



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Suivi énergétique du bâtiment tertiaire Polimmo, 5 route des Jeunes à Genève, rénové MINERGIE® et équipé de pompes à chaleur couplées à des sondes géothermiques

Aspects techniques et économiques

Synthèse du rapport final

Floriane Mermoud, Pierre Hollmuller, Eric Pampaloni, Bernard Lachal

Mandat réalisé pour le compte de l'Office cantonal de l'énergie de l'Etat de Genève (OCEN)
par le Groupe Energie, Institut Forel et Institut des Sciences de l'Environnement (ISE)



Carouge, septembre 2014

Contact : floriane.mermoud@unige.ch

Contexte général

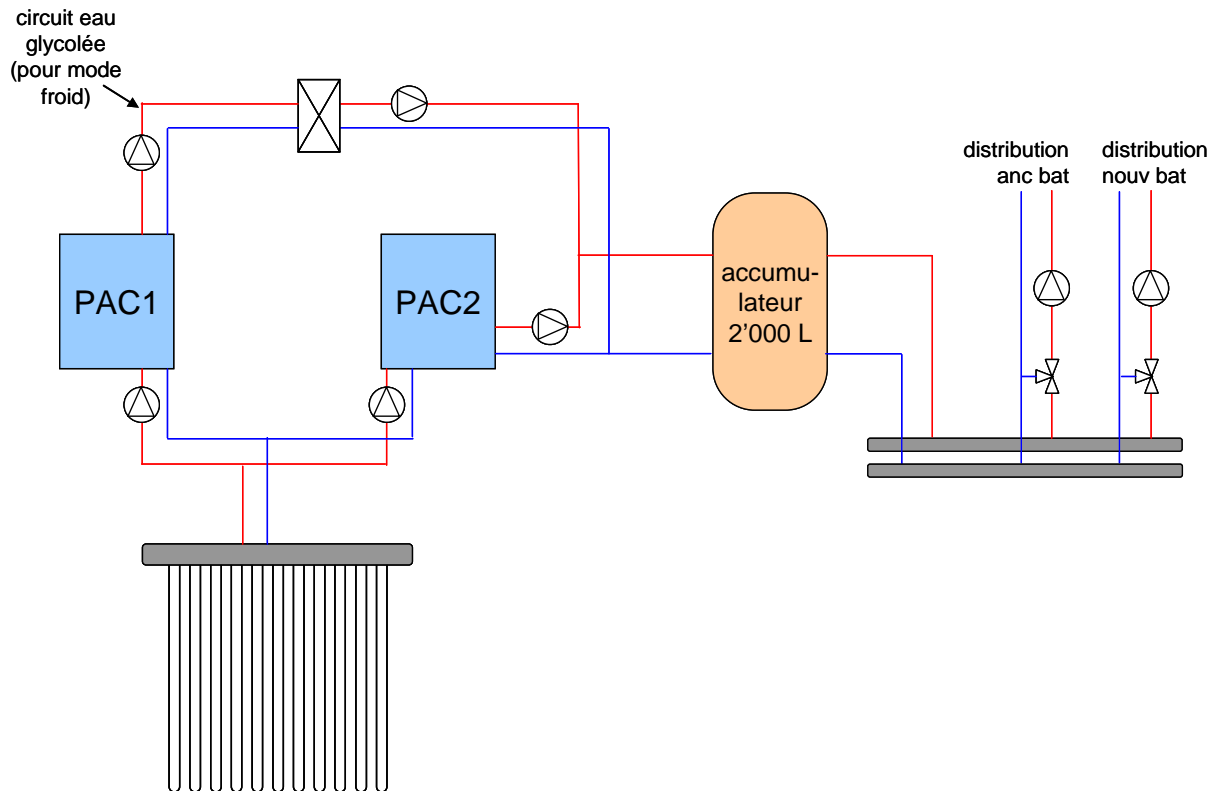
Lors d'un projet de rénovation énergétique d'un bâtiment, la rénovation de l'enveloppe s'accompagne souvent d'une rénovation des installations techniques. Le changement du système de chauffage se fait souvent vers une solution plus performante énergétiquement ayant recours aux énergies renouvelables, comme une pompe à chaleur géothermique.

Ce travail concerne un **retour d'expérience réalisé par le groupe Energie de l'Université de Genève sur la rénovation énergétique d'un bâtiment tertiaire datant des années 60 équipé de pompes à chaleur géothermiques**, situé au 5 route des Jeunes à Genève et appartenant à la régie Polimmo.

Voici quelques-unes des caractéristiques de la rénovation effectuée en 2008 :

- Rénovation au **standard Minergie** ($< 55 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ pour le chauffage et la ventilation) : isolation par l'extérieur, changement des fenêtres pour du double-vitrage.
- **Surélévation d'un étage**, faisant passer la SRE de 2'205 à 3'668 m^2 .
- Production de chaleur assurée par **2 pompes à chaleur géothermiques** (2x120 kW, 11 sondes de 244 m), dont une peut fonctionner en réversible pour produire du froid permettant d'alimenter de futurs plafonds froids.
- Surélévation équipée d'une **ventilation double-flux couplée à un puits canadien**.

La figure suivante présente le schéma de principe de l'installation de chauffage :

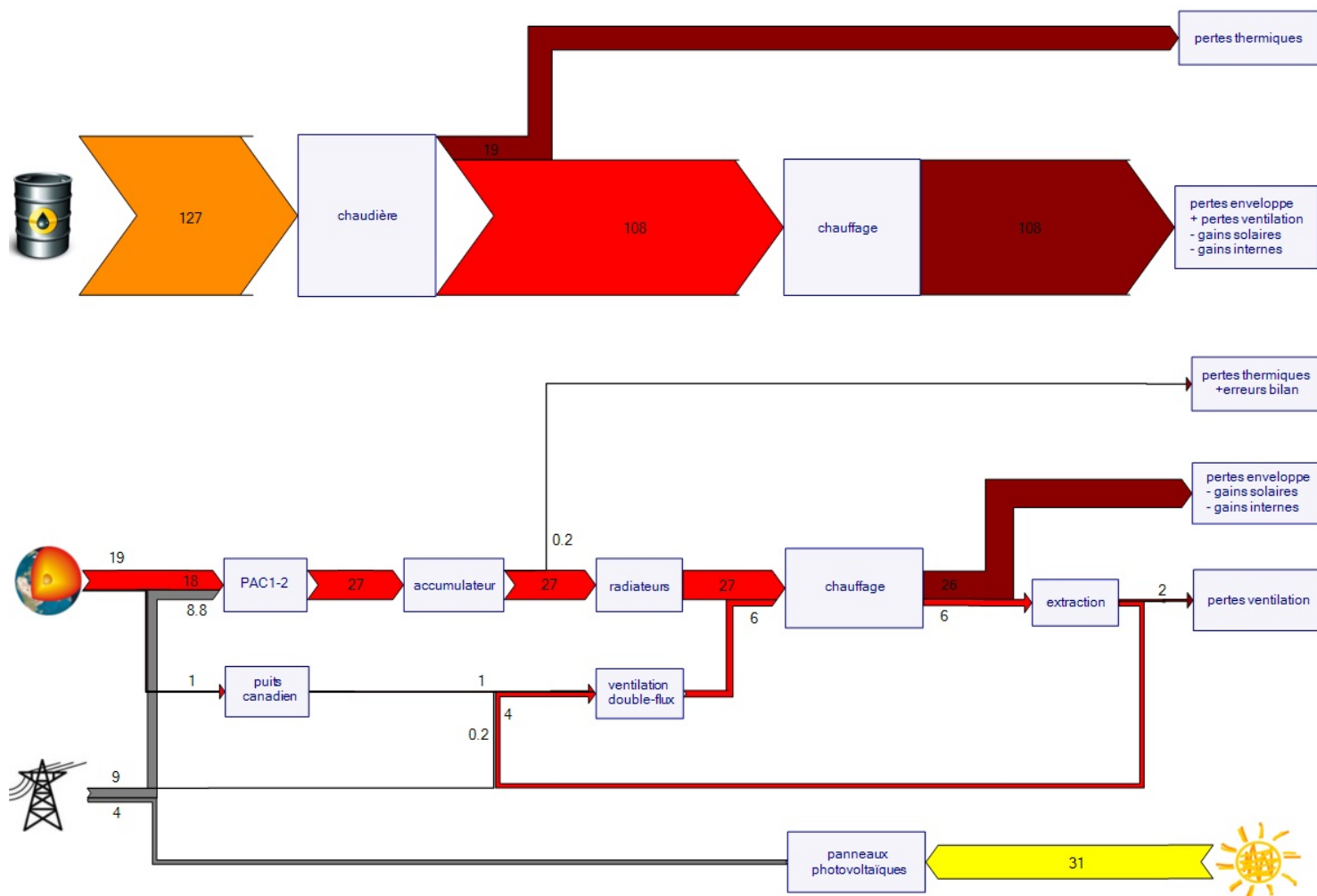


Le retour d'expérience, effectué sur deux années complètes (2010-2012), a porté aussi bien sur les aspects énergétiques qu'économiques.

Analyse énergétique

Flux énergétiques

Les flux énergétiques dans le bâtiment Polimmo pour une année moyenne corrigée climatiquement (kWh/m²/an) sont présentés sur le diagramme ci-dessous, avant transformation (haut) et après transformation (bas) :



On note tout d'abord que la **demande de chauffage du bâtiment** a été **divisée par 4**, passant de 108 kWh/m²/an à **27 kWh/m²/an**, grâce à la rénovation de l'enveloppe et à la haute performance de l'enveloppe thermique de la surélévation : les niveaux de consommation atteints sont similaires à ceux observés dans des constructions Minergie neuves. NB : la demande thermique se résume à une demande de chauffage (pas d'ECS car bâtiment de bureaux).

La **consommation électrique** est **inférieure à 10 kWh/m²/an** pour le chauffage et la ventilation (dont la majorité pour le fonctionnement de la PAC), ce qui est faible. L'installation photovoltaïque installée sur le toit du bâtiment compense en partie cette consommation.

Fonctionnement des pompes à chaleur

▪ Régulation

Les PAC sont connectées en série avec le ballon d'accumulation. Selon cette configuration hydraulique, **les PAC doivent obligatoirement charger le ballon**, sans possibilité de distribuer la chaleur en direct. La PAC

s'enclenche lorsque la température dans le ballon passe en dessous de la température de consigne. Une courbe de chauffe est réglée sur le ballon, en accord avec la courbe de chauffe de la distribution : linéaire entre 45°C par -10°C extérieur et 20°C par 20°C extérieur. Un ralenti de nuit (-10K entre 22h et 5h) a également été programmé. NB : durant la 1^{ère} année de suivi, il n'y avait pas de courbe de chauffe ni de ralenti de nuit sur le ballon : ce dernier était toujours à la même température (~50°C) quelle que soit la température demandée par la distribution et l'heure. Cette optimisation a permis d'améliorer les performances de l'installation.

▪ Dimensionnement

Chacune des PAC possède deux étages, soit un total de 4 niveaux de puissance possibles. Le suivi a montré que l'installation était **surdimensionnée d'un facteur 2** : une seule des deux PAC permet de couvrir 99% des besoins de chauffage (la 2^{ème} PAC ne se met quasiment jamais en route). En conséquence, la **température à la sortie des sondes géothermiques** est **élevée** (entre 10 et 15°C toute l'année) puisqu'elles ont été dimensionnées pour le fonctionnement de deux PAC simultanément. Ainsi, la puissance maximum tirée des sondes est de 30 W/m contre 50 recommandé habituellement. D'autre part, on observe un **cyclage important** avec une vingtaine de cycles de fonctionnement d'environ 1/2h pour un jour d'hiver, ce qui témoigne du **sous dimensionnement du ballon de stockage** (devrait être au minimum deux fois plus volumineux compte tenu des puissances en jeu), qui se révèle être plutôt un ballon tampon. Ce fonctionnement intermittent est préjudiciable pour les performances et la durabilité des PAC.

▪ Niveaux de température

L'analyse des niveaux de température dans le système montre que **la PAC produit à environ 10-15K plus haut que ce que demande la distribution**. Ceci est dû à plusieurs phénomènes :

- La présence d'un **échangeur intermédiaire** sur le circuit aval de la PAC1, qui induit une perte de température de quelques degrés qui doit être compensée par la PAC. La raison d'être de cet échangeur est un circuit en eau glycolée permettant la production de froid en été sans risque de gel des canalisations. NB : vu les niveaux de température de production du froid (plafonds froids), cet échangeur n'aurait pas été indispensable.
- La **configuration hydraulique** induit un passage obligé par le ballon, et le processus de charge est tel que la température dans le ballon à la fin du cycle est supérieure de quelques degrés à la température de consigne de la distribution.
- La **différence de température entre départ et retour de la distribution** est **faible** : de l'ordre de 2-3K, à cause de débits de distribution élevés. Une réduction significative des débits n'a pas pu être mise en œuvre durant le suivi à cause d'un mauvais équilibrage hydraulique du circuit de chauffage. Ce faible écart de température implique des retours de distribution chauds et donc une température à l'entrée du condenseur de la PAC élevée. La différence de température au condenseur étant fixe (7-8K avec un compresseur en marche, 14-15K avec deux compresseurs), la température à la sortie du condenseur (=température de production de la PAC) va être d'autant plus élevée et les performances diminuées.

Performances des pompes à chaleur

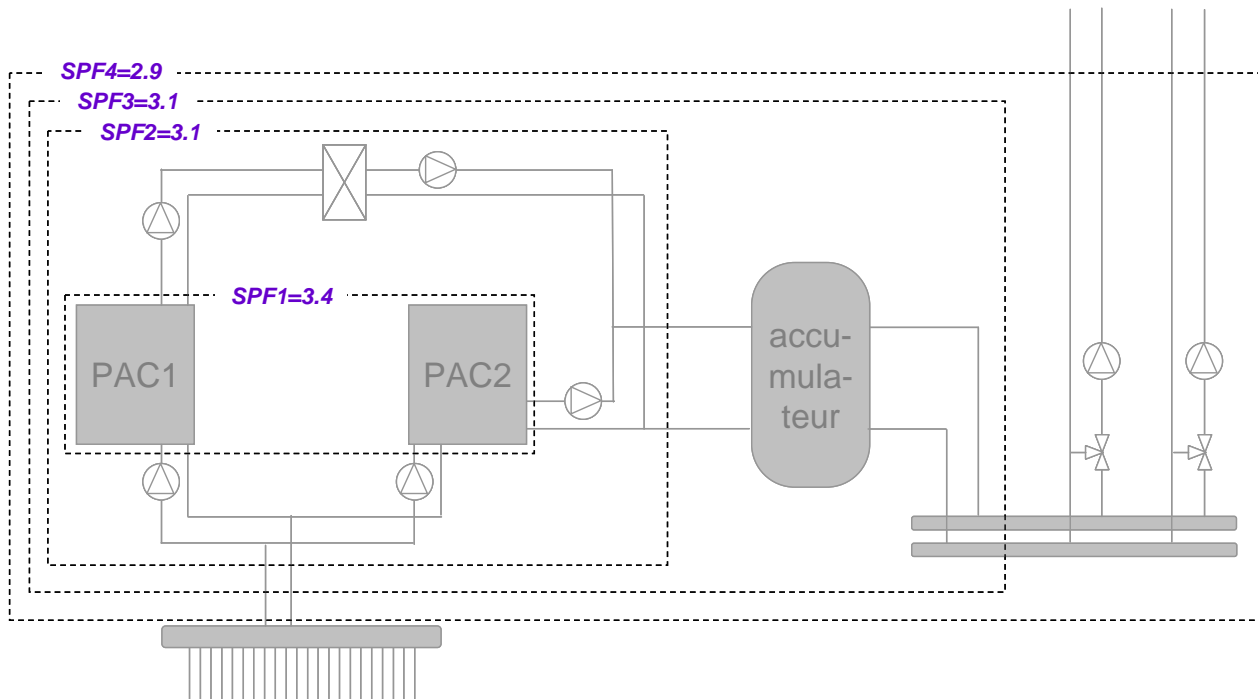
▪ Coefficient de performance (COP)

Les performances instantanées d'une PAC sont essentiellement dépendantes de l'écart de température entre l'évaporateur et le condenseur : plus ce dernier est élevé, moins les performances sont bonnes. Le suivi a montré

que le **COP de la PAC1** était **conforme aux données constructeur** lors du fonctionnement à deux compresseurs. Le fonctionnement à un seul compresseur présente un COP inférieur de -0.7 point à même écart de température. L'efficacité de la PAC1 (=rapport entre COP effectif et COP de Carnot) est de l'ordre de 0.4-0.45 à deux compresseurs, 0.3-0.4 à un seul compresseur, ce qui représente de bonnes performances.

- **Seasonal Performance Factor (SPF)**

Le SPF qualifie les performances annuelles de l'installation par le rapport entre l'énergie thermique produite et l'énergie électrique consommée. Plusieurs définitions existent en fonction des frontières retenues. La figure suivante présente les différentes valeurs mesurées sur l'année 11-12 (après optimisation de l'installation) :



Le **SPF1** (PAC seules) s'élève à **3.4**. NB : il était de 3.1 en 10-11 avant optimisation. Si on prend en compte la consommation des auxiliaires des PAC, le SPF3 tombe à 3.1 : ces derniers représentent 11% de la consommation électrique totale, en majorité imputables à la pompe géothermique (10%). Si on prend encore en compte la consommation des circulateurs de distribution, le **SPF4** arrive à **2.9**.

Cette **valeur** semble **modeste** compte tenu de la température élevée à la sortie des sondes géothermiques (12-13°C en moyenne) et du fait qu'il n'y a que du chauffage à fournir, i.e. de la chaleur à moyenne température. L'explication est à rechercher dans les **niveaux de température dans l'installation** et spécialement dans la température de production élevée de la PAC, qui pèjore ses performances. Ce résultat est cependant à relativiser puisque **la consommation électrique des installations de chauffage reste faible** (inférieure à 10 kWh/m²/an) grâce à l'excellente qualité de la nouvelle enveloppe thermique du bâtiment.

L'optimisation des installations a permis d'améliorer les performances du SPF4 de 2.6 à 2.9. Cependant, il est probable que **les performances n'évolueront plus significativement** dans les années à venir, car les possibilités d'optimisation sont limitées d'une part par la configuration hydraulique de l'installation, d'autre part par l'accès restreint aux paramètres de régulation.

Analyse de sensibilité

En complément à l'étude de terrain, nous avons mené une **analyse de sensibilité sur le dimensionnement de l'installation par simulation à l'aide du logiciel Pilesim**. Après validation du modèle grâce aux données mesurées, différentes configurations ont été testées et notamment une **diminution du nombre de sondes de 11 à 6** (soit près de 50% de moins). On note que la température d'injection minimale annuelle dans les sondes passe de 4°C pour 11 sondes à 0°C pour 6 sondes au bout de 25 ans. Il en résulte une influence minime sur les performances puisque le SPF2 se maintient à 3. On en conclut qu'un dimensionnement de moitié à Polimmo (une seule PAC avec 6 sondes) **n'aurait pas affecté les performances de l'installation** mais aurait significativement diminué les coûts.

Par la suite, une **installation bivalente** constituée d'une **PAC de la moitié de la puissance maximale appelée** sur l'installation complétée par une **résistance directe pour les pointes** a été simulée. Dans ce cas, la PAC couvrirait encore 90% des besoins thermiques annuels, et le **SPF3** de l'installation tomberait à **2.5 contre 3** dans le cas de base. Mais la **consommation électrique resterait faible** : elle passerait à 11 kWh/m²/an (contre 9 aujourd'hui) en tenant compte de la résistance. A noter que dans ce dernier cas, les performances diminueraient légèrement dans le temps à cause du dimensionnement plus serré des sondes géothermiques.

Fonctionnement de la ventilation

▪ **Débits et consommation électrique**

Seule la surélévation a été équipée d'une ventilation contrôlée, consistant en une ventilation double flux couplée à un puits canadien. Le monobloc est by-passé l'été, pour pouvoir profiter de l'effet du puits canadien.

Les normes en vigueur proposent des valeurs différentes concernant les débits de dimensionnement des installations de ventilation. Dans le cas de Polimmo, selon les hypothèses de la norme SIA 380/1 il serait de 2'600 m³/h tandis qu'en suivant les préconisations du cahier technique 2024, une valeur de 3'800 m³/h devrait être adoptée. Or le débit hygiénique recommandé par la norme 380/1 est seulement de 1'000 m³/h (correspondant au taux de renouvellement d'air préconisé par la norme de 0.7 m³/m²/h).

Initialement, la VDF fonctionnait au débit maximum du monobloc soit 3'600 m³/h et 2.5 à 3 kW électriques en permanence. Il en a résulté une **consommation électrique de 13 kWh/m²** la 1^{ère} année de suivi, soit plus que la consommation dédiée à la PAC. A ce débit, les locaux étaient notablement **surventilés** et le débit a été **diminué à 1'000 m³/h** (division par 3.6), soient 200 W électriques (la consommation électrique d'un ventilateur varie comme le cube de son débit). La baisse de débit couplée à un arrêt nocturne (22h-5h) devrait permettre à terme de maintenir la consommation électrique de la ventilation **en dessous de 1 kWh/m²/an**. A noter que les ventilateurs sont situés à l'intérieur des gaines, ce qui implique qu'ils dissipent leur énergie dans les conduites et non à l'extérieur, soit un gain supplémentaire d'énergie.

Notons que **les normes en vigueur amènent à surdimensionner les installations de ventilation**, et probablement à très largement surventiler les locaux si les ventilateurs sont réglés par défaut à leur vitesse maximale comme c'était le cas à Polimmo, provoquant des consommations électriques excessives et inutiles.

▪ **Apport du puits canadien**

Le puits canadien a essentiellement un **rôle amortisseur de l'amplitude thermique journalière** avec au final un apport énergétique faible, les effets diurnes étant compensés par les effets nocturnes. **En hiver**, le puits canadien

a essentiellement pour effet de conserver le monobloc hors gel en coupant les pointes de froid, mais **son effet est redondant avec celui de la VDF**. En été, il coupe effectivement les pointes de chaud, mais son effet est redondant avec la PAC qui peut fonctionner en mode froid pour alimenter des plafonds froids.

▪ Performances

Concernant le puits canadien, l'amplitude journalière à la sortie du puits est réduite à 25% de l'amplitude d'entrée pour le petit débit, 44% pour le grand débit.

Concernant la VDF, l'efficacité de l'échange est de 0.7 au grand débit, 0.8 au petit débit. Le **COP annuel** de la ventilation était de l'ordre de **8 à 10** durant les deux années de suivi, mais **devrait à terme atteindre 30** sous l'action conjuguée de la baisse de débit, de la mise en place de l'arrêt nocturne et de la résolution du problème de pannes récurrentes observé durant le suivi, au cours desquelles le ventilateur continue de tourner (et de consommer) mais sans fournir d'air aux locaux.

Analyse économique

NB : tous les coûts mentionnés s'entendent HT.

Investissements

L'investissement total dans la transformation du bâtiment (rénovation + surélévation) a presque atteint 7 millions de francs, dont **380 kCHF alloués aux installations de production de chaleur** et **160 kCHF à la ventilation**. Le maître d'ouvrage a touché des subventions à l'investissement de la part du Centime Climatique et de l'OCEN pour l'assainissement Minergie mais pas pour les installations techniques.

Charges annuelles

Les **charges annuelles pour le chauffage et la ventilation** s'élèvent à environ **14 CHF/m²** pour une année moyenne, dont 70% pour l'amortissement des investissements, 18% pour le contrat d'exploitation et 12% pour l'électricité. On note que les coûts sont composés à **88% de coûts fixes** qui ne dépendent pas de la consommation d'énergie, ce qui ne pousse pas à l'optimisation technique ni aux économies d'énergie. Ce phénomène est propre aux installations de production d'énergies renouvelables (pas uniquement les PAC).

Coût de la chaleur produite

Le **coût de la chaleur produite par la PAC** est de **36 ct/kWh** et **par la ventilation de plus de 70 ct/kWh**. Ce dernier était initialement de 22 ct/kWh, mais la baisse importante des débits a également entraîné une baisse importante de la quantité de chaleur produite, d'où l'explosion du coût du kWh produit. Lorsqu'il y a peu d'énergie en jeu, les charges annuelles en CHF/m² peuvent être un indicateur plus pertinent : dans le cas de Polimmo, les **charges annuelles** sont **de l'ordre de 10 CHF/m² pour la PAC** et **10 CHF/m² pour la ventilation** (dans ce cas rapporté à la seule surface de la surélévation). Cette dernière valeur est élevée par rapport à ce qu'on rencontre habituellement pour des installations de ventilation, à cause du surdimensionnement du monobloc et de la présence du puits canadien.

Comparaison avec le mazout et la situation avant rénovation

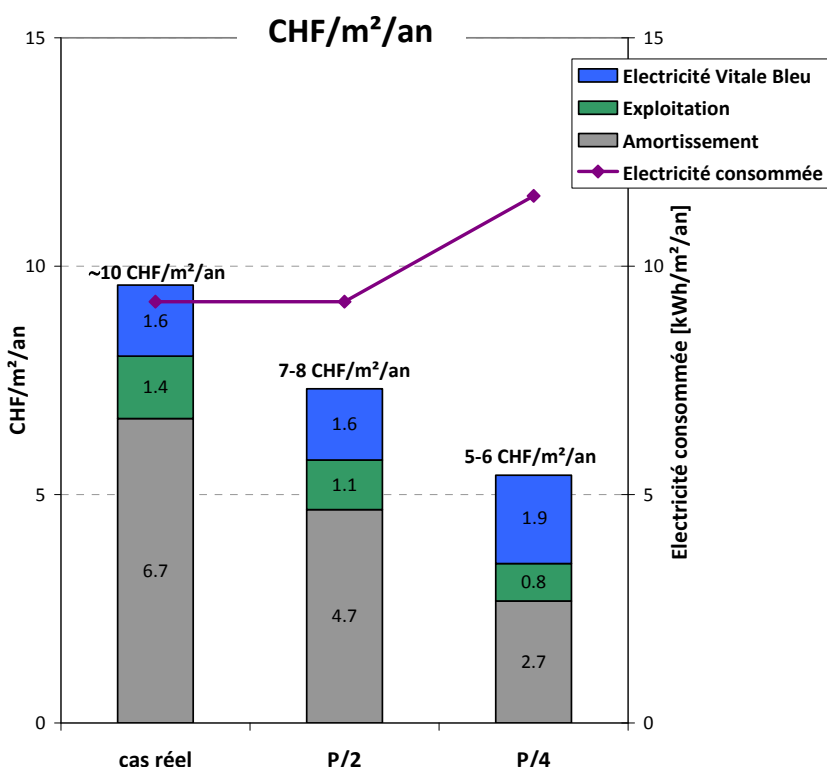
Les charge de chauffage à Polimmo ont été comparés à celles qui auraient été observées dans le cas (i) où il n’y aurait pas eu de rénovation de l’enveloppe (en ayant conservé la chaudière mazout) (ii) où il y aurait eu une rénovation de l’enveloppe, mais en restant au chauffage au mazout. Le tableau suivant présente les résultats pour une année moyenne :

	mazout au prix actuel à 1 CHF/L	projection mazout à 1.5 CHF/L
Sans rénovation + chaudière mazout	15 CHF/m ² /an	21 CHF/L
Avec rénovation enveloppe + chaudière mazout	5 CHF/m ² /an	6 CHF/L
Avec rénovation enveloppe + PAC (situation actuelle)	10 CHF/m ² /an	10 CHF/L

Grâce à la rénovation de l’enveloppe et au changement des installations techniques, les coûts de chauffage sont passés de 15 à 10 CHF/m²/an. Dans l’avenir, si les prix du mazout atteignaient 1.5 CHF/L, les coûts de chauffage auraient grimpé à plus de 20 CHF/m²/an en l’absence de rénovation. Après rénovation de l’enveloppe, sans le recours aux PAC les charges de chauffage seraient actuellement moins élevées (de l’ordre de 5 CHF/m²/an) grâce à un investissement dans les installations techniques (chaudière mazout) bien moindre. Même en cas d’augmentation forte du prix du mazout, les charges de chauffage seraient restées raisonnables. Ainsi, **la rénovation de l’enveloppe seule a permis de sécuriser les coûts de chauffage** contre l’augmentation des prix du mazout. Le recours aux PAC permet de s’en affranchir totalement, mais on peut se poser la question de la **pertinence d’investir doublement** dans la rénovation de l’enveloppe pour diminuer fortement la consommation de chaleur ET dans des installations techniques performantes pour produire le peu de chaleur résiduelle.

Impact d’un redimensionnement des installations techniques

Le redimensionnement de l’ensemble PAC+sondes d’un facteur 2 (P/2) et d’un facteur 4 avec une résistance électrique d’appoint (P/4) donne les résultats ci-dessous :



Le redimensionnement d’un facteur 2 fait baisser les charges de chauffage de **10 à 7-8 CHF/m²/an**, et le redimensionnement d’un facteur 4 de 10 à 5-6 CHF/m²/an grâce à un investissement moins élevé. Notons qu’avec le dimensionnement P/4, les coûts sont similaires au scénario rénovation + chaudière mazout lorsque le prix du mazout atteindra 1.5 CHF/L. Les charges d’achat de l’électricité sont les mêmes dans le cas P/2 que dans le cas réel car les performances de la PAC ne sont pas affectées. Elles augmentent de seulement 20% dans le cas P/4 à cause de la consommation de la résistance électrique d’appoint.

Quant au **redimensionnement de la ventilation d'un facteur 3 sans la présence du puits canadien**, il conduit à une baisse des charges de **10 à 6 CHF/m²/an** (dont les 2/3 sont imputables à l'absence du puits canadien). Enfin, un redimensionnement de la PAC d'un facteur 4 couplé au redimensionnement de la ventilation fait baisser les charges annuelles de 14 à 8 CHF/m² (soit une baisse de plus de 40%), pour une augmentation de la consommation électrique inférieure à 25%.

Recommandations générales

Au-delà de l'étude de l'installation-même, qui présente à l'heure actuelle un potentiel d'optimisation faible en dehors de quelques modifications mineures, on peut faire des recommandations générales dans la mise en œuvre des pompes à chaleur. Les **systèmes de PAC** sont **encore souvent appréhendés de la même manière que les installations conventionnelles** alors qu'ils ne se comportent pas du tout de la même manière : certains aspects comme la configuration hydraulique, le dimensionnement ou les niveaux de température dans le système sont primordiaux pour les PAC tandis qu'ils ont peu d'influence dans le cas d'une chaudière gaz.

Amélioration de l'intégration des pompes à chaleur dans les systèmes

Les performances des PAC disponibles sur le marché sont déjà très bonnes. A notre sens, l'enjeu principal réside plutôt dans la façon de les implémenter de manière optimale.

- **Architecture du système**

Comme on l'a vu à Polimmo, la **configuration hydraulique** retenue **conditionne le fonctionnement de l'installation** sur toute sa durée de vie, notamment sur la possibilité de produire à une température la plus proche possible des besoins. On comprend l'importance de faire le bon choix au moment de la conception en fonction des contraintes du site et de ne pas se contenter du schéma par défaut proposé par le constructeur.

- **Efforts sur la source chaude**

Généralement, un **travail important** est réalisé **pour obtenir une bonne source froide** (investissement dans des sondes géothermiques), alors que **peu d'intérêt est porté à l'amélioration de la source chaude** (autrement dit la distribution). Pourtant, les effets sont symétriques : une baisse de température de 1K côté source chaude a le même impact sur les performances qu'une augmentation de 1K côté source froide.

Ainsi, préalablement à l'installation d'un système de PAC, l'**optimisation de la distribution de chauffage** dans le bâtiment est indispensable, et en particulier une diminution maximum des températures de distribution. Le remplacement des radiateurs existants par des émetteurs basse température peut être envisagé, mais la plupart du temps des améliorations substantielles peuvent être obtenues sans investissement majeur, en abaissant les courbes de chauffe et les débits de distribution après réalisation d'un **équilibre hydraulique du circuit de chauffage**. Ces efforts réalisés à bas coût devraient être systématiquement considérés lors de l'implémentation de systèmes de PAC dans les bâtiments.

- **Importance du dimensionnement**

Traditionnellement dans le domaine du chauffage, les installations sont dimensionnées avec une marge de sécurité sur la puissance maximale de l'installation. Si cette façon de procéder ne pose pas de problème pour les chaudières classiques, elle est par contre préjudiciable dans le cas des PAC, pour lesquelles **les coûts d'investissement représentent les 2/3 des coûts de production de la chaleur**.

Exploitation

▪ **Importance d'une exploitation suivie**

Les installations de PAC sont généralement très fiables et ne présentent qu'exceptionnellement des pannes de fonctionnement. Par contre, contrairement à une chaudière traditionnelle, l'optimisation des performances d'une PAC n'est possible qu'au prix d'un suivi fin et régulier de l'installation.

▪ **Optimisation des performances**

Les performances d'une PAC diminuant avec l'augmentation de la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur, **une bonne gestion des niveaux de température dans le système est essentielle** pour optimiser le fonctionnement du système. Cela implique une diminution des températures de distribution d'une part, mais également une température de production de la PAC au plus proche de la température requise par la distribution.

Cependant, les **possibilités d'optimisation** peuvent être **limitées par la configuration hydraulique** de l'installation ou **l'accès restreint** par l'utilisateur **à certains paramètres de régulation**, bloqués par le constructeur pour protéger la machine. D'autre part, la régulation d'une PAC est souvent complexe à maîtriser dans sa totalité.

S'agissant des performances techniques, on se focalise généralement sur celles de la PAC en elle-même alors qu'il faudrait **considérer le système dans son ensemble**. Ainsi, il faut tenir compte de la consommation des auxiliaires (pompes PAC et distribution) qui représente de l'ordre de 10% de la consommation électrique totale. On observe parfois des consommations électriques parasites (comme des mises en marche intempestives en été lors de nuit fraîches) qui atteignent facilement 10% de la consommation électrique annuelle. Enfin, d'autres éléments du système comme la ventilation peuvent ne pas être optimisés et conduire à des consommations électriques excessives (à Polimmo, la consommation électrique de la ventilation dépassait initialement celle de la PAC).

Enjeux futurs

▪ **Bâtiments existants / neufs**

Dans les **bâtiments existants**, où la demande thermique reste élevée, **l'optimisation technique** du système de PAC est un enjeu majeur pour contenir les consommations électriques.

Dans les **bâtiments neufs ou fortement rénovés**, où la demande thermique est faible, les consommations électriques sont déjà faibles et **l'optimisation économique** est plus pertinente pour éviter le double investissement (dans une enveloppe performante ET dans des installations techniques performantes pour le peu d'énergie à fournir). La solution pourrait être à rechercher dans le recours à une source froide de moins bonne qualité comme l'air, avec en contrepartie une optimisation poussée du côté source chaude (températures de distribution).

▪ **Diffusion des bonnes pratiques**

Il y a **beaucoup de savoir-faire disponible** en Suisse et en Europe, mais celui-ci n'est pas assez largement diffusé. Il est pourtant nécessaire de sortir des habitudes héritées des installations traditionnelles. La demande d'installation de PAC explosant, de plus en plus d'acteurs pas spécifiquement qualifiés vont être appelés à réaliser des installations. Il est primordial d'**organiser un transfert efficace des connaissances**, et dans ce contexte le rôle des acteurs comme le Groupement professionnel suisse des pompes à chaleur (GSP), l'OCEN ou les constructeurs est à renforcer.

Conclusion

Le bilan de la transformation du bâtiment Polimmo (rénovation + surélévation) est très positif, et la possibilité de mener un suivi énergétique et économique complet a permis de tirer de multiples enseignements.

A ce jour, l'installation de PAC à Polimmo est relativement optimisée techniquement par rapport aux possibilités du site : ses performances ne devraient pas beaucoup évoluer dans les années à venir. Les performances observées durant le suivi sont faibles (SPF de 2.9). Avec une température à la sortie des sondes de 10-15°C toute l'année et sans production d'eau chaude sanitaire (uniquement de la chaleur pour le chauffage à moyenne température), on pourrait s'attendre à un meilleur résultat. Les performances de la PAC en elle-même n'étant pas à remettre en cause, les raisons sont à rechercher dans les niveaux de température dans le système, avec une température de production 10-15 degrés plus haut que ce que demande la distribution, notamment en raison de l'architecture hydraulique du système. Ce résultat modeste est cependant à nuancer par le fait que la consommation électrique reste faible : inférieure 10 kWh/m²/an, grâce aux efforts faits sur l'enveloppe du bâtiment qui ont permis de diviser la demande thermique par 4.

L'analyse de la ventilation a montré que les débits étaient réglés à une valeur presque 4 fois supérieure à ce que préconisent les normes pour obtenir un taux de renouvellement d'air normal, correspondant au débit de dimensionnement des ventilateurs. Cela aboutit à des consommations électriques excessives, qui pour la 1^{ère} année de suivi dépassaient même celles de la PAC. A noter que le surdimensionnement imposé par les normes conduit à des surconsommations électriques importantes si la ventilation est réglée par défaut sur le débit maximal.

L'analyse économique a révélé des charges de chauffage et de ventilation de 14 CHF HT/m²/an, dont 70% pour les investissements, 18% pour les frais d'exploitation et seulement 12% pour l'électricité, soient près de 90% de coûts fixes. La seule rénovation de l'enveloppe a déjà permis de limiter l'impact d'une hausse des prix du mazout sur les charges annuelles de chauffage. Le recours à une PAC pour produire le peu d'énergie restant permet de s'en affranchir totalement, mais fait un peu figure de double investissement.

Le suivi a montré que les PAC et les sondes étaient surdimensionnées d'un facteur 2 et que la ventilation était surdimensionnée d'un facteur 3, ce qui a un impact significatif sur les coûts. Un scénario avec une installation bivalente (PAC+sondes de la moitié de la puissance maximale appelée complétée par une résistance électrique directe) ainsi qu'une installation de ventilation plus petite et sans puits canadien aurait abouti à des coûts 40% inférieurs avec une augmentation de la consommation électrique inférieure à 25%. Dans une optique de standardisation à grande échelle de ces systèmes, une optimisation économique est nécessaire tout en maintenant des performances techniques acceptables.

A notre sens, le défi actuel dans le développement des PAC réside plus dans une meilleure intégration dans les systèmes que dans le développement de PAC plus performantes. Les réflexes des professionnels sont encore ceux hérités de décennies de travail avec des installations conventionnelles alors que les PAC requièrent une attention particulière pour certains points critiques comme l'architecture hydraulique du système ou la gestion des niveaux de température. Le savoir-faire existe bel et bien, mais il demande encore à être mieux diffusé.