

# Stratégies d'implantation de système Pompe à chaleur en milieu urbain – de l'installation individuelle au collectif

Alain P. GOUMBA<sup>1</sup>, Xiaofeng GUO<sup>1\*</sup>, Marc CLAUSSE<sup>2</sup>, François ROCARIES<sup>1</sup>, Tarik BOUROUINA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ESYCOM EA2552, ESIEE Paris, Université Paris-Est, 2 Bd Blaise Pascal - 93162 Noisy-le-Grand

<sup>2</sup>CETHIL UMR5008, INSA Lyon, 9 rue de la Physique, Campus La Doua - 69621 Villeurbanne

\* (auteur correspondant : [xiaofeng.guo@esiee.fr](mailto:xiaofeng.guo@esiee.fr))

## Résumé

Etant une solution efficace pour la production de l'énergie thermique dans l'habitat, l'utilisation de pompe à chaleur (PAC) pour l'eau chaude sanitaire (ECS) en milieu urbain est cependant peu acceptée. Cette étude porte sur la comparaison de différentes stratégies d'implantation de PAC pour l'ECS, notamment de l'installation individuelle au collectif.

L'étude est réalisée par simulation dynamique sous TRNSYS, où un système de PAC Air-Eau est modélisé en prenant en compte de différents profils de consommation d'ECS. Trois stratégies sont étudiées et comparées : installation individuelle, système collectif immeuble et installation en quartier. Le critère de comparaison est l'efficacité annuelle du système.

A l'issue de la simulation, les bilans énergétiques montrent qu'il y a davantage d'économies d'énergie électrique dans le cas d'une installation collective. Les efficacités des quatre installations individuelles varient entre 2.87 et 3.71, avec une valeur moyenne de 3.32. Pour une installation collective à l'échelle d'un immeuble, une efficacité annuelle de 3.51 est obtenue, soit de 5.4 % plus performante que la moyenne précédente. L'efficacité de l'installation à l'échelle du quartier n'est que de 2.63. La performance est en baisse du fait des pertes dans la distribution et le bouclage. L'intérêt du regroupement des plages de consommations pour une meilleure efficacité du système est abordé.

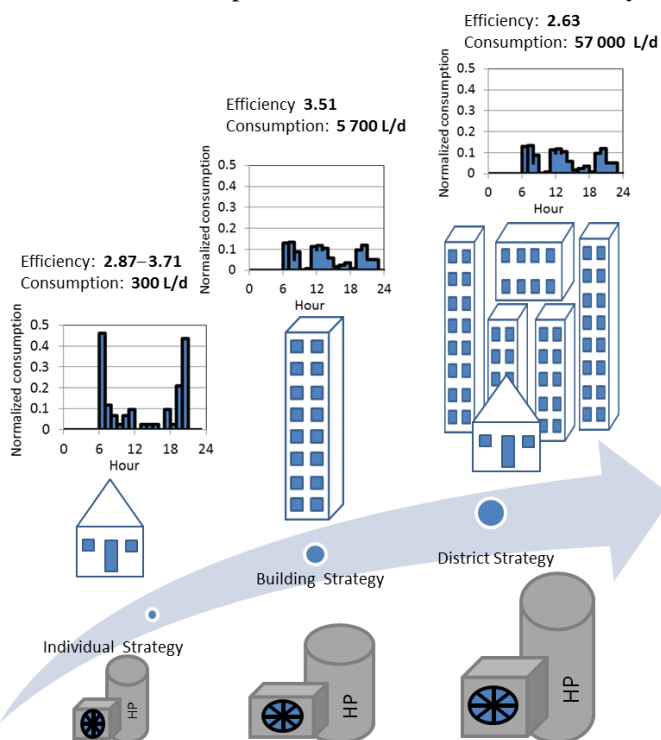


Figure: Comparaison de la performance annuelle pour des installations de PAC à différentes échelles

## Nomenclature

$COP$  Coefficient de Performance, -

$Effi$  Efficacité annuelle, -

$h_b$  Hauteur du ballon de stockage, m

$L_{Boucl}$  Longueur du circuit de bouclage (aller-retour), m

$Nb_P$  Nombre de puisages par jour, -

$Nb_{PP}$  Nombre de points de puisage, -

$Q_{loss-distrib}$  Pertes dans le circuit de distribution, kWh

$Q_{loss-recirculation}$  Pertes dans le circuit de bouclage, kWh

$S_b$  Surface du ballon de stockage, m<sup>2</sup>

$t$  Temps, h

$T_{air}$  Température de l'air, °C

$T_b$  Température de sortie du ballon, °C

$T_{edv}$  Température d'eau de ville, °C

$V_b$  Volume du ballon de stockage, L

$V_{distrib}$  Volume du circuit de distribution, m<sup>3</sup>

$Y$  Coefficient d'émission thermique, W/(m·K)

## 1. Introduction

Les besoins en chauffage et en Eau Chaude Sanitaire (ECS) dans le bâtiment représentent en Europe 80 % de la consommation énergétique du bâtiment résidentiel <sup>[1]</sup>. En France, elle est de 35.2 % <sup>[2]</sup> de la consommation d'énergie primaire totale. Les besoins de ces deux postes sont constitués essentiellement d'énergie thermique. L'un, en l'occurrence le chauffage, dépend directement de l'enveloppe du bâtiment, des conditions climatiques et du système de gestion technique tandis que l'autre, l'ECS, est en fonction principalement de l'utilisateur. Aujourd'hui, la production de l'ECS est essentiellement basée sur des systèmes à ressources fossiles, émetteur de gaz à effet de serre (GES) ou des résistances électriques, fortes consommatrices d'énergie électrique.

La pompe à chaleur (PAC) est a priori une solution efficace pour la production de ce type d'énergie. En pratique, à partir d'une faible puissance électrique consommée au compresseur, elle prélève à l'évaporateur la chaleur d'une source à basse température (air extérieur, eaux usées, îlots thermiques urbains, etc.) et la délivre au condenseur à température plus élevée pour le chauffage ou l'ECS. La performance est exprimée à travers le Coefficient de Performance (COP) de la PAC qui est le rapport entre la puissance thermique au condenseur et la puissance électrique au compresseur. Cependant, ce COP dépend fortement de l'installation (adaptation aux besoins, dimensionnement), des sources/émetteurs utilisés (météorologie), des stratégies de régulation, etc. De plus, la PAC n'est pas silencieuse. Selon l'étude menée au DECC <sup>[3]</sup>, une PAC entraîne plus de 42 dB de bruit, ce qui dépasse le seuil réglementaire. L'implantation dans un bâtiment individuel en milieu urbain est de ce fait compromise.

Les études existantes sur la PAC visent pour la plupart l'amélioration des composants, ou le couplage avec d'autres types de systèmes. Les principaux objets de ces recherches ont été les échangeurs de chaleur <sup>[4]</sup>, leur type, leur forme géométrique et l'introduction de nouvelles corrélations pour le calcul des transferts de chaleur <sup>[5]</sup> et des pertes de pression à partir de mesures expérimentales <sup>[6]</sup>. Le couplage avec d'autres formes d'énergie renouvelable telles que le solaire sont également étudié <sup>[7]</sup>. Les comparaisons sur différentes stratégies d'installation, i.e., individuelle ou collective, sont peu exploitées.

L'objectif de cette étude est d'analyser les performances énergétiques annuelles permettant d'identifier la stratégie optimale d'implantation de PAC dans l'habitat. Ainsi, trois configurations sont simulées sous TRNSYS à partir des mêmes critères de dimensionnement du ballon de stockage et des stratégies de contrôle. Elles sont constituées de différents profils de consommation d'ECS: d'abord un appartement avec un scénario donné, puis un immeuble collectif avec différents scénarios regroupés, et enfin un quartier constitué de dix immeubles identiques.

## 2. Méthodologie

La méthodologie adoptée consiste à coupler le système de production aux différents types de consommation. Elle se fait en quatre principales phases comme indiqués dans la Figure 1 : la production d'énergie par la pompe à chaleur, le stockage dans un ballon d'ECS, la distribution et la consommation et enfin le pilotage du système avec des règles de fonctionnement. A partir des données météorologiques, indispensables à la détermination du COP de la PAC, la performance annuelle du système est alors évaluée.

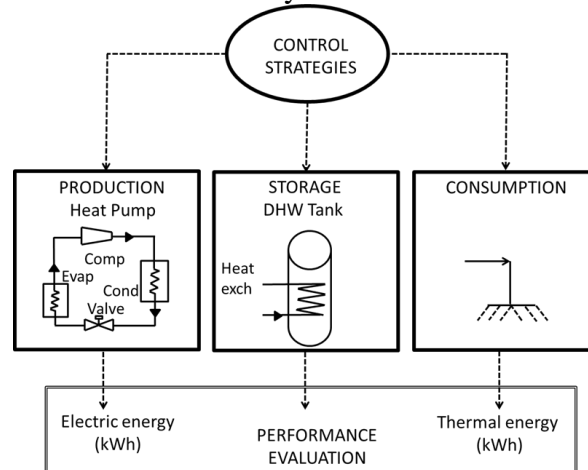


Figure 1 : Schéma de simulation d'un système PAC

(Evap: évaporateur, Comp: compresseur, Cond: Condenseur, Heat exch: échangeur de chaleur)

### 2.1. Système pompe à chaleur

La PAC aérothermique faisant l'objet de cette étude est représentée par un type standard (Type 941) <sup>[8]</sup> de TRNSYS et la variation de sa performance en fonction des paramètres extérieurs est donnée par un modèle testé en laboratoire. La Figure 2 présente l'évolution du COP calculé à partir des données de performances tirées du modèle WPWD-024 <sup>[9]</sup>, fournies par un catalogue utilisateur (Trane Inc, USA) en fonction des températures à l'évaporateur et au condenseur.

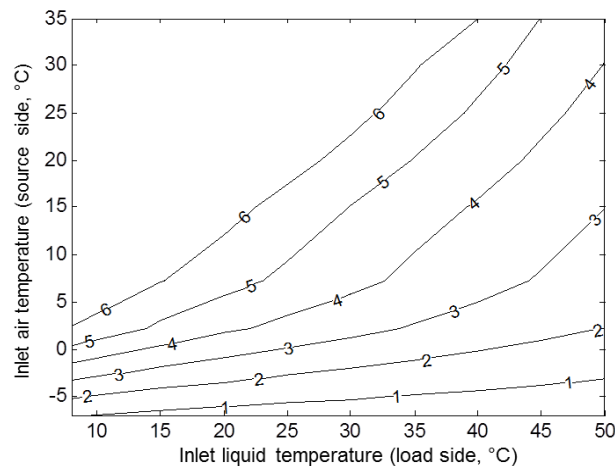


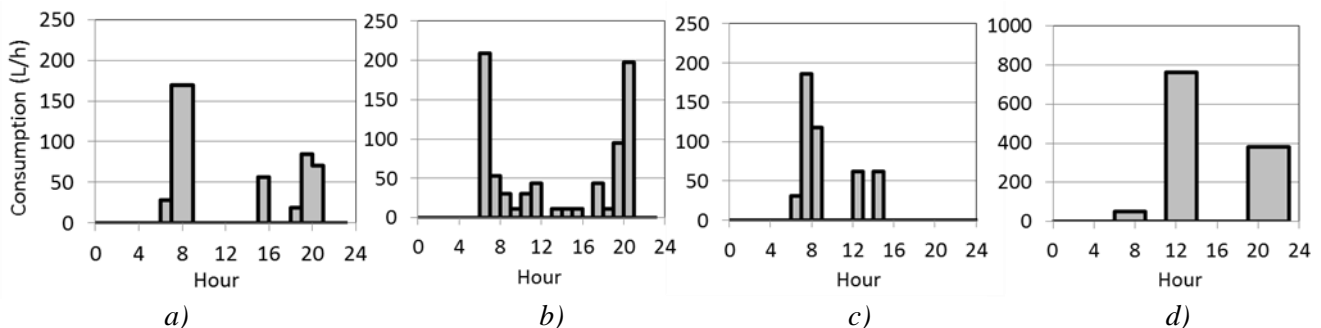
Figure 2 : COP de la PAC en fonction des températures d'entrée côté charge et côté source (modèle WPWD-024, Trane)

À l'extérieur des limites des données du fichier de performance (de 2.2 °C à 20 °C à l'évaporateur et de 25 °C à 50 °C au condenseur), le modèle conserve la dernière valeur disponible de capacité et de puissance électrique consommée. Afin de satisfaire les données

météorologiques de la ville de Paris, lieu choisi pour la comparaison des implantations, une extrapolation a été faite pour avoir des plages de températures appropriées avec les performances correspondantes. À 8 °C au condenseur et les températures à l'évaporateur variant entre -7.2 °C et 35°C, la consommation électrique décroît de 1.41 kW à 0.96 kW. La puissance thermique produite est comprise entre 1.47 kW à 13.73 kW. À 50 °C au condenseur, les valeurs de puissance électrique se trouvent entre 5.47 kW et 3.16 kW tandis que celles de puissance thermique varient entre 1.63 kW et 13.62 kW.

## 2.2. Profil de consommation

Les performances du système peuvent être influencées par le profil de consommation qui détermine le temps entre la production et la consommation. La Figure 3 présente les grands types de scénarios analysés : un premier type de trois appartements avec des plages de consommation journalière différentes (de a) à c)), mais un même volume, 300 L/j et un second type constitué d'un restaurant d) consommant 3000 L/j. Ces profils de consommation sont obtenus à partir de quelques études réalisées dont celle de Krauss et al. (2006)<sup>[10]</sup>.



**Figure 3:** Profils journaliers de consommation d'ECS pour trois types d'appartements et un restaurant  
a)-b)-c): Appartements A-B-C, 300 L/j, avec différentes plages de consommations ;  
d): Restaurant 3000 L/j, consommation principalement le midi et le soir.

Les regroupements de ces profils permettent d'obtenir les plages d'un immeuble ou encore d'un quartier. Dans le cas de l'immeuble, la plage de consommation est obtenue en regroupant respectivement sur trois étages les trois types d'appartements (A, B, C) ; le restaurant (fast-food) se situant sur un étage supplémentaire. Pour le quartier, dix immeubles identiques sont mis ensemble, en prenant en compte une distance de 10 m entre chacun d'eux.

## 2.3. Données météorologiques

Le modèle utilisé est le module Type TM-Y15 de TRNSYS, donné par METEONORM<sup>[11]</sup>. Il permet, à partir d'une ville choisie, de donner toutes les informations relatives aux conditions météorologiques (Température de l'air, de l'eau de ville, etc.) et selon la période voulue dans l'année. A Paris, la température moyenne annuelle est de 9.9 °C, avec une valeur minimale de -7.9 °C et une valeur maximale de 31.3 °C.

Le risque de givrage de la PAC dans les basses températures n'est pas pris en compte. De même pour faciliter la comparaison, aucun appoint électrique n'est utilisé.

## 2.4. Standard de dimensionnement et condition de fonctionnement

Pour tous les types d'implantation, le dimensionnement est fait sur la base de critères identiques. Les caractéristiques de la PAC sont inchangées. Cependant, selon les besoins de consommation, le nombre de PAC est modifié afin de faire varier sa puissance. La capacité de stockage ici correspond à l'ensemble des besoins du lieu d'installation. Le Tableau 1 ci-après

présente les critères de dimensionnement et le besoin en volume de chaque habitat. Une seule unité de PAC est utilisée dans l'appartement. En fonction de la consommation, cela correspond à 10 PAC pour le restaurant, 19 pour l'immeuble (9 appartements + 1 Restaurant) et 190 pour le quartier (10 immeubles).

	Daily consumption (L/j)	Tank Volume (L)	Sizing		
			Number of PAC	Tank diameter (m)	Tank height (m)
Apt A	300	300	1	0.39	2.4
Apt B	300	300			
Apt C	300	300			
Fast-food	3000	3 000	10	4*0.39	2.5*2.4
Building	5700	5 700	19	(19/4)*0.39	4*2.4
District	57000	57 000	190	(190/6)*0.39	6*2.4

Tableau 1 Critères de dimensionnement pour tous les types d'installations

Le contrôle de la PAC est en mode « semi-accumulation ». Le ballon de stockage disposant d'un échangeur immergé situé dans sa partie basse, conditionne le pilotage du système :

i) Démarrage de PAC quand la température au-dessus de l'échangeur, près du milieu du ballon, est en-dessous de 48°C; ii) Mise en arrêt du système quand la température du ballon atteint 55°C.

Le pas de simulation est fixé à 0.01 h sur une période d'une année, soit 8760 h. La température initiale du ballon est à 55°C.

## 2.5. Pertes thermiques

Avant d'être consommée par l'utilisateur, une partie de l'énergie thermique produite est perdue dans le ballon de stockage (déperditions thermiques), puis dans le circuit de distribution (volume perdu à la fin de chaque puisage). Pour l'immeuble et le quartier, des pertes supplémentaires apparaissent dans le circuit de bouclage. Ces trois pertes sont prises en compte.

### 1) Perte dans le ballon

Selon des normes NF EN15332 <sup>[12]</sup> et NF EN60379 <sup>[13]</sup>, le seuil de déperditions d'un ballon de 300 L est de 0.19 Wh/K/jour/L. Le coefficient de pertes dans le ballon de stockage, Type 534 de TRNSYS, en est déduit. La démarche commence par identifier la surface extérieure du ballon par :  $S_b = \pi * d_b * h_b$ , où  $d_b = \sqrt{V_b / (\frac{\pi}{4} * h_b)}$  est le diamètre du ballon, exprimé en mètres.

### 2) Perte dans le circuit de distribution

Elle est calculée en fonction du volume de la canalisation, du nombre et des points de puisages, et de la différence de températures entre sortie et entrée du ballon (l'eau de ville):

$$Q_{\text{loss-distrib}} = ((1.1628 * \pi * V_{\text{distrib}} * Nb_P * Nb_{PP} * (T_b - T_{\text{edv}})) \quad (1)$$

### 3) Perte dans le circuit de bouclage

Dans l'immeuble et le quartier, le bouclage permet de garantir l'eau chaude en permanence. Les pompes de circulation fonctionnent en continue. Les pertes qui en sont issues se calculent grâce à l'équation (2) :

$$Q_{\text{loss-recirculation}} = L_{\text{Boucl}} * Y * (T_b - T_{\text{air}}) * t \quad (2)$$

où  $t$  est le temps de fonctionnement de la pompe de circulation, et  $Y$  (exprimé en  $W/(m \cdot K)$ ), le coefficient d'émission tiré de la norme NF EN12828 [14].

### 3. Résultats et discussions

Les trois types d'installations sont simulés et analysés sur la base des critères dynamiques ou annuels permettant de comparer les performances. Le principal critère étant l'efficacité annuelle qui est le rapport entre l'énergie consommée par l'utilisateur et l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de la PAC.

#### 3.1. Performance annuelle des différentes installations

Sur la Figure 4, l'efficacité annuelle de chaque type d'installation est présentée en fonction du volume de consommation journalière. Les différentes efficacités annuelles obtenues nous montrent que l'installation collective de la PAC dans l'immeuble est la plus performante ( $Effi=3.51$ ). La stratégie d'installation dans un quartier a une efficacité de 2.63, tandis que celle de l'individuel (Apt A/B/C et le restaurant) varie entre 2.87 et 3.71.

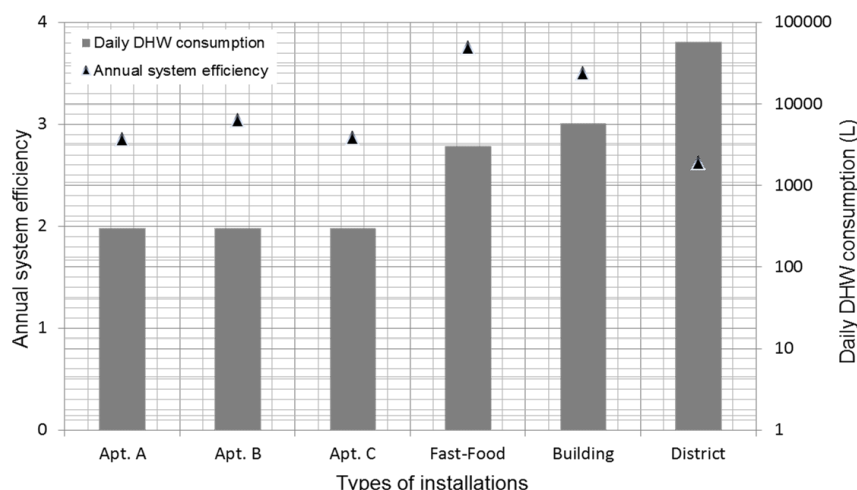


Figure 4 : Efficacité annuelle des systèmes de production d'ECS pour différents types d'installations

Bien que les trois appartements aient des volumes de consommations identiques, leur performance varie par rapport à la plage de puisage. L'appartement B, dont la consommation dure plus longtemps dans la journée a une efficacité énergétique supérieure. L'application dans l'appartement B donne une valeur supérieure à celle dans l'appartement A de l'ordre de 6 % (3.04/2.87). Cela montre l'influence du profil de puisage sur le système installé.

#### 3.2. Bilans énergétiques

Les résultats obtenus après la simulation nous permettent d'avoir en chiffres la répartition annuelle des différentes énergies en entrée et en sortie de chaque système. La Figure 5 présente pour chaque type d'installation, l'énergie électrique consommée par la PAC, l'énergie thermique produite, celle destinée à la consommation. Sont également présentées les pertes issues du ballon de stockage (déperdition), de la distribution, et enfin du bouclage dans le cas du collectif.

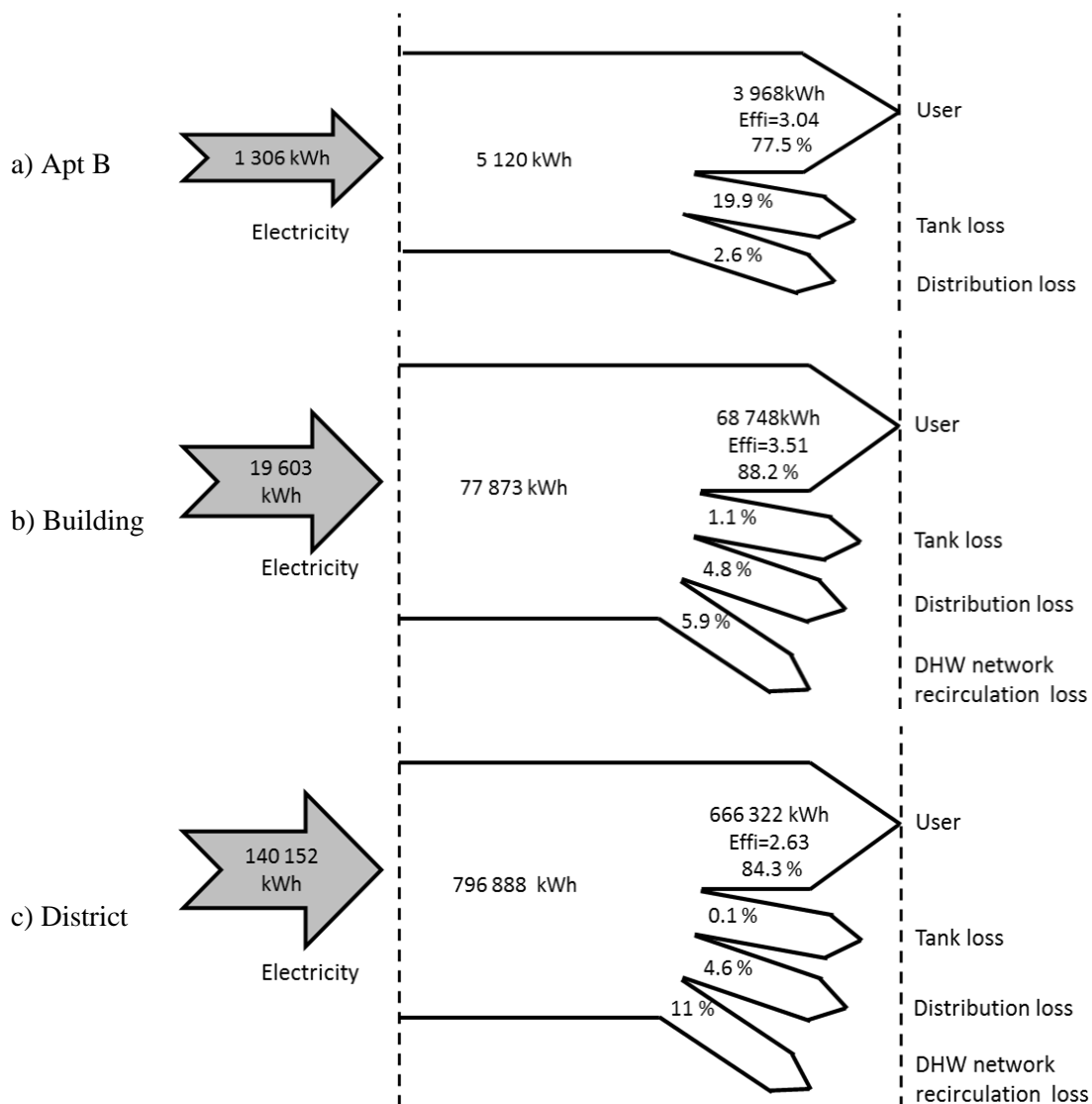


Figure 5 : Comparaison des bilans énergétiques annuels des trois types d'installations

Ces bilans énergétiques montrent que les pertes dans le collectif (Fig.5, b) et c)) proviennent principalement de la distribution et du bouclage (10.7 % de l'énergie totale produite pour le cas d'immeuble et 15.6 % pour le quartier) contrairement à l'appartement où elles sont issues en grande partie du ballon de stockage (19.9 %).

A partir d'une moyenne en prenant en compte les différents volumes de chaque installation individuelle, l'efficacité annuelle de l'ensemble de neuf appartements plus le restaurant est de 3.32. Elle est 5.4 % inférieure à celle du système avec une implantation centralisée dans l'immeuble (3.51).

#### 4. Conclusion et perspectives

Après avoir modélisé et comparé trois différentes stratégies d'implantation de PAC dans la ville, cette étude offre un outil d'aide à la prise de décision dans le choix du type d'installation de PAC en milieu urbain. D'après nos résultats, l'utilisation dans l'immeuble collectif est plus performante que celle dans l'individuel. Elle présente une efficacité supérieure de 5.4 %, c'est-à-dire une économie d'énergie électrique du même ordre. En effet, les systèmes regroupés permettent de baisser le pic de puisage, ce qui conduit à l'homogénéisation des profils de consommations et au final à augmenter l'efficacité annuelle.

Dans le cas du quartier, une telle installation collective est moins performante que celle à l'échelle de l'immeuble. En effet, les pertes y sont plus significatives dans les circuits de distribution et du bouclage (15.6 % pour le quartier contre 10.7 % pour l'immeuble). Néanmoins, le quartier a un potentiel avantageux qui offre la possibilité d'optimiser le système à travers l'ajout d'une PAC eau/eau pour la récupération de la chaleur des eaux usées et/ou l'ajout d'autres consommateurs (sur la base du principe d'homogénéisation).

Cependant, les résultats de cette étude sont limités à un seul fichier de performances testé avec une seule stratégie de contrôle (semi-accumulation) de la PAC. De plus, le débit de puisage influe, à priori, la stratification dans le ballon de stockage. Ce phénomène physique n'est malheureusement pas pris en compte à ce stade.

Nos futures études porteront sur l'optimisation de ces systèmes à l'échelle d'un quartier ainsi que les stratégies de contrôle de la PAC. L'influence du débit de puisage sur la stratification dans le ballon de stockage sera également étudiée.

## Remerciements

Les auteurs expriment leur reconnaissance à ESIEE Paris (CCIR Paris-IDF, Université Paris Est) grâce à qui cette étude a été réalisée via le projet Innovation-Technologique.

## Références

- [1] B. Lapillonne et al., Energy Trends for households in the EU, Report to Intelligent Energy Europe, 2013.
- [2] Chiffres clés du bâtiment, Rapport ADEME 2013
- [3] UK heat pump, Report MCS Planning Standards for permitted development installations of wind turbines and air source heat pumps on domestic premises, 2008
- [4] S. Garimella et al., Performance evaluation of a generator-absorber heat-exchange heat pump, Applied Thermal Engineering, Volume 16, Issue 7, July 1996, Pages 591-604
- [5] J. Fernández-Seara et al., Experimental evaluation of a geothermal heat pump for space heating and domestic hot water simultaneous production, Renewable Energy, Volume 48, December 2012, Pages 482-488,
- [6] O. Kwon et al., Performance evaluation of a two-stage compression heat pump system for district heating using waste energy, Energy, Volume 57, 1 August 2013, Pages 375-381
- [7] R. Chargui et al., Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software, Energy Conversion and Management, Volume 81, May 2014, Pages 384-399
- [8] TRNSYS HVAC component Models [www.TRNSYS.com/hvac.htm](http://www.TRNSYS.com/hvac.htm)
- [9] Product Literature Water Source Heat Pump - Water-to-Water WPWD 024, Trane Inc., 2000
- [10] G. Krauss et al., Modélisation sous TRNSYS d'une maison à énergie positive. 8ème séminaire International sur la Physique Energétique, Novembre 2006, Béchar, Algeria
- [11] Meteonorm, TRNSYS package, 2012, <http://logiciels.cstb.fr/Thermique-METEONORM>
- [12] NF EN15332, Chaudières de chauffage - Évaluation de la performance énergétique des préparateurs d'eau chaude, 2008
- [13] NF EN60379, Méthodes de mesure de l'aptitude à la fonction des chauffe-eau électriques à accumulation pour usages domestiques, 2004
- [14] NF EN12828, Isolation des réseaux de distribution d'eau chaude, Règlementation Thermique des Bâtiments Neufs, 2006