Optimisation multicritère d'un système de production d'eau chaude sanitaire utilisant l'énergie solaire

Arnaud LAPERTOT[1*], Benjamin KADOCH[1], Olivier LE MÉTAYER.

[1] Aix Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France
***arnaud.lapertot@univ-amu.fr**

RESUME. L'objectif est de réaliser une étude d'optimisation multicritère d'un système de production d'eau chaude sanitaire. Le système énergétique considéré, est composé d'une pompe à chaleur et d'un stockage thermique. Il récupère l'énergie de l'air extrait d'un bâtiment pour produire de l'eau chaude sanitaire. Il utilise également des capteurs photovoltaïques pour diminuer la consommation électrique du système et ainsi augmenter la part des énergies renouvelables. La méthodologie d'optimisation multicritère est appliquée au dispositif afin de déterminer sa meilleure régulation et son meilleur dimensionnement en tenant compte d'un critère économique et de deux objectifs énergétiques. La méthodologie est composée d'une optimisation multi-objectif pour déterminer le front de Pareto et d'une aide à la décision pour sélectionner le meilleur compromis. Cette étude permet de voir l'influence de la solution optimale pour différentes saisons et pour divers nombres de logements.

MOTS-CLÉS : eau chaude sanitaire, optimisation multicritère, pompe à chaleur.

ABSTRACT. The objective is to perform a multi-criteria optimization study of a domestic hot water production system. The energy system considered, is composed of a heat pump and a thermal storage. It recovers energy from the air extracted from a building to produce domestic hot water. It also uses photovoltaic collectors to reduce the electrical consumption of the system and thus increase the share of renewable energy. The multi-criteria optimization methodology is applied to a system in order to determine his best regulation and sizing parameter taking into account an economic criterion and two energy objectives. The methodology is composed of a multi-objective optimization to determine the Pareto front and a decision aid to select the best compromise. This study allows to see the influence of the optimal solution for different seasons and for various numbers of dwellings.

KEYWORDS: domestic hot water, heat pump, multicriteria optimization.

1. INTRODUCTION

L'eau chaude sanitaire (ECS) devient un poste de plus en plus important pour la consommation d'énergie finale dans le bâtiment en France avec une part de 20 % (Fuentes et al. 2018). Il est donc important d'augmenter les performances des systèmes de production d'ECS mais aussi d'augmenter simultanément la part des énergies renouvelables (ENR) et de diminuer le coût du système. Une des solutions possibles est l'utilisation d'un dispositif de production basé sur une pompe à chaleur (PAC). Cependant, la régulation et le dimensionnement d'un système énergétique peut être complexe, c'est pour cela qu'une méthodologie d'optimisation peut être utilisée pour répondre aux objectifs de performances énergétiques, du coût et de la fraction d'énergie d'énergie renouvelable.

Une procédure d'optimisation multi-objectif est appliquée à un système énergétique qui permet de produire de l'ECS. Le dispositif est composé d'une pompe à chaleur, d'un stockage thermique, d'échangeurs de chaleur et de capteurs PhotoVoltaïques (PV). La modélisation du système est présentée dans la partie 2. Tout d'abord, l'algorithme génétique NSGA-II permet d'identifier les solutions qui possèdent un bon compromis entre les objectifs. Les critères sont de maximiser le coefficient de performance et la fraction solaire, et de minimiser le coût de l'énergie du dispositif. Ensuite, la méthode d'aide à la décision multicritère TOPSIS est utilisée pour sélectionner la meilleure solution. Enfin, la procédure est appliquée pour différentes configurations afin de voir l'impact du volume puisé, du débit

d'air extrait et des conditions météorologiques sur les résultats d'optimisation. La méthodologie d'optimisation est présentée dans la partie 3.

2. DESCRIPTION DU MODELE

2.1. MODELISATION DU SYSTEME

Le système énergétique considéré est défini dans (Lapertot 2021). Le dispositif permet de produire de l'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie de l'air extrait d'un bâtiment individuel ou collectif. Il permet également de réduire la consommation d'électricité à partir des capteurs photovoltaïques. Pour cela, les données météorologiques de la ville de Marseille sont utilisées pour différentes conditions météos.

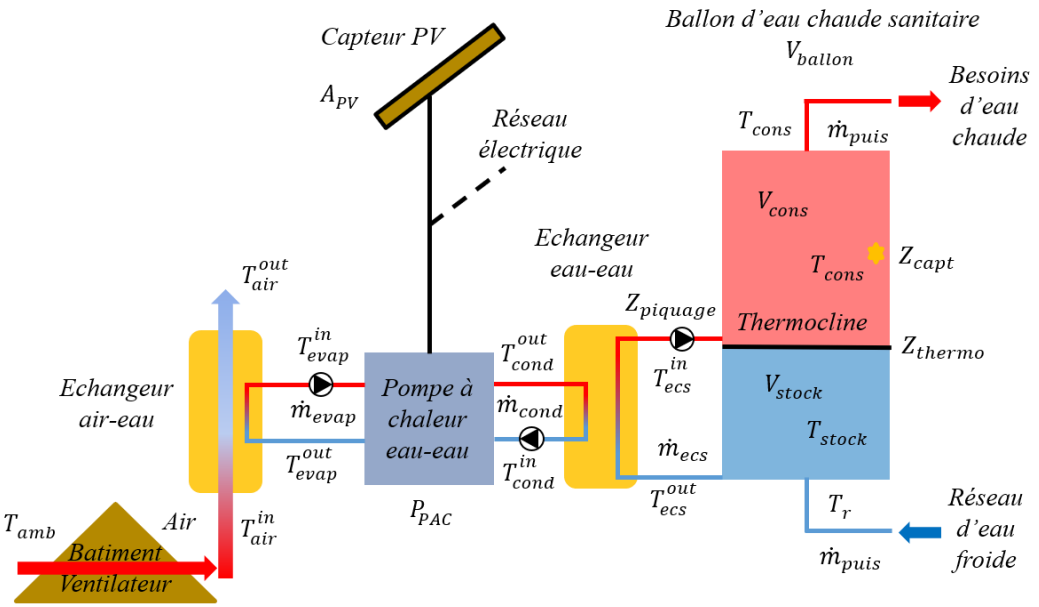

Figure 1 : Schéma du système dédié à la production d'eau chaude sanitaire.

La figure 1 montre que le système est composé d'un échangeur air/eau qui permet de transférer l'énergie contenue dans l'air pour l'injecter dans le fluide caloporteur. Ce fluide est connecté à une pompe à chaleur eau-eau (PAC) coté évaporateur. Cette PAC consomme de l'énergie électrique pour produire une plus grande quantité d'énergie thermique avec une puissance nominale P_{PAC}. Puis, l'échangeur à plaques eau-eau sépare l'eau chaude du ballon et le fluide de travail de la PAC. Cet échangeur permet ainsi de transférer l'énergie coté condenseur de la PAC vers le ballon de stockage d'eau chaude sanitaire, ce qui permettra donc de le chauffer. Ensuite, le ballon d'ECS préserve une quantité de chaleur avec un volume V_{ballon}, il est modélisé par une thermocline qui est constitué d'une partie d'eau chaude à température de consigne et d'une partie d'eau froide à température variable. Le puisage d'ECS permet de satisfaire les besoins d'eau chaude sanitaire lorsque la position de la thermocline est inférieure à la hauteur du ballon. Dans ce cas, la température en sortie du ballon est toujours égale à la température de consigne. Etant donné que le ballon est composé d'un volume constant, ce dernier est rempli directement avec de l'eau froide du réseau. Enfin, les capteurs solaires PV permettent de produire de l'électricité pour combler la consommation du compresseur et la surconsommation du ventilateur et des circulateurs qui sont liées aux pertes de charge. Il est nécessaire de raccorder le système énergétique au réseau électrique pour des problèmes d'intermittences.

2.2. ÉCHANGEUR DE CHALEUR

Les échangeurs de chaleur permettent de calculer les températures en entrée de l'évaporateur et du condenseur en fonction du débit d'air extrait $\dot{m}_{air}$, de la température de l'air T_{air}^{in}, du débit d'eau $\dot{m}_{eau}$, de la température du ballon T_{ecs}^{out}.

$$T_{evap}^{in} = T_{evap}^{out} - \epsilon_1 \cdot \frac{\dot{m}_{air} \cdot c_{air}}{\dot{m}_{eau} \cdot c_{eau}} \cdot \left(T_{evap}^{out} - T_{air}^{in}\right) \quad (1)$$

$$T_{cond}^{in} = T_{cond}^{out} - \epsilon_2 \cdot (T_{cond}^{out} - T_{ecs}^{out}) \quad (2)$$

avec $\epsilon_1 = 0.70$ l'efficacité de l'échangeur de chaleur air-eau et $\epsilon_2 = 0.83$ celle de l'échangeur eau-eau.

2.3. POMPE A CHALEUR EAU/EAU

Les puissances du compresseur P_{comp} et du condenseur P_{cond} de la pompe à chaleur sont déterminées à l'aide d'une corrélation empirique (Segond 2015). Ces puissances sont reliées aux températures d'entrée de l'évaporateur, du condenseur et de la puissance nominale de la PAC.

$$P_{cond} = f_1(P_{PAC}, T_{evap}^{in}, T_{cond}^{in}) \quad (3)$$

$$P_{comp} = f_2\left(P_{PAC}, T_{evap}^{in}, T_{cond}^{in}\right) \quad (4)$$

La puissance de l'évaporateur est obtenue à l'aide d'un bilan de puissance sur la PAC.

$$P_{evap} = P_{cond} - P_{comp} \quad (5)$$

2.4. BALLON D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Le stockage thermique est modélisé par une thermocline, détaillée dans (Launay et al. 2019). La modélisation par thermocline a l'avantage d'être plus simple comparée à une modélisation nodale et elle permet de réguler la PAC à partir de la position d'un capteur qui se trouve dans le ballon. La partie supérieure a une température de consigne T_{cons} constante égale à $60\ °C$ et la partie inférieure a une température variable T_{stock} qui est calculée en réalisant un bilan d'énergie.

$$\rho_{eau} \cdot c_{eau} \cdot V_{stock}(t) \cdot \frac{\partial T_{stock}}{\partial t} = \dot{m}_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \left(T_{ecs}^{out} - T_{ecs}^{in}\right) - \phi_{puis} \quad (6)$$

Le flux de soutirage est déterminé par le débit de puisage $\dot{m}_{puis}$ et la température du réseau T_r.

$$\phi_{puis} = \dot{m}_{puis} \cdot c_{eau} \cdot (T_{stock} - T_r) \quad (7)$$

La variation du volume de la partie basse du ballon est obtenue à partir d'un bilan de masse :

$$\rho_{eau} \cdot \frac{\partial V_{stock}}{\partial t} = \dot{m}_{puis} - \dot{m}_{eau} \quad (8)$$

Le volume de la partie haute est obtenu à partir du volume de la partie basse et du volume total du ballon V_{ballon}. Si la température de la partie basse atteint la température de consigne, alors le volume de la partie basse est forcé à zéro et le stockage est considéré comme rempli.

2.5. CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES

Les capteurs solaires photovoltaïques sont implémentés à partir de (Poulet et al. 2015). Le modèle permet de déterminer la puissance électrique produite P_{prod}^{PV} qui est fonction de A_{PV}.

$$P_{prod}^{PV} = \left[\eta_0 \cdot R_i - \left(T_{air}^{out} + K_R^{PV} \cdot R_i - T_{air}^{in}\right) \cdot K_T^{PV}\right] \cdot A_{PV} \quad (9)$$

avec $K_R^{PV} = 0.0035\, K.W^{-1}m^2$ le coefficient de radiation, $K_T^{PV} = 0.61\, W.K^{-1}$ le coefficient de température. R_i correspond au rayonnement solaire incident qui dépend des conditions météorologiques.

La durée de la simulation est de 24 heures avec un pas de temps d'une minute. Les modèles ont été validés expérimentalement à partir du banc d'essai du laboratoire IUSTI (Segond 2015) et la procédure d'optimisation a été vérifiée de manière expérimentale (Lapertot 2021).

2.6. VARIABLES ET OBJECTIFS

Les variables du problème d'optimisation sont constituées des facteurs de régulation et de dimensionnement. Le paramètre de régulation est la position du capteur de référence $Z^*_{capteur}$, qui permet d'activer la PAC lorsque la thermocline atteint cette position.

$$Z^*_{capteur} = \frac{Z_{capteur}}{H_{ballon}} \tag{10}$$

Les variables de dimensionnement sont la surface des capteurs photovoltaïques A_{PV}, la puissance thermique de la pompe à chaleur P_{PAC} et le volume du stockage d'ECS V_{ballon}.

Le tableau 1 présente la valeur de référence et les valeurs limites de chaque paramètre. La référence correspond au dimensionnement du banc d'essai du laboratoire IUSTI (Segond 2015).

Facteur	$\boldsymbol{Z^*_{capteur}}$ $[-]$	$\boldsymbol{P_{PAC}}$ $[\boldsymbol{kW}]$	$\boldsymbol{V_{ballon}}$ $[\boldsymbol{m^3}]$	$\boldsymbol{A_{PV}}$ $[\boldsymbol{m^2}]$
Réf	0.5	7.4	1.5	0
Min	0	0	0.1	0
Max	1	10	2	50

Tableau 1 : Récapitulatif des valeurs limites des paramètres.

Les objectifs du problème d'optimisation sont de minimiser le coût de l'énergie $LCOE$, et de maximiser la fraction solaire F_s et le coefficient de performance COP.

Tout d'abord, le coût de l'énergie est la somme des prix d'investissement, de maintenance et d'opération. Ce coût total est divisé par l'énergie produite sous forme d'eau chaude sanitaire sur une journée multipliée par le temps de vie du système égal à $N_{année} = 20$ ans.

$$LCOE = \frac{Coût_{investissement} + Coût_{maintenance} + Coût_{opération}}{N_{année} * 365 * \int_{0\,h}^{24\,h} \phi_{puis}\, dt} \tag{11}$$

La fraction solaire correspond au rapport entre l'énergie produite par les capteurs solaires photovoltaïques et la consommation électrique du compresseur, des circulateurs et du ventilateur sur une journée complète.

$$F_s = \frac{\int_{8\,h}^{19\,h} P^{PV}_{prod}\, dt}{\int_{0\,h}^{24\,h} \left(P_{circ} + P_{vent} + P_{comp}\right) dt} \tag{12}$$

Le coefficient de performance journalier quantifie l'énergie produite par le système sous forme d'ECS divisée par l'énergie consommée sous forme électrique.

$$COP = \frac{\int_{0\,h}^{24\,h} \dot{m}_{puis} \cdot c_{eau} \cdot (T_{cons} - T_r)\, dt}{\int_{0\,h}^{24\,h} \left(P_{circ} + P_{vent} + P_{comp}\right) dt} \tag{13}$$

Le coût d'investissement prend en compte le prix des capteurs solaires PV, du stockage de chaleur et de la PAC. Le coût d'opération est égal au prix de l'électricité multiplié par l'énergie consommée par le système d'appoint. Le coût de maintenance tient compte du nettoyage des capteurs.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La méthodologie d'optimisation est composée d'une optimisation multi-objectif pour identifier le front de Pareto et d'une aide à la décision multicritère pour sélectionner le meilleur compromis.

3.1. APPLICATION DE L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF

L'algorithme génétique NSGA-II, détaillé dans (Deb et al. 2002), consiste à faire évoluer une population dans son espace naturel à l'aide des processus de sélection, croisement et mutation. Le but est de déterminer toutes les solutions qui ont un bon compromis entre les objectifs, elles se regroupent sur le front de Pareto. Dans cette étude, l'algorithme est appliqué à 100 individus et 1000 générations.

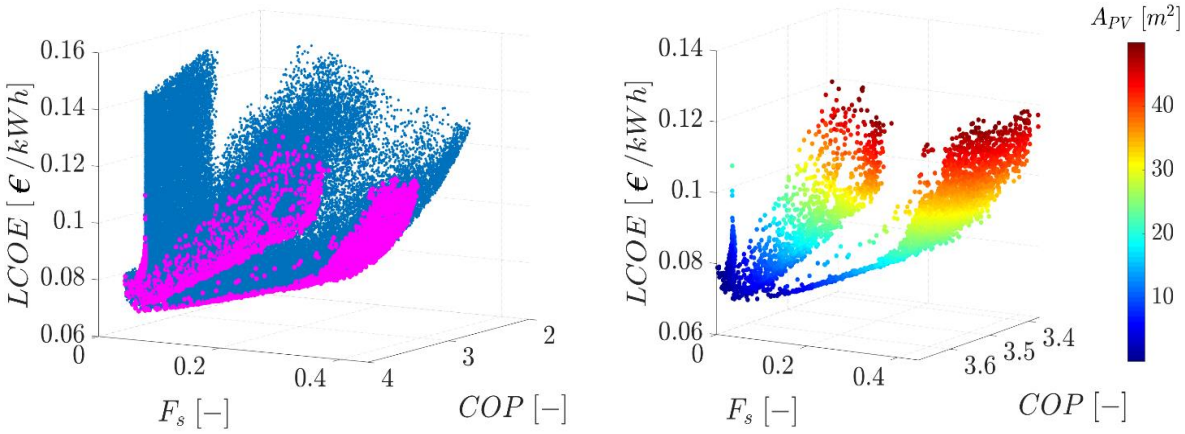

Figure 2 : Front de Pareto pour 10 logements et pour les conditions météorologiques hivernales.

La figure 2 à gauche illustre l'ensemble des solutions obtenues avec les points bleus et le front de Pareto avec les points roses. Les résultats montrent que lorsque le COP augmente entre 3.4 et 3.6, la F_s diminue entre 0.4 et 0 (dégradation) et le $LCOE$ diminue entre 0.15 et 0.08 €/kWh (amélioration). Le front de Pareto est composé de deux zones séparées dû aux contraintes imposées. De plus, la figure 2 à droite montre que lorsque A_{PV} augmente, la F_s augmente également puisque l'énergie d'appoint du système diminue. Le $LCOE$ est maximum quand la surface PV est élevée, car A_{PV} a une influence sur le coût du système. De même, quand P_{PAC} augmente, le COP augmente donc le système produit plus d'énergie thermique. La F_s est minimale pour des valeurs élevées de P_{PAC} puisque l'énergie consommée par le compresseur augmente également. Par ailleurs, le paramètre de régulation Z^*_{capt} est faible pour la plupart des solutions de Pareto. En effet, la PAC doit s'activer plus rapidement pour bénéficier des apports solaires et donc la fraction solaire est plus importante. En effet, la production des capteurs PV est directement utilisée pour la consommation électrique du système.

3.2. APPLICATION D'UNE AIDE A LA DECISION

La méthode d'aide à la décision TOPSIS, définie dans (Tzeng et al. 2011), permet de déterminer la meilleure solution qui est la plus proche de la solution idéale. Dans cette étude, la procédure est appliquée pour différentes conditions météorologiques de Marseille illustrées dans le tableau 2.

Saison	**Hiver**	**Inter-saison**	**Eté**
Température de l'eau du réseau T_r [°C]	10	15	20
Température de l'air extrait T^{in}_{air} [°C]	19	23	26

Tableau 2 : Conditions aux limites pour différentes météos.

La moyenne et l'écart relatif moyen sont déterminés par : $\bar{x} = \frac{1}{3}\sum(x)$ et $\sigma = \frac{1}{3}\sum\left(\frac{x-\bar{x}}{\bar{x}}\right)$.

Le tableau 3 présente les valeurs des critères et des paramètres du meilleur compromis. Tout d'abord, le système est performant, car le COP est d'environ 3.737 donc le dispositif produit plus d'énergie thermique que sa consommation en électricité. La fraction solaire a une valeur de 0.385, puisque le système a moins recours aux énergies auxiliaires et la part des ENR est plus élevée. Le coût de l'énergie est égal à 0.078 $€/kWh$ donc le système a un $LCOE$ inférieur au prix de l'électricité en France (0.120 $€/kWh$). De plus, la surface des capteurs PV est en moyenne de 17 m^2, le volume de stockage d'ECS de 0.75 m^3, la puissance de la pompe à chaleur de 3.5 kW et la position des capteurs de 28.8 %. Le système permet d'atteindre de haute performance énergétique pour les différentes saisons, car la valeur de l'écart relatif moyen σ est inférieure à 10 % sur les objectifs. Cependant, le dimensionnement a une forte variation sur les solutions optimales, puisque la valeur de σ est élevée.

/	**Objectifs**			**Variables**			
Paramètre	COP	F_s	$LCOE$	Z^*_{capt}	P_{PAC}	V_{ballon}	A_{PV}
Unité	–	–	$€/kWh$	–	kW	m^3	m^2
Hiver	3.566	0.328	0.089	0.353	4.124	0.828	25.85
Inter-saison	3.787	0.409	0.072	0.353	3.236	0.818	13.36
Eté	3.857	0.418	0.074	0.157	3.114	0.606	11.89
$\bar{x}$	3.737	0.385	0.078	0.288	3.491	0.751	17.03
σ [%]	3.045	9.870	9.078	30.28	12.08	12.85	34.51

Tableau 3 : Solution optimale du système pour diverses conditions météorologiques de Marseille.

La figure 3 à gauche montre les conditions aux limites sur une journée bien ensoleillée pendant l'inter-saison. La température extérieure varie entre 11 et 14 $°C$ avec un rayonnement solaire qui peut atteindre 700 W/m^2. Dans ce cas, le débit d'air extrait est de 1000 m^3/h et le volume de puisage de 1 m^3 puisque 10 logements sont considérés. La figure 3 à droite expose les grandeurs adimensionnées sur une journée complète. La courbe orange montre que le profil de puisage est composé de trois gaussiennes qui représentent la consommation journalière d'ECS avec le pic du matin, du midi et du soir. La courbe bleue illustre le volume puisé cumulé qui augmente lorsque le puisage est activé, jusqu'à atteindre le volume total de puisage. De plus, lorsque la courbe noire atteint la valeur de 1, cela signifie que la pompe à chaleur est activée et inversement lorsque cette valeur est de 0. La courbe rouge représente la température dans la partie basse du stockage. En effet, le niveau de stockage d'ECS est au

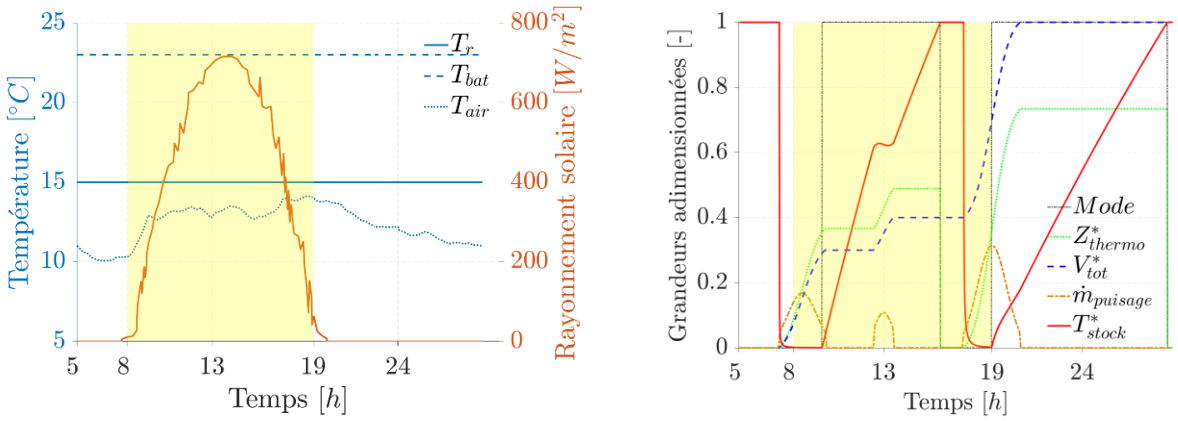

Figure 3 : Profil de température et d'autres grandeurs de la solution optimales pour l'inter-saison.

maximum au début de la journée, cette température augmente quand la PAC est activée jusqu'à ce que le ballon soit totalement rempli. Il se peut que T_{stock} diminue si le puisage est trop important. La courbe verte correspond à la position de la thermocline, celle-ci augmente lorsque le puisage est activé. Cette valeur est réinitialisée à 0 quand le ballon de stockage est rempli. Les résultats montrent que les besoins d'ECS sont satisfaits, car la position de la thermocline est inférieure à la hauteur du ballon.

3.3. IMPACT DE LA SOLUTION OPTIMALE POUR DIFFERENTES CONFIGURATIONS

La procédure d'optimisation multi-objectif est réalisée pour différents nombres de logements afin de voir l'influence sur le débit d'air extrait et sur le volume d'ECS puisé. Pour chaque logement, le débit d'air extrait est de 100 m^3/h et le volume de puisage d'ECS de 0.1 m^3.

La figure 4 à gauche illustre l'évolution des trois objectifs. Les résultats montrent que la F_s diminue entre 0.47 et 0.40, le COP décroit de 4.4 à 3.4 et le $LCOE$ diminue entre 0.32 et 0.06 €$/kWh$ quand le nombre de logements passe de 1 à 20. Le COP diminue quand le nombre de logements accroit, car même si l'énergie puisée est plus importante, l'énergie consommée est d'autant plus élevée. En effet, les puissances des circulateurs et du ventilateur sont liées aux pertes de charge singulières qui évoluent avec le carré du débit d'air et d'eau, respectivement. La puissance du compresseur augmente en fonction de P_{PAC}. De même, la F_s diminue, car même si les capteurs PV produisent de l'énergie solaire, le système consomme plus d'énergie à cause du ventilateur, des circulateurs et du compresseur pour les mêmes raisons que précédemment. De plus, le $LCOE$ diminue puisque l'énergie produite passe de 4 à 92 kWh mais le coût total du système varie entre 11 000 et 41 000 € pour 1 et 20 logements, respectivement. Le $LCOE$ est très important pour un faible nombre de logements donc le système n'est pas rentable et quand ce nombre augmente, le coût de l'énergie est inférieur au prix de l'électricité.

La figure 4 à droite présente la variation des paramètres adimensionnés. Tout d'abord, la position des capteurs, la surface des collecteurs PV et la puissance de la PAC augmente quand le nombre de logements augmente. Effectivement, la puissance P_{PAC} doit être plus élevée pour produire plus d'énergie thermique afin de satisfaire les besoins d'ECS. La surface A_{PV} doit être plus importante pour avoir une part des ENR élevée. La position Z^*_{capt} augmente puisqu'il faut un volume puisé un peu plus important afin d'activer la pompe à chaleur. De plus, le paramètre $V_{ballon}/V_{puissage}$ est supérieur à 1 quand le nombre de logements est faible donc le volume du ballon doit être plus élevé que le volume de puisage. Lorsque le nombre de logements est supérieur à 7, le volume du ballon doit être environ 60 % plus

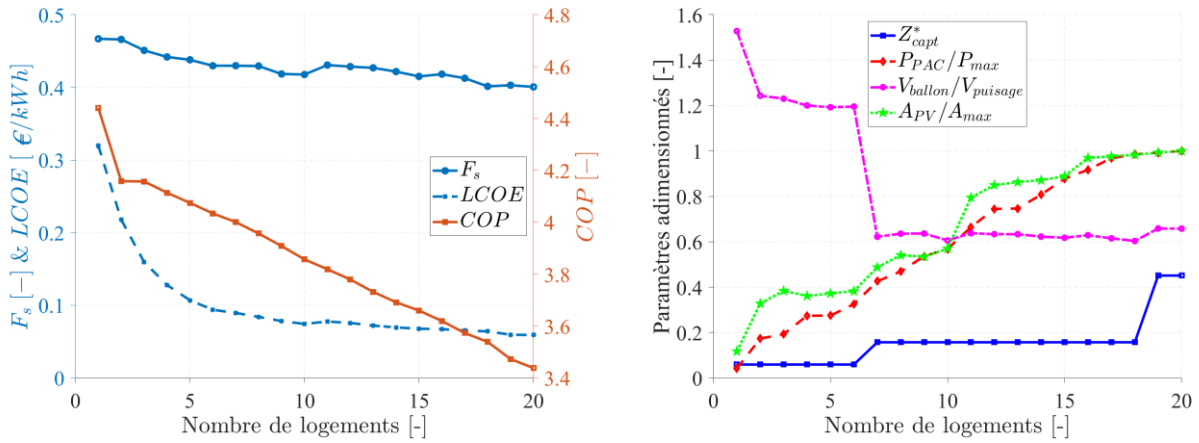

Figure 4: Evolution des objectifs et des paramètres adimensionnés en fonction du nombre de logements pour les conditions estivales.

faible que le volume puisé. À partir de 7 logements, le V_{ballon} augmente, car le rapport des volumes est constant. Dans ce cas, le système doit stocker plus d'énergie pour faire face à la demande.

Par ailleurs, les valeurs limites des objectifs varient quand les conditions météorologiques sont différentes. La F_s est plus faible en inter-saison et encore plus en hiver, car les apports solaires sont plus faibles. Le COP diminue également en hiver, car l'énergie consommée par le compresseur est plus importante. Le $LCOE$ est plus élevé puisque le coût du système est plus cher en inter-saison et surtout en hiver dû à une augmentation de la puissance de la PAC mais aussi de la surface des capteurs PV.

4. CONCLUSION

Une méthodologie d'optimisation a été appliquée à un système composé d'une pompe à chaleur, d'un stockage thermique et des capteurs photovoltaïques. Il utilise l'énergie de l'air extrait d'un bâtiment pour produire de l'eau chaude sanitaire. Tout d'abord, l'algorithme NSGA-II identifie le front de Pareto, lorsque le COP augmente, la F_s et le $LCOE$ diminuent. Ensuite, la méthode TOPSIS sélectionne le meilleur compromis, le système énergétique doit être constitué d'une surface des capteurs PV et d'une puissance de la PAC moyens, d'une position de capteur et d'un volume de stockage faibles. Enfin, le système atteint de haute performance énergétique en été et pour un nombre de logements élevé. Dans la suite de cette étude, il serait intéressant d'étudier divers puisages et différents types de climats (contrastés) pour observer son impact sur les résultats.

5. REMERCIEMENTS

Le "Centre de Calcul Intensif d'Aix-Marseille" est remercié pour les calculs de haute performance.

6. BIBLIOGRAPHIE

Deb K, Pratap A, Agarwal S, et Meyarivan T. 2002. « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II ». *IEEE transactions on neural networks / a publication of the IEEE Neural Networks Council* 6(2):182 - 197. DOI: https://doi.org/10.1109/4235.996017.

Fuentes E, Arce L et Salom J. 2018. « A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 1530–1547. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229.

Lapertot A. 2021. « Méthodologie d'optimisation de composants et de systèmes énergétiques complexes. Application au secteur résidentiel ». Thèse de doctorat dirigée par Olivier LE MÉTAYER, et Benjamin KADOCH, Energétique, Aix-Marseille. 2021AIXM0624.

Launay S, Kadoch B, Le Metayer, O et Parrado C. 2019. « Analysis strategy for multi-criteria optimization: Application to inter-seasonal solar heat storage for residential building needs ». *Energy* 171: 419–434. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.181.

Poulet P et Outbib R. 2015. « Energy production for dwellings by using hybrid systems based on heat pump variable input power ». *Applied Energy* 147: 413-429. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.005.

Segond G. 2015. « Études des couplages thermohydrauliques en régime variable d'un système thermique avec stockage : application à la production d'eau chaude sanitaire à partir de la valorisation d'une source de chaleur basse température ». Thèse de doctorat dirigée par Tadrist, Lounès et Launay, Stéphane Energétique, Aix-Marseille. 2015AIXM4722.

Tzeng G.H, Huang J.J. 2011. « Multiple attribute decision making: Methods and applications ». *CRC Press, Taylor and Francis Group, A Chapman & Hall Book, Boca Raton*. DOI: https://doi.org/10.1201/b11032.