

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

MERMOUD, Floriane, *et al.*

Abstract

Les installations de pompes à chaleur (PAC) ont été en fort développement durant ces dernières décennies et les sondes géothermiques constituent une source froide de bonne qualité couramment répandue. En 2008, le bâtiment tertiaire Polimmo, situé à Genève et datant des années 60, a été rénové et surélevé d'un étage ce qui porte sa surface à 3'668 m². Au cours de cette transformation, deux PAC géothermiques ont été installées pour produire la chaleur nécessaire au chauffage du bâtiment. Ce travail propose un retour d'expérience sur l'ensemble du système, issu de deux années de suivi énergétique et économique. La rénovation au standard Minergie a permis de diviser la demande thermique du bâtiment par 4 (de 108 à 27 kWh/m²/an, uniquement du chauffage). Si les performances de l'installation de PAC sont modestes (SPF mesuré de 2.9 après optimisations), la raison est à rechercher dans les niveaux de température dans le système. En effet, la PAC produit à 10-15 degrés de plus que ce que demande la distribution, à cause : (i) de la configuration hydraulique qui ne permet pas [...]

Reference

MERMOUD, Floriane, *et al.* *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.* [Mandate from:] Office cantonal de l'énergie. Genève : Office cantonal de l'énergie, 2014, 140 p.

Available at:

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:41178>

Disclaimer: layout of this document may differ from the published version.

[Downloaded 09/12/2014 at 16:43:20]



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE



**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

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

Remerciements

En premier lieu, nous souhaitons remercier le propriétaire du bâtiment Polimmo M. Paul Previdoli, qui a pleinement accepté de soumettre son bâtiment à un suivi énergétique et économique complet sur une période de deux années, et ce en toute transparence. Merci à Vincent Aeschbacher pour le temps passé à rechercher et nous transmettre les données économiques relatives au projet.

Le projet a été financé par le Service cantonal de l'énergie de l'Etat de Genève, représenté par M. Christian Freudiger.

Nous remercions chaleureusement Philippe Monteil et Emmanuel Guinot de l'entreprise Tech Building chargée de la maintenance et de l'exploitation des installations techniques à Polimmo. Nous tenons à saluer la qualité de la collaboration que nous avons eue, particulièrement lorsque nous avons essayé ensemble d'optimiser le fonctionnement des installations en mettant en place de nouveaux réglages.

Tous nos remerciements vont aux membres du groupe d'accompagnement, pour leur assiduité aux réunions de suivi, leur intérêt pour le travail réalisé et le temps qu'ils nous ont consacré en dehors des séances, en particulier : Paul Previdoli, Vincent Aeschbacher, Philippe Monteil, Emmanuel Guinot, Christian Freudiger, Fabien Roh.

Un grand merci à Eric Pampaloni qui s'est chargé de la mise en place du suivi et a apporté son support technique tout au long du projet. Enfin, nous remercions Yann Oberson qui a réalisé son travail de master sur le suivi de Polimmo, et qui a accepté que nous reprenions des éléments de son travail pour les intégrer au rapport.

Résumé

Les installations de pompes à chaleur (PAC) ont été en fort développement durant ces dernières décennies et les sondes géothermiques constituent une source froide de bonne qualité couramment répandue. En 2008, le bâtiment tertiaire Polimmo, situé à Genève et datant des années 60, a été rénové et surélevé d'un étage ce qui porte sa surface à 3'668 m². Au cours de cette transformation, deux PAC géothermiques ont été installées pour produire la chaleur nécessaire au chauffage du bâtiment. Ce travail propose un retour d'expérience sur l'ensemble du système, issu de deux années de suivi énergétique et économique.

La rénovation au standard Minergie a permis de diviser la demande thermique du bâtiment par 4 (de 108 à 27 kWh/m²/an, uniquement du chauffage). Si les performances de l'installation de PAC sont modestes (SPF mesuré de 2.9 après optimisations), la raison est à rechercher dans les niveaux de température dans le système. En effet, la PAC produit à 10-15 degrés de plus que ce que demande la distribution, à cause : (i) de la configuration hydraulique qui ne permet pas la distribution de chaleur en direct sans passer par le ballon de stockage (ii) à la présence d'un échangeur intermédiaire sur le circuit aval de la PAC (iii) aux retours chauds de la distribution. Avec une telle qualité de source froide (entre 10 et 15°C en sortie des sondes toute l'année) et une production de chaleur exclusivement à moyenne température (puisque pas de demande d'ECS), on s'attendrait à de meilleures performances. Cependant, grâce à une enveloppe thermique performante, les consommations électriques restent faibles (<10 kWh/m²/an). Le système de ventilation (double flux couplé à un puits canadien) installé dans la surélévation a également été étudié et il en est ressorti des consommations électriques excessives la 1^{ère} année, en lien avec un débit de ventilation presque 4 fois plus élevé que ce que recommande la norme (ce problème a été corrigé par la suite). En conclusion, dans le cas particulier de Polimmo le potentiel d'optimisation supplémentaire est faible et les installations techniques semblent avoir atteint leur rythme de croisière.

Selon les résultats de l'analyse économique, les charges de chauffage et de ventilation s'élèvent à 14 CHF/m²/an, ce qui est légèrement inférieur à ce qui aurait été observé en l'absence de rénovation du bâtiment (~15 CHF/m²/an). Cependant, avec un prix du mazout à 1.5 CHF/L, les charges auraient grimpé à plus de 21 CHF/m²/an : la rénovation a permis de sécuriser les charges annuelles liées au chauffage et à la ventilation. A noter que les coûts sont à 70% imputables à l'amortissement des investissements, si bien que la qualité du dimensionnement a son importance dans les performances économiques : à Polimmo, les PAC+sondes sont surdimensionnées d'un facteur 2 et un dimensionnement au plus juste aurait conduit à des charges de chauffage 25% plus faibles sans péjoration des performances d'après les résultats de simulation. Pour limiter l'effet de « double investissement » dans l'enveloppe et dans des installations techniques performantes, on aurait pu imaginer une installation bivalente (PAC de la moitié de la puissance maximale avec une résistance électrique en appoint), ce qui aurait diminué les coûts de 40% par rapport au cas actuel.

Quelques recommandations générales ont été tirées de ce retour d'expérience. Elles concernent principalement la façon d'intégrer les PAC dans les systèmes afin d'en optimiser les performances. En effet, les systèmes de PAC doivent être appréhendés de manière différente des installations conventionnelles, que ce soit au moment de la conception (dimensionnement, architecture hydraulique) ou de l'exploitation (gestion de niveaux de température). Le savoir-faire existe en Suisse mais demande encore à être mieux diffusé et partagé.

Mots-clés : retour d'expérience, analyse énergétique, simulation, pompe à chaleur, sondes géothermiques, ventilation double-flux, puits canadien, rénovation, bâtiment tertiaire, performances, coût de l'énergie.

Abstract

Over the past decades, heat pump (HP) systems have known a growing interest and development. Geothermal boreholes are an interesting and common heat source for HPs. In 2008, a tertiary building from the 60's called Polimmo and located in Geneva was renovated and an extra floor was added (new heated surface: 3'668 m²). Together with this transformation, two geothermal HPs for covering of the space heating demand were installed. This document presents the feedback based on a 2-year energy monitoring, coupled to an economical analysis of the entire system.

The renovation at Minergie standard enabled to divide the building heat demand by a factor 4 (from 108 to 27 kWh/m²/yr, only space heating). The HP performance is modest (measured SPF of 2.9 after optimisation) mainly because of the temperature levels in the system: the HP produces the heat at approximately 10-15 degrees higher than required by the distribution, because of: (i) the hydraulic configuration which does not allow for direct distribution of the heat bypassing the storage tank (ii) the presence of an intermediate heat exchanger on the condenser side of the HP (iii) the high return temperature from the heating circuit. With such a good heat source (between 10 and 15°C at boreholes output all over the year) and a heat production exclusively at moderate temperatures (no domestic hot water demand), a better performance was expected. However, thanks to the highly efficient thermal envelope, the electricity consumption remains low (<10 kWh/m²/yr). The ventilation system (dual flow ventilation coupled to buried pipes) installed in the added floor was also studied; very high electricity consumptions were observed during the first year, linked to a ventilation rate 4 times higher than the standard recommendations (this problem has been corrected). In conclusion, in this building the additional potential of optimisation is low and the technical facilities should have reached their stride.

According to the economical analysis, heating and ventilation charges reach 14 CHF/m²/yr, which is slightly lower than what would have been observed without renovation and with the oil boiler (~15 CHF/m²/yr). However, with an oil price of 1.5 CHF/L, the charges would have raised to more than 21 CHF/m²/yr. The renovation hence enabled to control the annual charges due to heating and ventilation. It has to be noted that 70% of the heat cost is due to the investments, thus a correct sizing of the equipments is essential to maintain a good economical performance. In this case, the HPs and boreholes are oversized by a factor 2, and a correct sizing would have led to heating charges 25% lower, with the same energy performance according to simulation results. In order to limit the "double investment" in the thermal envelope and in efficient technical facilities, a bivalent system could have been implemented (HP capacity=half of the maximum load plus electric resistance in back-up), and would have led to heating costs 40% lower than today.

Several recommendations for the implementation of HPs were drawn from this work. They mainly concern the way to integrate HPs in systems in order to optimise their performance. Indeed, HP systems should be considered differently from conventional systems, as well during the conception phase (sizing, hydraulic configuration) as in the operating phase (temperature levels management). This know-how exists in Switzerland but needs to be further diffused and shared.

Keywords: experimental feedback, energy analysis, simulation, heat pump, geothermal boreholes, dual flow ventilation, buried pipes, renovation, tertiary building, performance, heat cost.

Synthèse

Contexte général

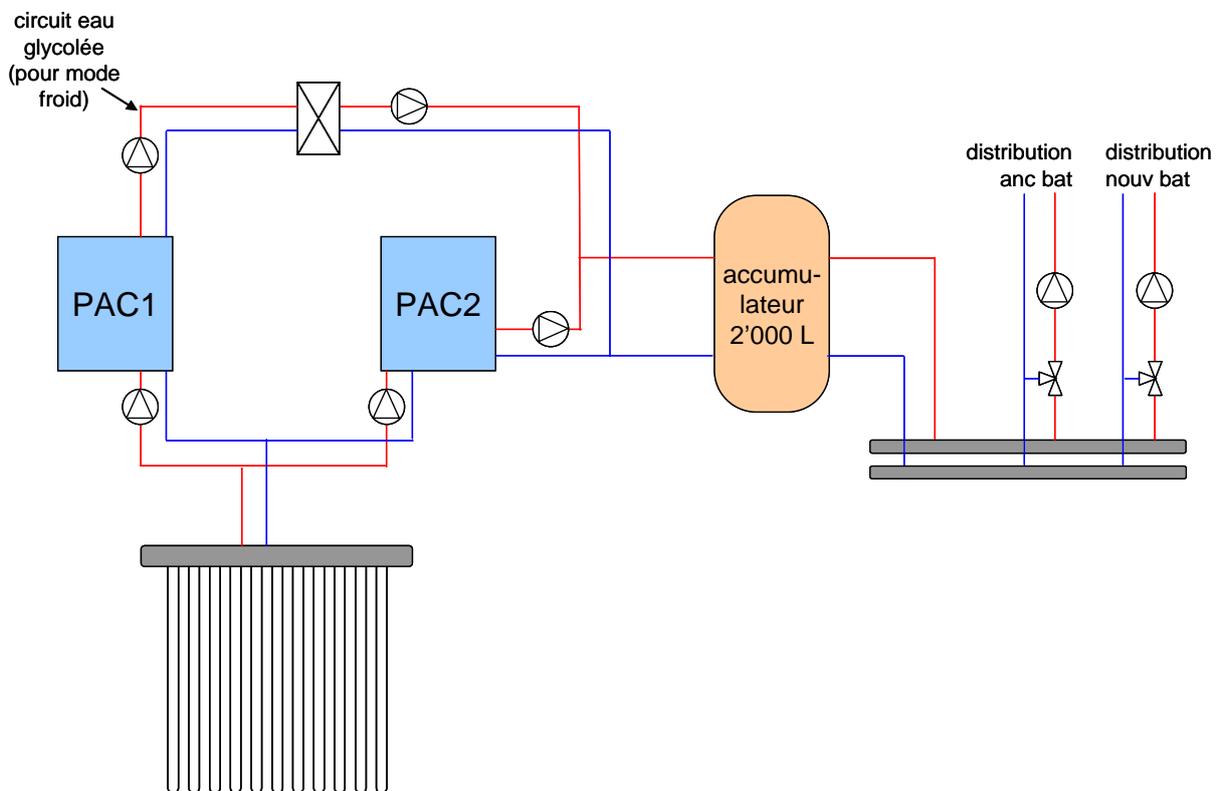
Lors d'un projet de rénovation énergétique d'un bâtiment, la rénovation de l'enveloppe s'accompagne souvent d'une rénovation des installations techniques. Le changement du système de chauffage se fait souvent vers une solution plus performante énergétiquement ayant recours aux énergies renouvelables,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

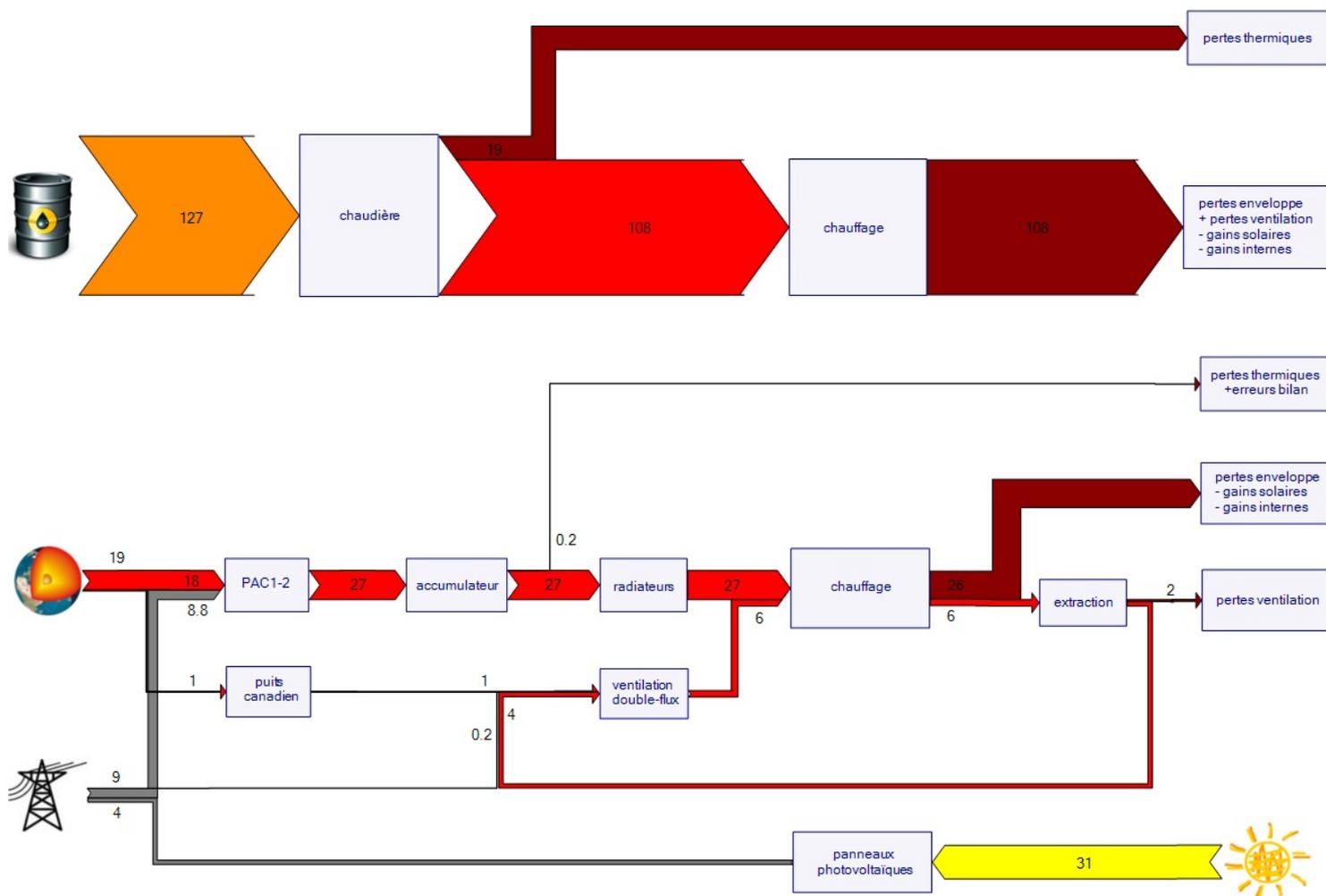


Le retour d'expérience, effectué sur deux années complètes (2010-2012), a porté aussi bien sur les aspects énergétiques qu'économiques.

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 : vus 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

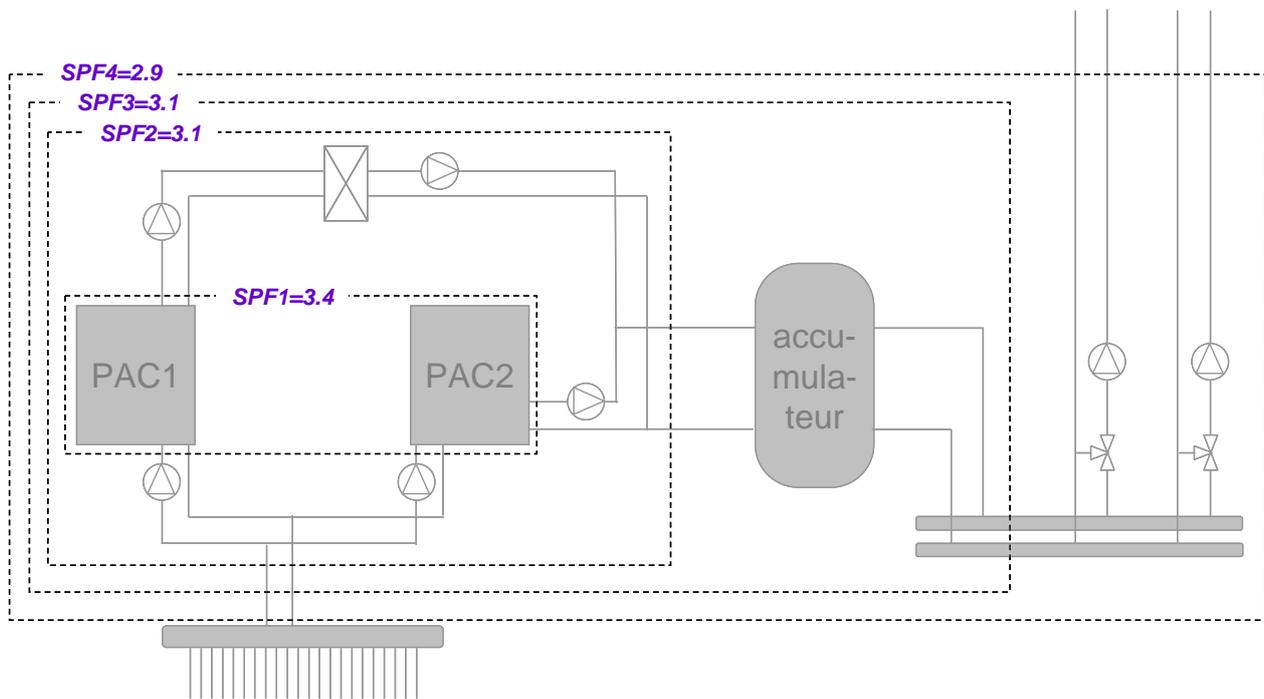
▪ Coefficient de performance (COP)

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

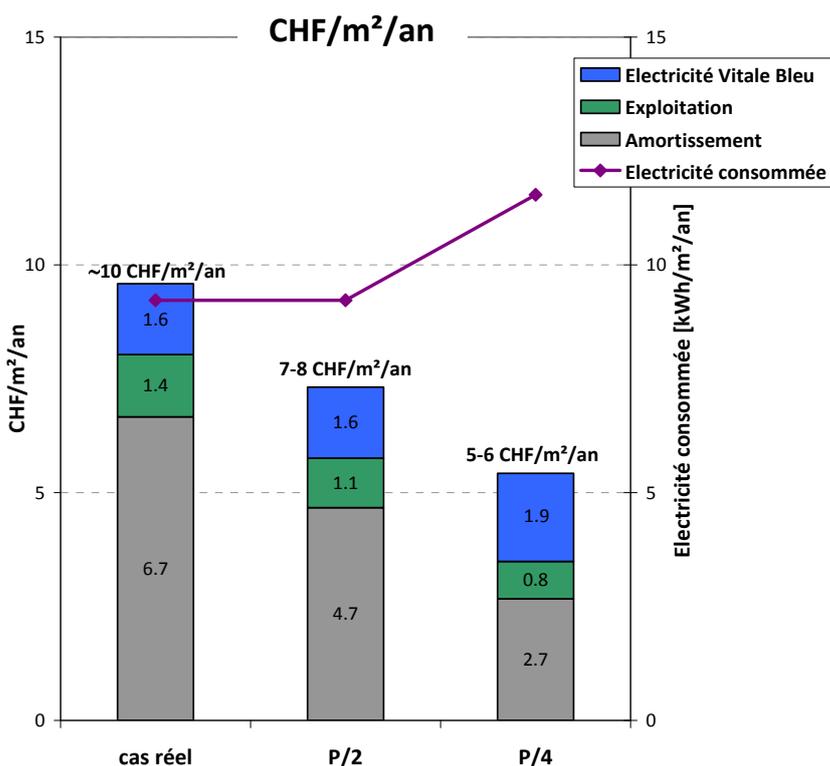
Les charge de chauffage à Polimmo ont été comparés à celles qui auraient été observées dans le cas (i) où il n’y aurait pas eu de rénovation de l’enveloppe (en ayant conservé la chaudière mazout) (ii) où il y aurait eu une rénovation de l’enveloppe, mais en restant au chauffage au mazout. Le tableau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

Table des matières

GLOSSAIRE	19
INTRODUCTION	21
I CHAPITRE I : CONTEXTE GENERAL	23
I.A Revue bibliographique	23
I.A.1 Marché des pompes à chaleur en Suisse	23
I.A.2 Fonctionnement d'une pompe à chaleur	25
I.A.3 Indicateurs de performance	27
I.A.4 Pompes à chaleur sur sondes géothermiques.....	29
I.B Etude de cas Polimmo	36
I.B.1 Bâtiment	36
I.B.2 Suivi énergétique	40
II CHAPITRE II : ANALYSE ENERGETIQUE	43
II.A Bilan énergétique par m² SRE et par an	43
II.A.1 Flux énergétiques.....	43
II.A.2 Diagrammes de flux	44
II.A.3 Indice Minergie	45
II.B Demande thermique du bâtiment	47
II.B.1 Demande de chauffage avant/après rénovation.....	47
II.B.2 Signature énergétique	47
II.B.3 Demande horaire classée	48
II.B.4 Courbes de chauffe.....	48
II.C Fonctionnement des pompes à chaleur	51
II.C.1 Régulation	51
II.C.2 Caractérisation du fonctionnement des PAC.....	55
II.C.3 Performances.....	60
II.C.4 Recommandations	65
II.D Analyse de sensibilité sur le dimensionnement du système	69
II.D.1 Simulation numérique	69
II.D.2 Validation	70
II.D.3 Sensibilité au dimensionnement du champ de sondes	72
II.D.4 Sensibilité au dimensionnement de la PAC	74
II.D.5 Sensibilité à la température de production	74
II.E Fonctionnement de la ventilation	75
II.E.1 Caractérisation du fonctionnement de la ventilation.....	75
II.E.2 Performances.....	81
II.E.3 Recommandations	85
II.F Conclusion	86
III CHAPITRE III : ANALYSE ECONOMIQUE	89
III.A Introduction	89
III.B Investissements	90
III.B.1 Investissement total	90
III.B.2 Investissement dans la production de chaleur	90
III.B.3 Investissement dans la ventilation	91
III.B.4 Subventions	92
III.C Charges annuelles	93
III.C.1 Amortissements.....	93
III.C.2 Contrat d'exploitation.....	93
III.C.3 Electricité	93
III.C.4 Répartition des charges	94

III.D	Coût de la chaleur produite	95
III.D.1	Coût du kWh	95
III.D.2	Coût du m ² chauffé.....	96
III.D.3	Autres scénarios	97
III.D.4	Impact d'un redimensionnement des installations techniques sur les coûts	100
III.E	Conclusion.....	104
IV	CHAPITRE IV : RECOMMANDATIONS GENERALES CONCERNANT L'IMPLEMENTATION DES POMPES A CHALEUR	105
IV.A	Enjeux futurs	105
IV.A.1	Amélioration des performances des PAC.....	105
IV.A.2	Amélioration de l'intégration des PAC dans les systèmes	105
IV.A.3	Vie de l'installation	108
IV.A.4	Performances	109
IV.B	Diffusion des bonnes pratiques.....	112
IV.C	Conclusion.....	114
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	115
	RÉFÉRENCES	117
	ANNEXES	119

Glossaire

ancien bâtiment / nouveau bâtiment	partie du bâtiment existante avant transformation / surélévation ajoutée lors de la transformation
CFC	Code des Frais de Construction, selon la norme suisse SN 506 500
COP	Coefficient de Performance
DJ	Degré-Jour Dans l'ensemble du travail, on utilise les $DJ_{12/18}$, qui se calculent suivant [SIA 381/3 ; 1982] :
	$DJ_{12/18} = \sum_{année} (18 - T_{ext moyjour}) \text{ si } T_{ext moyjour} < 12^{\circ}C$
	On considère que les bâtiments sont chauffés à 18°C et qu'en dessus de 12°C, il n'y a pas besoin de chauffage. L'OCEN publie les $DJ_{12/18}$ pour Genève, mesurés à Cointrin.
$E_{appoint}$	Electricité consommée par le système d'appoint
$E_{aux\ distrib}$	Electricité consommée par les pompes de distribution
$E_{aux\ sc}$	Electricité consommée par les pompes à l'amont de la PAC (côté source chaude)
$E_{aux\ sf}$	Electricité consommée par les pompes à l'aval de la PAC (côté source froide)
ECS	Eau Chaude Sanitaire
Eff	Efficacité de l'échangeur
E_{PAC}	Electricité consommée par la PAC
GSP	Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur http://www.fws.ch/
HT	Hors taxes
PAC	Pompe à Chaleur
pc	puits canadien
OCEN	Office cantonal l'énergie de l'Etat de Genève http://www.ge.ch/scane/
OFEN	Office Fédéral de l'Energie http://www.ofen.admin.ch/
$Q_{bâtiment}$	Chaleur fournie au bâtiment (demande thermique)
Q_{PAC}	Chaleur produite par la PAC
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SIG	Services Industriels de Genève http://www.sig-ge.ch/
SPF	<i>Seasonal Performance Factor</i> (annuel)

SPF1	$SPF1 = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC}}$
SPF2	$SPF2 = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + E_{auxsf}}$
SPF2'	$SPF2' = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + E_{auxsf} + E_{auxsc}}$
SPF3	$SPF3 = \frac{Q_{bâtiment}}{E_{PAC} + E_{auxsf} + E_{appoint}}$
SPF4'	$SPF4' = \frac{Q_{bâtiment}}{E_{PAC} + E_{auxsf} + E_{appoint} + E_{auxsc}}$
SPF4	$SPF4 = \frac{Q_{bâtiment}}{E_{PAC} + E_{auxsf} + E_{appoint} + E_{auxsc} + E_{auxdistrib}}$
SRE	Surface de Référence Energétique
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
U	Coefficient de transmission thermique [W/m ² /K]
Unige	Université de Genève
VDF	Ventilation Double-Flux
kWh/MJ	1 kWh=3.6 MJ

Introduction

Une grande part des bâtiments à Genève date des années 60 et arrive en période de rénovation. Un projet de rénovation de l'enveloppe thermique est souvent l'occasion d'entreprendre simultanément une rénovation des installations techniques. En remplacement des chaudières traditionnelles au gaz ou au mazout, le recours aux pompes à chaleur est souvent un choix qui s'impose aux maîtres d'ouvrage. Les sondes géothermiques représentent une source froide intéressante et couramment utilisée en Suisse pour les pompes à chaleur.

Le cas d'étude analysé dans ce travail concerne un bâtiment tertiaire – Polimmo – rénové en 2008 au standard Minergie et équipé de pompes à chaleur géothermiques. Une installation photovoltaïque a même été prévue pour couvrir partiellement les besoins en électricité des installations techniques. Devant le côté exemplaire de la démarche du maître d'ouvrage, l'OCEN a confié à l'Université de Genève un retour d'expérience complet sur cette installation.

L'objectif était d'évaluer l'efficacité énergétique de cette opération, et plus largement de déterminer les performances d'une pompe à chaleur géothermique en situation réelle de fonctionnement. Certains points problématiques dans la mise en œuvre des pompes à chaleur ont également pu être mis en évidence. Un suivi énergétique fin a été réalisé sur deux années complètes, auquel une analyse économique a été adossée. Nous tenons à souligner l'importance de réaliser des retours d'expérience de ce type, et l'exemplarité des acteurs de ce projet qui ont spontanément mis à disposition de l'Université aussi bien les installations techniques que les données économiques du projet, et ce en toute transparence. Certains résultats présentés dans cette étude peuvent paraître mitigés, mais ils constituent en réalité des enseignements précieux pour les projets à venir.

Après une description du cas d'étude, les résultats du suivi énergétique sur deux années complètes (2010-2011 et 2011-2012) sont présentés. En marge d'une analyse globale des flux énergétiques, le fonctionnement des pompes à chaleur (puissance, cascade, temps de fonctionnement, température de production, performances) et du système dans son entier (niveaux de température) est illustré sur des périodes choisies. Une optimisation technique a été réalisée en cours de suivi en collaboration avec l'entreprise de maintenance, et les effets en ont été quantifiés grâce au suivi. Quelques recommandations sont faites pour optimiser les performances et la durabilité du système sur le long terme. Une analyse économique vient par la suite compléter l'analyse technique. Enfin, des recommandations sont proposées pour favoriser un développement avisé de la filière pompes à chaleur de manière générale.

Chapitre I :

Contexte général

I.A Revue bibliographique

I.A.1 Marché des pompes à chaleur en Suisse

La Statistique suisse des énergies renouvelables 2012 [OFEN; 2013] permet d'identifier la part de l'énergie fournie par les pompes à chaleur dans la consommation finale d'énergie en Suisse (cf. Figure 1) :

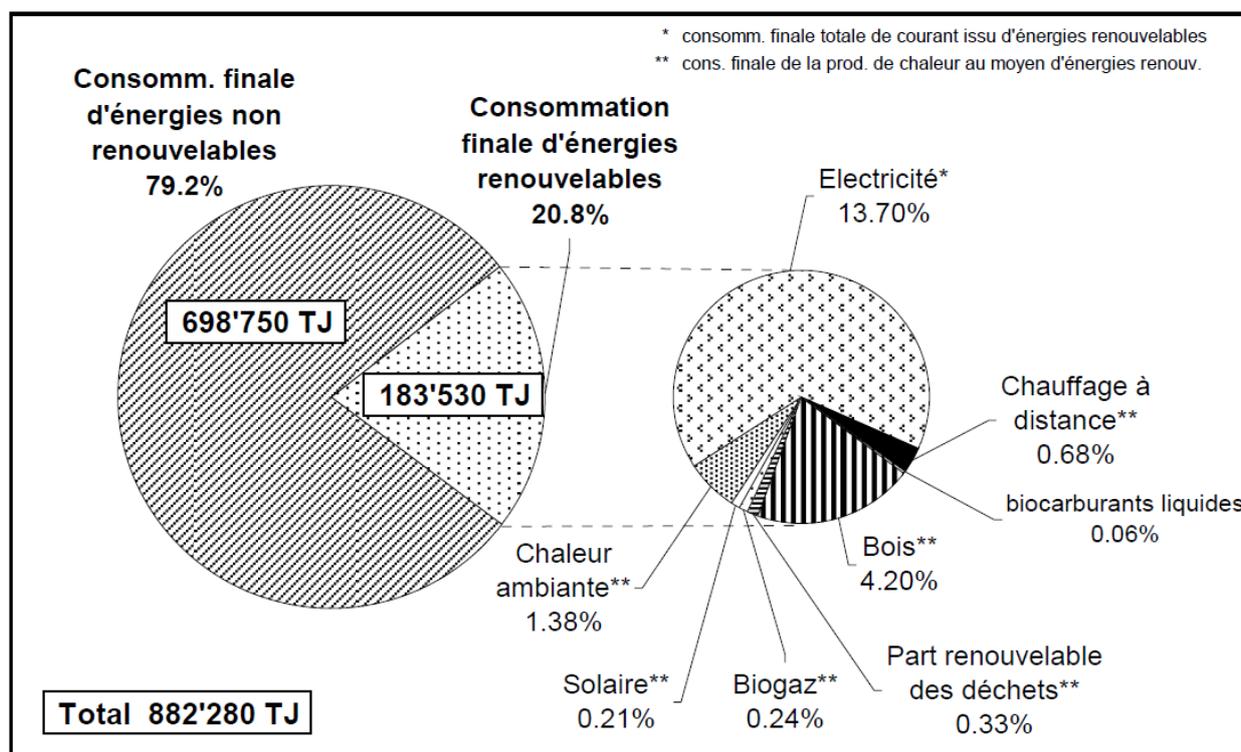


Figure 1 : Consommation finale d'énergie en Suisse pour l'année 2012 [OFEN; 2013]

La part de la « chaleur ambiante » ou chaleur tirée de l'environnement (eau, air, sol) était de 1.38% en 2012, soient 12'175 TJ. La chaleur produite au moyen de pompes à chaleur est estimée à 17'762 TJ, soit 4.8% de l'ensemble de la chaleur consommée en Suisse en 2012 (370'560 TJ).

Le marché des pompes à chaleur est très dynamique en Suisse, essentiellement dans le secteur individuel. Ainsi, environ 20'000 nouvelles pompes à chaleur sont installées chaque année en Suisse (cf. Figure 2) :

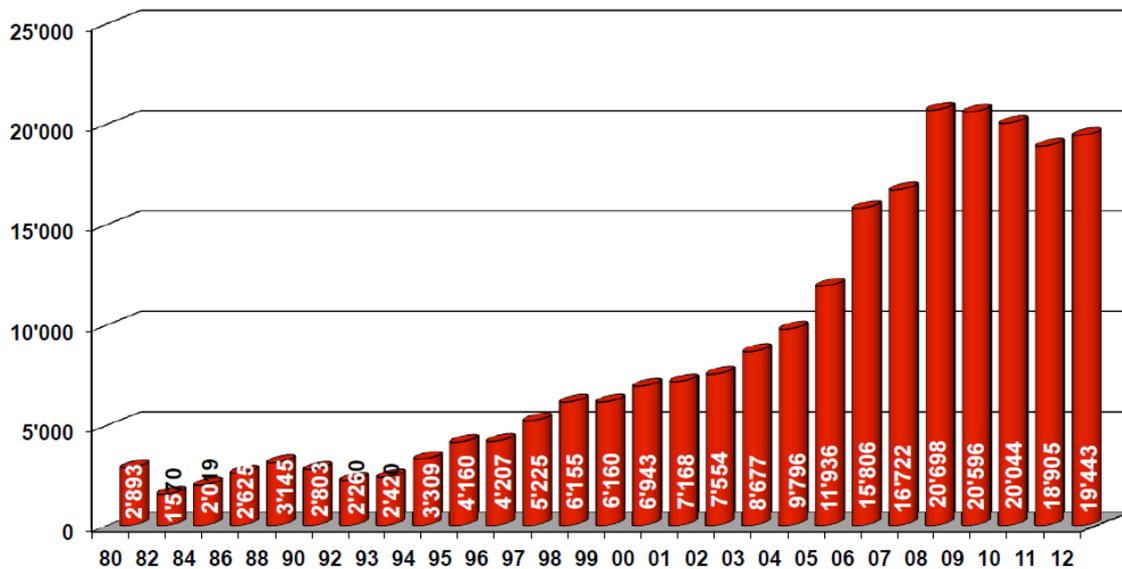


Figure 2 : Nombre de pompes à chaleur installées chaque année en Suisse (source : Présentation André Freymond (GSP)¹)

La Figure 3 présente l'évolution du nombre de pompes à chaleur en fonctionnement en Suisse depuis 1990 : la barre des 200'000 pompes à chaleur a été franchie en 2012.

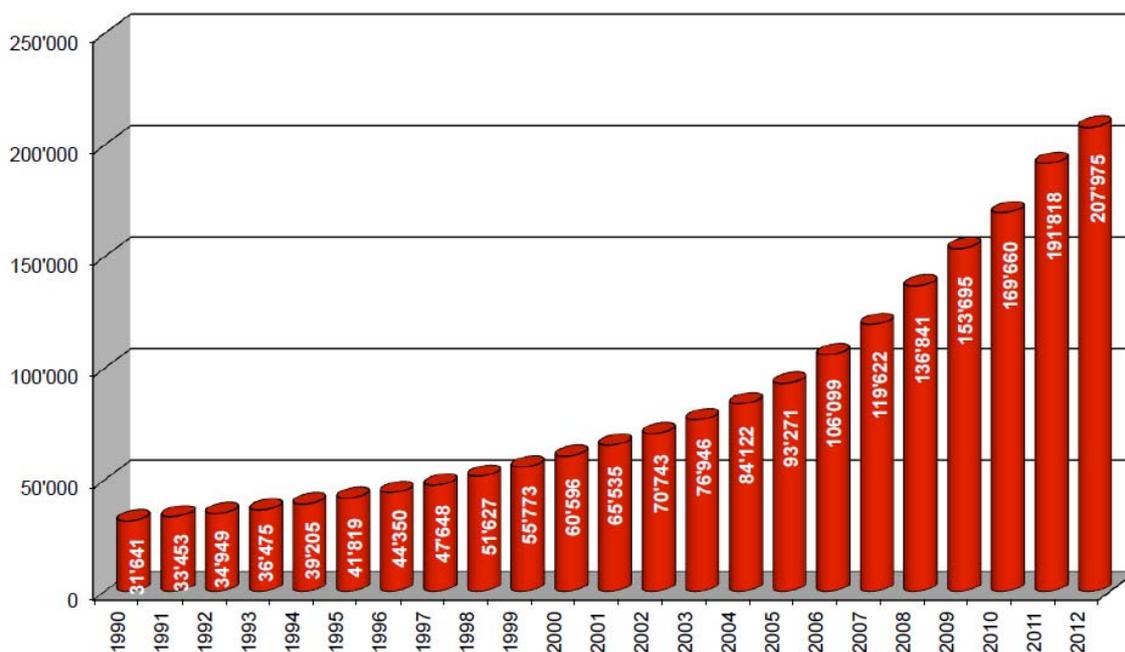


Figure 3 : Evolution du nombre de pompes à chaleur installées entre 1990 et 2012 (source : Présentation André Freymond (GSP)¹)

La Figure 4 présente la répartition par type de pompes à chaleur installées en 2012 (NB : peu d'évolution d'une année à l'autre) :

¹ 23^{ème} Journée du Cuepe, 22 novembre 2013

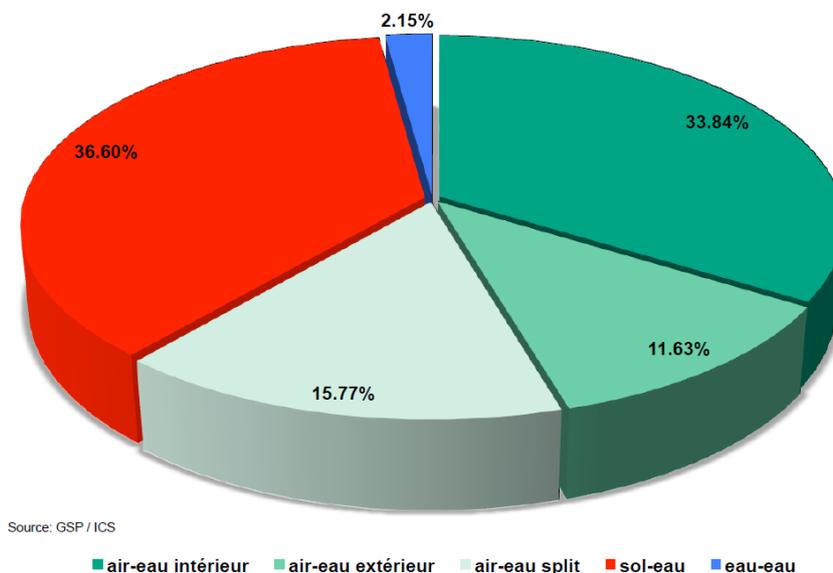


Figure 4 : Répartition des pompes à chaleur installées en 2012 en Suisse (source : Présentation André Freymond (GSP)²)

Les PAC sur air sont majoritaires avec 61% du marché suisse (33.84+11.63+15.77), suivies des PAC sur sondes géothermiques avec 37% du marché. Les PAC sur eau représentent seulement 2% des PAC installées. Le neuf représente 70 à 80% du marché, contre 20 à 30% dans la rénovation³ (remplacement de chaudières traditionnelles/chauffages électriques ou renouvellement de PAC). Les PAC arrivent en tête du nombre de nouvelles installations avec 40% des parts du marché suisse annuel, devant les chaudières gaz et les chaudières mazout⁴.

I.A.2 Fonctionnement d'une pompe à chaleur

I.A.2.a Définition

Une pompe à chaleur est une machine thermodynamique permettant de transférer de la chaleur d'une source froide à basse température vers une source chaude à haute température. Ce transfert étant contraire au transfert de chaleur naturel (du plus chaud vers le plus froid), il nécessite une source d'énergie externe, généralement l'électricité. Les pompes à chaleur sont couramment utilisées pour le chauffage et/ou la production d'eau chaude sanitaire des bâtiments.

D'après le 1^{er} principe de la thermodynamique ou principe de conservation de l'énergie, on a l'égalité suivante :

$$Q_c = Q_f + E$$

où Q_c est la chaleur fournie à la source chaude, Q_f la chaleur tirée de la source froide et E l'électricité fournie au système.

I.A.2.b Cycle thermodynamique

Une PAC est constituée de 4 éléments principaux permettant d'assurer le transfert de chaleur de la source froide (air, sol, eau) vers la source chaude (circuit de chauffage) par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène (cf. Figure 5) :

² 23^{ème} Journée du Cuepe, 22 novembre 2013

³ http://www.pac.ch/dateien/18-statistique_pac_types_construction.pdf, consulté en février 2014

⁴ http://www.pac.ch/dateien/10-marche_chauffage_2008.pdf, consulté en février 2014

- L'évaporateur : échangeur de chaleur permettant d'extraire la chaleur de la source froide à basse température et de la transférer au fluide frigorigène, qui s'évapore sous l'effet de l'apport de chaleur.
- Le compresseur : comprime le fluide frigorigène en phase vapeur, ce qui entraîne son échauffement ; un apport d'électricité pour le fonctionnement du compresseur est nécessaire.
- Le condenseur : échangeur de chaleur permettant de céder la chaleur à la source chaude à haute température ; le fluide frigorigène se condense suite à cette perte d'énergie.
- Le détendeur : détente du fluide frigorigène en phase liquide, ce qui entraîne son refroidissement et sa vaporisation partielle avant l'entrée dans l'évaporateur.

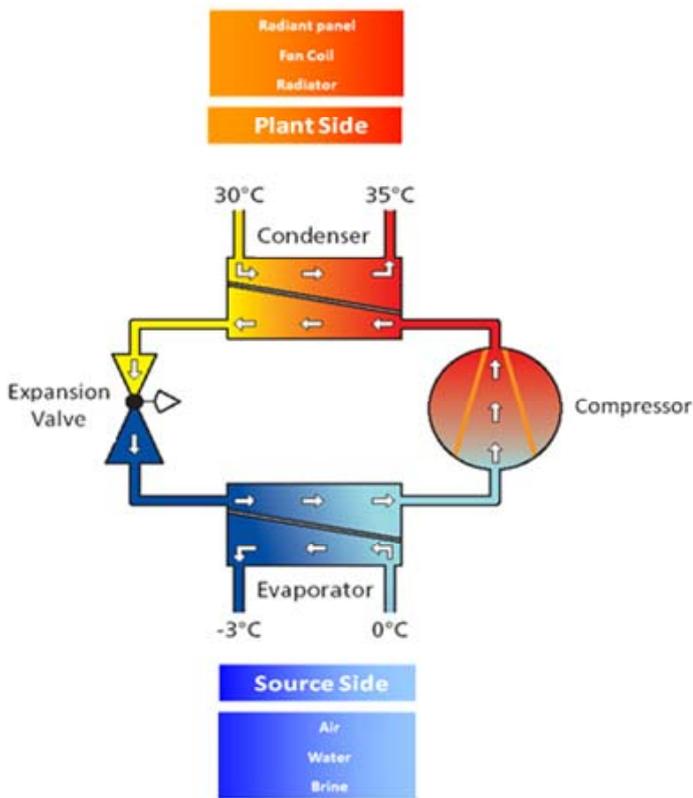


Figure 5 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur
(source : <http://www.icsheatpumps.co.uk/>)

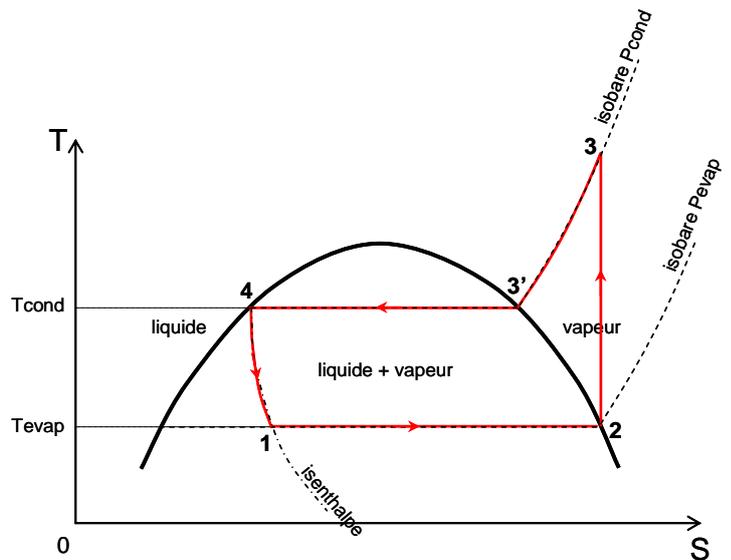


Figure 6 : Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur (machine parfaite) représenté sur un diagramme entropique

Le fluide frigorigène au sein de la machine subit un cycle thermodynamique visible sur la Figure 6. Le cycle comprend les phases suivantes :

- 1-2 : évaporation du fluide frigorigène à température constante ($T_{\text{évap}}$) et pression constante ($P_{\text{évap}}$)
- 2-3 : compression isentropique de la vapeur de $P_{\text{évap}}$ à P_{cond}
- 3-3' : refroidissement de la vapeur à pression constante P_{cond}
- 3'-4 : condensation de la vapeur à température constante (T_{cond}) et pression constante (P_{cond})
- 4-1 : détente isenthalpique du liquide de P_{cond} à $P_{\text{évap}}$, entraînant une évaporation partielle

Remarque : Par rapport à la machine parfaite, la machine réelle diffère sur trois points principaux : l'existence de pertes de charge dans les conduites entre le compresseur et les échangeurs, le fait que le compresseur ne fonctionne pas de manière isentropique et le non-turbinage à la décompression.

I.A.2.c Sources chaudes/froides

Les sources froides usuelles sont :

- l'air extérieur
- le sol (sondes géothermiques)
- l'eau (eau de nappe ou de rivière)

On a parfois recours à d'autres sources froides comme des capteurs solaires thermiques, l'air vicié extrait d'un bâtiment ou les eaux usées, qui constituent des gisements de chaleur à moyenne température.

Les vecteurs énergétiques utilisés du côté de la source chaude sont soit l'air (chauffage par ventilo-convecteurs), soit l'eau (chauffage par radiateurs ou plancher chauffant).

La dénomination conventionnelle des PAC combine la qualité de la source froide et celle de la source chaude : une PAC sol/eau est une PAC sur sondes géothermiques installée sur un circuit hydraulique de chauffage.

I.A.3 Indicateurs de performance

On peut distinguer deux types d'indicateurs concernant les performances des pompes à chaleur : par convention, les performances instantanées sont définies par le « Coefficient de Performance » (COP) et les performances annuelles par le « *Seasonal Performance Factor* » (SPF).

I.A.3.a Coefficient de Performance (COP)

Le Coefficient de Performance de la pompe à chaleur est typiquement défini par le rapport entre puissance thermique produite et puissance électrique consommée :

$$COP_{PAC} = \frac{\dot{Q}_{PAC}}{\dot{E}_{PAC}}$$

On définit l'efficacité (instantanée) de la pompe à chaleur par le rapport entre son COP et le COP de Carnot, qui est la limite thermodynamique :

$$Eff_{PAC} = \frac{COP_{PAC}}{COP_{Carnot}}$$

où $COP_{Carnot} = \frac{T_{sortie\ cond}}{T_{sortie\ cond} - T_{entrée\ évap}}$ (T en K) avec $T_{sortie\ cond}$ la température à la sortie du condenseur

$T_{entrée\ évap}$ la température à l'entrée de l'évaporateur.

Le principal facteur qui conditionne la performance d'une PAC est l'écart entre la température de condensation du fluide frigorigène T_{cond} (liée à la température de la source chaude) et la température d'évaporation $T_{évap}$ (liée à la température de la source froide) : plus cet écart est faible, plus les performances de la PAC seront élevées. Il faut donc privilégier les sources froides à température la plus haute possible ET travailler à des températures de distribution de chauffage les plus basses possibles.

Remarque : Il est à noter que dans la plupart des PAC du marché, le compresseur tourne à vitesse fixe avec une consommation électrique quasiment constante. Lorsque l'écart de température entre source froide et source

chaude augmente, c'est la quantité de chaleur produite qui diminue (et non la consommation électrique qui augmente).

I.A.3.b Seasonal Performance Factor (SPF)

Les performances annuelles sont décrites par le SPF (*Seasonal Performance Factor*). Lorsqu'un s'intéresse aux performances d'une installation incluant une pompe à chaleur, une difficulté importante consiste à définir les frontières du système, surtout si on entend comparer les performances obtenues par plusieurs installations distinctes. Un travail important d'harmonisation des définitions a été réalisé au niveau international dans le cadre du projet européen SEPEMO-Build⁵ (*SEasonal PErformance factor and MONitoring for heat pump systems in the building sector*). Plusieurs types de SPF sont définis en fonction des frontières adoptées pour le calcul (cf. Figure 7), selon les définitions suivantes [Zottl et al.; 2012] :

- SPF1 : pompe à chaleur seule

$$SPF1 = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC}}$$

- SPF2 : PAC + auxiliaires côté source froide

$$SPF2 = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + E_{aux\,sf}}$$

- SPF3 : PAC + auxiliaires côté source froide + appoint

$$SPF3 = \frac{Q_{bâtiment}}{E_{PAC} + E_{aux\,sf} + E_{appoint}}$$

- SPF4 : PAC + appoint + tous auxiliaires (source froide, source chaude, distribution)

$$SPF4 = \frac{Q_{bâtiment}}{E_{PAC} + E_{aux\,sf} + E_{appoint} + E_{aux\,sc} + E_{aux\,distrib}}$$

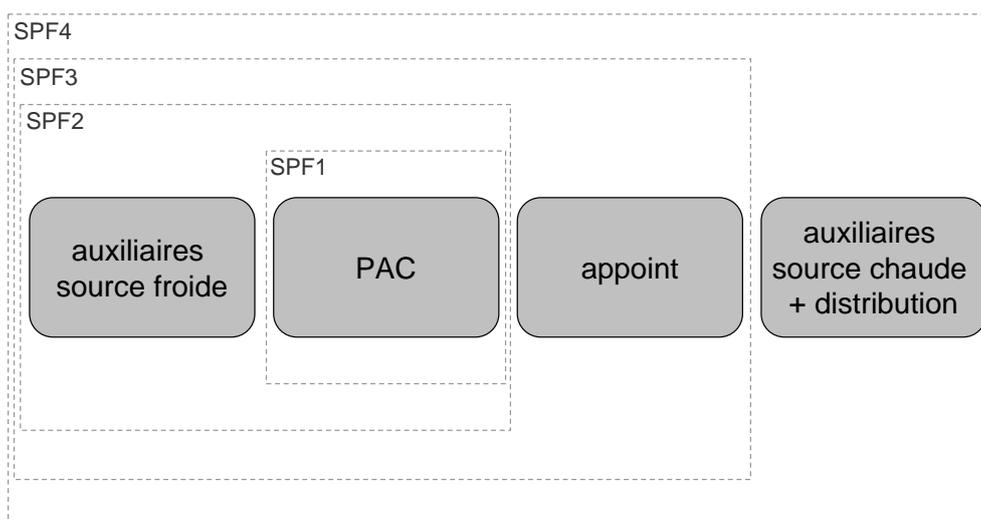


Figure 7 : Définition des différents SPF en fonction des frontières retenues (selon résultats du projet SEPEMO-Build)

⁵ <http://www.sepemo.eu/>

Dans le cadre de ce travail, deux indicateurs supplémentaires ont également été définis :

- SPF2' : PAC + auxiliaires côté source froide + auxiliaires source chaude

$$SPF2' = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC} + E_{aux.sf} + E_{aux.sc}}$$

- SPF4' : PAC + auxiliaires côté source froide + appoint + auxiliaires source chaude (sans auxiliaires distribution)

$$SPF4' = \frac{Q_{bâtiment}}{E_{PAC} + E_{aux.sf} + E_{appoint} + E_{aux.sc}}$$

Remarque : par convention, la consommation électrique liée à la distribution n'est souvent pas prise en compte dans le calcul des performances car le système de distribution est un dispositif standard dans tout bâtiment pourvu d'une production de chauffage centralisée (y compris dans le cas d'une chaudière gaz collective par exemple).

I.A.4 Pompes à chaleur sur sondes géothermiques

I.A.4.a Ressource géothermique

L'utilisation du sol comme source froide pour une PAC profite du fait que, dès lors qu'on se trouve à plus de 10 mètres de profondeur, on observe une température quasiment constante au cours de l'année (cf. Figure 8) : il s'agit de la température météorologique moyenne, aux alentours de 10°C sur le plateau Suisse. Au-dessus, le sol est sujet aux fluctuations thermiques saisonnières (ainsi que journalières sur les 50 premiers cm) liées à l'ensoleillement. En dessous, la température augmente d'environ 3 degrés par 100 m (gradient géothermique), sous l'effet de l'activité thermique du noyau terrestre. Ainsi, dans les quelques premières centaines de mètres, la ressource géothermique provient à la fois : (i) par le haut, de l'énergie solaire stockée au cours des siècles ; (ii) par le bas, du flux géothermique terrestre.

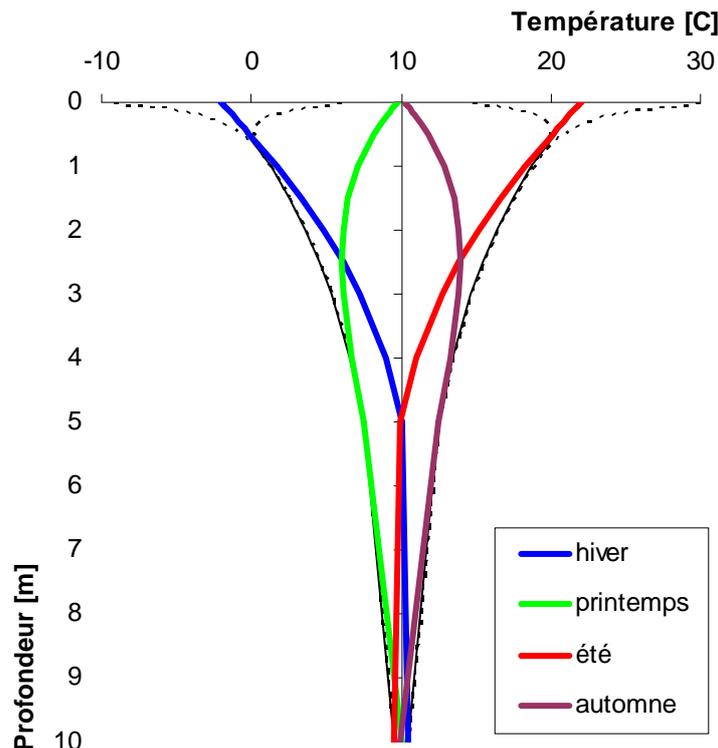


Figure 8 : Profil schématique de température dans le sol aux différentes saisons (en pointillés : dynamique journalière)

L'extraction de cette chaleur par sonde géothermique (sonde en U dans laquelle circule un liquide caloporteur, en général eau et antigel) entraîne un refroidissement du sol aux alentours immédiats de la sonde (cf. Figure 9). Ainsi, la température d'extraction (sortie de la sonde=entrée de l'évaporateur de la PAC) se situe quelque peu en-dessous de la température du sous-sol non perturbé.

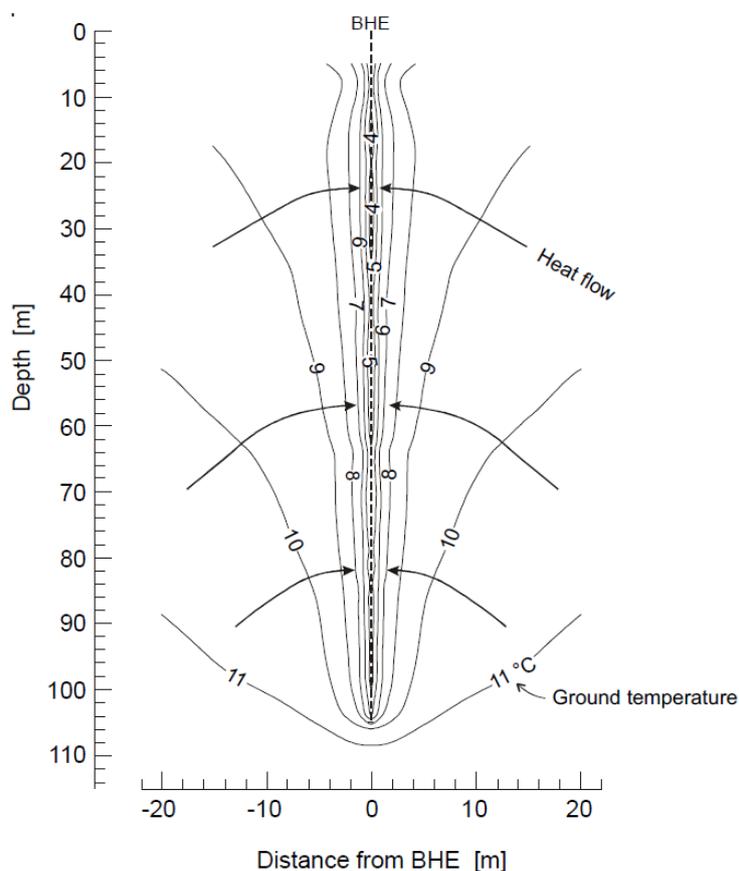


Figure 9 : Perturbation du sol par la présence d'une sonde géothermique [Rybach et al.; 2002]

La nouvelle température d'équilibre est fonction de l'intensité (puissance) et de la durée (énergie) de l'extraction de chaleur. Elle dépend également de la recharge naturelle du terrain par le haut (ensoleillement), par le bas (flux géothermique) et par les côtés (déstockage de chaleur du terrain avoisinant), c'est-à-dire à la fois des propriétés thermiques du terrain (conductivité) et de la configuration géométrique du système (nombre de sondes et profondeur). Par ailleurs, étant données les longues durées de transfert de la chaleur sur des dizaines ou centaines de mètres, le nouvel équilibre thermique peut prendre plusieurs années à être atteint. De nos jours, le calcul détaillé de ces effets peut se faire par simulation numérique. La Figure 10 présente la baisse de température observée à 1 m de la sonde étudiée par Rybach et al. [2002] à Elgg (ZH) sur une durée de 15 ans, ainsi qu'une extrapolation de l'évolution du profil de température sur 30 ans d'exploitation.

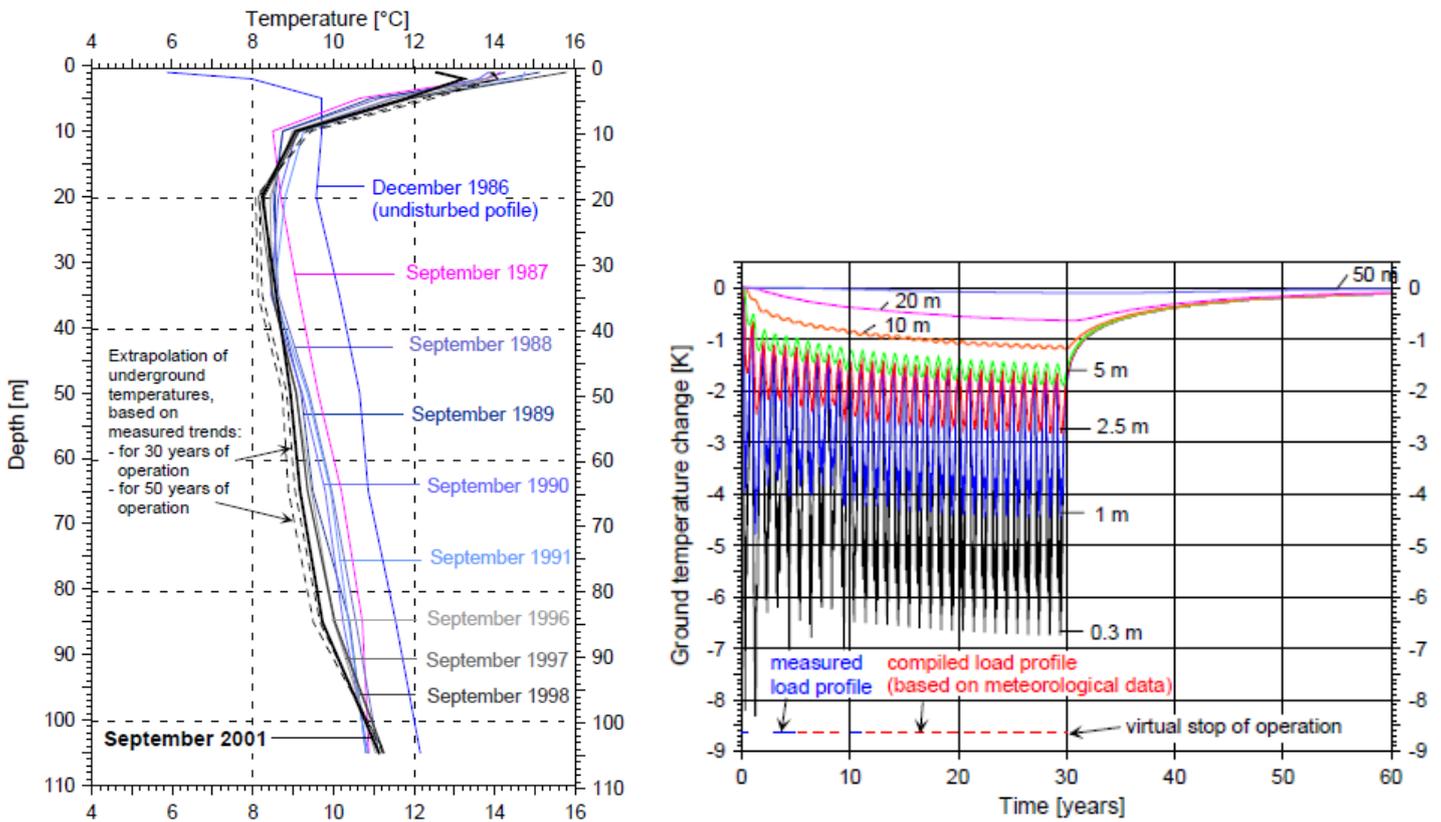


Figure 10 : Baisse de température observée à 1 m d’une sonde unique en 15 ans d’exploitation (gauche) et extrapolation de l’évolution de la température dans le sol à différentes distances de la sonde sur une période de 30 ans (droite) [Rybach et al.; 2002]

On note une différence de -1K entre la situation de départ (non perturbée) et le nouvel équilibre qui se crée dès la 1^{ère} année d’exploitation. Au bout de 15 ans, l’écart de température observé est compris entre -1.5 et -2K selon la profondeur (à partir de 10 m). Les simulations prédisent plutôt un écart de -3K à 1 m de la sonde après 15 ans, et -3.5K après 30 ans.

Remarque : en alternative aux sondes géothermiques, l’exploitation de la géothermie de faible profondeur (quelques centaines de mètres) peut également se faire :

- Par captage horizontal, via des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur. Cependant, ce type de système est rarement utilisé en Suisse du fait du risque de gel (cf. variations saisonnières de température en Figure 8).
- Par captage d’eau de nappe phréatique (~10°C). L’avantage de ce type de système est d’avoir directement accès à la température géothermique (pas d’abaissement de température lié au captage, car pas de diffusion de chaleur). Son utilisation est cependant limitée par l’existence d’une nappe et l’autorisation d’y puiser, ainsi que par la quantité d’eau exploitable (débit et durée).

I.A.4.b Dimensionnement

Optimiser la longueur des sondes est primordial, et les conséquences d’un mauvais dimensionnement sont les suivantes :

- surdimensionnement : température élevée à la source froide de la PAC mais coûts élevés car le forage est onéreux et relativement proportionnel à la longueur de forage ;
- sous dimensionnement : température faible à la source froide de la PAC et risque de gel du sol autour des sondes (et dans les sondes en l'absence d'antigel).

En principe, afin d'éviter les problèmes de gel, on dimensionne les sondes géothermiques de façon à ce que la température moyenne du fluide circulant dans les sondes (moyenne entre entrée et sortie) ne descende pas en dessous de -1.5°C pendant les 50 premières années de fonctionnement de l'installation [SIA; 2010].

A cet effet, le dimensionnement se fait en général en fonction de la puissance d'extraction maximale durant l'hiver. Dans le cas général (une sonde unique, une durée de fonctionnement nominale de 2'400 heures par an, une conductivité thermique du sous-sol de $1.5\text{-}3\text{ W/K/m}$), on considère généralement une clé de dimensionnement de 50 W/m [VDI; 2001].

A côté des sondes pour maisons unifamiliales, il est également de plus en plus habituel de mettre en œuvre de grands systèmes impliquant des champs de sonde plutôt que des sondes simples. En raison du terrain disponible, la recharge naturelle (par le terrain avoisinant et la surface) est limitée. Il devient alors nécessaire, en été, d'effectuer une recharge active du sol, par exemple via des capteurs solaires ou des rejets de chaleur liés à la climatisation.

La 1^{ère} option a été largement étudiée dans la littérature (essentiellement de manière numérique). Pahud et al. [2004] montrent notamment que la recharge solaire n'améliore pas nécessairement les performances globales de l'installation lorsqu'on prend en compte la consommation électrique supplémentaire de la pompe d'injection dans les sondes. D'autre part, il est important de bien dimensionner le champ de capteurs solaires pour assurer une recharge thermique suffisante (adéquation entre énergie extraite et énergie injectée), tout en évitant l'injection de chaleur à trop haute température, qui risquerait de « sécher » le sol à proximité de la sonde et ainsi diminuer sa conductivité thermique.

La possibilité de mettre en œuvre du rafraîchissement estival connaît de plus en plus de succès, en lien avec la prestation de confort supplémentaire qu'elle apporte. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que sous nos climats, la demande de froid estivale n'est généralement pas comparable à la demande de chaleur hivernale, si bien que les quantités de chaleur extraite et injectée dans le sol ne sont pas nécessairement du même ordre de grandeur.

Afin de ne pas descendre en dessous de 0°C dans les sondes en hiver, la clé de dimensionnement doit par ailleurs être adaptée. Selon une étude détaillée par simulation numérique [Pahud et al.; 2011], la clé de dimensionnement se situe aux alentours des 20 W/m pour une recharge estivale de 20% (ratio entre chaleur injectée dans le terrain en été et chaleur extraite en hiver) et remonte à 40 W/m pour une recharge de 100% (cf. Figure 11). A noter que ces valeurs restent indicatives, et que le dimensionnement de ce genre de système devrait toujours, in fine, se baser sur de la simulation numérique.

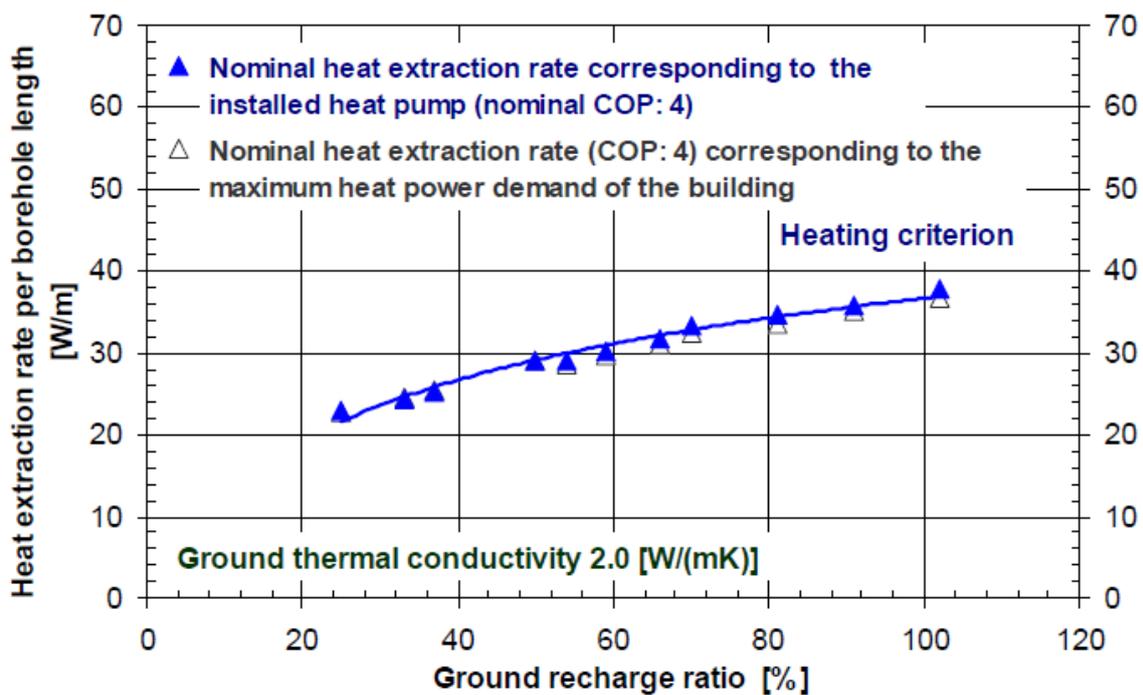


Figure 11 : Clefs de dimensionnement pour champs de sondes géothermiques en fonction du rapport de recharge du sol (source : [Pahud et al.; 2011])

I.A.4.c Performances observées (COP, SPF)

Remarque préalable : Les informations disponibles dans les publications rapportant des résultats de mesure de performances d'installations munies de pompes à chaleur ne mentionnent pas toujours clairement les frontières du système considérées ou alors les frontières ne correspondent pas exactement à un type de SPF tel que défini par le projet SEPOMO-Build : dans ces cas, l'indicateur le plus proche a été retenu.

Plusieurs études de grande envergure ont été menées afin de déterminer les performances réelles de pompes à chaleur couplées à des sondes géothermiques, essentiellement concernant des installations individuelles. On peut citer à ce sujet l'étude FAWA/ANIS [Erb et al.; 2004] réalisée sur le territoire suisse, l'étude du Fraunhofer-Institut [Miara et al.; 2011] qui analyse des PAC installées en Allemagne, et l'étude du *Department of Energy & Climate Change* anglais [Wickins; 2014].

Erb et al. [2004] ont étudié sur plusieurs années de fonctionnement 236 pompes à chaleur installées dans des maisons neuves ou existantes, parmi lesquelles 105 PAC air/eau et 94 PAC couplées à des sondes géothermiques. Le SPF2' moyen obtenu est respectivement de 2.7 et 3.5. La Figure 12 présente la distribution des performances observées sur les PAC géothermiques (en nombre d'installations pour chaque niveau de performances).

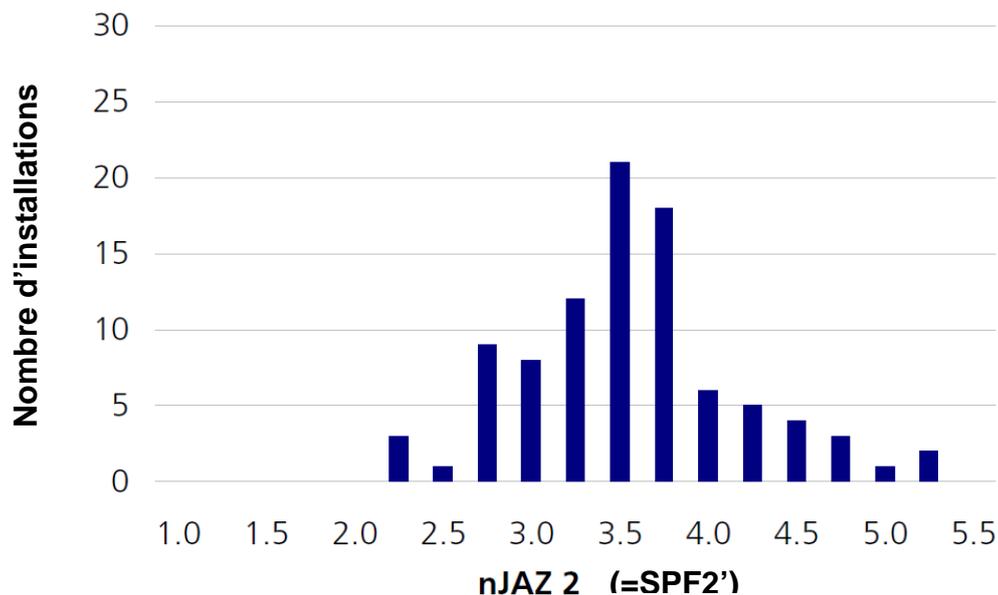


Figure 12 : Distribution des niveaux de performances des PAC géothermiques suivies (d'après [Erb et al.; 2004])

On note une dispersion importante des valeurs de SPF2' (entre 2.5 et 5), liée d'après les auteurs à la différence de performance des sondes géothermiques.

De leur côté, Miara et al. [2011] ont mesuré les performances de 83 installations de PAC sur 3 années de fonctionnement. Sur les 18 PAC air/eau étudiées, le SPF4' s'étale entre 2.3 et 3.4 (moyenne à 2.9), le SPF4 moyen est de 2.7 et le SPF1 moyen de 3.2. Pour les 56 PAC sur sondes géothermiques, le SPF4' observé est compris entre 3.1 et 5.2 (moyenne à 3.9), le SPF4 moyen est de 3.8 et le SPF1 moyen de 4.2. Les auteurs ont également étudié 3 PAC sur eau de nappe, et ont obtenu un SPF4' entre 3.3 et 4 (moyenne à 4), un SPF4 moyen de 3.9 et un SPF1 moyen de 4.7. Dans l'étude réalisée par Wickins pour le compte du *Department of Energy & Climate Change* anglais [Wickins; 2014], plus de 400 PAC ont été analysées, dont 289 PAC sur air et 124 PAC sur sondes géothermiques. L'étude préliminaire ne mentionne que des SPF sur le mois de décembre 2013, mais il est prévu dans la suite du travail de communiquer des résultats annuels.

Différents auteurs ont étudié diverses configurations de pompes à chaleur couplées à des capteurs solaires pour la recharge estivale du sous-sol ou le stockage saisonnier. Comme on peut s'y attendre, la recharge solaire améliore généralement les performances de l'installation. Miara et al. [2011] ont suivi 2 PAC solaire/sondes géothermiques et ont mesuré des SPF4' de 4.9 et 6. Wang et al. [2010] ont rapporté un SPF4 de 6.1 sur leur installation, mais seulement pour une application de chauffage (pas d'ECS). Trillat-Berdal et al. ont étudié un système similaire (également pour du chauffage seulement) décrit dans [Trillat-Berdal et al.; 2007]. Ils mentionnent seulement des SPF mensuels dans leur article [Trillat-Berdal et al.; 2006] allant de 3 à 3.5 pour le SPF4 et de 3.5 à 4 pour le SPF1. Pahud et al. [2004] ont étudié une installation couplant une PAC géothermique avec des capteurs solaires et dédiée au chauffage d'une villa. La production de l'ECS est assurée par les capteurs solaires, qui fournissent également de la chaleur pour le chauffage en priorité quand les niveaux de température le permettent. Sur deux années de fonctionnement, les auteurs ont mesuré un SPF1 et 4.1 et 4.2 et un SPF2' (incluant la consommation de la pompe d'injection du solaire dans les sondes) de 3.7 et 3.8. Quant à l'installation étudiée par Loose et al. [2011], elle inclut un stockage thermique en plus des sondes géothermiques et des capteurs solaires. Ils ont mesuré un SPF1 de 3.7 et un SPF4' compris entre 5 et 5.3 (grâce aux gains solaires) sur 3 années de fonctionnement. Enfin, Bertram et al. [2012] ont étudié un système couplant PAC géothermique et capteurs

solaires hybrides PVT, et ont atteint un SPF4 de 4.2 qui tomberait à 3.8 sans la recharge solaire d'après les résultats de simulation.

Tous ces travaux se réfèrent à des maisons individuelles. Nous n'avons pas trouvé d'études menées sur des installations de grande taille en fonctionnement dans des bâtiments résidentiels collectifs ou tertiaires. Les résultats présentés dans la suite concernent un immeuble de bureaux d'environ 4'000 m², rénové en 2007 et équipé de deux PAC géothermiques.

I.B Etude de cas Polimmo

I.B.1 Bâtiment

I.B.1.a Situation

Le bâtiment étudié est situé sur une parcelle de 3'448 m² au cœur de la zone industrielle des Acacias à Genève, sur la rive gauche de l'Arve, proche de la Jonction (cf. Figure 13). Il s'agit d'un bâtiment tertiaire qui abrite les bureaux de 26 entreprises. Il sera nommé par la suite « Polimmo », du nom de la régie de M. Paul Previdoli, propriétaire du bâtiment.

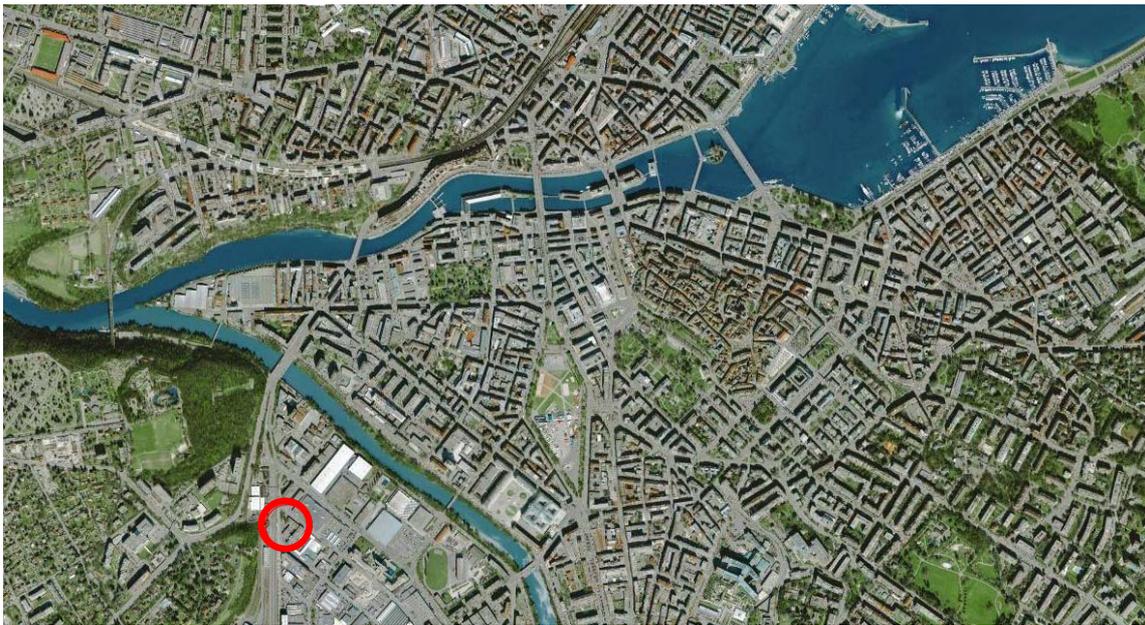


Figure 13 : Situation et vue du bâtiment Polimmo (source : Paul Previdoli)

I.B.1.b Description

Le bâtiment Polimmo date des années 60. Il est composé d'une structure en béton armé et dalles de béton. Ses caractéristiques avant rénovation correspondaient aux standards de l'époque : fenêtres en simple vitrage et isolation thermique réduite à 4 cm de liège sous toiture. Sa surface brute était de 2'258 m²⁶.

I.B.1.c Concept de rénovation + surélévation

En 2007, le propriétaire du bâtiment M. Previdoli fait appel au Groupe H (Bureau d'études intégrales) pour entreprendre une transformation complète de son bâtiment. Les travaux visaient à entreprendre⁶ :

- La rénovation complète des façades conformément au standard Minergie :
 - nouvelle enveloppe thermique comprenant 16 à 26 cm d'isolation en façade et 18 cm en toiture + traitement des ponts thermiques ;
 - remplacement du simple vitrage ($U_{\text{fenêtre}} \sim 5.6 \text{ W/m}^2/\text{K}$) par du double vitrage ($U_{\text{fenêtre}} \sim 1.3 \text{ W/m}^2/\text{K}$) ;

⁶ Document « Projet de rénovation au standard Minergie », Groupe H, 2009, 8 p.

- La surélévation du bâtiment d'un étage :
 - isolation renforcée ;
 - triple vitrage ($U_{\text{fenêtre}} \sim 1 \text{ W/m}^2/\text{K}$)
- La construction d'une nouvelle entrée et de dépôts en sous-sols
 - création d'un escalier extérieur et d'un espace parking
- La réalisation de nouvelles installations techniques (cf. paragraphe I.B.1.d)
 - pompes à chaleur couplées à des sondes géothermiques
 - ventilation double-flux couplée à un puits canadien alimentant uniquement la surélévation
 - panneaux solaires photovoltaïques

La SRE est de 2'205 m² pour le bâtiment existant rénové et de 1'463 m² pour la surélévation soit un total de 3'668 m². Ces deux parties du bâtiment sont respectivement appelées « ancien bâtiment » et « nouveau bâtiment » dans la suite.

A noter que le bâtiment Polimmo est adossé à deux autres bâtiments dont un n'a pas du tout été rénové. La Figure 14 présente le bâtiment Polimmo avant et après sa transformation.



Figure 14 : Vue du bâtiment Polimmo avant et après rénovation (source : Paul Previdoli)

I.B.1.d **Concept énergétique**

Avant rénovation, le bâtiment Polimmo était chauffé grâce à une chaudière à mazout. La ventilation se limitait à une extraction d'air dans les sanitaires du bâtiment.

i. Production de chaleur/froid

La rénovation a été l'occasion de revoir le concept énergétique du bâtiment. La volonté du propriétaire du bâtiment était d'avoir recours aux énergies renouvelables pour couvrir les besoins de chauffage du bâtiment (fortement diminués avec la rénovation de l'enveloppe). La solution retenue pour le chauffage a été l'installation de deux pompes à chaleur Viessmann de 120 kW chacune, utilisant comme source froide 11 sondes géothermiques verticales de 244 m chacune (soient 2'684 m au total), disposées en ligne et espacées de 7 m pour limiter les interactions thermiques entre les sondes.

La Figure 15 présente le schéma de principe de l'installation. Les deux pompes à chaleur fonctionnent en cascade. La pompe à chaleur 1 est « maître » et la pompe à chaleur 2 est « esclave ». Elles sont toutes deux équipées de deux vitesses (2 compresseurs distincts) permettant 4 niveaux de puissance. Comme les pompes à chaleur ne produisent pas exactement la puissance demandée par la distribution de manière instantanée, un fonctionnement cyclique est adopté : elles se mettent en marche pour charger un accumulateur tampon de 2'000 L et s'arrêtent lorsque celui-ci est plein. La distribution sur le réseau se fait depuis cet accumulateur.

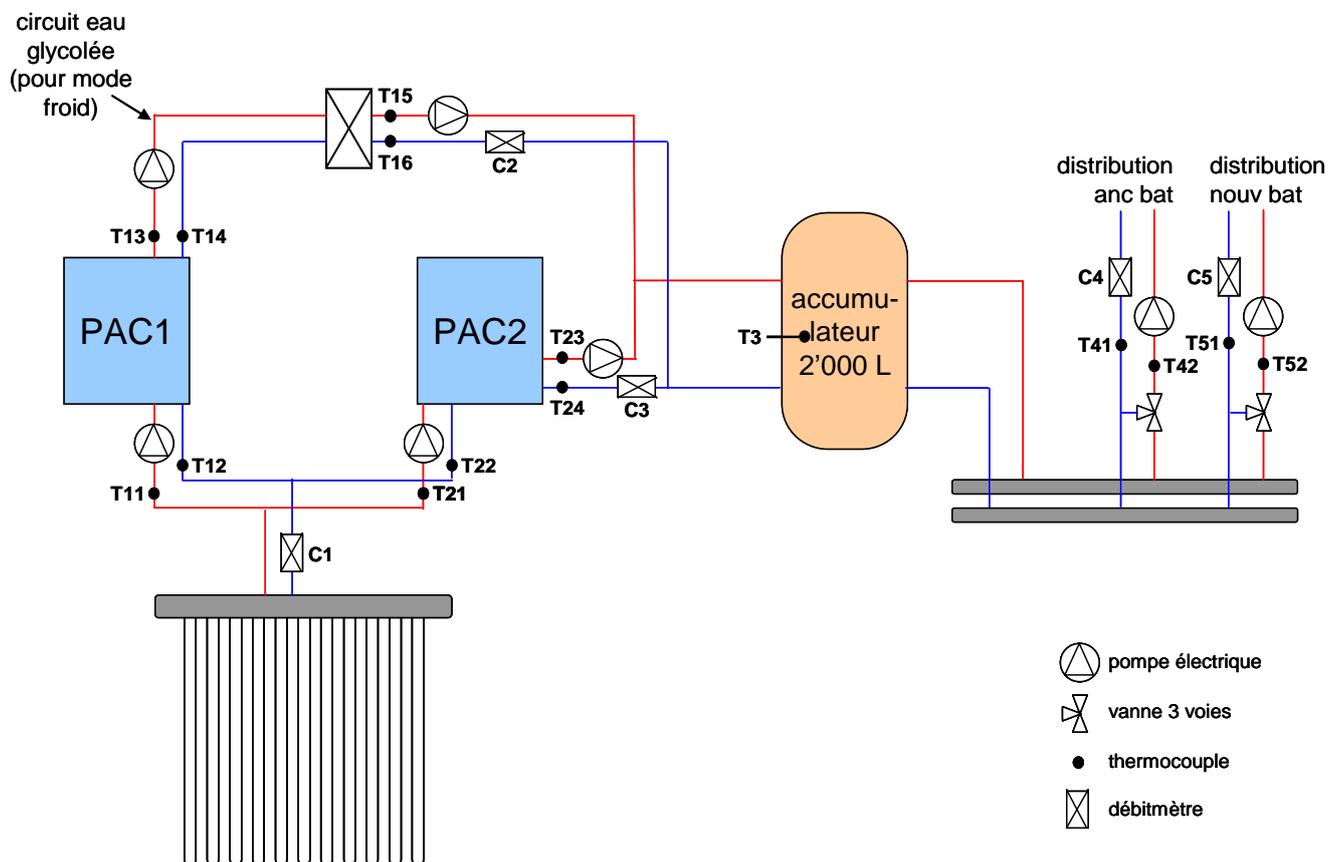


Figure 15 : Schéma de principe de l'installation

La pompe à chaleur 1 peut fonctionner en mode réversible en été pour la production de froid à destination d'éventuels plafonds froids. Afin d'éviter tout problème de gel des canalisations côté secondaire (=évaporateur lorsqu'on est en mode froid), un circuit intermédiaire en eau glycolée a été mis en place sur le secondaire, ce qui explique la présence d'un échangeur supplémentaire entre la pompe à chaleur et l'accumulateur.

Enfin, le propriétaire a investi dans une installation solaire photovoltaïque de 10 kWc crête pour compenser une partie de la consommation d'électricité des pompes à chaleur (cf. Figure 16). L'électricité produite est revendue en intégralité aux SIG.



Figure 16 : Vue de l'installation solaire photovoltaïque installée sur le toit de l'immeuble Polimmo (source : Paul Previdoli)

ii. Distribution

La distribution du chauffage, réalisée au moyen des radiateurs en fonte existants, n'a pas été revue. Un circuit distinct équipé de radiateurs classiques a été mis en place dans la surélévation. Les deux départs chauffage sont visibles sur le schéma de principe de l'installation en Figure 15. Un circuit de distribution de froid a également été prévu dans la surélévation en anticipation de besoins de froids futurs, le soin étant laissé aux entreprises locataires des bureaux d'installer les plafonds froids (NB : le départ de la distribution de froid n'est pas représenté sur la Figure 15).

iii. Ventilation

La surélévation a été équipée d'un système de ventilation double flux avec récupération d'énergie. La pulsion d'air dans les bureaux se fait au moyen de bouches d'aération situées au plafond au dessus des fenêtres. La VDF est couplée à un puits canadien permettant de couper les pointes de chaleur en été. En hiver, l'air neuf passe à travers le puits canadien avant d'entrer dans le monobloc de ventilation et est ainsi préchauffé de quelques degrés. La ventilation de la partie existante du bâtiment n'a pas été modifiée.

iv. Caractéristiques des installations techniques

Le Tableau 1 regroupe les caractéristiques des principales installations techniques du bâtiment Polimmo.

Tableau 1 : Caractéristiques des principales installations techniques (source : [Oberson; 2011])

	Matériel	Marque	Modèle	Taille	Quantité	Description
Production de chaleur	Pompes à chaleur	Viessmann	Natura BW 280.1	120 kW	2	
	Sondes géothermiques verticales	HakaGerodur	double U, 40 mm	244 m	11	2'684 m de sondes disposées en ligne, espacées de 6 à 8 m, parcourues par de l'eau glycolée
	Accumulateur			2'000 L	1	en série avec les pompes à chaleur
Ventilation	Monobloc ventilation double flux à haut rendement	Cesovent	Minair 4000 HP	4'000 m ³ /h	1	débit variable
	Puits canadien		tubes PVC 40 cm diamètre	~100 m		enterré à une profondeur 2.4 m
Installation photovoltaïque	Panneaux photovoltaïques			0.19 kWc	54	74.4 m ² =10.26 kWc, exposés Sud et inclinés à 30°

La fiche technique des PAC est disponible en Annexe 1 pour information. La Figure 17 présente quelques photos des principales installations techniques :



Figure 17 : Vue des principales installations techniques (de gauche à droite et de haut en bas) : pompes à chaleur, ballon d'accumulation, collecteur et départs de chauffage, monobloc de ventilation

I.B.2 Suivi énergétique

I.B.2.a Cadre du mandat

En 2007, le propriétaire du bâtiment M. Paul Previdoli entreprend une transformation complète de son bâtiment, qu'il confie au Groupe H. Il fait le choix ambitieux de retenir une rénovation conforme au standard Minergie afin d'assurer la pérennité de son patrimoine. Il opte également pour le recours à des pompes à chaleur sur sondes géothermiques.

Les études thermiques ont été réalisées par le bureau d'études thermiques Betica (Groupe H) et la conception et la réalisation des installations techniques a été assurée par l'entreprise Hydro Partner SA, alors hébergée dans le

bâtiment Polimmo. L'exploitation des installations avait initialement été confiée à l'entreprise Hydro Partner, puis à l'entreprise Tech Building suite à leur disparition en 2010.

A la suite de cette rénovation, l'Office cantonal de l'énergie de l'Etat de Genève (OCEN) a mandaté le Groupe Energie de l'Université de Genève pour réaliser un suivi énergétique du bâtiment sur 2 années complètes. A noter que le Groupe Energie a déjà effectué ce type de suivi par le passé sur d'autres bâtiments, par exemple sur le bâtiment neuf au standard Minergie du Pommier situé au Grand Saconnex [Zraggen; 2010], sur le bâtiment rénové au standard Minergie du Gros Chêne situé à Onex [Mermoud et al.; 2012], ou sur le complexe Minergie neuf situé à Satigny et équipé de pompes à chaleur couplées à des capteurs solaires [Mermoud et al.; 2014].

Dans le cas de Polimmo, l'OCEN était particulièrement intéressé à connaître les performances énergétiques en situation réelle de pompes à chaleur de puissance moyenne (120 kW) couplées à des sondes géothermiques. L'objectif du suivi était de tirer des enseignements sur la façon de réguler les pompes à chaleur (notamment en ce qui concerne les niveaux de température) et sur les bonnes pratiques à recommander, aussi bien en ce qui concerne la conception que l'exploitation.

1.B.2.b Groupe d'accompagnement

Un groupe d'accompagnement du suivi énergétique du bâtiment a été constitué avec les acteurs principaux de la rénovation afin de faciliter les échanges d'informations. La liste des membres du groupe d'accompagnement est présentée dans le Tableau 2. Le groupe s'est réuni deux fois par an pendant la durée du mandat.

Tableau 2 : Participants au groupe d'accompagnement du suivi énergétique

Institut	NOM	Fonction
OCEN	FREUDIGER Christian	Mandant
Polimmo	PREVIDOLI Paul	Maître d'ouvrage
Tech Building	MONTEIL Philippe GUINOT Emmanuel	Exploitation installations techniques
Groupe H	AESCHBACHER Vincent	Architecte
Betica	ROH Fabien	Ingenieur études thermiques
Unige	LACHAL Bernard	Responsable du mandat
Unige	MERMOUD Floriane	Responsable du suivi énergétique
Unige	HOLLMULLER Pierre	Participation au suivi énergétique
Unige	PAMPALONI Eric	Support technique du monitoring

1.B.2.c Concept de mesure

Le suivi énergétique a été effectué sur deux années complètes, d'octobre 2010 à septembre 2012. Le dispositif de suivi énergétique a été conçu pour pouvoir quantifier les flux d'énergie au sein du bâtiment, mesurer les performances des pompes à chaleur et de la ventilation et identifier les niveaux de températures lors du fonctionnement du système (32 points de mesure en tout). Les principaux paramètres météo ont également été relevés. Les données étaient scannées par le datalogger toutes les 5 secondes, puis moyennées et enregistrées toutes les 5 minutes (10 minutes jusqu'au 20.01.2011). Les grandeurs suivantes ont été quantifiées grâce au suivi :

- Production de chaleur/froid
 - énergie tirée de la géothermie et températures aller/retour
 - énergie (chaud/froid) fournie par la PAC1 et températures avant/après échangeur

- énergie fournie par la PAC2 et températures
- température dans l'accumulateur (à mi-hauteur)
- consommation électrique de chaque PAC
- Distribution de chaleur/froid
 - énergie distribuée sur le bâtiment existant (« ancien bâtiment ») et températures
 - énergie (chaud/froid) distribuée dans la surélévation (« nouveau bâtiment ») et températures
- Ventilation
 - énergie extraite et pulsée dans le bâtiment et températures de fonctionnement
 - débit de ventilation
 - consommation électrique du monobloc de ventilation
- Météo
 - température extérieure et humidité relative

La liste complète des sondes mises en œuvre est fournie en Annexe 2 et leur positionnement est indiqué sur la Figure 15 et sur l'Annexe 3 pour la ventilation.

Chapitre II :

Analyse énergétique

II.A Bilan énergétique par m² SRE et par an

II.A.1 Flux énergétiques

Le suivi énergétique a permis d'établir le bilan des flux énergétiques au sein du bâtiment sur les deux années de suivi (10-11 et 11-12). Le Tableau 3 présente les principaux flux mensuels pour l'année 11-12 (après optimisations). Les valeurs annuelles pour l'année 10-11 sont également mentionnées pour comparaison.

Tableau 3 : Demande de chauffage du bâtiment et consommations électriques des différents éléments pour l'année 11-12, valeurs mensuelles issues du suivi

		oct.11	nov.11	déc.11	janv.12	févr.12	mars.12	avr.12	mai.12	juin.12	juil.12	août.12	sept.12	TOTAL 11-12	TOTAL 10-11	prévu	avant rénovation
kWh/m ²	SRE													mesuré	mesuré	Enercad	moy 96-99
Demande chauffage														2541 DJ	2476 DJ	2659 DJ	2507 DJ
conso chauff anc bat	2205	1.1	3.1	4.0	4.6	5.6	1.9	1.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	22.2	20.5	17.8	107.6
conso chauff nouv bat	1463	1.6	4.1	5.5	6.3	8.7	4.0	2.9	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0	34.3	37.7	28.6	
conso chauff bat	3668	1.3	3.5	4.6	5.3	6.8	2.8	2.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	27.0	27.4	21.1	
Consommation électrique																	
conso élec PAC	3668	0.4	1.1	1.5	1.7	2.4	0.9	0.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	10.3	14	
conso élec VDF	1463	1.3	1.5	1.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	4.9	13.5	2.8	
conso élec totale	3668	1.0	1.7	1.9	1.7	2.5	0.9	0.6	0.3	0.1	0.0	0.1	0.1	10.8	15.7		

La demande de chauffage du bâtiment complet est de l'ordre de 27 kWh/m²/an, ce qui est faible (stable entre 10-11 et 11-12 malgré une petite différence de rigueur climatique). Cette valeur est néanmoins supérieure à la valeur mentionnée dans le justificatif thermique (21 kWh/m²/an), ce qui est couramment observé : le logiciel Enercad réalise un calcul dans des conditions normées (température intérieure de 20°C, taux de ventilation, gains internes et météo standards) qui ne reflètent pas les conditions réelles d'utilisation. Il ne s'agit en aucun cas d'une prédiction de consommation mais d'un calcul réglementaire visant à satisfaire à une norme.

On note que les demandes de chauffage de l'ancien et du nouveau bâtiment sont très différentes : ce point sera commenté au paragraphe II.B.1. La demande de chauffage rapportée au m² SRE a été divisée par 4 grâce à la rénovation de l'enveloppe thermique.

Remarque : Le bâtiment Polimmo étant un bâtiment tertiaire, la demande thermique correspond uniquement à une demande de chauffage. L'eau chaude pour les sanitaires est produite par des petits boilers électriques mais la consommation n'est pas significative : elle n'a pas été étudiée dans le cadre de ce travail.

La consommation d'électricité pour les besoins de chauffage et de ventilation du bâtiment s'élève à environ 11 kWh/m² SRE en 11-12, contre 16 kWh/m² SRE en 10-11, en majorité pour le fonctionnement des PAC. La consommation électrique des PAC a légèrement diminué entre 10-11 et 11-12 pour une même production de chaleur du fait des optimisations réalisées. La consommation électrique de la ventilation, applicable uniquement au nouveau bâtiment, a en revanche été divisée par 3 entre 10-11 et 11-12. En 10-11, la consommation électrique de la ventilation (rapportée au m² SRE) était anormalement élevée puisqu'elle dépassait la consommation électrique

des PAC : ce point a été corrigé grâce à un meilleur réglage des débits (cf. paragraphe II.E.1.b). L'analyse des performances des différents sous-systèmes sera détaillée plus largement dans les paragraphes II.C et II.E.

II.A.2 Diagrammes de flux

Les diagrammes de flux d'énergie du bâtiment Polimmo avant et après transformation sont respectivement présentés en Figure 18 et Figure 19.

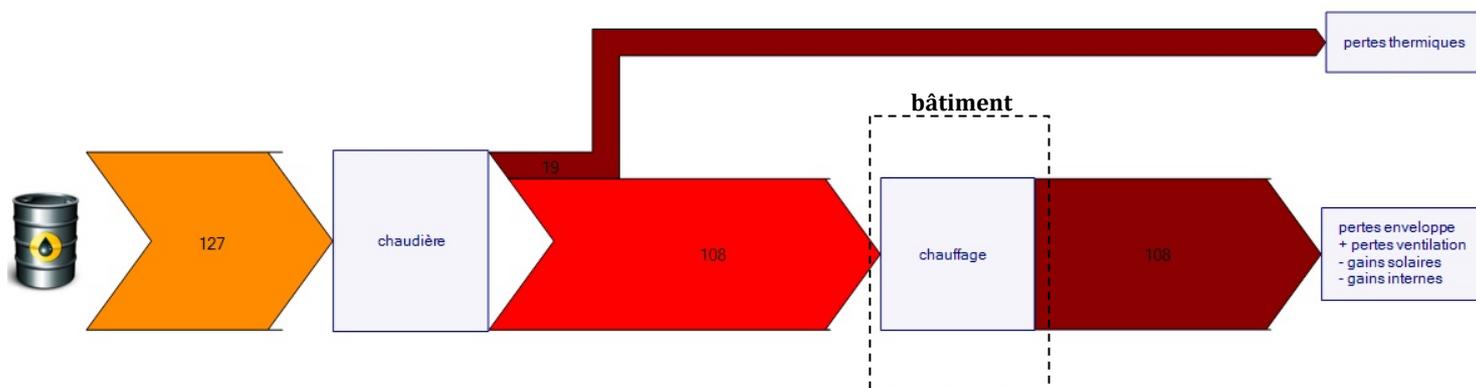


Figure 18 : Diagramme de flux du bâtiment Polimmo avant transformation (kWh/m²/an)

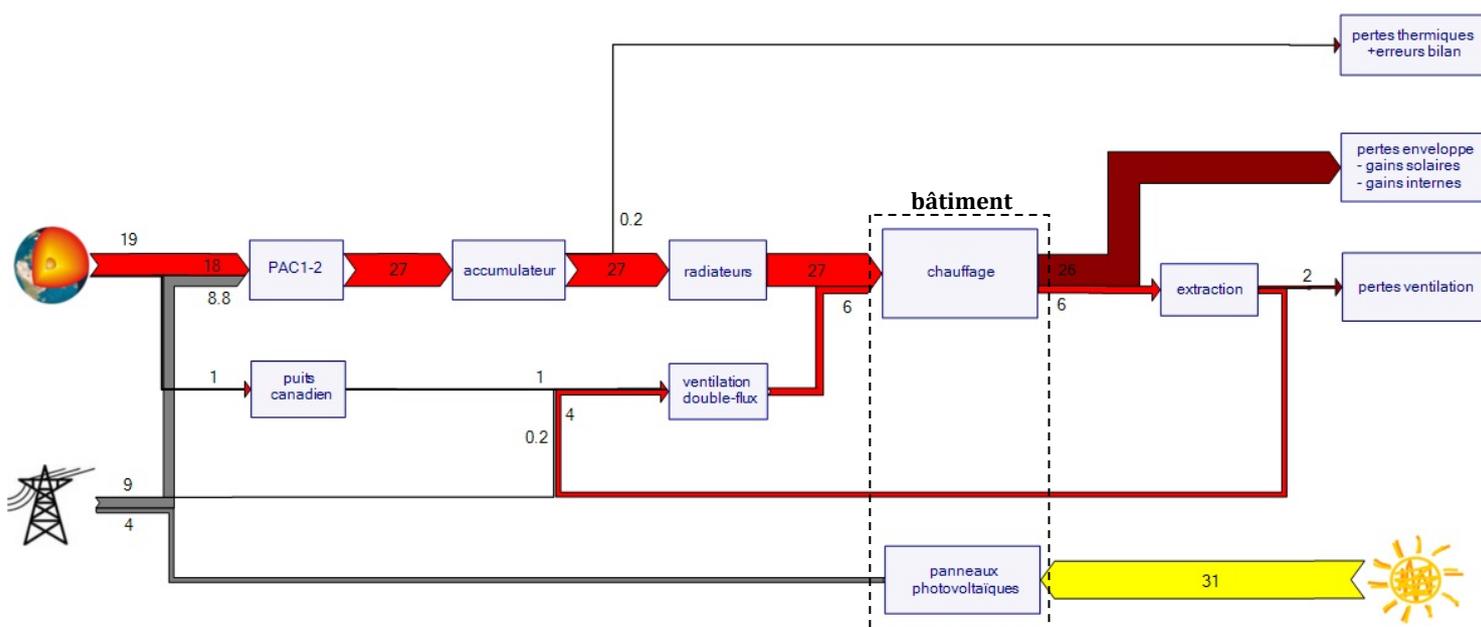


Figure 19 : Diagramme de flux du bâtiment Polimmo après transformation (kWh/m²/an)

Hypothèses :

- Le bilan est exprimé en kWh/m² SRE/an (SRE de 2'205 m² avant transformation et 3'668 m² après transformation). Les deux diagrammes sont à la même échelle.
- Pour le bâtiment avant rénovation, les consommations de mazout observées sur 3 années complètes (96-99) ont été utilisées pour calculer la demande thermique du bâtiment, en considérant un rendement de chaudière de 85%.
- Pour le bâtiment après transformation, les données présentées sont issues :
 - des résultats du suivi sur l'année 11-12 – plus représentative que l'année 10-11 car après optimisations – pour les flux liés aux PAC (cf. Tableau 3), corrigées par rapport au climat moyen à Genève (2'507 DJ_{12/18}/an en moyenne entre 1992 et 2010 [Mermoud et al.; 2012]) ;

- de l'extrapolation des résultats obtenus après optimisations réalisées en février 2012 pour les flux liés à la ventilation (un COP annuel de 30 a été considéré, cf. paragraphe II.E.2.c). NB : par convention, seule la consommation électrique du ventilateur de pulsion a été mentionnée (l'extraction étant considérée comme un dispositif standard).

La réduction de la demande thermique du bâtiment est bien visible sur la Figure 18 et la Figure 19 : alors qu'elle était de 108 kWh/m²/an avant rénovation, la demande thermique brute (=énergie nécessaire pour chauffer le bâtiment) est de 33 kWh/m²/an après transformation tandis que la demande thermique nette (=énergie qu'il faut apporter au bâtiment de l'extérieur) n'est que de 28 kWh/m²/an grâce à la récupération de chaleur sur la VDF.

La demande thermique est aux 3/4 couverte par les radiateurs, 1/4 par la VDF. NB : même si la VDF n'est opérante que dans le nouveau bâtiment et pas dans l'ancien, un seul diagramme de Sankey a été réalisé pour l'ensemble du bâtiment (la contribution de la VDF a été rapportée à l'ensemble de la SRE et pas seulement la SRE du nouveau bâtiment).

Les besoins d'énergie sont couverts aux 2/3 par la géothermie et à 1/3 par l'électricité. A noter que l'installation photovoltaïque implantée sur le toit de l'immeuble compense 40% de l'électricité consommée par le bâtiment pour ses besoins thermiques.

Remarque : L'installation photovoltaïque n'a pas été monitorée par l'Unige mais les données fournies par le propriétaire concernant les ventes d'électricité aux SIG permettent d'estimer le rendement des panneaux à 13%.

II.A.3 Indice Minergie

II.A.3.a Rappel de la procédure

Lors d'une rénovation, le label Minergie peut être obtenu si une performance énergétique suffisante est atteinte. Cette performance énergétique est évaluée au moyen de l'« indice pondéré de demande d'énergie » du bâtiment, sur lequel s'applique la valeur limite Minergie. En rénovation, la valeur limite Minergie pour les bâtiments administratifs est de 55 kWh/m²/an depuis 2009⁷.

Cet indice est calculé en faisant la somme des consommations en énergie finale d'un site pour le chauffage et la ventilation, après pondération des différentes sources d'énergie suivant les facteurs adoptés par Minergie, présentés dans le Tableau 4 :

Tableau 4 : Facteurs de pondération adoptés par Minergie en fonction de la source d'énergie (source : Minergie⁸)

Vecteur énergétique/source d'énergie	Facteur de pondération
Soleil, chaleur de l'environnement, géothermie	0
Biomasse (bois, biogaz, gaz de STEP)	0.7
Chauffage à distance (min. 50% d'énergie renouvelable, chaleur résiduelle, CCF)	0.6
Combustibles fossiles (pétrole, gaz)	1
Électricité	2

⁷ source : site internet Minergie www.minergie.ch/minergie_fr.html, consulté en juillet 2014

⁸ <http://www.minergie.ch/>, consulté en juin 2014

Dans le cas de Polimmo, une pondération de 2 est appliquée aux consommations d'électricité pour les PAC et la ventilation, et l'énergie tirée de la géothermie n'est pas prise en compte.

II.A.3.b Calcul de l'indice Minergie d'après les résultats du suivi

L'indice pondéré de demande d'énergie est un calcul normé représentant une estimation « a priori » des performances futures du bâtiment, et le label Minergie est accordé sans vérification des performances effectives du bâtiment. Dans la suite, nous avons confronté les valeurs mentionnées dans le justificatif Minergie aux valeurs mesurées lors du suivi. Afin de ramener les consommations d'énergie mentionnées sur la Figure 19 au climat « standard » considéré par Minergie (soient 2'959 DJ_{12/18}/an), nous avons effectué une correction climatique par rapport au climat moyen à Genève (2'507 DJ_{12/18}) :

$$\text{Indice Minergie Polimmo} = (\text{élec PAC} + \text{élec VDF}^a) \cdot \frac{DJ_{ref}}{DJ_{moy}} \cdot 2 = (8.8 \cdot \frac{2659}{2507} + 0.4) \cdot 2 \approx 19 \ll 55 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{an}$$

^aConformément aux préconisations Minergie, la consommation des 2 ventilateurs d'extraction et de pulsion est prise en compte dans le calcul

Ainsi d'après les résultats du suivi, le bâtiment Polimmo remplit parfaitement les exigences du label Minergie en rénovation.

II.B Demande thermique du bâtiment

II.B.1 Demande de chauffage avant/après rénovation

Comme évoqué au paragraphe II.A.1, la demande de chauffage du bâtiment est passée de 108 kWh/m²/an à 27 kWh/m²/an, soit une division par 4. La nouvelle enveloppe thermique du bâtiment est excellente, puisque sa demande de chauffage est comparable à celle observée sur le bâtiment neuf Minergie du Pommier (25 kWh/m²/an, hors contribution de la VDF) [Zgraggen; 2010]. A titre de comparaison, l'immeuble résidentiel du 40-42 avenue du Gros Chêne [Mermoud et al.; 2012], qui lui a été rénové au standard Minergie, présente une demande de chauffage de 73 kWh/m²/an (hors contribution de la VDF).

Les besoins thermiques de l'ancien et du nouveau bâtiment (enregistrés sur les circuits de distribution de chauffage respectifs) sont très différents : 20 à 22 kWh/m²/an pour la partie rénovée contre 34 à 38 kWh/m²/an pour la surélévation. Ce constat n'est pas étonnant puisque le facteur de forme de la surélévation est moins bon que celui de la partie existante. La partie nouvelle du bâtiment est proportionnellement plus exposée aux pertes thermiques ; en effet, la partie existante comporte deux étages dont les façades sont exposées sur l'extérieur et sa partie inférieure est exposée contre le sol (plus favorable que l'air extérieur) tandis que la partie nouvelle ne comporte qu'un étage et sa partie supérieure est elle aussi exposée sur l'extérieur.

Remarque : Ces valeurs concernent uniquement la demande de chauffage distribuée via les radiateurs. La VDF participe également au chauffage du nouveau bâtiment : la demande thermique brute du nouveau bâtiment est donc encore plus élevée.

II.B.2 Signature énergétique

La signature énergétique du bâtiment se définit comme la puissance nécessaire au chauffage du bâtiment [W/m²] en fonction de la température extérieure (en moyenne journalière). Il s'agit en principe d'une droite, le bâtiment ayant un comportement linéaire en fonction de la température extérieure. La signature énergétique de la partie existante et de la surélévation ainsi que du bâtiment dans son ensemble est présentée en Figure 20.

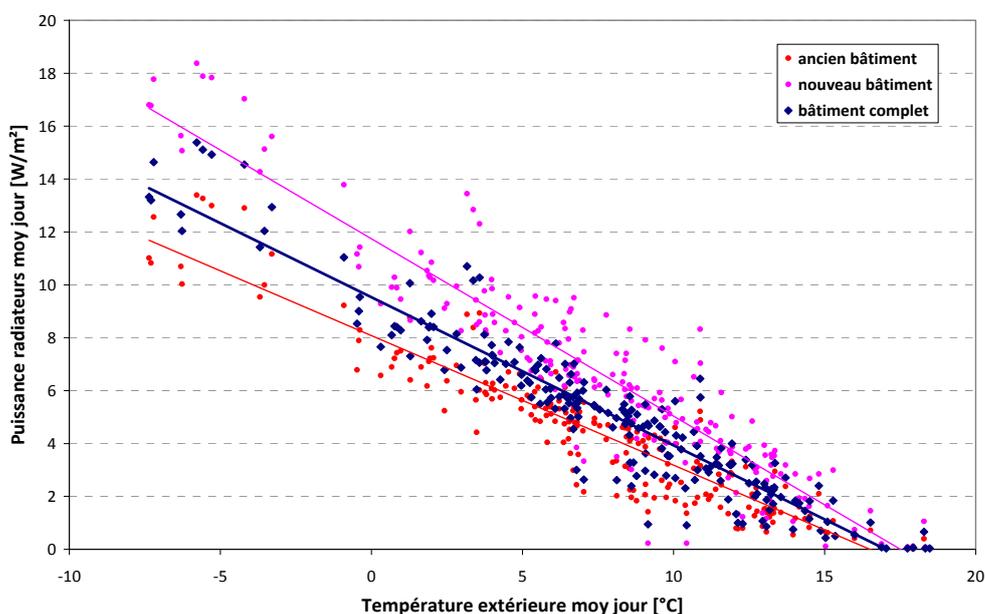


Figure 20 : Signature énergétique de l'ancien et du nouveau bâtiment et du bâtiment complet exprimée en W/m² (données 11-12, moyennes journalières), hors contribution de la VDF dans le nouveau bâtiment

La demande de chauffage apportée par les radiateurs au bâtiment Polimmo est de 9 W/m² à une température extérieure de 0°C. Cette valeur est faible, résultat de l'excellente enveloppe thermique du bâtiment après transformation. A titre de comparaison, la valeur observée sur le bâtiment du Pommier [Zraggen; 2010] est de 10 W/m², tandis que celle observée sur le bâtiment du Gros Chêne [Mermoud et al.; 2012] est de 22 W/m².

II.B.3 Demande horaire classée

La Figure 21 présente la demande horaire classée pour le bâtiment Polimmo pour l'année 11-12 (ancien bâtiment, nouveau bâtiment et bâtiment complet).

La demande brute de chauffage représentée sur la Figure 21 est la somme de l'énergie fournie par les radiateurs et par la ventilation dans le nouveau bâtiment. La demande totale est la somme instantanée de la demande brute de chauffage des deux parties du bâtiment (NB : les courbes prises séparément ne s'additionnent pas, elles ne se réfèrent de toute façon pas aux mêmes SRE).

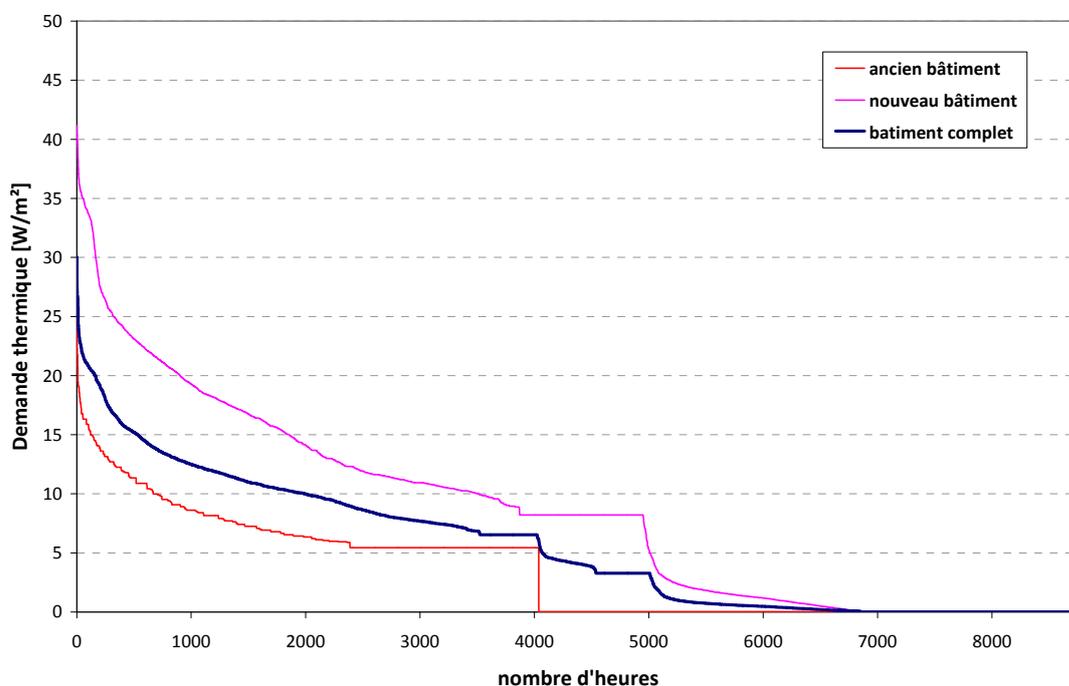


Figure 21 : Demande horaire classée de l'ancien et du nouveau bâtiment et du bâtiment complet pour l'année 11-12 (énergie pulsée par la ventilation incluse dans le cas du nouveau bâtiment)

La puissance thermique brute maximale (incluant la chaleur apportée par la ventilation) est quasiment deux fois plus importante dans le cas du nouveau bâtiment que dans l'ancien. Pour le bâtiment complet, elle est d'environ 25 W/m², ce qui est du même ordre de grandeur que la valeur atteinte au Pommier [Zraggen; 2010]. La valeur observée au Gros Chêne [Mermoud et al.; 2012] est quant à elle de 40 W/m².

On note que la période de chauffage annuel dure 4'000 heures pour l'ancien bâtiment et 5'000 heures pour le nouveau. La cassure dans la courbe montre que la VDF prend encore le relais pendant 1'700 heures dans le nouveau bâtiment.

II.B.4 Courbes de chauffe

La Figure 22 présente les courbes de chauffe de l'ancien et du nouveau bâtiment.

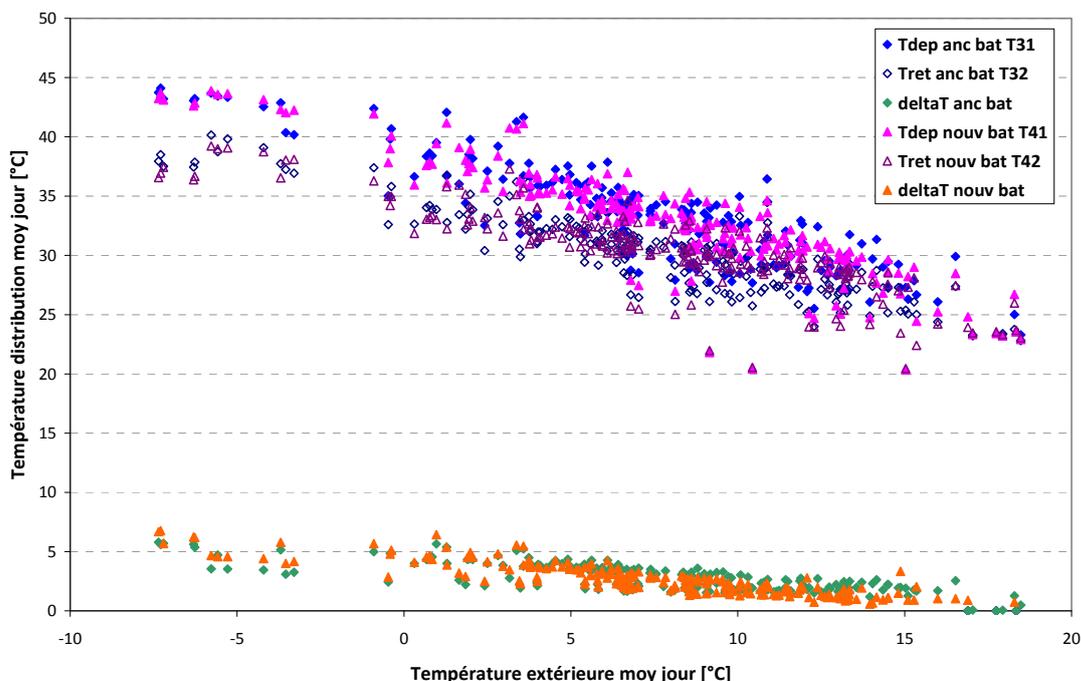


Figure 22 : Courbes de chauffe dans l’ancien et le nouveau bâtiment, ainsi que différence de température entre départ et retour (données oct 11-avr 12, moyennes journalières)

Les deux bâtiments présentent des courbes de chauffe très similaires, avec un départ à maximum 45°C lorsque la température extérieure est inférieure à -5°C, jusqu’à un départ à 25°C lorsque la température extérieure atteint les 18°C ; ces valeurs sont raisonnables si on tient compte du type d’émetteurs en place (radiateurs). De manière classique, l’évolution est linéaire entre ces deux points extrêmes. La température de départ est réglée par une vanne 3 voies mélangeant de l’eau provenant de l’accumulateur (PAC) à de l’eau du circuit de retour (cf. schéma de principe en Figure 15).

Un ralenti/arrêt de nuit est généralement programmé sur la distribution des installations de chauffage afin d’économiser de l’énergie. Sur le bâtiment Polimmo, les différents réglages nocturnes qui ont été implémentés sur la distribution sont récapitulés dans le Tableau 5 :

Tableau 5 : Réglages sur le ralenti de nuit sur la distribution effectués durant la période de suivi

	anc bat	nouv bat
réglage initial	arrêt entre 21h et 3h	X
modif 22.02.2011	arrêt entre 21h et 3h	
modif 13.10.2011	ralenti (-10K) entre 22h et 5h	

Suite à des difficultés de relance matinale à cause de l’arrêt complet du chauffage entre 21h et 3h, l’entreprise de maintenance Tech Building a proposé de mettre en place un ralenti de nuit (baisse de 10K dans la température de distribution) entre 22h et 5h plutôt qu’un arrêt complet des installations (réglage effectué le 13.10.2011). NB : ce ralenti de nuit de -10K n’est pas directement visualisable sur la Figure 22 car les valeurs sont moyennées sur 24h.

Sur la Figure 22 on lit également les différences de température entre départ et retour pour les deux circuits. Là encore, les valeurs sont proches dans les deux cas et très faibles : le ΔT est généralement inférieur à 5K et majoritairement compris entre 2 et 4K, ce qui témoigne de débits trop importants dans les circuits de distribution (les ΔT devraient pouvoir atteindre facilement 10K). Les débits sur les circuits de distribution, fixes quelle que soit

la température extérieure, ont été modifiés à plusieurs reprises au cours du suivi : le Tableau 6 récapitule les différentes modifications effectuées.

Tableau 6 : Réglages sur les débits de distribution effectués durant la période de suivi

	circuit anc bat	circuit nouv bat	Remarques
réglage initial	6.7 m ³ /h	4.6 m ³ /h	
modif 22.02.2011	3.8 m ³ /h	2.4 m ³ /h	proposition de l'Unige
modif 13.10.2011	6.7 m ³ /h	4.6 m ³ /h	plainte des locataires (T _{distrib} trop faibles en mi-saison pour maintenir le bâtiment en température avec de faibles débits)
modif 14.11.2011	3.8 m ³ /h	2.4 m ³ /h	augmentation T _{distrib} en mi-saison pour pouvoir diminuer les débits
modif 30.01.2012	2.5 m ³ /h	1.6 m ³ /h	proposition de l'Unige
modif 31.01.2012	3.8 m ³ /h	2.4 m ³ /h	plainte des locataires dès le 31.01.2012 (radiateurs froids) => retour aux valeurs initiales
modif 08.02.2012	7.2 m ³ /h	5.5 m ³ /h	plainte des locataires (trop froid dans les locaux) durant période de froid extrême en février 2012 => augmentation des débits
modif 13.02.2012	3.8 m ³ /h	2.4 m ³ /h	fin de la période de grand froid

Si les ΔT sur les deux circuits sont proches, les débits sont en revanche très différents car le circuit du bâtiment existant alimente deux étages tandis que le circuit de la surélévation alimente un seul étage. Une baisse durable et importante des débits de distribution est difficile à mettre en place à Polimmo comme en témoignent les expériences menées fin janvier-début février 2012. En effet, dès lors qu'on diminue les débits de manière significative, on observe un phénomène de radiateurs froids dans certaines parties du bâtiment : un équilibrage hydraulique serait nécessaire pour pallier à ce problème.

II.C Fonctionnement des pompes à chaleur

II.C.1 Régulation

Les pompes à chaleur délivrent leur chaleur à un ballon accumulateur de 2'000 L. Les deux PAC peuvent fonctionner séparément ou simultanément, mais la chaleur produite passe obligatoirement par le ballon (relié en série avec les PAC), comme le montre la Figure 23.

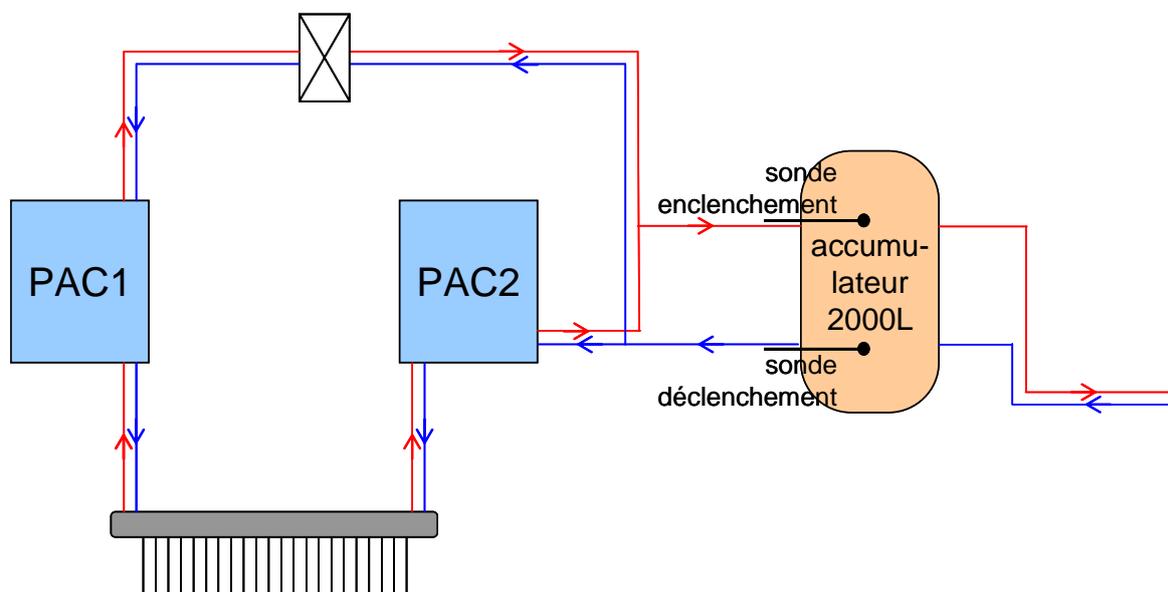


Figure 23 : Schéma de raccordement des PAC à l'accumulateur

II.C.1.a Enclenchement/déclenchement des PAC

L'enclenchement/déclenchement des PAC se fait de la manière suivante :

- La PAC se met en route lorsque la température mesurée par la sonde de température haute (sonde d'enclenchement cf. Figure 23) placée au niveau du départ vers le collecteur de distribution passe en dessous d'une consigne basse définie par une courbe de chauffe.
- La PAC fonctionne pour charger le ballon et s'arrête lorsque la température mesurée par la sonde de température basse (sonde de déclenchement cf. Figure 23) placée au niveau des retours de distribution atteint une consigne haute définie par la courbe de chauffe. NB : initialement, la sonde de température basse était positionnée en dessous du piquage de retour de la distribution dans une zone « morte » non brassée ce qui retardait l'arrêt de la PAC, la température mesurée ne correspondant pas à la température disponible dans le ballon.
- Une hystérésis de +/- 1 ou 2 degrés sur les températures de consigne est en place dans la régulation.

Cette façon de réguler l'enclenchement/déclenchement des PAC est assez classique pour ce type de schéma hydraulique, qui permet notamment d'éviter un trop grand nombre de cycles (=enclenchement/déclenchement) des PAC.

Remarque : L'installation est assujettie à un délestage en périodes de pointes électriques sur demande des SIG, ce qui pourrait lui permettre de bénéficier du tarif préférentiel « pompes à chaleur ». Durant les périodes de délestage (en général en milieu de journée), la PAC ne peut pas se mettre en marche même s'il y a une demande de chaleur.

La courbe de chauffe sur le ballon est définie par une température de consigne dépendante de la température extérieure. Il s'agit d'une valeur unique valable pour l'enclenchement et le déclenchement de la PAC, mais qui s'applique respectivement sur la sonde haute et sur la sonde basse. Les paramètres de la courbe de chauffe du ballon sont les suivants :

Tableau 7 : Courbe de chauffe du ballon d'accumulation et de la distribution

Text	20°C	10°C	0°C	-10°C
Tconsigne	20°C	30°C	40°C	45°C
Tdistrib	22°C	31°C	38°C	47°C

Remarques :

- Durant la 1^{ère} saison, il n'y avait pas de courbe de chauffe sur le ballon : ce dernier était toujours à la même température quelle que soit la température extérieure. Puis la courbe de chauffe du ballon d'accumulation a été réglée 5K plus haut que la courbe de chauffe de la distribution pour pouvoir amortir d'éventuelles variations brusques de la température extérieure. Dans un souci d'amélioration des performances de la PAC et sur proposition de l'Unige, Tech Building a ajusté le 14 novembre 2011 les deux courbes de chauffe (cf. Tableau 7), estimant que l'inertie du bâtiment était suffisante pour absorber les éventuelles variations de température extérieure. Ce réglage est seulement susceptible de poser problème durant les périodes de grand froid, où la température du ballon est plafonnée à 45°C.
- Un ralenti de nuit a été programmé sur la courbe de chauffe du ballon (-10K entre 22h et 5h), mais seulement à partir du 13 février 2012. Avant cette date, le ralenti de nuit était en place seulement sur la distribution, ce qui ne permettait pas d'optimiser les performances de la PAC (durant la nuit, le ballon était à la même température que la journée alors que la distribution était 10K plus basse).

En connaissant le volume de l'accumulateur (2'000 L) et les débits respectifs sur le circuit PAC et sur les circuits de distribution, nous avons pu calculer le temps de recharge minimal et le temps de décharge minimal de l'accumulateur :

Tableau 8 : Temps minimum de recharge et de décharge hydraulique du ballon d'accumulation

	Débit circuit PAC	
	1 PAC=7 m ³ /h	2 PAC=14 m ³ /h
Temps recharge min	17 min	9 min
	Débit distribution	
	bas=6.2 m ³ /h	haut=12.7 m ³ /h
Temps décharge min	19 min	9 min

Le temps d'autonomie est au minimum de 10 à 20 min selon les débits réglés sur les circuits de distribution (d'après les valeurs extrêmes observées durant la période de suivi). Le temps de recharge minimal est du même ordre de grandeur.

A noter qu'on recommande généralement⁹ un volume de 35 L/kW installé pour l'accumulateur. Dans le cas de Polimmo, on est plutôt à 17 L/kW voire 8 L/kW si les 2 PAC fonctionnent en même temps : le volume de

⁹ d'après discussion avec André Freymond, responsable de l'antenne Suisse romande du Groupement Suisse pour les pompes à chaleur (GSP)

l'accumulateur semble sous dimensionné, ce qui explique que le temps d'autonomie soit si faible et ce qui a pour conséquence une augmentation du cyclage des PAC.

II.C.1.b Cascade des PAC

Les PAC comprennent chacune deux compresseurs de même taille fonctionnant à vitesse fixe. L'installation dispose donc de 4 niveaux de puissance distincts selon le nombre de compresseurs enclenchés. La régulation de l'enclenchement en cascade des compresseurs se fait de la manière suivante :

- Lorsqu'il y a demande de chaleur, le 1^{er} compresseur de la 1^{ère} PAC se met en marche pour une durée minimale réglée par l'utilisateur. La PAC ne s'arrête en principe pas avant la fin de cette durée minimale même si la température de consigne est atteinte, pour éviter les démarrages/arrêts intempestifs des compresseurs (mauvais pour la durabilité).
- A l'issue de cette période (par exemple 20 min), si la température de consigne n'est pas atteinte dans le ballon, le 2^{ème} compresseur de la 1^{ère} PAC se met en marche jusqu'à ce que la température de consigne dans le ballon soit atteinte.
- Si cela n'est encore pas suffisant, le 1^{er} compresseur de la 2^{ème} PAC se met en marche et ainsi de suite.
- Un temps de latence de 15 min est observé pendant lequel une PAC ne peut redémarrer après un arrêt pour laisser la pression retomber au sein du système. La 2^{ème} PAC peut prendre le relais au cas où il y a une nouvelle demande de chaleur dans ce délai.

Si la PAC1 est maître et la PAC2 esclave, l'installation est programmée pour équilibrer le nombre d'heures de fonctionnement des compresseurs de chaque PAC afin d'homogénéiser leur usure. Cependant, le suivi a montré que cette fonction semblait ne pas fonctionner correctement. Le Tableau 9 et le Tableau 10 récapitulent le temps de fonctionnement ainsi que l'énergie produite par les deux PAC au cours des années 10-11 et 11-12.

Tableau 9 : Temps de fonctionnement et énergie thermique fournie par les PAC 1 et 2 en 10-11

	oct.10	nov.10	déc.10	janv.11	févr.11	mars.11	avr.11	mai.11	juin.11	juil.11	août.11	sept.11	10-11
intervention Tech Building 22.02.2011													
<i>Temps de fonctionnement des PAC</i>													
temps fonct PAC1 (h)	227	238	406	387	18	116	37	39	33	10	0	0	1673
%temps	30%	33%	55%	52%	27%	16%	5%	5%	5%	1%			19%
temps fonct PAC2 (h)	2	6	22	19	21	44	9	4	4	6	0	0	138
%temps	0.3%	1%	3%	3%	3%	6%	1%	1%	1%	1%			2%
<i>Energie thermique fournie</i>													
PAC1 (kWh)	12770	13801	24046	22629	16539	7060	2281	1559	825	133	0	0	101641
PAC2 (kWh)	9	15	58	56	99	2593	636	207	137	50	0	0	4755

Tableau 10 : Temps de fonctionnement et énergie thermique fournie par les PAC 1 et 2 en 11-12

	oct.11	nov.11	déc.11	janv.12	févr.12	mars.12	avr.12	mai.12	juin.12	juil.12	août.12	sept.12	11-12
intervention Tech Building 14.11.2011													
<i>Temps de fonctionnement des PAC</i>													
temps fonct PAC1 (h)	74	29	268	284	368	127	91	45	4	0	0	0	1479
%temps	10%	3%	36%	38%	55%	17%	13%	6%	1%				17%
temps fonct PAC2 (h)	15	5	13	16	27	2	0.3	0	0	0	0	0	78
%temps	2%	1%	2%	2%	4%	0.2%	0.04%						1%
<i>Energie thermique fournie</i>													
PAC1 (kWh)	4270	12349	16908	19327	25074	10121	7408	2945	170	0	0	0	99072
PAC2 (kWh)	778	27	93	93	183	7	1	0	0	0	0	0	1183

On observe sur le Tableau 9 qu'avec les réglages initiaux, la PAC2 ne s'enclenchait quasiment jamais (oct 10-fév 11). Cela était dû à un mauvais réglage dans la régulation qui bloquait le démarrage de la PAC2, qui a été corrigé par Tech Building le 22 février 2011 après leur prise en charge de l'installation. Comme on le voit sur le Tableau 9 et le Tableau 10, la PAC2 s'est enclenchée plus régulièrement à partir de ces réglages et jusqu'au mois d'octobre 2011, sans pour autant égaler le nombre d'heures de fonctionnement de la PAC1. Le 14 novembre 2011, Tech Building intervient à nouveau sur l'installation pour modifier les courbes de chauffe sur le ballon d'accumulation et depuis cette date, la PAC2 ne s'enclenche à nouveau plus que très rarement : ce problème devra être corrigé à terme pour équilibrer le temps de fonctionnement des deux PAC et préserver la durabilité de l'installation.

II.C.1.c Température de production des PAC

Dans la configuration retenue à Polimmo, la température de production des PAC ne peut être réglée directement, alors même que cette dernière qui influe grandement sur les performances de la PAC. En effet plus la différence de température entre la source froide ($T_{\text{entrée evap}}$) et la source chaude ($T_{\text{sortie cond}}$) est grande, moins le COP de la PAC sera élevé.

La Figure 24 présente l'évolution de la température à la sortie du condenseur de la PAC1 (=température de production) et de la différence de température entre l'entrée et la sortie du condenseur sur le mois de novembre 2011 (valeurs 5 min).

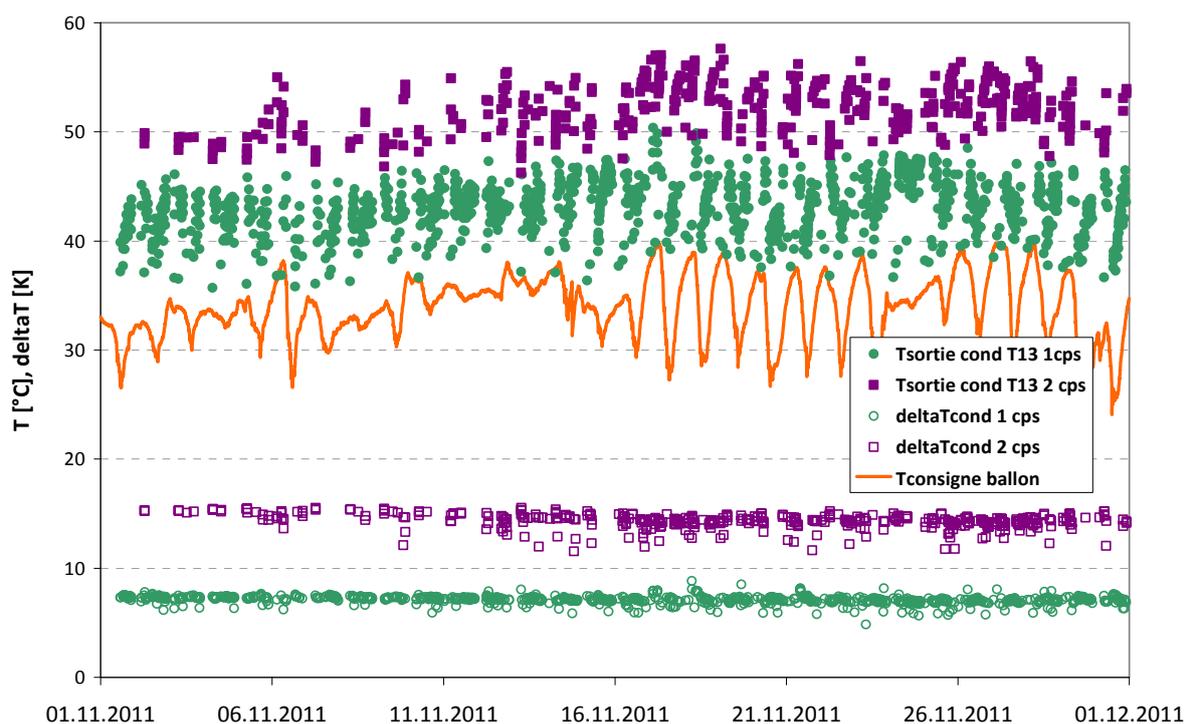


Figure 24 : Températures observées à la sortie du condenseur de la PAC1 (T13) au cours du mois de novembre 2011, différenciées selon que 1 ou 2 compresseurs fonctionnent (données 5 min)

La température à la sortie du condenseur varie majoritairement entre 40 et 45°C lorsqu'un seul compresseur est en marche, et entre 50 et 55°C lorsque les deux compresseurs fonctionnent simultanément. $T_{\text{sortie cond}}$ est en moyenne 10K au dessus de la température de consigne dans le ballon (selon courbe de chauffe programmée par Tech Building), ce qui doit se ressentir sur les performances de la PAC.

Dans la pratique, la température de production de la PAC n'est pas liée à la température de consigne mais à la température à l'entrée du condenseur : la Figure 24 montre que la différence de température entre entrée et sortie

du condenseur est relativement stable, environ 7-8K lorsqu'un seul compresseur est en marche contre 14-15K lorsque les deux compresseurs fonctionnent simultanément. Ce phénomène s'explique par le fait que le débit dans le circuit aval de la PAC est fixe alors que la puissance délivrée est double. Ainsi, la seule manière d'agir sur la température de production est d'agir sur la température d'entrée dans le condenseur (donc sur la température de retour de la distribution).

II.C.2 Caractérisation du fonctionnement des PAC

II.C.2.a Dimensionnement

Le Tableau 11 présente le temps et la puissance moyenne de fonctionnement des PAC sur l'hiver 11-12.

Tableau 11 : Temps et puissance moyenne de fonctionnement des PAC 1 et 2, puissance et température en sortie des sondes géothermiques durant l'hiver 11-12 (données 5 min)

	oct.11	nov.11	déc.11	janv.12	févr.12	mars.12	avr.12	hiver 11-12
<i>Temps de fonctionnement des PAC</i>								<i>total</i>
temps fonct PAC1 (h)	74	219	268	284	368	127	91	1430
%temps	10%	30%	36%	38%	55%	17%	13%	28%
temps fonct PAC2 (h)	15	5	13	16	27	2	0.3	78
%temps	2%	1%	2%	2%	4%	0.2%	0.04%	2%
<i>Puissance de fonctionnement des PAC</i>								<i>Pnom</i>
Pther moy PAC1 (kW)	50	52	55	60	62	67	68	
Pther max PAC1 (kW)	111	111	111	111	111	111	111	120
Pther moy PAC2 (kW)	39	2	3	2	3	2	2	
Pther max PAC2 (kW)	111	9	58	13	15	7	8	120
<i>Géothermie</i>								<i>réf</i>
Ptirée moy (W/m sonde)	14	13	14	15	16	18	18	
Ptirée max (W/m sonde)	42	31	31	31	29	31	31	50
Tgéoth moy (°C)	14.6	13.4	12.8	12.3	11.0	12.5	13.3	
Tgéoth min (°C)	12.3	11.5	10.8	10.5	8.7	10.6	11.4	

On note qu'au cours de l'hiver 11-12, la PAC1 a fonctionné 28% du temps et la PAC2 seulement 2% : la PAC1 suffirait à couvrir seule les besoins thermiques. D'autre part, la puissance thermique moyenne de la PAC1 (durant les périodes où elle fonctionne) est de l'ordre de la moitié de sa puissance nominale.

La Figure 25 présente les puissances classées produites par les deux PAC ainsi que leur consommation électrique sur l'année 11-12 et la demande thermique classée du bâtiment. NB : les données par 5 min ont été utilisées dans ce graphique car les cycles de fonctionnement des PAC ont une durée typiquement comprise entre 20 et 40 min, et les données horaires n'auraient pas permis de mener une analyse suffisamment fine. L'aspect en échelons de la courbe de demande du bâtiment est lié à la faible sensibilité du compteur de chaleur.

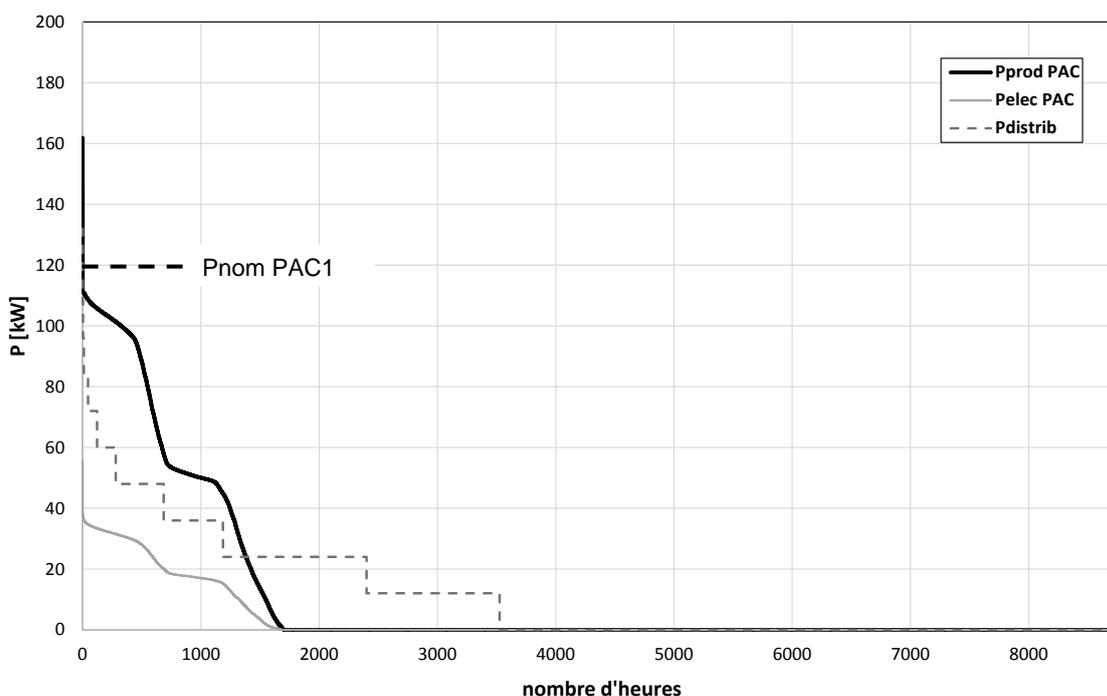


Figure 25 : Puissances classées concernant la chaleur produite et l'électricité consommée par les PAC, ainsi que la chaleur distribuée au bâtiment (valeurs 5 min)

Les PAC ont fonctionné 1'700 heures sur l'année 11-12, alors que la distribution a fonctionné durant 3'500 heures en cumulé. La puissance maximale fournie par l'installation est de l'ordre de 110 kW (hormis un point à 160 kW). A noter que la puissance maximale appelée par la distribution (radiateurs) est de l'ordre de 85 kW (hormis quelques pointes à 130 kW).

On voit nettement les deux allures de fonctionnement, avec un plateau à 110 kW (2 compresseurs) et un plateau à 55 kW (1 seul compresseur). Il est intéressant de noter que les trois quarts de l'énergie produite est couverte par le fonctionnement de la PAC1 avec un seul compresseur, ce qui pose la question de l'opportunité de travailler avec d'autres sources d'énergie complémentaires pour les pointes de consommation. On aurait pu imaginer dimensionner la PAC pour couvrir les besoins de base (équivalent d'un seul compresseur sur les 4 par exemple), avec un accumulateur plus grand permettant d'allonger les cycles de fonctionnement, et un système d'appoint pour faire le complément (<1/4 des besoins annuels grâce à un volume d'accumulation élevé permettant d'amortir les pointes). Ce scénario est traité au paragraphe II.D.4.

La puissance moyenne tirée des sondes géothermiques est de l'ordre de 15 W/m sonde (lorsque la PAC1 fonctionne), avec un maximum autour de 30 W/m sonde. L'énergie tirée de la géothermie est d'environ 25 kWh/m sonde/an. Les bonnes pratiques recommandent plutôt une puissance maximum tirée de la géothermie de 40-50 W/m sonde et une énergie de 80 kWh/m sonde/an¹⁰. Les sondes géothermiques sont surdimensionnées puisque prévues pour le fonctionnement des 2 PAC en même temps alors qu'une seule est utilisée en pratique. En conséquence, les températures observées à la sortie des sondes sont plutôt élevées : la plupart du temps entre 10 et 15°C.

¹⁰ d'après André Freymond, Responsable de l'antenne romande du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur <http://www.fws.ch/>

En conclusion, les PAC sont surdimensionnées d'un facteur 2 (une seule PAC aurait suffi), et logiquement les sondes géothermiques aussi puisqu'elles ont été dimensionnées pour le double de puissance. Cela présente l'avantage de procurer une source froide de très bonne qualité (entre 10 et 15°C toute l'année) mais entraîne par contre des coûts plus élevés. La PAC aurait pu être dimensionnée bien en dessous de la puissance actuelle, en prévoyant une chaudière conventionnelle ou même une simple résistance électrique en appoint. Cette pratique permet notamment d'atténuer le risque de surdimensionnement des PAC et des sondes géothermiques, qui comme on le voit ici est très élevé lorsqu'on travaille sur un bâtiment neuf ou qui a subi une rénovation lourde, si bien qu'il est difficile de connaître a priori ses besoins thermiques avec précision. Un tel surdimensionnement des PAC entraîne d'une part un surcoût important (les PAC sont très intensives en investissement) mais également des cycles courts, préjudiciables pour la durabilité des équipements et les performances.

II.C.2.b Niveaux de température

La Figure 26 illustre les niveaux de température atteints sur l'installation en nov-déc 2011 (moyennes horaires).

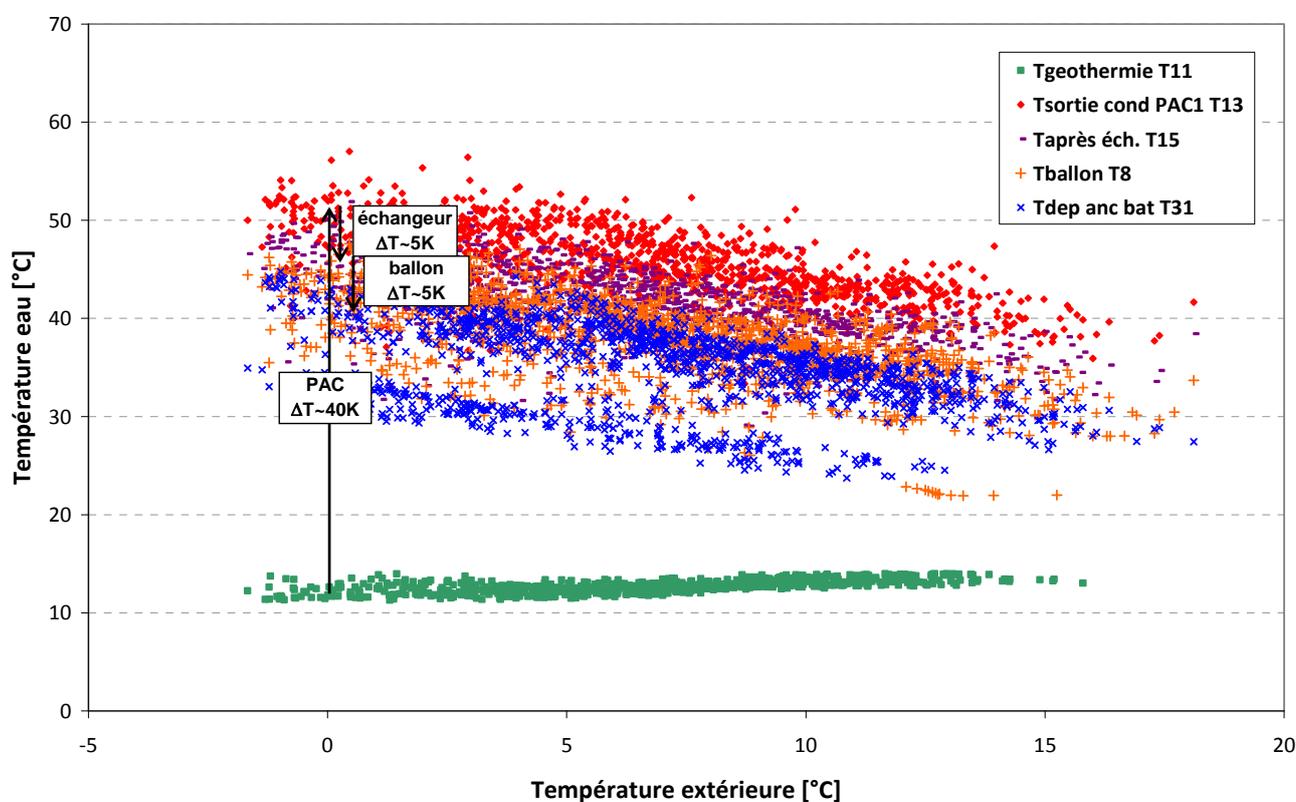


Figure 26 : Niveaux de température atteints lors du fonctionnement de la PAC1 (données nov-déc 11, moyennes horaires)

La température à l'entrée de l'évaporateur de la PAC1 (=sortie sondes géothermiques) est de l'ordre de 12-13°C. La PAC1 relève la température jusqu'à 40 à 55°C (dépendant de la température extérieure), puis la chaleur produite est évacuée vers le ballon d'accumulation, en passant préalablement par l'échangeur du circuit condenseur (cf. schéma de principe en Figure 15), qui induit un ΔT d'environ 5K. La température dans le ballon est encore 5K inférieure à la température à la sortie de l'échangeur. La température de distribution est également représentée, elle est proche de la température à mi-hauteur du ballon. La partie basse de la courbe s'explique par le ralenti de nuit (-10K) programmé sur les courbes de chauffe du ballon d'accumulation et de la distribution.

On enregistre un écart d'environ 10K entre la température à la sortie du condenseur de la PAC1 et la température de distribution, synonyme d'une perte de performances sur la PAC par rapport à une situation où cette dernière produirait plus proche de la température nécessaire. L'échangeur positionné sur le circuit condenseur de la PAC1

(pour la production éventuelle de froid) est très pénalisant pour le fonctionnement de l'installation, car il induit une perte de température de plusieurs degrés, qui nécessite que la PAC produise à plus haute température. Cet échangeur, dont l'objectif était de créer un circuit intermédiaire en eau glycolée sur l'évaporateur de la PAC1 pour le fonctionnement en mode froid, n'était en réalité pas indispensable étant donné le mode de distribution du froid retenu (plafonds froids, loin du froid négatif : en principe la température de l'eau froide est supérieure à 15°C pour éviter la condensation de la vapeur d'eau de l'air à proximité des émetteurs). Il est regrettable que cet échangeur soit installé sur la PAC1, justement celle qui fonctionne la majorité du temps en mode chaud, et impacte donc grandement les performances annuelles de l'installation. Sur notre proposition, Tech Building a étudié la possibilité de favoriser le fonctionnement de la PAC2 en mode chaud (non équipée d'un échangeur supplémentaire), mais cela se révèle difficile car la PAC1 est maître sur la PAC2 et tous les capteurs lui sont reliés.

Remarque : Durant la saison de chauffe 10-11, il n'y avait pas de courbe de chauffe programmée sur le ballon d'accumulation (la température de consigne dans le ballon était fixe), si bien que la température de production des PAC était toujours la même (>50°C) même si la température de distribution était bien plus basse (30-35°C en mi-saison). Ce défaut de régulation a été corrigé pour la saison de chauffe 11-12 en ajustant la courbe de chauffe du ballon à celles de la distribution, ce qui engendre une température de production variable en fonction des besoins de la distribution (cf. Figure 26).

II.C.2.c Journée typique d'hiver

La Figure 27 illustre le fonctionnement de l'installation au cours d'une journée d'hiver, le 18 février 2012.

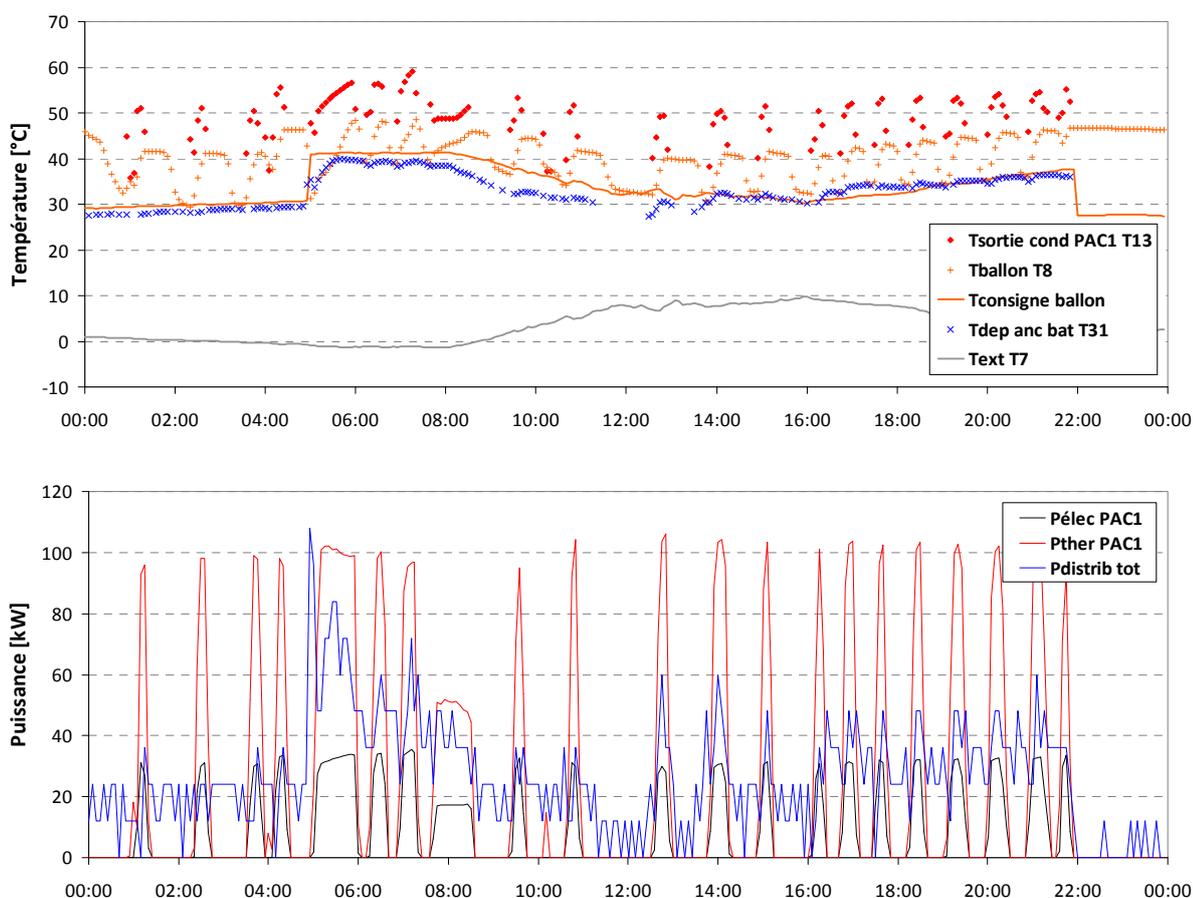


Figure 27 : Niveaux de températures et de puissance atteints au cours de la journée d'hiver du 18 février 2012 (valeur 5 min)

Au cours de cette journée la température est proche de 0°C la nuit et augmente en journée jusqu'à 10°C. On compte un nombre important de cycles de fonctionnement pour la PAC à cause de la petite taille du ballon

d'accumulation. Le temps de fonctionnement est assez court à chaque fois (10 à 20 min). Elle fonctionne essentiellement à plein régime avec les deux compresseurs en marche : notons que d'après la régulation initiale, elle devrait fonctionner d'abord avec un seul compresseur donc sur des durées plus longues. Un paramètre a dû être modifié dans la régulation sans que nous en ayons connaissance car la PAC1 ne s'enclenche quasiment plus à mi puissance depuis l'intervention de Tech Building le 13 février 2012 (même dans les mois plus chauds).

Suite à l'ajustement des courbes de chauffe du ballon et de la distribution, on note que la température de consigne dans le ballon est très proche de la température de distribution. La température réelle à mi-hauteur dans le ballon est en général supérieure à la température de consigne donnée par la courbe de chauffe. Le ralenti de nuit (entre 22h et 5h) sur le ballon et la distribution est bien visible.

II.C.2.d Fonctionnement estival

L'installation a été conçue pour pouvoir produire du froid en été (PAC1 réversible) pour alimenter des plafonds froids dans la surélévation. L'installation reste donc en marche toute l'année. Cependant, la pose des plafonds froids dans les bureaux est à la charge des entreprises locataires, et pendant la durée du suivi aucun d'entre eux n'y a eu recours.

La Figure 28 illustre le fonctionnement de l'installation durant le mois de mai 2012.

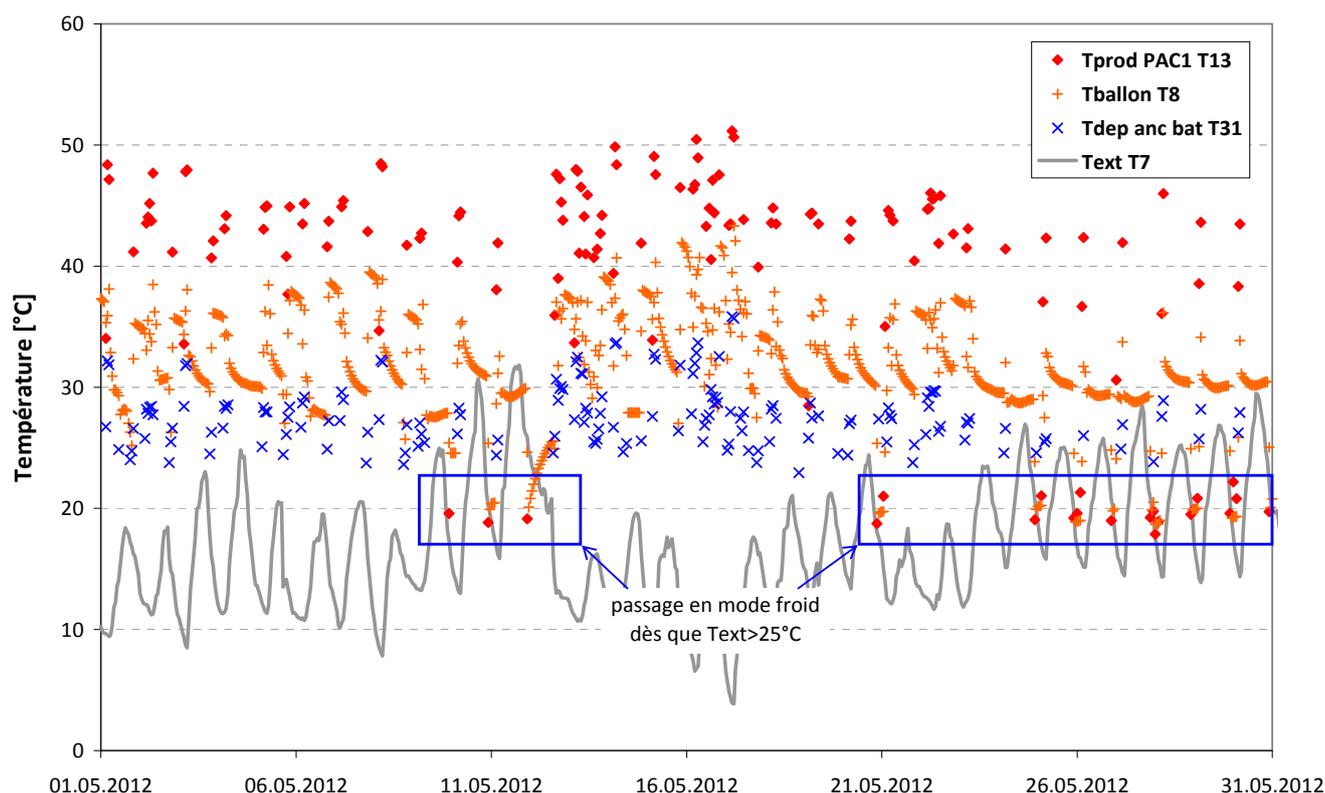


Figure 28 : Fonctionnement de l'installation de chauffage au début de l'été 2012 (données mai 2012, moyennes horaires)

On remarque que malgré les températures clémentes, le chauffage continue à fonctionner durant la nuit lorsque les températures redescendent, ce qui ne semble pas indispensable, l'inertie du bâtiment suffisant à maintenir le bâtiment en température à cette période de l'année. D'autre part, on note que bien qu'il n'y ait pas de demande de froid dans le bâtiment, la PAC1 commence à produire du froid (inutilement) dès que certaines conditions de température sont réunies. Si on n'y prend pas garde, l'installation continue de fonctionner ainsi durant tout l'été, ce qui représente des consommations d'électricité inutiles.

En 2011, les PAC ont été mises à l'arrêt par Tech Building le 7 juillet, mais les consommations électriques des mois de mai et juin ont représenté 2'650 kWh (7% de la consommation annuelle des PAC), qui auraient pu être économisés facilement. En 2012, sur notre demande, les PAC ont été mises à l'arrêt plus tôt le 5 juin 2012, mais la consommation électrique du mois de mai s'est tout de même élevée à 1'000 kWh (3% de la consommation annuelle des PAC). Ainsi, la consommation électrique « parasite » des PAC en été est de l'ordre de 1'000 kWh par mois, ce qui sur 5 mois peut représenter 12 à 15% de la consommation électrique annuelle pour ne fournir aucune prestation.

Afin d'éviter des consommations électriques inutiles, nous recommandons que les PAC soient mises à l'arrêt complet chaque année début mai dès lors que les températures le permettent, et ce tant qu'il n'y a pas de consommation de froid dans le bâtiment. Par la suite, il conviendra de désactiver le mode chaud durant la période estivale pour éviter que le chauffage se mette en marche durant la nuit lorsque les températures diminuent.

II.C.3 Performances

II.C.3.a Coefficient de Performance des PAC

La Figure 29 présente le coefficient de performance instantané de la PAC1 (cf. définition au paragraphe I.A.3.a) en fonction de la différence de température entre la sortie du condenseur et l'entrée de l'évaporateur. Les valeurs sont différenciées selon le nombre de compresseurs en marche (1 ou 2). Les données constructeur (pour 2 compresseurs) sont également représentées.

Remarque : Seules les performances de la PAC1 en mode chaud ont été caractérisées, le fonctionnement en mode froid n'ayant pas pu être étudié faute de demande de froid sur le bâtiment durant la période de suivi.

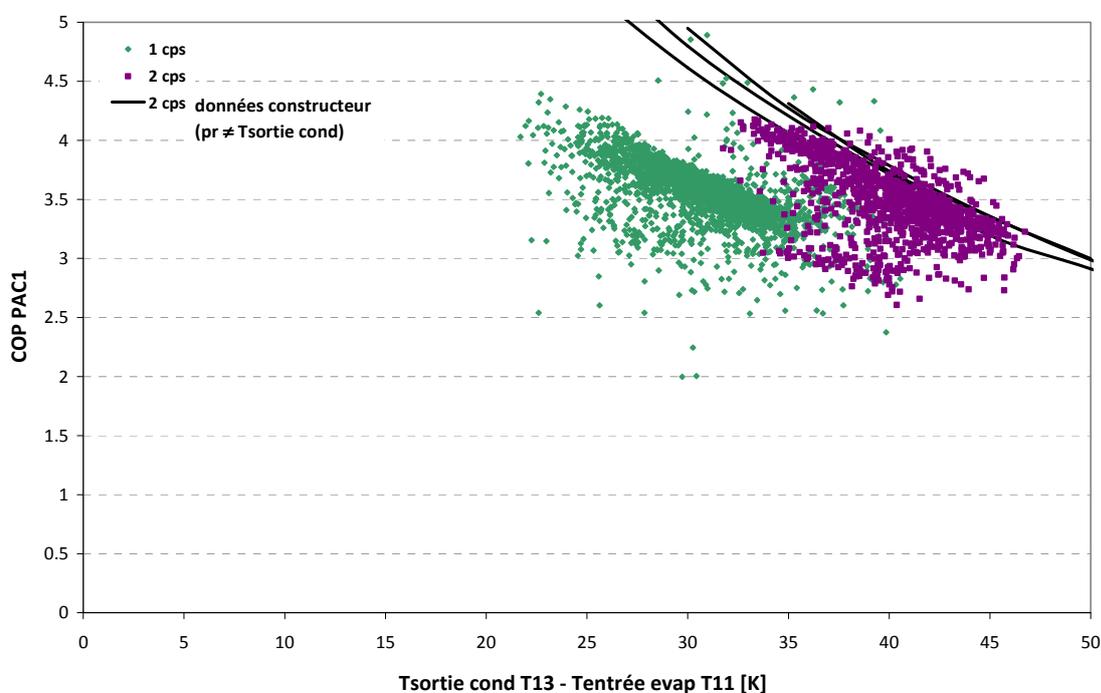


Figure 29 : Coefficient de Performance observé sur la PAC1 en fonction de la différence de température entre la sortie du condenseur et l'entrée de l'évaporateur, différencié selon que 1 ou 2 compresseurs fonctionnent (données nov-déc 11, valeurs 5 min)

Comme on s'y attend, le COP instantané diminue lorsque le ΔT entre source chaude et source froide augmente (pente ~ 0.8 point de COP par 10K de ΔT). Sur les mois de novembre et décembre 2011, le ΔT entre source

chaude et source froide a majoritairement varié entre 25 et 45K. La distinction entre les deux modes de fonctionnement (1 ou 2 compresseurs) est très nette. Les performances sont meilleures pour le fonctionnement à 2 compresseurs (+0.7 point de COP à même ΔT). Le COP avec 1 compresseur varie majoritairement entre 4.2 et 3.4 lorsque le ΔT varie entre 25 et 35K, tandis que le COP avec 2 compresseurs varie entre 4.1 et 3.3 lorsque le ΔT varie entre 35 et 45K.

La dispersion des valeurs est importante car les valeurs par 5 min ont été utilisées ; elle est en grande partie imputable aux phases transitoires (démarrage et arrêt de la PAC). Pour atténuer la dispersion, on utilise habituellement des moyennes horaires pour réaliser ce type de caractérisation, mais dans ce cas la durée typique d'un cycle étant de quelques dizaines de minutes, les valeurs par 5 min étaient plus adéquates.

Les données constructeur (cf. Annexe 1), fournies uniquement pour le fonctionnement à 2 compresseurs, correspondent bien aux valeurs enregistrées sur l'installation, quoique légèrement supérieures. Ce phénomène n'est pas étonnant car les données constructeur sont mesurées dans des conditions opératoires très précises définies par la norme EN14511 et pas en situation réelle d'utilisation. A titre d'exemple, les données constructeur s'appliquent à un circuit en eau glycolée sur le circuit évaporateur (géothermie) et un circuit en eau sur le circuit condenseur, alors que dans notre cas le circuit condenseur est également en eau glycolée (circuit intermédiaire pour la production de froid).

La Figure 30 présente l'efficacité de la PAC1 (cf. définition au paragraphe I.A.3.a) en fonction de la différence de température entre source chaude et source froide.

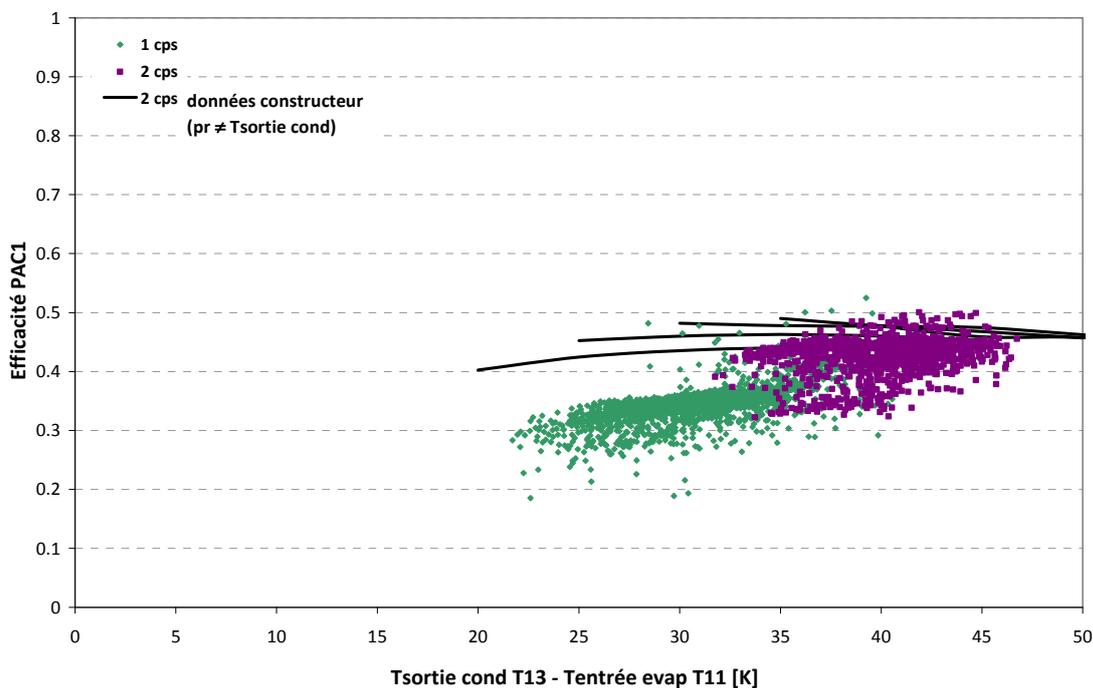


Figure 30 : Efficacité observée de la PAC1 en fonction de la différence de température entre la sortie du condenseur et l'entrée de l'évaporateur, différenciée selon que 1 ou 2 compresseurs fonctionnent (données nov-déc 11, valeurs 5 min)

L'efficacité augmente avec le ΔT (tandis que le COP diminue), elle est plus faible avec un seul compresseur (0.3 à 0.4) qu'avec les deux (0.4 à 0.45). Les données constructeur prévoient une efficacité légèrement plus élevée (>0.45 lors du fonctionnement avec 2 compresseurs entre 35 et 45K de ΔT). Ces valeurs d'efficacité sont typiques pour des PAC disponibles sur le marché en situation réelle.

II.C.3.b Seasonal Performance Factor

i. Consommation des auxiliaires

Les principaux auxiliaires de l'installation sont les suivants :

Tableau 12 : Caractéristiques des principaux auxiliaires de l'installation

	Nombre	Puissance max (kW)	Type	Remarques
Géothermie	2 (1 par circuit PAC)	2'500 W	débit fixe (triphase)	<ul style="list-style-type: none"> en marche lorsque les PAC fonctionnent puissance élevée à cause de la longueur des sondes géothermiques
Aval PAC	3 2 pour la PAC1 (circuit condenseur intermédiaire et circuit échangeur-ballon) 1 pour la PAC2	120 W 80 W	débit variable (mais réglé sur débit maximal)	<ul style="list-style-type: none"> en marche lorsque les PAC fonctionnent puissance faible car canalisations courtes
Distribution	2 circuit ancien bâtiment circuit nouveau bâtiment	560 W 85 W	débit fixe, mais réglable débit variable	en marche lorsque la température extérieure implique une demande thermique dans le bâtiment

La consommation de ces différentes pompes n'était pas mesurable directement. Une évaluation a été réalisée sur la base de la puissance nominale des pompes (ou de leur puissance électrique selon le débit fixé pour les circulateurs de distribution) et de leur temps de fonctionnement. Il s'agit d'une estimation conservatrice.

Le Tableau 13 présente la consommation de ces différentes pompes estimée pour les deux années de suivi :

Tableau 13 : Consommation électrique des auxiliaires estimée pour les années 10-11 et 11-12

	<i>kWh/m²</i>	10-11	11-12
Pompes géothermie		0.936	0.901
	<i>PAC1</i>	0.897	0.891
	<i>PAC2</i>	0.039	0.011
Aval PACs		0.077	0.102
	<i>PAC1</i>	0.074	0.098
	<i>PAC2</i>	0.003	0.004
Distribution		0.348	0.355
	<i>ancien bâtiment</i>	0.268	0.282
	<i>nouveau bâtiment</i>	0.080	0.073
Total		1.361	1.358

La consommation totale des auxiliaires s'élève à environ 1.3 kWh/m²/an (1 kWh/m²/an sans compter les circulateurs de distribution).

ii. PAC1

Dans ce qui suit, les performances annuelles de la PAC1 sont caractérisées via deux indicateurs définis au paragraphe I.A.3.b : le SPF1 (PAC seule) et le SPF2' (PAC+auxiliaires côté source froide+auxiliaires côté source

chaude). Le Tableau 14 détaille la consommation électrique mensuelle de la PAC1 et de ses auxiliaires pour l'année 11-12 :

Tableau 14 : Production de chaleur et consommation électrique mensuelle de la PAC1 au cours de l'année 11-12

<i>kWh/m²</i>	oct.11	nov.11	déc.11	janv.12	févr.12	mars.12	avr.12	mai.12	juin.12	juil.12	août.12	sept.12	11-12	hiver
Production chaleur PAC1													<i>total</i>	<i>total</i>
Total	1.2	3.5	4.6	5.3	6.8	2.8	2.0	0.7	0.03	0.0	0.0	0.0	26.9	26.1
Consommation électrique PAC1													<i>total</i>	<i>total</i>
Total	0.4	1.1	1.5	1.7	2.4	0.9	0.6	0.3	0.02	0.0	0.0	0.0	8.8	8.5
dont PAC1	0.321	0.979	1.312	1.524	2.116	0.768	0.544	0.225	0.016				7.8	7.6
dont pompe primaire géoth.	0.045	0.135	0.160	0.166	0.227	0.074	0.054	0.026	0.003				0.891	0.862
dont pompes secondaires	0.005	0.014	0.018	0.019	0.025	0.008	0.006	0.003	0.0003				0.098	0.095
%auxiliaires	13%	13%	12%	11%	11%	10%	10%	11%	15%				11%	11%
SPF PAC1													<i>total</i>	<i>total</i>
SPF1 (PAC seule)	3.6	3.6	3.5	3.5	3.2	3.6	3.7	3.2	1.7				3.4	3.5
SPF2' (PAC + auxiliaires)	3.1	3.1	3.1	3.1	2.9	3.2	3.3	2.8	1.5				3.1	3.1

10%
1%

Les auxiliaires représentent 11% de la consommation électrique totale de la PAC1, en majorité imputables à la pompe géothermique (10%). Le SPF1 PAC1 est de 3.4 (3.5 sur l'hiver), mais à cause de la consommation des auxiliaires le SPF2' PAC1 chute à 3.1.

iii. Installation

Le Tableau 15 et la Figure 31 présentent les performances de l'installation selon les données issues du suivi.

Tableau 15 : Production de chaleur, consommation électrique et SPF de l'installation pour les années 10-11 et 11-12

<i>kWh/m²</i>	10-11	11-12
Bâtiment		
Demande thermique	27.4	27.0
Conso élec distribution	0.3	0.4
PAC1		
Production chaleur	27.5	26.9
Conso élec PAC	8.9	7.8
Conso élec auxiliaires	1.0	1.0
PAC2		
Production chaleur	1.3	0.3
Conso élec PAC	0.4	0.09
Conso élec auxiliaires	0.04	0.01
SPF		
SPF1 PAC1	3.1	3.4
SPF1 PAC2	3.3	3.3
SPF4	2.6	2.9

Le SPF1 PAC1 est passé de 3.1 en 10-11 à 3.4 en 11-12. Il en résulte que le SPF4 de l'installation est passé de 2.6 à 2.9. NB : les performances de la PAC2 ne sont pas significatives car les quantités de chaleur produites sont négligeables.

L'amélioration des performances de la PAC1 est le résultat des optimisations réalisées sur l'installation, notamment la baisse de la courbe de chauffe sur le ballon à compter du 14.11.2011 et le ralenti de nuit à compter du 13.02.2012 (cf. paragraphe II.C.1.a). Ce résultat demande à être confirmé durant les années suivantes, mais a priori les possibilités d'optimisation supplémentaires sont restreintes (cf. paragraphe II.C.4.b).

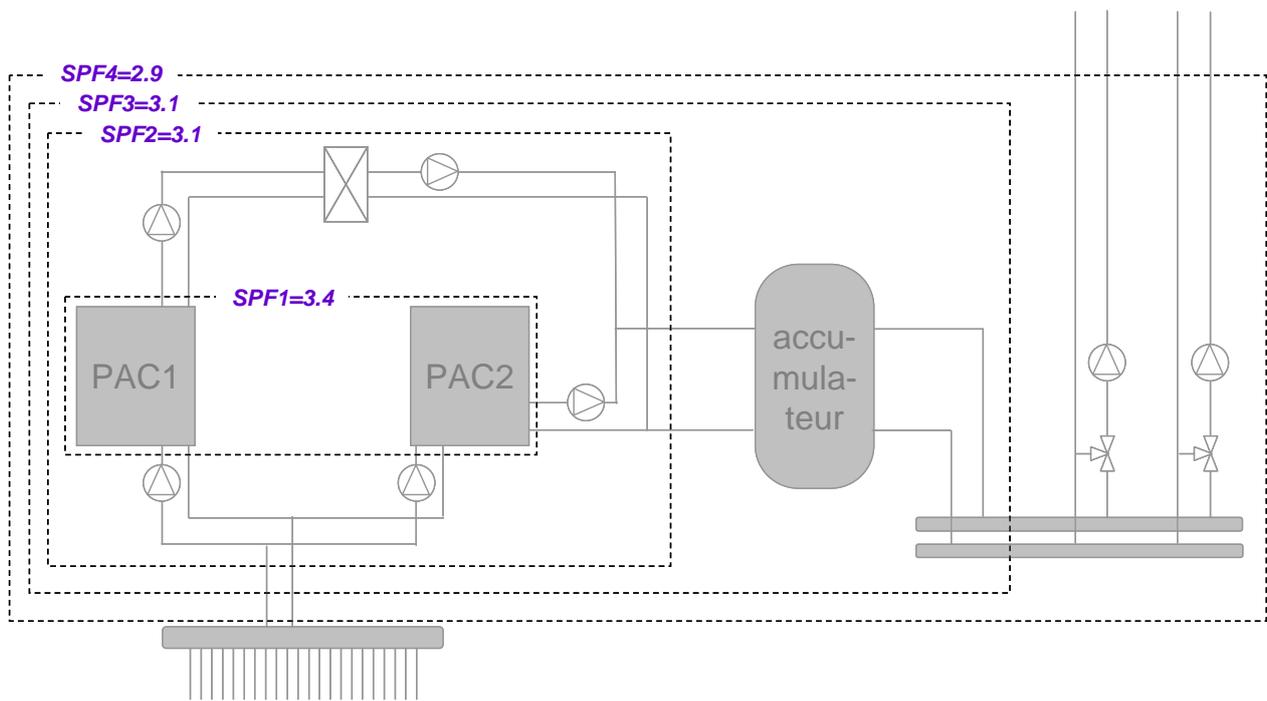


Figure 31 : Performances techniques de l'installation selon les frontières de calcul retenues (année 11-12)

On note sur la Figure 31 l'influence de la consommation des différents auxiliaires sur le SPF de l'installation (année 11-12). Les auxiliaires les plus consommateurs sont les pompes du circuit géothermique (qui font passer d'un SPF1 de 3.4 à un SPF2 de 3.1) à cause de la longueur de tuyaux. Les pompes côté secondaire ne font pas chuter significativement le SPF3 car leur consommation électrique est minimale (la longueur des tuyaux est faible). Une fois prise en compte la consommation électrique des auxiliaires de distribution, le SPF4 de l'installation tombe à 2.9.

De telles performances semblent faibles compte tenu de la qualité de la source froide à disposition (température comprise entre 10 et 15°C toute l'année) et du fait que la prestation à fournir se limite à du chauffage (bâtiment tertiaire=pas d'ECS, donc températures nécessaires plus faibles par rapport à du résidentiel).

Le Tableau 16 récapitule les différents SPF observés à Polimmo en 11-12 ainsi que des valeurs observées dans la littérature :

Tableau 16 : SPF observés à Polimmo en 11-12 et sur d'autres installations (valeurs issues de la littérature)

	Polimmo 11-12	littérature sans solaire	littérature avec solaire	références
SPF1	3.4	4.2	3.7 à 4.2	[Pahud et al.; 2004, Loose et al.; 2011, Miara et al.; 2011]
SPF2	3.1			
SPF2'	3.1	2.5 à 5	3.7 à 3.8	[Erb et al.; 2004, Pahud et al.; 2004]
SPF3	3.1			
SPF4'	3.0	3.1 à 5.2	4.9 à 6	[Miara et al.; 2011] [Loose et al.; 2011, Miara et al.; 2011]
SPF4	2.9	3.8	4.2 à 6.1	[Miara et al.; 2011] [Wang et al.; 2010, Bertram et al.; 2012]

De manière générale, les SPF observés à Polimmo sont en dessous de la fourchette des valeurs rapportées dans la littérature pour des systèmes similaires mais mis œuvre dans des villas individuelles. A noter que selon les cas, la prestation fournie est soit du chauffage et de l'ECS, soit du chauffage seul. Les performances des installations profitant d'un couplage avec des capteurs solaires permettant de la recharge estivale sont encore meilleures.

Les raisons de cet écart avec les performances habituelles sont à rechercher dans les niveaux de température dans l'installation (comme évoqué au paragraphe II.C.2.b), puisque la PAC produit de la chaleur à 10-15K de plus que ce que la distribution demande. Les possibilités et limites d'optimisation de ces niveaux de température sont détaillées au paragraphe II.C.4.b.

iv. Impact d'un fonctionnement ininterrompu de l'installation en été

Comme évoqué au paragraphe II.C.2.d, si l'installation n'est pas arrêtée durant la période estivale (mai-septembre), la PAC se met régulièrement en marche lors des périodes fraîches ou au contraire durant les périodes chaudes pour la production de froid (alors qu'il n'y a à ce jour pas de demande de froid dans le bâtiment). Ces consommations « parasites » représenteraient environ 1'000 kWh par mois soient 5'000 kWh sur les 5 mois d'été (12 à 15% de la consommation électrique annuelle). En considérant un tel fonctionnement sur tout l'été, le SPF de l'installation baisserait de 3 à 2.6 (si on considère que la chaleur produite durant la période estivale n'est pas une prestation utile), d'où l'intérêt de veiller à éviter un fonctionnement inutile de l'installation en été.

v. Conclusion

L'installation fonctionne globalement correctement, dans le sens où elle fournit la prestation demandée (i.e. la température intérieure du bâtiment est maintenue durant l'hiver) sans pannes majeures. Les performances observées (SPF de 3) semblent par contre faibles compte tenu de la qualité de la source froide d'une part (entre 10 et 15°C toute l'année) et du fait que la prestation se limite à du chauffage (pas d'ECS), donc à température plus basse. Cette valeur est par ailleurs faible par rapport à celles observées dans la littérature (plutôt de l'ordre de 4), mais pour des applications individuelles. A noter que la consommation électrique de l'installation de chauffage (hors ventilation), inférieure à 10 kWh/m²/an, reste faible grâce à l'excellente qualité de la nouvelle enveloppe thermique.

II.C.4 Recommandations

II.C.4.a Interventions Tech Building

Durant la période de suivi, l'installation de chauffage à Polimmo a fonctionné correctement avec seulement quelques pannes rapidement prises en charge par l'entreprise de maintenance Tech Building. La liste de leurs principales interventions durant la période de suivi pour faire face à des pannes ou dans un objectif d'optimisation est disponible en Annexe 4. Nous tenons encore une fois à les remercier pour leur pleine collaboration au cours du suivi, en particulier lors des essais d'optimisations réalisés selon les propositions de l'Unige. A l'issue du suivi, le potentiel d'optimisation supplémentaire est faible mais certains problèmes de fonctionnement persistent et devront être résolus, entre autres :

- Sur notre recommandation, un réglage a été effectué le 14.11.2011 (cf. paragraphe II.C.1.a) pour ajuster la courbe de chauffe du ballon sur la courbe de chauffe de la distribution (elle était auparavant réglée 5K plus haut par sécurité). Il a eu pour conséquence de diminuer les températures de production de la PAC (et donc d'améliorer ses performances) mais aussi d'augmenter le cyclage (~20 cycles/jr) car le ballon présente moins d'inertie. Ce phénomène pourrait à terme affecter la durabilité de la PAC, et il serait peut être préférable que les réglages initiaux soient remis en place, même au détriment des performances.

- La PAC2 ne s'enclenche plus depuis les réglages du 14.11.2011 alors que les heures de fonctionnement des deux PAC devraient être équilibrées pour préserver la durabilité de l'installation ;
- La PAC1 s'enclenche presque toujours à pleine puissance depuis les réglages du 13.02.2012, alors que lorsque les besoins thermiques sont faibles, un seul compresseur suffirait. Il est difficile d'évaluer clairement l'impact de ce phénomène sur les performances, mais il est clair que les températures de production sont plus élevées avec deux compresseurs qu'avec un seul.
- La PAC est prévue pour rester en état de marche toute l'année pour permettre un enclenchement en mode froid en période estivale. Durant les deux années de suivi, il a été mis en évidence des mises en marche intempestives en mode chaud et en mode froid en été lorsque les conditions de température sont réunies. Les consommations électriques associées peuvent dépasser 10% de la consommation électrique annuelle de la PAC (cf. paragraphe II.C.3.b). Le chauffage étant inutile en été (même durant les nuits fraîches) et sachant qu'il n'y a à ce jour pas de demande de froid dans le bâtiment, il est important de neutraliser ces enclenchements inutiles, soit en arrêtant complètement les PAC dès le mois de mai tant qu'il n'y a pas de demande de froid sur l'installation, soit en bloquant le mode chaud en période estivale.
- Dans une démarche d'optimisation, nous nous sommes rapprochés du fournisseur des PAC en mars 2012 pour identifier avec eux le potentiel d'optimisation de l'installation de Polimmo. Cependant, ils n'ont pas proposé de nouveaux réglages par rapport à ceux qui avaient déjà été mis en place lors du suivi.

Une partie de ces recommandations a déjà été mise en œuvre au cours de l'année 2013. Nous recommandons par ailleurs de continuer une exploitation suivie par l'entreprise Tech Building pour maintenir la fiabilité, les performances et la durabilité de l'installation.

II.C.4.b Limites dans les possibilités d'optimisation

Le suivi énergétique a été l'occasion d'optimiser le fonctionnement de l'installation. A notre sens, l'optimisation des performances de l'installation est limitée par la température de production trop élevée des PAC par rapport la température nécessaire pour satisfaire à la demande de la distribution. La température de production élevée des PAC est elle-même liée à la température élevée d'entrée dans le condenseur (le ΔT au condenseur étant constant, cf. paragraphe II.C.1.c). Plusieurs facteurs influencent cette température :

- des températures de retour de la distribution trop élevées, à cause d'un ΔT faible sur la distribution (débits élevés, cf. paragraphe II.B.4) ;
- la présence d'un échangeur sur le circuit intermédiaire de la PAC1, qui induit un ΔT de plusieurs degrés ;
- l'architecture du système : afin d'assurer le découplage hydraulique des circuits PAC et de distribution, le fluide caloporteur passe obligatoirement par l'accumulateur à l'aller comme au retour, ce qui induit un mélange au sein du ballon (l'eau de retour de la distribution se réchauffe par mélange avec l'eau du ballon avant de revenir à la PAC) ; d'autre part, la configuration hydraulique ne permet pas de réguler la température de production de la PAC.

La Figure 32 présente une photo des niveaux de température dans le système pour deux situations : 1 compresseur enclenché (24.01.2012 à 14h30) et 2 compresseurs enclenchés (13.01.2012 à 14h30).

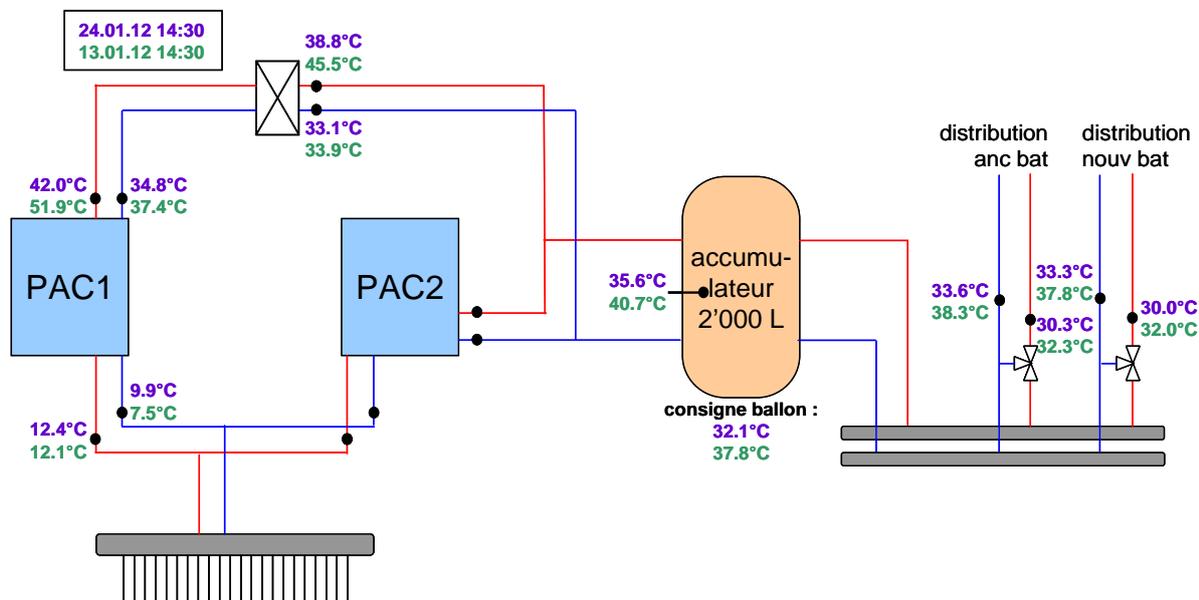


Figure 32 : Image des niveaux de température atteints en différents points du système à deux instants choisis : 24.01.2012 à 14h30, 1 compresseur enclenché (en violet) et 13.01.2012 à 14h30, 2 compresseurs enclenchés (en vert) (valeurs 5 min)

On note que dans les deux cas, de nombreux ΔT sont induits au cours du fonctionnement de l'installation. Le Tableau 17 les récapitule pour les deux instants choisis :

Tableau 17 : Ecarts de température induits en différents points du système à deux instants choisis (24.01.2012 à 14h30, 1 compresseur enclenché et 13.01.2012 à 14h30, 2 compresseurs enclenchés, valeurs 5 min)

	24.01.2012 14:30	13.01.2012 14:30
	1 cps	2 cps
ΔT production-distribution	8.4 K	13.6 K
ΔT échangeur intermédiaire	4.9 K	9.9 K
<i>aller</i>	3.2 K	6.4 K
<i>retour</i>	1.7 K	3.5 K
ΔT ballon-consigne ballon	3.5 K	2.9 K
ΔT mélange ballon	6.0 K	6.4 K
<i>aller</i>	3.2 K	4.8 K
<i>retour</i>	2.8 K	1.6 K
ΔT distribution	3.3 K	6.0 K
ΔT condenseur PAC1	7.2 K	14.5 K

Dans les deux cas, on note que la température de production de la PAC est supérieure à la température demandée par la distribution (+8.4K et +13.6K). Plusieurs facteurs conduisent à ce résultat :

- l'échangeur intermédiaire induit un ΔT de plusieurs degrés à l'aller comme au retour, ce qui implique que : (i) la chaleur doit être produite plus haut en température pour arriver à la température voulue dans le ballon (ii) le fluide caloporteur revient plus chaud au condenseur (donc en ressort plus chaud également) ; la présence de cet échangeur est donc doublement pénalisante ;
- le ballon est à une température légèrement supérieure (~3K) à la température de consigne préconisée par la courbe de chauffe (NB : peut difficilement être évité étant donné le mode de recharge du ballon) ;
- le ΔT sur la distribution est faible (3.3 et 6K) ;
- un mélange se produit dans le ballon : à l'aller, le ballon ne monte pas jusqu'à la température de l'eau à l'entrée ; au retour : l'eau ressort du ballon à une température plus élevée que le retour de la distribution ;

- le ΔT au condenseur est fixe (7-8K avec 1 compresseur, 14-15K avec 2 compresseurs, cf. paragraphe II.C.1.c), donc la température à la sortie du condenseur ne dépend que de la température à l'entrée du condenseur, sans lien avec la température de consigne dans le ballon.

Sur l'installation de Polimmo, pour limiter la température de production de la PAC il faudrait limiter la température d'entrée dans l'évaporateur, or la seule façon d'agir sur celle-ci est de diminuer la température de retour de la distribution. Aujourd'hui, les ΔT sur la distribution sont faibles (<5K en moyenne journalière) car les débits sont trop élevés, donc les retours de distribution sont trop chauds. Cependant, les essais pour diminuer significativement les débits sur les circuits de distribution ont entraîné une sensation de radiateurs froids chez certains usagers, probablement liée à un problème d'équilibrage hydraulique (à notre connaissance aucun équilibrage hydraulique n'a été réalisé au cours des travaux, que ce soit sur l'ancien ou le nouveau bâtiment).

Un équilibrage hydraulique devrait donc être réalisé si on souhaite diminuer plus les débits de distribution. En plus d'atteindre des températures de retour plus basses, cela permettrait de diminuer la consommation électrique associée (rappel : la consommation électrique d'une pompe de circulation diminue comme le cube de son débit). L'OCEN octroie des subventions pour ce type d'opération (2 CHF/m² SRE dans le cadre du ChèqueBâtimentEnergie¹¹).

Cependant, il n'est pas certain qu'une diminution des températures de retour de la distribution (obtenue par une diminution des débits de distribution) aboutisse à des températures de production plus basses. En effet, le débit sur l'échangeur intermédiaire (~8 m³/h) est supérieur au débit sur les circuits de distribution (maximum 6 m³/h s'il n'y a pas de recirculation au niveau des vannes 3 voies), si bien qu'un mélange / une recirculation dans le ballon est inévitable pour rétablir l'équilibre des débits (on observe ce phénomène sur la Figure 32 en comparant les températures retour distribution et entrée échangeur intermédiaire). En diminuant les débits de distribution, on accentuerait ce phénomène en creusant le déficit de débit côté condenseur et donc en augmentant le court circuit avec de l'eau chaude du ballon. Ce problème d'équilibre des débits n'aurait pu être traité qu'au moment de la conception, en choisissant une machine fonctionnant avec des débits sur le circuit condenseur compatibles avec les débits de distribution du bâtiment.

Selon notre opinion, il sera difficile d'améliorer encore significativement les performances de la PAC à Polimmo dans la configuration hydraulique actuelle. Une possibilité impliquant une modification hydraulique serait de supprimer l'échangeur sur le circuit condenseur de la PAC1, le circuit intermédiaire en eau glycolée ne semblant pas indispensable compte tenu des températures modérées auxquelles la production de froid se fera à l'avenir (pour des plafonds froids, la température de l'eau froide est en principe supérieure à 15°C). A partir des exemples présentés en Figure 32 et des performances de la PAC en fonction des niveaux de température (cf. Figure 29), on pourrait estimer que le gain sur le SPF1 serait de l'ordre de 0.2 à 0.3.

¹¹http://ge.ch/energie/media/energie/files/fichiers/documents/cbe_synthesecriteres_15032014_v2.pdf, consulté en juin 2014

II.D Analyse de sensibilité sur le dimensionnement du système

Dans ce chapitre, nous allons mener une étude de sensibilité concernant le dimensionnement du champ de sondes et de la pompe à chaleur. Partant du constat que le système actuel est surdimensionné, l'objectif est de voir en quoi un dimensionnement réduit influencerait sa performance énergétique. NB : ces travaux s'appuient en partie sur ceux de Yann Oberson [Oberson; 2011], qui a accepté qu'on s'inspire d'une partie de son travail de master dans ce chapitre.

II.D.1 Simulation numérique

L'étude de sensibilité sera menée avec le logiciel Pilesim [Pahud; 2007], un programme de simulation dynamique en pas de temps horaire pour l'évaluation des performances techniques d'un système de chauffage/refroidissement utilisant des sondes géothermiques. Le modèle comprend un algorithme de calcul détaillé des phénomènes de transferts de chaleur dans le sous-sol, incluant les phénomènes thermiques locaux (interférence entre les sondes) et les phénomènes globaux (régénération du sol par contact avec le terrain environnant et la météo en surface). Les effets à long terme sont simulés sur une période pouvant aller jusqu'à 25 ans. L'efficacité thermodynamique de la pompe à chaleur est considérée comme constante et définie à partir d'un point de fonctionnement choisi. La performance instantanée de la PAC est adaptée aux températures de fonctionnement instantanées par le biais de l'efficacité thermodynamique.

Pour la simulation de la PAC et du champ de sondes de Polimmo, les principales hypothèses retenues sont les suivantes :

- Par mesure de simplicité, nous nous limitons ici à la simulation d'une seule PAC (correspondant à la PAC1 de Polimmo qui, pour rappel, couvre 99% de la demande thermique du bâtiment).
- La pompe à chaleur est caractérisée par le point de fonctionnement suivant : (i) un COP de 2.9 pour une température de pompage (à l'entrée de l'évaporateur) de 10°C et une température de production (à la sortie du condenseur) de 55°C ; (ii) associée à ce régime de température, une puissance thermique de 104 kW (pour une puissance électrique de 36 kW, comprenant la pompe de circulation côté sondes géothermiques) ; (iii) au niveau du condenseur, un différentiel de température input/output de 11K, au niveau de l'évaporateur un différentiel de 5K.
- Le fonctionnement à d'autres régimes de température est déterminé par une efficacité thermodynamique constante (39.8%, selon le point de fonctionnement retenu). Ainsi, au régime normalisé 0°C/35°C, la PAC fonctionne avec un COP de 3.5.
- Le champ de sondes est composé de 11 sondes en U de 244 m (avec un espacement de 10 m et une disposition en quinconce, ce qui permet de reproduire l'espacement effectif de 7 m et la disposition linéaire existants à Polimmo¹²).
- Conformément à la coupe géologique obtenue auprès de HydroGeo Conseils et des coefficients thermiques associés (cf. Annexe 5), le sol est caractérisé : (i) sur les 10 premiers mètres par une conductivité de 2.3 W/m et une capacité de 2.4 MJ/K/m³ ; (ii) par la suite, par une conductivité de 2.5 W/m et une capacité de 2.1 MJ/K/m³. On considère par ailleurs un gradient géothermique de 3K par 100 m, et les éventuels mouvements d'eau ne sont pas pris en compte (vitesse de Darcy nulle).

¹² Selon recommandation de D. Pahud, concepteur de Pilesim

- La demande de chaleur annuelle totalise 99 MWh. Elle est caractérisée, heure par heure, en termes de puissance thermique et de température à la sortie du condenseur. Ces valeurs sont celles qui ont été mesurées au niveau de la PAC1.

Le détail des paramètres de simulation se trouve en Annexe 6. Il s'agit là des paramètres du cas de base (correspondant au système réalisé à Polimmo). Les variations effectuées lors de l'étude de sensibilité (nombre/longueur des sondes, puissance de la PAC, température de production) sont indiquées dans le texte.

II.D.2 Validation

Afin de valider la modélisation du système dans son ensemble, on compare sur la Figure 33, en dynamique mensuelle, les mesures du suivi énergétique avec les résultats de simulation, pour la 3^{ème} année de fonctionnement consécutif (correspondant à notre année de mesure 11-12). Au niveau de la simulation, on observe que la chaleur géothermique extraite du sol correspond bien à la valeur mesurée au niveau de l'évaporateur. Par déduction, afin de couvrir la demande de chaleur au niveau du condenseur, la demande d'électricité (incluant la consommation électrique de la pompe géothermique de la PAC1) correspond également bien à la valeur mesurée. Il en résulte un SPF2 de 3.0, contre une valeur mesurée de 3.1 (cf. paragraphe II.C.3.b).

On observe par ailleurs une très bonne corrélation simulation/mesure en ce qui concerne la puissance horaire maximale extraite de la géothermie, dont le maximum annuel se situe aux alentours de 60 kW (soient 22 W/m de sonde). Il en va de même pour la température horaire minimale d'injection dans le sol (output de l'évaporateur), dont le minimum annuel se situe aux alentours de 6°C (correspondant à 11°C à l'entrée dans l'évaporateur).

L'extension de la simulation sur une période de 25 ans permet par ailleurs de visualiser l'effet d'épuisement/stabilisation de la ressource géothermique (cf. Figure 34). Ainsi, le minimum de température dans le sol (lors du maximum de demande, en février) passe d'environ 6°C lors de l'année 3 à environ 4°C lors de l'année 25, avec une stabilisation au bout d'environ 10 ans. La puissance d'extraction n'en est cependant guère affectée.

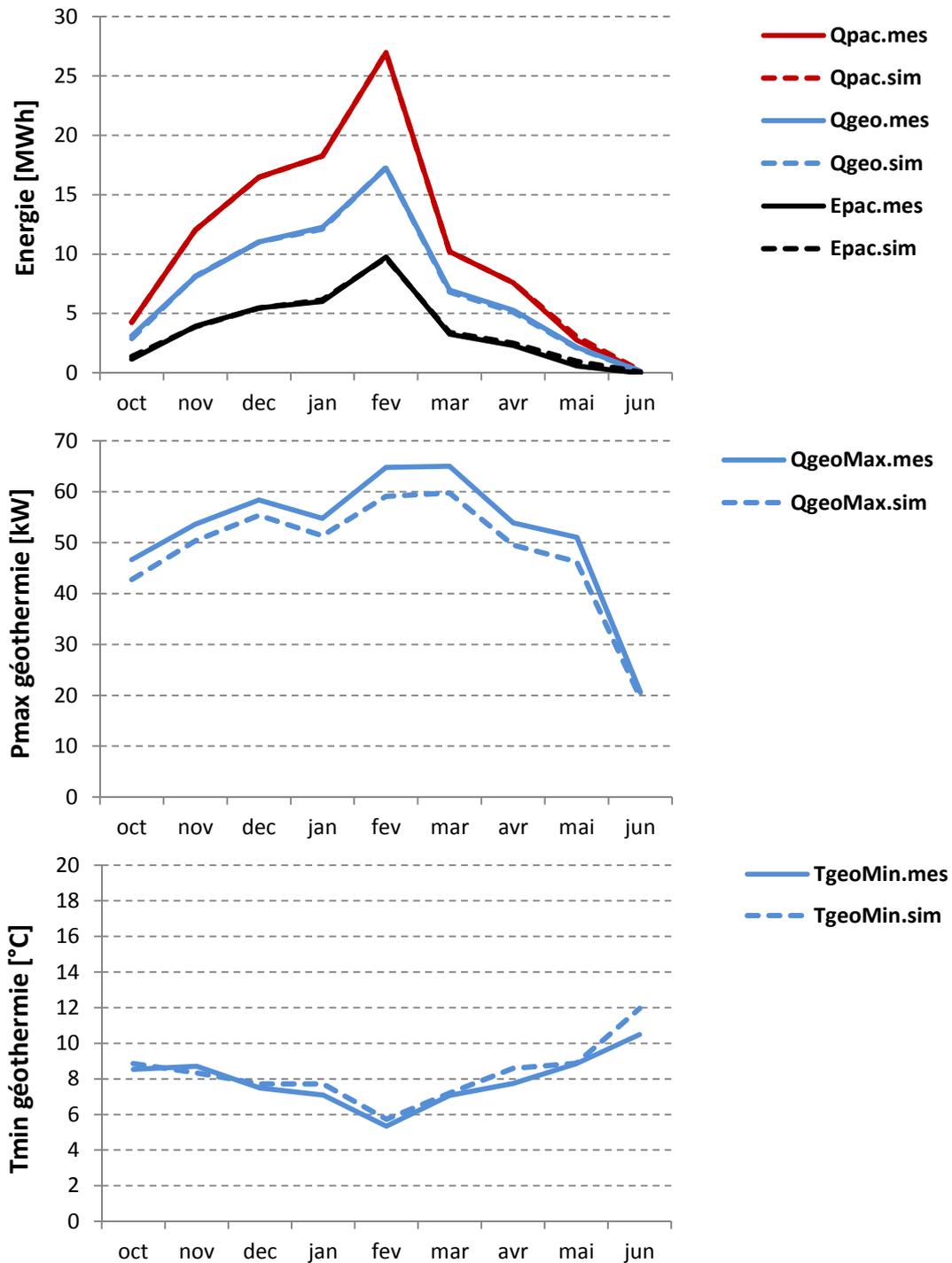


Figure 33 : Dynamique mensuelle du système, mesure et simulation, 3^{ème} année de fonctionnement (Qpac : production thermique PAC ; Qgeo : énergie extraite du sous-sol ; Epac : électricité PAC ; QgeoMax : puissance géothermique horaire maximale ; TgeoMin : température horaire minimale d'injection dans le sol)

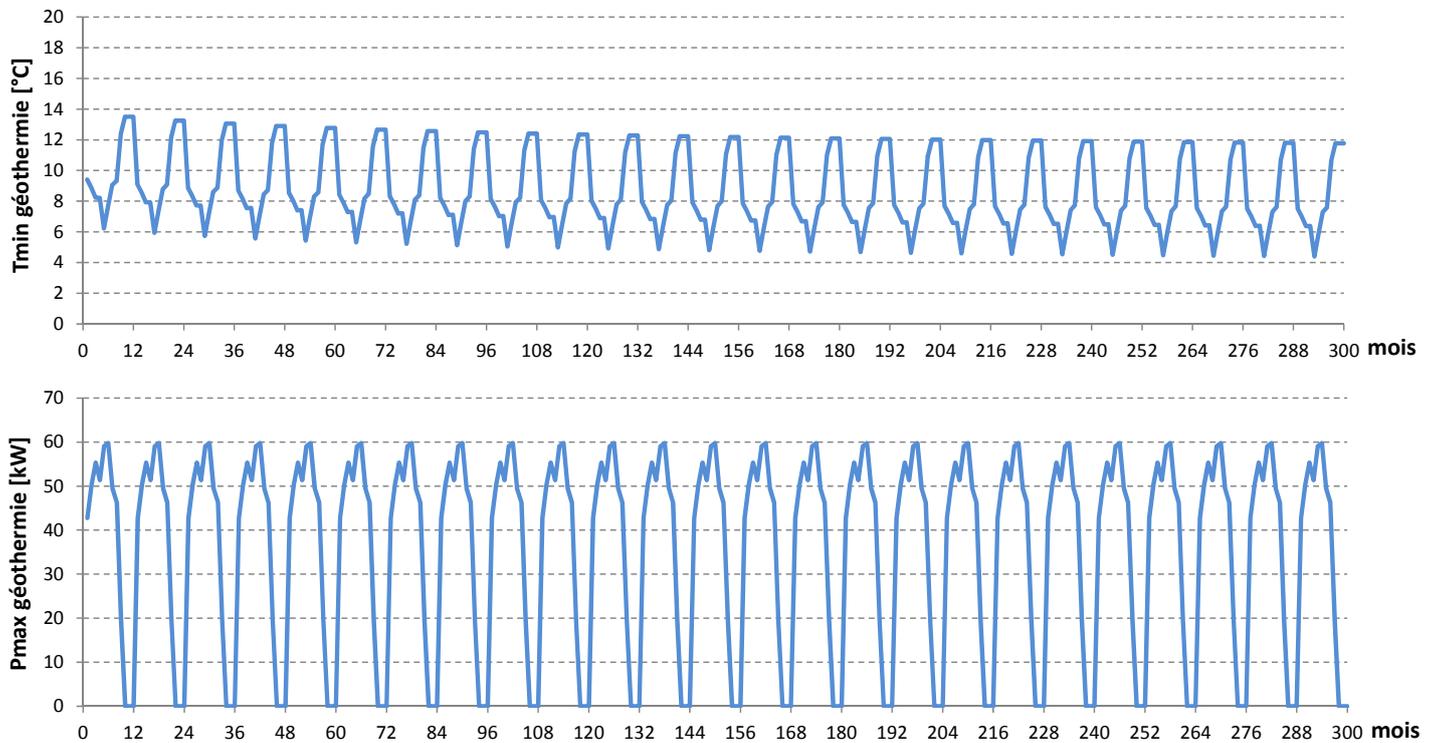


Figure 34 : Dynamique mensuelle sur 25 ans : Température horaire minimale d'injection dans le sol (haut) ; Puissance géothermique horaire maximale (bas)

II.D.3 Sensibilité au dimensionnement du champ de sondes

Une première étude de sensibilité concerne le dimensionnement du champ de sondes qui, étant donné le niveau élevé des températures au niveau de la géothermie, est manifestement surdimensionné par rapport à la demande de chaleur en jeu. Nous allons donc étudier l'effet d'une réduction de la taille du champ de sondes, selon l'une ou l'autre des deux façons suivantes : (i) réduction du nombre de sondes (en maintenant leur longueur individuelle à 244 m) ; (ii) réduction de la longueur des sondes (en maintenant leur nombre à 11). Pour l'une et l'autre de ces façons de procéder, on observe ci-dessous l'effet de la réduction sur les performances du système.

Dans le cas d'une réduction du nombre de sondes (cf. Figure 35) on observe que la température horaire minimale d'injection dans le sol chute, au bout de 25 ans, de 4°C pour 11 sondes à 0°C pour 6 sondes (en deçà de quoi la baisse de température pourrait causer le gel du sol et poser des problèmes de génie civil). Avec ce dimensionnement (de moitié par rapport au cas de base), la puissance d'extraction maximale se maintient aux alentours de 60 kW (soient 41 W/m de sonde). Etant donnée la température de production de l'ordre de 50°C (cf. paragraphe II.C.1.c), une diminution de la température minimale extraite des sondes de 4K ne va pas influencer grandement les performances de la PAC (augmentation du différentiel de température entre sortie condenseur et entrée évaporateur inférieure à 10%). On n'observe d'ailleurs pas d'influence significative sur le SPF2, qui se maintient à 3.

On observe des résultats similaires dans le cas de la réduction de la longueur des sondes (cf. Figure 36). La température minimale de 0°C est cependant déjà atteinte avec une réduction à 70% du cas de base (11 sondes de 170 m). En effet, par rapport à la réduction du nombre de sondes (jusqu'à 50% du cas de base), en réduisant la longueur des sondes on perd à la fois : (i) sur l'augmentation de la température du sous-sol avec la profondeur ; (ii) sur l'augmentation de la recharge latérale avec la diminution du nombre de sondes. Les performances de la PAC ne sont pas affectées par un redimensionnement à 70% de la longueur des sondes : le SPF2 reste à 3.

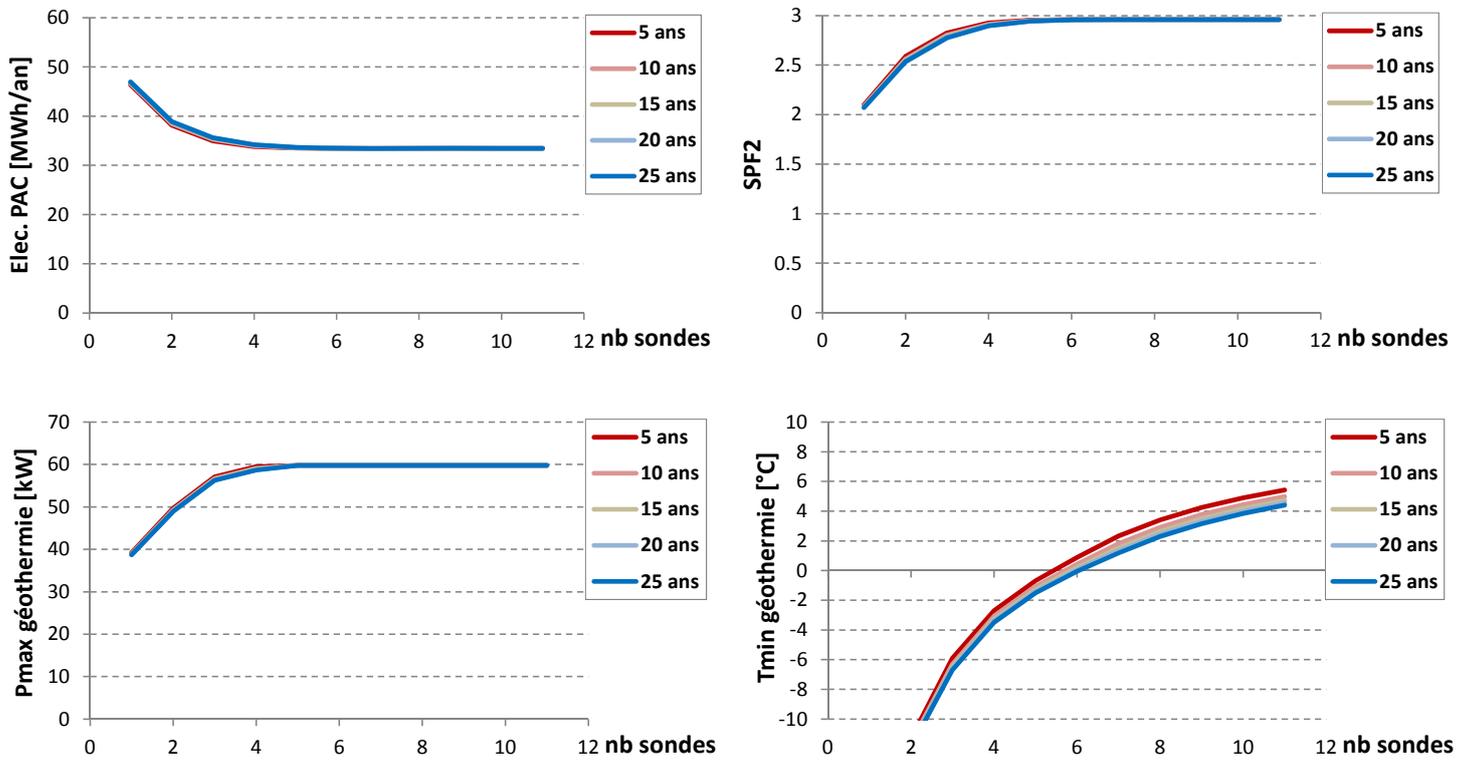


Figure 35 : Sensibilité au nombre de sondes (longueur 244 m)

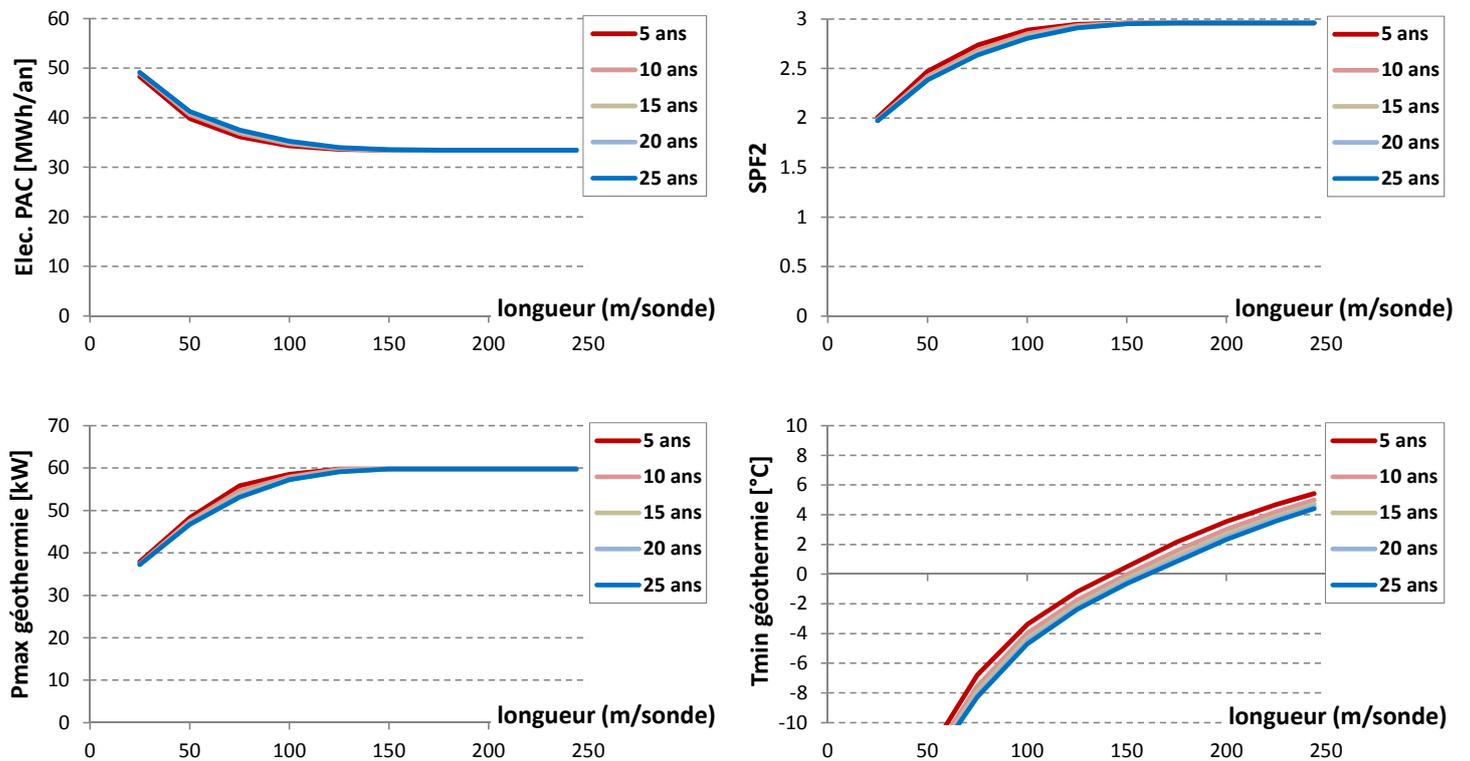


Figure 36 : Sensibilité à la longueur des sondes (11 sondes)

II.D.4 Sensibilité au dimensionnement de la PAC

En complément à la réduction du champ de sondes, nous étudions ici l'effet d'une réduction de moitié de la puissance de la PAC (puissance thermique nominale de 52 kW aux températures de fonctionnement 10°C/55°C). Conformément à l'analyse d'optimisation ci-dessus (6 sondes de 244 m pour une puissance de 104 kW), on réduit par ailleurs à 3 le nombre de sondes. Lors des périodes de pointe, le déficit de puissance est couvert par une résistance électrique. On limite de plus le fonctionnement du système à une température de sortie de l'évaporateur (=injection dans le sol) supérieure à 0°C pour éviter les effets de gel. En dessous de cette limite la PAC est arrêtée, et le défaut de production est fourni par la résistance électrique.

Il résulte de ce dimensionnement une couverture via la PAC de 90% (89 MWh) de la demande, avec un SPF2 de 2.9. En tenant compte de la résistance, la consommation électrique annuelle s'élève à 40 MWh (contre 33 MWh dans le cas de base), soit un SPF3 de 2.5 (y compris résistance électrique et pompe géothermique de la PAC1) contre 3.0 dans le cas de base. Dans ce cas, les performances diminuent légèrement avec le temps suite à l'épuisement du sol : au bout de 25 ans, le taux de couverture de la PAC n'est plus que de 87% (87 MWh) et pour compléter, la consommation électrique annuelle augmente à 42 MWh avec un SPF3 de 2.4.

Les performances techniques de l'installation peuvent être discutables dans cette configuration, mais la consommation électrique annuelle du système reste faible, de l'ordre de 11 kWh/m²/an. Cependant, pour améliorer la performance globale du système, on pourrait envisager un autre système d'appoint (gaz ou mazout) qu'une résistance électrique directe.

II.D.5 Sensibilité à la température de production

Une dernière partie de cette étude concerne la température de production de la pompe à chaleur, qui dans le cas de base se situe une dizaine de degrés au dessus du niveau de température requis par la distribution de chauffage (cf. paragraphe II.C.2.b). En alternative, nous simulons ici le même système de production (PAC de 104 kW, champ de 11 sondes de 244 m) pour une production calée directement sur la distribution de chauffage (puissance thermique et température), avec au niveau de l'évaporateur le même différentiel aller-retour de 5K que dans le cas de base (c'est-à-dire le même débit). Il en résulte une nette amélioration du SPF2 qui, pour la même demande de chaleur globale, passe de 3.0 à 3.5.

Il est à noter qu'il s'agit ici d'une optimisation maximale (théorique) du couplage thermique entre la PAC et la demande de chaleur. En effet même pour un système optimisé, dans la réalité un découplage hydraulique entre les deux systèmes est toujours nécessaire, étant donné : (i) les débits différenciés de la pompe à chaleur et de la distribution de chauffage ; (ii) la non adéquation, en particulier hors pointe, de la puissance de production de la PAC et de la demande du bâtiment, nécessitant un dispositif de stockage. Or ce découplage hydraulique entraîne inévitablement un différentiel de température entre la production de la PAC et la distribution.

Finalement, nous analysons la combinaison des deux mesures ci-dessus, à savoir : (i) une réduction de moitié de la puissance thermique de la PAC en combinaison avec 3 sondes géothermiques (plus une résistance électrique auxiliaire) ; (ii) une production calée directement sur la distribution de chauffage (puissance thermique et température). Cette configuration permet une couverture par la PAC de 90% de la demande thermique, avec un SPF3 théorique de 2.8 (y compris résistance électrique et pompe géothermique de la PAC1), contre 2.4 sans optimisation de la température de production.

II.E Fonctionnement de la ventilation

II.E.1 Caractérisation du fonctionnement de la ventilation

II.E.1.a Principe de l'installation

L'étude de la ventilation porte uniquement sur la surélévation, puisque les deux étages existants n'ont pas été équipés d'une ventilation contrôlée : seule l'extraction pré-existante dans les sanitaires a été conservée. Dans la surélévation, l'installation de ventilation est constituée d'un puits canadien (diamètre : 40 cm ; longueur : 100 m environ) couplé à un échangeur de chaleur sur air vicié. En principe, le puits canadien devrait permettre : (i) en hiver de préchauffer l'air neuf, avant de passer dans l'échangeur sur air vicié ; (ii) en été de rafraîchir l'air neuf avant de l'introduire dans le bâtiment (en by-passant l'échangeur de chaleur pour ne pas réchauffer l'air neuf). L'extraction d'air se fait par les plafonds (au milieu des pièces) et la pulsion d'air est située en dessus des fenêtres, également au niveau des plafonds.

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 (ce qui représente un gain supplémentaire d'énergie). Un by-pass de la ventilation double-flux est prévu pour la période estivale. Il se met en marche lorsque certaines conditions de température sont réunies, afin de ne pas réchauffer l'air entrant dans le bâtiment par l'air repris et de profiter de l'effet du puits canadien.

II.E.1.b Débits et consommation électrique

Selon l'annexe A de la norme SIA 382/1 [SIA; 2007], le ventilateur de pulsion dans un bâtiment à usage de bureaux doit être dimensionné pour pouvoir assurer un débit d'air neuf de 36 m³/h/personne durant les heures d'occupation. Le cahier technique 2024 [SIA; 2006] et la norme SIA 380/1 [SIA; 2009] admettent des surfaces par personne différentes dans les bâtiments de bureaux, respectivement 14 et 20 m²/personne. Dans le 1^{er} cas, le débit de dimensionnement pour la surélévation à Polimmo devrait être de 1'463/14*36~3'800 m³/h correspondant à un taux de renouvellement d'air de 2.6 m³/m²/h. Dans le 2^{ème} cas, il devrait être de 1'463/20*36~2'600 m³/h, soit un taux de renouvellement d'air de 1.8 m³/m²/h. Dans la pratique, le monobloc installé présente un débit nominal de 4'000 m³/h en pulsion comme en extraction, plus proche de la valeur de dimensionnement proposée par le cahier technique 2024. Cependant, ce niveau de débit d'air neuf est uniquement une valeur de dimensionnement, et un tel renouvellement d'air est excessivement élevé par rapport à la valeur recommandée par la norme SIA 380/1 [SIA; 2009] en ventilation naturelle de 0.7 m³/m²/h (facteur 4).

La Tableau 18 présente les débits d'air neuf réglés à Polimmo :

Tableau 18 : Débits d'air neuf réglés à Polimmo

	Débit air neuf		Taux renouvellement air		Remarques
	m ³ /h	m ³ /m ² /h	v/h	m ³ /h/pers.	
jusqu'au 09.02.2012	3600	2.5	1.0	34 / 49	
depuis le 09.02.2012	1000	0.7	0.3	10 / 14	valeur recommandée SIA 380/1 ventilation naturelle
valeur dimens. selon cahier technique 2024	3800	2.6	1.0	36	
valeur dimens. selon norme SIA 380/1	2600	1.8	0.72	36	

Le débit d'air neuf à Polimmo était initialement réglé à 3'600 m³/h, soit un taux de renouvellement d'air de 2.5 m³/m²/h. Ce débit d'air élevé a mené à une consommation électrique excessive (elle a dépassé celle de la PAC en 10-11, 13.5 contre 10.3 kWh/m²), et les débits d'air ont été diminués par 3.6 jusqu'à atteindre un taux de

renouvellement d'air de $0.7 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$, valeur recommandée par la norme SIA 380/1 [SIA; 2009] en ventilation naturelle. De plus, un arrêt nocturne de la VDF entre 22h et 5h a été programmé le 05.12.2011.

Théoriquement, la consommation électrique d'un ventilateur varie comme le cube du débit d'air. Dans le cas de Polimmo, le débit d'air était initialement réglé à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ mais a pu être diminué à 30% de cette valeur, soit $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. La consommation du ventilateur est passée de 2.5-3 kW à environ 200 W, soit une réduction par 12 à 15.

II.E.1.c Pannes et interventions

La liste des interventions de Tech Building sur l'installation sur la période de suivi énergétique est disponible en Annexe 4. Les pannes récurrentes de la ventilation constituent le principal défaut à noter sur cette installation (cf. Figure 37).

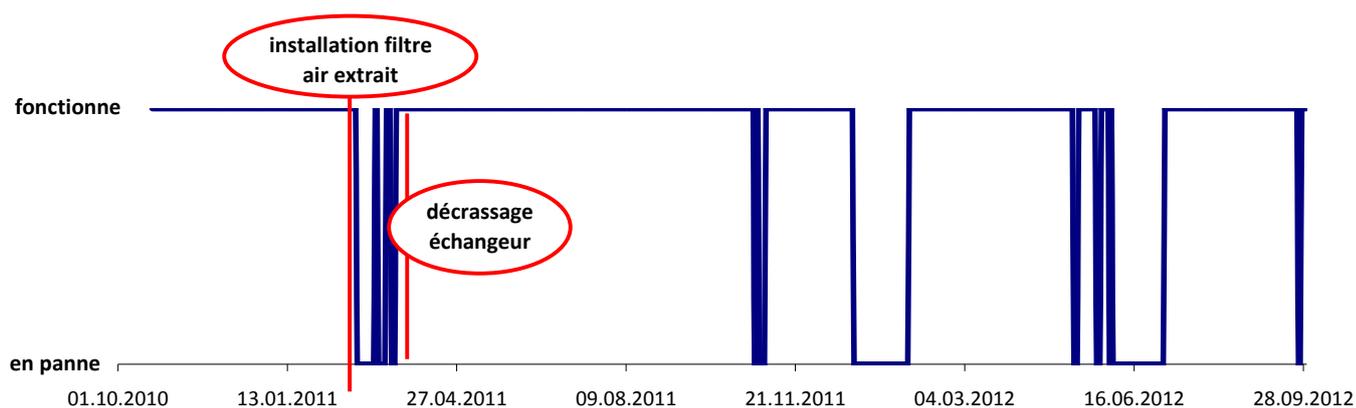


Figure 37 : Illustration des périodes de pannes sur la ventilation au cours des deux années de suivi (2010 à 2012)

Durant les périodes de pannes, dans certaines cas les ventilateurs continuent à tourner (et à consommer) mais il n'y a plus de débit dans les gaines de ventilation suite à la fermeture d'un clapet. Parfois, l'erreur se quitte automatiquement et la ventilation repart d'elle-même, dans d'autres cas, l'installation doit être relancée manuellement par Tech Building. Comme l'installation n'est pas équipée de système d'alarme en cas de dysfonctionnement, la ventilation peut rester en panne durant de longues périodes, comme l'atteste la Figure 37. En 11-12, on ne décompte pas moins de 8 périodes de pannes allant de 1 à 34 jours consécutifs, totalisant 80 jours de pannes sur la ventilation.

On note que les pannes ont commencé à partir du moment où Tech Building a installé un filtre sur l'air extrait, nécessaire pour protéger le ventilateur de l'encrassement et qui était inexistant jusque là. Un décrassage de l'échangeur à l'azote a été nécessaire pour que la ventilation fonctionne à nouveau correctement. Cela laisse à penser que les pannes sont liées à un problème de perte de charge anormale sur le circuit de ventilation.

II.E.1.d Niveaux de température (hiver)

La Figure 38 présente les niveaux de température atteints par l'installation de ventilation durant l'hiver 11-12 (moyennes horaires).

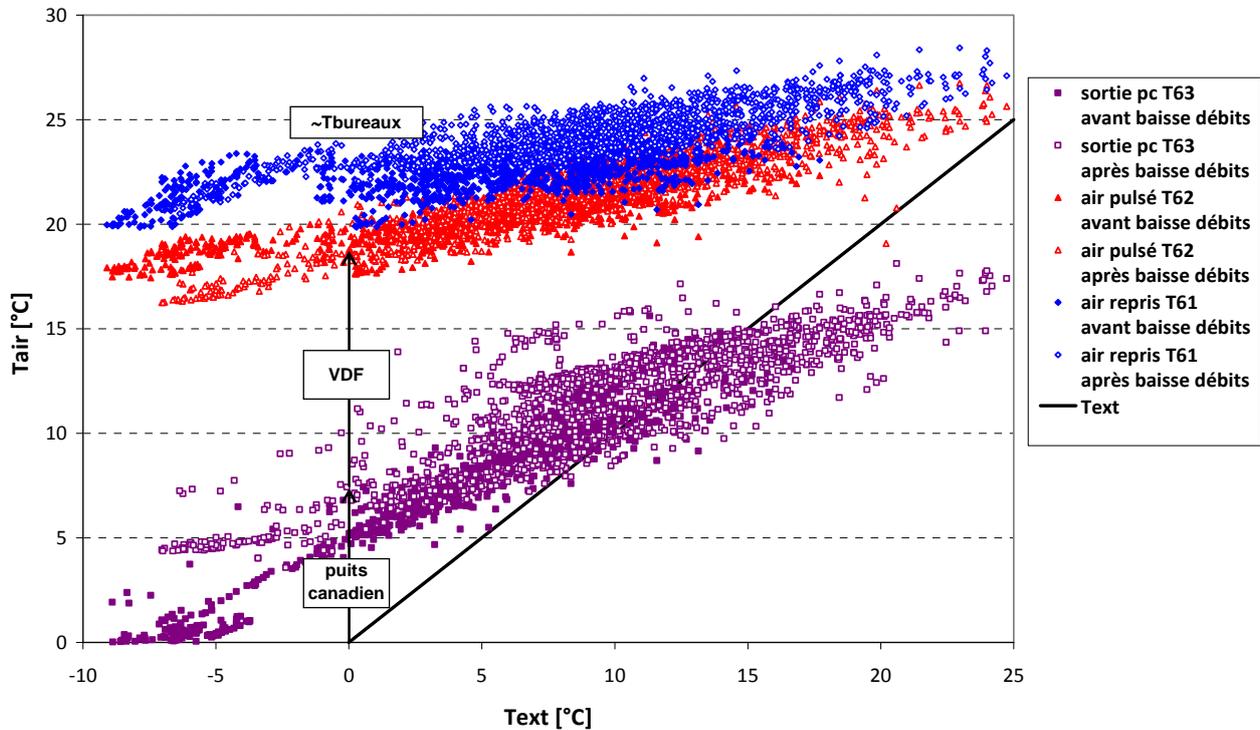


Figure 38 : Niveaux de températures observés sur l’installation de ventilation durant l’hiver 11-12 (données nov 11-avr 12, moyennes horaires)

L’air frais venant de l’extérieur passe d’abord par le puits canadien où il se réchauffe de quelques degrés avant d’entrer dans la VDF. L’air est ensuite pulsé dans les bureaux à une température comprise entre 18 et 23°C dépendant de la température extérieure.

Remarque : Nous n’avons pas équipé les bureaux de sondes de température intérieure, mais la température de l’air repris des bureaux est une bonne indication de la température intérieure moyenne dans la surélévation. Or l’air repris présente une température élevée, entre 21 et 25 °C : le nouveau bâtiment est surchauffé, sa température intérieure pourrait être abaissée de 3K, ce qui représenterait une consommation de chaleur pour le nouveau bâtiment de l’ordre de 20% inférieure, ou environ 9% à l’échelle du bâtiment complet (soient 3% d’économies d’électricité). Aucune information n’est par contre disponible sur la température intérieure dans l’ancien bâtiment (non équipé de VDF).

On observe l’effet de la baisse du débit de ventilation (09.02.2012) sur les niveaux de température : en toute logique, la température en sortie du puits canadien est plus élevée avec le débit plus faible (les échanges étant facilités). Par contre, on s’attendrait à ce que la température en sortie d’échangeur soit également plus élevée à faible débit, or c’est l’inverse qu’on observe. Ce phénomène est dû au fait que les ventilateurs dissipent dans les conduites de ventilation, si bien que la consommation électrique des ventilateurs participe au chauffage de l’air pulsé. Or la consommation électrique d’un ventilateur diminue théoriquement comme le cube du débit d’air : elle est passée de 2’600 W à environ 200 W suite à la diminution de débit. La dissipation thermique dans l’air pulsé a diminué d’autant, ce qui explique qu’au final la température de pulsion soit plus élevée avec les hauts débits qu’avec les bas débits (il s’agit en fait de chauffage électrique).

L’air neuf passe par le puits canadien avant d’entrer dans le VDF. Plus la température extérieure est basse et plus l’effet du puits canadien est visible : à -10°C l’air gagne près de 15K, à 0°C, plus que 7.5K, et à 10°C plus rien. Au-delà de 10°C, le puits canadien refroidit l’air neuf car le sol est plus froid que l’air extérieur.

II.E.1.e Dynamique annuelle

La dynamique de fonctionnement sur une année (oct. 11-sep. 12) est représentée sur la Figure 39 en valeurs journalières. Rappel : la position des capteurs de mesure est présentée en Annexe 3.

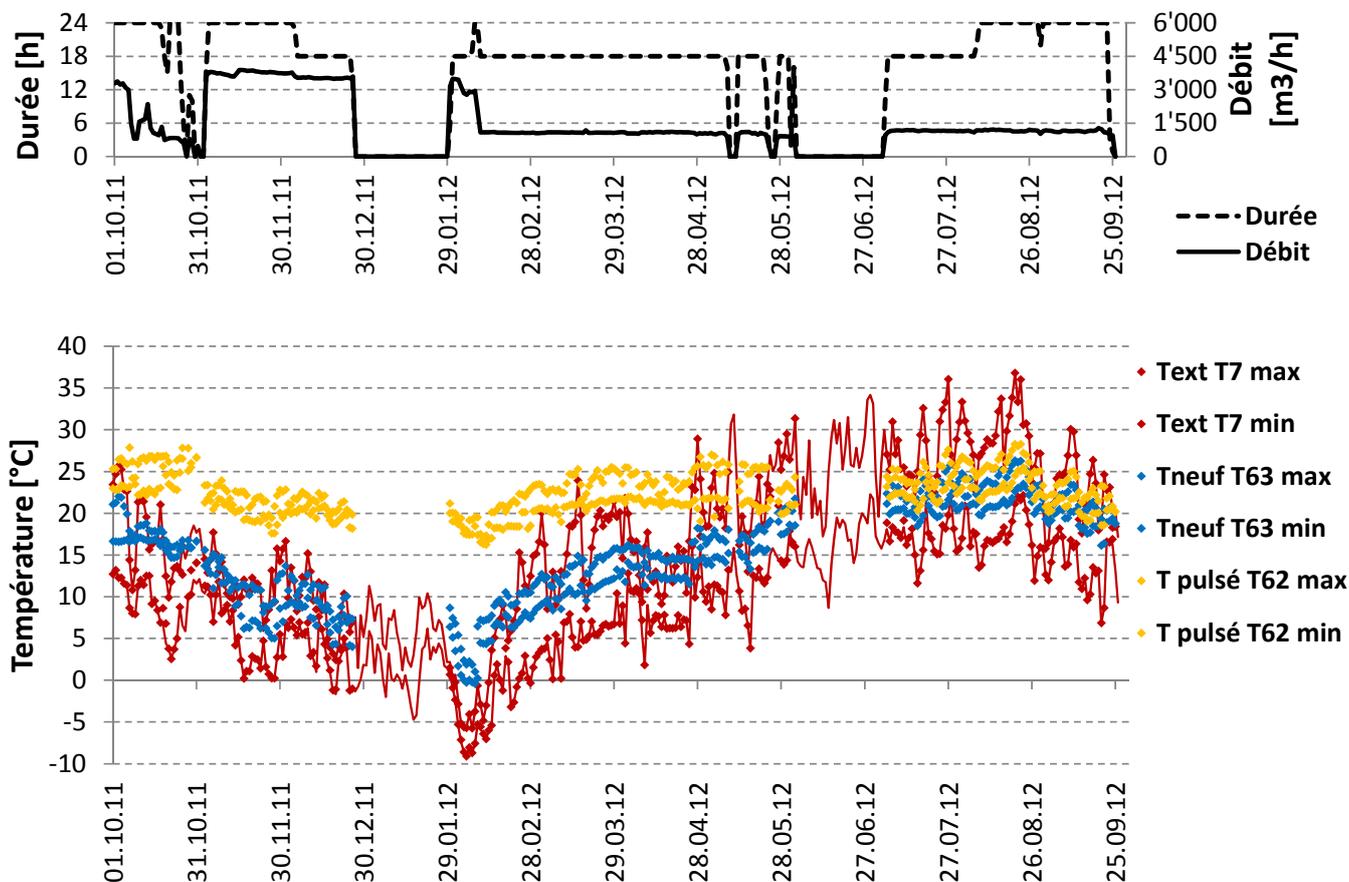


Figure 39 : Dynamique de fonctionnement annuelle (en moyennes journalières). En haut : durée de fonctionnement journalier de l'installation et débit moyen d'air pulsé (moyenne pendant la durée de fonctionnement) ; en bas : minima et maxima journaliers de température aux divers points d'amenée d'air neuf : température extérieure T7, sortie du puits canadien T63 (air neuf), sortie du récupérateur de chaleur T62 (air pulsé)

Au niveau des débits, on remarque les deux interventions suivantes : (i) dès le 06.12.2011, arrêt de la ventilation entre minuit et 6h (18 au lieu de 24h de fonctionnement journalier) ; (ii) dès le 09.02.2012, réduction du débit de ventilation de 3'600 m³/h à 1'000 m³/h. On note par ailleurs les nombreuses pannes sur l'installation, en particulier les deux pannes d'environ un mois en janvier et juin 2012.

i. Apport du puits canadien

Au niveau des températures on observe tout d'abord l'effet du puits canadien, qui permet de stocker/déstocker dans le terrain les variations de température portées par la prise d'air extérieur.

Il en résulte pour l'essentiel un amortissement de l'amplitude météo journalière : par rapport à l'extérieur, la variation de température à la sortie du puits est fortement réduite. Ainsi, sur toute la période de fonctionnement à faible débit, la moyenne de l'oscillation météo jour-nuit est de 2.6K à la sortie du puits, pour 9.6K à l'entrée. Sur la période à grand débit, la moyenne est de 2.2K à la sortie du puits, pour 6.9K à l'entrée.

A cet effet journalier se superpose un léger effet saisonnier : par rapport à l'extérieur, la variation de température été-hiver est légèrement plus faible à la sortie du puits. Ceci se remarque surtout au creux de l'hiver, où la sortie du

puits est en moyenne moins froide que l'extérieur (5.6°C contre 0.1°C en moyenne sur février), et de façon moins marquée au pic de l'été (22.6°C contre 23°C en moyenne sur août).

Globalement, la combinaison de ces deux effets permet :

- En hiver, de maintenir le récupérateur sur air vicié hors gel (visible en particulier lors des pointe de froid de début février), sans quoi le récupérateur sur air vicié devrait être maintenu hors gel via une résistance électrique.
- En été, de couper court aux apports de chaleur diurnes via la ventilation, et de garantir une température de ventilation qui ne dépasse pas 26°C.

Pour le reste, l'apport énergétique du puits canadien reste globalement très faible. En effet, puisqu'il se caractérise essentiellement par un effet journalier, les réchauffements nocturnes sont pour la plupart compensés par des rafraîchissements diurnes.

ii. Apport du récupérateur de chaleur

En hiver, l'air sortant du puits canadien est réchauffé par échange thermique avec l'air vicié (qui se trouve généralement entre 21 et 26°C). Ainsi, l'air pulsé dans le bâtiment se situe finalement entre 20 et 25°C.

Pendant l'été, le récupérateur sur air vicié est by-passé. On observe malgré cela un échauffement d'environ 2°C entre l'air neuf (à la sortie du puits) et l'air pulsé (à la sortie du récupérateur). Cet échauffement est dû à la dissipation thermique dans les gaines de l'électricité consommée par les ventilateurs.

Durant la période hivernale, le puits canadien est redondant avec la VDF, car l'élévation de température imputable au puits canadien aurait été en grande partie assurée par la VDF si le puits canadien n'avait pas été là (cf. paragraphe II.E.2.d). Le puits canadien a néanmoins l'avantage de maintenir hors gel le ventilateur lorsque les températures extérieures sont très négatives, puisqu'il remonte l'air neuf jusqu'à une température positive (cf. Figure 39).

iii. Fonctionnement sur deux semaines types

Le fonctionnement précédent est également illustré en valeurs horaires pour une semaine type d'hiver et d'été (cf. Figure 40). On note en particulier : (i) l'amortissement de l'amplitude journalière par le puits canadien, avec un léger effet saisonnier (en hiver, température moyenne légèrement moins fraîche qu'à l'extérieur, le contraire en été) (ii) le fort effet de préchauffage du récupérateur sur air vicié, qui est by-passé en été (le réchauffement résiduel d'environ 2K étant dû à la dissipation thermique des ventilateurs dans les gaines).

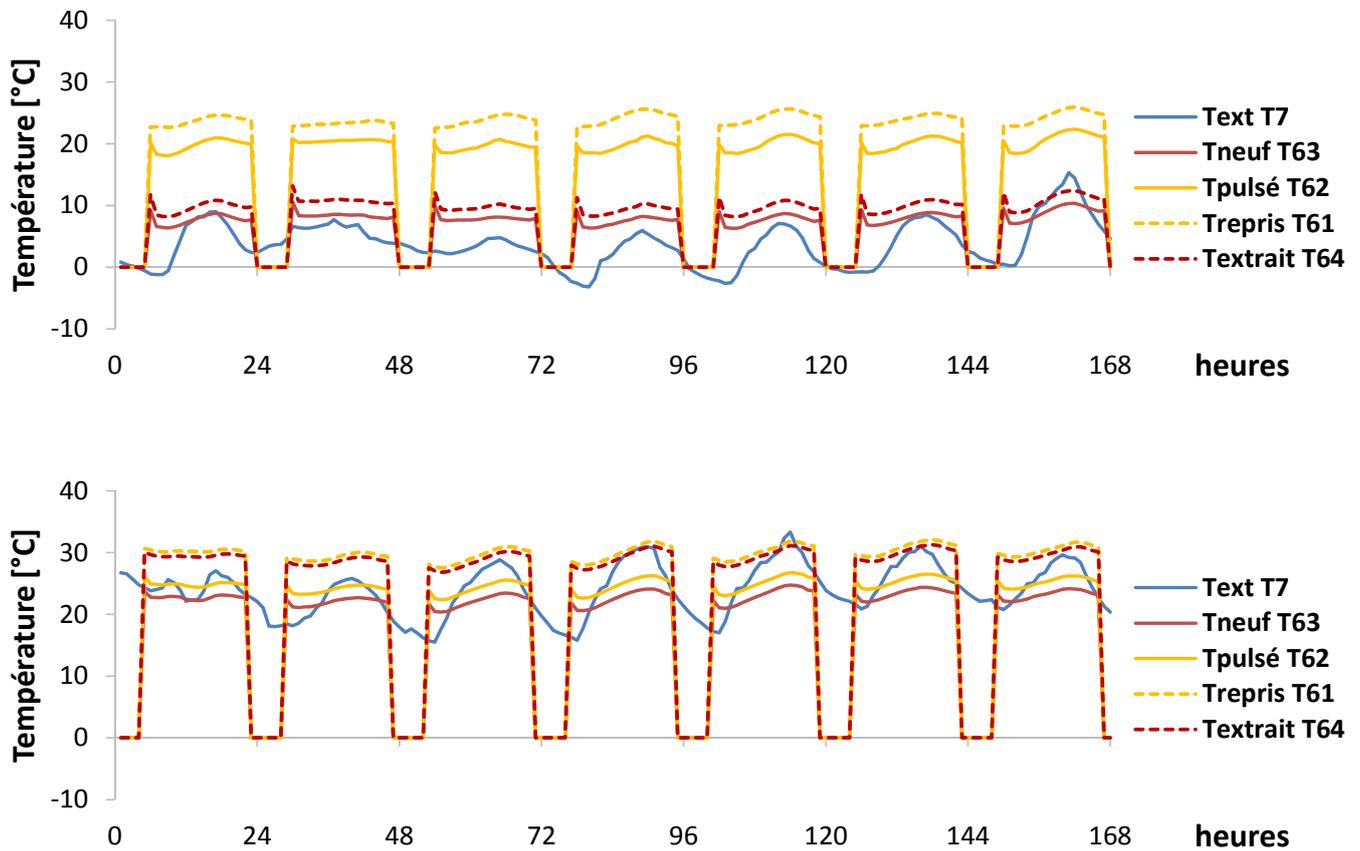


Figure 40 : Fonctionnement sur une semaine type (moyennes horaires) : en haut : en hiver (18.02-24.02.2012) ; en bas : en été (28.07-03.08.2012)

iv. Apport potentiel d'une batterie froid sur la ventilation

Durant l'été, des températures élevées (>30°C) sont parfois atteintes sur l'air pulsé. La température de l'air repris dans les bureaux est relativement élevée, la plupart du temps entre 26 et 30°C. Le puits canadien joue bien son rôle d'amortisseur des pointes de température, puisque dans les périodes chaudes, la température en sortie de puits canadien est jusqu'à 10K en dessous de la température extérieure. Cependant, l'effet thermique sur le bâtiment est faible car les puissances en jeu sont faibles (limité au débit de ventilation).

Le propriétaire du bâtiment envisage d'installer une batterie de froid sur la ventilation, qui permettrait de refroidir l'air pulsé dans le nouveau bâtiment grâce à la pompe à chaleur en mode froid. Les contraintes suivantes sont à respecter pour éviter une sensation d'inconfort pour les occupants :

- une température de pulsion d'au minimum 15°C
- un débit de pulsion raisonnable

Le potentiel de refroidissement en W/m² a été estimé de manière très simplifiée pour une pulsion d'air à 15°C. Avec le débit standard (2'600 m³/h), le potentiel de rafraîchissement a été estimé à 10-12 W/m² par 35°C extérieur, à comparer à la valeur habituelle de dimensionnement de 30 W/m². Si on descend au débit hygiénique de ventilation (1'000 m³/h, cf. paragraphe II.E.1.b), le potentiel de rafraîchissement devient très faible (<5 W/m² par 35°C extérieur). Il apparaît difficile de fonctionner au débit maximal du ventilateur (4'000 m³/h soit un taux de renouvellement d'air de 2.7 m³/m²/h) sans provoquer de sensation d'inconfort chez les occupants. Une batterie de

froid pourrait donc participer au rafraîchissement du bâtiment mais en aucun cas permettre sa climatisation à température contrôlée.

II.E.2 Performances

II.E.2.a Puits canadien

On caractérise le puits canadien par sa capacité à réduire les oscillations météo journalières et saisonnières. A cet effet, nous définissons les amplitudes suivantes :

- Pour chaque jour, l'amplitude journalière est donnée par la différence entre la température maximale et minimale du jour.
- Pour chaque jour, l'amplitude annuelle est donnée par la différence entre la température moyenne du jour, et la température moyenne annuelle (NB : il s'agit à strictement parler d'une demi-amplitude).

Ces amplitudes sont calculées à l'entrée et à la sortie du puits, et reportées l'une par rapport à l'autre (cf. Figure 41). On en ressort les caractéristiques suivantes :

- Amplitude journalière : Pour le petit débit (1'000 m³/h), l'amplitude à la sortie du puits est réduite en moyenne à 25% de l'amplitude à l'entrée (météo). Pour le grand débit (3'600 m³/h), l'amplitude n'est réduite qu'à 44 %.
- Amplitude annuelle : Pour le petit débit (1'000 m³/h), l'amplitude à la sortie du puits est réduite en moyenne à 74% de l'amplitude à l'entrée (météo). Pour le grand débit (3'600 m³/h), l'amplitude est réduite à 67%. A noter que la valeur est légèrement plus faible pour le grand débit (alors qu'on s'attendrait à l'inverse).

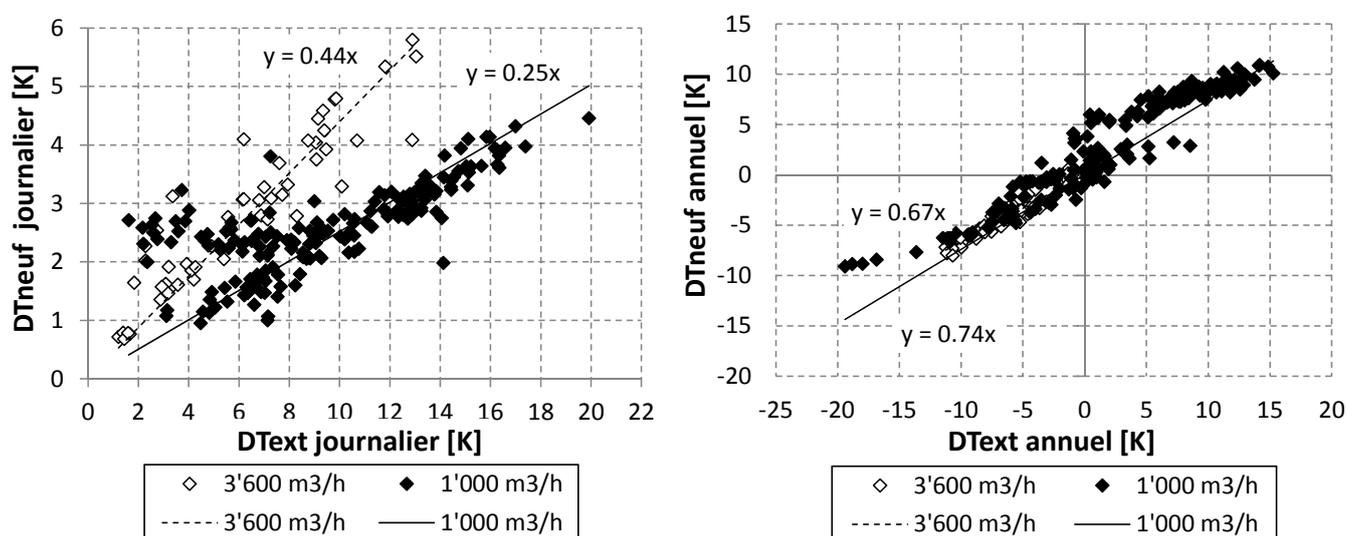


Figure 41 : Caractérisation du puits canadien. A gauche : amplitudes journalières (entrée versus sortie) ; à droite : amplitudes annuelles (entrée versus sortie)

II.E.2.b Ventilation double flux

Les performances techniques d'un ventilateur sont couramment caractérisées par le Coefficient de Performance, qui se définit comme la quantité de chaleur récupérée grâce à la VDF rapportée à l'électricité consommée. NB : par convention, on prend en compte seulement la consommation électrique du ventilateur de pulsion dans le calcul

du COP, car le ventilateur d'extraction est considéré comme standard et donc présent dans tous les bâtiments récents ou rénovés.

$$COP_{VDF} = \frac{Q_{\text{récupéré VDF}}}{E_{\text{ventilateur pulsion}}}$$

La qualité de l'échange de chaleur est traduite par le calcul de l'efficacité, soit de manière classique :

$$Eff = \frac{T_{\text{pulsé}}(T62) - T_{\text{neuf}}(T63)}{T_{\text{repris}}(T61) - T_{\text{neuf}}(T63)}$$

Remarques :

- Cette expression de l'efficacité suppose que les débits d'air des deux côtés de l'échangeur sont égaux. Nous n'avons pas pu le vérifier dans le cas de Polimmo car il nous a été impossible de mesurer le débit d'air dans la conduite d'extraction (pas de longueur droite suffisante accessible), et le débit d'air extrait a été pris égal au débit d'air pulsé.
- Dans le cas de Polimmo, l'air neuf traverse d'abord le puits canadien, donc la température de l'air neuf n'est pas égale à la température extérieure mais à la température en sortie du puits canadien.
- Le monobloc de ventilation est fait de telle manière que les ventilateurs dissipent leur énergie dans les gaines de ventilation. Cette dissipation a été prise en compte (via la consommation électrique de la VDF) pour calculer l'efficacité de l'échange de chaleur dans la VDF indépendamment de la dissipation des ventilateurs :

$$Eff = \frac{T_{\text{pulsé}}(T62) - \Delta T_{\text{dissip}} - T_{\text{neuf}}(T63)}{T_{\text{repris}}(T61) + \Delta T_{\text{dissip}} - T_{\text{neuf}}(T63)} \text{ où } \Delta T_{\text{dissip}} = \frac{P_{\text{élec VDF}}}{2 \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{p air}} \cdot \dot{V}_{\text{air}}}$$

avec $P_{\text{élec VDF}}$ en W, \dot{V}_{air} en m^3 / s , $\rho_{\text{air}} = 1.2 \text{ kg} / m^3$, $c_{\text{p air}} = 1005 \text{ J} / \text{kg} / \text{K}$

et T_{neuf} à la sortie du puits canadien

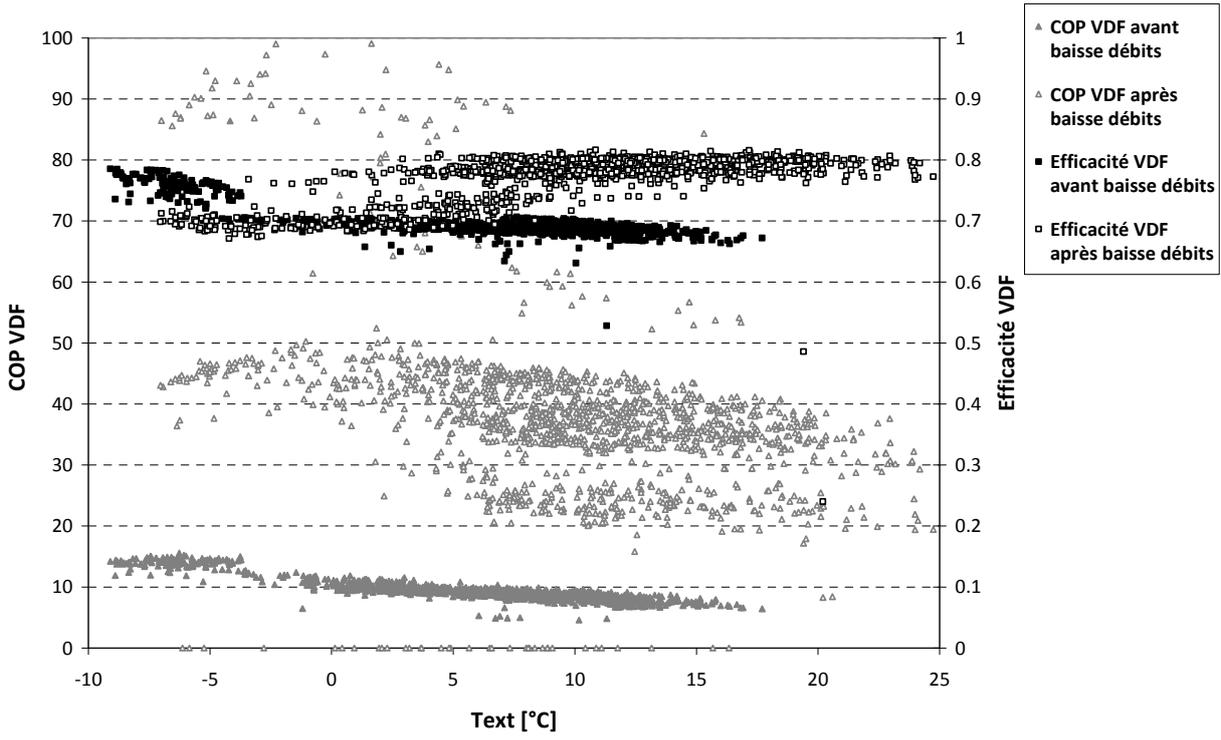


Figure 42 : COP et efficacité de la VDF en fonction de la température extérieure (données nov 11-avr 11, moyennes horaires)

L'effet de la baisse des débits de ventilation est clairement visible sur les performances. Le COP est multiplié par 4, il passe de 10 (très faible) à plus de 40 à 0°C, du fait de la diminution non linéaire de la consommation électrique avec le débit d'air. Cette dernière valeur est semblable à celle observée au bâtiment du Gros Chêne [Mermoud et al.; 2012]. De la même manière, on observe que l'évolution du COP diminue lorsque la température extérieure augmente : en effet, plus la température extérieure est faible, plus la quantité d'énergie potentiellement récupérée est importante à même consommation électrique du ventilateur. Tout comme [Mermoud et al.; 2012] et [Zraggen; 2010], on observe une dispersion importante des valeurs, qui s'explique en partie par une obturation progressive des filtres de la VDF.

L'efficacité de l'échangeur ne dépend pas de la température extérieure, par contre l'effet de la diminution de débit est clairement visible sur l'efficacité de l'échange : 0.68-0.7 à grand débit, contre 0.78-0.8 à petit débit. Des valeurs comprises entre 0.6 et 0.7 sont couramment observées [Zraggen; 2010, Mermoud et al.; 2012]. Les valeurs proches de 0.8 sont élevées, et s'expliquent par le fait qu'à ces niveaux de débits, l'échangeur fonctionne loin de ses conditions nominales (30%) et que les surfaces d'échanges sont donc très surdimensionnées.

II.E.2.c Bilan annuel

Le Tableau 19 présente le bilan mensuel et annuel sur l'année 11-12.

Tableau 19 : Bilan énergétique et COP de la ventilation durant l'année 11-12

	baisse débits 09.02.2012													
<i>kWh/m²</i>	oct.11	nov.11	déc.11	janv.12	févr.12	mars.12	avr.12	mai.12	juin.12	juil.12	août.12	sept.12	11-12	10-11
Chaleur														
Puits canadien (<i>Q_{pc}</i>)	0.4	1.3	0.8	0.1	1.2	0.1	0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.1	0.3	4.0	
chauffage	(0.6)	(1.4)	(0.9)	(0.1)	(1.2)	(0.3)	(0.3)	(0.1)	(0.0)	(0.1)	(0.2)	(0.3)	(5.5)	
rafraîchiss.	-(0.1)	-(0.1)	-(0.1)	(0.0)	(0.0)	-(0.2)	-(0.1)	-(0.2)	(0.0)	-(0.3)	-(0.3)	-(0.1)	-(1.5)	
VDF (<i>Q_{VDF avec pc}</i>)	1.5	6.0	4.7	0.3	3.1	1.4	1.2	0.7	0.0	0.3	0.3	0.2	19.8	
Total	1.9	7.3	5.6	0.4	4.3	1.5	1.4	0.7	0.0	0.1	0.2	0.5	23.8	57.1
Electricité*														
hors pannes	1.0	1.4	1.0	0.0	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	4.4	
total	1.3	1.5	1.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	4.9	13.5
COP														
hors pannes	4	11	11	15	26	39	36	22				8	11	
total	3	10	11	14	26	39	36	17				7	10	8

*pulsion+extraction

mise en place
arrêts nocturnes
05.12.2011

Remarques :

- Toutes les valeurs sont ramenées à la SRE de la surélévation et pas à la SRE de tout le bâtiment (valeurs différentes de celles présentées dans le diagramme de flux en Figure 19).
- De manière conventionnelle, le calcul du COP prend en compte seulement la consommation du ventilateur de pulsion et pas celle du ventilateur d'extraction (soit la moitié de la consommation électrique totale).

Avec le puits canadien, l'air neuf est pulsé plus froid que l'air extérieur le jour et plus chaud que l'air extérieur la nuit. La 1^{ère} ligne correspond à l'énergie « soustraite » du bâtiment lorsque la température de pulsion est inférieure à la température extérieure, la 2^{ème} ligne correspond au surcroît d'énergie injecté dans le bâtiment lorsque la température de pulsion est supérieure à la température extérieure. Au final, le bilan est légèrement positif.

Le COP de la ventilation est compris entre 3 et 39 selon les mois, la valeur moyenne annuelle étant à 10. Une fois retirée de la consommation électrique du ventilateur durant les périodes de pannes (le ventilateur continue parfois à tourner mais il n'y a plus de débit dans les conduites, cf. paragraphe II.E.1.c), le COP annuel passe à 11. L'influence de la baisse des débits d'air en cours d'année (09.02.2012) est très visible sur les performances, puisque le COP mensuel passe d'environ 10 à plus de 30.

La consommation électrique de la ventilation est passée de 13.5 en 10-11 à 4.9 en 11-12, suite à deux interventions recommandées par l'Unige :

- Mise en place d'un arrêt nocturne entre 22h et 5h le 5.12.2011 (économie d'électricité de 30%) ; cet arrêt pourrait encore être étendu pour suivre les heures d'occupation effective du bâtiment.
- Baisse des débits de ventilation par 3 le 9.02.2012 (division de la consommation électrique des ventilateurs par 12).

Pour les années suivantes et si les débits et les horaires de fonctionnement restent tels quels, la consommation électrique annuelle devrait tomber en dessous de 1 kWh/m²/an et le COP annuel sera très probablement de l'ordre de 30, soit une division par 13 de la consommation électrique par rapport à la situation initiale et une multiplication par 4 du COP annuel.

A titre de comparaison, la consommation électrique observée sur la VDF de l'immeuble du Gros Chêne est de 1.7 kWh/m²/an et le COP annuel de 20 [Mermoud et al.; 2012], tandis que pour l'immeuble du Pommier, la consommation électrique annuelle est de 2.8 kWh/m²/an et le COP annuel de 15 [Zraggen; 2010], pour des taux de renouvellement d'air comparables, légèrement supérieurs à la valeur limite de 0.7 m³/m²/h. Cependant dans le cas de l'immeuble du Pommier, la pulsion se fait à travers les dalles en béton, ce qui induit des pertes de charge beaucoup plus élevées et une consommation électrique accrue pour le ventilateur.

II.E.2.d Performances sans puits canadien

Le rôle d'un puits canadien est avant tout d'amortir les pointes de température : l'effet du puits canadien d'un point de vue énergétique est quasi nul. Il peut être caractérisé comme suit :

$$Q_{VDF \text{ sans } pc} = Q_{VDF \text{ avec } pc} + Eff \cdot Q_{pc} = 19.8 + 0.75 \cdot 4 = 22.8 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{an}$$

avec $Q_{VDF \text{ avec } pc}$ et Q_{pc} définis dans le Tableau 19

En l'absence du puits canadien, 75% de l'énergie fournie par ce dernier serait récupérée par la VDF, aboutissant à une énergie produite par la ventilation de 22.8 kWh/m²/an contre 23.8 kWh/m²/an avec le puits canadien. En termes de températures de pulsion, on aboutirait à la situation illustrée sur la Figure 43 :

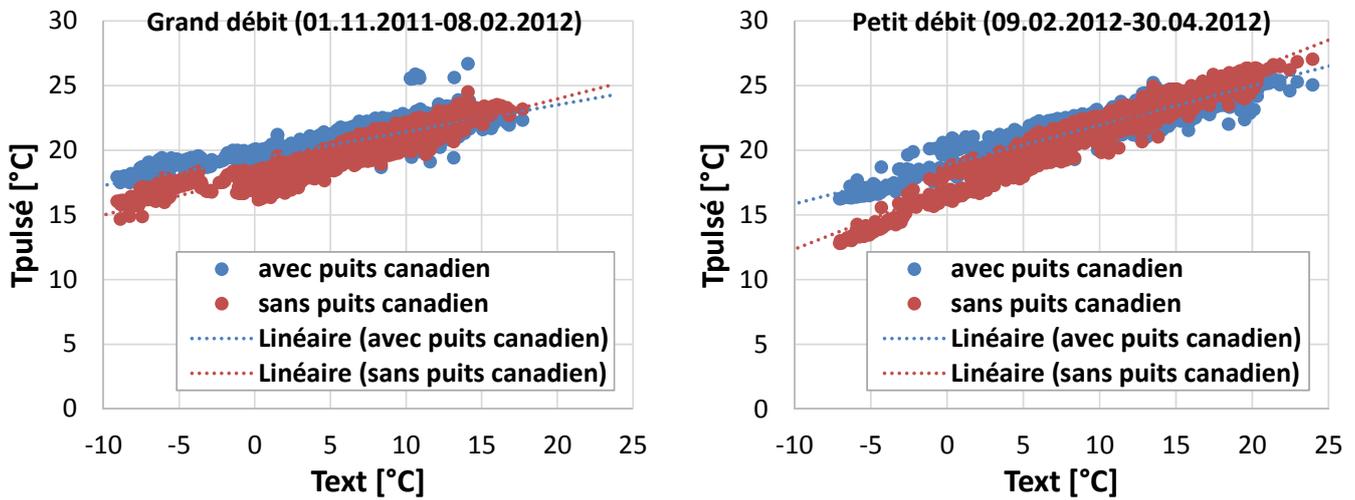


Figure 43 : Température de pulsion avec et sans puits canadien (moyennes horaires). A gauche : grand débit (3'600 m³/h) ; à droite : débit réduit (1'000 m³/h)

La différence de température est de quelques degrés seulement (-2K à grand débit et -3K à petit débit à -10°C extérieur). On s'attendrait à une situation plus favorable à petit débit qu'à grand débit, mais en réalité le moins bon échange à grand débit est contrebalancé par une dissipation thermique du ventilateur dans les canalisations bien plus élevée.

II.E.3 Recommandations

Aujourd'hui, l'installation de ventilation à Polimmo est optimisée avec une consommation électrique qui devrait se stabiliser à 1 kWh/m²/an contre 13.5 au début du suivi. Le COP annuel était initialement de 8 et devrait dépasser 30 avec les nouveaux réglages. On note que les normes, qui préconisent des débits d'air de dimensionnement excessifs par rapport aux besoins réels d'utilisation, entraînent des surdimensionnements importants des ventilateurs. Or par défaut, la ventilation sera souvent réglée à son débit maximal, ce qui va faire exploser inutilement sa consommation électrique. Cette dernière peut d'ailleurs dépasser celle de la PAC, comme on l'a vu ici : en 10-11, ~10 kWh/m² pour la PAC et ~13 kWh/m² pour la ventilation (surélévation seulement) avec une VDF surdimensionnée d'un facteur 4 par rapport aux besoins réels.

Le problème des pannes récurrentes subsiste, mais surtout Tech Building n'est pas informé lorsqu'il y a une avarie. Les pannes sur la ventilation sont donc découvertes fortuitement lors d'une autre intervention sur le site, ce qui explique que des périodes de pannes de plus de 30 jours consécutifs aient pu être observées : ainsi en 11-12, la ventilation a été en panne plus de 20% du temps. Pour pallier à ce problème, nous recommandons vivement la mise en place d'une alarme chez le propriétaire M. Previdoli ou directement chez Tech Building afin que les pannes sur la ventilation soient détectées et résolues rapidement.

II.F Conclusion

Un bâtiment tertiaire datant des années 60 a été récemment rénové au standard Minergie. A l'occasion de la rénovation, une surélévation a été ajoutée au bâtiment, faisant passer la SRE de 2'205 à 3'668 m². En même temps que la rénovation de l'enveloppe, une rénovation des installations techniques a été entreprise. La chaudière mazout existante a été remplacée par deux pompes à chaleur géothermiques. Une ventilation double-flux couplée à un puits canadien a été installée (dans la surélévation seulement). Le suivi énergétique a porté sur l'ensemble du bâtiment avec ses installations techniques et s'est déroulé sur deux années complètes (oct 2010-oct 2012).

Le suivi a tout d'abord montré que la demande de chauffage du bâtiment a été divisée par 4, passant de 108 à 27 kWh/m²/an, soient des performances comparables à un bâtiment Minergie neuf (NB : pas de demande d'ECS car il s'agit d'un bâtiment tertiaire). La consommation électrique globale pour le chauffage et la ventilation est inférieure à 10 kWh/m²/an. Cela conduit à un indice Minergie (après pondérations) de 19 kWh/m²/an, ce qui est très inférieur à la valeur limite de 55 kWh/m²/an pour un bâtiment tertiaire rénové. Le chauffage est assuré par les radiateurs existants, et la courbe de chauffe a été réglée à une température de départ maximale de 45°C à une température extérieure de -5°C. A noter que les débits de distribution sont trop élevés, ce qui mène à des différences de température entre départ et retour faibles, de l'ordre de 2-3K. Le déséquilibre hydraulique actuel du bâtiment ne permet pas une baisse importante des débits.

La production de chauffage est assurée par deux PAC de 120 kW chacune en parallèle, dont l'une peut fonctionner en réversible pour produire du froid qui serait distribué par de futurs plafonds froids en été (dans la surélévation uniquement). Un circuit intermédiaire en eau glycolée a été prévu à l'aval de la PAC pour éviter tout risque de gel lors de la production de froid. Les PAC sont en série avec le ballon, ce qui implique que le ballon doit obligatoirement être chargé à une température de consigne avant utilisation de la chaleur (pas de possibilité de délivrer la chaleur directement à la distribution). L'inconvénient de cette configuration est que le processus de charge du ballon induit forcément une température de production plus élevée de quelques degrés par rapport à ce que demande la distribution. Initialement, aucune courbe de chauffe n'était programmée sur le ballon, et ce dernier était à une température constante toute l'année quelle que soit la température demandée par la distribution. Au cours de la période de suivi, une courbe de chauffe en fonction de la température extérieure ainsi qu'un ralenti de nuit ont été programmés pour améliorer les performances de la PAC. D'autre part, l'échangeur intermédiaire (ajouté pour le circuit intermédiaire en eau glycolée) induit encore une différence de température de quelques degrés. Enfin, les retours chauds de la distribution (différence de température départ-retour de seulement 2-3K) induisent une température de production élevée. Au final, la PAC produit à 10-15K de plus que ce que demande la distribution, ce qui pénalise les performances.

Le suivi a montré que l'installation était surdimensionnée d'un facteur 2 : une seule PAC suffirait à couvrir la quasi-totalité des besoins thermiques. Il en résulte que la température à la sortie des sondes est élevée (12-13°C toute l'année), puisque celles-ci ont été dimensionnées pour le fonctionnement des deux PAC simultanément : la puissance instantanée tirée des sondes est au max de 30 W/m (la valeur recommandée étant de 50 W/m). Par contre, le ballon de stockage est largement sous dimensionné, ce qui entraîne un cyclage important : environ 20 cycles de 10-20 min par jour, ce qui est préjudiciable pour les performances et la durabilité.

Les performances observées de la PAC sont compatibles avec celles fournies par le constructeur. Le SPF annuel atteint 2.9 après les optimisations réalisées sur l'installation. Cette valeur est modeste compte tenu des

températures de production (seulement du chauffage, pas de demande d'ECS), ainsi que de la température élevée à la sortie des sondes géothermiques (10-15°C). Le potentiel d'amélioration est faible, avec plusieurs points de blocage : (i) la configuration hydraulique du système (ii) l'accès restreint aux paramètres de régulation (iii) les retours de distribution trop chauds (débits élevés car pas d'équilibrage hydraulique réalisé). Le SPF PAC (sans auxiliaires) est de 3.4, la consommation des auxiliaires de la PAC représentant 11% de la consommation électrique totale (15% si on inclut les circulateurs de distribution). Enfin, l'installation n'est pas arrêtée l'été pour pouvoir assurer une éventuelle production de froid : selon les conditions de température extérieure, la PAC se met en marche en mode chaud ou froid et charge le ballon inutilement (NB : il n'y a pas encore de demande de froid à l'heure actuelle). Ces mises en marche intempestives peuvent facilement représenter 10% de la consommation électrique totale.

Un modèle des sondes géothermiques a été réalisé avec le logiciel Pilesim. Après validation avec les données mesurées, des simulations avec un facteur de dimensionnement de $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{4}$ (1 PAC de 104 kW et 6 sondes, et 1 PAC de 52 kW et 3 sondes) ont donné les résultats suivants. La réduction du nombre de sondes de 11 à 6 n'a pas d'effet sur le SPF qui se maintient à 3 ; la température minimale annuelle à l'entrée des sondes géothermiques passe de 6 à 0°C. Une installation bivalente avec une PAC de la moitié de la puissance maximale couvrirait encore 90% des besoins de chauffage ; dans le cas où l'appoint se fait par une résistance électrique, le SPF de l'installation descend à 2.5 avec une consommation électrique de 11 kWh/m²/an.

La nouvelle partie du bâtiment constituant la surélévation a été pourvue d'une ventilation double flux couplée à un puits canadien. Les normes actuelles poussent à surdimensionnement les installations de ventilation en imposant un débit de dimensionnement correspondant à un taux de renouvellement d'air 3 fois supérieur aux préconisations pour un fonctionnement habituel. Initialement, la ventilation était réglée au débit maximum de 3'600 m³/h : il en a résulté une consommation électrique excessive de 13 kWh/m² la 1^{ère} année de suivi, soit plus que la PAC (10 kWh/m²). Durant la 2^{ème} année de suivi, les débits ont été réduits par 3 et un arrêt nocturne a été programmé, ce qui a engendré une baisse de la consommation électrique par 12. Le suivi a mis en évidence des pannes fréquentes ayant duré plusieurs semaines, car découvertes fortuitement lors d'un passage sur le site.

Concernant les performances, l'efficacité de l'échange de chaleur a été mesurée à environ 0.7 au débit maximum et 0.8 au débit réduit. Le COP de la ventilation est de l'ordre de 10 mais il pourrait facilement atteindre 30 avec le débit minimal et en résolvant le problème de pannes récurrentes. Quant au puits canadien, il joue bien son rôle d'amortissement (baisse de l'amplitude journalière à 45% de l'amplitude d'entrée en débit maximum, 25% en débit réduit). Il fait par contre double-emploi avec la ventilation double-flux en hiver et avec les futurs plafonds froids en été. La possibilité d'inclure une batterie de froid sur la ventilation pour pulser de l'air frais dans les bureaux a été étudiée. A une température extérieure de 35°C et une température de pulsion de 15°C, le potentiel de rafraîchissement est de l'ordre de 12 W/m² au débit maximal et descend en dessous de 5 W/m² au débit hygiénique (à comparer avec la valeur de dimensionnement habituelle de 30 W/m²).

Aujourd'hui, les installations techniques ont atteint leur rythme de croisière et les performances ne devraient pas beaucoup évoluer durant les prochaines années. Certains défauts devraient être corrigés : identifier pourquoi la 2^{ème} PAC ne se met jamais en marche, réaliser un équilibrage hydraulique, trouver la raison des pannes récurrentes sur la ventilation et installer une alarme pour avertir rapidement d'un dysfonctionnement. Nous recommandons de poursuivre une exploitation suivie des installations techniques pour maintenir leurs performances et leur fiabilité.

Chapitre III :

Analyse économique

III.A Introduction

Dans le cadre du suivi énergétique à Polimmo, le maître d'ouvrage M. Previdoli nous a donné – via Vincent Aeschbacher du groupe H – accès à l'ensemble des données économiques du projet, ce qui nous a permis de compléter notre suivi technique par une analyse économique. Nous avons notamment pu consulter le CFC (Code des Frais de Construction) relatif au projet ainsi que les devis détaillés concernant les installations techniques, les factures relatives à l'entretien et à la maintenance des installations, les factures d'électricité.

Ces documents nous ont permis de reconstituer le montant des charges de chauffage et de ventilation depuis la transformation du bâtiment, plus particulièrement sur les deux années de suivi 10-11 et 11-12. Nous avons déterminé le coût de la chaleur produite et le montant annuel des charges par m² chauffé, qui a pu être comparé à la valeur avant rénovation. NB : ces travaux s'appuient en partie sur ceux de Yann Oberson [Oberson; 2011] qui a accepté qu'on s'inspire d'une partie de son travail de master dans ce chapitre.

Remarques :

- Tous les montants figurant dans l'analyse économique s'entendent hors TVA.
- Les calculs économiques présentés dans ce chapitre ont été pour certains reconstruits avec les données en présence, et ne correspondent donc pas en tous points aux coûts réels observés sur le site.
- Le détail des coûts est proposé en Annexe 7 pour l'ensemble des cas présentés.

III.B Investissements

III.B.1 Investissement total

Le montant total des investissements s'élève à 6'640'000 CHF HT. Avec l'aide de M. Vincent Aeschbacher du Groupe H (maître d'œuvre du projet), nous avons pu distribuer les coûts par postes principaux à partir du CFC relatif au projet :

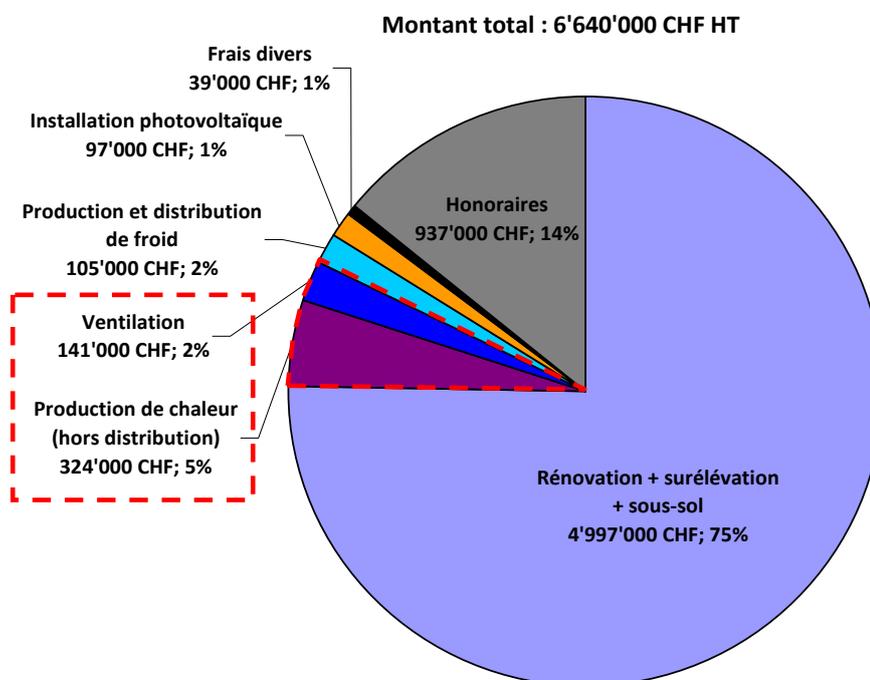


Figure 44 : Répartition des investissements sur le projet de transformation du bâtiment Polimmo (source des données : CFC)

Les 3/4 des investissements (5 MCHF) sont dédiés à la transformation du bâtiment : rénovation de la partie existante, création de la surélévation et aménagement du sous-sol. Le second poste est celui des honoraires, qui représentent 14% du montant total (~1 MCHF). Les installations techniques (production de chaud, de froid, ventilation et installation photovoltaïque) représentent seulement 10% du montant total. Dans la suite nous allons plus particulièrement nous intéresser aux coûts liés aux installations techniques que nous avons étudiées durant le suivi énergétique, à savoir la production de chaleur et la ventilation. Ces deux postes représentent respectivement 5 et 2% du total des coûts, soient moins de 500'000 CHF (hors honoraires). NB : nous n'avons pas étudié les coûts liés à la production et la distribution de froid (même s'ils représentent plus de 100'000 CHF) car durant le suivi, il n'y a pas eu de demande de froid sur le bâtiment.

III.B.2 Investissement dans la production de chaleur

Ce poste regroupe tout ce qui a trait à la production de chaleur par les pompes à chaleur. Les honoraires calculés au prorata ont également été inclus, ce qui porte le total à 377'000 CHF HT.

Les sondes géothermiques occupent le 1^{er} poste avec près de la moitié des coûts (159'000 CHF, soient 59 CHF/m sonde). Les pompes à chaleur représentent 35% des coûts (132'000 CHF, soient 550 CHF/kW installé), puis viennent les honoraires calculés au prorata (14% des coûts) et enfin d'autres postes secondaires comme la tuyauterie, la partie électrique ou le transport et montage qui représentent les 10% restants.

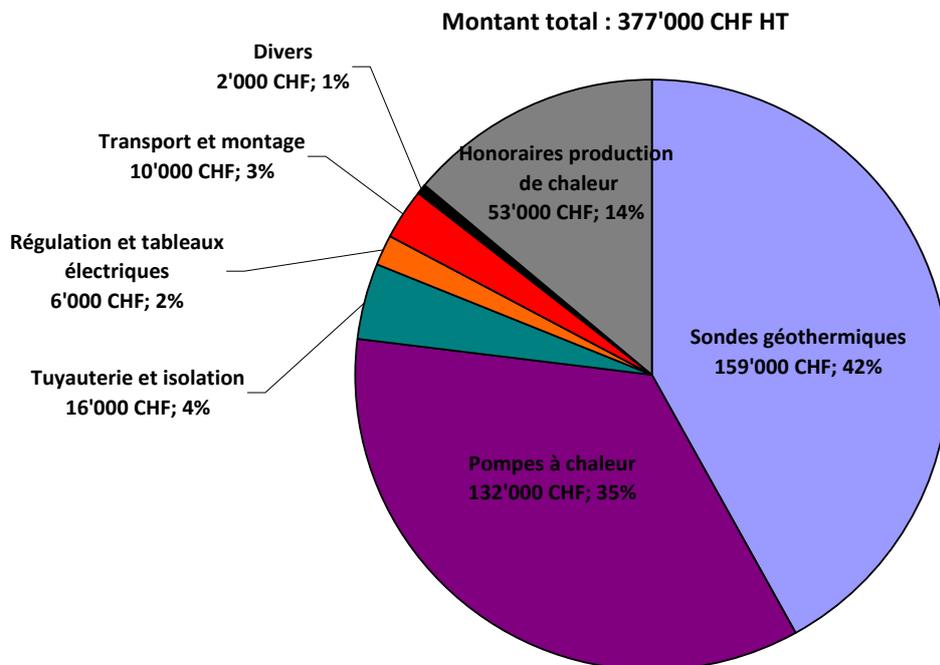


Figure 45 : Répartition des investissements relatifs à la production de chaleur (source des données : CFC)

Remarque : Les frais liés à la mise en place de la distribution dans la surélévation et à l'adaptation de la distribution dans le bâtiment existant (e.g. vannes thermostatiques) n'ont pas été inclus dans ce poste, qui porte uniquement sur les coûts de production de la chaleur. Ces frais s'élèvent à environ 70'000 CHF supplémentaires (hors honoraires) et ont été intégrés au poste « Rénovation + surélévation + sous-sol » (cf. Figure 44).

III.B.3 Investissement dans la ventilation

L'investissement total dans la ventilation s'élève à environ 163'000 CHF HT (honoraires au prorata inclus), soient environ 100 CHF/m² (rapporté à la SRE de la surélévation seulement).

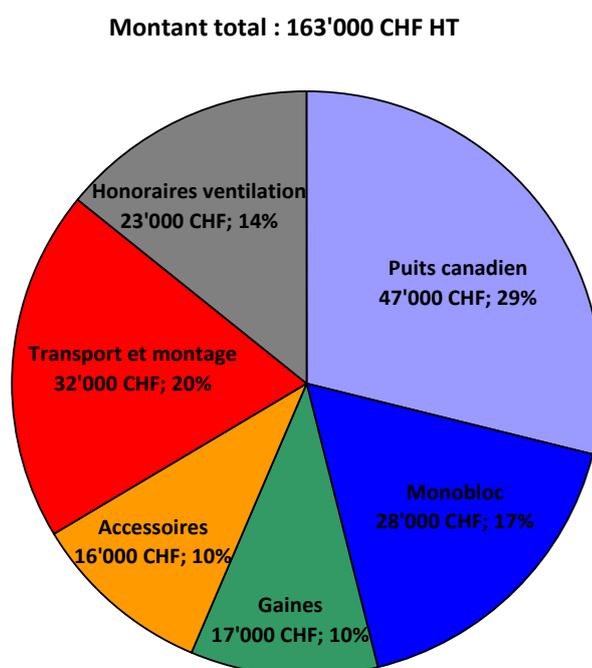


Figure 46 : Répartition des investissements relatifs à la ventilation (source des données : CFC et V. Aeschbacher (puits canadien))

Le puits canadien représente 30% du coût total, suivi du monobloc avec 17%, puis viennent les gaines et autres accessoires 20%, et enfin le transport et montage encore 20%.

III.B.4 Subventions

Le maître d'ouvrage a bénéficié de subventions de la part de la Fondation pour le Centime Climatique (~90'000 CHF) et de l'OCEN (~55'000 CHF) au titre de l'assainissement Minergie du bâtiment¹³. Aucune subvention n'a cependant été octroyée pour les installations techniques en elles-mêmes.

A noter que le maître d'ouvrage bénéficie d'une déduction fiscale sur les impôts cantonaux et communaux suite à la rénovation du bâtiment et des installations techniques, qui s'élève à environ 15'000 CHF par an¹⁴.

¹³ source : V. Aeschbacher

¹⁴ d'après document de l'administration fiscale cantonale, fourni par M. Previdoli

III.C Charges annuelles

III.C.1 Amortissements

Les annuités ont été calculées avec un temps d'amortissement de 20 ans (~durée de vie des équipements) et un taux d'intérêt de 3%, ce qui aboutit à une annuité de 25'300 CHF pour les PAC et 11'000 CHF pour la ventilation.

En appliquant la déduction fiscale (cf. paragraphe III.B.4) au prorata du montant des investissements dans les pompes à chaleur et dans la ventilation, on aboutit à une subvention de l'ordre 900 CHF et 400 CHF par an respectivement, que nous avons déduite des annuités.

Remarque : Ces données financières ne sont pas celles qui se sont réellement appliquées au projet (montage financier plus complexe) mais elles correspondent au marché actuel.

III.C.2 Contrat d'exploitation

D'après les factures, les contrats d'exploitation et de maintenance des installations techniques par la société Tech Building se sont élevés 9'400 CHF en 2011 et 8'700 CHF en 2012, dont environ 4'000 CHF pour la ventilation (entretien + changement des filtres 3 fois par an).

III.C.3 Electricité

Les charges liées aux consommations électriques des PAC et de la ventilation n'ont pas pu être déterminées directement à partir des factures SIG car ces dernières incluaient d'autres postes comme l'électricité des communs (pompes de circulation, éclairage...). Elles ont donc été reconstruites à partir des consommations électriques mesurées durant le suivi énergétique en connaissant le tarif électrique dont bénéficie l'installation. NB : le tarif en vigueur dans l'année en cours a été utilisé.

Le bâtiment Polimmo souscrit au tarif Vitale Bleu Profil Double des SIG avec un tarif heures pleines (7h-22h en semaine, 17h-22h le week-end) et un tarif heures douces. Le Tableau 20 présente l'évolution du tarif depuis la mise en service des installations à Polimmo en 2010 :

Tableau 20 : Evolution du tarif Vitale Bleu Profil Double des SIG entre 2010 et 2013 (source : SIG)

ct HT/kWh	Vitale Bleu Profil Double				PAC
	01.01.2010	01.01.2011	01.01.2012	01.01.2013	01.01.2013
heures pleines	25.09	24.36	22.01	21.21	20.61
heures douces	13.88	13.61	13.61	13.21	12.61

heures pleines : 7h à 22h en semaine, 17h à 22h le week-end

Le tarif Vitale Bleu Profil Double baisse d'année en année depuis 2010 avec une baisse importante en 2012 (-2.35 ct/kWh), suite à une décision de la Cour des comptes et de la Commission fédérale de l'électricité (EiCom), qui ont estimé que les SIG avaient surestimé les coûts d'acheminement de l'électricité avant 2009 et devaient rembourser le trop perçu aux consommateurs.

Il est à noter que les PAC sont interruptibles en cas de demande de délestage de la part des SIG (en périodes de pointe, typiquement en milieu de journée), et à ce titre les consommations électriques des PAC pourraient bénéficier d'un tarif un peu plus avantageux. Avec le tarif applicable en 2013 (heures pleines : 20.61 ct HT/kWh,

heures douces : 12.61 ct HT/kWh), l'économie potentielle est de l'ordre de 200 CHF/an sur une facture de l'ordre de 6'000 CHF/an (~3%).

III.C.4 Répartition des charges

Les charges annuelles ont été calculées pour les deux années de suivi 10-11 et 11-12, ainsi que pour une année « moyenne » considérée comme représentative de la situation future (à court terme) :

- consommation de chaleur normée par rapport au climat de référence à Genève (2'507 DJ/an [Mermoud et al.; 2012])
- SPF4'=3.0 (valeur 11-12 après optimisations, cf. paragraphe II.C.3.b)
- consommation électrique ventilation de 1 kWh/m²/an rapportée à la SRE de la surélévation (valeur si débits actuels conservés sur l'année complète, cf. paragraphe II.E.2.c)
- coûts de maintenance et d'exploitation de 9'000 CHF/an (~moyenne des deux dernières années), dont 4'000 CHF pour la ventilation et 5'000 CHF pour les PAC
- tarif électricité Vitale Bleu 2013

La Figure 47 présente la répartition des charges annuelles en 10-11, 11-12 et pour une année moyenne :

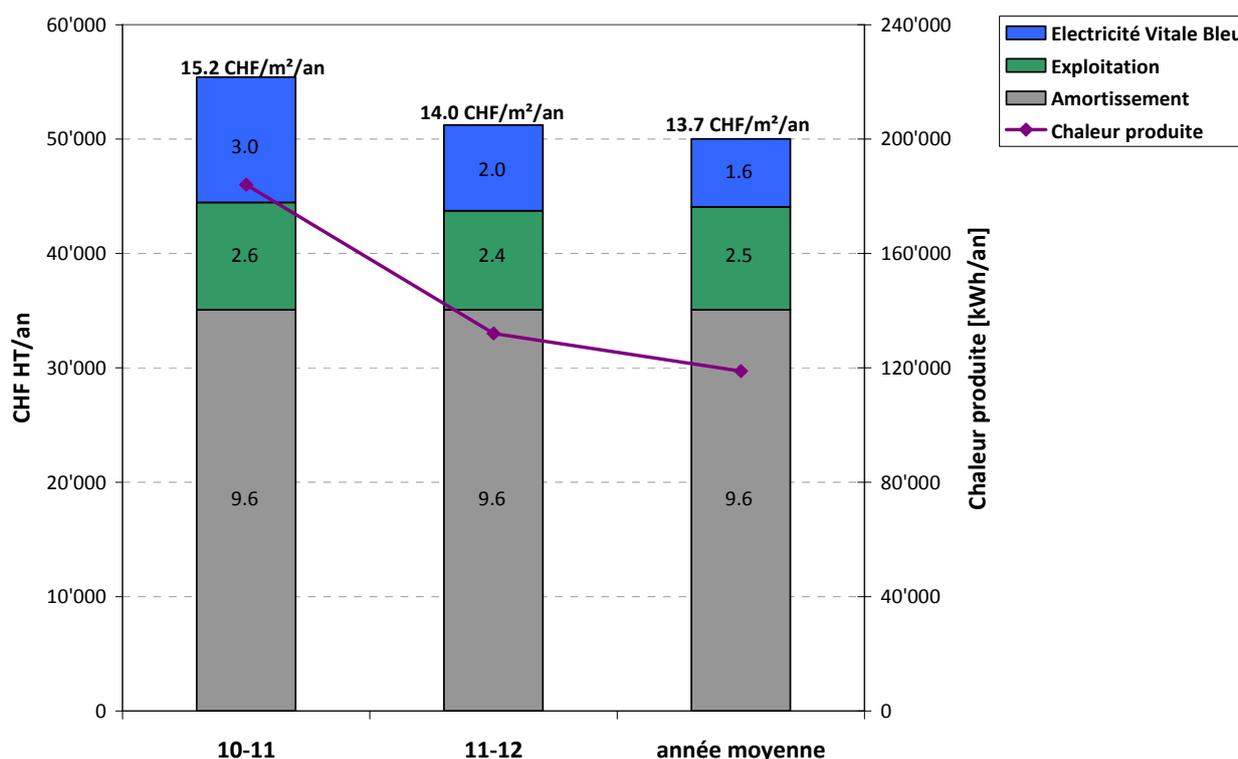


Figure 47 : Répartition des charges annuelles liées au chauffage et à la ventilation entre les principaux postes en 10-11 et 11-12 et pour une année moyenne

Les charges annuelles pour le chauffage et la ventilation sont de 50-55'000 CHF HT/an, dépendant des coûts d'électricité. Pour une année moyenne, les coûts d'investissement représentent 70% du coût total, les coûts d'exploitation 18% et les coûts d'électricité 12% (~6'000 CHF/an avec le tarif en vigueur en 2013 et après optimisation des PAC et de la ventilation). Le coût au m² chauffé est de l'ordre de 14 CHF/m²/an (~10 CHF/m²/an pour l'amortissement des investissements, 2.5 CHF/m²/an pour l'exploitation des installations et 1.5 CHF/m²/an pour les achats d'électricité). L'optimisation des installations techniques conjuguée à la baisse des tarifs de l'électricité a conduit à une baisse des coûts de 5'000 CHF entre 10-11 et 11-12, soit 1.5 CHF/m².

III.D Coût de la chaleur produite

III.D.1 Coût du kWh

La Figure 48 présente le coût du kWh produit par la PAC et par la ventilation (rapporté respectivement à l'énergie produite par la PAC et par la VDF). L'Annexe 7 présente le détail des coûts par poste.

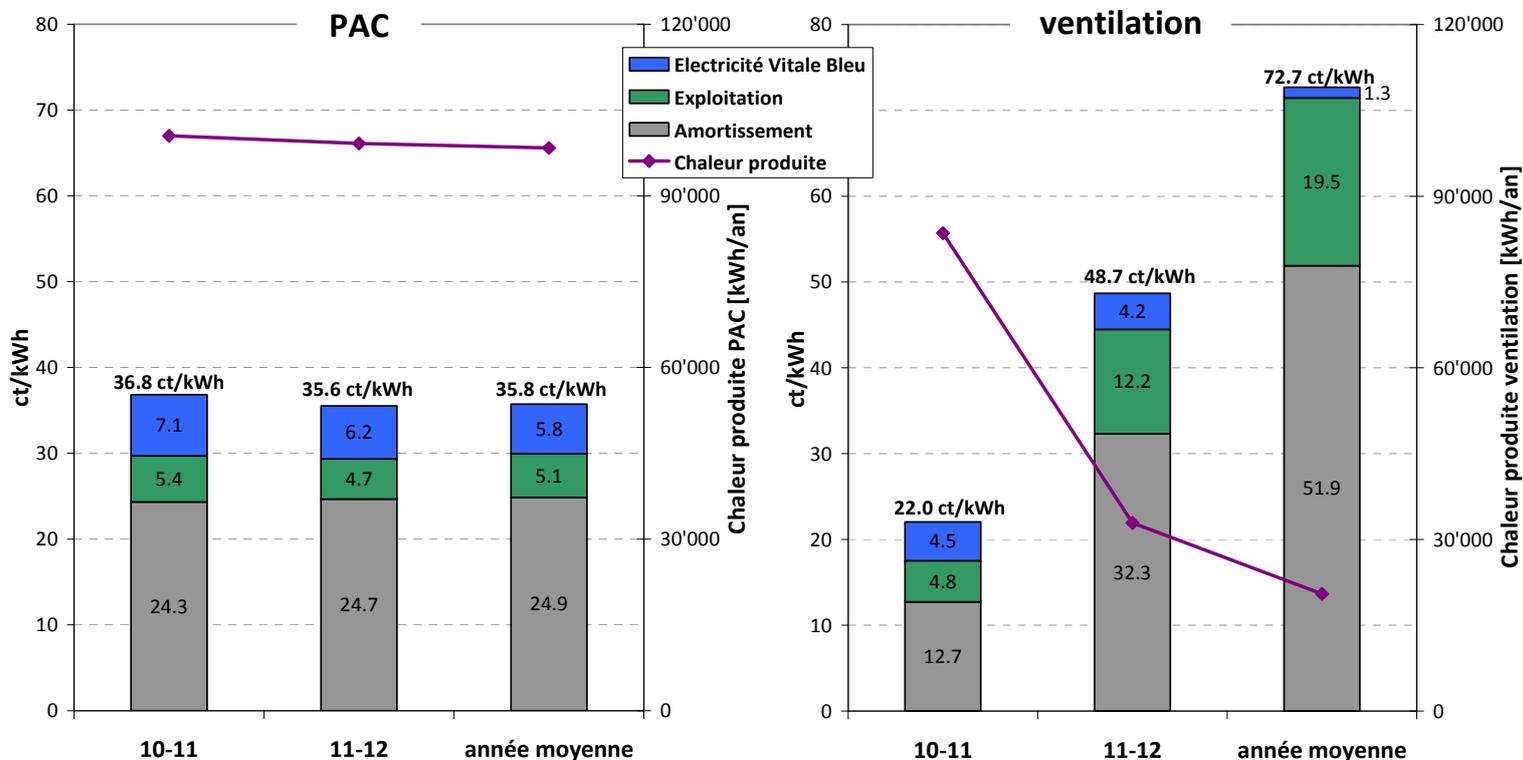


Figure 48 : Coût du kWh produit par la PAC et par la VDF (ct/kWh) pour les années 10-11, 11-12 et une année moyenne

Le coût du kWh produit par la PAC est stable d'une année à l'autre, autour de 36 ct HT/kWh (légère baisse depuis 2011, liée à la baisse des tarifs d'achat de l'électricité). Les coûts se répartissent comme suit : 70% pour l'amortissement de l'investissement, 15% pour l'exploitation et 15% pour les achats d'électricité. La quantité de chaleur produite par la PAC est stable d'une année à l'autre (~100'000 kWh/an).

Concernant la ventilation : la chaleur récupérée par la ventilation (puits canadien + VDF) a beaucoup diminué depuis 2010 (84'000 en 10-11, 33'000 en 11-12, elle devrait se stabiliser aux alentours de 20'000 kWh/an), suite à la diminution par 3 des débits d'air neuf. Il en résulte que le coût du kWh produit par la ventilation a explosé depuis 2010 (22 ct/kWh en 10-11, 49 ct/kWh en 11-12, il devrait se stabiliser aux alentours de 70 ct/kWh), car les coûts fixes sont prépondérants (60 à 70% du coût total). Ces coûts sont deux fois plus élevés que ceux observés sur l'installation du Gros Chêne (bâtiment résidentiel rénové équipé d'une VDF complétée par une PAC) qui sont inférieurs à 35 ct/kWh [Mermoud et al.; 2012] malgré des coûts d'investissement similaires (~100 CHF/m² SRE). La quantité de chaleur produite par la ventilation à Gros Chêne est cependant bien supérieure (24 kWh/m²/an contre 14 kWh/m²/an à Polimmo à terme), car la ventilation fonctionne en continu (à petite ou à grande vitesse), tandis qu'elle est complètement arrêtée la nuit à Polimmo.

III.D.2 Coût du m² chauffé

La Figure 49 présente le montant des charges liées à la PAC et à la ventilation (CHF/m²/an, rapportée à la surface totale du bâtiment pour la PAC et à la surface de la surélévation seule pour la ventilation). L'Annexe 7 présente le détail des coûts par poste.

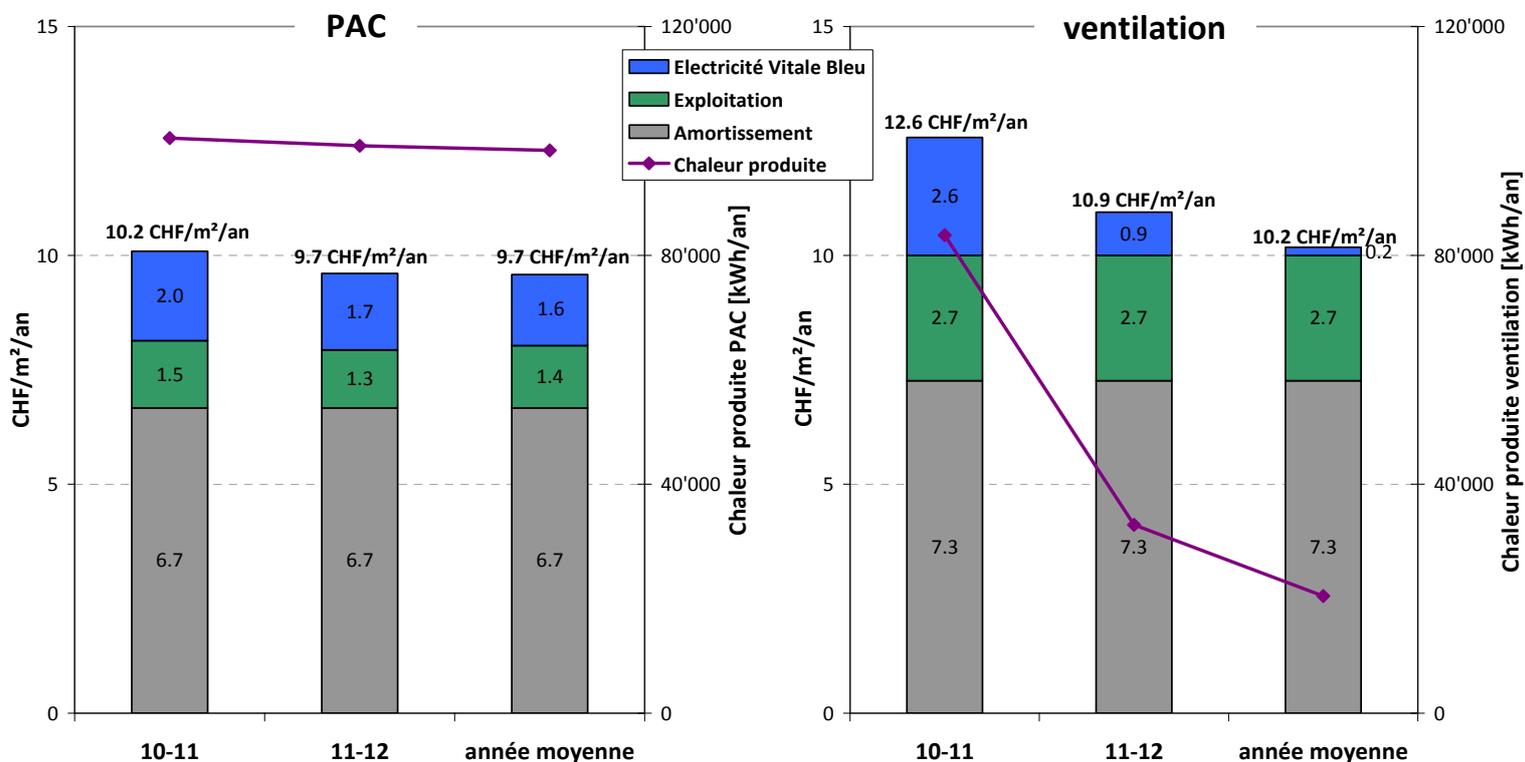


Figure 49 : Charges liées à la PAC et à la ventilation double flux (CHF/m²/an) pour les années 10-11, 11-12 et une année moyenne

Les charges liées à la PAC sont relativement stables d'une année à l'autre et de l'ordre de 10 CHF/m²/an. Elles fluctuent légèrement suivant le tarif d'achat de l'électricité.

Les charges liées à la ventilation ont diminué de 2 CHF/m²/an entre 10-11 et 11-12 et devraient se stabiliser à terme autour de 10 CHF/m²/an également (uniquement pour la surélévation). La baisse des coûts est essentiellement liée à la baisse des débits de ventilation par 3, qui a entraîné une baisse de la consommation électrique par 12 (cf. paragraphe II.E.2.c). Pour comparaison, les charges liées à la ventilation sur l'immeuble du Gros Chêne sont de l'ordre de 9 CHF/m²/an [Mermoud et al.; 2012], sachant que l'installation concernée est équipée d'une PAC pour relever la température de l'air pulsé à une valeur confortable pour les occupants, mais pas de puits canadien.

A noter que les coûts de la ventilation au m² sont comparables à ceux de la PAC, ce qui paraît élevé, et en grande partie imputables à l'investissement. Ils auraient pu être mieux maîtrisés avec un dimensionnement plus juste de la ventilation.

III.D.3 Autres scénarios

III.D.3.a Comparaison avec d'autres situations typiques

Dans ce paragraphe, les coûts pour les années 10-11, 11-12 et l'année moyenne ont été comparés à d'autres situations de référence :

- la situation avant rénovation
- une rénovation de l'enveloppe identique mais avec un simple renouvellement de la chaudière mazout

i. Situation avant rénovation

Le Tableau 21 présente les hypothèses principales pour le calcul des coûts avant rénovation :

Tableau 21 : Hypothèses de calcul des coûts de chauffage à Polimmo avant rénovation

SRE	2'205	m ²
Consommation d'énergie		
Consommation de mazout moyenne (2'507 DJ)	12.7	L/m ² /an
Rendement chaudière mazout	0.85	
Demande de chaleur moyenne (2'507 DJ)	108	kWh/m ² /an
Coûts fixes		
Prix d'achat chaudière (500 kW)	25'000	CHF HT
Amortissement annuel (taux d'intérêt 3% sur 20 ans)	1'680	CHF HT/an
Entretien annuel	3'000	CHF HT/an

La consommation de mazout est la moyenne des valeurs réellement observées sur le site entre 1996 et 1999. Le prix d'achat de la chaudière a été estimé à partir de prix catalogue et les frais d'entretien sont des valeurs couramment observées.

Le Tableau 22 présente une estimation des charges de chauffage (CHF/m²/an) et du coût de la chaleur (ct/kWh) qui auraient été observés s'il n'y avait pas eu de rénovation :

Tableau 22 : Charges de chauffage (CHF/m²/an) et coût de la chaleur produite (ct/kWh) en l'absence de rénovation, pour les années 10-11, 11-12, l'année moyenne et une projection avec un prix du mazout à 1.5 CHF/L

		10-11	11-12	année moyenne	projection 1.5 CHF/L
Prix mazout (conso > 20'000 L/an) ¹	CHF HT/L	0.902	0.989	1	1.5
Rigueur climatique	DJ/an	2'476	2'541	2'507	2'507
Consommation mazout	L/an	27'578	28'302	27'923	27'923
Coûts variables (mazout)	CHF HT/an	24'874	27'981	27'923	41'885
Coûts fixes	CHF HT/an	4'680	4'680	4'680	4'680
Coût total	CHF HT/an	29'554	32'662	32'604	46'565
	CHF/m²/an	13.4	14.8	14.8	21.1
	ct/kWh	12.6	13.6	13.7	19.6

¹source : OCSTAT

Les charges seraient de l'ordre de 15 CHF/m² pour une année moyenne, mais dépasseraient les 20 CHF/m² si le prix du mazout augmentait à 1.5 CHF/L. Le coût de la chaleur est de l'ordre de 14 ct/kWh et monterait jusqu'à presque 20 ct/kWh si le prix du mazout atteignait les 1.5 CHF/L. A noter que la part des coûts fixes (amortissement + frais d'entretien) est faible : seulement 2 ct/kWh, le coût d'achat du mazout représentant plus de 80% du coût total de la chaleur.

ii. Rénovation enveloppe + chaudière mazout

Le Tableau 23 présente les hypothèses principales pour le calcul des coûts avec une transformation de l'enveloppe telle qu'elle a été faite mais avec un simple remplacement de la chaudière mazout pour la production de la chaleur :

Tableau 23 : Hypothèses de calcul des coûts de chauffage à Polimmo après rénovation de l'enveloppe mais avec une production de chaleur par chaudière mazout

SRE	3'668	m ²
Consommation d'énergie		
Demande de chaleur moyenne (2'507 DJ)	27	kWh/m ² /an
Rendement chaudière mazout	0.9	
Consommation de mazout moyenne (2'507 DJ)	3.0	L/m ² /an
Coûts fixes		
Prix d'achat chaudière (200 kW)	20'000	CHF HT
Amortissement annuel (taux d'intérêt 3% sur 20 ans)	1'344	CHF HT/an
Entretien annuel	3'000	CHF HT/an

La consommation de mazout a été estimée à partir de la demande de chaleur mesurée dans le cadre du suivi énergétique. Le prix d'achat de la chaudière a été estimé à partir de prix catalogue et les frais d'entretien sont des valeurs couramment observées.

Le Tableau 24 présente une estimation des charges de chauffage (CHF/m²/an) et du coût de la chaleur (ct/kWh) qui auraient été observés dans le bâtiment rénové mais avec une chaudière mazout :

Tableau 24 : Charges de chauffage (CHF/m²/an) et coût de la chaleur produite (ct/kWh) dans le cas d'une rénovation de l'enveloppe avec une production de chaleur par chaudière mazout, pour les années 10-11, 11-12, l'année moyenne et une projection avec un prix du mazout à 1.5 CHF/L

		10-11	11-12	année moyenne	projection 1.5 CHF/L
Prix mazout (conso > 20'000 L/an) ¹	CHF HT/L	0.919	1.004	1	1.5
Rigueur climatique	DJ/an	2'476	2'541	2'507	2'507
Consommation mazout	L/an	10'736	11'018	10'871	10'871
Coûts variables (mazout)	CHF HT/an	9'872	11'066	13'045	16'306
Coûts fixes	CHF HT/an	4'680	4'680	4'680	4'680
Coût total	CHF HT/an	14'552	15'746	17'725	20'987
	CHF/m²/an	3.9	4.2	4.7	5.6
	ct/kWh	14.7	15.5	17.8	21.1

¹source : OCSTAT

Les charges seraient de l'ordre de 5 CHF/m² pour une année moyenne (soit 3 fois moins qu'avant rénovation), et 6 CHF/m² si le prix du mazout augmentait à 1.5 CHF/L. Le coût de la chaleur est de l'ordre de 18 ct/kWh et monterait jusqu'à plus de 20 ct/kWh si le prix du mazout atteignait les 1.5 CHF/L. Les coûts fixes (amortissement + frais d'entretien) grimpent à plus de 4 ct/kWh (moins de kWh produits).

iii. Comparaison avec le cas réel

La Figure 50 présente une comparaison des charges de chauffage (CHF/m²/an) et du coût de la chaleur produite (ct/kWh) à Polimmo (hors ventilation) dans les 3 cas : sans rénovation, rénovation de l'enveloppe avec chaudière mazout, cas réel.

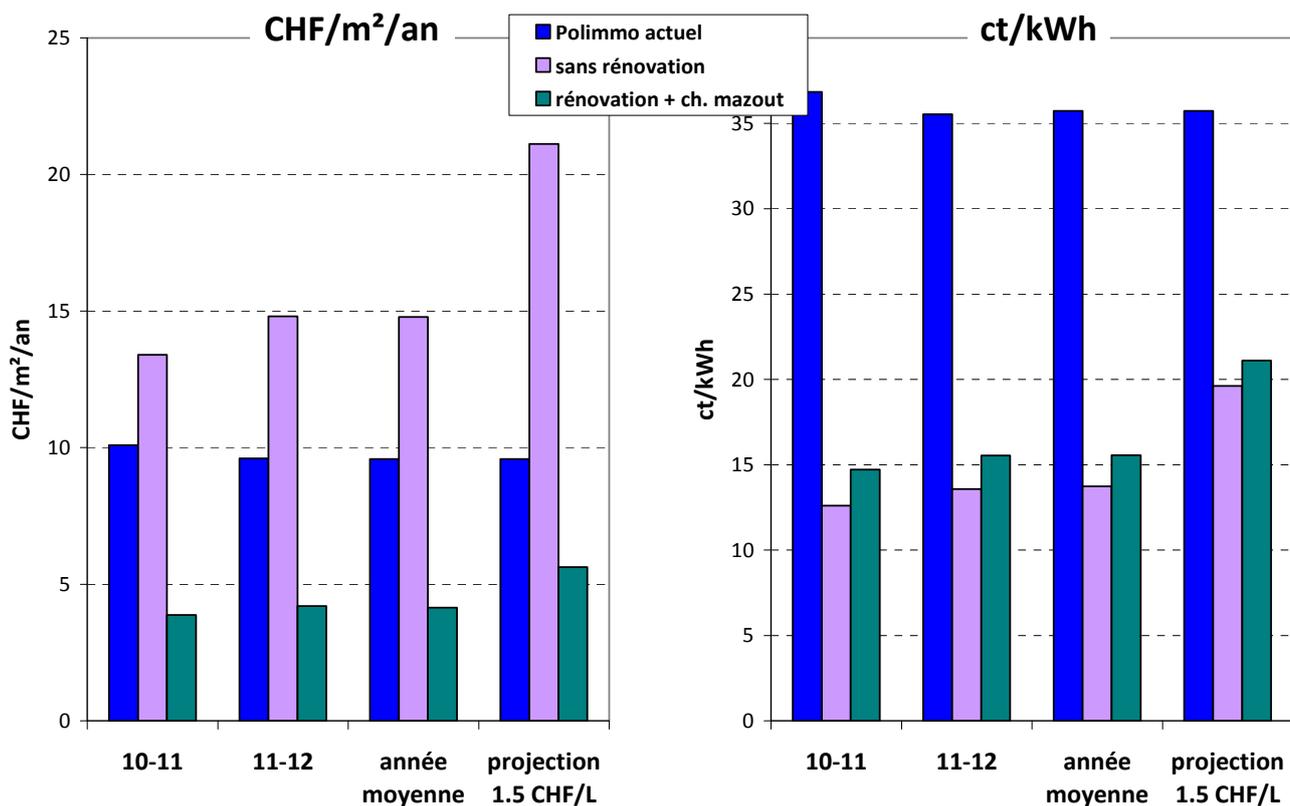


Figure 50 : Charges de chauffage (CHF/m²/an) et coût de la chaleur produite (ct/kWh) à Polimmo (cas réel, sans rénovation, rénovation de l'enveloppe + chaudière mazout), pour les années 10-11, 11-12, une année moyenne et une projection avec un prix du mazout à 1.5 CHF/L

Le coût de la chaleur est plus élevé après rénovation (~35 ct/kWh) qu'avant (<15 ct/kWh), à cause de l'importance des coûts fixes (investissements lourds) et du peu de chaleur consommé par le bâtiment. Cet écart se resserre si le prix du mazout augmente (NB : dans le scénario « projection », le prix de l'électricité a été fixé à la valeur observée en 2013 sans tenir compte d'une éventuelle augmentation ; les coûts d'achat de l'électricité représentant seulement 15% du coût total, l'impact d'une augmentation du prix de l'électricité resterait limité).

Dès le moment où on a une consommation de chaleur faible comme à Polimmo, le coût de la chaleur (ct/kWh) explose (surtout dans le cas où on a des coûts fixes élevés) et ne devient plus très significatif. Il devient plus approprié de raisonner en charges de chauffage (CHF/m²/an). Aux prix actuels du mazout, elles sont un tiers plus faibles après la rénovation (~10 CHF/m²/an contre ~15 CHF/m²/an avant rénovation).

Comme on pouvait s'y attendre, elles auraient été inférieures si une chaudière mazout avait été retenue (~5 CHF/m²/an). Cela pose la question de la pertinence d'investir doublement dans la rénovation de l'enveloppe pour diminuer fortement la consommation de chaleur ET dans les installations techniques performantes pour produire le peu de chaleur résiduelle. Un compromis pourrait sans doute être trouvé pour optimiser les investissements de manière globale et éviter le surinvestissement sur un site en particulier.

Contrairement au cas de la PAC où les charges de chauffage sont peu influencées par le prix de l'électricité, les scénarios avec la chaudière mazout montrent une très forte dépendance au cours du mazout : la rénovation de l'enveloppe permet en tous cas de maîtriser l'évolution des charges de chauffage, qui auraient vite pu exploser dans le futur.

III.D.4 Impact d'un redimensionnement des installations techniques sur les coûts

III.D.4.a Redimensionnement de la PAC et des sondes

Les systèmes de pompes à chaleur sont généralement très intensifs en investissement (les amortissements représentent 2/3 des coûts annuels à Polimmo). Un dimensionnement correct des installations est d'autant plus important, puisque les coûts d'investissement augmentent avec la puissance de l'installation.

A Polimmo, les pompes à chaleur et les sondes géothermiques ont été surdimensionnées d'un facteur 2 (cf. paragraphe II.C.2.a). Au paragraphe II.D.4, l'impact d'un redimensionnement de l'ensemble (PAC + sondes) d'un facteur 2 et 4 sur les performances énergétiques de l'installation a été estimé par simulation. Pour rappel :

- Le redimensionnement de l'ensemble d'un facteur 2 n'entraîne pas d'augmentation de la consommation d'électricité (9.2 kWh/m²/an) et le SPF4' se maintient à 2.9.
- Dans le cas d'un redimensionnement par un facteur 4 avec une coupure de la PAC lorsque la température d'injection dans les sondes descend en dessous de 0°C, la PAC ne couvre plus que 90% des besoins thermiques, le reste étant assuré par une résistance électrique. Il en résulte une augmentation de la consommation électrique à 11.5 kWh/m²/an et une diminution du SPF4' à 2.3.

Remarque : Pour simplifier, les pointes de puissance sont couvertes par une résistance électrique dans le scénario P/4. Pour améliorer la performance globale du système, on aurait pu considérer une autre énergie d'appoint comme le gaz ou le mazout, mais cela n'influencerait pas significativement les coûts.

Le Tableau 25 présente les hypothèses principales pour l'estimation des coûts dans le cas d'un redimensionnement des installations techniques (PAC + sondes géothermiques).

Tableau 25 : Hypothèses pour l'estimation des coûts dans le cas d'un redimensionnement de la PAC (+sondes géothermiques) d'un facteur 2 et 4

Dimensionnement PAC + sondes		réel 2x104 kW 11 sondes de 244 m	P / 2 104 kW 6 sondes de 244 m	P / 4 52 kW 3 sondes de 244 m	Remarques
Demande thermique	kWh/m ² /an	27.0	27.0	27.0	valeurs issues de la simulation ¹
Consommation d'électricité	kWh/m ² /an	9.2	9.2	11.5	valeurs issues de la simulation ¹
dont conso résistance d'appoint	kWh/m ² /an	0.004	0.005	3.4	valeurs issues de la simulation ¹
SPF4'		2.9	2.9	2.3	valeurs issues de la simulation ¹
Investissement PAC + sondes	CHF HT	291'219	194'146	97'073	valeurs réelles ajustées ²
Investissement total production de chaleur	CHF HT	377'059	264'029	151'000	autres postes=valeurs réelles
Amortissement production de chaleur	CHF HT/an	25'344	17'747	10'150	taux d'intérêt 3% sur 20 ans
Déductions fiscales	CHF HT/an	-889	-623	-356	valeur réelle (pro-rata)
Contrat exploitation	CHF HT/an	5'000	4'000	3'000	valeurs réelles ajustées ³
Achats d'électricité	CHF HT/an	5'714	5'720	7'100	Tarif Vitale Bleu 2013

¹Dans un souci de cohérence entre les résultats, les consommations d'énergie (thermique et électrique) retenues pour le bâtiment dans le cas de base (dimensionnement actuel) sont celles issues de la simulation et non les valeurs réelles mesurées lors du suivi.

²La réduction des investissements dans la PAC+sondes n'a pas été prise exactement proportionnelle à la réduction de puissance (facteur 1.5 pour une réduction de puissance par 2 et facteur 3 pour une réduction de puissance par 4).

³Une réduction de 20% a été considérée sur le contrat d'exploitation dans le cas d'une réduction de puissance par 2 et une réduction de 40% pour une réduction de puissance par 4.

La Figure 51 présente l'estimation des charges annuelles (CHF/m²/an) et du coût de l'énergie (ct/kWh) pour un redimensionnement de la PAC+sondes.

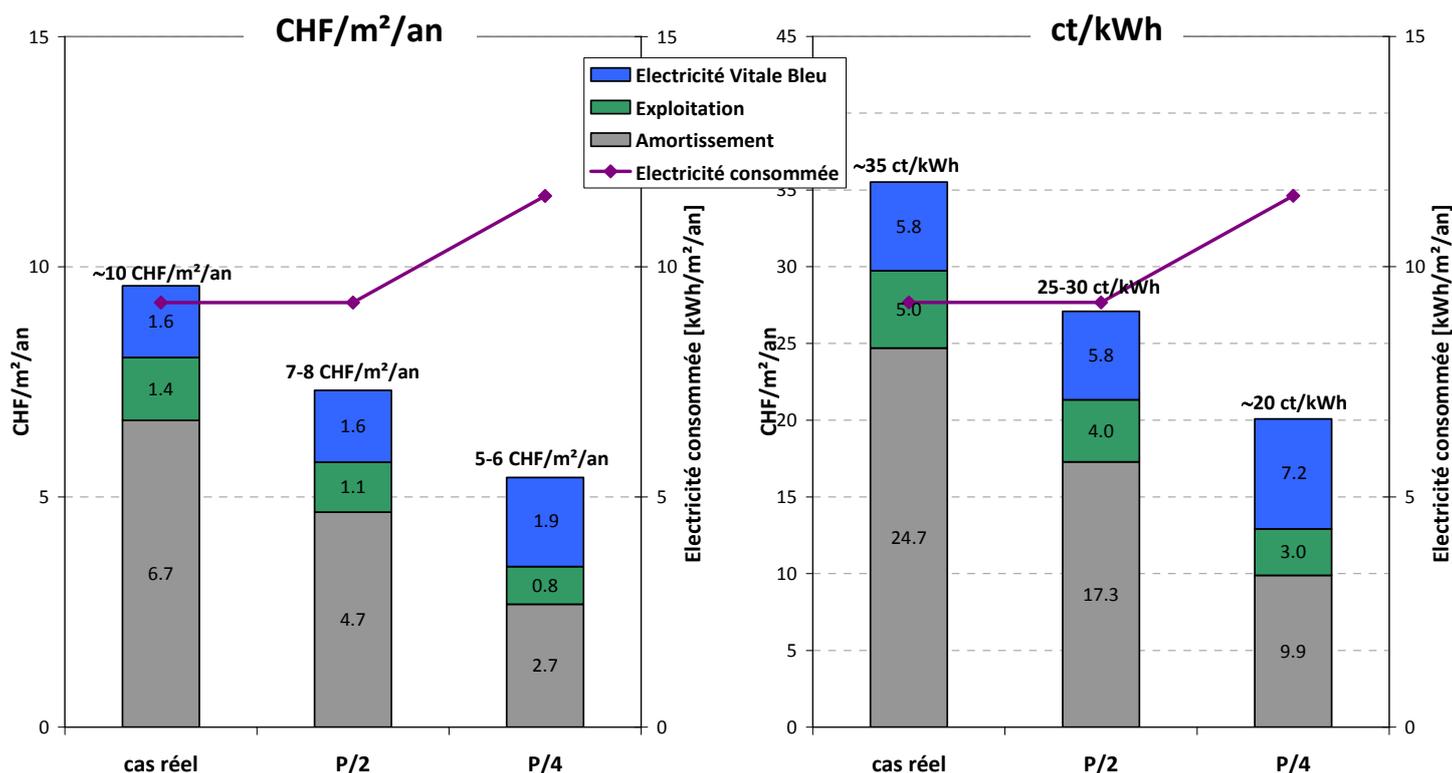


Figure 51 : Charges annuelles (CHF/m²/an) et coût de l'énergie (ct/kWh) estimés pour un redimensionnement de la PAC+sondes à 1/2 et 1/4 de la puissance actuelle

On note sur la Figure 51 que si l'installation avait été dimensionnée au plus juste, les coûts annuels de chauffage auraient été 25% plus faibles. Dans le cas d'une installation bivalente (production de chaleur en partie assurée par la PAC, complétée par une résistance électrique directe), les coûts seraient presque divisés par deux tandis que la consommation électrique augmenterait de 25% (pour rester <12 kWh/m²/an, ce qui est faible).

En se référant au scénario rénovation + chaudière mazout (cf. paragraphe III.D.3.a), on note que les charges annuelles de chauffage deviennent équivalentes à celles du scénario P/4 dès lors que le prix du mazout atteint 1.5 CHF/L (cf. Figure 50). Ce résultat montre l'intérêt de considérer des installations bivalentes (et non monovalentes) pour réduire les coûts d'investissement, tout en couvrant encore 85-90% de la production de chaleur par la PAC.

III.D.4.b Redimensionnement de la ventilation

La ventilation double-flux installée dans la surélévation a été dimensionnée selon les normes en vigueur (cf. paragraphe II.E.1.b). Cependant, ces normes préconisent des débits de dimensionnement bien supérieurs (facteur 4) à ce qui est nécessaire en pratique pour satisfaire aux préconisations de renouvellement d'air de la norme SIA 380/1 [SIA; 2009], soit un taux de 0.7 m³/m²/h en ventilation naturelle. Il en résulte deux phénomènes :

- une consommation électrique excessivement élevée si les ventilateurs fonctionnent en permanence à leur vitesse maximale (cf. paragraphe II.E.1.b)
- des coûts d'investissement élevés par rapport au débit réellement nécessaire

Un dimensionnement du monobloc au débit réellement nécessaire aurait permis d'optimiser le fonctionnement (au débit nominal) et les coûts de la ventilation à Polimmo. D'autre part, l'apport du puits canadien est limité par la

présence de la ventilation double-flux (double-emploi en hiver, cf. paragraphe II.E.1.eII.E.1.d) ainsi que par la possibilité de faire du rafraîchissement grâce à la PAC en été.

Dans la suite, nous proposons une analyse des coûts associés à une réduction du débit nominal par 3 par rapport au débit existant (4'000 m³/h) et sans puits canadien, selon les hypothèses présentées dans le Tableau 26 :

Tableau 26 : Hypothèses pour l'estimation des coûts dans le cas d'un redimensionnement de la ventilation d'un facteur 3, sans puits canadien

Dimensionnement ventilation		réel 4'000 m ³ /h puits canadien	redim 1'300 m ³ /h pas de puits canadien	Remarques
				fonctionnement à 1'000 m ³ /h dans les deux cas
Energie thermique produite	kWh/m ² /an	14.0	14.0	hyp : même énergie récupérée avec ou sans puits canadien
Consommation d'électricité	kWh/m ² /an	0.9	0.9	
COP annuel		30	30	
Investissement puits canadien	CHF HT	46'964	0	
Investissement monobloc	CHF HT	27'929	13'965	valeurs réelles ajustées ¹
Investissement total ventilation	CHF HT	163'841	92'897	autres postes=valeurs réelles
Amortissement ventilation	CHF HT/an	11'013	6'244	taux d'intérêt 3% sur 20 ans
Déductions fiscales	CHF HT/an	-386	-219	valeur réelle (pro-rata)
Contrat exploitation	CHF HT/an	4'000	2'800	valeurs réelles ajustées ²
Achats d'électricité	CHF HT/an	258	258	tarif Vitale Bleu 2013

¹La réduction des investissements dans le monobloc n'a pas été prise exactement proportionnelle à la réduction de débit (facteur 2 pour une réduction de débit par 3).

²Une réduction de 30% a été considérée sur le contrat d'exploitation dans le cas de l'installation de ventilation redimensionnée.

La Figure 52 présente l'estimation des charges annuelles (CHF/m²/an) et du coût de l'énergie (ct/kWh) pour un redimensionnement de la ventilation.

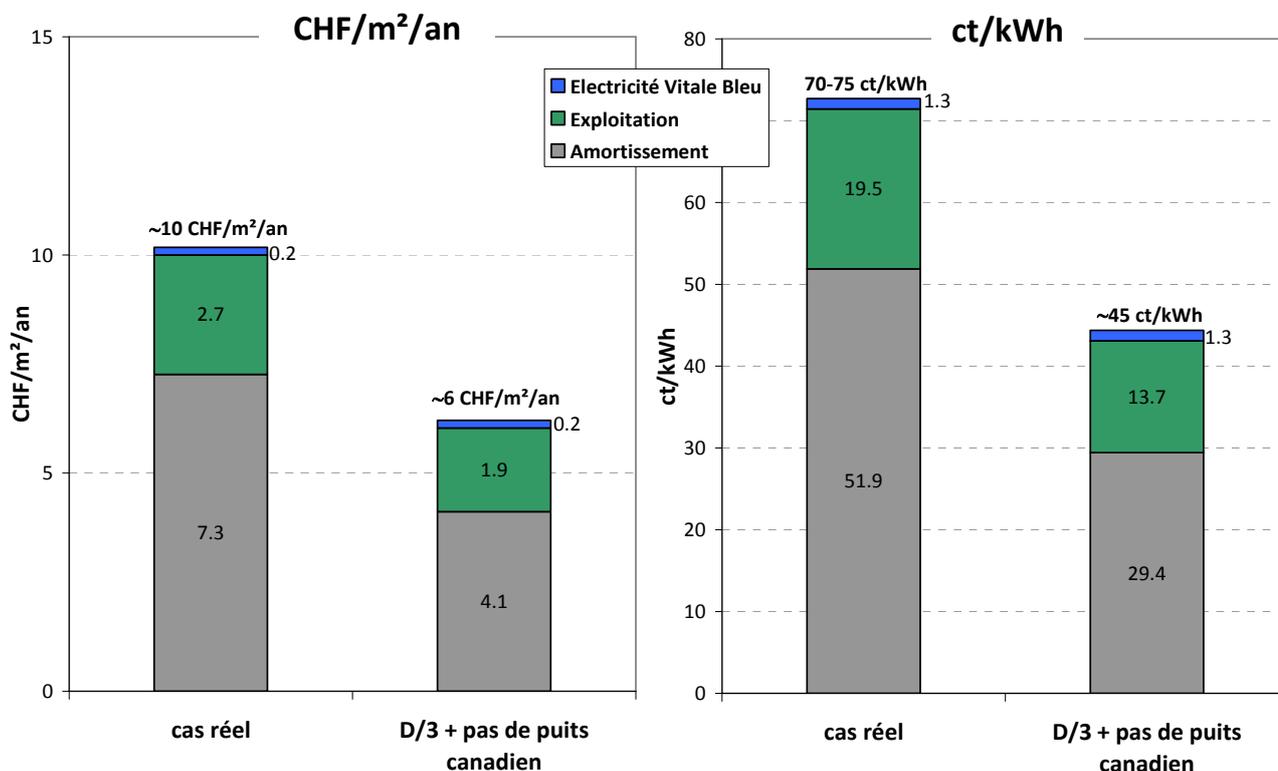


Figure 52 : Charges annuelles (CHF/m²/an) et coût de l'énergie (ct/kWh) estimés pour un redimensionnement de la ventilation à 1/3 du débit actuel et sans puits canadien

De la même manière que pour la PAC, le coût de l'énergie produite par la ventilation est essentiellement attribué aux coûts d'investissement : une diminution de 45% des coûts d'investissement dans la ventilation (réduction du débit + suppression du puits canadien) entraîne une diminution du coût de l'énergie quasiment du même facteur. A noter que la réduction de coût est aux 2/3 imputable à l'absence du puits canadien.

III.D.4.c Redimensionnement de la PAC et de la ventilation

La Figure 53 présente l'impact sur les coûts d'un redimensionnement conjoint de la PAC (P/4) et de la ventilation selon les scénarios exposés ci-dessus.

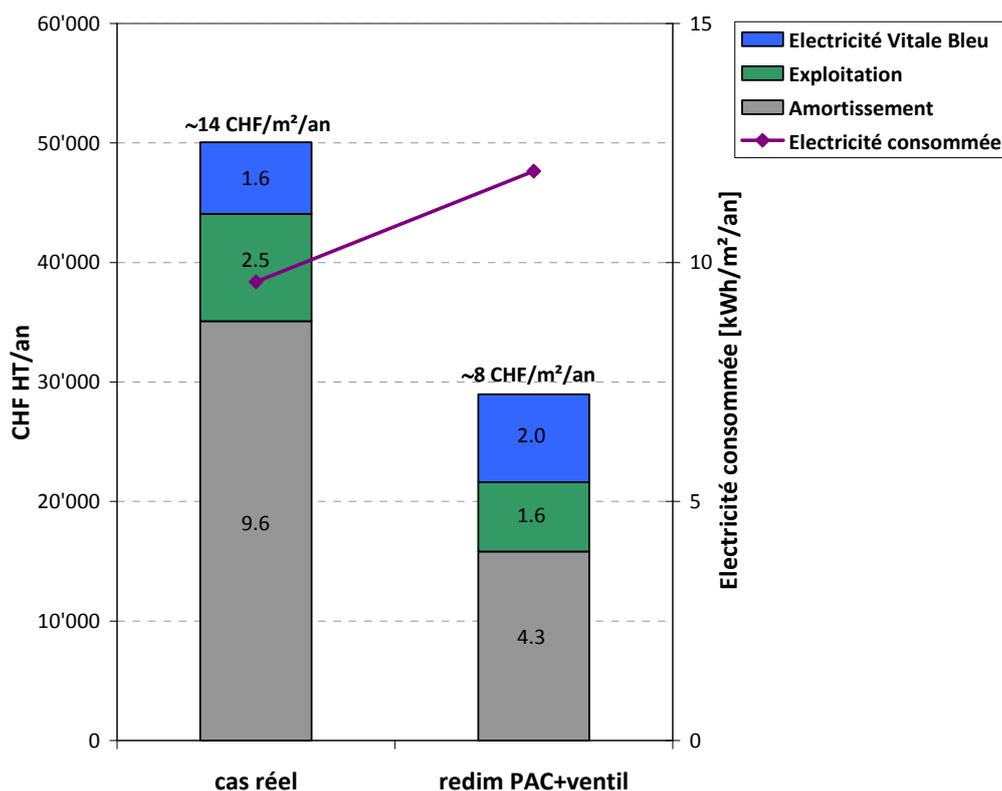


Figure 53 : Charges annuelles liées au chauffage et à la ventilation dans le cas réel et dans le cas d'un redimensionnement de la PAC+sondes d'un facteur 4 et de la ventilation d'un facteur 3 ainsi que la suppression du puits canadien

Ce nouveau dimensionnement entraîne une diminution des coûts annuels de plus de 40% pour une augmentation de la consommation d'électricité inférieure à 25% (12 kWh/m²/an contre ~10 dans le cas réel).

III.E Conclusion

En complément de l'analyse énergétique, une analyse économique de l'installation a été menée. Nous avons obtenu tous les éléments de coûts auprès du maître d'ouvrage. L'investissement total (y compris la rénovation de l'enveloppe et la surélévation) s'élève à presque 7 millions de CHF HT. La part allouée aux installations de production de chaleur est d'environ 400 kCHF, pour la ventilation 150 kCHF et pour la production et la distribution de froid 100 kCHF.

Les charges annuelles pour le chauffage et la ventilation s'élèvent à 14 CHF HT/m² pour une année moyenne, dont 70% pour l'amortissement des investissements, 18% pour le contrat d'exploitation et 12% pour l'électricité. Elles varient peu d'une année à l'autre car elles sont composées à près de 90% de coûts fixes. Le coût de la chaleur produite par la PAC est de 36 ct/kWh (70% d'amortissements, 15% de frais d'exploitation et 15% d'achats d'électricité), ce qui paraît élevé, mais tenant compte du fait qu'il y a peu de kWh à produire, on arrive à 10 CHF/m²/an. Pour la ventilation, le coût de la chaleur produite a beaucoup évolué entre le début et la fin du suivi, car avec la baisse des débits par 3, la quantité de chaleur produite par la ventilation a été divisée par 4 : il était de 22 ct/kWh avec les débits initiaux, mais dépasse les 70 ct/kWh à terme (dont seulement 2% pour l'électricité), ce qui revient à 10 CHF/m²/an (rapporté à la surface de la surélévation seulement). Ce coût est similaire à celui de la PAC, ce qui s'explique par le surdimensionnement important de l'installation de ventilation et la présence du puits canadien.

Nous avons également réalisé des simulations économiques pour d'autres situations typiques, telles que la situation sans rénovation et la situation avec rénovation de l'enveloppe mais chauffage au mazout. Il en résulte qu'au lieu des 10 CHF/m²/an actuels pour le chauffage à Polimmo, on aurait observé des coûts de 15 CHF/m²/an, qui dépasseraient les 20 CHF/m²/an si le prix du mazout atteint 1.5 CHF/L. Dans le cas d'une rénovation de l'enveloppe seule (en conservant un chauffage au mazout), les charges de chauffage auraient été d'environ 5 CHF/m²/an (6 avec le prix du mazout à 1.5 CHF/L). La rénovation de l'enveloppe permet clairement de maîtriser les charges de chauffage sur le long terme. Par contre, on peut se poser la question de la pertinence d'entreprendre à la fois une rénovation lourde sur l'enveloppe et l'installation d'équipements énergétiquement performants – comme une PAC géothermique – mais très gourmands en investissement pour produire si peu d'énergie.

L'effet d'un redimensionnement des installations techniques a également été étudié. Un redimensionnement de la PAC et des sondes d'un facteur 2 (=dimensionnement au plus juste) fait passer les charges de chauffage de 10 à 7-8 CHF/m²/an. Avec une installation bivalente avec un redimensionnement de la PAC et des sondes d'un facteur 4 (la PAC pouvant encore couvrir la moitié de la puissance maximale appelée), les charges de chauffages tombent à 5-6 CHF/m²/an, ce qui est équivalent aux charges de chauffage avec une chaudière mazout lorsque le prix du mazout aura atteint 1.5 CHF/L. A noter que la part des investissements dans ce cas-là est réduite à 50% du total (contre 70% dans le cas de base). Concernant la ventilation, un scénario sans puits canadien et une diminution par 3 du débit maximal conduit à des charges annuelles de 6 CHF/m² contre 10 à l'heure actuelle (les 2/3 de la réduction étant dus à l'absence de puits canadien). Enfin, une PAC redimensionnée d'un facteur 4 combinée à une ventilation redimensionnée aboutit à des charges annuelles de 8 CHF/m² contre 14 à l'heure actuelle, soit une réduction de plus de 40%.

Chapitre IV :

Recommandations générales concernant l'implémentation des pompes à chaleur

IV.A Enjeux futurs

Remarque préliminaire : Les recommandations proposées dans la suite ne sauraient être exhaustives : elles sont en substance tirées des observations réalisées sur des points particuliers à Polimmo. Elles visent essentiellement à atteindre de meilleures performances sur les installations équipées de PAC en général, tout en préservant leur durabilité.

IV.A.1 Amélioration des performances des PAC

Les PAC actuellement disponibles sur le marché offrent déjà de bonnes performances et une fiabilité avérée. Les performances annoncées par les constructeurs sont en général bien reproduites en situation réelle (cf. Figure 29). Un travail de développement conséquent est fait dans la recherche d'une amélioration continue de ces performances d'un point de vue thermodynamique (optimisation des cycles, des fluides, des composants), et pour étendre les gammes de température de fonctionnement des machines. Cependant, les technologies sont déjà matures et on ne peut pas s'attendre à une rupture technologique majeure. A notre avis, l'enjeu fort est plutôt une amélioration de l'intégration des PAC dans les systèmes pour optimiser leurs performances en conditions réelles.

IV.A.2 Amélioration de l'intégration des PAC dans les systèmes

La phase de conception doit être particulièrement soignée car contrairement aux systèmes conventionnels, elle conditionne le fonctionnement de l'installation sur toute sa durée de vie, et les erreurs de conception peuvent difficilement être réparées par la suite.

IV.A.2.a Architecture du système

Il existe de nombreuses configurations hydrauliques pour l'intégration d'une pompe à chaleur dans un système. Le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP) propose 7 schémas standards¹⁵ pour les installations individuelles selon l'application. Pour un œil non averti, il peut être difficile de savoir lequel retenir alors même que ce choix est important pour le fonctionnement de l'installation.

Dans le cas de Polimmo, le schéma de principe retenu est celui qui est fourni par défaut par le constructeur, et qui assure une bonne fiabilité au système mais pas des performances techniques optimales. En effet, l'accumulateur est dans ce cas connecté en série avec la PAC, ce qui oblige à le charger / décharger alors qu'il serait plus intéressant en termes de température de production que la PAC puisse fournir directement de la chaleur au circuit

¹⁵ http://www.fws.ch/tl_files/download_f/technique/schema_standard_cours1-7.pdf, consulté en juillet 2014

de chauffage. On a vu également que le fait de prévoir un circuit en eau glycolée à l'aval de la PAC1 pour la production de froid estivale induisait une température de production plus élevée, alors même que ce circuit n'était pas nécessaire. Au final, l'architecture du système est telle que la PAC produit à une température de 10K supérieure à ce que demande la distribution (cf. paragraphe II.C.2.b). Ainsi, les choix de conception devraient être particulièrement réfléchis et leur impact bien compris pour limiter les erreurs pénalisantes pour le fonctionnement de l'installation.

Un point important est la réalisation du découplage hydraulique entre la PAC et le circuit de distribution de chauffage. Ce découplage est généralement nécessaire car le débit de circulation sur le condenseur de la PAC doit être maintenu à une valeur donnée par sécurité pour la machine, et est souvent plus élevé que le débit sur le circuit de chauffage, qui dépend des caractéristiques de la distribution. Cependant, il est conseillé que ces débits soient du même ordre de grandeur. Par exemple, le guide édité dans le cadre du programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art du Grenelle Environnement 2012 » [RAGE; 2013b] recommande un surdébit côté condenseur PAC inférieur à 30% dans le cas d'un schéma type Polimmo. A Polimmo, les débits de distribution sont élevés mais la recirculation au niveau de la vanne 3-voies qui gère la température de départ de la distribution est importante car la température dans le ballon est supérieure à la température demandée par la distribution (cf. paragraphe II.C.2.b). Au final, il y a donc un mélange et une recirculation importants au niveau du ballon, avec de l'eau au retour au condenseur à une température élevée puisqu'en grande partie issue du ballon et non des retours de la distribution.

Il est donc important de bien connaître les débits et écarts de température sur la distribution existante (ou les soigner sur une installation neuve) au moment de la conception de l'installation.

IV.A.2.b Efforts sur la source chaude

Généralement, des efforts importants (techniques et économiques) sont faits pour améliorer la source froide de la PAC, tandis que peu d'attention est portée côté source chaude, à savoir la distribution de chauffage dans le bâtiment. 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, la performance de la PAC étant essentiellement affectée par la différence de température entre la source chaude et la source froide, et les efforts sur la source chaude peuvent généralement être réalisés à coût moindre.

Un équilibrage hydraulique du circuit de chauffage devrait être réalisé systématiquement au moment de la conception de l'installation, pour pouvoir abaisser les débits de distribution et ainsi obtenir des retours plus froids, ce qui permettra à la PAC de produire à plus basse température. Les radiateurs étant surdimensionnés sur la plupart des installations existantes par rapport aux régimes de température habituels, il est souvent possible de diminuer les températures de distribution sans toucher aux émetteurs. Dans certains cas, il peut être plus avantageux économiquement de remplacer les radiateurs existants par des émetteurs basse température que d'investir dans un nombre élevé de sondes géothermiques pour augmenter la température de la source froide. Il est cependant vrai qu'en termes d'image, les efforts réalisés côté source chaude sont moins facilement valorisables que ceux réalisés sur la source froide, alors même qu'on peut atteindre la même performance énergétique à plus bas coût.

IV.A.2.c Dimensionnement des éléments du système

La qualité du dimensionnement de l'installation influence à la fois le fonctionnement et les coûts. Les principaux éléments du système à dimensionner sont :

- La PAC
- La source froide
- L'accumulateur

i. PAC

Nous avons observé à Polimmo que dans le cas d'une rénovation lourde de l'enveloppe, il était difficile de connaître a priori la puissance maximale appelée sur l'installation, ce qui conduit à surdimensionner la PAC par sécurité. Si le surdimensionnement a peu d'influence dans le cas des chauffages traditionnels comme les chaudières gaz ou mazout, il s'agit d'un point critique dans le cas des pompes à chaleur, que ce soit pour des raisons techniques (cycles courts, préjudiciables pour la durabilité) ou économiques (l'investissement représente les 2/3 du coût de la chaleur produite).

Pour des raisons pratiques, les PAC sont généralement prévues pour un fonctionnement monovalent. Cependant, un fonctionnement bivalent permettrait de nuancer le risque de surdimensionnement puisque les puissances de pointe sont assurées par le système d'appoint (résistance électrique ou chaudière traditionnelle), qui fournit seulement une part marginale de l'énergie (typiquement 10% pour un dimensionnement de la PAC à 50% de la puissance maximale). Le recours à une installation bivalente est indiqué dans le cas d'installations de taille significative comme à Polimmo ou s'il y a une demande en ECS (les pointes de température pour la production de l'ECS pouvant être produites par le système d'appoint et ainsi décharger la PAC).

D'autre part, selon la taille de l'installation, une PAC à inverter peut être envisagée. Cette technologie de variation de la vitesse du compresseur permet de moduler la puissance fournie selon la demande thermique au lieu de fonctionner en tout ou rien comme les PAC classiques. Le surcoût est significatif donc les PAC à inverter ne sont pas pertinentes sur des installations de petite taille, par contre sur des installations de la taille de Polimmo, on peut dans certains cas s'affranchir de la présence d'un accumulateur. D'après les premières études, les performances des PAC à inverter ne seraient pas significativement affectées par le fonctionnement à charge partielle [RAGE; 2013a]. Ce qui n'est d'ailleurs pas le cas du fonctionnement d'une PAC étagée, puisque comme on le voit sur la Figure 29, le fonctionnement à un seul compresseur présente un COP inférieur de 0.7 par rapport au fonctionnement à deux compresseurs (à même ΔT).

ii. Sondes géothermiques

On a généralement dimensionné à tort par rapport à une puissance maximale tirée des sondes de 50 W/m. La démarche de dimensionner en puissance et non en énergie est une habitude héritée des systèmes traditionnels pour lesquels la qualité du dimensionnement importe peu. Dans le cas des PAC, il serait plus pertinent de réfléchir en termes d'énergie et non de puissance (ou au moins les deux). Ainsi, d'après André Freymond (GSP), la valeur de dimensionnement à retenir pour un système monovalent est de 80 kWh/m sonde/an, ce qui correspond à 2'000 heures de fonctionnement équivalent à une puissance maximale extraite de 40 W/m sonde. Suivant la qualité du sous-sol et pour des champs de sondes, cette valeur diminue encore.

Le surdimensionnement des sondes géothermiques ne pose pas de problème technique (au contraire il engendre des températures en sortie de sondes élevées comme on le voit sur la Figure 26), mais seulement un problème économique. L'OCEN pousse d'ailleurs à surdimensionner les sondes pour éviter l'utilisation de glycol. Comme nous l'avons déjà mentionné, il peut être plus pertinent de limiter l'investissement dans les sondes pour se concentrer sur une optimisation de la distribution de chauffage.

iii. Accumulateur

L'accumulateur permet le découplage hydraulique entre le circuit condenseur de la PAC et le circuit de chauffage. Son dimensionnement n'est pas évident et dépend des débits respectifs sur les deux circuits, de la puissance de la PAC et éventuellement de la puissance demandée par le chauffage. D'après André Freymond (GSP), on considère qu'une valeur de 35 L/kWth est correcte et permet de limiter les courts cycles. Dans le cas de Polimmo où le sous-dimensionnement est manifeste (17 L/kWth avec une seule PAC en fonctionnement), on observe une vingtaine de cycles de 10-20 min par jour, ce qui est préjudiciable pour les performances et la durabilité (moins de cycles mais plus longs seraient préférables).

IV.A.3 Vie de l'installation

IV.A.3.a Importance du suivi

Les installations de PAC sont généralement très fiables et ne présentent qu'exceptionnellement des pannes de fonctionnement. Elles fonctionnent sans problème avec les paramètres programmés par défaut (c'était le cas de l'installation de Polimmo avant le début du suivi). Par contre, contrairement à une chaudière traditionnelle dont les performances dépendent essentiellement de sa construction, dans le cas d'une PAC un suivi fin et régulier de son fonctionnement est primordial pour optimiser ses performances.

IV.A.3.b Stratégie de régulation

i. Gestion des températures de production

Le point essentiel en termes de régulation est la bonne gestion des températures de production, au plus proche des températures demandées par la distribution (abaissées au maximum par le travail réalisé au préalable sur la distribution) pour optimiser les performances. Ce n'était pas le cas dans la régulation par défaut à Polimmo, puisqu'initialement il n'y avait pas de courbe de chauffe réglée sur le ballon, qui était à la même température toute l'année quelle que soit la température demandée par la distribution. D'autre part, la programmation d'un ralenti de nuit a permis de limiter la température de production durant les heures creuses. Le problème de produire la chaleur au plus proche de la température nécessaire est récurrent sur les installations de PAC : sur une autre installation que nous avons suivie (PAC + capteurs solaires thermiques) baptisée « Solarcity » [Mermoud et al.; 2014], nous avons noté que les 2/3 de la chaleur utilisée pour le chauffage (~30°C) étaient issus d'une surproduction d'ECS à 60°C, ce qui péjore les performances de la PAC.

Selon la configuration hydraulique et le type de machine, on peut avoir ou non un contrôle direct sur la température de production. Dans tous les cas, des retours les plus froids possibles au condenseur de la PAC (et donc de la distribution) favoriseront des températures de production basses.

ii. Limites dans les potentialités d'optimisation de la régulation

Selon le type de machine et la politique du constructeur, l'accès à la régulation est plus ou moins large. Dans le cas de Polimmo par exemple, certains paramètres sont verrouillés par le constructeur pour des raisons de sécurité et d'autre part on est limité par la configuration hydraulique de l'installation, qui ne permet pas à l'utilisateur de fixer une température de consigne pour la production de chaleur.

La régulation d'une installation équipée d'une PAC est toujours plus complexe que celle d'une chaudière traditionnelle, avec parfois différents modes de fonctionnement (surtout s'il y a également production d'ECS). Il est souvent difficile de la comprendre dans son intégralité. Au cours des essais réalisés dans le cadre du suivi en collaboration avec l'entreprise Tech Building, dans plusieurs cas une action sur un paramètre a engendré une répercussion inattendue sur le fonctionnement de la PAC. Par exemple, suite à deux interventions différentes sur la courbe de chauffe du ballon, dans un cas la 2^{ème} PAC ne s'est plus mise en marche et dans le 2^{ème} cas la PAC1 ne s'enclenchait plus qu'à deux compresseurs. Nous avons attribué ces phénomènes à des processus internes qui gouvernent le fonctionnement de la PAC mais auxquels nous n'avons pas accès.

Au contraire à Solarcity [Mermoud et al.; 2014], le concepteur a souhaité avoir une liberté totale sur la régulation, ce qui a abouti à une régulation complexe avec 15 modes de fonctionnement différents et des priorités qui s'appliquent. Cette complexité rend difficile la transmission de l'installation à une entreprise de maintenance ni une éventuelle standardisation du concept : il faut probablement trouver le bon compromis entre liberté d'accès et complexité de la régulation.

IV.A.4 Performances

IV.A.4.a Performances techniques

i. Pertinence du SPF comme indicateur

Les performances techniques d'un système de PAC sont généralement caractérisées par le *Seasonal Performance Factor* (SPF). Les définitions sont multiples dépendant de si on considère ou non l'électricité consommée par les auxiliaires et la distribution, les pertes de stockage, l'énergie d'appoint...

L'objectif d'un tel indicateur est généralement de comparer les installations entre elles. Au-delà de la nécessité de considérer les mêmes frontières de calcul pour le calcul du SPF, la question est de savoir si les installations sont effectivement comparables. Si on considère la nature de la prestation, une installation qui produit seulement du chauffage (=à température moyenne) à un immeuble tertiaire tel que celui de Polimmo peut-elle être comparée à une installation qui fournit du chauffage et de l'ECS (=à haute température) à un immeuble résidentiel ? La comparaison semble difficile. De la même manière, la taille de l'installation (individuelle ou collective) a son importance.

La structure de la demande thermique influe également sur le SPF. Un immeuble résidentiel dont l'enveloppe a été particulièrement soignée présentera une faible demande de chauffage, et par là même la part d'ECS (=à haute température) à fournir dans la demande thermique totale sera plus élevée, comme c'est le cas à Solarcity [Mermoud et al.; 2014] (30% chauffage-70% ECS). De manière logique, comme une grande part de la chaleur doit être produite à haute température, le SPF à Solarcity est pénalisé par rapport à une demande thermique classique (70% chauffage-30% ECS) : paradoxalement, une enveloppe thermique moins performante aurait favorisé le SPF... mais pas la consommation électrique annuelle. Dans un tel cas, le SPF seul n'est pas un indicateur

pertinent, et il convient par exemple de lui adosser la consommation électrique annuelle par m² pour nuancer sa faible valeur. A Polimmo par exemple, le SPF est de 3 (ce qui est une valeur modeste), mais la consommation électrique est inférieure à 10 kWh/m²/an, ce qui est faible : la performance globale de l'installation est bonne.

ii. Considérer le système dans son ensemble

On se focalise généralement sur les performances de la PAC en elle-même mais il y a également d'autres éléments importants à considérer :

- Les auxiliaires :
 - la consommation des pompes amont et aval de la PAC n'est pas négligeable et représente environ 10% de la consommation électrique totale annuelle (11% à Polimmo et 10% à Solarcity [Mermoud et al.; 2014]) ;
 - les circulateurs de distribution sont souvent surdimensionnés et fonctionnent à des débits trop élevés : rappelons que la consommation électrique d'une pompe diminue avec le cube de son débit, et même si les circulateurs de distribution sont de petite taille, ils fonctionnent en permanence, parfois même en été en l'absence de demande de chauffage ;
- Les consommations parasites, à titre d'exemple :
 - à Polimmo, la PAC se met en marche en été durant la nuit lorsque les conditions de température sont réunies pour produire du chaud ou de froid alors qu'il n'y a pas de demande : ces fonctionnements inutiles peuvent facilement représenter 10% de la consommation électrique annuelle ;
 - à Solarcity [Mermoud et al.; 2014], un réglage constructeur par défaut maintenait le carter en température durant les périodes de veille de la PAC, menant à une consommation électrique de 100 W en continu représentant presque 1 kWh/m²/an ; ce problème a été détecté grâce au suivi et cette consommation a pu être divisée par 10 ;
- Autres éléments du système
 - la ventilation : durant la 1^{ère} année de suivi à Polimmo, le renouvellement d'air était inutilement élevé et la consommation électrique de la VDF a dépassé celle de la PAC (13 kWh/m² contre 10 pour la PAC), ce qui paraît aberrant ; après une diminution des débits par 3 couplée à un arrêt nocturne, la consommation électrique de la VDF a été ramenée en dessous de 1 kWh/m²/an ;

Ces quelques points sont loin d'être exhaustifs mais illustrent l'importance d'optimiser le système dans son ensemble au lieu de s'intéresser uniquement à la PAC. Ces actions simples à mettre en œuvre (notamment en étant vigilant au fonctionnement estival intempestif des installations) à coût quasi nul permettent souvent d'économiser des quantités d'énergie significatives.

IV.A.4.b Performances économiques

i. Structure des coûts

Les systèmes de PAC sont caractérisés par des investissements élevés (dans la source froide et dans la machine elle-même) : l'amortissement des investissements représente de l'ordre de 2/3 du coût de la chaleur produite. Les coûts d'exploitation sont également plus élevés que pour les systèmes traditionnels, en lien avec la régulation complexe et la nécessité de suivi pour optimiser les performances. Au total, les coûts fixes représentent généralement 80-90% des coûts totaux annuels, ce qui ne pousse pas aux économies d'énergie (côté bâtiment) ni à l'optimisation des installations.

ii. Quel indicateur économique ?

L'indicateur économique usuel est le coût de la chaleur produite (ct/kWh). Dans le cas où il y a peu de kWh consommés comme à Polimmo, le coût spécifique est élevé : ~35 ct/kWh. Il peut alors être plus pertinent de raisonner en charges de chauffage (CHF/m²/an), ce qui permet une comparaison plus aisée avec d'autres situations. A Polimmo par exemple, les charges de chauffage sont de l'ordre de 10 CHF/m²/an, soit moins qu'avant la rénovation avec l'ancienne chaudière mazout.

Cet indicateur a aussi l'avantage de peu dépendre de la consommation de chaleur puisque les achats d'électricité représentent seulement une part marginale des coûts (~15% à Polimmo), tandis que le coût de la chaleur produite variera beaucoup d'une année à l'autre surtout dans le cas où la consommation d'énergie spécifique est faible.

IV.A.4.c Optimisation technico-économique

La performance économique va toujours à l'encontre de la performance technique, ce qui nécessite de trouver un compromis acceptable si on vise une standardisation à grande échelle des solutions. A notre sens, les enjeux sont différents dans l'existant ou dans le neuf :

- Bâtiments existants (=demande thermique élevée) : l'enjeu reste d'améliorer les performances techniques du système de PAC pour maîtriser les consommations électriques.
- Bâtiments neufs ou fortement rénovés (=demande thermique faible) : les consommations électriques sont déjà faibles (10 kWh/m²/an à Polimmo), et une optimisation technique ne conduirait pas à une économie majeure d'électricité (maximum 1-2 kWh/m²/an). Il paraît plus pertinent de chercher à optimiser les coûts pour éviter la « double-peine » : investissement élevé dans l'enveloppe + investissement élevé pour produire le peu d'énergie qui reste nécessaire. Cela implique probablement un compromis sur la technique (moins d'efforts sur la source froide (air au lieu de sondes géothermiques ?) tout en travaillant plus sur la source chaude (car à plus bas coût)).

Le recours à des installations bivalentes couplées à une chaudière traditionnelle peut également permettre de réduire les coûts de manière substantielle (-40% à Polimmo cf. paragraphe III.D.4.a), pour une baisse des performances techniques acceptable : pour une installation dimensionnée correctement, 85-90% de la chaleur est encore produite par la PAC. Il faut cependant accepter que l'installation ne soit plus « 100% renouvelable ». D'autre part, la bivalence réduit le risque de surdimensionnement de la PAC puisqu'il y a une chaudière d'appoint pour prendre le relais durant les périodes de pointe.

IV.B Diffusion des bonnes pratiques

Il existe beaucoup de savoir-faire en Suisse et en Europe concernant l'implémentation et l'optimisation des pompes à chaleur. Il est diffusé sous la forme de formations, manuels, normes, rapports d'études, colloques. L'Annexe 8 présente quelques pistes pour rechercher de l'information, sans pour autant prétendre être exhaustive.

Malgré l'abondance de connaissances disponibles, nous avons noté au cours de ce travail que le savoir-faire existant en Suisse n'était pas uniformément transmis, ce qui a abouti à une installation qui n'était pas optimisée en termes de conception et d'exploitation. En effet, la difficulté réside surtout dans la diffusion de ces bonnes pratiques : comment toucher un maximum d'intervenants ? quel est le rôle des différents acteurs ?

A l'heure actuelle, il n'existe pas de garde-fous techniques et économiques pour éviter les erreurs de conception, telles que des normes contraignantes ou des subventions adossées à des critères de performances par exemple. La filière doit donc encore s'organiser et les différents acteurs pourraient avoir un rôle à jouer pour favoriser une meilleure diffusion des bonnes pratiques :

- Propriétaires / Maîtres d'ouvrages : volontaires pour s'engager dans l'efficacité énergétique, mais ils n'ont pas toujours l'information nécessaire pour appréhender les enjeux liés aux PAC.
- Concepteurs : les PAC diffèrent des chaudières traditionnelles sur de nombreux points (sensibilité à l'architecture hydraulique et aux niveaux de température dans le système, importance du dimensionnement), et on ne peut que trop recommander que tout concepteur d'installations PAC ait suivi une formation spécifique.
- Constructeurs : actuellement plus dans l'optique d'assurer une bonne fiabilité, ils connaissent parfaitement leurs machines et pourraient avoir un rôle de conseil auprès des concepteurs sur la façon d'intégrer leur PAC dans le système et de gérer la régulation pour optimiser les performances.
- Exploitants : contrairement aux installations traditionnelles, les PAC nécessitent un suivi régulier sur toute leur durée de vie. Les stratégies de régulation sont autrement plus complexes que celles des chaudières classiques, et nécessitent de l'expérience voire une formation spécifique pour optimiser les performances et préserver la durée de vie des installations.
- OCEN / SIG : l'OCEN impose des exigences de conception pour les nouvelles installations de PAC qui répondent aux critères pour prétendre aux subventions¹⁶ : un dispositif de subventionnement plus systématique permettrait d'imposer des exigences à l'ensemble des installations, notamment sur la qualification du concepteur de l'installation (en demandant par exemple une attestation de formation). Les SIG, dans le cadre du programme « chaleur renouvelable » d'eco21, rémunèrent au maître d'ouvrage le CO₂ économisé par l'installation d'une PAC¹⁷, ce qui revient à favoriser les bonnes performances. A noter que ces subventions s'adressent essentiellement aux particuliers.
- Filière (associations faitières / professionnelles) : les organismes comme le GSP ont un rôle primordial à jouer dans la diffusion de l'information, ce qu'ils font déjà au travers de nombreuses formations spécifiques type « Partenaire GSP certifié » (70 personnes certifiées depuis 2009), de la mise à disposition de documents d'appui en téléchargement sur leur site internet ou de l'organisation de colloques d'information.

¹⁶ http://ge.ch/energie/media/energie/files/fichiers/documents/cbe_synthesecriteres_15032014_v2.pdf, consulté en juillet 2014

¹⁷ <http://www.eco21.ch/eco21/particuliers/solution-chaleur-renouvelable.html>, consulté en juillet 2014

Le GSP est également actif dans le développement de modules standardisés « PAC système-module »¹⁸, conçus pour limiter le risque d'erreurs de conception et d'installation et ainsi garantir une qualité conforme aux attentes de l'utilisateur.

- OFEN : favorisent et financent la recherche et le développement dans le domaine des PAC, ainsi que la diffusion de ces nouvelles connaissances au moyen de rapports ou de colloques.
- Milieux académiques : leur apport se situe dans la recherche pour l'amélioration des performances des PAC d'une part, et dans la réalisation de retours d'expériences en situation réelle tels que celui-ci d'autre part.

¹⁸ <http://www.fws.ch/pac-systeme-module.html>

IV.C Conclusion

Au-delà de l'amélioration des performances des machines (qui sont déjà très bonnes), les enjeux futurs résident dans une meilleure intégration des PAC dans les systèmes. Certains points sont régulièrement négligés, en particulier les aspects hydrauliques et les niveaux de température dans le système. A Polimmo, la configuration hydraulique est limitante et les choix de conception (PAC en série avec le ballon de stockage) conditionnent le fonctionnement de l'installation à vie. En pratique il s'agit de déterminer comment faire au mieux le découplage hydraulique entre circuit PAC et circuit de distribution. De manière générale, peu d'efforts sont réalisés côté source chaude par rapport à ceux qui sont portés sur la source froide, alors même que les effets sont symétriques sur les performances. Dans un 1^{er} temps, un équilibrage du circuit de chauffage est impératif pour pouvoir diminuer les débits de distribution et obtenir des retours les plus froids possible. Les températures de distribution doivent être diminuées au maximum, et dans certains cas une action sur les émetteurs de chaleur peut éviter un surinvestissement dans une bonne source froide, à performances égales.

De manière générale, une PAC ne doit pas être traitée comme une chaudière gaz, ni dans la conception, ni dans l'exploitation : certains aspects qui ne sont pas décisifs pour les installations traditionnelles sont essentiels pour les PAC. Citons par exemple l'architecture du système et notamment les niveaux de température qui en découlent (on a vu à Polimmo l'effet de la présence d'un échangeur intermédiaire inutile). Le soin à apporter dans le dimensionnement est un autre élément important : sachant que l'amortissement des investissements représente plus des 2/3 du coût total dans le cas d'une PAC (alors qu'il est minime dans le cas d'une chaudière conventionnelle), on comprend l'importance de dimensionner correctement les installations. Enfin, l'importance d'une exploitation fine est à souligner : une PAC non suivie va probablement fonctionner, mais ses performances ne seront pas optimisées. En particulier une bonne gestion des températures de production et de distribution est à recommander.

Dans l'optique d'une diffusion des PAC à large échelle, une optimisation technico-économique est à viser mais les enjeux sont différents dans le neuf et dans l'existant. Dans les bâtiments existants, qui présentent une demande de chaleur élevée, il est primordial d'optimiser les performances techniques pour contenir la consommation électrique. En marge des performances de la PAC, il est pertinent de considérer le système dans son ensemble : certaines consommations inutiles peuvent être facilement maîtrisées, comme celles liées à un fonctionnement estival intempestif ou une surventilation des locaux. Dans le cas des bâtiments neufs ou fortement rénovés, qui présentent une demande de chauffage faible, une optimisation technique ne conduira pas à une réduction significative de la consommation électrique, déjà faible. Une optimisation économique peut être plus pertinente puisque les investissements représentent les 2/3 du coût total de la chaleur. Faire un compromis sur la technique permet d'éviter la double peine : fort investissement dans l'enveloppe ET dans les installations techniques pour produire le peu d'énergie nécessaire au bâtiment. L'enjeu énergétique n'est pas forcément élevé dans le sens où les consommations électriques sont de toutes manières raisonnables. Les solutions peuvent résider dans le choix d'une source froide moins performante (air au lieu de sondes géothermiques) tout en optimisant les températures côté source chaude, ou alors le recours à une installation bivalente pour limiter le montant des investissements.

En tout état de cause, il existe beaucoup de savoir-faire en Suisse et en Europe mais il est aujourd'hui impératif de faciliter la diffusion des bonnes pratiques pour faire évoluer les habitudes de travail issues des installations conventionnelles. Renforcer le rôle et les compétences respectifs des différents acteurs de la filière permettra d'améliorer les performances techniques et économiques de l'ensemble des installations de PAC.

Conclusion et perspectives

Une analyse complète du bâtiment Polimmo, rénové au standard Minergie et équipé de deux pompes à chaleur géothermiques, a été réalisée sur deux années de fonctionnement. Les aspects énergétiques et économiques ont été étudiés.

Le suivi a montré que la rénovation a permis de diviser par 4 la demande de chauffage du bâtiment, la portant à 27 kWh/m²/an soit une valeur proche de ce qui est observé aujourd'hui sur des bâtiments Minergie neufs. La consommation électrique globale pour le chauffage et la ventilation est de l'ordre de 10 kWh/m²/an, ce qui reste faible. L'analyse du fonctionnement des PAC a mis en évidence un SPF global de 2.9 (3.4 si on exclut la consommation des auxiliaires), ce qui est dans la fourchette basse des valeurs qu'on trouve dans la littérature. Cette valeur est modeste compte tenu de la qualité de la source froide (sondes géothermiques avec une température de sortie de 12-13°C toute l'année) et du fait qu'il n'y pas de production d'eau chaude sanitaire (soit de la chaleur à haute température). Elle s'explique par les niveaux de température dans le système : la PAC produit de la chaleur à 10-15 degrés de plus que ce qui est demandé par la distribution, ce qui dégrade ses performances. Ce phénomène trouve différentes explications : (i) la configuration hydraulique du système : la connexion de la PAC en série avec le ballon de stockage (sans possibilité de distribution directe) implique une température dans le ballon toujours légèrement plus élevée qu'à la distribution (ii) la présence d'un échangeur intermédiaire sur le circuit aval de la PAC avec un circuit en eau glycolée pour la production de froid en été : cet échangeur induit une perte de température de quelques degrés, que la PAC doit compenser en produisant plus chaud (iii) les retours élevés de la distribution : la température à la sortie du condenseur de la PAC est en fait conditionnée par la température à l'entrée du condenseur de la PAC (différence de température constante), et donc par la température de retour de la distribution : plus elle est élevée, plus la température de production sera élevée. Ces différents facteurs sont tels qu'il sera difficile d'optimiser encore le fonctionnement de l'installation de PAC.

Parallèlement à l'étude de la PAC, nous avons analysé le fonctionnement de la ventilation double-flux, installée dans la surélévation du bâtiment et couplée à un puits canadien. Le suivi a révélé une consommation électrique excessive la 1^{ère} année de 13 kWh/m² (supérieure à celle de la PAC de 10 kWh/m²), qui s'explique par un taux de renouvellement d'air très élevé. La VDF avait initialement été réglée à son débit maximal, qui était proche du débit de dimensionnement recommandé par les normes. Au cours de la 2^{ème} année du suivi, le débit de ventilation a été divisé par 3.6 pour atteindre les préconisations habituelles en fonctionnement normal : il s'en est suivi une division par 12 des consommations électriques. Notons que les normes poussent à un surdimensionnement important des installations de ventilation, ce qui entraîne des consommations électriques élevées si la ventilation est réglée par défaut sur son débit maximal. Les performances de la VDF sont classiques et le puits canadien joue bien son rôle d'amortissement des pointes, mais il fait double emploi avec la VDF en hiver.

L'analyse économique a révélé des charges de chauffage et de ventilation de 14 CHF HT/m²/an, dont 70% pour l'amortissement des investissements, 18% pour les frais d'exploitation et seulement 12% pour l'électricité, soient près de 90% de coûts fixes. Le coût de la chaleur produite par la PAC est de 36 ct/kWh et par la ventilation de plus de 70 ct/kWh après la réduction des débits par 3. Le coût rapporté au m² est similaire pour la PAC et la ventilation (10 CHF/m²/an, mais dans le cas de la ventilation limité à la surface de la surélévation). Sans la rénovation et avec

la chaudière mazout, les coûts auraient été de 15 CHF/m²/an aux prix actuels du mazout et auraient dépassé les 20 CHF/m²/an si le prix du mazout atteignait 1.5 CHF/L. Dans le cas d'une rénovation de l'enveloppe où on aurait conservé la chaudière mazout, les coûts auraient plutôt été de 5 CHF/m²/an (6 CHF/m²/an avec le mazout à 1.5 CHF/L). Ainsi, la rénovation de l'enveloppe, en réduisant la demande de chauffage, permet de maîtriser les charges sur le long terme. Par contre le recours à une PAC géothermique pour produire le peu d'énergie qui reste à fournir peut faire figure de double investissement (l'amortissement des investissements représentant les 2/3 des coûts totaux).

Le suivi a montré que l'installation de PAC était surdimensionnée d'un facteur 2, puisqu'une des 2 PAC suffit à couvrir la quasi-totalité des besoins thermiques. Il en résulte une température élevée en sortie des sondes (de l'ordre de 12-13°C toute l'année) car celles-ci ont été dimensionnées pour le fonctionnement des deux PAC simultanément. Si l'installation avait été dimensionnée au plus juste (une seule PAC avec la moitié de sondes), la simulation a montré que les performances n'auraient pas été affectées mais par contre les charges de chauffage seraient tombées à 7-8 CHF/m²/an au lieu des 10 actuels. Pour faire baisser encore les coûts, on aurait pu envisager une installation bivalente avec une PAC de la moitié de la puissance maximale appelée (ou le quart de la puissance actuelle) qui couvrirait encore 90% des besoins thermiques. Dans le cas où le complément serait couvert par une résistance électrique, le SPF chuterait à 2.3 mais avec une consommation électrique de seulement 12 kWh/m²/an. Les coûts de chauffage tomberaient à 5-6 CHF/m²/an, soit une valeur similaire au chauffage au mazout avec un prix du mazout à 1.5 CHF/L.

Au final, cette étude a permis de mettre en évidence différents points à améliorer pour optimiser le développement de la filière PAC. A notre sens, l'enjeu majeur réside dans l'amélioration de l'intégration des PAC dans les systèmes plus que dans l'amélioration des performances des machines elles-mêmes. De manière générale, une PAC ne doit pas être traitée comme une chaudière gaz, ce qui implique de bouleverser les habitudes de travail de l'ensemble de la profession. Ainsi, les aspects liés à l'architecture hydraulique et aux niveaux de température dans le système ne devraient pas être négligés. D'autre part, le soin à apporter au dimensionnement des différents éléments du système est d'autant plus important que les PAC sont intensives en investissement. L'importance d'un suivi régulier et fin des installations (notamment des températures de production et de distribution) doit également être soulignée. Quelques points de blocage comme l'accès limité aux paramètres de régulation ou les problèmes d'équilibrage hydraulique sur le circuit de chauffage ne permettent pas de diminuer les températures de distribution au maximum possible. Par ailleurs, les enjeux futurs sont différents dans l'existant ou dans le neuf. Dans les bâtiments existants, l'optimisation technique des installations est primordiale pour maîtriser les consommations d'électricité. Dans les bâtiments neufs ou fortement rénovés (qui présentent une demande thermique faible comme à Polimmo), une optimisation économique peut être plus pertinente puisque les consommations électriques sont déjà faibles. Cela impliquerait des compromis sur la technique, comme le recours à une source froide moins chère (air au lieu de sondes géothermiques), mais en redoublant d'efforts pour optimiser le côté source chaude (distribution).

De manière générale, il existe beaucoup de savoir-faire en Suisse et en Europe dans le domaine des PAC, mais celui-ci demande à être diffusé de manière plus large, d'autant qu'avec le développement rapide de la filière, un nombre croissant d'acteurs sont appelés à concevoir, installer et exploiter des installations de PAC sans avoir pour l'heure de compétences spécifiques dans ce domaine.

Références

- [Bertram et al.; 2012] Bertram, E., Glembin, J. and Rockendorf, G., Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger, *Energy Procedia*, 30(0), 2012, pp. 414-423.
- [Erb et al.; 2004] Erb, M., Hubacher, P. and Ehrbar, M., Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003, Bundesamt für Energie, 2004, 111 p.
- [Loose et al.; 2011] Loose, A., Drück, H., Hanke, N. and Thole, F., Field test for performance monitoring of combined solar thermal and heat pump systems, ISES Solar World Congress, Kassel (Germany), 28 Aug-2 Sep 2011.
- [Mermoud et al.; 2014] Mermoud, F., De Sousa Fraga, C., Hollmuller, P., Pampaloni, E. and Lachal, B.M., COP5 : Source froide solaire pour pompe à chaleur avec un COP annuel de 5 généralisable dans le neuf et la rénovation, Office fédéral de l'énergie, 2014, 145 p. <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:35401>.
- [Mermoud et al.; 2012] Mermoud, F., Khoury, J. and Lachal, B.M., Suivi énergétique du bâtiment 40-42 de l'avenue du Gros-Chêne à Onex (GE), rénové selon le standard MINERGIE - Aspects techniques et économiques, University of Geneva, 2012, 137 p. <http://archive-ouverte.unige.ch/unige:23005>.
- [Miara et al.; 2011] Miara, M., Danny, G., Kramer, T., Oltersdorf, T. and Wapler, J., Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, 2011, 154 p.
- [Oberson; 2011] Oberson, Y., Source froide géothermique pour le chauffage des bâtiments par pompes à chaleur - Retour d'expérience sur un bâtiment tertiaire rénové au standard Minergie, Université de Genève, 2011, 131 p.
- [OFEN; 2013] OFEN, Statistique suisse des énergies renouvelables 2012 (en allemand), 2013, 83 p. http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/index.html?lang=fr&dossier_id=00772.
- [Pahud; 2007] Pahud, D., PILESIM2: Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers - User Manual, SUPSI, 2007, 50 p.
- [Pahud et al.; 2011] Pahud, D. and Belliardi, M., Geocooling Handbook - Cooling of Buildings using Vertical Borehole Heat Exchangers, Swiss Federal Office of Energy, 2011, 182 p.
- [Pahud et al.; 2004] Pahud, D. and Lachal, B., Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur couplée sur des sondes géothermiques à Lugano (TI), Office fédéral de l'énergie, 2004, 129 p.
- [RAGE; 2013a] RAGE, Les pompes à chaleur avec inverter, Grenelle Environnement, 2013a, 19 p.

- [RAGE; 2013b] RAGE, Schémathèque de pompes à chaleur en habitat individuel, Grenelle Environnement, 2013b, 81 p.
- [Rybach et al.; 2002] Rybach, L. and Eugster, W. (2002). Sustainability aspects of geothermal heat pumps. 27th Workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford (California).
- [SIA; 2006] Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations du bâtiment, Cahier technique 2024, 2006, 122 p.
- [SIA; 2007] Installations de ventilation et de climatisation - Bases générales et performances requises, SIA 382/1, 2007, 86 p.
- [SIA; 2009] L'énergie thermique dans le bâtiment, SIA 380/1, 2009, 64 p.
- [SIA; 2010] Sondes géothermiques, SIA 384/6, 2010, 76 p.
- [Trillat-Berdal et al.; 2007] Trillat-Berdal, V., Souyri, B. and Achard, G., Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors, Applied Thermal Engineering, 27(10), 2007, pp. 1750-1755.
- [Trillat-Berdal et al.; 2006] Trillat-Berdal, V., Souyri, B. and Fraisse, G., Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors, Energy and Buildings, 38(12), 2006, pp. 1477-1484.
- [VDI; 2001] Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2 / Thermal use of the underground, Part 2, VDI 4640 2001, 43 p.
- [Wang et al.; 2010] Wang, H., Qi, C., Du, H. and Gu, J., Improved method and case study of thermal response test for borehole heat exchangers of ground source heat pump system, Renewable Energy, 35(3), 2010, pp. 727-733.
- [Wickins; 2014] Wickins, C., Preliminary data from the RHPP heat pump metering programme, Department of Energy & Climate Change, 2014, 61 p.
- [Zraggen; 2010] Zraggen, J., Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités. Retour d'expérience basé sur le suivi énergétique approfondi d'un complexe de logements Minergie (Pommier à GE). Université de Genève, 2010, 236 p.
- [Zottl et al.; 2012] Zottl, A., Nordman, R., Coevoet, M., Riviere, P., Miara, M., Benou, A. and Riederer, P., SEPEMO-Build Project: Concept for evaluation of SPF - A defined methodology for calculation of the seasonal performance factor and a definition which devices of the system have to be included in this calculation. Heat pumps with hydronic heating systems, Intelligent Energy Europe, 2012, 18 p.

Annexes

Annexe 1	Fiche technique Viessmann pompe à chaleur Natura BW 280.1
Annexe 2	Sondes de mesure utilisées par l'Unige pour le suivi
Annexe 3	Position des sondes de mesure sur l'installation de ventilation
Annexe 4	Interventions de Tech Building sur l'installation durant le suivi
Annexe 5	Propriétés géologiques et thermiques du sous-sol
Annexe 6	Paramètres de simulation Pilesim (cas de base)
Annexe 7	Détail des coûts pour le chauffage et la ventilation à Polimmo
Annexe 8	Savoir-faire disponible

Annexe 1 :

Fiche technique Viessmann pompe à chaleur Natura BW 280.1

Leistungsdaten in kW weitere Betriebspunkte siehe Diagramm Seite 2		Puissances en kW autres points de fonctionnement : voir diagramme page 2		 BW280.1		
Betriebspunkt	<i>Point de fonctionnement</i>	[°C]	B0 / W35	B2 / W45	B2 / W55	
Heizleistung	<i>Puissance de chauffage</i>	[kW]	81.2 ⁽¹⁾	84.4	81.4	
Kälteleistung (Umweltwärme)	<i>Puissance frigorifique (Energie de l'environnement)</i>	[kW]	62.3	60.3	53.3	
el. Aufnahmeleistung	<i>Puissance électrique absorbée</i>	[kW]	18.9 ⁽²⁾	24.1	28.1	
COP (Leistungszahl)	COP (Coefficient de performance)		4.3	3.5	2.9	

Elektrische Daten		Données électriques		Einheit / Unité	Wert / Valeur
Nennspannung / Frequenz	<i>Tension nominale / fréquence</i>			V / Hz	3 x 400 / 50
Betriebsstrom max.	<i>Courant de fonctionnement max</i>			A	55.6 (27.8 + 27.8)
Anlaufstrom	<i>Courant de démarrage</i>				
Kompressor 1	<i>Compresseur 1</i>			A	160 (95 ⁽³⁾)
Kompressor 2	<i>Compresseur 2</i>			A	160 (95 ⁽³⁾)
Blockierstrom LRA	<i>Courant à rotor bloqué LRA</i>				
Kompressor 1	<i>Compresseur 1</i>			A	189
Kompressor 2	<i>Compresseur 2</i>			A	189
Absicherung in der Zuleitung	<i>Fusible (à action retardée) sur conducteur</i>			A	80 träge

Wärmeabgabe		Distribution de chaleur		Einheit / Unité	Wert / Valeur
Heizwasserdurchsatz	<i>Débit eau de chauffage</i>			l/h	6800
Heizwasseranschluss	<i>Raccordement eau de chauffage</i>			Zoll / pouces	1 ½
Druckverlust Kondensator	<i>Perte de charge au condenseur</i>			mbar	140
Vorlauftemperatur max.	<i>Température de départ max</i>			°C	55

Wärmegewinnung		Source de chaleur		Einheit / Unité	Wert / Valeur
Sole-Durchsatz	<i>Débit de eau glycolée</i>			l/h	18600
Sole-Anschluss	<i>Raccordement eau glycolée</i>			Zoll / pouces	2
Druckverlust Verdampfer	<i>Perte de charge à l'évaporateur</i>			mbar	370
max. Sole-Eintrittstemperatur (bei höherer Temp. Mischer vorschalten)	<i>Temp. max d'entrée eau glycolée. (pour temp. sup. ouvrir vanne mélangeuse)</i>			°C	25
min. Sole-Eintrittstemperatur	<i>Temp. min. entrée eau glycolée</i>			°C	-5
Frostschutzkonzentration (Aethylenglykol)	<i>Concentration d'antigel (éthylène-glycol)</i>				
- für Erdwärmesonden	<i>- pr. sondes géothermiques verticales</i>			%	23
- für Flachregister	<i>- pour registre terrestre horizontal</i>			%	33

Wärmepumpe		Pompe à chaleur		Einheit / Unité	Wert / Valeur
Abmessungen (Höhe x Breite x Tiefe)	<i>Dimensions (hauteur x larg. x prof.)</i>			mm	1505 / 1200 / 760
Kompressoren vollhermetisch	<i>Compresseurs hermétiques</i>			Stk. / pces.	2
Arbeitsmittelfüllung R407C	<i>Quantité de fluide frigorigène R407C</i>			kg	ca. 13 (6.5 + 6.5)
Gewicht	<i>Poids</i>			kg	540

⁽¹⁾ Nenn-Heizleistung nach EN 255

⁽²⁾ el. Nennleistung P_{NT}

⁽³⁾ mit Anlaufstrombegrenzer

⁽¹⁾ *Puissance de chauffage nominale selon norme EN 255*

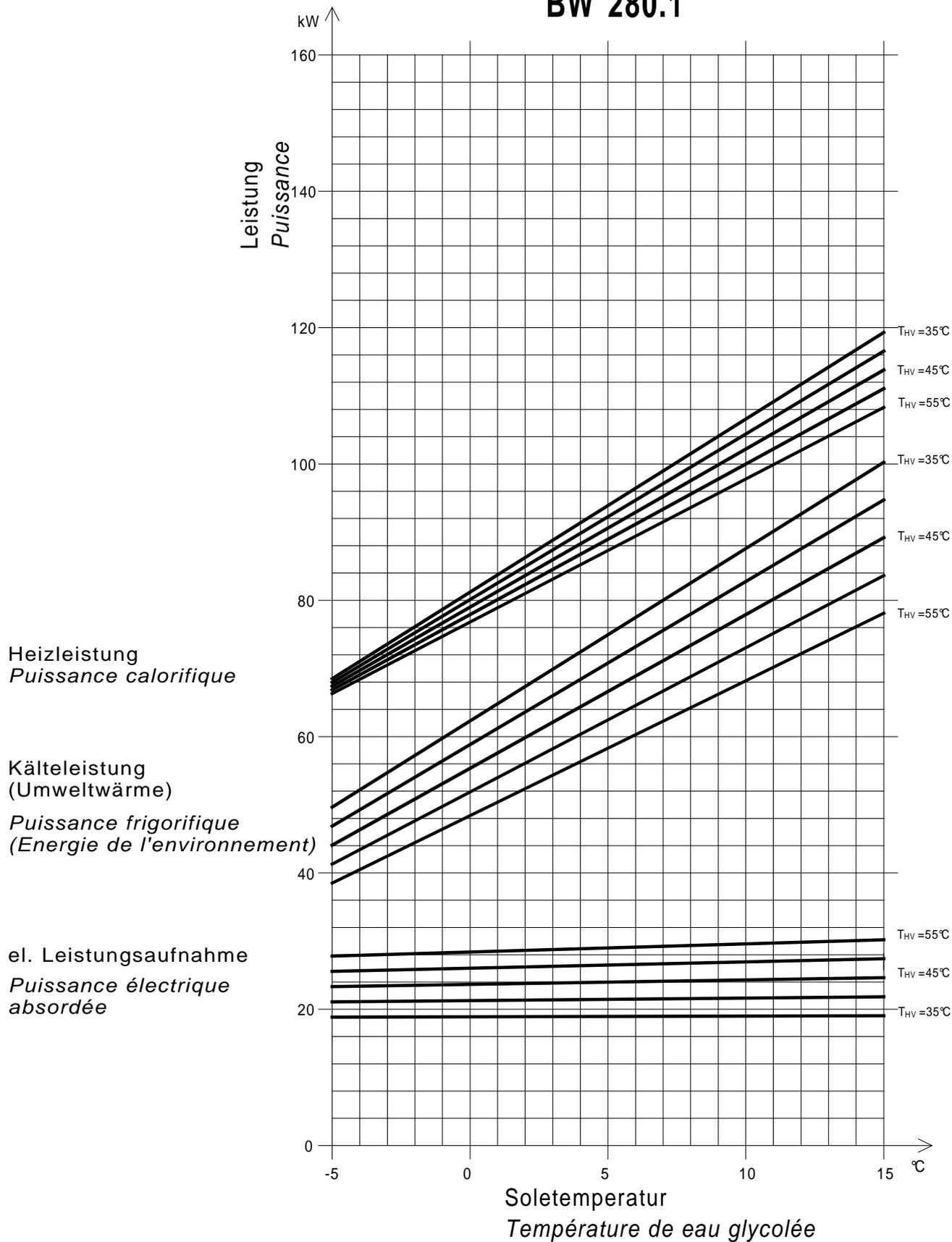
⁽²⁾ *Puissance électrique nominale P_{NT}*

⁽³⁾ *avec limiteur de courant de démarrage*

Toleranz Leistungswerte 5%
Technische Änderungen vorbehalten /

*Tolérance des puissances 5%
Sous réserve de modifications techniques*

BW 280.1



File: Bw-ww_di_a prt

Toleranz Leistungswerte 5%
Technische Änderungen vorbehalten /

Tolérance des puissances 5%
Sous réserve de modifications techniques

Annexe 2 :

Sondes de mesure utilisées par l'Unige pour le suivi

Thermocouples		Modèle	Rmq
T11	Température entrée évaporateur PAC1	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T12	Température sortie évaporateur PAC1	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T13	Température sortie condenseur PAC1	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T14	Température entrée condenseur PAC1	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T15	Température sortie échangeur circuit secondaire PAC1	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T16	Température entrée échangeur circuit secondaire PAC1	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T21	Température entrée évaporateur PAC2	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T22	Température sortie évaporateur PAC2	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T23	Température sortie condenseur PAC2	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T24	Température entrée condenseur PAC2	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T31	Température départ chauffage circuit ancien bâtiment	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T32	Température retour chauffage circuit ancien bâtiment	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T41	Température départ chauffage circuit nouveau bâtiment	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T42	Température retour chauffage circuit nouveau bâtiment	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T51	Température départ rafraîchissement circuit nouveau bâtiment	Thermocouple T Cu/Cs	froid
T52	Température retour rafraîchissement circuit nouveau bâtiment	Thermocouple T Cu/Cs	chaud
T61	Température air repris VDF	Thermocouple T Cu/Cs	avant échangeur
T62	Température air pulsé VDF	Thermocouple T Cu/Cs	après échangeur
T63	Température air neuf VDF	Thermocouple T Cu/Cs	avant échangeur
T64	Température air extrait VDF	Thermocouple T Cu/Cs	après échangeur
T7	Température extérieure	Rotronic MP 300/340	
T8	Température milieu ballon accumulation	Thermocouple T Cu/Cs	

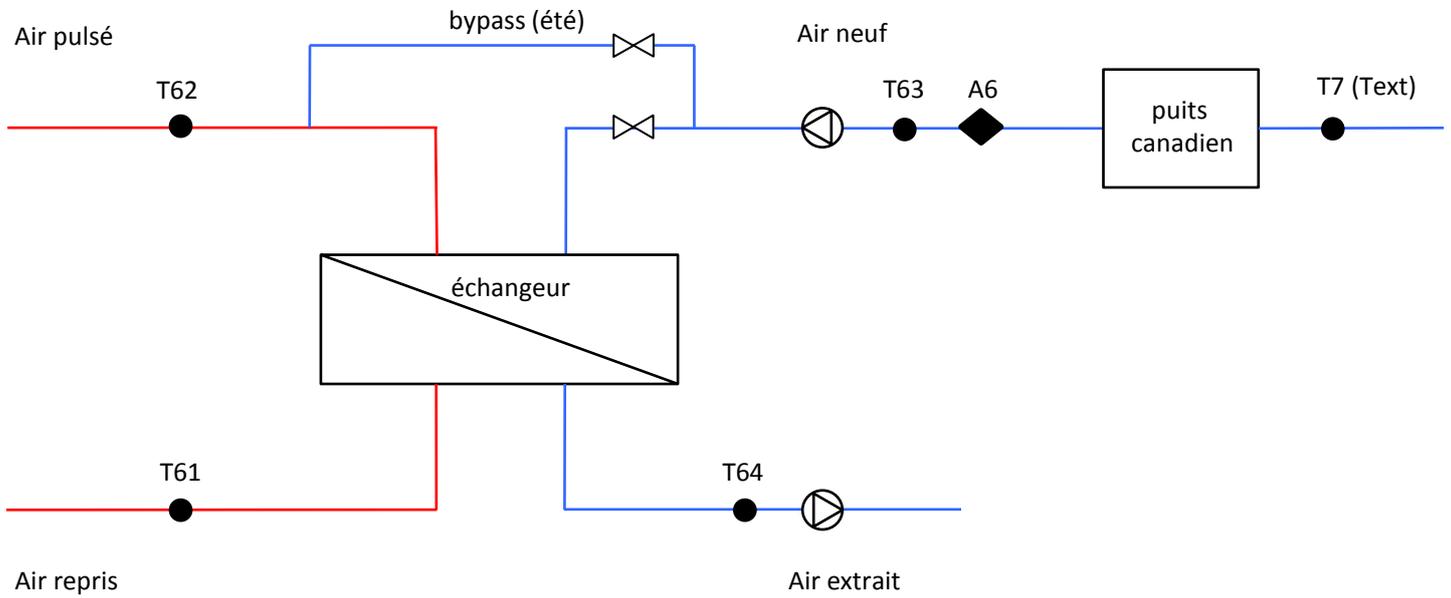
Compteurs chaleur/débitmètres			
C1	débitmètre circuit primaire sortie PAC1	Aquametro Rubis WPDH 50	1 imp/L
C2	débitmètre sortie PAC2	Aquametro Rubis WPDH 50	1 imp/L
C3	compteur chaleur chauffage circuit ancien bâtiment	Aquametro Calec ST	1 imp/kWh
C4	compteur chaleur chauffage circuit nouveau bâtiment	Aquametro Calec ST	1 imp/kWh
C5	compteur chaleur rafraîchissement circuit nouveau bâtiment	Aquametro Calec ST	1 imp/kWh

Compteurs électriques			
E1	compteur électrique PAC1	Camille Bauer Sineax M 563	kW
E2	compteur électrique PAC2	Camille Bauer Sineax M 563	kW
E6	compteur électrique VDF	Hager EC 310	1 imp/0.1 kWh

Autres			
A6	anémomètre air neuf	Schiltknecht MiniAir 6	m/s
H7	hygromètre extérieur	Rotronic MP 300/340	%HR

Annexe 3 :

Position des sondes de mesure sur l'installation de ventilation



Annexe 4 :

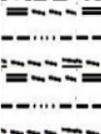
Interventions de Tech Building sur l'installation durant le suivi

Date	Actions sur installation chauffage	Actions sur ventilation	Observations
22.02.2011	Diminution débits distribution par 1.8 Mise en place coupure distribution nocturne (entre 21h et 3h) sur le nouveau bâtiment Déblocage fonctionnement PAC2	Mise en place filtre sur l'air extrait (inexistant jusque là) pour protéger le ventilateur	prise en main installation
13.04.2011	Intervention en présence du fournisseur des PAC (Satag) Modifications mineures régulation PAC Proposition déplacement sonde basse ballon (déclenchement PAC), réalisé durant l'été 2011	Décrassage de l'échangeur à l'azote suite aux panmes observées depuis la mise en place du filtre (perte de charge supplémentaire)	la PAC1 se met souvent en sécurité haute température/haute pression car la sonde de déclenchement des PAC est située trop bas dans le ballon, dans une zone morte et Tballon passe au dessus de la consigne avant que les PAC s'arrêtent
07.07.2011	Mise à l'arrêt des PAC		
06.10.2011	Remise en route des PAC		
13.10.2011	Remplacement coupure nocturne par ralenti de nuit (-10K entre 22h et 5h) sur courbe de chauffe distribution des deux bâtiments Remise en place débits distribution initiaux suite à la plainte de locataires (en mi-saison, les températures de distribution sont trop faibles compte tenu de l'émissivité des radiateurs pour permettre de maintenir une température suffisante dans les locaux)		
14.11.2011	Ajustement courbe de chauffe ballon à courbe de chauffe distribution (-5K) Rediminution débits distribution par 1.8 en poussant un peu les températures de distribution en mi-saison		la PAC2 ne s'enclenche plus depuis cette intervention
05.12.2011	Mise à jour horaires ralentis de nuit Modifications mineures régulation PAC	Mise en place arrêt ventilation nocturne (22h-5h)	
30.01.2012	Diminution débits distribution par 1.5	Remise en marche ventilation (filtres encrassés)	ΔT distribution restait faible (<5K) malgré la 1ère diminution des débits
31.01.2012	Remise en place des réglages initiaux des débits de distribution suite à la plainte de locataires (radiateurs froids)		
08.02.2012	Augmentation débits distribution par 2 car période de grand froid (difficulté à maintenir une température suffisante dans les locaux) Baisse courbe chauffe distribution ancien bâtiment de 5K		plainte de certains locataires concernant une température trop faible dans les locaux
09.02.2012	Limitation Tballon à 43°C car la PAC1 se met en défaut haute température/haute pression (temporisation 3h avant de redémarrer) lorsque Tballon augmente trop	Baisse débits de ventilation de 3600 à 1000 m ³ /h (0.7 m ³ /m ² /h)	la PAC2 devrait s'enclencher lorsque la PAC1 est bloquée par la sécurité haute pression ??
13.02.2012	Mise en place ralenti de nuit (-10K entre 22h et 5h) sur courbe de chauffe ballon Remise en place réglages débits distribution avant période de grand froid ?		la PAC1 ne s'enclenche quasiment plus à mi-puissance (1 compresseur) depuis cette intervention : les deux compresseurs se mettent d'office en marche quelle que soit la demande thermique
05.06.2012	Mise à l'arrêt des PAC		
07.08.2012		Remise en route ventilation nocturne sur proposition Unige pour essayer de profiter de la fraîcheur nocturne	

Annexe 5 :

Propriétés géologiques et thermiques du sous-sol

(source : [Oberson; 2011])

Coupe	Profondeur (m)	Formation	Code lithologique genevois	Conductivité thermique λ (W/mK)		Capacité thermique spécifique ρ_c (MJ/m ³ K)	
				Plage de valeurs	Valeur de calcul recommandée	Plage de valeurs	Valeur de calcul recommandée
	0 - 1	Remblais (grave de fondation du parking)	2	-	-	-	-
	1 - 10	Retrait würmien (limon, sable, gravier sableux)	6 a,b,c,d	1.5 - 4	2.3	2.2 – 2.8	2.4
	10 - 160	Molasse grise (grès et marnes gris à gypse)	14	2.4 – 2.8	2.5	1.8 - 2.6	2.1
	160 - 244	Molasse rouge (marnes et grès bariolés)	15	2.4 – 2.8	2.5	1.8 - 2.6	2.1

Source du log: HydroGeo Conseil, Carouge (collectif de géologues et hydrogéologues)

Source des valeurs de conductivité thermique et capacité thermique spécifique: SIA 384/6. (2010). *Sondes géothermiques*, 76 p.

Annexe 6 :

Paramètres de simulation Pilesim (cas de base)

Temperature Limitations	
Minimum allowed temperature of the heat carrier fluid in the piles/boreholes [TfMin]	<input type="text" value="-50.0"/> °C
Maximum allowed temperature of the heat carrier fluid in the piles/boreholes [Tfmax]	<input type="text" value="100.0"/> °C

Heat Pump and Cooling Machine	
Design electric power of the heat pump [Pel]	<input type="text" value="36.0"/> kW
Design performance coefficient [COPo]	<input type="text" value="2.9"/> -
Constant COP and efficiency during simulation	<input type="text" value="No"/> ▾
Design inlet fluid temperature in evaporator	<input type="text" value="10"/> °C
Design outlet fluid temperature from condenser	<input type="text" value="55"/> °C
Temperature difference for COP reduction	<input type="text" value="50"/> K
Temperature difference for COP stagnation	<input type="text" value="150"/> K
Maximum possible COP (PAC and cooling machine)	<input type="text" value="15.0"/> -
Penalty on the COP (PAC and cooling machine)	<input type="text" value="0.0"/> -
Design electric power of the cooling machine [PelCOM]	<input type="text" value="0.0"/> kW
Design efficiency of the cooling machine [EffCOM]	<input type="text" value="0.0"/> -
Design inlet fluid temperature in evaporator	<input type="text" value="0"/> °C
Design outlet fluid temperature from condenser	<input type="text" value="0"/> °C
Design inlet-outlet temp. difference in evaporator (PAC and cooling machine)	<input type="text" value="5.0"/> K
Design inlet-outlet temp. difference in condenser (PAC and cooling machine)	<input type="text" value="11.0"/> K

Counterflow Heat Exchangers	
Design temperature loss in cooling heat exchanger [LossTCool]	<input type="text" value="0.0"/> K
Design temperature loss in geocooling heat exchanger [LossTGeo]	<input type="text" value="0.0"/> K

Interface Ground-Building	
Room air temperature in building [TairH]	<input type="text" value="20"/> °C
Height of the cellar between rooms and ground [Hfloor]	<input type="text" value="3.5"/> m
Air change rate in the cellar [AchRat]	<input type="text" value="100000000"/> 1/h
Global room-cellar heat transfer coefficient [UCelBu]	<input type="text" value="0.0"/> W/m ² K
Insulation thickness between ground and cellar [Hinsul]	<input type="text" value="0.30"/> m
Concrete thickness between ground and cellar [Hmagco]	<input type="text" value="0.50"/> m
Length of the horizontal pipes on ground [LCOEPF]	<input type="text" value="0"/> m

Ground Characteristics	
Initial ground temperature [TGRDIN]	<input type="text" value="11.0"/> °C
Mean temperature gradient in the undisturbed ground [dTGRND]	<input type="text" value="30.000"/> K/km
Thermal conductivity of ground layer 1 [LG1]	<input type="text" value="2.3"/> W/mK
Volumetric thermal capacity of ground layer 1 [CG1]	<input type="text" value="2.40"/> MJ/m ³ K
Thickness of ground layer 1	<input type="text" value="10.0"/> m
Darcy velocity of ground water in layer 1 [DA1]	<input type="text" value="0.0000E+00"/> m/day
Thermal conductivity of ground layer 2 [LG2]	<input type="text" value="2.5"/> W/mK
Volumetric thermal capacity of ground layer 2 [CG2]	<input type="text" value="2.10"/> MJ/m ³ K
Thickness of ground layer 2	<input type="text" value="1000.0"/> m
Darcy velocity of ground water in layer 2 [DA2]	<input type="text" value="0.0000E+00"/> m/day
Thermal conductivity of ground layer 3 [LG3]	<input type="text" value="2.0"/> W/mK
Volumetric thermal capacity of ground layer 3 [CG3]	<input type="text" value="3.00"/> MJ/m ³ K
Thickness of ground layer 3	<input type="text" value="0.0"/> m
Darcy velocity of ground water in layer 3 [DA3]	<input type="text" value="0.0000E+00"/> m/day
Simulate forced convection on global process	<input type="text" value="No"/> ▾
Simulate forced convection on local process	<input type="text" value="No"/> ▾

Energy Piles or Borehole Heat Exchangers

Diameter of pile/borehole type 1 [dp1]	<input type="text" value="0.127"/>	m
Number of piles/boreholes for type 1 [N1]	<input type="text" value="11"/>	-
Average active length of piles/boreholes type 1 [H1]	<input type="text" value="244.0"/>	m
Thermal resistance Rb of pile/borehole type 1 [Rb1]	<input type="text" value="0.1300"/>	K/(W/m)
Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type 1 [Ra1]	<input type="text" value="0.3000"/>	K/(W/m)
Diameter of pile type/borehole 2	<input type="text" value="1.000"/>	m
Number of piles/boreholes for type 2	<input type="text" value="0"/>	-
Average active length of piles/boreholes type 2	<input type="text" value="1.0"/>	m
Thermal resistance Rb of pile/borehole type 2	<input type="text" value="0.0600"/>	K/(W/m)
Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type 2	<input type="text" value="0.1000"/>	K/(W/m)
Diameter of pile/borehole type 3	<input type="text" value="1.000"/>	m
Number of piles/boreholes for type 3	<input type="text" value="0"/>	-
Average active length of piles/boreholes type 3	<input type="text" value="1.0"/>	m
Thermal resistance Rb of pile/borehole type 3	<input type="text" value="0.0600"/>	K/(W/m)
Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type 3	<input type="text" value="0.1000"/>	K/(W/m)
Diameter of pile/borehole type 4	<input type="text" value="1.000"/>	m
Number of piles/boreholes for type 4	<input type="text" value="0"/>	-
Average active length of piles/boreholes type 4	<input type="text" value="1.0"/>	m
Thermal resistance Rb of pile/borehole type 4	<input type="text" value="0.0600"/>	K/(W/m)
Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type 4	<input type="text" value="0.1000"/>	K/(W/m)
Diameter of pile/borehole type 5	<input type="text" value="1.000"/>	m
Number of piles/boreholes for type 5	<input type="text" value="0"/>	-
Average active length of piles/boreholes type 5	<input type="text" value="1.0"/>	m
Thermal resistance Rb of pile/borehole type 5	<input type="text" value="0.0600"/>	K/(W/m)
Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type 5	<input type="text" value="0.1000"/>	K/(W/m)
Diameter of pile/borehole type 6	<input type="text" value="1.000"/>	m
Number of piles/boreholes for type 6	<input type="text" value="0"/>	-
Average active length of piles/boreholes type 6	<input type="text" value="1.0"/>	m
Thermal resistance Rb of pile/boreholes type 6	<input type="text" value="0.0600"/>	K/(W/m)
Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type 6	<input type="text" value="0.1000"/>	K/(W/m)
Average spacing between the piles/boreholes [BPILE]	<input type="text" value="10.0"/>	m
Number of piles/boreholes coupled in series [NSERIE]	<input type="text" value="1"/>	-
Pipe configuration in pile/borehole	<input type="text" value="U-pipe configuration"/>	
Pipe number in a cross section of a pile/borehole	<input type="text" value="2"/>	-
Inner diameter of one pipe	<input type="text" value="37.000"/>	mm
Fraction of pile/borehole concrete/filling material thermal capacity	<input type="text" value="0.00"/>	%

Remarque : Afin de tenir compte de l'arrangement en quinconce sur lequel est basé Pilesim, les sondes sont espacées de 10 m, au lieu de 7 m en moyenne dans l'arrangement linéaire effectif à Polimmo (recommandation de D. Pahud, concepteur de Pilesim).

Annexe 7 :

Détail des coûts pour le chauffage et la ventilation à Polimmo

	Polimmo actuel			Sans rénovation + chaudière mazout		Rénovation enveloppe + chaudière mazout		Redimensionnement installations techniques				
	10-11	11-12	année moyenne	année moyenne 1 CHF/L	projection 1.5 CHF/L	année moyenne 1 CHF/L	projection 1.5 CHF/L	PAC P/2 + 6 sondes	PAC P/4 + 3 sondes	ventil D/3 + pas de puits canadien	PAC P/4 + ventil D/3	
CHF HT/an												
Amortissements (taux d'intérêts : 3% sur 20 ans) production chaleur (PAC ou mazout) ventil	36'357 25'344 11'013	36'357 25'344 11'013	36'357 25'344 11'013	1'680 1'680 1'680	1'680 1'680 1'680	12'357 1'344 11'013	12'357 1'344 11'013	28'760 17'747 11'013	21'162 10'150 11'013	31'588 25'344 6'244	16'394 10'150 6'244	
Subventions (déduction fiscale au pro-rata) production chaleur (PAC ou mazout) ventil	-1'276 -889 -386	-1'276 -889 -386	-1'276 -889 -386			-386 -386 -386	-386 -386 -386	-1'009 -623 -386	-742 -356 -386	-1'108 -889 -219	-575 -356 -219	
Contrat exploitation production chaleur (PAC ou mazout) ventil	9'385 5'385 4'000	8'654 4'654 4'000	9'000 5'000 4'000	3'000 3'000 3'000	3'000 3'000 3'000	7'000 3'000 4'000	7'000 3'000 4'000	8'000 4'000 4'000	7'000 3'000 4'000	7'800 5'000 2'800	5'800 3'000 2'800	
Electricité tarif actuel production chaleur (PAC ou mazout) ventil	10'957 7'184 3'774	7'505 6'121 1'384	5'946 5'687 258			258 258 258	258 258 258	5'978 5'720 258	7'358 7'100 258	5'946 5'687 258	7'358 7'100 258	
Mazout				27'923	41'885	10'871	16'306					
Total charges annuelles production chaleur (PAC ou mazout) ventil	55'424 37'024 18'400	51'240 35'230 16'010	50'027 35'142 14'885	32'604 32'604 32'604	46'565 46'565 46'565	30'100 15'215 14'885	35'535 20'651 14'885	41'729 26'844 14'885	34'778 19'893 14'885	44'226 35'142 9'083	28'977 19'893 9'083	
Flux d'énergie [kWh/an] Production chaleur production chaleur (PAC ou mazout) ventil	184'048 100'509 83'538	132'051 99'164 32'887	118'849 98'373 20'477	237'348 237'348 237'348	237'348 237'348 237'348	118'849 98'373 20'477	118'849 98'373 20'477	119'518 99'041 20'477	119'518 99'041 20'477	118'849 98'373 20'477	119'518 99'041 20'477	
Consommation électricité production chaleur (PAC ou mazout) ventil	57'549 37'872 19'677	39'994 32'831 7'162	33'757 32'392 1'365			1'365 1'365 1'365	1'365 1'365 1'365	33'867 1'365 1'365	43'687 42'322 1'365	33'757 32'392 1'365	43'687 42'322 1'365	
CHF/m²/an production chaleur (PAC ou mazout) ventil (rapporté à SRE surélévation)	15.1 10.1 12.6	14.0 9.6 10.9	13.6 9.6 10.2	14.8 14.8 14.8	21.1 21.1 21.1	8.2 4.1 10.2	9.7 5.6 10.2	11.4 7.3 10.2	9.5 5.4 10.2	12.1 9.6 6.2	7.9 5.4 6.2	
ct/kWh production chaleur (PAC ou mazout) ventil	30.1 36.8 22.0	38.8 35.5 48.7	42.1 35.7 72.7	13.7 13.7 13.7	19.6 19.6 19.6	25.3 15.5 72.7	29.9 21.0 72.7	34.9 27.1 72.7	29.1 20.1 72.7	37.2 35.7 44.4	24.2 20.1 44.4	

Annexe 8 :

Savoir-faire disponible

Formations

En Suisse romande, le GSP propose des formations continues de courte durée destinées aux professionnels et leur permettant d'acquérir les connaissances de base pour accéder au label « Partenaire GSP certifié ». Elles sont organisées sous forme de modules <http://www.fws.ch/calendrier-des-cours-2014.html> :

1. Bases de la technique des PAC
2. Projets PAC neuf et rénovation
3. Dimensionnement des sondes
4. Acoustique

En France, de nombreux organismes dispensent des formations concernant la conception et l'installation de PAC (essentiellement qualifiantes pour l'obtention du label Quali'PAC) et/ou la maintenance des PAC :

- Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques Costic <http://www.costic.com/formations-en-genie-climatique>
- Apave <http://www.apave.com/nous-decouvrir/le-groupe/metiers/les-metiers/formation.html>
- Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques Cetiat <http://formation.cetiat.fr/>
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières BRGM <http://www.brgm.fr/missions/formation-enag/formation-enag> : dans le domaine des PAC géothermiques

Manuels et normes

Les sites suivants regroupent de l'information utile concernant l'implémentation des PAC :

- Groupement professionnel suisse pour les PAC (GSP) <http://www.fws.ch/> : offre d'accompagnement assez large
- Programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » (RAGE) <http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart.html> : guidelines pour les professionnels de l'énergie dans le bâtiment
- Office Fédéral de l'Energie – Programmes de recherche « Pompes à chaleur et froid » <http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk/index.html?lang=fr> : rapports de nombreux projets de recherche concernant les PAC et retours d'expérience sur des installations réelles (la plupart en allemand)

Ci-dessous quelques publications qu'on peut recommander, concernant des guidelines (cf. Tableau A 1), des schémas standards (cf. Tableau A 2), et des normes (cf. Tableau A 3).

Tableau A 1 : Guidelines pour la réalisation et l'optimisation d'installations de PAC

Institution	Titre / Lien	Date de parution
OFEN / GSP	Pompes à chaleur : Planification – Optimisation – Fonctionnement – Entretien http://www.fws.ch/tl_files/download_f/publications_specialisees/Manuel_PAC_08F.pdf	
GSP	WP-Doktor (livre en allemand) PAC'Analyse (en cours de traduction en français)	
RAGE	Recommandations professionnelles « RAGE 2012 » : Pompes à chaleur air extérieur/eau en habitat individuel – Rénovation http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart/detail/recommandations-professionnelles-rage-2012-pompes-a-chaleur-air-exterieureau-en-habitat-ind-1.html	2013
RAGE	Recommandations professionnelles « RAGE 2012 » : Pompes à chaleur air extérieur/eau en habitat individuel – Neuf http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart/detail/recommandations-professionnelles-rage-2012-pompes-a-chaleur-air-exterieureau-en-habitat-ind.html	2013
RAGE	Recommandations professionnelles « RAGE 2012 » : Pompes à chaleur double-service en habitat individuel http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart/detail/recommandations-professionnelles-rage-pompes-a-chaleur-double-service-en-habitat-individuel-ju.html	2014

Tableau A 2 : Schémas hydrauliques standards pour systèmes de PAC individuels

Institution	Titre / Lien	Date de parution
OFEN	Schémas standard pour petites installations de pompes à chaleur http://www.fws.ch/tl_files/download_f/technique/schema_standard_ENET.pdf	2002
OFEN	Schémas standards 1 à 7 http://www.fws.ch/tl_files/download_f/technique/schema_standard_cours1-7.pdf	
RAGE	Schémathèque de pompes à chaleur en habitat individuel http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart/detail/guide-rage-2012-schematheque-de-pompes-a-chaleur-en-habitat-individuel-octobre-2013.html	2013

Tableau A 3 : Normes concernant les installations de PAC géothermiques

Institution	Titre / Lien	Date de parution
SIA	384/6 Sondes géothermiques (norme suisse)	2010
VDI	4640 Thermal use of the underground (normes allemandes, en allemand et en anglais) -Part 1: Fundamentals, approvals, environmental aspects -Part 2: Ground source heat pump systems -Part 3: Underground thermal energy storage -Part 4: Direct uses	2001 2001 2001 2004

A noter que les normes présentées ici concernent uniquement les installations équipées de sondes géothermiques. Les standards allemands édités par la *Verein Deutscher Ingenieure* VDI proposent de nombreuses recommandations utiles pour la conception et le dimensionnement de telles installations. Il existe également un nombre important de normes européennes concernant les PAC, mais elles ne sont pas listées ici.

De nombreux documents techniques d'accompagnement existent, mais ils prodiguent en général peu de conseils sur les meilleurs choix à faire dans une situation particulière (par exemple quelle configuration hydraulique choisir ?). On trouve partiellement ce type d'information dans les retours d'expériences effectués sur des installations de PAC.

Retours d'expérience

Différents retours d'expérience à large échelle ont été réalisés en Suisse et en Europe. Le Tableau A 4 répertorie ceux dont nous avons connaissance :

Tableau A 4 : Retours d'expérience sur des installations de PAC réalisés à large échelle

Pays	Titre / Lien	Date de parution
Suisse	Analyse in situ d'installations de pompes à chaleur ANIS 1996-2003 (résumé en français) Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003 (étude complète en allemand) http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk/02425/02724/02727/index.html?lang=fr&dossier_id=03960	2004
Suisse	AQ-PAC (Assurance-Qualité/Pompes à chaleur): suite des mesures in situ, analyse du comportement à long terme et évaluation de l'efficacité pour le modèle statistique 2008-2011 » (suite ANIS/FAWA) http://www.fws.ch/tl_files/download_f/rapports/rapport_2012_mesures_in_situ_aq_pac.pdf	2012
Allemagne	Heat Pump Efficiency – Analysis and Evaluation of Heat Pump Efficiency in Real-life Conditions (résumé en anglais) Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb (étude complète en allemand) http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/german/index/	2011
Royaume-Uni	Preliminary data from the RHPP heat pump metering programme https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/276612/Preliminary_Report_on_the_RHPP_metering_programme_2014-01-31.pdf	2014

Le Tableau A 5 présente les retours d'expérience complets réalisés sur des installations spécifiques :

Tableau A 5 : Retours d'expérience complets réalisés sur des installations spécifiques

Institution	Titre / Lien	Date de parution
Unige	COP5 : Source froide solaire pour pompe à chaleur avec un COP annuel de 5 généralisable dans le neuf et la rénovation http://archive-ouverte.unige.ch/unige:35401	2014
SUPSI / Unige	Mesure des performances thermiques d'une pompe à chaleur couplée sur des sondes géothermiques à Lugano (TI) http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=fr&publication=8891	2004
HEVs	Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure – Centre Scolaire Vers l'Eglise / Fully http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=fr&publication=7539	2002

Autres sources d'information

D'autres sites proposent également des informations utiles :

- Energie+ <http://www.energieplus-lesite.be/> : aide à la décision en efficacité énergétique des bâtiments du secteur tertiaire
- International Energy Agency Heat Pump Programme IEA HPP www.heatpumpcentre.org : appui au développement des PAC, lobbying, encouragement de la recherche et diffusion des connaissances, nombreux documents en téléchargement
- European Heat Pump Association EHPA <http://www.ehpa.org/> : lobbying, diffusion de l'information

Différents colloques concernant les PAC sont organisés régulièrement :

- GSP : Journée professionnelle de la pompe à chaleur (chaque année en Suisse romande)
- OFEN : Nouvelles de la recherche sur les pompes à chaleur (chaque année à Burgdorf (BE))
- Institut National des Pompes à Chaleur INPAC : Congrès Français des pompes à chaleur (chaque année à Paris)
- EHPA : European Heat Pump Forum (chaque année en Europe)
- IEA HPP : IEA Heat Pump Conference (tous les 3 ans)

