



Chapitre d'actes

2020

Accepted version

Open Access

This is an author manuscript post-peer-reviewing (accepted version) of the original publication. The layout of the published version may differ .

Réduction des émissions de CO₂ pour pompes à chaleur en résidentiel collectif

Romano, Elliot; De Sousa Fraga, Carolina; Holzmüller, Pierre

How to cite

ROMANO, Elliot, DE SOUSA FRAGA, Carolina, HOLLMULLER, Pierre. Réduction des émissions de CO₂ pour pompes à chaleur en résidentiel collectif. In: 26. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte». BFH Burgdorf, Suisse. [s.l.] : [s.n.], 2020.

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:136508>

Elliot Romano*, Carolina Fraga, Pierre Hollmuller, Université de Genève

Réduction des émissions de CO₂ pour pompes à chaleur en résidentiel collectif

Résumé

Nous évaluons les émissions de CO₂ de systèmes PAC, sur air ou sur eau souterraine, avec et sans PV complémentaire, pour un échantillon d'immeubles résidentiels collectifs (neufs, rénovés et non rénovés) situés à Genève. La performance des systèmes est évaluée par simulation numérique. Elle est croisée avec le contenu CO₂ du réseau électrique suisse (en tenant compte à la fois de la production nationale et des importations des pays voisins), en pas de temps horaire. En effet, la demande de chaleur des bâtiments ainsi que du contenu en CO₂ du réseau affichent toutes deux une forte tendance saisonnière, si bien qu'une estimation à partir de valeurs annuelles s'avère insuffisante. Finalement, en comparaison avec une chaudière à gaz, les deux types de PAC induisent d'importantes économies annuelles de CO₂ (air : 61 - 81% selon la méthode de comptabilisation ; eau souterraine : 75% - 87%). Enfin, si le photovoltaïque peut contribuer de manière substantielle à la demande estivale en électricité, les économies additionnelles de CO₂ restent relativement marginales, en raison de la saisonnalité de la production et du contenu en CO₂ du réseau.

Mots clés : pompe à chaleur (PAC) ; photovoltaïque (PV), résidentiel collectif ; émissions de CO₂

* Auteur correspondant. Tél.: +41 22 379 0657; Email: elliot.romano@unige.ch.

Nomenclature

Acronymes

ECS	eau chaude sanitaire
PAC	pompe à chaleur
PV	photovoltaïque

Symboles

COP	coefficient de performance ($\text{kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{el}}$)
Cbld	contenu CO_2 de la chaleur, relatif à la surface chauffée (kg/m^2)
Cel	contenu CO_2 de l'électricité pour la PAC ($\text{kg}/\text{kWh}_{\text{el}}$)
Cgrid	contenu CO_2 du réseau électrique ($\text{kg}/\text{kWh}_{\text{el}}$)
Cth	contenu CO_2 de la chaleur ($\text{kg}/\text{kWh}_{\text{th}}$)
Esys	électricité du système ($\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2$)
Qdem	demande de chaleur du bâtiment ($\text{kWh}_{\text{th}}/\text{m}^2$)
Qecs	demande d'ECS ($\text{kWh}_{\text{th}}/\text{m}^2$)
Qch	demande de chauffage ($\text{kWh}_{\text{th}}/\text{m}^2$)
SPF	facteur saisonnier de performance ($\text{kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{el}}$)

1. Introduction

1.1. Enjeu général

Un nombre croissant d'auteurs évaluent l'impact environnemental lié à l'introduction massive de pompes à chaleur (PAC), mais peu d'entre eux se penchent sur la dynamique temporelle du contenu carbone de la production d'électricité, en lien avec la demande des PAC. Par ailleurs, lorsque tel est le cas [1,2], les études en question ne prennent pas en compte l'impact des importations et des exportations d'électricité sur le contenu en carbone du mix électrique. Dans un pays comme la Suisse, qui dépend de façon importante des échanges d'électricité avec les pays voisins, cet enjeu est cependant primordial.

1.2. Contexte local

A Genève, la production de chaleur pour les bâtiments repose actuellement à 93% sur des sources fossiles. L'objectif de la politique énergétique est de réduire cette part à 66% d'ici 2035. L'une des principales contributions prévues en ce sens consiste en l'introduction massive de systèmes PAC, au niveau des bâtiments ainsi que sur les réseaux de chauffage à distance [3].

Même si les immeubles résidentiels collectifs ne constituent que 27% du parc immobilier genevois, ils représentent près de la moitié des surfaces chauffées du canton, soit 19.3 sur 40.9 millions de m^2 [4]. Environ la moitié de ces immeubles ont été construits entre 1946 et 1980 : ils ont besoin aujourd'hui d'être rénovés et présentent un fort potentiel d'économie d'énergie. Parallèlement à la réduction de la demande de chaleur via la rénovation, la réduction des émissions de CO_2 peut également être obtenue en remplaçant les combustibles fossiles par des énergies renouvelables, en particulier par des systèmes de pompes à chaleur (PAC). Toutefois, outre les questions de performance, le contenu CO_2 de l'électricité nécessaire pour faire fonctionner ces systèmes, ainsi que la complémentarité avec la production locale de PV, restent une question fondamentale.

1.3. Objectif

Dans ce contexte, nous avons précédemment réalisé une étude par simulation numérique qui compare les potentiels et les contraintes des différentes sources de chaleur exploitées par PAC, mis en œuvre dans divers types de bâtiments résidentiels collectifs situés à Genève [5]. En complément, une étude récente évalue la teneur horaire en CO₂ du mix de consommation d'électricité suisse [6], en tenant compte à la fois de la production nationale et des importations en Suisse en provenance des pays voisins.

L'objectif du présent document est de recouper ces deux études, afin d'évaluer les émissions de CO₂ de systèmes PAC, sur air ou sur eau souterraine, avec et sans PV complémentaire, pour l'échantillon de bâtiments en question.

1.4. Méthode et résultats

La partie méthodologique du document est organisée comme suit : i) présentation de l'échantillon de bâtiment et des profils de charge thermique associés ; ii) caractérisation des sources de chaleur considérées (air et eau souterraine), du schéma et de l'algorithme de simulation du système PAC, ainsi que du système PV complémentaire ; iii) caractérisation du contenu horaire en CO₂ du mix de consommation d'électricité suisse, qui est donnée pour deux approches comptables distinctes (contenu CO₂ du réseau inférieur et supérieur).

Les résultats sont analysés comme suit : i) performance des systèmes PAC, en termes de COP quotidien et SPF annuel, pour les différentes demandes de chaleur ; ii) émissions de CO₂ des systèmes PAC et comparaison avec les émissions de CO₂ d'une chaudière à gaz ; iii) effet de la production PV sur la consommation/production d'électricité, ainsi que réduction des émissions de CO₂ correspondantes.

2. Échantillon de bâtiment et charge thermique

2.1. Échantillon de bâtiment

La présente étude se base sur le même échantillon de bâtiments résidentiels collectifs étudié dans [5] : i) 2 bâtiments neufs, avec même demande de chauffage, mais une demande d'ECS différenciée ; ii) 3 bâtiments rénovés, dont l'un avec une demande de chauffage faible et les deux autres avec une demande de chauffage intermédiaire, mais une température de distribution différenciée ; iii) 1 bâtiment non rénové, avec une demande de chauffage élevée. Les principales caractéristiques de ces bâtiments sont résumées dans le tableau 1 (avec une demande de chauffage correspondant à une année météorologique standard). A noter que 4 des bâtiments correspondent à des études de cas réels (*New*, *RetBest*, *RetRef*, *NoRet*), tandis que les 2 autres sont des combinaisons de ceux-ci, en termes de demande d'ECS (*NewLow*) ou de température de distribution de chauffage (*RetAvg*).

Bâtiment	Qch	Qecs	Qdem	Tch.0
	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	°C
New	20.8	47.7	68.5	30
New Low	20.8	28.3	49.1	30
Ret Best	37.8	34.6	72.4	40
Ret Avg	69.3	28.3	97.6	40
Ret Ref	69.3	28.3	97.6	50
No Ret	110.0	28.3	138.3	50

Qecs, Qch, Qdem : demande annuelle d'ECS, de chauffage et totale (avec correction climatique par rapport à la météo standard).

Tch.0 : température de distribution de chauffage, pour une température météo de 0°.

Tableau 1. Échantillon de bâtiments.

La représentativité de l'échantillon est évaluée comme suit :

- Pour la demande de chauffage, la comparaison avec un benchmark du parc résidentiel collectif de Genève [4] montre que, à l'exception de *NoRet*, tous nos bâtiments se situent dans le 1^{er} décile de leurs périodes de construction respectives, ce qui signifie qu'ils sont représentatifs des meilleurs pratiques. Le bâtiment *NoRet* se situe dans le 3^{ème} quartile, proche du 4^{ème} quartile, ce qui signifie qu'il est représentatif d'une enveloppe de bâtiment inférieure à la moyenne.
- Pour la demande en ECS, la comparaison avec un benchmark sur un ensemble de 61 bâtiments genevois [7] donne les résultats suivants : *New* se situe dans le 4^{ème} quartile, parmi les valeurs les plus élevées ; *RetBest* est légèrement supérieur à la médiane ; tous les autres cas (qui par définition ont la même demande ECS) se situent dans le 2^{ème} quartile, plus proche du 1^{er} quartile que de la médiane.

2.2. Profils de charge thermique

Pour les besoins de la présente étude, les demandes de chaleur ci-dessus sont reportées à 2017, l'année météorologique de référence de cette étude, pour laquelle la teneur horaire en CO₂ de l'électricité est disponible (voir plus bas). Pour ce faire, nous considérons que : i) la demande d'ECS est indépendante de l'année météorologique et est donc la même que pour les données météorologiques standard ; ii) la demande de chauffage est multipliée par 1.03, le rapport entre les degrés-jours de 2017 et de l'année météorologique standard.

En accord avec [5], le profil de la demande horaire est alors défini comme suit : i) Pour l'ECS, le profil horaire se base sur les mesures d'un immeuble résidentiel collectif typique [8]. Il est ajusté par un facteur multiplicatif, de sorte que l'intégrale de la charge corresponde à la demande annuelle d'ECS du bâtiment considéré ; ii) Pour le chauffage, la charge horaire est donnée par une fonction linéaire de la température extérieure, définie par une température météo de non-chauffage (au-dessus duquel ce dernier est éteint) et une puissance thermique nominale à une température extérieure de 0°C (qui est ajustée de sorte que l'intégrale de la charge corresponde à la demande annuelle du bâtiment considéré) ; iii) La température de distribution de chauffage est donnée par une courbe de chauffe linéaire en fonction de la température extérieure, alors que la température de distribution de l'ECS est considérée constante, à 55°C.

Les limites de cette méthodologie, en particulier en termes de courbe de charge, ont été discutées en détail dans [9]. Pour le cas particulier d'un système PAC sur un bâtiment basse énergie, il a été montré que les résultats de simulation avec la demande de chaleur modélisée sont très similaires aux résultats de simulation avec la demande de chaleur mesurée, du moins au niveau du système agrégé.

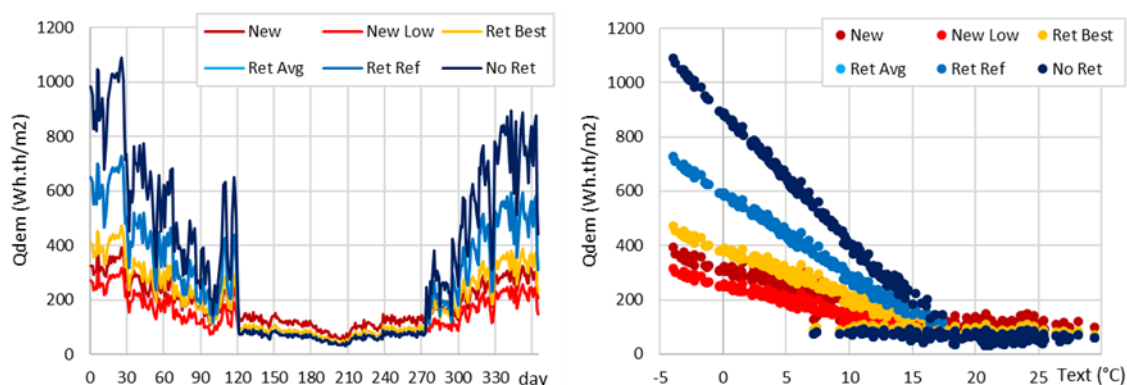


Figure 1. Demande thermique de l'échantillon de bâtiments : dynamique et relation avec la température météo (2017, valeurs journalières).

Les profils de demande thermique résultants sont présentés sur la Figure 1, en valeurs quotidiennes. Nous observons la demande d'ECS relativement constante pour une température

météo supérieure à 18°C, en dessous de laquelle les demandes de chauffage de l'échantillon de bâtiment sont visibles.

3. Systèmes PAC et demande électrique

3.1. Sources de chaleur

L'échantillon de bâtiment ci-dessus a précédemment été utilisé pour évaluer la performance de PAC sur diverses sources de chaleur [5] : i) air ambiant ; ii) sondes géothermiques ; iii) eau du lac Léman, pompée à une profondeur de 35 m ; iv) eau du Rhône, correspondant à la couche supérieure du lac ; v) eaux souterraines peu profondes ; vi) capteurs solaires thermiques non vitrés, utilisés comme absorbeurs de chaleur pour la PAC en cas d'irradiation solaire insuffisante pour la production solaire directe.

Comme attendu, les facteurs de performance saisonniers (SPF) simulés se sont avérés être fortement liés à la température de la source de chaleur : les eaux souterraines ont donné les valeurs SPF les plus élevées (4.3 – 4.8, en fonction de la demande de chaleur du bâtiment), suivies par le Rhône (3.9 – 4.5) et le Lac (3.8 – 4.3). Les sondes géothermiques donnaient des résultats légèrement inférieurs (3.6 – 4.0), tandis que le solaire et l'air se situaient en bas de l'échelle, avec des valeurs très similaires (solaire : 2.9 – 3.5 ; air : 3.0 – 3.4).

Dans la présente étude, nous nous concentrerons sur les deux cas extrêmes : i) l'air, qui est caractérisé par une forte variabilité saisonnière et quotidienne (valeurs horaires allant de -5°C à 34°C) ; ii) les eaux souterraines, avec une température constante de 13°C.

3.2. Système PAC

Le dimensionnement du système (PAC et stocks, Figure 2) est adapté à la charge thermique maximale du bâtiment considéré [5]. Son fonctionnement obéit aux priorités suivantes :

- 1) Maintien du réservoir d'ECS au-dessus de 50°C (avec hystérèse de 5 K) ;
- 2) Couverture de la demande de chauffage, selon les priorités suivantes : a) décharge du stock ; b) activation de la PAC, l'excédent de production étant utilisé pour charger le stock ; c) chauffage électrique direct, qui n'est activé qu'en cas de demande de chauffage et ECS simultanées, sans possibilité de décharge du stock.

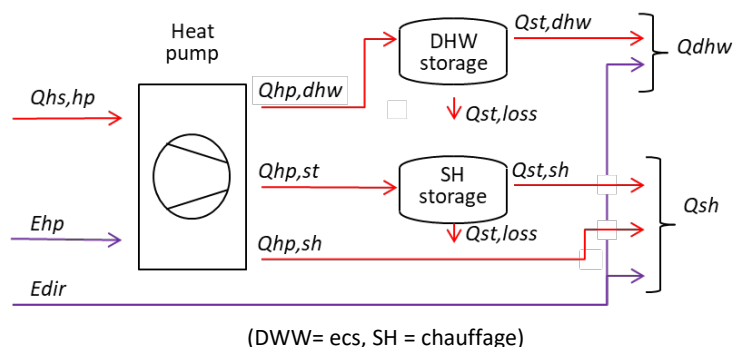


Figure 2. Configuration du système PAC et flux d'énergie associés.

Les composants sont modélisés selon des équations de bilan énergétique, qui sont intégrées dans le logiciel de simulation TRNSYS, en tenant compte des règles de priorité définies ci-dessus [9]. La PAC est caractérisée par une table de performance (fonction des températures côté évaporateur et condenseur), basé sur les données fabricant (note : dans le cas de la PAC sur air, la performance en question comprend l'électricité pour le dégivrage). Chacun des réservoirs de stockage est modélisé au moyen d'un modèle à un nœud (sans tenir compte des effets de stratification, négligeables étant donné les capacités de stockage relativement faibles), en tenant compte des pertes de chaleur dans le local technique. Le chauffage électrique direct couvre la différence instantanée entre la demande et la production.

L'électricité auxiliaire pour les pompes de circulation n'est pas prise en compte. Les résultats de la simulation ont été validés au préalable avec les valeurs mesurées d'un système de pompe à chaleur solaire, au niveau des composants et du système [9]. Afin de prendre correctement en compte la dynamique du système, la simulation est réalisée en pas de temps de 6 minutes, et les résultats sont agrégés au pas de temps horaire.

3.3. Scénario de référence avec chaudière à gaz

Comme alternative au système PAC décrit ci-dessus, et à des fins de comparaison en termes de réduction des émissions de CO₂, nous considérons également la production de chaleur par le biais d'une chaudière à gaz. Dans ce cas, la production de chaleur (y compris les pertes de stockage) est considérée équivalente à la production horaire du système PAC sur eau.

4. Production photovoltaïque

En complément au système PAC, nous étudions les avantages de l'ajout de panneaux photovoltaïques sur la surface de toiture disponible du bâtiment. Pour ce faire, nous considérons les deux cas suivants [5] : i) une surface de toiture disponible de 0.2 m² par m² de surface chauffée, correspondant à Genève à un immeuble "bas" (4 étages, sous l'hypothèse d'un rapport de 80% entre la surface de toiture disponible, et la surface chauffée par étage) ; ii) une surface de toiture disponible de 0.1 m² par m² de surface chauffée, correspondant à Genève à un immeuble "haut" (8 étages).

La production PV est basée sur un rendement de 12 % appliqué directement à l'irradiation solaire horizontale horaire globale, ce qui correspond pour la météo 2017 à une production annuelle d'électricité de 162 kWh par m² de PV.

5. Emissions de CO₂

5.1. Systèmes PAC

Dans le cas des systèmes PAC, les émissions induites sont calculées sur une base horaire, au moyen du contenu CO₂ du mix de consommation d'électricité suisse, tel qu'évalué par [6]. Cette dernière étude prend en compte à la fois la production nationale et les flux entrants en Suisse en provenance de chacun des pays voisins. Pour ce faire, elle utilise les données horaires du mix de production des différents pays européens, par type de production, ainsi que les flux transfrontaliers horaires entre eux. Sur la base de considérations d'ordre de mérite économique, relativement aux divers types de production, il prend en compte l'impact sur le mix de production additionnel dû aux importations des pays voisins.

Enfin, le contenu CO₂ du mix électrique résultant est calculée à partir de l'intensité en carbone de chaque type de production, via la base de données ecoinvent [10]. Si cette méthode est relativement simple pour la plupart des types de production (énergies renouvelables, nucléaire, fossiles), un problème spécifique concerne la production d'électricité à partir des gaz de haut fourneau en Allemagne. Bien que ces dernières ne représentent qu'une faible part de la capacité de production du marché total, elles jouent un rôle important dans la compensation des pénuries de capacité au niveau européen, pendant la période hivernale, et contribuent de manière significative aux importations suisses. A cet égard, il convient de noter que le contenu CO₂ de l'électricité provenant des hauts fourneaux allemands est controversée, ce qui conduit à deux approches comptables distinctes : i) d'une part, ces gaz peuvent être considérés comme des "déchets" de l'industrie sidérurgique, auquel cas le contenu CO₂ correspondant est attribué à ce dernier secteur et non à la production d'électricité (contenu CO₂ inférieur) ; ii) d'autre part, au vu de considérations économiques spécifiques relatives à la décision de brûler les gaz ou de produire de l'électricité [6], on peut également soutenir que les émissions correspondantes doivent être attribuées au secteur de l'électricité (contenu CO₂ supérieur).

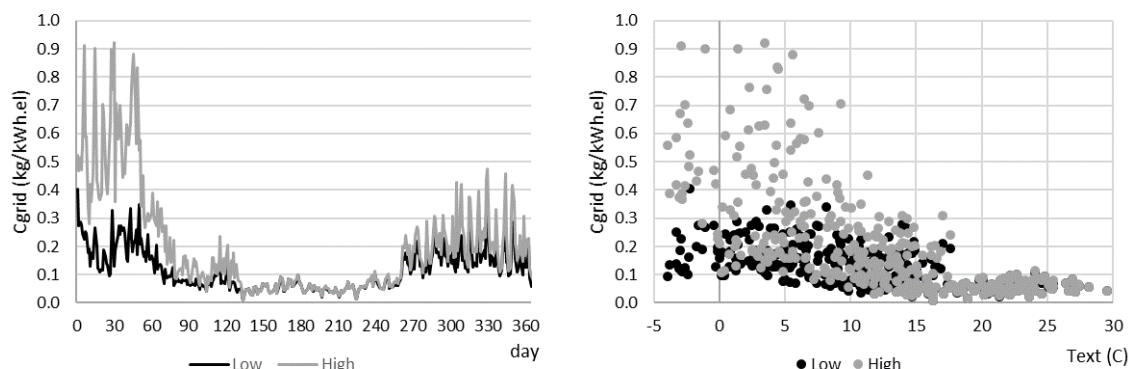


Figure 3. Contenu CO₂ de l'électricité suisse : dynamique et relation avec la température météo (2017, valeurs journalières).

Finalement, la dynamique du contenu CO₂ du réseau (année 2017) est représenté sur la Figure 3, en valeurs quotidiennes. Les deux approches comptables révèlent une forte saisonnalité, qui résulte de la saisonnalité de la production et de la demande d'électricité en Suisse et dans les pays voisins, ainsi que des importations et exportations qui y sont liées. On note en outre la question fondamentale de la méthode de comptabilisation des gaz de haut-fourneau, avec un facteur approximatif de 2 entre la moyenne annuelle résultante (contenu CO₂ inférieur : 108 g/kWh_{el}, contenu CO₂ supérieur : 196 g/kWh_{el}).

5.2. Production photovoltaïque et chaudière à gaz

Comme pour les systèmes PAC, les émissions évitées liées à la production photovoltaïque sont calculées sur une base horaire, au moyen du contenu CO₂ horaire du réseau. Dans le cas des chaudières à gaz, les émissions sont liées directement à la chaleur produite, par le biais d'un facteur d'émission constant de 249 g/kWh_{th} donné par la KBOB [11].

6. Résultats et discussions

6.1. Indicateurs de performance et d'émissions

Les résultats seront examinés sur la base de valeurs agrégées (au niveau journalier ou annuel) de la demande horaire de chaleur des bâtiments Q_{dem} (kWh_{th}/m²), de la demande d'électricité du système PAC E_{sys} (kWh_{el}/m²) et du contenu CO₂ du réseau C_{grid} (kg/kWh_{el}).

En fonction du niveau d'agrégation temporel, la performance du système PAC sera examinée en termes de COP journalier (kWh_{th}/kWh_{el}) et de SPF annuel (kWh_{th}/kWh_{el}) :

$$COP = \frac{\sum Q_{dem}}{\sum E_{sys}} \quad (1)$$

$$SPF = \frac{\sum Q_{dem}}{\sum E_{sys}} \quad (2)$$

Les émissions seront examinées en fonction du contenu CO₂ de la demande de chaleur, C_{bld} (kg/m²) et C_{th} (kg/kWh_{th}), ainsi que du contenu CO₂ de l'électricité pour la PAC, C_{el} (kg/kWh_{el}). Ces indicateurs sont définis comme suit (avec un niveau d'agrégation journalier ou annuel) :

$$C_{bld} = \sum E_{sys} \cdot C_{grid} \quad (3)$$

$$C_{th} = \frac{\sum E_{sys} \cdot C_{grid}}{\sum Q_{dem}} \quad (4)$$

$$C_{el} = \frac{\sum E_{sys} \cdot C_{grid}}{\sum E_{sys}} \quad (5)$$

6.2. Performances de la PAC

La Figure 4 montre le COP journalier en fonction de la température météo. Dans le cas de la PAC sur air, le COP se situe essentiellement entre 3 et 4 lorsque la température météo est supérieure à 10°C, mais il baisse pour des températures plus basses (en raison de la température plus basse de la ressource, ainsi que du dégivrage qui en découle). Dans le cas de la PAC sur eau, le COP se situe essentiellement 3.5 et 5.5 et n'est pas aussi sensible à la température extérieure.

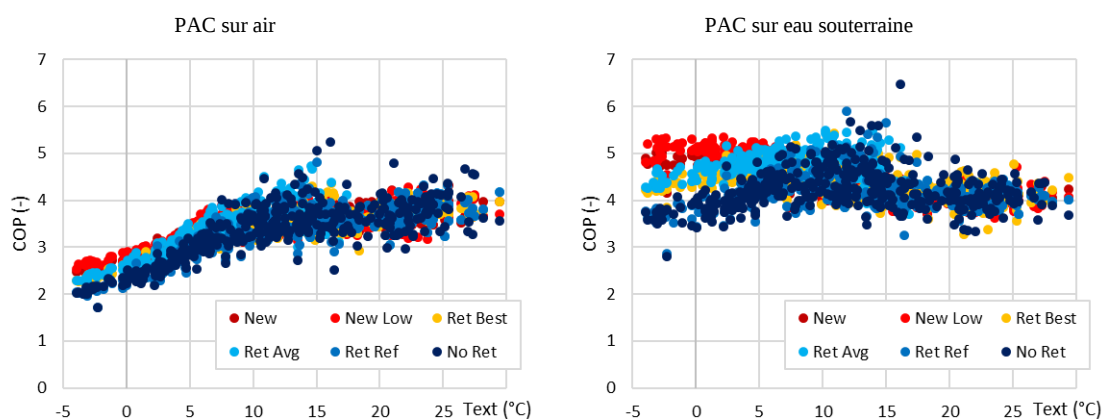


Figure 4. COP en fonction de la température météo (valeurs journalières).

Les valeurs correspondantes du SPF (non-compris électricité auxiliaire pour pompe de circulation) sont indiquées dans le Tableau 2, avec une moyenne de 3.06 pour la PAC sur air et de 4.42 pour la PAC sur eau.

Demande de chaleur et SPF		New	New Low	Ret Best	Ret Avg	Ret Ref	No Ret	Moyenne
Qdem	kWh.th/m2	67.12	47.72	69.51	92.23	92.23	129.82	
SPF air	kWh.th/kWh.el	3.24	3.26	3.10	3.11	2.83	2.80	3.06
SPF eau	kWh.th/kWh.el	4.51	4.68	4.46	4.65	4.10	4.12	4.42

air : PAC sur air ; eau : PAC sur eau souterraine

Tableau 2. Demande annuelle de chaleur et SPF associé.

6.3. Émissions de CO₂, sans PV

La Figure 5 montre les valeurs journalières de la consommation d'électricité (E_{sys} , en haut) et le contenu CO₂ de la demande de chaleur, relatif au contenu CO₂ inférieur du réseau (C_{bld} , en bas). On observe une forte corrélation entre la consommation d'électricité et la température extérieure, qui suit la demande de chaleur (cf. Figure 1). Une dispersion beaucoup plus importante apparaît pour le contenu CO₂, étant donné la dispersion du contenu CO₂ du réseau (cf. Figure 3).

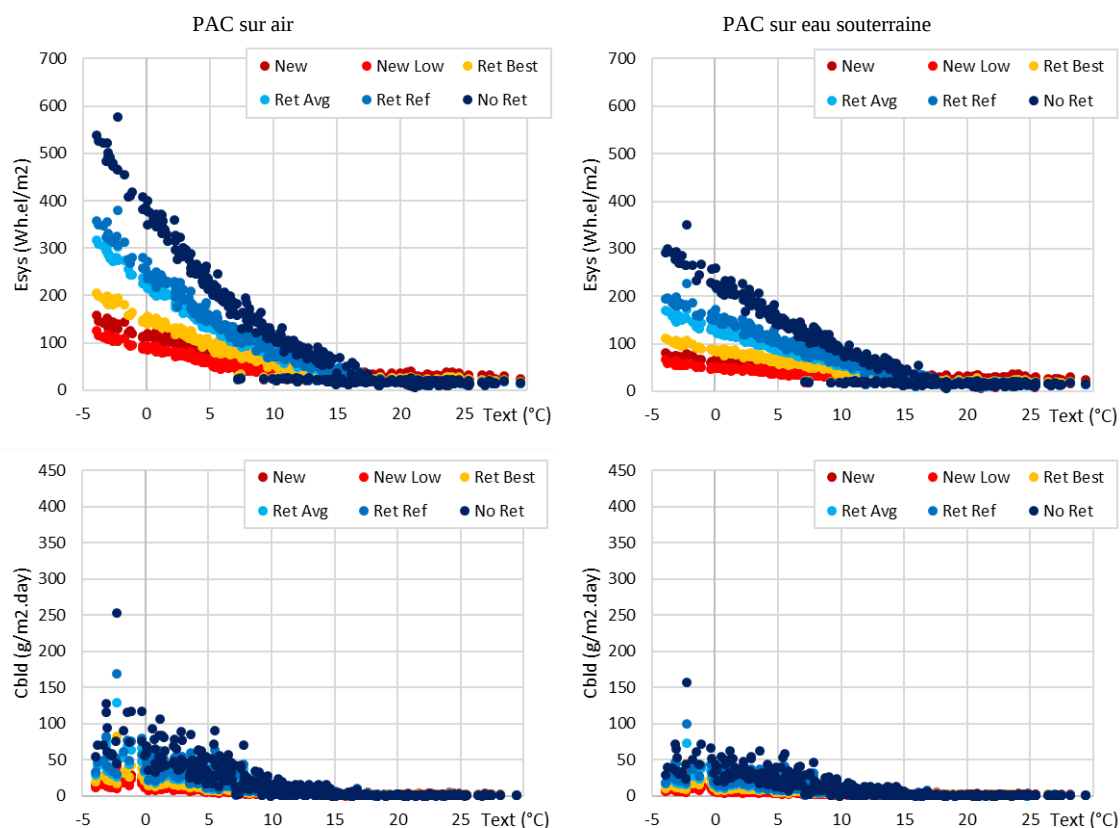


Figure 5. PAC sans PV : consommation d'électricité (E_{sys}) et contenu CO_2 de la demande de chaleur - pour contenu CO_2 inférieur du réseau (C_{bld}). Valeurs journalières.

Chaudière à gaz		New	New Low	Ret Best	Ret Avg	Ret Ref	No Ret	Moyenne
C_{bld}	kg/m ²	17.17	12.25	17.83	23.61	23.72	33.34	
C_{th}	kg/kWh.th	0.256	0.257	0.256	0.256	0.257	0.257	0.256
PAC (CO_2 inférieur)		New	New Low	Ret Best	Ret Avg	Ret Ref	No Ret	Moyenne
C_{bld}	air	kg/m ²	2.79	2.03	3.28	4.63	5.19	7.54
	eau	kg/m ²	1.90	1.36	2.19	2.98	3.47	5.00
C_{th}	air	kg/kWh.th	0.042	0.043	0.047	0.050	0.056	0.058
	eau	kg/kWh.th	0.028	0.028	0.031	0.032	0.038	0.039
C_{el}	air	kg/kWh.el	0.135	0.139	0.146	0.156	0.159	0.163
	eau	kg/kWh.el	0.128	0.133	0.140	0.150	0.154	0.159
PAC (CO_2 supérieur)		New	New Low	Ret Best	Ret Avg	Ret Ref	No Ret	Moyenne
C_{bld}	air	kg/m ²	5.42	4.09	6.55	9.54	10.58	15.62
	eau	kg/m ²	3.55	2.58	4.26	5.98	6.89	10.07
C_{th}	air	kg/kWh.th	0.081	0.086	0.094	0.103	0.115	0.120
	eau	kg/kWh.th	0.053	0.054	0.061	0.065	0.075	0.078
C_{el}	air	kg/kWh.el	0.262	0.280	0.292	0.321	0.325	0.337
	eau	kg/kWh.el	0.239	0.253	0.273	0.302	0.307	0.319

air : PAC sur air ; eau : PAC sur eau souterraine

Tableau 3. Chaudière à gaz et PAC (sans PV) : émissions annuelles de CO_2 , pour contenu CO_2 inférieur et supérieur de l'électricité.

Les émissions annuelles de CO₂ correspondantes sont résumées dans le Tableau 3, pour le contenu CO₂ inférieur et supérieur du réseau, ainsi que pour la chaudière à gaz de référence. Le contenu CO₂ lié à la surface chauffée (*Cbld*) dépend évidemment du bâtiment considéré, alors que le contenu CO₂ lié à la demande de chaleur (*Cth*) s'avère relativement constant. Dans le cas de la chaudière à gaz, il s'élève à 256 g/kWh_{th} (soit 3 % de plus que le contenu de la chaleur à la sortie de la chaudière, voir section 5.2, en raison des pertes de stockage). En comparaison, et si l'on considère le contenu CO₂ inférieur du réseau, celui de la PAC sur air ne s'élève en moyenne qu'à 49 g/kWh_{th} (81 % d'économies par rapport à la chaudière à gaz), respectivement 33 g/kWh_{th} pour la PAC sur eau (87 % d'économies). Si l'on considère le contenu CO₂ supérieur du réseau, les valeurs sont deux fois plus élevées (air : 100 g/kWh_{th} - 61 % d'économies ; eaux souterraines : 64 g/kWh_{th} - 75 % d'économies).

Finalement, étant donné la concomitance saisonnière de la demande d'électricité (*Esys*, cf. Figure 5) et du contenu CO₂ du réseau (*Cgrid*, cf. Figure 3), le contenu CO₂ de l'électricité pour la PAC (*Cel*) s'avère, en moyenne annuelle, nettement supérieur à la valeur du réseau. C'est le cas tant pour le contenu inférieur du réseau (*Cgrid* : 108 g/kWh_{el}; *Cel* : 150 g/kWh_{el} pour PAC sur air, 144 g/kWh_{el} pour PAC sur eau), que pour la teneur supérieure du réseau (*Cgrid* : 196 g/kWh_{el}; *Cel* : 303 g/kWh_{el} pour PAC sur air, 282 g/kWh_{el} pour PAC sur eau). Si ces résultats confirment la nécessité d'évaluer les émissions de PAC au moyen de valeurs horaires du contenu CO₂ du réseau, le contenu CO₂ annuel de l'électricité de la PAC calculé ici pourrait en principe être utilisé pour d'autres valeurs annuelles de SPF que celles considérées dans cette étude.

6.4. PV complémentaire

Dans cette section, nous analysons les performances du système combiné PAC-PV. De façon analogue à ce qui a été montré à la section précédente, la Figure 6 montre les valeurs journalières de la consommation d'électricité (*Esys*, en haut) et le contenu CO₂ de la demande de chaleur, relatif au contenu CO₂ inférieur du réseau (*Cbld*, en bas), ceci pour un système PV de 0.2 m² par m² de surface chauffée (bâtiment bas, voir section 4).

En considérant le bilan électrique du système PAC-PV (consommation PAC - production PV), et en le comparant au cas sans PV (Figure 5), on observe le déphasage saisonnier entre les deux technologies : pour des températures inférieures à 5°C, la consommation est très similaire au cas sans PV ; pour des températures supérieures à 10°C, la production PV atteint des valeurs beaucoup plus importantes que la consommation PAC, ce qui entraîne une injection PV dans le réseau (valeurs négatives de *Esys*).

Lorsque l'on considère les émissions de CO₂, la situation est tout à fait différente. En effet, alors que l'injection de PV dans le réseau entraîne des émissions de CO₂ négatives (économies), les valeurs correspondantes restent relativement faibles, puisque cela se produit lorsque le contenu CO₂ du réseau est déjà faible (cf. Figure 3).

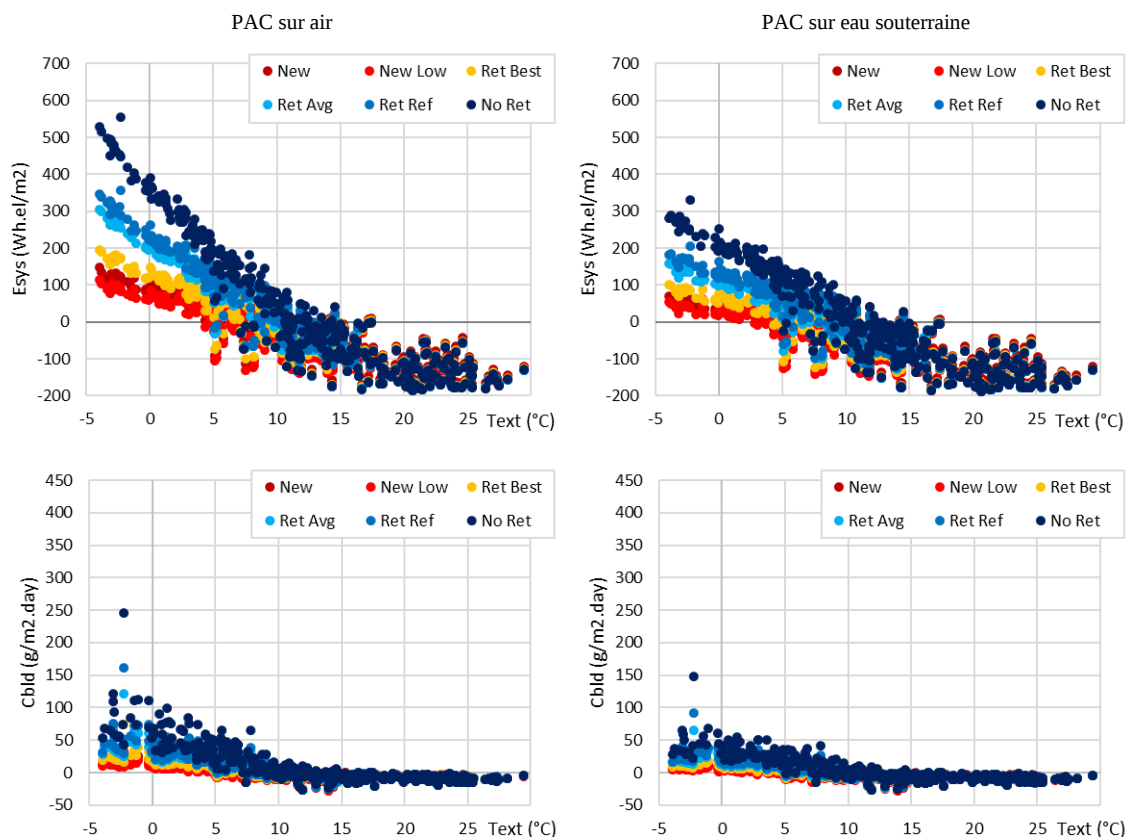


Figure 6. PAC et PV (0.2 m^2 par m^2 de surface chauffée) : consommation d'électricité (E_{sys}) et contenu CO_2 de la demande de chaleur - pour contenu CO_2 inférieur du réseau (C_{bid}). Valeurs journalières.

Enfin, la Figure 7 résume les résultats de l'étude en termes de contenu CO_2 de la chaleur, relativement à la surface chauffée, pour les 3 systèmes de production (chaudière à gaz, PAC sur air, PAC sur eau) en conjonction ou non avec du PV (0.1 et 0.2 m^2 par m^2 de surface chauffée), à la fois pour le contenu CO_2 du réseau inférieur et supérieur du mix de consommation d'électricité suisse.

Dans tous les cas, le contenu CO_2 de la chaleur est fortement corrélé à la demande de chaleur du bâtiment, avec une relation linéaire entre les deux. Comme nous l'avons déjà souligné, le contenu CO_2 des PAC est toujours inférieur à celle de la chaudière à gaz. Enfin, si le photovoltaïque peut contribuer de manière substantielle à la demande de chaleur estivale, les économies annuelles de CO_2 qu'il permet de réaliser restent relativement marginales. Ce n'est que dans le cas des bâtiments à faible demande de chaleur ($< 90 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^2$), et en particulier de bâtiments bas (0.2 m^2 de PV par m^2 de surface chauffée), que le contenu en CO_2 du système combiné PAC-PV conduit, en valeur annuelle, à des bâtiments à contenu CO_2 positif (sans toutefois tenir compte d'autre consommation électrique que celle de la PAC).

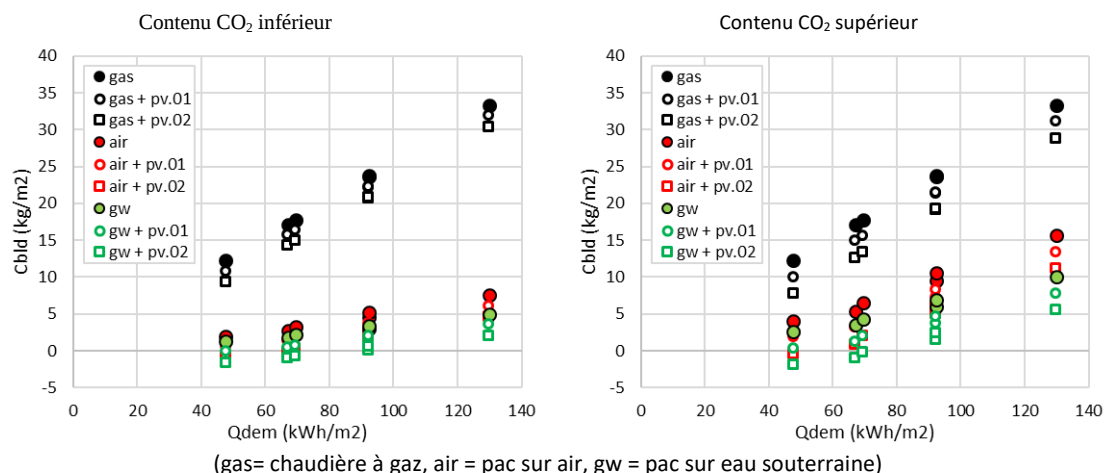


Figure 7. Chaudière à gaz et PAC, avec et sans PV : émissions annuelles de CO₂ de la chaleur - pour contenu CO₂ inférieur et supérieur du réseau.

7. Conclusions

Cette étude évalue les émissions de CO₂ de systèmes PAC sur air et sur eau souterraine, avec et sans PV complémentaire, pour un échantillon de bâtiments résidentiels collectifs (neufs, rénovés et non rénovés) situés à Genève. La performance des systèmes est évaluée par simulation numérique en pas de temps horaire, et est croisée avec la teneur horaire en CO₂ du mix électrique suisse (en tenant compte à la fois de la production nationale et des importations des pays voisins).

Cette évaluation est effectuée au moyen de deux approches comptables distinctes : i) le contenu CO₂ inférieur du réseau, qui considère que l'électricité provenant des hauts fourneaux allemands est exempte de CO₂ (le contenu CO₂ correspondant étant attribué à l'industrie sidérurgique) ; ii) le contenu CO₂ supérieur du réseau, pour laquelle les émissions correspondantes sont attribuées au secteur de l'électricité.

Les principaux résultats sont les suivants :

- Sur l'ensemble de l'échantillon des bâtiments considérés, le SPF annuel est en moyenne de 3.06 pour la PAC sur air, et de 4.42 la PAC sur eau (sans compter l'électricité auxiliaire pour les pompes de circulation).
- Dans les deux cas, la consommation journalière d'électricité, qui suit la demande de chaleur, est fortement liée à la température météo. Une dispersion beaucoup plus importante apparaît pour le contenu CO₂, de la chaleur, étant donné la dispersion du contenu CO₂ du réseau.
- Lorsqu'on les compare avec celles d'une chaudière à gaz, les émissions des PAC entraînent des économies annuelles de CO₂ très importantes, du moins pour le contenu CO₂ inférieur du réseau (PAC sur air : 81 % d'économies ; PAC sur eau : 87 % d'économies). Ces économies sont quelque peu réduites si l'on considère le contenu CO₂ supérieur du réseau (air : 61 % ; eau : 75 %).
- Etant donné la concomitance saisonnière de la demande d'électricité et du contenu CO₂ du réseau, le contenu CO₂ de l'électricité pour la PAC s'avère, en moyenne annuelle, nettement supérieur à la valeur du réseau. C'est le cas tant pour le contenu inférieur du réseau (réseau : 108 g/kWh_{el} ; PAC sur air : 150 g/kWh_{el} ; PAC sur eau : 144 g/kWh_{el}), que pour la teneur supérieure du réseau (réseau : 196 g/kWh_{el} ; PAC sur air : 303 g/kWh_{el} ; PAC sur eau : 282 g/kWh_{el}).
- Bien que le photovoltaïque puisse contribuer de manière substantielle à la consommation électrique des PAC en été, les économies annuelles de CO₂ qui en découlent restent relativement marginales. En effet, pour des températures inférieures à 5°C, la consommation électrique est très similaire à celle sans PV ;

pour des températures supérieures à 10°C, la production PV atteint des valeurs beaucoup plus importantes que la consommation de PAC, ce qui entraîne l'injection de PV dans le réseau, mais les économies de CO₂ correspondantes restent relativement faibles puisque cela se produit lorsque le contenu CO₂ du réseau est déjà faible.

Enfin, il convient de souligner que ces résultats sont basés sur une simulation numérique, qui suppose des conditions optimisées d'intégration et de contrôle des PAC, et ne tient pas compte de l'électricité auxiliaire des pompes de circulation.

Remerciements

Cette recherche a été cofinancée par la Innosuisse dans le cadre des projets SCCER FEEB&D et SCCER CREST.

Références

- [1] P.J. Luickx et al. : Influence of massive heat-pump introduction on the electricity-generation mix and the GHG effect: Comparison between Belgium, France, Germany and The Netherlands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12, 2140-2158.
- [2] A.M. Brockway et al. : Emissions reduction potential from electric heat pumps in California homes, *The Electricity Journal*, 2018, 31, 44-53.
- [3] L. Quiquerez et al. : The role of district heating in achieving sustainable cities: comparative analysis of different heat scenarios for Geneva, 2017, 116, 78-90.
- [4] J. Khoury : Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois, PhD thesis, University of Geneva, 2014.
- [5] C. Fraga et al. : Heat pump systems for multifamily buildings: Potential and constraints of several heat sources for diverse building demands, *Applied Energy*, 2018, 225, 1033-1053.
- [6] E. Romano E. et al. : Real-time carbon emission due to electricity consumption - a marginal approach for an open economy. The case of Switzerland, Université de Genève, Switzerland, submitted paper, 2019.
- [7] L. Quiquerez : Analyse comparative des consommations de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire estimées à partir de relevés mensuels: Etude sur un échantillon de bâtiments résidentiels collectifs alimentés par un réseau de chaleur à Genève, Université de Genève, 2017.
- [8] J.-M. Zraggen : Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique: objectifs et réalités, PhD thesis, University of Geneva, 2010.
- [9] C. Fraga et al. : Solar assisted heat pump system for multifamily buildings: Towards a seasonal performance factor of 5? Numerical sensitivity analysis based on a monitored case study, *Solar Energy*, 2017, 146, 543-564.
- [10] R. Frischknecht et al. : The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database, *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13, 1337-43.
- [11] KBOB, Empfehlung Ökobilanzdaten im Baubereich 2009-1-2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren, Bundesamt für Bauten und Logistik, Schweiz, 2016.