

Optimisation multicritère d'un système de production d'eau chaude sanitaire

Multi-criteria optimization of a domestic hot water production system

G. SEGOND¹, A. LAPERTOT¹, T. FASQUELLE^{1*}, B. KADOCH¹, O. LE METAYER¹.

¹ IUSTI UMR 7343, CNRS-Université d'Aix Marseille, 5 rue Enrico Fermi, Marseille, France

* (auteur correspondant : thomas.FASQUELLE@univ-amu.fr)

Résumé – Un système de production d'eau chaude sanitaire, composé d'un chauffe-eau thermodynamique couplé à un stockage par chaleur sensible, est considéré pour cette étude. L'eau du ballon est chauffée par une pompe à chaleur (PAC) via un échangeur à plaques. La PAC récupère la chaleur sur l'air extrait d'un logement de type collectif. Une optimisation multicritère est alors appliquée pour identifier les jeux de paramètres qui permettent de maximiser à la fois le coefficient de performance du système et la part d'énergie renouvelable potentielle d'origine photovoltaïque qui alimenterait la PAC.

Mots-clés : Systèmes énergétiques, Stockages, Eau chaude sanitaire, Pompe à chaleur, Optimisation

Abstract – A domestic hot water production system, composed by a thermodynamic water heater coupled with a sensible heat storage, is considered for this study. The water in the storage tank is heated by a heat pump via a plate heat exchanger. The hot source used by the heat pump is from the heat recovery of the exhaust air in a collective dwelling. A multi-criteria optimization is then applied to identify the sets of parameters which maximize both the coefficient of performance and the part of potential renewable energy from photovoltaic.

Keywords: Energy systems, Storage, Domestic hot water, Heat pump, Optimization

Nomenclature

c capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

E_{ap} énergie d'appoint, J

H hauteur, m

\dot{m} débit massique, kg/s

P puissance, W

T température, °C

V volume, m^3

Z position, m

Symboles grecs

ρ masse volumique, kg/m^3

Δh délai d'activation, h

η rendement, -

Indices

circ circulateur

cond condenseur

évap évaporateur

comp compresseur

vent ventilateur

e entrée

s sortie

Abréviations

ECS eau chaude sanitaire

COP coefficient de performance

NSGA non dominated sorting genetic algorithm

PAC pompe à chaleur

PV photovoltaïque

1. Introduction

Avec les réglementations thermiques récentes RT 2012 et à venir RT 2020, l'eau chaude sanitaire (ECS) devient un poste de consommation de plus en plus important et peut représenter jusqu'à 50 % de la consommation totale du bâtiment en énergie finale [1]. Les systèmes de production d'eau chaude sanitaire basés sur l'utilisation de pompes à chaleur (PAC) sont disponibles depuis plusieurs années [2]. Pour compenser des investissements initiaux plus

importants, l'efficacité énergétique et la fiabilité de tels systèmes doivent être plus compétitives que les systèmes classiques de productions d'ECS.

Dans cette étude, une optimisation multicritère est appliquée à un système de production d'eau chaude sanitaire composé d'un chauffe-eau thermodynamique couplé à un stockage par chaleur sensible. L'eau du ballon est chauffée par une pompe à chaleur (PAC) via un échangeur à plaques. La source froide utilisée par la PAC est issue de la récupération de chaleur sur l'air extrait d'un logement de type collectif. Un modèle réduit, validé expérimentalement à l'aide d'un banc d'essai développé au laboratoire IUSTI [3], est utilisé pour simuler dynamiquement le système. Ce modèle est décrit en partie 2. Les paramètres importants identifiés pour le système sont la forme du puisage pour une consommation journalière donnée et deux variables de régulation. Ces variables de régulation permettent le déclenchement de la PAC soit à partir d'une hauteur de thermocline dans le ballon, soit à partir d'un temps de délai défini avant le pic de puisage du soir. Dans la partie 3, une optimisation utilisant des algorithmes génétiques, permet alors d'identifier les jeux de paramètres qui permettent de maximiser à la fois le coefficient de performance du système et la part d'énergie renouvelable potentielle d'origine photovoltaïque. Les contraintes du problème sont d'assurer le besoin d'eau chaude et le traitement thermique d'élimination de la légionelle. Une méthode d'aide à la décision TOPSIS sélectionne ensuite les paramètres optimaux depuis le front de Pareto généré par l'optimisation.

2. Modélisation du système

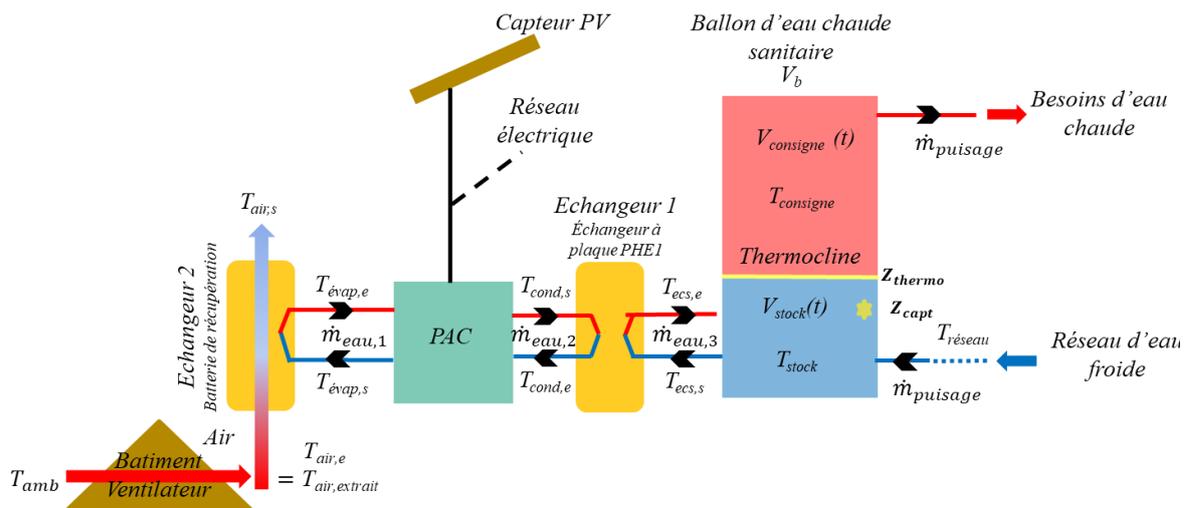


Figure 1 : Schéma du système.

La modélisation du système s'effectue à partir de bilans énergétiques sur chacun des sous-systèmes, c'est à dire l'échangeur air/eau à travers duquel l'énergie contenue dans l'air extrait est récupérée, la PAC eau/eau qui élève le niveau de température de la chaleur récupérée et qui peut être alimentée par un capteur photovoltaïque (PV), l'échangeur eau/eau qui permet d'éviter toute contamination de l'ECS par le fluide de travail de la PAC et le ballon d'ECS dans lequel est stockée la chaleur totale produite et à partir duquel est puisée l'eau consommée.

2.1. Échangeur air/eau

Dans l'échangeur air/eau, les températures d'entrée de l'air $T_{air,e}$ et de l'eau $T_{eau,e}$ sont supposées connues. L'efficacité de l'échangeur $\eta_{Ech_{air/eau}}$ est supposée constante et les températures de sortie sont déterminées à partir de celle-ci, des débits de l'eau $\dot{m}_{eau,1}$ et de l'air

\dot{m}_{air} , des chaleurs spécifiques (considérées comme constantes) c_{eau} et c_{air} et en considérant l'air comme le fluide commandant le transfert de chaleur ($\dot{m}_{air} \cdot c_{air} < \dot{m}_{eau} \cdot c_{eau}$).

$$\eta_{Ech_{air/eau}} = \frac{\dot{m}_{eau,1} \cdot c_{eau} \cdot (T_{eau,s} - T_{eau,e})}{\dot{m}_{air} \cdot c_{air} \cdot (T_{air,e} - T_{eau,e})} \quad (1)$$

2.2. PAC eau/eau

Les puissances de compression P_{comp} et de condensation P_{cond} de la PAC sont déterminées à l'aide d'une corrélation empirique, obtenue à partir du banc d'essai, reliant ces dernières aux températures d'entrée de l'évaporateur $T_{évap,e}$ et du condenseur $T_{cond,e}$. La puissance d'évaporation est obtenue à l'aide d'un bilan d'énergie sur la PAC.

$$P_{cond} = f(T_{évap,e}, T_{cond,e}) \quad (2)$$

$$P_{comp} = f(T_{évap,e}, T_{cond,e}) \quad (3)$$

$$P_{évap} = P_{cond} - P_{comp} \quad (4)$$

Les expressions ont été obtenues par régression via la méthode des moindres carrés ordinaires sous la forme d'un polynôme de 3^e ordre et à 2 variables avec pour forme générale :

$$Y = C_1 + C_2 \cdot T_{cond,e} + C_3 \cdot T_{évap,e} + C_4 \cdot T_{cond,e}^2 + C_5 \cdot T_{cond,e} \cdot T_{évap,e} + C_6 \cdot T_{évap,e}^2 + C_7 \cdot T_{cond,e}^3 + C_8 \cdot T_{évap,e} \cdot T_{cond,e}^2 + C_9 \cdot T_{cond,e} \cdot T_{évap,e}^2 + C_{10} \cdot T_{évap,e}^3 \quad (5)$$

Les températures de sortie des fluides sont alors obtenues à partir de ces puissances et d'un bilan enthalpique. Par exemple, côté condenseur, on obtient :

$$T_{cond,s} = T_{cond,e} + \frac{P_{cond}}{\dot{m}_{eau,1} \cdot c_{eau}} \quad (6)$$

2.3. Echangeur eau/eau

L'échangeur eau/eau est modélisé de la même manière que l'échangeur air/eau (différence de température au condenseur ΔT_{cond} constante). On obtient donc les températures de sortie de l'échangeur à partir des formules ci-dessous.

$$T_{cond,e} = T_{ecs,s} + \Delta T_{cond} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{Ech_{eau/eau}}} - 1 \right) \quad (7)$$

$$T_{ecs,e} = T_{ecs,s} + \frac{\dot{m}_{eau,2} \cdot (T_{cond,s} - T_{cond,e})}{\dot{m}_{eau,3}} \quad (8)$$

Avec $T_{ecs,e}$ et $T_{ecs,s}$ les températures d'entrée et de sortie de l'ECS dans le ballon (circuit de charge), donc les températures de sortie et d'entrée de l'échangeur côté ECS, respectivement.

2.4. Ballon ECS

Le ballon est divisé en deux parties : la partie supérieure est celle contenant l'eau à la température de consigne $T_{consigne}$ tandis que la partie inférieure à une température variable T_{stock} est calculée en effectuant un bilan d'énergie entre chaque pas de temps. L'équation générale de l'évolution de sa température est donnée ci-dessous.

$$\rho_{eau} \cdot c_{eau} \cdot V_{stock}(t) \cdot \frac{\partial T_{stock}}{\partial t} = \phi_{ent,b} - \dot{m}_{puisage} \cdot c_{eau} \cdot (T_{stock} - T_{réseau}) \quad (9)$$

Le flux de chaleur entrant dans le ballon $\phi_{ent,b}$ est calculé à partir d'un bilan enthalpique sur l'eau circulant entre le ballon ECS et l'échangeur eau/eau

$$\phi_{ent,b} = \dot{m}_{eau,3} \cdot c_{eau} \cdot (T_{ecs,e} - T_{ecs,s}) \quad (10)$$

La variation du volume de la partie basse du ballon est obtenue à partir du débit de puisage mesuré en sortie du réseau d'eau froide $\dot{m}_{puisage}$ et de l'équation de conservation de la masse.

$$\rho_{eau} \cdot \frac{\partial V_{stock}}{\partial t} = \dot{m}_{puisage} \quad (11)$$

Le volume de la partie haute est obtenu à partir du volume de la partie basse et du volume total du ballon. Si la température de la partie basse atteint la température de consigne, alors le volume de la partie basse est forcé à 0 et le stock est considéré comme plein.

2.5. Modélisation du système pour le cas de référence

Dans la figure 2 de gauche sont représentées les 3 gaussiennes représentant les pics de consommation journalière d'ECS. Le volume de puisage total est fixé à $1,5 \text{ m}^3$.

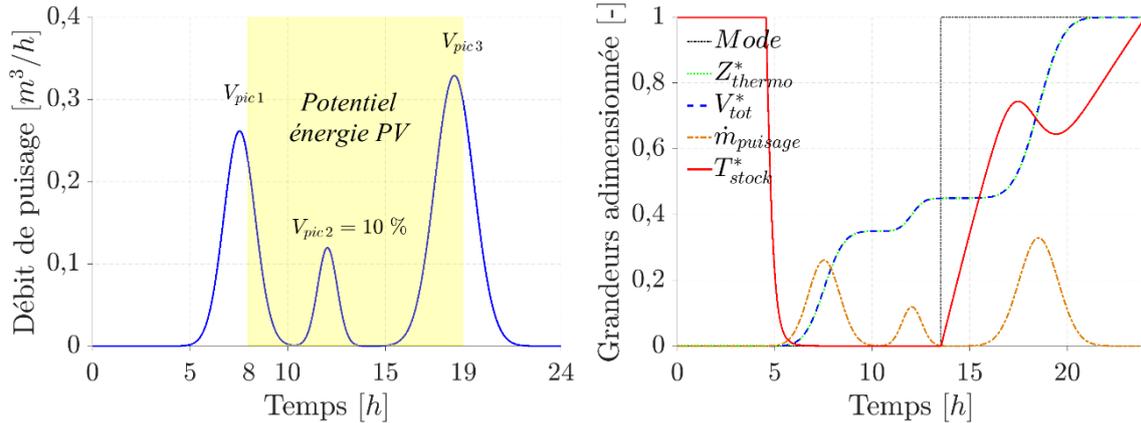


Figure 2 : Profil de puisage et dynamique du cas de référence. Les profils ont été créés à partir de mesures de débits dans un bâtiment collectif de 20 logements (lissage des profils discontinus avec respects du volume total et des heures de pic) [3]. La zone jaune indique l'intervalle de temps de fonctionnement des modules PV. Les courbes orange et bleue correspondent aux profils de puisage instantané et cumulé. Les courbes noire, rouge et verte représentent respectivement le mode de fonctionnement de la PAC, la température du ballon et la position de la thermocline.

Pour le cas de référence, le volume du premier pic V_{pic1} est fixé à 35 % du volume de puisage total, V_{pic2} 10 % et le reste pour V_{pic3} . Le système considéré est raccordé à des panneaux photovoltaïques fonctionnant entre 8h et 19h (zone jaune). La figure 2 droite montre la dynamique du système pour le cas référence sur une journée. Nous observons que le volume puisé et la position de la thermocline sont superposés puisque le volume du ballon et le volume de puisage sont tous les deux égaux à $1,5 \text{ m}^3$. Le mode de fonctionnement indique que la PAC est activée si le délai dépasse 6 heures après le premier pic, ou si la position de la thermocline est supérieure à 50 % de la hauteur du ballon (pour le cas de référence). Dans tous les cas, la PAC est activée à partir de 21h pour que le ballon soit chargé le lendemain. La température T_{stock}^* est nulle quand la PAC est désactivée et augmente quand la PAC est en fonctionnement.

La position Z_{thermo}^* est réinitialisée à 0 quand la température de stockage atteint 55 °C (T_{stock} atteint 1), cela signifie que le ballon est totalement chargé d'eau chaude.

3. Détermination de la solution optimale

3.1. Présentation des variables, des objectifs et des contraintes du système :

Les variables du problème sont les paramètres de régulation du système et la forme du puisage. La position du capteur adimensionnée Z_{capt}^* est un paramètre qui permet d'activer la PAC si la position de la thermocline est supérieure à Z_{capt}^* . Le délai Δh permet déclencher la PAC au bout d'un certain temps après le 1^{er} pic de consommation d'ECS. Le volume adimensionné du puisage $V_{pic\ 1}^*$ modifie la forme du puisage. Z_{capt}^* et $V_{pic\ 1}^*$ sont exprimés par :

$$Z_{capt}^* = Z_{capt} / H_{ballon} \quad (12)$$

$$V_{pic\ 1}^* = V_{pic\ 1} / V_{tot} \quad (13)$$

Le tableau 1 regroupe les valeurs de référence et les conditions aux limites pour les différentes variables (valeurs du cas de validation expérimentale du banc d'essai [3]).

Tableau 1 : Présentation des variables.

Nom	Référence	Minimum	Maximum	Unité
Z_{capt}^*	50	10	90	%
$V_{pic\ 1}^*$	35	25	75	%
Δh	6	0	12	h

Les objectifs du problème sont de maximiser le coefficient de performance COP et de minimiser l'énergie d'appoint E_{ap} . Le COP moyen journalier du système est défini par l'énergie utile divisée par l'énergie consommée totale (compresseur, circulateurs, ventilateurs).

$$COP = \frac{\int_{0h}^{24h} \dot{m}_{puisage} c_{eau} (T_{consigne} - T_{réseau}) dt}{\int_{0h}^{24h} (P_{comp} + P_{circ} + P_{vent}) dt} \quad (14)$$

L'énergie d'appoint correspond à l'énergie qui ne provient pas des ressources solaires. En effet, le système considéré peut-être raccordé à des modules photovoltaïques qui fonctionnent sur la plage représentative 8h - 19h. L'énergie d'appoint est la différence entre l'énergie consommée par la PAC et l'énergie récupérée par les modules photovoltaïques.

$$E_{ap} = \int_{0h}^{24h} (P_{comp} + P_{circ} + P_{vent}) dt - \int_{8h}^{19h} P_{PV} dt \quad (15)$$

Avec

$$P_{PV} = P_{comp} + P_{circ} + P_{vent} \quad (16)$$

Les deux contraintes sont de traiter les légionnelles et d'assurer le besoin d'ECS. Pour éviter la prolifération des légionnelles, le ballon doit être chauffé à 55 °C pendant 2 heures [4]. De plus, pour assurer le besoin d'ECS, il faut que le ballon contienne toujours de l'eau chaude, ce qui implique que la position de la thermocline doit être toujours inférieure à la hauteur du ballon.

3.2. Résultats sur l'optimisation multi-objectifs

3.2.1. Généralités

Un problème d'optimisation multi-objectifs cherche à optimiser plusieurs objectifs en même temps. Le but est de trouver toutes les solutions qui ont un bon compromis pour l'ensemble des objectifs. Ces solutions se regroupent sur une courbe appelée front de Pareto. Dans cette étude, l'algorithme génétique NSGA II [5] est utilisé car il est capable de résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs avec contrainte. Le pourcentage de mutation et de croisement est de 50 %, le nombre d'individus et de générations est de 100 et 1000.

3.2.2. Résultats optimisation

La figure 3 représente les meilleures solutions obtenues en fonction des deux objectifs. Nous remarquons que le front de Pareto est discontinu à cause des différentes contraintes imposées (traitement des légionnelles et assurer le besoin d'ECS). Le COP varie entre 3,09 et 3,24 et E_{ap} entre 6,58 et 13,48 kWh. De plus, nous avons représenté le front de Pareto pour différents paramètres. La position du capteur adimensionnée est comprise entre 0,2 et 0,9, le volume adimensionné du puisage entre 0,25 et 0,7 et le délai d'activation de la PAC entre 0 et 12 heures.

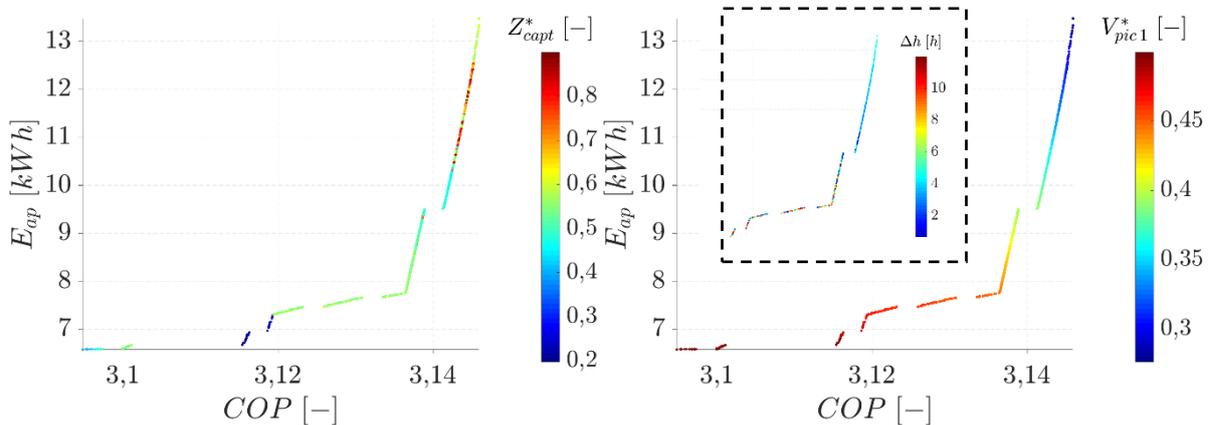


Figure 3 : Représentation du front de Pareto pour les différents paramètres.
La croix rose correspond à la solution optimale obtenue avec TOPSIS.

Nous remarquons que Z_{capt}^* a tendance à augmenter quand le COP et E_{ap} augmentent : si la PAC se met en route tardivement, l'énergie solaire utilisée est plus faible mais l'efficacité énergétique du système global augmente. On remarque également que V_{pic1}^* diminue quand le COP et E_{ap} augmentent. Un premier pic de consommation de forte intensité implique donc une mise en marche de la PAC plus tôt dans la journée et donc une augmentation de l'énergie solaire utilisée. Toutefois, cela se fait au détriment du COP du système. Enfin, Δh a des valeurs faibles pour un COP et E_{ap} élevés mais la valeur du Δh varie beaucoup pour le reste du front. Dans le cas où $V_{pic1}^* > 0,4$ et $Z_{capt}^* < 0,5$, la PAC n'a pas été enclenchée à partir de Δh , car elle a déjà été déclenchée lorsque la position Z_{thermo}^* a atteint la limite Z_{capt}^* . Il ne semble donc pas que ce délai d'activation soit un des paramètres prépondérants pour l'optimisation du système.

La figure 4 représente les cartographies des deux objectifs. Certaines zones de la figure 4 n'admettent pas de solutions car elles ne respectent pas les contraintes imposées (traitement des légionnelles et assurer le besoin).

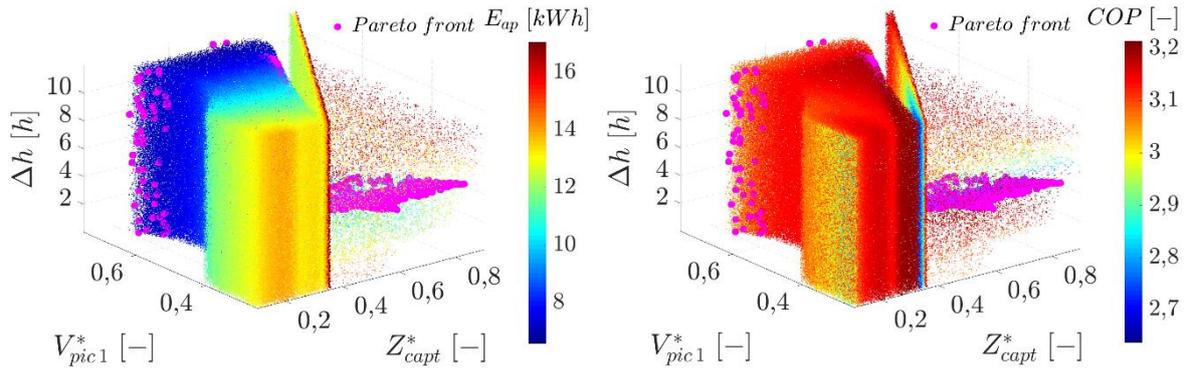


Figure 4 : Cartographies pour les deux objectifs. Les points roses forment le front de Pareto.

Il semble que Δh ait peu d'impact sur les deux objectifs puisque la cartographie a une allure constante sur l'axe vertical (0h – 12h). Les deux autres variables, V_{pic1}^* et Z_{capt}^* , influencent fortement l'énergie d'appoint E_{ap} et le COP : pour un volume de puisage constant de 0,5, la variation de Z_{capt}^* entre 0,1 et 0,35 entraîne une variation de E_{ap} entre 13 kWh et 17 kWh, tandis que le COP passe de 3,15 à 2,7. Une partie du front de Pareto est située sur les zones indiquées précédemment pour maximiser le COP et une autre partie pour minimiser E_{ap} . Certaines solutions correspondent à des bons compromis dans les zones non indiquées.

3.3. Résultats sur l'aide à la décision

3.3.1. Généralités

L'aide à la décision est une technique permettant de décider de la meilleure solution parmi un ensemble de solutions possibles. Il existe un certain nombre de méthodes mais TOPSIS semble la plus appropriée car elle se réfère à la solution idéale. La procédure de la méthode TOPSIS est de sélectionner la solution qui a la distance la plus courte avec la solution idéale [6]. Dans cette étude, la méthode TOPSIS est utilisée sur le front de Pareto afin de déterminer la solution optimale. La solution idéale correspond au minimum de E_{ap} et au maximum de COP.

3.3.2. Application de la méthode TOPSIS

Le tableau 3 présente la solution retenue par la méthode d'aide à la décision. On obtient un COP et E_{ap} de 3,19 et 7,75 kWh, respectivement. La valeur des variables est de 55,9 % pour Z_{capt}^* , 58,9 % pour V_{pic1}^* et 4 heures pour Δh . Cette solution respecte les deux contraintes imposées car le ballon reste à 55 °C pendant 5 h et la position de thermocline ne dépasse pas 75 %, ce qui permet d'assurer le traitement des légionnelles et les besoins d'ECS (voir figure 3).

Tableau 3. Présentation de la solution optimale.

Nom	Objectifs			Variables	
	COP	E_{ap}	Z_{capt}^*	V_{pic1}^*	Δh
Meilleure Solution	3,19	7,75 kWh	0,559	0,589	4,00 h

4. Simulation du cas de référence et du cas optimisé :

La figure 5 compare les dynamiques du système de référence et du système optimisé. Dans les deux cas, la position de la thermocline et la température du ballon sont influencées par

l'évolution conjointe du puisage et le mode de fonctionnement de la PAC ; une augmentation du débit de puisage entraîne une diminution de la pente de la courbe de T_{stock} .

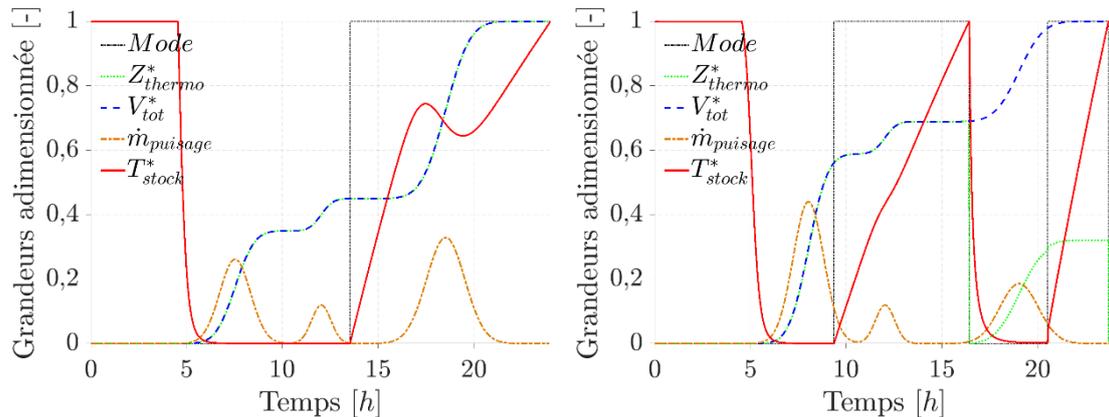


Figure 5 : Dynamique du système pour le cas de référence (gauche) et pour le cas optimisé (droite)

La figure 5 permet de comprendre l'augmentation du COP dans le cas optimisé. En effet, pour le cas optimisé, la PAC fonctionne moins longtemps, et E_{ap} diminue du fait d'une meilleure valorisation de la ressource solaire qui est en adéquation avec la plage de fonctionnement de la PAC. De plus, pour le cas de référence, la position de la thermocline atteint le sommet du ballon ($Z_{thermo}^* = 1$), ce qu'il faut éviter si l'on souhaite assurer le besoin d'ECS et prévenir le risque légionelles (car cela signifie une température de sortie plus faible).

5. Conclusion et perspectives

Dans cette étude, l'optimisation d'un système de production d'ECS est réalisée en prenant en compte deux critères énergétiques, le coefficient de performance COP et l'énergie d'appoint E_{ap} , sachant que les trois paramètres choisis sont la position du capteur, le volume du 1^{er} pic de puisage et le délai. Cette procédure d'optimisation montre que la solution optimale se situe pour $Z_{capt}^* = 55,9\%$, $V_{pic1}^* = 58,9\%$, $\Delta h = 4h$. Cette solution permet d'avoir $COP = 3,19$ et $E_{ap} = 7,75 kWh$ et aussi d'assurer le besoin d'ECS et le traitement des légionnelles.

Une confirmation expérimentale des résultats de l'optimisation, avec analyse de sensibilité, est en cours, afin de vérifier que le point trouvé est bien la solution optimale.

Références

- [1] La Réglementation Thermique « Grenelle Environnement 2012 » : la généralisation des Bâtiments Basse Consommation, une ambition sans équivalent en Europe, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (2010).
- [2] A. Hepbasli., Y Kalinci. « A review of heat pump water heating systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 6-7, pp. 1211-1229, 2009.
- [3] G. Segond, « Étude des couplages thermo-hydrauliques en régime variables d'un système thermique avec stockage », *Thèse de Doctorat, Marseille, Aix-Marseille Université*, 2015.
- [4] Centre Technique et Scientifique du Bâtiment (CSTB), « Maîtrise du risque de développement des légionnelles dans les réseaux d'eau chaude sanitaire », *Guide Technique du CSTB*, 2012.
- [5] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, « A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 182 – 197, 2002.
- [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.