Récupération de chaleur sur air vicié

Estimation du potentiel de systèmes utilisant des pompes à chaleur comme alternative aux double-flux

Daniel CABRERA
Pierre HOLLMULLER
Bernard LACHAL

Octobre 2011

Réalisé dans le cadre du Partenariat SIG – UNIGE
Contrat spécifique « ExpTherm »
Responsable UNIGE : B. Lachal
Responsable SIG : M. Monnard

Groupe Energie
Institut Forel / Institut des Science de l'Environnement
Site Battelle - Bat D - 7 route de Drize - CH 1227 Carouge
www.unige.ch/energie

Version corrigée, Septembre 2012

Sommaire

1. Contexte / Objectifs / Problématique 2
2. Enjeux énergétiques de la ventilation et de la récupération de chaleur 3
3. Systèmes de ventilation : la pratique actuelle 5
3.1. Système d'extraction simple/ le type de ventilation le plus répandu actuellement à Genève ? 5
3.2. Les système double-flux avec récupération de chaleur 6
4. Systèmes de ventilation : les alternatives de valorisation de la chaleur de l'air vicié 9
4.1. Les différentes alternatives 9
4.2. Niveaux des températures 10
5. Discussion des alternatives et potentiel 12
5.1. Modélisation 12
5.2. Valorisation air neuf 14
5.3. Valorisation ecs 16
5.4. Valorisation chauffage 19
6. Conclusions et recommandations 22
7. Références 23

1. Contexte / Objectifs / Problématique

L'expertise concernant la récupération de chaleur sur l'air vicié fait partie de l'ensemble d'expertises thermiques qui s'inscrivent dans le cadre du Partenariat établi entre SIG et l'Université de Genève en avril 2010.

L'objectif de cette expertise est de faire le point sur les installations de double flux qui existent actuellement (typologies d'installations, bilans énergétiques, émissions de dioxyde de carbone, aspects financiers et autres impacts), principalement en rénovation, et évaluer la pertinence de diverses alternatives de récupération de chaleur via pompes à chaleur sur air vicié. On ne traitera pas ici les systèmes décentralisés de récupération de chaleur.

2. Enjeux énergétiques de la ventilation et de la récupération de chaleur

Sous nos latitudes, la consommation d'énergie nécessaire à conditionner l'air frais destiné à la ventilation des locaux pendant la période hivernale est loin d'être négligeable. A l'heure actuelle, on utilise principalement des combustibles fossiles (mazout et gaz naturel) pour le chauffage entraînant des émissions de CO2 significatives liées à la ventilation. Dans ce chapitre, nous esquissons l'enjeu énergétique thermique[1] de la ventilation au niveau du canton de Genève, afin de situer ce travail dans le contexte de la politique énergétique cantonale

Notons tout d'abord que beaucoup d'incertitudes règnent sur les statistiques de chauffage, en particulier l'indice énergétique de chaleur, pour les raisons suivantes :

- La fluctuation de consommation d'une année sur l'autre pour des objets à priori identiques (de l'ordre de 10%), non seulement à cause de la météo mais aussi pour des raisons diverses comme l'évolution des réglages, la date effective du début et de la fin du chauffage, jaugeage du mazout,…
- La consommation énergétique est sujette à incertitude du à la définition de l'énergie primaire, rendement de conversion, ….
- Les références de surface utilisées, théoriquement la surface de référence énergétique dont la définition est complexe et peut amener des incertitudes (jusqu'à 10%).

Il est donc illusoire en l'état d'espérer une compréhension quantitative plus précise que 10 %. Un travail au sein du groupe Energie est en cours pour préciser et améliorer ces points.

A partir des données statistiques cantonales existantes et de retours d'expérience effectués sur des bâtiments, la consommation de chaleur nécessaire au chauffage de l'air frais pour la ventilation au niveau du canton a été estimée comme suit.

L'indice de chaleur IDC, indicateur de la consommation d'énergie primaire dans le bâtiment, est relevé depuis plusieurs années pour un nombre représentatifs de bâtiments à Genève.

Une consultation de la base de données du Service Cantonal de l'énergie nous a permis de constater que la moyenne de **l'indice de dépense de chaleur pour l'année 2008 se situe autour de 500 MJ/m2/an (490 MJ/m².an sur bâtiments avec plus de 5 preneurs soit 17 millions de m² SRE représentant la moitié environ des surfaces construites)**. En appliquant cette valeur à l'ensemble du parc de bâtiments de Genève (33 millions de m² de plancher bruts en 2005, soit environ 35 millions de m² de référence énergétique en 2011, nous arrivons à environ 17.5 PJ/an, les statistiques cantonales faisant état en 2009 d'une consommation de combustible de 20.1 PJ au total (9.4 PJ gaz et 10.7 PJ mazout). Cet écart de 13% entre estimation des besoins de chauffage et consommation totale cantonale de combustible reste dans la marge d'incertitude à la fois des surfaces et des indices, surtout si on tient compte que du gaz est utilisé pour d'autres usages (cuisine, process, …).

Concernant la partie aération, la quantité d'énergie va dépendre du taux de ventilation. Ainsi, en considérant une hauteur de plafond de 2.5m, un taux de ventilation de 0.1 volume / heure va

[1] L'énergie électrique utilisée par les moteurs pour la ventilation est prise en compte plus loin.

induire une consommation de chaleur de 20 MJ/m².an pour un chauffage à 20°C. Un taux effectif moyen de 0.5 volume / heure pour les habitations aboutit à un indice de 100 MJ/m².an, alors que les bureaux vont être plus ventilés mais vont posséder plus souvent une récupération sur air vicié.

Cet ordre de grandeur est confirmé par les analyses énergétiques approfondies effectuées par le groupe énergie, pour lesquelles nous mesurons les demandes réelles suivantes (valeurs brutes, ne tenant pas compte d'apports provenant de récupération de chaleur sur air vicié, de puits canadiens ou de pompe à chaleur sur air-vicié) :

- 125 MJ/m2 à la Cité solaire de Plan-les-Ouates (Branco et al. 2002).
- 132 MJ/m2 aux Pommiers (Zgraggen, 2010).
- 98 MJ/m2 au Gros Chêne (Mermoud et al. 2012).

On peut donc retenir la valeur de 100 MJ/m².an comme valeur indicative, soit 20 % de l'indice de chaleur moyen, donc une quantité de chaleur totale de 3.3 PJ/an ou environ 1000 GWh/an.

A l'heure actuelle, nous ne connaissons pas avec certitude le nombre d'installations de récupération de chaleur dans le canton, cependant, à notre avis, celui-ci reste encore marginal. D'après notre expérience, la majorité des bâtiments de logements possède actuellement uniquement des installations d'extraction d'air.

Dans la majorité des bâtiments comportant un système de ventilation du type « extraction simple », l'air neuf pénètre, grâce à la dépression créée, à travers les défauts d'étanchéité ; il se réchauffe lorsqu'il rentre en contact avec les différents éléments du bâtiment et ressort (environ une à deux heures plus tard) par le système d'extraction, amenant avec lui la chaleur prise. Cette chaleur «fatale »[2] peut être récupérée. Les alternatives de récupération font l'objet du présent travail.

En conclusion, la quantité d'énergie primaire nécessaire pour réchauffer l'air de ventilation des immeubles de Genève est de l'ordre de 1'000 GWh (moitié gaz, moitié mazout grosso modo à l'heure actuelle mais proportion de gaz toujours plus élevée), ce qui correspond à une émission de dioxyde de carbone d'environ 200'000 tonnes[3] par an.

[2] L'énergie fatale désigne la quantité d'énergie inéluctablement présente ou piégée dans certains processus, ou produits, qui parfois- au moins pour partie- peut être récupérée ou valorisée (Wikipédia).
[3] D'après http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/index.html?lang=fr

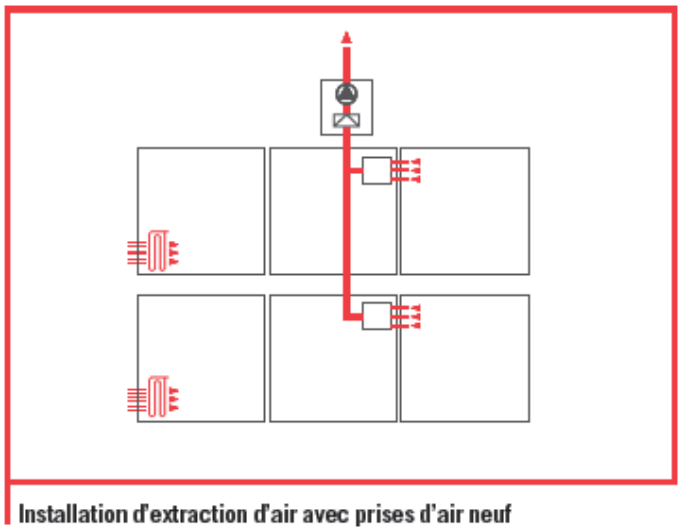
3. Systèmes de ventilation : la pratique actuelle

3.1. Système d'extraction simple/ le type de ventilation le plus répandu actuellement à Genève ?

La nécessité d'avoir une certaine qualité de l'air dans les espaces intérieurs, pour des raisons de santé et de protection du bâti contre l'humidité, a conduit à l'introduction du renouvellement de l'air à l'aide de la ventilation mécanique, ce qui a été réalisé, dans les décennies précédentes, par des systèmes de ventilation d'extraction simple.

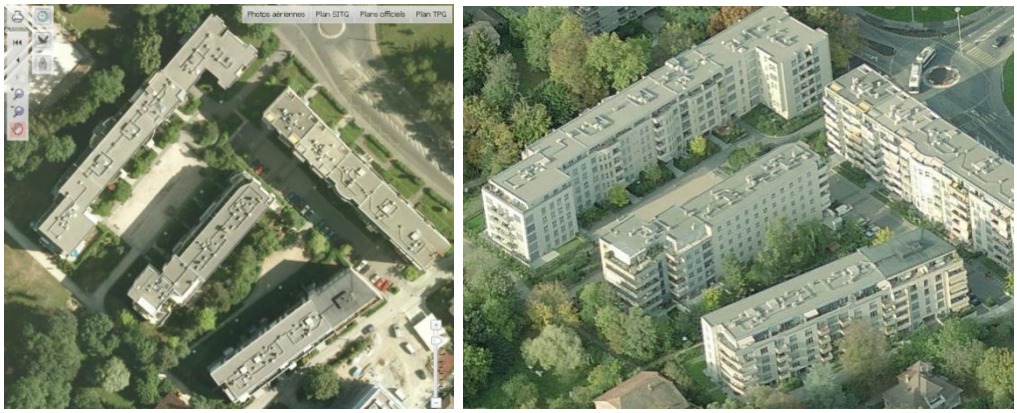
Dans un système de ventilation d'extraction simple, seul l'air vicié est extrait mécaniquement. L'air frais pénètre dans le bâtiment grâce à la dépression créée par l'installation d'extraction. L'extraction est réalisée en général dans les toilettes et la cuisine par des conduites qui montent jusqu'à la toiture où se trouve une tourelle de ventilation. Quant à l'air fourni, il semblerait que jusqu'à la fin des années 90 (voir SIA 180), l'introduction de l'air frais était laissée aux défauts d'étanchéité du bâtiment. A partir de 1999, la norme SIA 180 exige que la fourniture d'air frais soit assurée par des ouvertures ad hoc ou par une installation de ventilation naturelle ou mécanique. La figure suivante montre le schéma d'un système de ventilation d'extraction simple avec prises d'air frais.

Fig. 1 : Système de ventilation d'extraction simple. (Source : Minergie)



Le système de ventilation d'extraction simple est très probablement le système de ventilation le plus répandu actuellement dans le parc immobilier à Genève (en particulier dans les logements). Il suffit de faire un survol des cités de Meyrin et d'Onex (à l'aide du système SITG par exemple) pour constater l'existence des conduites et tourelles de systèmes d'extraction installés sur les toitures des bâtiments (voir figure suivante).

Fig. 2 : Toitures de bâtiments à Meyrin : on aperçoit la présence des cages d'ascenseurs, des conduites et des tourelles d'extraction sur les toits. (Source : SITG Genève)



L'air sortant par le système d'extraction est, en général, à une température d'environ 22°C à 24°C. Pour les logements, des mesures réalisées sur quelques bâtiments nous ont permis de constater que la température de l'air extrait est relativement constante, elle augmente légèrement tôt le matin, à midi, et le soir. En effet, l'utilisation des douches (le matin) et la cuisson des aliments (à midi et le soir) dégagent de la chaleur qui est évacuée directement par le système d'extraction.

Les chapitres suivants traitent des alternatives de récupération de chaleur de l'air vicié pour les systèmes d'extraction simple, qui sont centralisés.

3.2. Les système double-flux avec récupération de chaleur

La récupération de chaleur de l'air extrait des bâtiments pour le préchauffage de l'air frais n'est pas un nouveau concept. Une publication du Centre Universitaire d'Etudes des problèmes de l'Energie CUEPE datant de 1981 (Gsponer et. al. 1981) contient quelques études portant sur la récupération de chaleur dans le secteur des bâtiments locatifs.

De nos jours, la récupération de chaleur de l'air vicié pour le préchauffage de l'air frais à travers l'utilisation des installations double flux avec récupération de chaleur est relativement bien connue. Une bonne partie des nouvelles constructions intègrent des systèmes double flux avec différents types d'échangeurs de chaleur. Par exemple, les bâtiments au standard Minergie doivent posséder une installation ventilée contrôlée avec récupération de chaleur, faute de quoi le standard est difficilement atteignable.

Pendant les deux décennies précédentes, nous avons eu l'opportunité de suivre, analyser et expertiser quelques systèmes de récupération de chaleur sur l'air extrait pour le chauffage de l'air frais. Les cas les plus représentatifs sont les suivants :

- Le Complexe de la « Cité Solaire » (Branco et al. 2002) : 6 monoblocs double flux avec récupération de chaleur à plaques, avec en amont un puits canadien;

- Le Complexe du « Pommier » (Zgraggen, 2010) : 5 monoblocs double flux avec récupération de chaleur (RC) à plaques pour le préchauffage de l'air frais et pompe à chaleur sur l'air vicié;
- Le Bâtiment « Perret » (Hollmuller et Lachal 2003) : un monobloc double flux avec RC. Deux puits canadiens (sol-air et sol-eau-air) se situent en amont ;
- Le Bâtiment « Gros-Chêne » (Mermoud et al. 2012) : un monobloc double flux avec RC et pompe à chaleur (étude en cours)
- Le Bâtiment « Liotard » (Zgraggen et al. 2005) : un monobloc double flux avec RC.

Notons que dans tous ces cas, la récupération de chaleur est réalisée par des échangeurs à plaques à flux croisé. C'est ce type de système qui est le plus couramment utilisé actuellement dans les nouvelles installations.

Ci-dessous les points essentiels de ces études :

- L'étude réalisée sur la cité Solaire montre que le rendement de température pour les trois monoblocs qui ont été étudiés est de 42%, 37% et 48% respectivement. Les rapports de débit pulsion/extraction sont les suivants : 1.21, 0.52 et 1.09 respectivement.
- L'étude réalisée sur le bâtiment Perret montre un rendement de température moyen de l'échangeur de chaleur de 48%. La variation du rendement en fonction du flux d'air est principalement due à l'encrassement des filtres.
- L'expertise réalisée sur le monobloc du bâtiment Liotard montre qu'en conditions normales de fonctionnement, le rendement de température est de 59%. Le rapport pulsion/extraction est légèrement supérieur à 1.1
- L'étude réalisée sur l' un des 5 monoblocs du complexe du Pommier montre que le rendement de température de l'échangeur de chaleur en fonctionnement réel se situe autour de 65%. Le rapport pulsion/extraction est de 1.02.
- Les mesures réalisées sur le monobloc du bâtiment Gros-Chêne montrent que le rendement de température de l'échangeur de chaleur à grande vitesse et à petite vitesse est de 65% et 70% respectivement. Dans ce monobloc, les flux entrant et sortant se trouvent correctement équilibrés.

On note l'évolution positive de l'efficacité au cours du temps. En effet, les récupérateurs de chaleur de la Cité Solaire (construits entre 1994 et 1996) et le bâtiment Perret (construit autour de l'année 2000) ont des rendements de température moyens qui se situent grosso modo entre 40% et 50% ; le rendement de température de l'échangeur de chaleur du bâtiment Liotard (rénové en 2002) est proche de 60% ; pour le bâtiment Pommier (construit entre 2004 et 2005) ce rendement est autour de 65% et finalement pour le bâtiment Gros-chêne (rénové entre 2007 et 2008), le rendement se situe entre 65% et 70%. Cette évolution est confirmée par les spécialistes de la ventilation.

Notons que le rendement de température, utilisé ci-dessus, est un indicateur couramment utilisé pour déterminer l'efficacité d'un échangeur de chaleur. Il correspond au rapport entre l'augmentation de température effectivement gagnée par l'air neuf (différence de température entre la sortie et l'entrée de l'échangeur) et le maximum de température qu'il aurait pu gagner (la différence de température entre les entrées des deux flux d'air). Cependant, le taux effectif de récupération de chaleur (quantité de chaleur effectivement récupérée, par rapport à la demande

brute de chaleur pour l'air neuf) peut différer du rendement de température, notamment lorsque les flux ne sont pas correctement équilibrés ou que le bâtiment n'a pas une bonne étanchéité (Roulet et al. 2001), ou lorsque le système de ventilation comporte un autre système de récupération en amont, comme p. ex. un puits canadien (Hollmuller, 2002).

Peu d'études existent sur la consommation d'énergie électrique induite par le système double flux. Les études citées plus haut montrent une **consommation électrique supplémentaire comprise entre 3 et 10 MJ/m².an**, avec un COP (Coefficient de performance énergétique, soit énergie chaleur gagnée divisée par énergie électrique consommée) compris entre 8 et 20. A l'échelle du canton, 10 millions de m² rénovés avec double flux amèneraient une consommation électrique supplémentaire de 10 à 30 GWh et un gain d'énergie thermique d'environ 200 GWh (40'000 tonnes de CO2).

Concernant les coûts, les études citées plus hauts donnent des coûts convergents **d'environ 25 cts /kWh économisé en neuf, et de l'ordre de 35 cts/kWh économisé en rénovation**. Ne sont pas pris en compte ici les cobénéfices de la ventilation double-flux comme le confort (pulsion d'air préchauffée plutôt que froid, humidité interne limitée), la pérennité de la construction par absence de condensation,…

4. Systèmes de ventilation : les alternatives de valorisation de la chaleur de l'air vicié

Il semble cohérent de penser tout d'abord à valoriser cette chaleur à l'intérieur du périmètre du bâtiment où se trouve le système de ventilation. Les alternatives pour la valorisation des rejets thermiques de la ventilation, si l'on se restreint au périmètre d'une même construction, sont les suivantes :

- Post - chauffage de l'air frais par pompe à chaleur en complément du double-flux (bâtiments de logements et bâtiments administratifs) ;
- (pré)chauffage de l'eau chaude sanitaire en absence de double-flux (plutôt les bâtiments de logements) ;
- Chauffage du bâtiment en absence de double-flux (bâtiments de logements et bâtiments administratifs).

Si pour une raison quelconque, il est impossible de valoriser cette chaleur fatale au sein même du bâtiment, il ne faut pas négliger la possibilité de la valoriser en dehors du périmètre même du bâtiment, en se servant par exemple de l'existence d'un réseau de chaleur à distance et à condition que celui-ci fonctionne à température basse. Cette possibilité n'a pas été prise en compte dans cette étude.

Ces différentes alternatives de valorisation présentent certaines caractéristiques propres (profils de consommation journaliers, hebdomadaires et saisonniers, niveaux de température, etc.) dont il faut tenir compte dans le but de choisir la technologie de récupération la plus appropriée et d'évaluer correctement le potentiel de récupération.

4.1. Les différentes alternatives

Nous décrivons ici sommairement les caractéristiques de différentes alternatives ou compléments de valorisation à l'échangeur double-flux. Les chapitres suivants présentent les analyses plus détaillées que nous avons réalisées.

<u>Chauffage de l'air frais</u>

Certains systèmes intégrés de ventilation double-flux possèdent une pompe à chaleur puisant l'énergie restant dans l'air vicié extrait après son passage dans le récupérateur et l'injectant à l'air neuf après son passage dans le récupérateur.

<u>Préchauffage de l'eau chaude sanitaire</u>

La récupération de la chaleur de l'air vicié pour le préchauffage (ou chauffage) de l'eau chaude sanitaire est, à notre connaissance, encore peu répandue à Genève. Cette alternative ne devrait pas donner un aussi bon taux de récupération que pour le cas de la valorisation pour le chauffage de l'air frais: le niveau de température est plus élevé (entre 10 °C et 55°C *versus* 18°C pour le conditionnement de l'air) et la demande est moins corrélée avec l'offre que dans le cas de la valorisation par le chauffage de l'air frais. Par contre, pour ce type d'application, la récupération de

chaleur sur l'air vicié peut se faire tout au long de l'année. A noter que s'il s'agit d'un bâtiment administratif, la demande d'eau chaude sanitaire est certainement faible.

Chauffage du bâtiment

Une autre alternative à considérer pour valoriser la chaleur de l'air vicié à l'intérieur du bâtiment est le chauffage.

La consommation d'énergie pour le chauffage peut varier considérablement d'un bâtiment à un autre en fonction de la qualité de l'enveloppe thermique. En outre, les caractéristiques du système de distribution de chauffage constituent un autre paramètre variable d'importance. Un système de distribution de chauffage à basse température, permettrait d'obtenir de meilleurs rendements qu'un système de distribution à haute température.

Pour ce type d'application, de même que pour le chauffage de l'air frais, la valorisation est réalisée pendant la période de chauffe.

4.2. Niveaux des températures

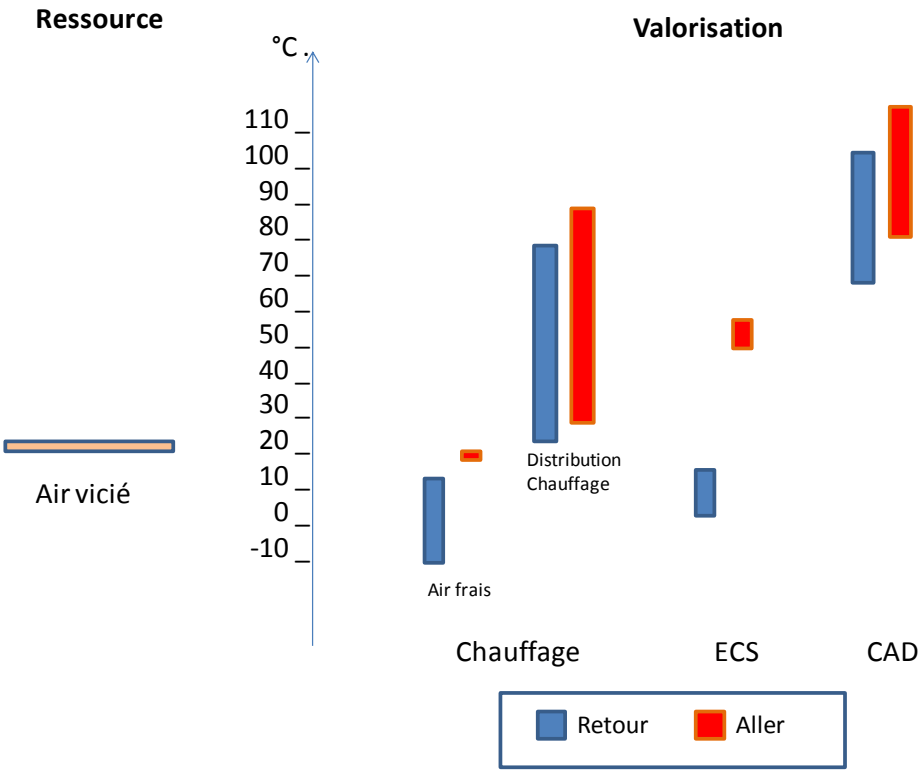
Les niveaux de températures de la chaleur fournie varient selon les alternatives :

- Chauffage de l'air pour la ventilation : l'air frais pendant la période de chauffe varie généralement entre -10°C et 15°C et doit être conditionné à une température proche de 20°C.
- Chauffage de l'eau chaude sanitaire : la température de l'eau potable varie au long de l'année entre 5°C et 15°C et doit être chauffée entre[4] 55°C et 60°C.
- Chauffage : la température de départ du fluide caloporteur pour le chauffage peut varier entre 30°C et 90°C, d'une part en fonction des caractéristiques du système de distribution de chaleur, en particulier de celles des émetteurs de chaleur (i.e. chauffage par le sol, radiateurs) et, d'autre part d'après les conditions de température externe. Concernant la température de retour, une différence de température entre 5°C et 15°C est typique entre la température de distribution et celle du retour.
- Chauffage à distance : Un chauffage à distance doit être capable de fournir de la chaleur à différents types d'utilisateurs qui sont connectés à ce service. A Genève, les températures du CAD se situent entre 85°C et 130°C, valeur qui dépend principalement de la température externe.

[4] Les besoins en température pour l'eau chaude sanitaire sont en général moins élevés. Cependant, pour diminuer les risques de légionellose, la pratique courante est de chauffer l'eau entre 55°C et 60°C.

La figure ci-dessous donne sous forme schématique les niveaux de températures pour les différentes alternatives de valorisation que nous venons d'énoncer.

Fig. 3 : Niveau de température de la ressource (air vicié) et des différentes alternatives de valorisation.



Un simple récupérateur de chaleur peut servir à valoriser la chaleur de l'air vicié pour le chauffage de l'air frais compte tenu que la température de l'air frais est en général celle de la température externe[5]. Par contre, les applications concernant l'eau chaude sanitaire, le système de chauffage du bâtiment, et le système CAD, ont besoin de températures plus élevées que celle de l'air vicié et l'utilisation d'une pompe à chaleur devient alors impérative.

[5] Il existe quelques exceptions, par exemple lors de l'existence d'un puits canadien.

5. Discussion des alternatives et potentiel

5.1. Modélisation

Données de base

La simulation des trois types de valorisation (air neuf, ecs, chauffage) concernent un bâtiment résidentiel type. Une bonne partie des conditions cadre (débit d'air vicié type, consommation ecs, production solaire, …) sont calquées sur un bâtiment rénové de la Nouvelle Cité d'Onex (Lachal et al. 1992). Les simulations sont effectuées en pas de temps horaire, sur une année météorologique complète.

De façon générale, l'air vicié est fixé à une valeur constante de 1.1 m3/h par m2 de plancher (0.4 ach pour 2.5 m de plafond). Sa température est fixée à 22 °C pendant la période de chauffage, et fluctue autrement en fonction de la température extérieure.

La pac se caractérise par un DT de 6K pris sur l'air vicié (ce qui, pour le débit de 1.1 m3/h.m2 correspond à un potentiel d'extraction de 2.16 W/m2). La consommation électrique se scinde en deux composantes (selon analyse de la pac sur air vicié du bâtiment gros-Chêne, effectuée dans le cadre du projet COP5) :

- Une composante qui participe activement au cycle thermodynamique ; cette composante est déterminé via une efficacité technique fixe (43%), appliquée au rendement de Carnot.
- Une composante résiduelle (0.18 W/m2), qui correspond à une puissance de fonctionnement à vide ou à des pertes non directement liée au cycle thermodynamique (frottements, …)

Enfin, selon le type de valorisation considérée, la chaleur délivrée par la pac est limitée par la demande, ou encore par une température de coupure au niveau du condenseur ou de l'évaporateur.

Valorisation sur air neuf

Lors d'une valorisation sur l'air neuf (en aval d'un récupérateur de chaleur double-flux), les seuils de coupure sont les suivants :

- Coupure générale de la pac en dehors de la saison de chauffage.
- Température en sortie d'évaporateur inférieure à 0 °C, afin d'éviter le givrage. A noter que cette limite est spontanément respectée par les deux autres types de valorisation, qui fonctionnent directement sur l'air vicié (sans récupérateur double flux).
- Température du condenseur (valorisation sur air neuf) inférieure à 22°C (cas de base).
- Température en sortie de récupérateur double-flux (évaporateur) supérieure à 18 °C (cas de base) ; cette situation a lieu en début/fin de saison de chauffage, lorsque la demande de chaleur est faible.

Valorisation sur ecs

Lors d'une valorisation sur ecs, le cycle de demande journalier n'est pas en phase avec l'offre, qui est quasi constante. Ainsi, la valorisation de la pac se fait via un stock de préchauffage (en amont de l'auxiliaire). Ce stock peut être connecté directement sur l'arrivée d'eau froide, ou sur un stock solaire (0.6 lit de stock par m2 de plancher). La température de préchauffage du stock (condensateur) est fixée comme suit :

- De façon générale, la température du condenseur s'adapte au niveau de celle du stock.
- Au niveau supérieur, l'utilisation de la pac est limitée par une température maximum (55 °C pour cas de base) ; notons cependant qu'en en été le stock peut monter à des températures plus élevées lorsqu'il est alimenté par le stock solaire.
- Au niveau inférieur, le condenseur est au minimum 4K en dessus de l'évaporateur, ce qui permet de préchauffer le stock lorsque celui-ci est alimenté par de l'eau plus froide que l'air vicié (source froide) : cela est le cas lorsque le stock est alimenté directement par le réseau, ou par le stock solaire en hiver.

Au niveau de la distribution, la demande ecs est fixée par un débit de soutirage (1.72 lit/m2 par jour, en moyenne) et une température (58 °C en moyenne) qui évoluent au niveau horaire, mais également au cours de l'année (données CGO).

Valorisation sur distribution chauffage

Lors d'une valorisation chauffage, l'inertie du bâtiment est en principe suffisante à encaisser les variations de production de la pac, si bien que celle-ci livre sa chaleur directement au circuit de distribution. La demande de chauffage est caractérisée par une signature énergétique (puissance de chauffage à 0 °C extérieur, et variation linéaire en fonction de celle-ci), pouvant éventuellement limiter la production de la pac (en début/fin de saison). Le niveau de température du condenseur est donné quant à lui par la température de distribution, également fonction linéaire de la température extérieure (courbe de chauffe).

5.2. Valorisation air neuf

		Base	EffBas	EffHaut	Mdeseq
Air vicié & neuf					
Mvicié	m3/h.m2	1.10	1.10	1.10	1.10
Mneuf/Mvicié		1.00	1.00	1.00	1.10
Récupérateur					
EffRec		0.65	0.50	0.85	0.65
COPrec		20.00	20.00	20.00	20.00
Pac					
TcondMax	C	22.00	22.00	22.00	22.00
TevapMax	C	18.00	18.00	18.00	18.00
dTevapMax	K	6.00	6.00	6.00	6.00
EffPac	-	0.43	0.43	0.43	0.43
EoPac	W/m2	0.18	0.18	0.18	0.18
Resultats					
Qtot	MJ/m2	102.1	102.1	102.1	112.3
Qrec	MJ/m2	66.4	51.1	86.8	73.0
Qpac	MJ/m2	33.2	38.8	8.8	33.7
Qaux	MJ/m2	2.5	12.3	6.5	5.7
Erec	MJ/m2	3.3	2.6	4.3	3.7
Epac	MJ/m2	5.7	4.9	2.9	5.7
COPpac		5.87	7.99	3.07	5.86
COPrec+pac		11.10	12.13	13.27	11.35

Paramètres

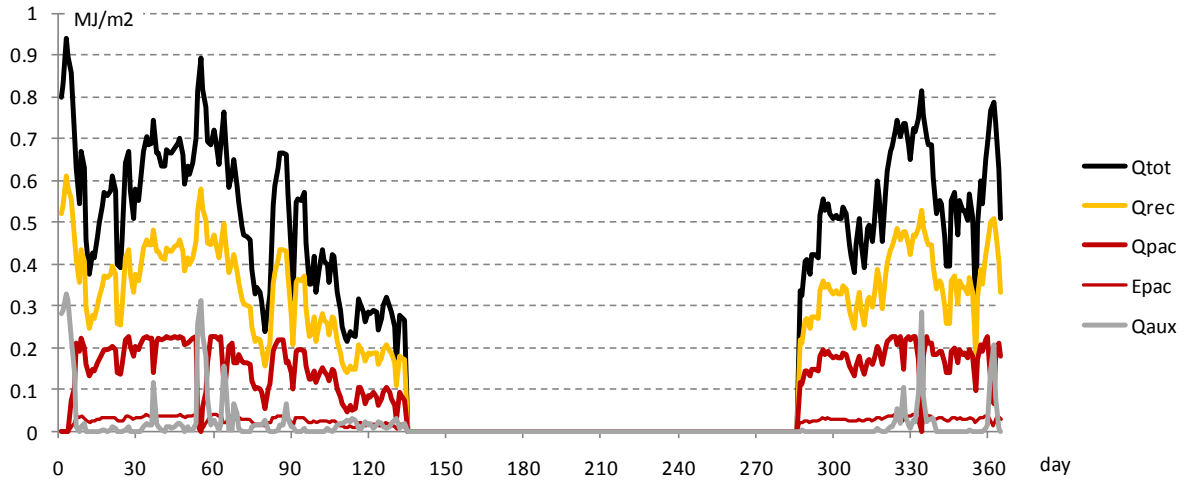
- Mvicié : débit air vicié
- Mneuf/Mvicié : rapport de débit air neuf/vicié
- EffRec : efficacité récupérateur double-flux
- COPRec : COP récupérateur double-flux
- TcondMax : consigne max au condenseur (air neuf, après pac)
- TevapMax : consigne max à l'évaporateur (air vicié, après récupérateur)
- EffPac : efficacité technique de la pac
- EoPac : consommation électrique résiduelle de la pac

Résultats

- Qtot : chaleur nécessaire au chauffage de l'air (remplacement air vicié par air extérieur)
- Qrec : chaleur récupérée double-flux
- Qpac : chaleur produite pac
- Qaux : chaleur auxiliaire (solde pour atteindre Qtot)
- Erec : électricité double-flux
- Epac : électricité pac
- COPpac : COP pac = Qpac/Epac

- COPrec+pac : COP système = (Qrec+Qpac)/(Erec+Epac)

Fig. 4 : Valorisation sur air neuf, cas de base



L'ajout d'une pompe à chaleur après le récupérateur permet de réduire la consommation énergétique, et ce d'autant plus que le récupérateur est moins efficace. Ainsi, un récupérateur d'efficacité moyenne (65%) permet une récupération de chaleur supplémentaire de 1/3 des besoins contre 8% avec un récupérateur de haute efficacité (85%). Le coefficient de performance (COP) de la pac seule va être maximum avec un « mauvais » récupérateur, alors que le COP total, incluant les deux systèmes de récupération, sera maximum avec un excellent échangeur. Des valeurs de 5 sont dépassées pour la pac avec les récupérateurs standards.
Ainsi, le rajout d'une pompe à chaleur après le récupérateur statique est une bonne solution avec un échangeur de faible efficacité, ce qui est le cas avec un système de récupération directe via un circuit à eau glycolée connectant la gaine de pulsion à celle d'extraction. Ce type de solution peut être intéressant dans les rénovations où des contraintes d'espace existent et où il est quelquefois difficile de rapprocher physiquement les systèmes aérauliques.

Enfin, un léger déséquilibre entre pulsion et extraction (mise du bâtiment en surpression pour éviter les infiltrations froides peu confortables) ne change pas fondamentalement les résultats.

5.3. Valorisation ecs

		Base	Vst#1	Vst#2	BaseSol	Vst#1	Vst#2
Air vicié							
Mvicié	m3/h.m2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Solaire							
Isol	1/0	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00
COPsol		50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
Pac							
dTpacMin	K	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
dTevapMax	K	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
EffPac	-	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
EoPac	W/m2	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Stock							
TstockMax	C	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00	55.00
Vstock	lit/m2	0.50	1.00	0.25	0.50	1.00	0.25
Resultats							
Qtot	MJ/m2	125.3	125.3	125.3	125.3	125.3	125.3
Qsol	MJ/m2	0.0	0.0	0.0	39.6	40.2	38.8
Qpac	MJ/m2	64.3	74.6	54.0	44.1	51.3	37.0
Qaux	MJ/m2	61.1	50.9	71.4	41.7	34.0	49.5
Esol	MJ/m2	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.8
Epac	MJ/m2	11.0	14.2	8.3	8.6	11.0	6.7
COP pac	-	5.9	5.2	6.5	5.1	4.7	5.5
COP sol&pac	-	5.9	5.2	6.5	8.9	7.8	10.2

Paramètres

- Mvicié : débit air vicié
- Isol : avec/sans préchauffage solaire thermique (1/0)
- COPsol : COP solaire thermique
- dTpacMin : consigne min pour différentiel condensateur - évaporateur
- TevapMax : consigne max à l'évaporateur (air vicié, après récupérateur)
- EffPac : efficacité technique de la pac
- EoPac : consommation électrique résiduelle de la pac
- TstockMax : température max pour le stock de préchauffage pac
- Vstock : volume du stock de préchauffage pac

Résultats

- Qtot : chaleur nécessaire au chauffage de l'air (remplacement air vicié par air extérieur)
- Qsol : chaleur solaire thermique
- Qpac : chaleur produite pac
- Qaux : chaleur auxiliaire (solde pour atteindre Qtot)
- Esol : électricité solaire thermique

- Epac : électricité pac
- COPpac : COP pac = Qpac/Epac
- COPsol+pac : COP système = (Qsol+Qpac)/(Esol+Epac)

Fig. 5 : Valorisation sur ecs, cas de base.

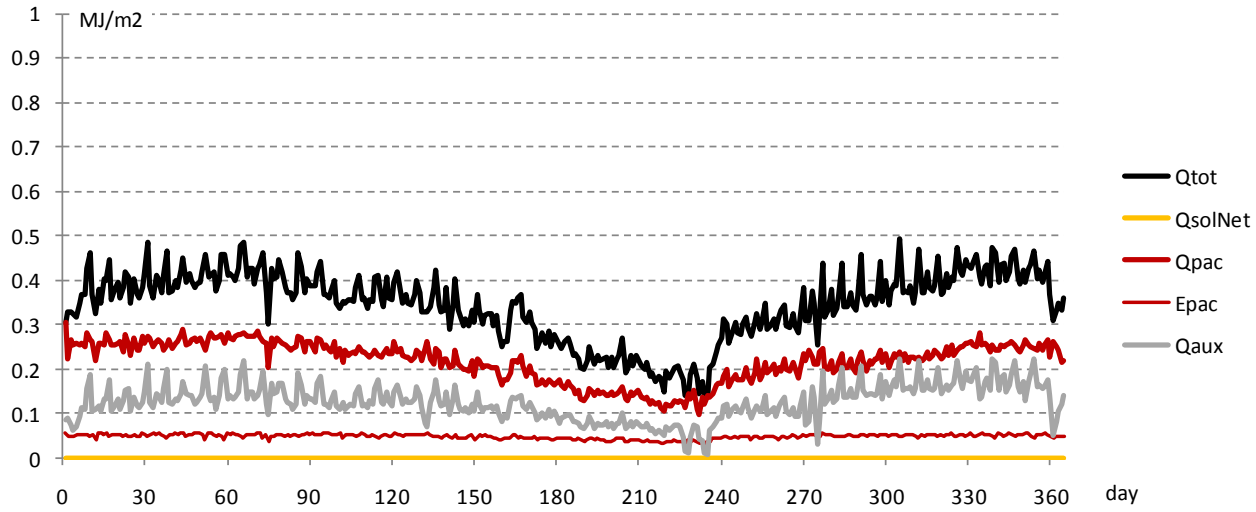
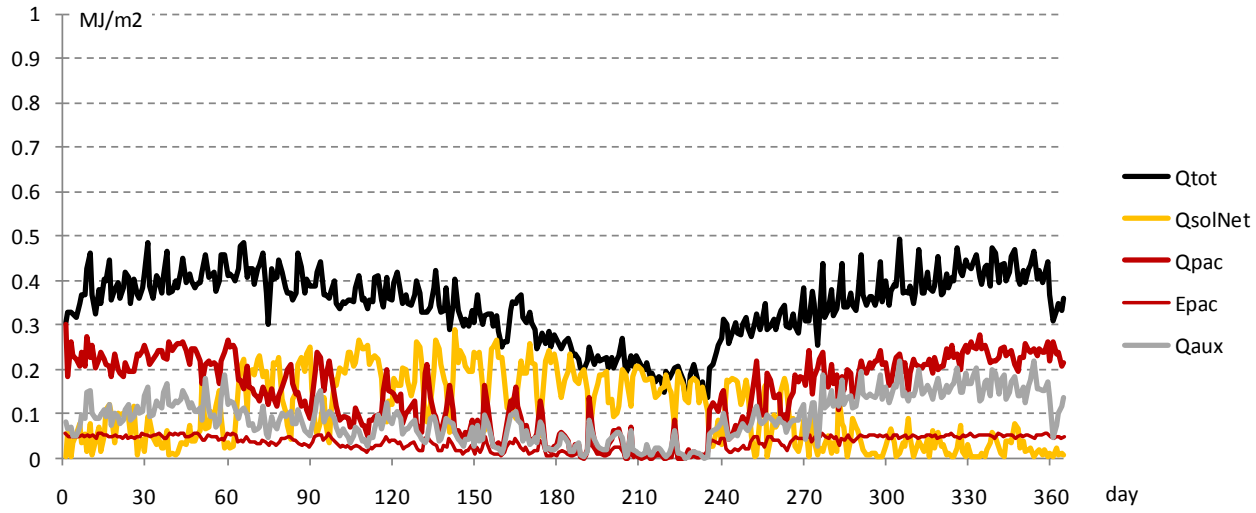


Fig. 6 : Valorisation sur ecs, cas de base avec solaire thermique.



Deux cas sont considérés selon qu'il y a une installation solaire ou pas.

<u>Sans installation solaire</u>

Dans ce cas, la Pompe à chaleur sur air vicié permet de récupérer environ la moitié de la chaleur nécessaire à chauffer l'eau avec un COP intéressant de 5.9.

Le dimensionnement du stock de préchauffage est optimum avec une valeur de 0.5 l/m² (soit 2.5 m³ pour un immeuble de 5'000m²) dans le sens où son agrandissement permet de récupérer plus de chaleur mais diminue le COP alors que sa diminution permet d'augmenter le COP mais diminue la quantité de chaleur récupérée. Il s'agit donc d'un paramètre moyennement important et qui devrait être dimensionné en tenant compte d'autres facteurs (place à disposition, prix, objectif quantité ou qualité,…).

Avec installation solaire

Comme prévu, la présence d'une installation solaire de préchauffage grève la récupération aussi bien en quantité qu'en qualité. Toutefois, il s'agit d'un double système qui reste intéressant principalement par la quantité totale de chaleur renouvelable fournie et par le COP total élevé. Il y a en fait une certaine complémentarité saisonnière entre les 2 systèmes.

Ce type de système se trouve quelquefois en option décentralisée afin de pouvoir couper l'alimentation depuis un mini-réseau et ainsi réduire les pertes de transport et maintien chaudière car il permet d'assurer 100% des besoins estivaux par tout temps (Pommier).

5.4. Valorisation chauffage

		Base	Renov	Renov&Sol	Neuf	Neuf&Sol
Air vicié						
Mvicié	ach	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Pac						
dTevapMax	K	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
EffPac	-	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
EoPac	W/m2	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Chauffage						
Pchf#0	W/m2	40.00	20.00	20.00	15.00	15.00
dPchf	W/m2.K	-2.00	-1.00	-1.00	-0.75	-0.75
Tchf#0	C	50.00	40.00	30.00	40.00	30.00
dTchf	C/K	-1.50	-1.00	-0.50	-1.00	-0.50
Resultats						
Qtot	MJ/m2	490.7	245.3	245.3	184.0	184.0
Qpac	MJ/m2	63.2	53.2	46.2	53.0	46.0
Qaux	MJ/m2	427.5	192.2	199.2	131.0	138.0
Epac	MJ/m2	23.9	14.1	7.1	14.2	7.2
COP	-	2.6	3.8	6.5	3.7	6.4
Qpac2	MJ/m2	137.9	113.0	97.0	111.3	95.6
Qaux2	MJ/m2	352.8	132.3	148.3	72.7	88.4
Epac2	MJ/m2	59.9	36.2	20.1	35.9	19.9
COP2	-	2.3	3.1	4.8	3.1	4.8

Paramètres

- Mvicié : débit air vicié
- TevapMax : consigne max à l'évaporateur (air vicié, après récupérateur)
- EffPac : efficacité technique de la pac
- EoPac : consommation électrique résiduelle de la pac
- Pchf#0 : puissance de chauffage à 0°C
- dPchf : baisse de puissance de chauffage
- Tchf#0 : température de chauffage à 0°C
- dTchf : baisse de température de chauffage

Résultats

- Qtot : chaleur nécessaire au chauffage de l'air (remplacement air vicié par air extérieur)
- Qpac : chaleur produite pac
- Qaux : chaleur auxiliaire (solde pour atteindre Qtot)
- Epac : électricité pac
- COP : COP pac = Qpac/Epac
- Qpac2 : chaleur produite, deux pac en cascade

- Qaux2 : chaleur auxiliaire, deux pac en cascades (solde pour atteindre Qtot)
- Epac2 : électricité, deux pac en cascades
- COP2 : COP deux pac en casacdes = Qpac2/Epac2

Fig. 7 : Valorisation chauffage, cas de base (une seule pac).

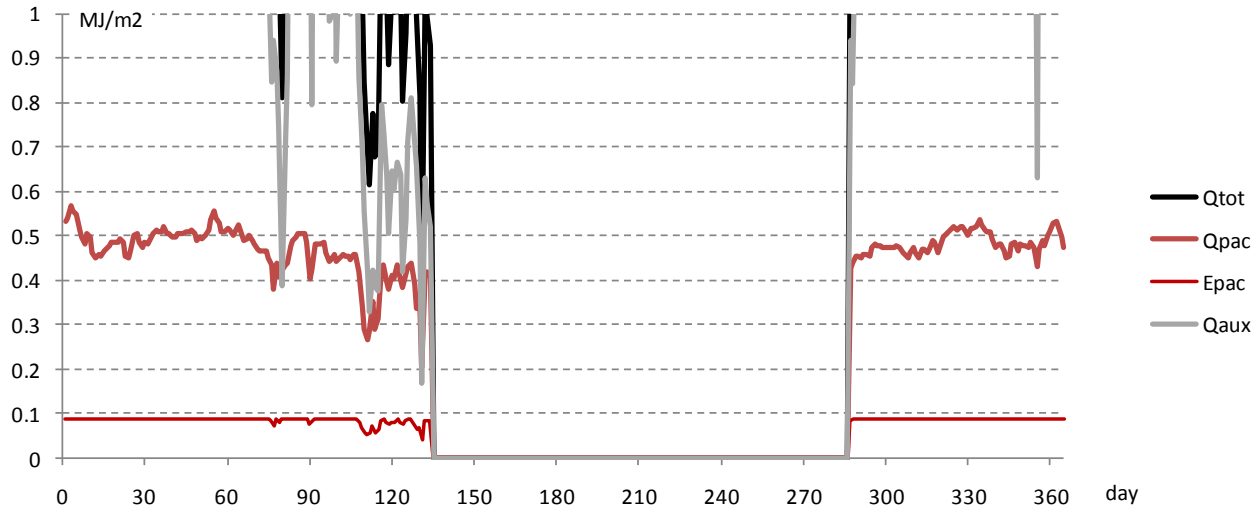
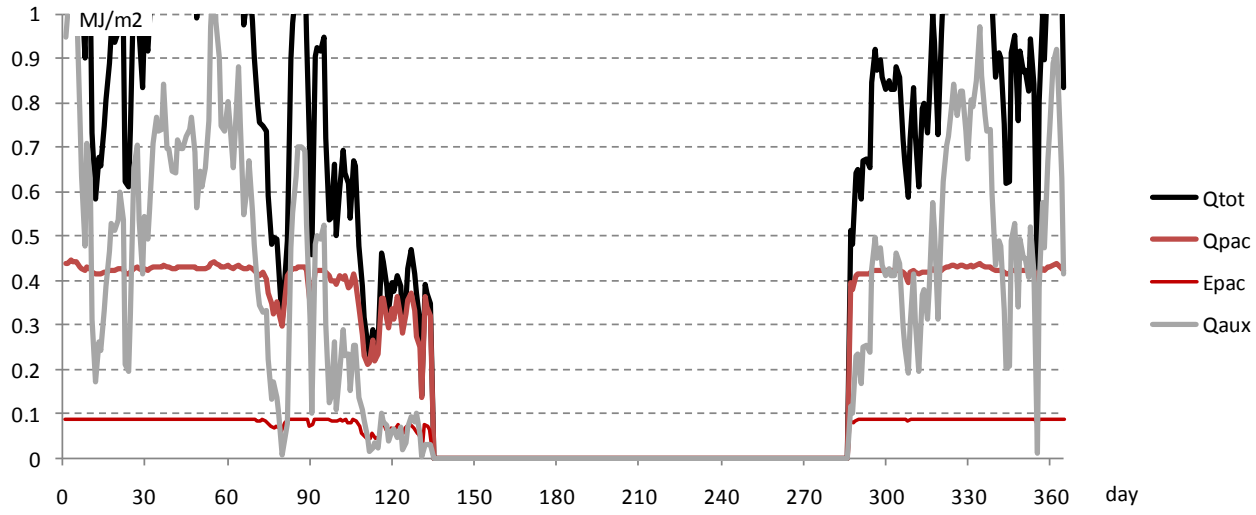


Fig. 8 : Valorisation chauffage, bâtiment neuf avec chauffage au sol (une seule pac).



<u>Bâtiment ancien / rénové</u>

Le paramètre le plus important est la température de distribution du chauffage. Avant rénovation, la récupération de chaleur est faible vis-à-vis des besoins (12%) et le COP trop bas pour être acceptable (2.6). Après rénovation et en supposant une adaptation de la température de distribution (baisse de 50 à 40 °C pour 0°C extérieur), la part couverte augmente à 25% (même si la valeur absolue baisse) et le COP dépasse la valeur de 3 (3.8). Ce n'est que l'utilisation d'un chauffage par le sol (30°C par 0°C extérieur) qui permet d'atteindre un COP intéressant (6.5).

L'utilisation de deux PAC en série abaissant la température de l'air de 6°C à chaque fois double environ la chaleur transférée au chauffage mais pénalise fortement les COP (la deuxième PAC travaille côté froid à plus basse température) et la température de distribution du chauffage devient très critique.

La rénovation du bâtiment est un critère obligatoire pour un tel système.

Bâtiment neuf type Minergie

La demande de chaleur a tenu compte du fait que l'air n'est plus préchauffé et qu'il faut donc d'avantage de chaleur que dans les bâtiments Minergie standards.

Exactement les mêmes résultats sont observés que pour le neuf, mais les conditions importantes pour l'efficacité d'un tel système sont beaucoup plus faciles à réaliser.

Soulignons que cette alternative peut contribuer à plus de la moitié des besoins de chauffage tout en conservant un COP élevé (proche de 5).

6. Conclusions et recommandations

Comme mentionné précédemment, la première alternative à considérer pour la valorisation de la chaleur de l'air vicié est le (pré)chauffage de l'air frais, ce qui peut être réalisé à l'aide d'un système double flux avec récupérateur de chaleur. Cependant, si pour une raison quelconque (d'ordre technique, architectural, financier ou autre) cette option n'est pas viable, il est envisageable de valoriser cette chaleur autrement via une pompe à chaleur (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.)

Trois alternatives ont été étudiées et sont toutes recommandables à condition d'assurer une conception, une réalisation et une gestion des installations excellentes. Toute médiocrité dans l'un de ces 3 stades va se reporter négativement sur les performances des systèmes en cause.

Les critères de choix d'un système seront donc basés essentiellement sur les contraintes physiques, financières et organisationnelles existantes de cas en cas et ceci en comparaison avec les contraintes existantes sur les systèmes à double-flux. Le prix beaucoup plus élevé par négakWh produit par un système double-flux dans le cas des rénovations est une indication du niveau de complexité plus élevé. Il parait donc à première vue que les systèmes alternatifs présentés ici auront des avantages importants dans le cas de la rénovation, le transport de l'énergie par l'eau étant beaucoup moins invasif que le transport par air.

A ce stade, nous proposons, avant d'aller plus loin dans la réflexion, de tester in-situ un de ces systèmes dans un cas de rénovation. Le système qui, à priori, s'y prêterait le mieux semble être celui intégrant l'eau chaude sanitaire.

7. Références

Branco G., Lachal B., Gallinelli P., Gonzalez D., Weber W. (2002). Analyse thermique de la cité solaire à Plan les Ouates (Genève). Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.

Gsponer A., Giovannini B., Branch J. (1981). Energie, problèmes et perspectives : conservation de l'énergie : recherches et réalisations techniques dans l'habitat et l'équipement ménager. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.

Hollmuller P. (2002) Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Genève : Université de Genève, Faculté des Sciences (Thèse, Section de physique et Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie).

Hollmuller P., Lachal B. (2003). COSTEAU, Préchauffage et rafraîchissement par collecteurs souterrains à eau, Etude de cas (bâtiment Perret à Satigny, GE) et généralisation. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.

Lachal B., Weber W., Guisan O. (1992). Simplified methods for the thermal analysis of multifamily and administrative buildings, in : ASHRAE Transactions, vol. 98, part 1, p. 1151-1159.

Mermoud F., Khoury J., Lachal B. (2012). Suivi énergétique du bâtiment 40-42 de l'avenue du Gros-Chêne à Onex (GE), rénové selon le standard MINERGIE® Aspects techniques et économiques. Institut des sciences de l'environnement, Université de Genève.

Roulet C.-A., Heidt F.D., Foradini F., Pibiri M.-C. (2001). Real heat recovery with air handling units. Energy and Buildings, 33, pp. 495-502.

Zgraggen J.M., Lachal B., Pampaloni E. (2005). Immeuble de la rue Liotard 71 à Genève. Problèmes de ventilation. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.

Zgraggen J.M. (2010), 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). Thèse No 4218, Université de Genève.