², celle pour l'ECS s'élevait à 21 kWh/m², et la demande d'électricité pour la ventilation de l'immeuble était de 2,3 kWh/m². La puissance de chauffage théorique était égale à 100 kW.

En analysant les données disponibles sur le site des SITG, nous constatons que l'immeuble étudié, construit sur la rive gauche de Genève, dans la commune de Carouge, présente une contre-indication aux forages géothermiques. Une solution utilisant des forages géothermiques n'a donc pas été retenue. De plus, du fait de la nouvelle réglementation OPair 2018, les émissions de NOx et de particules fines sont particulièrement encadrées dans le centre-ville de Genève. De ce fait, il est devenu interdit d'installer des chaudières à bois, à copeaux ou à pellets.

La SRE du bâtiment est égale à 5'750 m². Les données fournies par le bureau d'ingénieurs en charge d'étudier la solution d'une PAC, concernant l'IDC des bâtiments donne un indice de 158 MJ/m².an pour l'année 2017 soit 43 kWh/m² soit très proche de la valeur de projet.

8.3 Modèle technique sélectionné

Les PAC sélectionnées lors de la phase d'étude du projet étaient des monoblocs en toiture, pouvant fournir un régime de température de 65°/45°C lors de la production d'ECS, et de 45°C/35°C le reste du temps pour le chauffage des appartements.

Une surface totale de 560 m² de panneaux solaires photovoltaïques, installés à proximité des PAC en toiture avait pour but de produire une énergie électrique directement consommée ou revendue au gestionnaire du réseau. La puissance crête était considérée égale à 80 kWc. L'option d'autoconsommer l'électricité produite était envisagée, mais il semblait plus intéressant de réinjecter l'entièreté de la production dans le réseau électrique du fait du tarif d'achat possible en 2013. Notons que les coûts de ce champ photovoltaïque n'apparaissent pas dans les analyses du projet ci-dessous, puisque le photovoltaïque n'est qu'une option d'alimentation des PAC. Afin de calculer le prix de revient de la chaleur produite par les PAC, nous avons considéré d'alimenter ces PAC avec une électricité à 20 cts/kWh provenant du réseau de Genève (identique au projet n°3).

Le calcul de la température de consigne en sortie condenseur PAC était orienté prioritairement vers la production d'ECS, puis vers celle du chauffage. Une épingle électrique à l'intérieur du bouilleur ECS assurait la relève de température dans le cas où la PAC n'arrivait pas à atteindre la température de consigne souhaitée. Le fonctionnement des PAC était de ce fait une monovalence bi-énergétique. L'apport énergétique de cette épingle électrique était considéré égale à 5% du total de l'électricité consommée pour le chauffage.

Il est important de souligner qu'à l'époque du projet seulement deux variantes techniques étaient proposées et respectées les consignes de la loi sur l'énergie du canton de Genève en vigueur :

- PAC air-eau couplées à un champs de capteurs photovoltaïques
- Chaudière gaz couplée à un champs de capteurs solaires thermiques

Nous rajouterons donc une variante d'étude, qui semble pertinente dans ce contexte de prix élevé du photovoltaïque en 2013 :

- PAC air-eau, consommant de l'électricité du réseau genevois, sans utilisation du solaire.

8.4 Modèle financier sélectionné

Pour ce projet, seul le propriétaire du bâtiment aurait réalisé tous les investissements nécessaires à l'installation des PAC en toiture. Les coûts du projet auraient été couverts par un crédit à la construction, puis par un crédit hypothécaire. Afin de simplifier l'analyse financière, nous considérons de manière arbitraire, que l'investissement aurait pu être réalisé grâce à un seul emprunt bancaire avec un taux d'intérêt de 3.5% sur 20 ans.

Chaque PAC est munie de son compteur de production thermique, et de consommation électrique. La chaleur n'est pas revendue comme telle aux occupants du site, mais les frais annuels de chauffage sont répercutés sur leurs loyers dans la rubrique "frais généraux-frais de chauffage". Un décompte des frais de chauffage par preneur de chaleur est réalisé afin de calculer de manière précise la consommation de chacun.

Lors du projet, le temps de retour brut du projet était attendu à 25 ans, en prenant en compte de l'investissement du champ photovoltaïque. Nous allons voir par la suite que ce surcoût est venu fausser les résultats technico-économiques du projet, car le temps de retour brut de l'installation des PAC seules est en fait réduit de moitié.

8.5 Analyse de l'implantation

8.5.1 Implantation des PAC en toiture

Les PAC devaient être installées dans un local technique entièrement cloisonné, au milieu de la toiture de l'immeuble. La structure porteuse de la toiture était suffisamment résistante pour ne pas avoir besoin d'un renfort mécanique. L'accès à ce local technique en toiture avait été pensé pour permettre un accès facilité par escaliers déroulant, avec boîte à clés disponible pour les utilisateurs.

8.5.2 Intégration des PAC au patrimoine bâti

Afin d'intégrer le local technique en toiture, un habillage des cloisons à l'aide de végétation était préconisé. De ce fait, depuis les plus proches immeubles, situés à une distance de 15m et d'une hauteur similaire à notre immeuble étudié, l'apparence du local ne laisse pas penser que des machines pouvaient y être entreposées. Les PAC monobloc auraient alors été gainées depuis l'intérieur du local technique jusqu'au passage de cloisons.

8.5.3 Bruit admis dans le périmètre du site

Des pièges à son devaient être installés sur les gaines connectés aux ouvertures à travers les cloisons du local technique. Ces amortisseurs auraient eu une atténuation de la puissance sonore d'environ 7 dB(A).

Le niveau exact de la puissance acoustique n'a pu être communiqué du fait que le modèle exact des PAC monobloc n'était alors pas décidé. Notons simplement que le secteur où se situe le projet est une zone résidentielle, appartenant à la catégorie II (habitation) de sensibilité au bruit selon l'Annexe 6 de l'OPB (version 2018). De ce fait, pour rappel, le niveau d'émission sonore mesuré à partir de la fenêtre du local sensible le plus proche, située à 8m de la source d'émission, ne doit pas dépasser 55 dB(A) de jour et 45 dB(A) de nuit.

8.6 Analyse du cycle de coût

L'analyse du cycle des coûts du projet démarre tout d'abord avec le cas théorique des PAC air-eau seules en toiture, qui assurent 95% de la chaleur du site. Nous verrons par la suite pourquoi les autres variantes techniques doivent être traitées séparément.

Remarquons tout d'abord que ce projet concerne un immeuble moderne, bien isolé, dont les demandes de chaleur pour le chauffage et pour l'ECS sont à peu près similaires (autour de 20 kWh/m².an chacune). Les PAC installées en toiture avaient pour but de produire 95% de l'énergie thermique du site, et ce toute l'année :

A0 : Données techniques du site			
Puissance thermique demandée: Pmax des PAC		100	kW
Surface de référence énergétique : SRE		5 750	m ²
Indice de dépense d'énergie moyen: IDC (3ans)		158	MJ/m ² .an
Consommation d'énergie thermique totale		253 000	kWh/an
Objectif part d'énergie issue de la PAC		95%	énergie totale
Indicateur d'appel de puissance surfacique : Pmax/SRE		17	W/m ²

8.6.1 Investissement brut pour le remplacement du système

L'enveloppe pour les travaux CVC comprenant les PAC air-eau en toiture était évaluée à 300'000 CHF, sans précision sur le détail de chaque position :

A1 : Production de chaleur par les PAC			
Prix des PAC air-eau (machines monoblocs)		-	CHF HT
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		-	CHF HT
Prix des accumulateurs de chaleur		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		-	CHF HT
Divers, imprévus, autres		-	CHF HT
Total production par PAC		300 000	CHF HT

8.6.2 Surcoût d'investissement dû au système

Les mesures prises en compte sont la construction d'un cloisonnement autour des PAC monoblocs installées sur la superstructure, ainsi que l'installation d'amortisseurs de bruit sur les prises d'air. Le grutage des machines, des équipements et du matériel nécessaire à la construction du local technique en toiture représente la part la plus importante des surcoûts. Les montants du tableau ci-dessous sont hypothétiques, estimés par corrélation avec les projets étudiés précédemment dans ce document :

A2 : Surcoûts liés à l'installation des PAC			
Plus value d'installation : grutage sur la toiture (part PAC)		10 000	CHF HT
Adaptation de toiture: maçonnerie, supportage, socles		7 000	CHF HT
Adaptation de l'alimentation en puissance électrique		3 000	CHF HT
Mesures d'atténuation acoustique : piège à son		2 500	CHF HT
Mesures de sécurisation de la toiture		-	CHF HT
Mise en conformité concept incendie		-	CHF HT
Ventilation du local technique cloisonné		-	CHF HT
Intégration de la partie visible de la PAC au bâti		-	CHF HT
Total surcoûts		22 500	CHF HT

8.6.3 Production d'eau chaude sanitaire

Le réseau ECS étant dans toutes les variantes, les seuls surinvestissements dans un échangeur ECS entre les PAC et le bouilleur ECS sont compris dans le tableau A1 :

A3: Production d'eau chaude sanitaire : compris dans A1			
Prix des conduites et des équipements hydrauliques		-	CHF HT
Echangeur entre le réseau primaire et le réseau ECS		-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel		-	CHF HT
Divers, autres		-	CHF HT
Total production d'ECS		-	CHF HT

8.6.4 Régulation et raccordement électrique

Les données suivantes sont des estimations, corrélées aux précédents cas d'étude :

A4: Régulation et tableaux électriques			
Automates de régulation: compris dans prix PAC		-	CHF HT
Raccordement électrique		2 000	CHF HT
Compteurs d'énergie		1 500	CHF HT
Tableaux électriques		4 000	CHF HT
Total régulation électrique		7 500	CHF HT

8.6.5 Honoraires, études et frais

Ce poste peut varier suivant la complexité des études préliminaires et des études de faisabilité. Les données suivantes sont des estimations, corrélées aux précédents cas d'étude :

A5 : Honoraires, étude et frais			
Honoraires architecte, ingénieurs civil, CVCSE	0.9%	3 000	CHF HT
Honoraires direction des travaux	1.9%	6 500	CHF HT
Etablissement des servitudes (ingénieurs, notaires taxes et redevances)		-	CHF HT
Divers, différence engagée, autres		1 700	CHF HT
Total honoraires et frais		11 200	CHF HT

8.6.6 Récapitulatif des coûts des travaux

A6 : Récapitulatif du coût des travaux, y compris honoraires				
A1	Production de chaleur par les PAC		300 000	CHF HT
A2	Surcoûts liés à l'installation des PAC		22 500	CHF HT
A3	Production d'eau chaude sanitaire		-	CHF HT
A4	Régulation et tableaux		7 500	CHF HT
A5	Honoraires et frais		11 200	CHF HT
Total travaux, honoraires			341 200	CHF HT
TVA		7.7%	26 272	CHF HT
Total TTC			367 472	CHF TTC

8.6.7 Aides et subventions au financement

Le projet n'ayant pas abouti, aucune subvention pour les PAC ne fut demandée. Cependant, afin d'améliorer la rentabilité théorique d'un tel projet, nous considérerons ces subventions comprises dans l'analyse économique :

A7 : Financement (aides et déductions)			
Impôt préalable sur investissement		-	CHF
Subvention PAC air-eau P>50 kW	Forfait	13 000	CHF
canton de Genève	Variable	20 000	CHF/kW
programme Bâtiments	Total	33 000	CHF
Subvention aux clients	Base	-	CHF/kW
	Total	-	CHF
Total aide au financement		33 000	CHF
Coût de l'ouvrage après déductions des aides		334 472	CHF TTC

8.6.8 Frais financiers et annuités

Afin de comparer ce projet avec les autres cas d'étude, le taux d'intérêt bancaire est supposé égale à 3.5% pour une durée d'emprunt de 20 ans :

A8 : Frais financiers			
Taux d'intérêt bancaire		3.50%	
Durée d'amortissement (moyen)		20	ans
Annuité en %		7.04%	
Montant investi		367 472	CHF TTC
Annuités: intérêts et amortissement sur l'investissement brut		25 856	CHF/an
		10.8	cts CHF/kWh
Montant investi net après déduction de l'impôt préalable, des aides financières de l'état, et de la participations des clients		334 472	
Annuités: intérêts et amortissements sur investissement net		23 534	CHF/an
		9.8	cts CHF/kWh

8.6.9 Achat du combustible : électricité et gaz

Le prix l'électricité a été considéré à 20 cts/kWh au début du projet (2013). Ce prix est brut et ne prend pas en compte une négociation à la baisse due à la forte consommation des machines. De plus, ce prix peut évoluer dans le temps, sur un cycle de 20 ans, selon la norme ISO 15686-5, ce qui est considéré par la suite via l'indexation des prix des combustibles.

Le COPa de la PAC est supposé égal à 3.0, presque similaire à celui du cas d'étude n°1 :

B : Achat du combustible			
Consommation de chaleur des clients		253 000	kWh/an
Chaleur via la PAC	95%	240 350	kWh/an
COPa de la PAC		3.00	
Electricité consommée par la PAC		80 117	kWh/an
Achat de l'électricité			
prix unitaire		20	cts/kWh
consommation annuelle		16 023	CHF/an TTC
Chaleur via épingle électrique	5%	12 650	kWh/an
Achat du mazout par un distributeur			
prix unitaire		20	cts/kWh
consommation annuelle		2 530	CHF/an TTC
Total achat combustible		18 553	CHF/an TTC

8.6.10 Frais d'entretien et d'opération

Les frais d'opération et d'entretiens sont supposés égal à 2'000 CHF/an, ce qui semble correspondre à la puissance installée du projet. Le détail de ces frais n'est pas connu :

C : Frais d'entretien et d'opération			
Frais d'entretien : contrat de maintenance		1 500	CHF/an HT
Frais d'entretien : remplacement ou réserve		-	CHF/an HT
Ramonage		-	CHF/an HT
Frais d'opération		-	CHF/an HT
Assurances		-	CHF/an HT
Suivis de performance des installations		-	CHF/an HT
Autres frais		-	CHF/an HT
Total frais de maintenance		2 000	CHF/an HT

8.6.11 Prix de revient de la chaleur issue des PAC

Le prix de revient de ce projet est très élevé et dépasse déjà les 16 cts/kWh du prix de vente de l'énergie des trois précédents cas d'étude. Il est logique de s'attendre à une non-rentabilité du projet, avec un prix de vente toujours maintenu à 16 cts/kWh.

D : Prix de revient de la chaleur issue des PAC				
Chaleur vendue aux clients			253 000	kWh/an
Prix de revient de la chaleur brut (sans participations financières extérieures)				
Annuités	56%		25 856	CHF/an
Combustible	40%		18 553	CHF/an
Maintenance	4%		2 000	
Total			46 409	CHF/an
Prix de revient de la chaleur			18.3	cts TTC CHF/kWh
Prix de revient de la chaleur net avec participations extérieures				
Annuités	53%		23 534	CHF/an
Combustible	42%		18 553	CHF/an
Maintenance	5%		2 000	CHF/an
Total			44 087	CHF/an
Prix de revient de la chaleur			17.4	cts TTC CHF/kWh

8.6.12 Estimation de la marge pour la vente d'énergie

Étant donné que le prix de revient de l'énergie thermique est calculé à 17.4 cts/kWh pour ce scénario PAC seules, le prix de vente de l'énergie est fixé à 18 cts/kWh. La marge est donc très réduite, à seulement 0.6 cts/kWh. Dans ces conditions, le temps de retour brut de ce projet est égal à 13.4 ans, ce qui est relativement intéressant pour ce système de PAC air-eau pour 2013 :

E : Marge estimée pour le vendeur d'énergie			
Prix de vente de l'énergie thermique estimé		18.0	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de la part du vendeur d'énergie	2%	0.4	cts TTC CHF/kWh
Marge attendue de sécurité pour production PAC	1%	0.2	cts TTC CHF/kWh
Gain économique par vente d'énergie		45 540.0	CHF/an
Dépenses annulées sans annuité		20 553.3	CHF/an
Temps de retour brut		13.4	an

8.6.13 Valeur actualisée nette et temps de retour actualisé

Le tableau suivant rassemble les coefficients d'actualisation des coûts et des prix des combustibles utilisés dans les calculs de cycle des coûts d'un projet d'investissement pour PAC air-eau :

Taux d'inflation en Suisse (moyenne sur 10 ans)	1,0%
Taux d'indexation sur les frais opérationnels	0,5%
Taux d'indexation sur les combustibles	2,0%
Taux d'actualisation	5,0%

Tableau 7 : Taux employés dans l'analyse des coûts

Le graphique suivant représente les coûts d'investissement nécessaires sur une partie du cycle de vie du système de production de chaleur, comprenant l'investissement initial, mais également tous les coûts et frais d'exploitation annuels ou extraordinaires (remplacement de pièces). Nous avons volontairement limité ce temps à 20 ans, pour rester cohérent vis-à-vis des cas d'étude précédent.

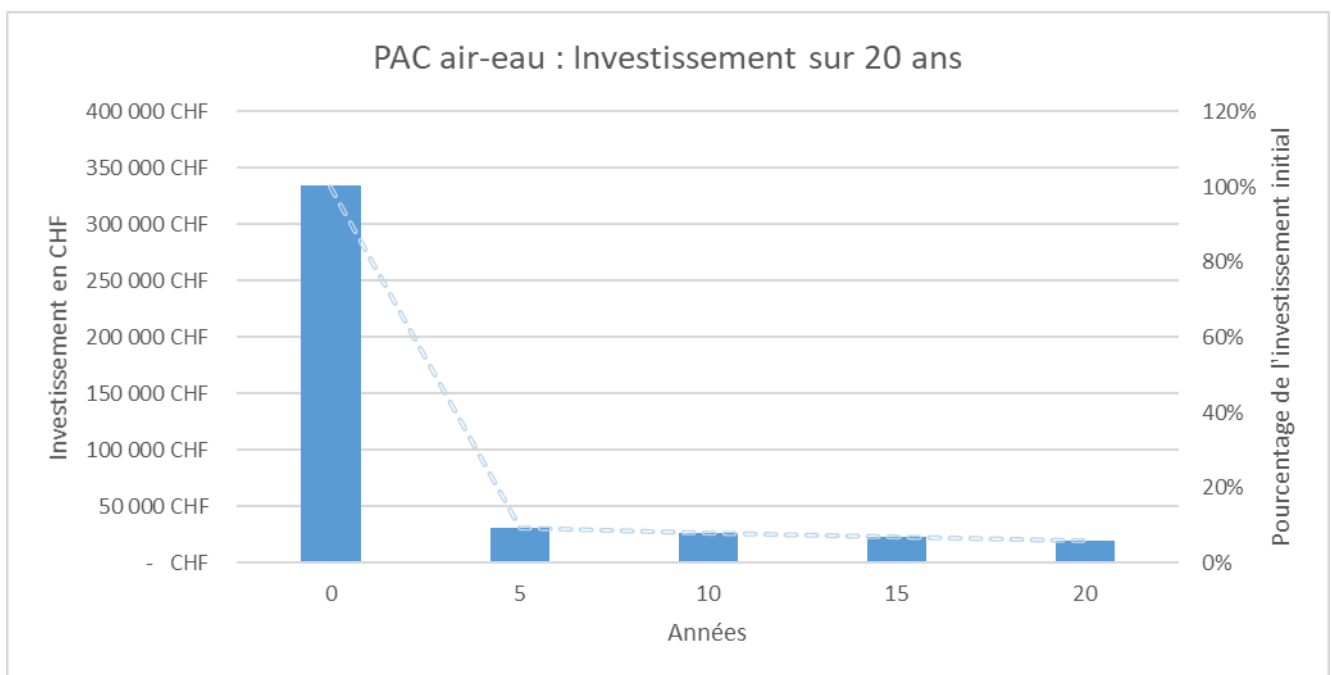


Figure 13 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de PAC air-eau

Afin de pouvoir juger de la rentabilité de ce projet sur un horizon de 20 ans, le calcul de la valeur actualisée est nécessaire sur la période du calcul de cycle des coûts (qui est égale à 20 ans ici). Cette valeur représente la différence entre l'investissement initial et le flux de trésorerie actualisé et additionné chaque année compte tenu du taux d'actualisation. À partir du moment où cette valeur de VAN devient positive, le projet devient bénéficiaire pour l'investisseur :

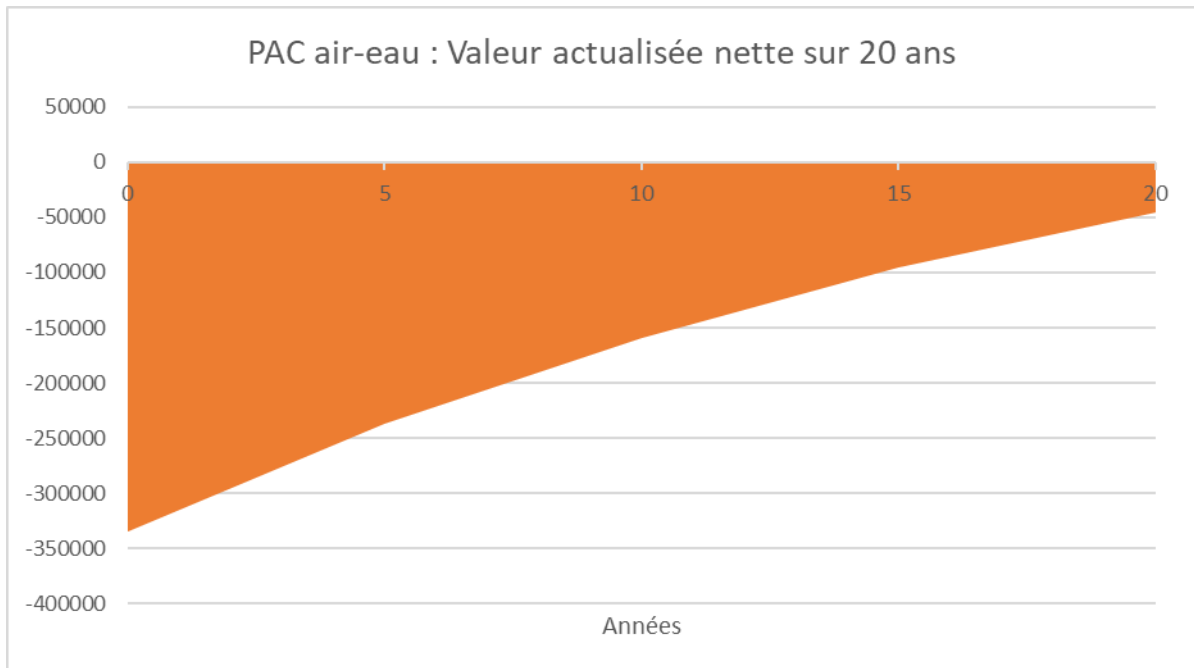


Figure 14 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet avec PAC air-eau

Nous constatons que sur un horizon de 20 ans, avec les hypothèses prises sur les coûts d'investissement, mais également sur les taux appliqués, ce projet n'est pas rentable. Pourtant rappelons que le prix de vente de l'énergie thermique est fixé à 18 cts/kWh, alors que les 3 précédents projets sont à 16 cts/kWh. Cette explication provient du prix très élevé de l'investissement, par rapport à la puissance installée (100 kW) que nous verrons dans le dernier chapitre de conclusion sur les indicateurs économiques des cas d'étude. Dans ces conditions de calcul le TRI du projet PAC seules pourrait être estimé à -1.6%.

Au cours de l'élaboration du projet, le maître de l'ouvrage avait prévu de réaliser un investissement sur une durée totale de 30 ans, au lieu de 20 ans. De ce fait, les annuités d'investissement pouvaient être alors réduites. En fixant alors un prix de vente de l'énergie thermique à 19.2 cts/kWh, le projet devenait rentable sur un horizon d'exactement 20 ans. Cette mesure exceptionnelle de hausse du kWh vendu aurait pu se justifier auprès du consommateur comme la nécessité de maximiser les énergies renouvelables dans le mixe énergétique de l'immeuble résidentiel. Pourtant cette solution n'a pas été adoptée.

8.7 Scénario avec un champ solaire photovoltaïque

Revenons alors au scénario étudié en 2013, avec des PAC air-eau en toiture et un champ solaire photovoltaïque. En effet, c'est en comparant ce projet avec celui de référence, utilisant du gaz et un champ solaire thermique, que le maître de l'ouvrage a décidé d'abandonner la variante technique avec des PAC air-eau.

Comme indiqué précédemment, le propriétaire des installations de l'immeuble avait pour but d'optimiser au maximum la surface disponible sur sa toiture. De ce fait, un champ solaire photovoltaïque de 580 m² avait été intégré à la phase d'étude. Le montant d'investissement de ce champ était évalué à 500'000 CHF. Rappelons que le projet date de 2013, et qu'à cette époque les coûts d'installation de panneaux PV étaient plus élevés qu'aujourd'hui.

Nous estimons la production d'électricité par ces panneaux à 140 kWh/m².installé, soit 81'200 kWh/an. Pour simplifier l'analyse, nous considérons alors que 100% de l'énergie consommée par les PAC provient de la production solaire. Or nous avons vu précédemment que pour assurer 95% des besoins en chaleur du site, les PAC avaient besoin de 80'117 kWh. La seule électricité achetée sur le réseau est alors celle pour l'appoint d'ECS, qui représente 5% de la part d'énergie thermique du site :

B : Achat du combustible			
Consommation de chaleur des clients		253 000	kWh/an
Chaleur via la PAC	95%	240 350	kWh/an
COPa de la PAC		3.00	kWh/an
Electricité consommée par la PAC		-	kWh/an
Achat de l'électricité			
	prix unitaire	20	cts/kWh
	consommation annuelle	-	CHF/an TTC
Chaleur via épingle électrique	5%	12 650	kWh/an
Achat du mazout par un distributeur			
	prix unitaire	20	cts/kWh
	consommation annuelle	2 530	CHF/an TTC
Total achat combustible		2 530	CHF/an TTC

La facture énergétique annuelle du site a donc été diminuée de 86%. Nous allons maintenant considérer que les coûts d'investissement pour les PAC, leurs surcoûts techniques, les coûts de régulation, les honoraires, les frais d'entretien et d'opération restent similaires. Le taux d'intérêt bancaire, et la durée d'amortissement sont toujours considérés à 3.5% pendant 20 ans.

Mais nous allons maintenant intégrer les 500'000 CHF d'investissement dans le système énergétique pour la production de chaleur :

A1 : Production de chaleur par les PAC		
Prix des PAC air-eau (machines monoblocs)	300 000	CHF HT
Prix des panneaux solaires photovoltaïques	500 000	CHF HT
Prix des accumulateurs de chaleur	-	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel	-	CHF HT
Divers, imprévus, autres	-	CHF HT
Total production par PAC	800 000	CHF HT

Les frais financiers deviennent alors :

A8 : Frais financiers			
Taux d'intérêt bancaire		3.50%	
Durée d'amortissement (moyen)		20	ans
Annuité en %		7.04%	
Montant investi		905 972	CHF TTC
Annuités: intérêts et amortissement sur l'investissement brut		63 745	CHF/an
		26.5	cts CHF/kWh
Montant investi net après déduction de l'impôt préalable, des aide financières de l'état, et de la participations des clients		872 972	
Annuités: intérêts et amortissements sur investissement net		61 423	CHF/an
		25.6	cts CHF/kWh

Le prix de revient de la chaleur produite peut alors être calculé ainsi :

D : Prix de revient de la chaleur issue des PAC			
Chaleur vendue aux clients		253 000	kWh/an
Prix de revient de la chaleur brut (sans participations financières extérieures)			
Annuités	93%	63 745	CHF/an
Combustible	4%	2 530	CHF/an
Maintenance	3%	2 000	
Total		68 275	CHF/an
Prix de revient de la chaleur		27.0	cts TTC CHF/kWh
Prix de revient de la chaleur net avec participations extérieures			
Annuités	93%	61 423	CHF/an
Combustible	4%	2 530	CHF/an
Maintenance	3%	2 000	CHF/an
Total		65 953	CHF/an
Prix de revient de la chaleur		26.1	cts TTC CHF/kWh

Avec les subventions accordées aux PAC dans ce second scénario comprenant les panneaux solaires photovoltaïques, le coût de revient de la chaleur est passé de 27.0 cts/kWh à 26.1 cts/kWh. Ce prix de revient, bien loin de celui de la variante précédente avec PAC seules, marque alors l'importance du prix d'investissement d'un champ photovoltaïque dans un calcul de rentabilité d'un projet de PAC air-eau. Le prix de vente de l'énergie ne pouvant pas atteindre de tel niveau, il est alors logique de concevoir l'abandon de cette solution PAC + photovoltaïque en 2013.

Afin d'espérer atteindre un certain seuil de rentabilité, le prix de l'énergie aurait pu être fixé au-dessus de 22 cts/kWh, le taux d'intérêt bancaire aurait pu être fixé à 2% sur 30 ans, et les subventions auraient dû atteindre près de 10% de l'investissement totale. Au vu de cette analyse le propriétaire de l'immeuble résidentiel, ainsi que le concepteur de l'installation, ont préféré préconiser une variante plus classique, sans PAC air-eau, ni photovoltaïque.

L'analyse de ce deuxième scénario du cas d'étude n°4 a pour but de montrer que l'ajout du photovoltaïque a totalement péjoré le prix de revient de la chaleur. Le concepteur voulant à tout prix inclure une source d'énergie solaire et utiliser toute la surface de toiture, n'a pas retenu le premier scénario, PAC seules, alors que celui-ci était bien plus rentable (sur une durée de 25 ans toutefois).

8.8 Comparaison d'une solution classique avec énergie fossile

Ce troisième scénario du cas d'étude n°4 fut mis en place lors de ce projet, appelé "cas de référence". Il consistait à installer une chaudière gaz qui couvrirait 82% des besoins de chaleur du site (chauffage et ECS), avec en complément un champ de capteurs solaires thermiques sur la toiture qui apportait les 18% complémentaires (uniquement ECS)

Dans ce troisième scénario du cas d'étude n°4, la facture énergétique annuelle s'élève à 19'709 CHF/an, ce qui représente un montant identique à celui des PAC seules (pour rappel : 18'553 CHF/an), avec un prix du gaz de 9.5 cts/kWh. Remarquons que les 18% d'énergie totale produite par les panneaux solaires thermiques permettent d'abaisser le coût de cette facture énergétique, puisque les trois premiers cas d'étude soulignaient un surcoût de la solution classique avec gaz égal à 30%. Or dans ce scénario le "cas de référence" a une facture équivalente à celle pour des PAC seules en toiture.

De plus, le bilan environnemental de ces installations doit également entrer en jeu dans cette analyse technico-économique. En effet, avec l'option gaz, la quantité de CO₂ rejetée dans l'atmosphère serait de 79 tCO₂/an. Avec l'installation des PAC seules, le bilan des émissions passerait à 11 tCO₂/an (avec le mixe électrique suisse), soit une diminution de 85%. À noter que ce calcul se base sur une émission de CO₂ dans la consommation locale d'électricité de 14.4 g/CO₂/kWh électrique.

Du fait que cette variante technique intègre des panneaux solaires thermiques, les coûts d'investissement initiaux sont fortement augmentés, comparativement à ceux des trois autres cas d'étude. En effet, si le prix annoncé de la chaudière gaz est de 135'000 CHF, celui du champ de capteur thermique est de 190'000 CHF. De ce fait, le coût d'investissement de 325'000 CHF est supérieur à celui pour des PAC seules de 300'000 CHF :

A1 : Production de chaleur par chaudière gaz				
Prix chaudière gaz de			135 000	CHF HT
Prix des conduites et des équipements hydrauliques			-	CHF HT
Prix des panneaux solaires thermiques (avec accumulateur)			190 000	CHF HT
Prix unitaire fourniture et pose du matériel			-	CHF HT
Divers, imprévus, autres			-	CHF HT
Total production par chaudière gaz			325 000	CHF HT

En considérant des frais d'opération et d'entretien égale à 2'000 CHF/an, identiques à ceux des deux autres scénarios avec PAC, un emprunt bancaire à 3.5% sur 20 ans, un prix du combustible gaz à 9.5 cts/kWh, et aucune subvention, le prix de revient de la chaleur est alors de 18.9 cts/kWh. Nous constatons que dans cette situation le prix de vente doit donc être égale à 19 cts/kWh pour espérer atteindre un temps de retour brut sous les 20 ans.

Ce troisième scénario avec solaire thermique possède donc un prix de vente de l'énergie thermique plus élevé que pour les PAC seules, ce qui s'explique simplement par un investissement plus important pour le champ solaire en toiture (190'000 CHF pour 18% de l'énergie totale).

De ce fait, l'analyse technico-économique de cette variante classique amène aux conclusions sur la rentabilité suivante :

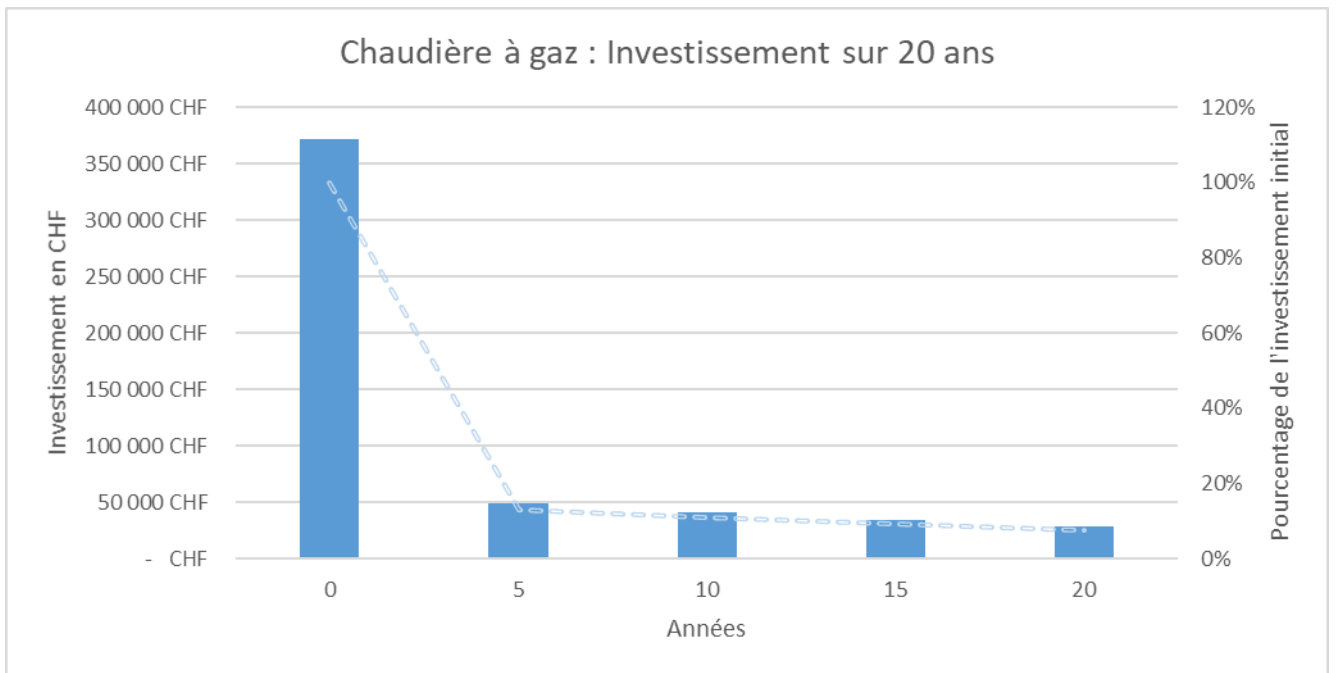


Figure 15 : Répartition des dépenses sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz avec capteurs solaires thermiques

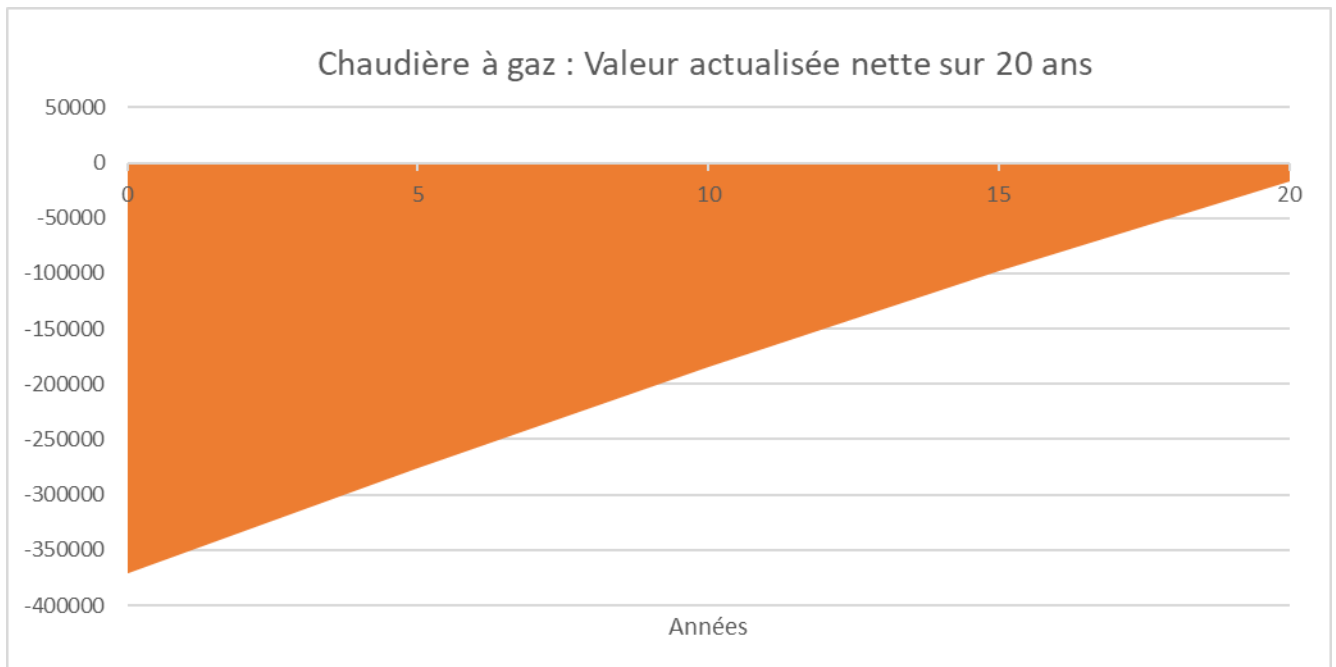


Figure 16 : Évolution de la VAN sur 20 ans pour un projet de chaudière gaz avec capteurs solaires thermiques

Nous constatons d'après ce dernier graphique que le temps de retour pour atteindre la rentabilité du projet sur 20ans n'est toujours pas atteinte. Le TRI est négatif, égale à -0.5%. L'impact du solaire thermique se fait donc ressentir, puisqu'il s'agit du premier scénario avec chaudière gaz non rentable sur 20 ans.

8.9 Conclusion de l'analyse économique

Ce cas d'étude n°4 est différent des cas d'étude précédents puisqu'ici les différentes solutions techniques intègrent une part d'énergie solaire. Que ce soit pour du photovoltaïque ou du solaire thermique, l'installation de panneaux en toiture a tendance bien évidemment à augmenter les coûts d'investissement du projet.

En effet, même pour l'installation dite de "référence", avec chaudière gaz et champs solaire thermique en toiture, le TRI est négatif sur une durée d'étude de 20 ans. Ainsi, aucun des trois scénarios étudiés n'a atteint un niveau de rentabilité sur 20 ans, alors que pourtant les prix de vente de l'énergie ont été configuré à 18 cts/kWh et 20 cts/kWh.

Notons que ce résultat découle logiquement des coûts d'investissement des champs solaires considéré : 500'000 CHF pour le champ photovoltaïque, contre 192'000 CHF pour le champ solaire thermique. Dans le cas du photovoltaïque l'entièreté de l'électricité consommée par les PAC est produite localement. Alors que pour les panneaux solaires thermiques, seulement 18% de l'énergie thermique nécessaire au chauffage et à l'ECS est produite localement.

Dans le contexte de la Loi Genevoise sur l'énergie, le résultat de ces scénarios n'est pas anodin. En effet, tout bâtiment neuf, ou avec une toiture rénovée, doit posséder des panneaux solaires thermiques afin de produire 30% des besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire. Si l'option PAC, est retenue, en fonction du COPa des machines sélectionnées, cette obligation peut alors se transformer en l'obligation de pose de capteurs photovoltaïques.

Or nous avons vu dans ce cas d'étude n°4 que le coût de revient de la chaleur avec PAC seules était de 17.4 cts/kWh, alors qu'avec un champ photovoltaïque il augmentait à une valeur de 26.1 cts/kWh, et revenait à 18.9 cts/kWh pour une chaudière avec solaire thermique. Il est intéressant de constater que le coût de revient des PAC seules est plus attractif que celui avec chaudière gaz et solaire thermique.

Dans un contexte de promotion de la ressource solaire renouvelable, ce quatrième cas d'étude souligne comment l'énergie solaire vient faire de l'ombre à une installation thermique uniquement concentrée sur des PAC air-eau. Soulignons toutefois, que les prix des installations solaires ont aujourd'hui fortement diminués par rapport à l'année 2013. Cependant, la démarche de comparaison des variantes techniques mérite d'être accomplie pour chaque futur projet, afin de sélectionner un projet techniquement faisable, économiquement rentable, et environnementalement responsable.

9 Méthodologie d'analyse technico-économique

En se basant sur l'ensemble des données financières, ce chapitre permet de réaliser une première modélisation économique. En fonction des exigences techniques et opérationnelles du projet, une structure d'opération peut être proposée. Celle-ci permet de déterminer les coûts de main-d'œuvre, les coûts d'infrastructures, d'équipements, de démarrage, et d'opérations. Finalement, un modèle financier peut être établi, en se basant sur des hypothèses de financement et d'indexation des coûts.

9.1 Structure opérationnelle

Avant de lancer le chantier de remplacement d'une chaudière classique par des PAC air-eau, il est bon de définir correctement la structure opérationnelle de l'organisation des acteurs du projet. Chaque type d'organisation possède ses propres caractéristiques et avantages, le propriétaire du bâtiment devra alors sélectionner un de ces modèles en fonction de ses prérogatives propres.

9.1.1 Le modèle d'auto-investissement

Le propriétaire du bâtiment investit lui-même dans le remplacement de la chaudière classique en fonction de sa capacité financière. Deux variantes existent : capital propre ou emprunt bancaire.

D'un point de vue technique, le propriétaire peut lui-même piloter le chantier de remplacement, mais il est souvent recommandé, pour les immeubles résidentiels, avec des puissances importantes, de s'entourer d'un représentant du Maître de l'Ouvrage offrant une expertise technique et un savoir-faire organisationnel.

Une fois le chantier terminé, et la PAC mise en service, le propriétaire doit s'entourer d'une entreprise de maintenance compétente, affichant une expérience réussie dans la régulation et le paramétrage des installations thermodynamiques. Des défauts ou autre erreur de contrôle ou de programmation de commande peuvent apparaître durant les premières années de fonctionnement. L'entreprise chargée de la maintenance peut être différente de l'entreprise ayant réalisé l'installation. Il s'avère économiquement intéressant de rassembler les responsabilités de la technique CVC d'un bâtiment au sein d'une même entreprise de maintenance.

Dans le cas de la location du bâtiment, le propriétaire ne peut pas tirer des bénéfices de la vente de l'énergie thermique aux occupants. L'Ordonnance sur le bail à loyer et le bail à ferme d'habitations et de locaux commerciaux, OBLF, articles 4 à 8, définit les charges facturables aux locataires comme les frais de chauffage, frais administratifs et d'entretien des réseaux hydrauliques.

9.1.2 Le modèle de semi-investissement

Afin d'inciter un propriétaire d'immeuble à investir dans le remplacement d'une chaudière classique par une PAC air-eau, une entreprise privée ou semi-privée peut proposer un investissement partagé. Dans ce modèle, le propriétaire investit un montant qui représente seulement le prix d'une nouvelle chaudière classique. Le supplément d'investissement pour une PAC air-eau est alors assuré par l'entreprise partenaire.

Un contrat lie alors les deux entités, et il est commun que le propriétaire du bâtiment se décharge des responsabilités techniques, comme le pilotage du chantier, la communication avec les mandataires techniques, la maintenance et les réglages des PAC air-eau.

Ce modèle ne représente pas de surcoût d'investissement pour le propriétaire mais peut engendrer des surcoûts administratifs tout au long du cycle de vie de l'installation.

9.1.3 Le modèle de contracting

Ce troisième modèle organisationnel devient de plus en plus répandu sur le territoire suisse, du fait que certaines entreprises spécialisées en assistance à maîtrise d'ouvrage sont devenues expertes dans ce type de montage financier et de gestion technique et que les entreprises électriques cherchent une diversification dans la fourniture de solutions clés en main à leurs clients historiques. Ainsi, le propriétaire du bâtiment peut entièrement se reposer sur un partenaire fiable, possédant de l'expérience sur des sites similaires, tout en se focalisant sur son activité principale et sa gestion immobilière.

Afin de simplifier les démarches, les entreprises d'assistance à maîtrise d'ouvrage investissent elles-mêmes dans l'achat des PAC air-eau et leurs équipements, et peuvent diriger l'ensemble du chantier technique et sa gestion administrative. Ainsi, cette entreprise se retrouve totalement indépendante dans le choix des mandataires techniques, ce qui peut faciliter le travail du propriétaire de l'immeuble, mais aussi lui limiter son champ d'action et l'appel à la concurrence.

La chaleur ainsi produite est vendue par l'entreprise au propriétaire de l'immeuble, à travers un contrat négociable sur une durée définie ou indéfinie. Le prix de vente de l'énergie peut alors être différent du prix de revient de la chaleur, ce qui constituera la marge de l'entreprise qu'il est souvent impossible de connaître pour le propriétaire. Un organisme soutenu par l'OFEN SwissEsco peut aider grandement dans les démarches.

9.2 Analyse économique

9.2.1 Méthode d'analyse des coûts initiaux

Pour une puissance similaire de chauffage, le prix à l'investissement pour des PAC air-eau est supérieur d'un ratio situé entre 2,5 et 5 par rapport à une chaudière classique. Afin de compenser ce déficit de rentabilité initiale, il convient d'essayer d'abaisser la puissance thermique nécessaire, par exemple grâce à l'utilisation d'accumulateurs tampon, le remplacement des diffuseurs de chaleur, la programmation horaire de la production de chaleur, ou l'assainissement de l'enveloppe thermique.

Le choix initial du mode de fonctionnement en bivalence ou en monovalence va influencer de manière très forte le calcul de rentabilité d'une installation de PAC air-eau. En effet, le coût d'investissement peut doubler dans le cas d'une bivalence alternative. Si la chaudière classique est en bon état, on peut alors envisager de l'utiliser quelques années en bivalence avec les nouvelles PAC air-eau, puis de réaliser un investissement différé pour remplacer cette chaudière classique.

La décision d'investissement va dépendre du taux de couverture du chauffage par une énergie renouvelable que l'on doit ou souhaite atteindre.

Les surcoûts d'investissement pour les PAC air-eau sont également à contrôler et à limiter au maximum, à l'aide de mesures performantes d'atténuation du bruit, d'implantation dans des zones non exposées, sur des structures porteuses solides, avec un concept de sécurité robuste et confirmé. Mieux vaut investir un supplément lors de l'investissement initial, plutôt que de payer des études et des modifications techniques au cours du cycle de vie des machines.

La solution PAC air-eau étant éligible aux subventions, il est important de vérifier et d'initier toutes les démarches envisageables à l'échelle de la commune, du canton et de la confédération afin de minimiser la part de fond propre que le propriétaire doit libérer.

9.2.2 Période d'analyse

La période d'analyse représente la durée durant laquelle les coûts différés sont pris en compte. La norme ISO 15686-5 privilégie le cycle de vie complet de l'ouvrage, c'est-à-dire de sa réalisation à sa déconstruction. Cet horizon de temps peut alors dépasser 100 ans. Néanmoins, par convention, l'analyse en Coût Global fixe une limite à 100 ans puisqu'une modification significative du résultat au-delà de cette période paraît peu probable.

L'incertitude des prévisions des coûts différés sur un horizon de temps aussi éloigné est également à considérer. Aussi, la norme ISO 15686-5 admet que la période d'analyse soit plus courte à condition de le préciser et de le justifier. Ainsi la période d'analyse peut être fixée sur la base d'une échéance contractuelle : contrat de partenariat, bail à construction. Dans ce cas de figure, il convient de prendre en compte la valeur résiduelle de l'ouvrage dans le calcul en coût global.

L'apparition de coûts additionnels en dehors de la période d'analyse (comme par exemple les coûts de grosse maintenance engagés après la fin de cette période et/ou la perte de performance associée) peuvent occasionner des impacts significatifs sur les coûts de possession du maître d'ouvrage. Il est donc recommandé d'estimer le coût global sur une période allant jusqu'à la limite de l'obsolescence d'un ouvrage, par exemple 20-30 ans pour un bâtiment, ou de tenir compte de l'état dégradé dans la valeur résiduelle de l'ouvrage ou du système analysé.

Une analyse de sensibilité permettra d'affiner le niveau de précision des calculs et d'explicitier si le changement de période de calcul influence la décision. Certains paramètres ou hypothèses peuvent jouer un rôle clé lors de la réalisation d'une analyse de cycle des coûts : taux d'actualisation, taux d'inflation, prix de vente de l'énergie, marge de sécurité. Par cette analyse de sensibilité, on dégage les influences les plus importantes ainsi que les points clés pour une prise de décision. L'influence de certaines hypothèses prises sera analysée de façon critique.

9.2.3 Maintenance et remplacement

Les coûts annuels de la maintenance se basent sur des taux de fonctionnement et d'utilisation des équipements courants et fonctionnant toute l'année. Plus un équipement sera entretenu et plus sa durée de vie est prolongée.

L'un des paramètres-clé d'une étude du cycle des coûts est la fréquence des maintenances lourdes, qui s'accompagnent d'études ou d'audits pouvant préconiser des remplacements précoces de certains équipements. Pour les installations CVCSE, ces maintenances permettent d'optimiser le fonctionnement des machines, ce qui abaisse la consommation des fluides et d'électricité, et a donc un impact direct sur les coûts fonctionnels des bâtiments.

9.2.4 Le taux d'actualisation

Le calcul doit s'effectuer à une date de référence qui est, en général, la date de livraison de la construction. L'actualisation est l'opération mathématique qui permet de ramener les coûts différés à leur équivalent de date de référence. En d'autres termes, la norme ISO 15686-5 le définit par le concept de « valeur du temps », le taux d'actualisation étant ainsi un taux de substitution entre futur et présent. Ce taux varie suivant les organisations. Dans le secteur privé, ce taux d'actualisation représente le coût d'opportunité de l'investissement du capital. Pour la norme ISO 15686-5, il peut être estimé à partir :

- du coût du financement contracté par l'investisseur,
- du taux de rémunération de la trésorerie,
- du taux de rentabilité du coeur de métier,
- d'un taux de rentabilité exigé pour un investissement jugé comme risqué.

La norme ISO 15686-5 distingue deux types de taux d'actualisation :

- Le taux réel d'actualisation : « facteur ou taux utilisé pour ramener une valeur future à sa valeur présente, sans tenir compte du taux d'inflation générale ou spécifique dans le coût d'un bien particulier », c'est-à-dire un taux différentiel qui prend déjà en compte l'inflation. Dans cette hypothèse, tous les coûts différés supportent le même taux d'inflation.
- Le taux nominal d'actualisation : "facteur ou taux utilisé pour ramener une valeur future à sa valeur présente, en tenant compte du taux d'inflation/déflation générale », c'est-à-dire un taux brut auquel il faudra appliquer des scénarios d'inflation.

La norme suggère d'appliquer un taux réel d'actualisation compris entre 0 et 5%.

9.2.5 L'Inflation

La norme ISO 15686-5 préconise de raisonner en valeur constante pour éviter des hypothèses aléatoires sur le taux d'inflation « sauf s'il est prévisible que les coûts relatifs des différentes sources d'énergie vont augmenter ». Elle précise aussi que « l'indexation des prix de l'énergie est un facteur important » du calcul en coût global. C'est pourquoi, elle admet un taux d'inflation spécifique pour les fluides énergétiques. Ce taux sera défini au début de l'étude à 1% par an.

9.2.6 Limites du système

L'étendue des ouvrages concernés par l'approche en coût global est un autre facteur distinguant les pratiques. Ainsi, le coût global peut s'appliquer à différentes échelles physiques : au niveau d'un patrimoine, au niveau d'une construction ou au niveau d'une partie d'ouvrage.

9.2.7 Catégories de coûts

Compte tenu de la diversité des catégories de coûts affectant un ouvrage, la Norme ISO/DIS 15686 rappelle que « ...le chiffrage doit être effectué à un niveau de détail approprié aux phases clés du

projet ». Ce chiffrage est réalisé (pour chaque phase) sur la base de la fixation préalable du champ d'application de l'approche en « Coût Global » avec le maître d'ouvrage. Il convient de raisonner en coût global dès les études préalables. Nous pouvons rappeler ici que « 80% des coûts d'exploitation, de maintenance et de remplacement d'un bâtiment sont déterminés dans les premiers 20% du processus de conception ».

9.2.8 Plan d'amortissement

Lors du montage financier du projet, plusieurs valeurs caractéristiques doivent être sélectionnées et définies. Grâce à celle-ci les calculs de rentabilité, les valeurs nettes actualisées et les taux de retour internes pourront alors être calculés. Ces valeurs peuvent être listées comme suit :

- + Part d'investissement direct, part empruntée
- + Montant du prêt d'investissement
- + Taux d'intérêt annuel sur le prêt : 3.5 %
- + Durée du prêt : 20 ans
- + Tableau des soldes et intérêts cumulatifs
- + Bénéfices attendus par l'investisseur : rentabilité annuelle
- + Taux d'actualisation : 5 %

10 Conclusion

10.1 Contrainte acoustique et bâtiment classé

L'installation de PAC air-eau dans un milieu urbain dense pourrait poser un certain nombre de contraintes, sans adaptations appropriées à la puissance acoustique produite par les machines.

Dans les études de cas utilisées, les mesures nécessaires de protection contre le bruit et de réduction de l'impact esthétique (cloisonnement des locaux techniques en toiture) ont été expliquées et chiffrées. Dans nos quatre cas d'étude, ces mesures sont simples et n'ont pas nécessité d'étude acoustique abouties : construction de locaux technique en toiture, bandes acoustiques sous le socle des PAC et pièges à son dans les gaines et prises d'air. Ainsi, un propriétaire peut établir un modèle économique sur la base des données techniques et économiques spécifiques à son bien, afin de faciliter la prise de décision.

Dans le cas des bâtiments anciens et classés au patrimoine, les contraintes peuvent potentiellement freiner le bon déroulement du projet et dans le pire des cas interdirent la réalisation.

Si des études acoustiques approfondies étaient nécessaires ou si un architecte spécialisé devait intervenir afin de réaliser le dossier de mise à l'enquête, un soutien aux frais d'études de la part de l'état serait une solution afin de favoriser l'installation de la PAC air-eau comme seule alternative à la chaudière classique.

10.2 Comparatif des scénarios PAC air-eau étudiés

Le présent rapport met en évidence les modalités d'installation de PAC air-eau dans de l'habitat collectif, en milieu urbain. Les analyses de cycle de coût réalisées et les comparaisons des prix des quatre projets de référence étudiés peuvent se résumer dans le tableau suivant (le projet n°4 représente le premier scénario avec PAC seules) :

		Projet n°1	Projet n°2	Projet n°3	Projet n°4
Mode de fonctionnement		Bivalent	Monovalent	Bivalent	Monovalent
Type de PAC		Monobloc	Splits	Module-monobloc	Monobloc
Taux de couverture PAC	%	75%	90%	80%	95%
Puissance PAC	kW	210	36	80	100
Investissement	CHF TTC	525 772	117 006	126 411	334 472
Indicateur énergétique	W / m ²	28	22	26	17
Indicateur financement	CHF / kW	2504	3250	1580	3345
Indicateur charge d'exploitation	CHF / m ²	2.6	0.5	1.0	0.3
Temps de retour brut	ans	7.8	11.0	10.4	13.4
Prix d'achat de l'électricité	cts CHF / kWh	18.0	20.6	20.0	20.0
Prix de revient de la chaleur	cts CHF / kWh	13.0	14.4	14.0	17.4
Prix de vente de l'énergie th.	cts CHF / kWh	16.0	16.0	16.0	18.0
Marge sécurité pour PAC	cts CHF / kWh	1.0	0.6	0.6	0.2
Taux de retour interne /20ans	%	5.1%	0.1%	1.3%	-1.6%
Temps de rentabilité	ans	11.5	20	16.5	23
CO₂ économisé	tonne/an	211	53	40	68
Positionnement PAC	-	Toiture	Local technique	Local technique	Local technique
Puissance acoustique PAC	Lwa (dB(A))	49	31	30.8	-

Tableau 8 : Récapitulatif des résultats de l'étude

10.2.1 Aspects d'intégration architecturale

Les quatre projets étudiés nous ont permis d'étudier plusieurs systèmes de PAC air-eau, installées soit directement sur la toiture, soit dans un local technique construit sur la toiture. À chaque fois, aucune autre disposition des machines n'était imaginable. Notons que le cas n°3 est celui qui s'intègre le mieux au système du bâtiment, puisque les PAC sont des modules montés à l'intérieur de monoblocs d'extraction d'air simple-flux. L'aspect esthétique n'a pas été profondément recherché dans chacun de ces cas d'étude, les locaux techniques pouvant être recouvert de végétation ou peint dans une couleur neutre sur la toiture. Les installations techniques étant courantes sur les toitures des immeubles résidentiels en Suisse, aucune contrainte particulière n'a été relevée par les porteurs de projet. La plus grosse part des surcoûts liés aux PAC réside donc dans la construction de ces locaux techniques, mais aussi dans le grutage des machines et la construction de socles. La sécurisation de la toiture est négligeable, par rapport à une sécurisation standard.

10.2.2 Aspects sonores et vibrations

La construction de locaux techniques cloisonnés en toiture réduit très fortement le bruit aérien des compresseurs. De plus, dans la plupart des cas, des pièges à son sur les prises d'air sont envisagés pour réduire les puissances acoustiques de 5 à 10 dB(A). Tous les socles ont été montés sur des résines ou bande de caoutchouc, type "Silent Bloc". De ce fait, contre l'avis général, l'aspect sonore n'est pas du tout un facteur aggravant ou limitant pour ce type de technologie.

10.2.3 Modèle de PAC air-eau

Les quatre cas d'étude regroupent deux modes de fonctionnement (monovalent et bivalent) et trois types de fonctionnement (monobloc, module et splits). Remarquons que les modes bivalents peuvent abaisser leur taux de couverture PAC (75% et 80%), pour ainsi réduire l'indicateur d'investissement CHF / kW. Le fonctionnement en bivalence permet donc de limiter la puissance installée, afin d'optimiser au mieux le fonctionnement des machines au meilleur COPa. Les deux modes bivalents sont également ceux avec le prix de revient de la chaleur la moins chère, avec 13 et 14 cts/kWh.

10.2.4 Prix d'achat des combustibles et de l'électricité

Les prix d'achat de l'électricité, et des combustibles fossiles dans le cas de bivalence, dépend intrinsèquement des contrats de chaque propriétaire avec son distributeur d'énergie. Ces prix peuvent varier géographiquement en fonction de la localisation en Romandie des immeubles étudiés. Ainsi, bien que les variations entre 18 cts/kWh et 21 cts/kWh aient une grande importance dans le coût de revient de l'énergie produite, celle-ci est difficilement négociable pour de faibles ou moyennes puissances.

10.2.5 Prix de vente de l'énergie thermique

Afin de mettre tous les cas d'étude sur un pied d'égalité lors de la comparaison économique, le prix de vente de l'énergie a été fixé arbitrairement à 16 cts/kWh. Ce prix reste concurrentiel avec une solution fossile (en comptant tous les frais d'opération et de combustible). Seul le cas d'étude n°4 ne peut pas être vendu à 16 cts/kWh, à cause de son prix de revient trop élevé.

10.2.6 Temps de retour brut et rentabilité

L'analyse des bilans financiers des quatre cas d'étude montre que le temps de retour brut moyen d'un projet d'installation de PAC air-eau se situe entre 7 et 14 ans. Les trois premiers réalisés ont démontré un taux de retour interne (TRI) positif sur 20 ans, et sont donc considérés comme des projets rentables. Le dernier projet ne peut pas être rentable dans ces conditions de prix d'investissement trop élevé.

Remarquons que cette comparaison de quatre études de cas peut donner une première approximation de la rentabilité qu'un investisseur peut attendre. Ainsi les solutions en bivalence, avec des taux de couverture inférieurs à 80% sont les projets les plus rentables. Remarquons que ces projets reposent sur un complément fossile existant, et de ce fait profite d'une énergie sans coût d'investissement (chaudière gaz ou mazout existante). Cependant les chaudières existantes ne sont pas aussi efficaces que des nouvelles chaudières et le respect des normes anti-pollution doit être garanti en tout temps.

En règle générale, chercher à réduire le coût d'investissement du projet, en réutilisant des installations existantes, est le moyen le plus pratique d'augmenter la rentabilité du projet. Cette remarque est à considérer dans les cas de faisabilité technique, puisque la durée de vie des équipements de production de chaleur est limitée. Cependant, dans les quatre cas d'étude, il est préférable d'augmenter les coûts d'exploitation et de maintenance (comme dans le cas n°1), si cela peut diminuer les coûts d'investissement. Cette stratégie peut s'avérer risquée, et devra faire l'objet d'une étude sur un plus grand nombre d'objet immobilier pour être confirmée.

10.3 Comparatif avec variantes techniques

Pour chacun des quatre cas d'étude, une comparaison avec un scénario employant une chaudière fossile classique (gaz), avec ou sans appoint électrique, ou aide de panneaux solaires, fut menée. Il s'agit de variantes techniques de comparaison. Ces comparaisons économiques, sur l'échelle du cycle des coûts, mettent en évidence le fait que la solution PAC air-eau reste actuellement plus chère que le simple remplacement à l'identique d'une chaudière à gaz ou au mazout. Les données de calcul de ces études sont rassemblées dans le tableau suivant :

		Projet n°1	Projet n°2	Projet n°3	Projet n°4	
Source énergétique		Gaz	Gaz + élec	Gaz	PAC + PV	Gaz + Solaire
Taux de couverture Gaz	%	100%	90%	100%	0%	82%
Investissement	CHF TTC	172 000	59 082	56 968	872 972	371 606
Indicateur financement	CHF / kW	819	1641	712	8730	3716
Temps de retour brut	ans	5.1	11.0	7.1	21.3	14.1
Prix de revient de la chaleur	cts CHF /kWh	13.8	15.2	13.5	26.1	18.9
Prix de vente de l'énergie th.	cts CHF /kWh	16.0	16.0	16.0	18.0	19.0
Taux de retour interne /20ans	%	16.4%	2.9%	9.8%	-2.0%	-0.5%
Temps de rentabilité	ans	6	14.7	9	-	21

Tableau 9 : Récapitulatif des résultats des variantes avec chaudière fossiles

Le temps de retour brut pour l'installation d'une chaudière à gaz pour la production du chauffage et de l'ECS peut être attendu à 8 ans environ. Le TRI peut être compris entre 3% et 16%. Dans le cas n°4, l'implantation de panneaux photovoltaïques ou solaires thermiques a tendance à péjorer grandement les résultats de rentabilité. Même si le prix des combustibles augmente avec le temps, le prix d'investissement dans une technologie mature et robuste est l'atout principal du bilan financier de ces systèmes. Avec un taux d'actualisation de 5%, l'influence du montant investi est très marquée et le taux d'indexation des carburant devient presque négligeable.

Nous pouvons remarquer une importante différence entre l'indicateur de financement en CHF/kW des cas n°1 et n°3 avec celui du cas n°2. Ce résultat s'explique par le fait que la chaudière gaz du cas n°2 devra être installée sur la toiture du bâtiment, puisqu'il n'existe pas de place en sous-sol. Les deux autres cas possèdent déjà des chaufferies installées en sous-sol. De plus, la situation de départ du projet n°2 est celle d'un chauffage électrique pour l'immeuble résidentiel. Ainsi, l'ensemble des surcoûts sur la production hydraulique, pour les honoraires d'études, et pour les appareils de régulation, sont bien plus importants que pour les cas n°1 et n°3.

Afin de comparer des indicateurs technico-économiques pour d'autres systèmes énergétiques que ceux des systèmes de PAC air-eau ou chaudière gaz, pour une puissance thermique de 210 kW (cas d'étude n°1), nous avons rassemblé des données d'autres sujets de référence dans le tableau ci-dessous :

		Gaz	Mazout	CAD	Boucle d'eau	PAC sol eau	PAC eau-eau
Investissement	CHF TTC	172 000	215 220	236 742	354 190	556 466	444 616
Indicateur financement	CHF / kW	819	1 025	1 127	1 687	2 650	2 117
Temps de retour brut	ans	7.8	7.3	9.5	10.5	13.5	12.3
Prix de revient de la chaleur	cts CHF /kWh	14.7	13.7	15.2	15.7	17.1	16.1

Tableau 10 : Récapitulatif des résultats des variantes avec chaudière fossiles

Pour une puissance similaire de 210 kW, les solutions basées sur des ressources fossiles, de valorisation de produits de combustion ou de rejets thermiques apparaissent toujours plus rentables aujourd'hui que des solutions reposant sur le fonctionnement de PAC thermodynamiques. Le prix d'investissement afin d'aller puiser l'énergie thermique dans la source renouvelable est toujours le facteur limitant des installations avec PAC.

10.4 Choix de l'utilisation des systèmes PAC air-eau

Aujourd'hui, les projets utilisant des chaudières gaz seules sont plus rentables (temps de retour plus courts et TRI plus élevés) que des projets avec PAC seules. Mais, force est de constater que le choix du système de production n'est pas si binaire (exemple : bivalent, appoint électrique, complément solaire, mixe avec existant). En effet, des règles et législations contraignantes obligent dans certains cas à augmenter la part d'énergie renouvelable dans le mixe énergétique, ou d'utiliser la toiture pour avoir une production d'énergie liée au solaire (thermique ou électrique). De ce fait, de nombreux concepteurs de systèmes énergétiques optent pour des systèmes bivalents, plus rentables, et utilisent des sources fossiles existantes comme appoint ou sécurité.

Nous avons donc vu dans cette étude que le bruit produit par des PAC air-eau ou leur intégration architecturale n'a pas engendré des désagréments importants, ou produits des surcoûts rendant le

projet non rentable. L'obstacle est donc financier. Des lois contraignantes sur la part d'énergie renouvelable dans le mixe des bâtiments résidentiels, ou la responsabilité environnementale des propriétaires, permettent aux projets avec PAC air-eau de se développer en Suisse. Le changement du paradigme actuel des énergies fossiles bon marché poussera peut-être l'investisseur de demain à préférer un système PAC air-eau à la place d'une solution classique au gaz.