

Analyse de sensibilité d'un système de production d'eau chaude sanitaire avec des capteurs solaires thermiques, d'une pompe à chaleur et d'un stockage.

A. Lapertot^{1*}, A. Kindinis¹.

¹ Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP Paris, 94230 Cachan, France

*(auteur correspondant : alapertot@estp-paris.eu)

Résumé – Un dispositif, composé d'un système solaire thermique, d'une pompe à chaleur et d'un ballon d'eau chaude sanitaire (ECS), permet de capter l'énergie solaire afin de produire de l'ECS pour un bâtiment collectif. La procédure d'analyse de sensibilité et d'aide à la décision a été appliquée au système énergétique pour déterminer les limites de dimensionnement en tenant compte de trois critères énergétiques et économiques. La variation du nombre de logements et du profil de puisage sera également étudiée pour voir l'impact sur les solutions. Les résultats ont montré que le système devient rentable pour un nombre de logements supérieur à 6, cependant, les performances et la part d'énergie renouvelable sont moins importantes.

Nomenclature

A surface, m^2

c_p capacité calorifique, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

\dot{m} débit massique, $kg \cdot s^{-1}$

P puissance, W

T température, $^{\circ}C$

V volume, m^3

Symboles grecs

η rendement, —

ρ masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$

Indices et exposants

comp compresseur

cond condenseur

dem demande

evap évaporateur

fe fluide entrée

fs fluide sortie

puis puisage

stock stockage

Abréviations

ECS eau chaude sanitaire

COP coefficient de performance (—)

F_{ENR} fraction d'énergie renouvelable (—)

LCOE coût de l'énergie ($\text{€}/kWh$)

PAC pompe à chaleur

1. Introduction

La consommation d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) représente environ 20 % de l'énergie finale dans le secteur du bâtiment [1]. Il est donc primordial d'utiliser des dispositifs de production basés sur les énergies renouvelables afin de réduire les impacts environnementaux. Il est possible d'utiliser un système énergétique basé sur les capteurs solaires thermiques couplés à une pompe à chaleur (PAC) et un stockage d'ECS. Cependant, le dimensionnement peut être complexe, puisqu'il doit respecter certaines limites pour éviter le surcoût ou la sous-performance du dispositif, c'est pour cela qu'une méthodologie d'analyse de sensibilité et d'aide à la décision est utilisée.

Une PAC est un dispositif thermodynamique qui permet de réaliser du chauffage. Il soutire la chaleur d'un milieu naturel pour produire une plus grande quantité d'énergie thermique vers un espace à chauffer, tout de même, il requiert de l'énergie électrique pour faire fonctionner le compresseur. Le chauffe-eau thermodynamique (CET) est composé d'une pompe à chaleur et d'un stockage thermique, il permet de produire de l'ECS. La grandeur caractéristique des PAC est le coefficient de performance, qui correspond au ratio entre l'énergie produite et l'électricité consommée. Par exemple, Lu et al. [2] ont étudié un système

expérimental constitué d'un CET couplée à des capteurs solaires thermiques. Ils ont montré que le COP varie entre 2 et 6 dépendant des conditions climatiques.

L'objectif de cette étude est de déterminer les limites de dimensionnement d'un modèle dynamique qui tient compte de plusieurs paramètres et critères. Effectivement, les variables sont le volume du stockage de chaleur, la surface des panneaux solaires et la puissance de la PAC. Les critères sont de maximiser le coefficient de performance et la fraction solaire, et de minimiser le coût de l'énergie.

Une méthodologie d'analyse de sensibilité et d'aide à la décision multicritère est appliquée à un système énergétique qui permet de produire de l'ECS. Le dispositif est composé de capteurs solaires thermiques, d'une pompe à chaleur et d'un stockage de chaleur. La modélisation du système est présentée dans la partie 2. Ensuite, une analyse de sensibilité est appliquée pour observer l'impact des paramètres sur les objectifs, puis, une aide à la décision multicritère est utilisée pour sélectionner la limite de dimensionnement. Les résultats de la méthodologie sont décrits par la partie 3. Une discussion sera également apportée pour observer l'influence du nombre de logements et du puisage sur les objectifs.

2. Description du modèle

La modélisation du système se base sur les travaux de [3, 4]. Un bâtiment collectif de dix habitations est composé d'un système énergétique qui permet de satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire. Le dispositif est composé de capteurs solaires thermiques, d'une pompe à chaleur, d'un échangeur de chaleur à plaques et d'un stockage d'ECS, comme illustré par la figure 1. Plus concrètement, ce dispositif permet de stocker de l'énergie en été pour la réutiliser en hiver sous forme de chaleur et au cours de l'année sous forme d'eau chaude sanitaire. Les données météorologiques de la ville de Paris située en France sont considérées dans cette étude.

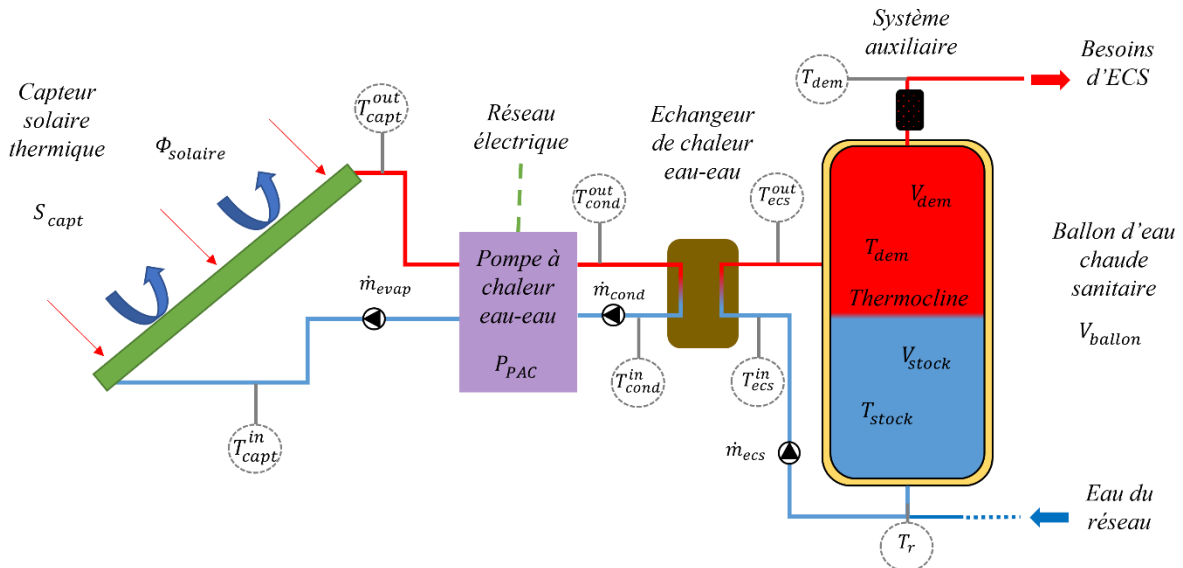


Figure 1 : Schéma du système solaire thermique inter-saisonnier.

Dans un premier temps, les capteurs solaires utilisent de l'énergie solaire afin de chauffer un fluide calorifique qui circule dans la boucle des capteurs à l'aide d'une pompe. Ensuite, la chaleur est envoyée vers la PAC qui a pour but de produire une plus grande quantité d'énergie. La chaleur est transférée vers un échangeur à plaques pour éviter la contamination de l'eau chaude avec le fluide caloporteur de la PAC. Enfin, l'énergie est injectée dans un ballon de stockage afin de le remplir d'ECS. Dans un second temps, l'utilisateur consomme

de l'eau chaude en puisant dans le stockage thermique. Si le ballon est vide, alors un système d'appoint fournira la part d'énergie manquante et dans ce cas, le ballon est alimenté avec de l'eau froide du réseau.

2.1. Capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques sont implémentés à partir de [3]. Le modèle permet de déterminer la puissance thermique produite P_{ST} à partir d'un bilan d'énergie sur les capteurs.

$$P_{ST} = A_{ST} \cdot F_r \cdot \left(R_i - K_{amb} \cdot (T_{capt}^{in} - T_{amb}) \right) \quad (1)$$

K_{amb} est lié au coefficient des transferts thermiques incluant la conduction, la convection et la radiation. F_r est un facteur qui tient compte des gradients de température dans les capteurs solaires. R_i correspond au rayonnement solaire incident qui dépend des conditions météorologiques. De plus, la température en sortie des capteurs T_{capt}^{out} est calculée en fonction de la température en entrée T_{capt}^{in} et de la puissance produite par les panneaux solaires.

$$T_{capt}^{out} = T_{capt}^{in} + P_{ST} / (c_{p,gl} \cdot \dot{m}_{evap}) \quad (2)$$

Avec $c_{p,gl}$ la capacité calorifique du glycol et \dot{m}_{evap} le débit massique.

2.2. Échangeur de chaleur

Les échangeurs de chaleur permettent de calculer les températures en entrée du condenseur en fonction du débit d'eau \dot{m}_{eau} , de la température du ballon T_{ecs}^{out} et de son rendement η_1 .

$$T_{cond}^{in} = T_{cond}^{out} - \eta_1 \cdot (T_{cond}^{out} - T_{ecs}^{out}) \quad (3)$$

2.3. Pompe à 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 [4]. Ces puissances sont reliées aux températures d'entrée de l'évaporateur, du condenseur et de la puissance nominale de la PAC.

$$P_{cond} = f_1(P_{PAC}, T_{capt}^{out}, T_{cond}^{in}) \quad (4)$$

$$P_{comp} = f_2(P_{PAC}, T_{capt}^{out}, T_{cond}^{in}) \quad (5)$$

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

$$P_{evap} = P_{cond} - P_{comp} \quad (6)$$

2.4. Ballon d'eau chaude sanitaire

Le stockage thermique est modélisé par une thermocline, détaillée dans [4]. La figure 1 montre que la partie supérieure de la thermocline a une température de demande T_{dem} constante égale à 60 °C. En ce qui concerne la partie inférieure de la thermocline, elle a une température variable T_{stock} qui est calculée en réalisant un bilan d'énergie. Dans ce cas, cette température augmente lorsque la PAC chauffe et diminue lorsqu'il y a du puisage ou des pertes thermiques.

$$\rho_{eau} \cdot c_{eau} \cdot V_{stock}(t) \cdot \frac{\partial T_{stock}}{\partial t} = \dot{m}_{ecs} \cdot c_{eau} \cdot (T_{dem} - T_{stock}) - \phi_{puis} - \phi_{perte} \quad (7)$$

Le premier terme correspond au flux stocké, le deuxième à la puissance fournie par la PAC, le troisième au flux de soutirage qui est relatif à l'énergie extraite du ballon pour satisfaire les besoins d'ECS et la quatrième aux pertes thermiques.

$$\phi_{puis} = \dot{m}_{puis} \cdot c_{eau} \cdot (T_{stock} - T_r) \quad (8)$$

$$\phi_{perte} = h_{ECS} \cdot A_{ECS} \cdot (T_{stock} - T_{bat}) \quad (9)$$

Si la température de la partie basse atteint la température de demande, alors le volume de la partie basse est forcé à zéro et dans ce cas, le stockage est considéré comme rempli. De plus, la variation du volume de la partie basse du ballon est obtenue à partir d'un bilan de masse.

$$\rho_{eau} \cdot \frac{\partial V_{stock}}{\partial t} = \dot{m}_{puis} - \dot{m}_{ecs} \quad (10)$$

2.5. Régulation

Les circulateurs et la pompe à chaleur cessent de fonctionner si la température du fluide est inférieure à 0 °C et si cette température est supérieure à 100 °C. De même, la pompe à chaleur s'active si la position de la thermocline est supérieure à la position des capteurs et elle s'arrête si le stockage a une température de 60 °C.

La figure 2 montre les trois profils de puisage étudiés, dont un moyen [1], un Gaussien [3] et un réel [4]. Les différents profils tiennent compte de la consommation journalière d'ECS qui varie en fonction des divers mois de l'année [1]. Dans cette étude, chaque logement nécessite en moyenne 100 litres d'eau chaude sanitaire par jour.

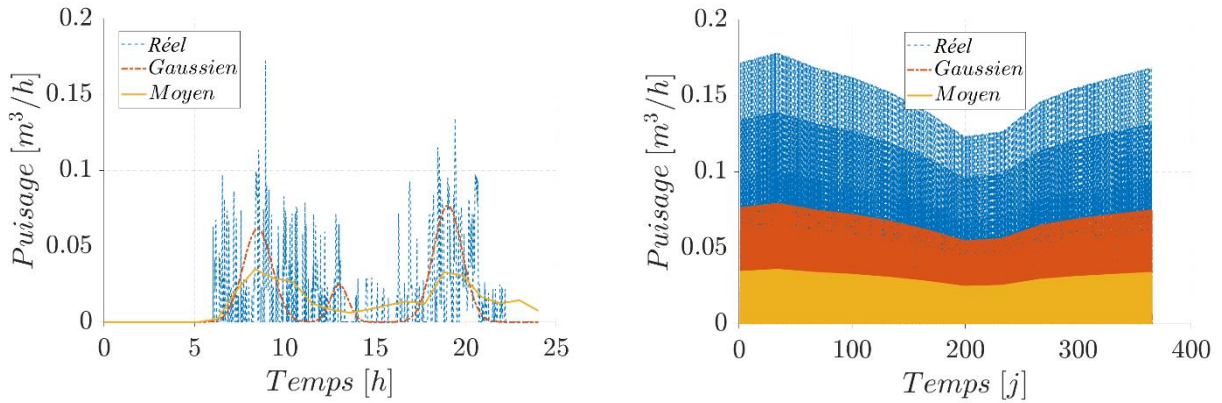


Figure 2 : Evolution des trois profils de puisage sur une journée et sur une année.

Par ailleurs, le modèle des capteurs solaires a été validé dans [3] et les autres modèles ont été validés expérimentalement à partir du banc d'essai du laboratoire IUSTI [4].

2.6. Variables et objectifs

Les variables du problème sont la surface des capteurs solaires thermiques A_{ST} , la puissance thermique de la pompe à chaleur P_{PAC} et le volume du stockage d'ECS V_{ECS} . De plus, les objectifs sont de minimiser le coût de l'énergie $LCOE$, et de maximiser la fraction d'énergie renouvelable F_{ENR} et le coefficient de performance du système 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 pour un temps $T = 1$ an multiplié par le temps de vie égal à $N_{année} = 20$ ans.

$$LCOE = \frac{Coût_{investissement} + Coût_{maintenance} + Coût_{opération}}{N_{année} * \int_0^T \phi_{puis} dt} \quad (11)$$

La fraction d'énergie renouvelable est définie par un moins le rapport entre l'énergie auxiliaire du système d'appoint, les consommations électriques et l'énergie produite en ECS pour une année.

$$F_{ENR} = 1 - \frac{\int_0^T (P_{aux} + P_{circ} + P_{comp}) dt}{\int_0^T \phi_{puis} dt} \quad (12)$$

Le coefficient de performance annuel du système quantifie la consommation d'ECS divisée par l'énergie consommée par le compresseur et les circulateurs.

$$COP = \frac{\int_0^T \phi_{puis} dt}{\int_0^T (P_{circ} + P_{comp}) dt} \quad (13)$$

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

Une contrainte est également étudiée puisque le système doit satisfaire les besoins d'ECS.

3. Résultats et discussions

La méthodologie utilisée dans cette étude pour déterminer la limite de dimensionnement est composé d'une analyse de sensibilité et d'une aide à la décision multicritère. Cette procédure permet de réduire l'espace de recherche dans le but d'améliorer le processus d'optimisation multicritère.

3.1. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est effectuée avec la méthode des plans factoriels à deux niveaux [5]. Elle requiert 2^k évaluations avec $k = 3$ le nombre de paramètres. Elle permet de faire varier l'ensemble des variables simultanément afin de voir l'influence sur les critères. Cette méthode nécessite de déterminer les valeurs minimales X_{min} et maximales X_{max} des variables. Tout d'abord, les valeurs minimales sont fixées à 100 litres pour V_{ECS} , 1 kW pour P_{PAC} , 1 m² pour A_{ST} . Ensuite, les valeurs maximales sont, quant à elles, calculées à partir de l'équation suivante :

$$\begin{cases} X_{max}(V_{ECS}) = X_{min}(V_{ECS}) * (1 + 2 * \sigma) \\ X_{max}(P_{PAC}) = X_{min}(P_{PAC}) * (1 + 2 * \sigma) \\ X_{max}(A_{ST}) = X_{min}(A_{ST}) * (1 + 5 * \sigma) \end{cases}$$

Un facteur σ est utilisé en le faisant varier entre 1 et 10 avec un pas de 1. Un coefficient multiplicateur a été ajouté à σ pour élargir le domaine de recherche et pour éviter un temps de calculs trop important, car le but est d'obtenir les limites de dimensionnement rapidement.

La figure 3 montre les solutions obtenues par les plans factoriels en fonction des différents objectifs et des variables. Dans le cas d'un profil réel et de 10 logements, le coût de l'énergie varie entre 0.15 et 0.22 €/kWh, le coefficient de performance de 1.5 à 18, et la fraction d'énergie renouvelable entre 0.21 et 0.55. En ce qui concerne les valeurs des variables, quand la puissance de la PAC augmente, la F_{ENR} augmente considérablement puisque la PAC permet de satisfaire les besoins d'ECS. Dans ce cas, le COP du système diminue, car même si les besoins d'ECS restent constants, la consommation d'électricité provenant du compresseur croît. De plus, lorsque la surface des capteurs augmente, la F_{ENR} augmente également puisque les panneaux récupèrent plus d'irradiation solaire. En revanche, le $LCOE$ croît, car le prix d'installation est beaucoup plus important. Par ailleurs, dans le cas où le volume de stockage augmenterait, la F_{ENR} augmente, puisque le système permet de stocker plus d'énergie provenant du soleil. Cependant, si le volume V_{ECS} est trop grand et la puissance P_{PAC} est trop faible, alors la pompe à chaleur ne pourra pas remplir le ballon de stockage et le système d'appoint fonctionne plus souvent afin de satisfaire les besoins. De même, lorsque V_{ECS} augmente, le COP diminue, car la PAC fonctionne plus longtemps pour remplir le ballon d'eau chaude.

En outre, la figure 3 en bas à droite présente le pourcentage de satisfaction annuel des besoins d'ECS pour les différentes solutions des plans factoriels. Nous observons que lorsque la P_{PAC} et la A_{ST} sont faibles alors les besoins sont satisfaits uniquement à 40 %, puisque le dimensionnement du système ne permet pas de combler suffisamment la demande. Par contre, dans le cas où la puissance de la PAC et la surface des capteurs sont plus élevées, les besoins sont satisfaits à plus de 90 %, donc le système est mieux dimensionné pour satisfaire la demande d'ECS.

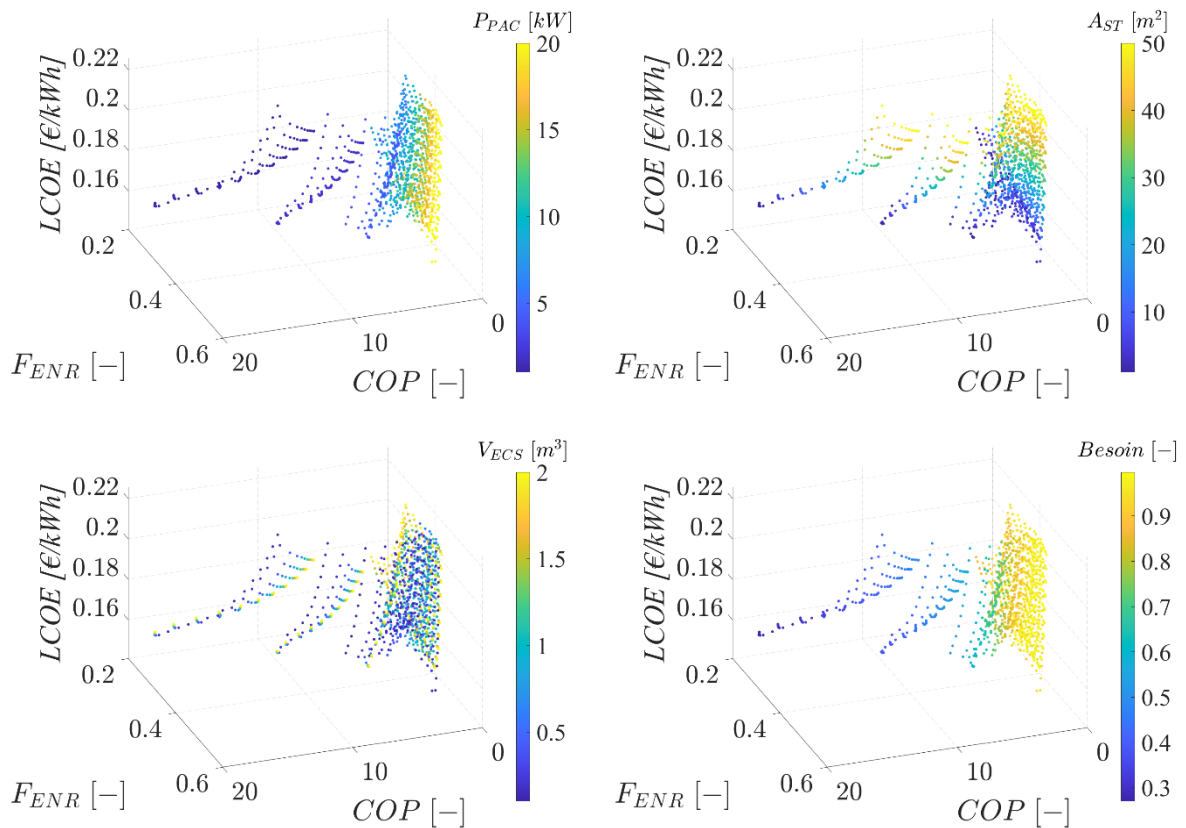


Figure 3 : Solutions des plans factoriels en fonction des objectifs et pour différentes variables et pour la contrainte sur les besoins d'ECS.

3.2. Aide à la décision :

Une aide à la décision est appliquée avec la méthode TOPSIS pour déterminer la valeur de sigma σ qui permet d'avoir le meilleur compromis entre les critères [6]. Cette méthode consiste à sélectionner une solution des plans factoriels qui est la plus proche de la solution idéale, définie par le maximum du COP , de F_{ENR} et le minimum de $LCOE$. Le poids associé à chaque critère est fixé à 1/3.

Dans cette étude, la procédure d'analyse de sensibilité et d'aide à la décision a été appliquée pour différents profils de puisage afin d'observer l'impact sur les limites de dimensionnement. Le tableau 1 montre que les valeurs des paramètres n'exercent pas une grande influence sur la solution obtenue par la méthodologie, car la puissance de la PAC est de 20 kW, le volume de stockage varie entre 1.2 et 1.4 m³ et la surface des capteurs entre 5 et 10 m². La valeur de P_{PAC} correspond à la valeur maximale, car la PAC doit fournir une grande quantité de chaleur au stockage d'ECS. De même, le V_{ECS} doit être élevé dans le but de contenir suffisamment d'énergie pour limiter les problèmes d'intermittences, en revanche, il ne doit pas être surdimensionné afin d'éviter plus les pertes thermiques. La surface A_{ST} ne doit pas être trop élevée pour éviter un surcoût du système. En ce qui concerne les critères, le COP a une valeur comprise entre 2 et 2.2, ce qui correspond aux bornes indiquées par [2]. La F_{ENR} est de 0.49 à 0.55 et le $LCOE$ entre 0.16 et 0.17 €/kWh. Par conséquent, le système est un peu plus performant et un peu plus rentable pour le profil de puisage Gaussien, car même si le volume puisé est identique, le profil du puisage a un impact sur le dispositif. De plus, les besoins d'ECS sont satisfaits à 98 % avec ces configurations, puisque contrairement à F_{ENR} , elle ne tient pas compte de la consommation électrique des composants.

Tableau 1 : Coordonnées des paramètres, des critères et de la contrainte pour différents puisages et pour un nombre de logements égale à dix.

Paramètres	P_{PAC}	V_{ECS}	A_{ST}	COP	F_{ENR}	$LCOE$	Besoin
Unités	[kW]	[m ³]	[m ²]	[-]	[-]	[€/kWh]	[-]
Profil Réel	20.00	1.200	5.000	2.043	0.485	0.165	0.975
Profil Gaussien	20.00	1.200	10.00	2.204	0.555	0.161	0.977
Profil Moyen	20.00	1.400	10.00	2.076	0.497	0.171	0.978

Par ailleurs, cette méthodologie a été effectuée pour différents nombres de logements afin de voir l'influence sur les résultats obtenus. La figure 4 illustre que même si le $LCOE$ décroît, la F_{ENR} , le COP diminuent en fonction du nombre de logements N_{log} . En effet, le système devient rentable pour N_{log} supérieur à 6, puisque le coût de l'énergie est inférieur au prix de l'électricité en France, égal à 0.17 €/kWh [7]. On note que dans le cas où N_{log} augmenterait, la demande d'ECS est beaucoup plus importante, ce qui tend à diminuer le $LCOE$. De même, lorsque P_{PAC} augmentent, la puissance consommée par la PAC croît également, d'où la diminution de la F_{ENR} et du COP . De plus, le coefficient de performance diminue entre 2.6 et 1.8 donc le système produit plus d'énergie thermique que sa consommation électrique, mais le dispositif devient moins performant quand N_{log} augmente.

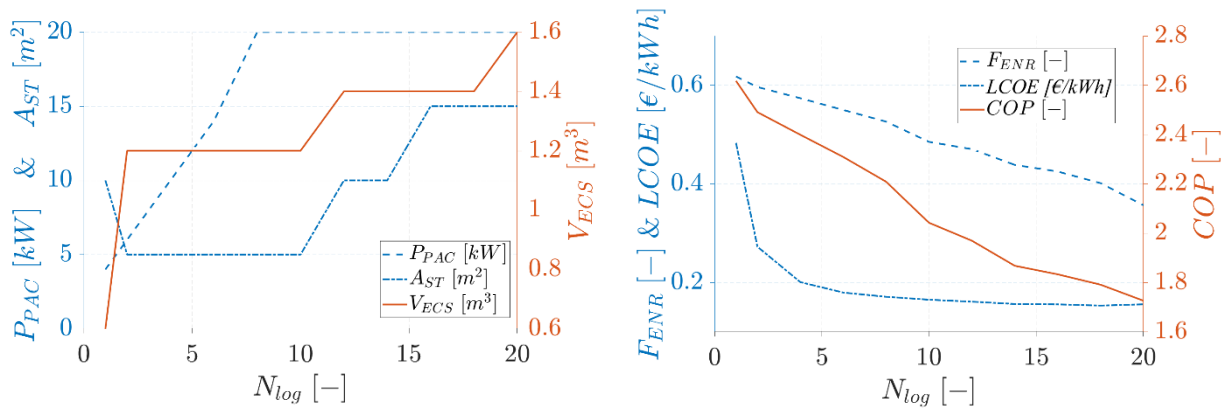


Figure 4 : Evolution des paramètres et des objectifs en fonction du nombre de logements pour un profil de puisage réel.

4. Conclusion

Un système solaire thermique couplé à une pompe à chaleur et à un stockage thermique a été étudié afin de satisfaire les besoins d'eau chaude sanitaire pour un bâtiment collectif. La procédure, composée d'une analyse de sensibilité et d'une aide à la décision multicritère, permet de déterminer les limites de dimensionnement. Cette méthodologie permet également de diminuer le nombre d'itérations dans la procédure d'optimisation, car l'espace de recherche est réduit. De plus, les limites de dimensionnement doivent être plus élargies quand le nombre de logements augmente et varient légèrement pour divers puisages. En effet, les résultats ont montré que le système n'est rentable pas pour N_{log} inférieur à 6, dans ce cas, le coût de l'énergie est supérieur au prix de l'électricité en France. De même, le dispositif devient moins performant quand le nombre de logements augmente, puisque l'énergie consommée par la PAC augmente. Il n'en demeure pas moins que le système produit plus d'énergie pour fournir de l'ECS que sa consommation électrique. Dans la suite de cette étude, il serait intéressant d'étudier l'influence de la météo dans la procédure.

Références

- [1] E. Fuentes and L. Arce and J. Salom, A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 (2018) 1530-1547, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229>.
- [2] Jie Lu and Yitian Tang and Zhiyuan Li and Guoqing He. Solar heat pump configurations for water heating system in China, *Applied Thermal Engineering*, 187 (2021), 116570. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116570>.
- [3] S. Launay, B. Kadoch, O. Le Métayer, C. Parrado. Analysis strategy for multi-criteria optimization: Application to inter-seasonal solar heat storage for residential building needs. *Energy* 171 (2019), p. 419–434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.181>.
- [4] G. Segond. Etudes 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 2015, <http://www.theses.fr/2015AIXM4722>.
- [5] Montgomery, D. C. (2013). Design and analysis of experiments, *John Wiley & Sons*, ISBN: 978-1-118-14692-7.
- [6] G. H. Tzeng, J. J. Huang, Multiple attribute decision making: Methods and applications, *CRC Press, Taylor and Francis Group, A Chapman & Hall Book, Boca Raton*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11032>.
- [7] Prix du kWh : tarif du kilowatt d'électricité en France en 2022. <https://selectra.info/energie/electricite/prix> (consulté en décembre 2022).