

Analyse énergétique et exergetique d'un système expérimental de production d'eau chaude sanitaire

Arnaud LAPERTOT^{*1,3}, Jean-Henry FERRASSE², Thomas FASQUELLE¹, Benjamin KADOCH¹, Olivier LE METAYER¹

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France

² Aix-Marseille Université, CNRS, M2P2 UMR734, Ecole Centrale Marseille, France

³ Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP Paris, 94230 Cachan, France

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

Résumé - La consommation d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) devient de plus en plus important, il est donc nécessaire de satisfaire les besoins d'ECS en utilisant des systèmes performants. Pour cela, le dispositif expérimental du laboratoire IUSTI, composé d'une pompe à chaleur et d'un stockage thermique, est utilisé. Dans cette étude, des analyses énergétiques et exergetiques ont été menées sur le système pour quantifier les pertes thermiques et les irréversibilités en prenant en compte différentes conditions météorologiques et types de bâtiments.

Nomenclature

E : énergie (J)	$elec$: électrique
Ex : exergie (J)	$evap$: évaporateur
h : enthalpie massique ($J \cdot kg^{-1}$)	ce : fluide chaud entrant
\dot{m} : débit massique ($kg \cdot s^{-1}$)	$cond$: condenseur
P : puissance (W)	cs : fluide chaud sortant
P_{ex} : flux d'exergie (W)	fe : fluide froid entrant
\dot{q}_v : débit volumique ($m^3 \cdot s^{-1}$)	fs : fluide froid sortant
s : entropie massique ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$)	des : destruction
T : température ($^{\circ}C$)	$puis$: puisage
u : énergie interne massique ($J \cdot kg^{-1}$)	$vent$: ventilateur
V : volume (m^3)	<i>Abréviations</i>
W : puissance électrique (W)	BR : Batterie de Récupération
<i>Symboles grecs</i>	CTA : Centrale de Traitement de l'Air
ρ : masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)	COP : Coefficient de Performance
η : rendement (-)	EC : Echangeur de Chaleur
Φ : flux de chaleur (W)	ECS : Eau Chaude Sanitaire
<i>Indices et exposants</i>	PAC : Pompe à Chaleur

1. Introduction

La consommation d'Eau Chaude Sanitaire (ECS) devient un poste de consommation de plus en plus important dans le secteur du bâtiment, contrairement à la consommation de chauffage [1]. Cependant, le chauffe-eau électrique traditionnel présente une faible performance pour produire de l'ECS [2]. Pour améliorer l'efficacité d'un tel système, une solution intéressante, pour répondre aux besoins d'ECS, est l'utilisation d'un chauffe-eau thermodynamique.

Un chauffe-eau thermodynamique est un système énergétique qui permet de satisfaire les besoins d'ECS grâce à une Pompe à Chaleur (PAC) et un stockage de chaleur. Le système récupère la chaleur de l'air pour chauffer l'eau du ballon. La consommation d'énergie électrique permet de produire une plus grande quantité d'énergie thermique. Son efficacité est exprimée par le Coefficient de Performance (COP) qui est le rapport entre la chaleur fournie et l'énergie consommée.

L'objectif de cette étude est d'effectuer une analyse énergétique et exergétique d'un système expérimental afin de déterminer s'il est performant pour produire de l'ECS. Pour cela, il faut quantifier les pertes thermiques et les irréversibilités. Différentes conditions météorologiques et configurations de bâtiments seront étudiées pour voir l'impact sur les critères.

Dans cette étude, des analyses énergétiques et exergétiques sont menées sur un système expérimental dédié à la production d'ECS. La section 2 présente le fonctionnement et la métrologie du dispositif expérimental, ainsi que la procédure des différents essais. La section 3 décrit les bilans énergétiques et exergétiques appliqués sur le système complet. La section 4 met en avant l'interprétation des résultats des études expérimentales pour différentes conditions aux limites. La procédure met en évidence les pertes thermiques et les irréversibilités du système pendant le chauffage du ballon.

2. Description du banc expérimental

Le banc d'essai du laboratoire IUSTI utilisé dans cette étude, est schématisé dans la figure 1. Le système est constitué d'une Centrale de Traitement de l'Air (CTA), d'une PAC et d'un ballon de stockage. La CTA comprend une batterie froide, deux résistances électriques et un ventilateur afin de contrôler la température et le débit de l'air extrait. Une Batterie de Récupération (BR) est intégrée également dans la CTA pour extraire l'énergie de l'air et la transférer à l'évaporateur de la PAC eau-eau. Ensuite, cette PAC produit une plus grande quantité de chaleur au niveau du condenseur. Cependant, elle requiert de la puissance électrique pour le fonctionnement du compresseur. Enfin, cette PAC permet de chauffer le ballon d'eau chaude par l'intermédiaire d'un Echangeur de Chaleur à plaques eau-eau (EC). Ce système permet de prélever de l'eau chaude sanitaire à partir d'un profil de puisage. Plus de détails peuvent être trouvés dans [3,4].

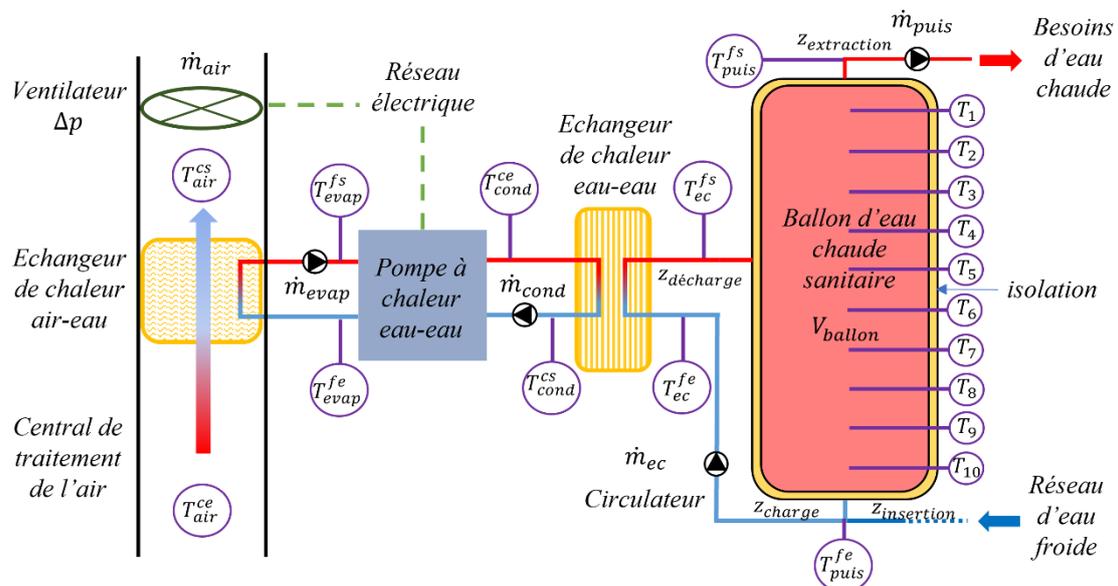


Figure 1: Schéma du système expérimental [4].

2.1 Métrologie du système

Le système expérimental contient un ventilateur, des électrovannes et des circulateurs, visibles dans la figure 1. Le ventilateur est contrôlé avec un module PID pour obtenir le débit d'air imposé $q_{v_{air}}$ qui varie entre 0 et 2000 m^3/h . La même procédure est appliquée avec les résistances électriques pour réguler la température de l'air extrait à une température de consigne T_{air} , variant entre 15 °C et 25 °C. De plus, l'installation est composée de jauges de pression, de débitmètres et de capteurs de température (Pt100 pour mesurer la température de l'air dans la CTA et la température de l'eau dans les circuits hydrauliques, et dix thermocouples pour enregistrer l'évolution de la température dans le ballon d'ECS). Le dispositif est également constitué d'un capteur différentiel de pression pour le calcul de la surconsommation du ventilateur et d'un wattmètre pour mesurer la puissance du compresseur fournie à la PAC.

2.2 Procédure des essais expérimentaux

Une étape préparatoire est effectuée pour mettre le système à son état de référence, en contrôlant les conditions aux limites. Les essais expérimentaux commencent lorsque le stockage d'ECS est vide, c'est-à-dire à une température $T_{ballon} = 13\text{ °C}$, et ils se terminent lorsque le ballon est rempli à une température $T_{ballon} = 53\text{ °C}$. Le tableau 1 synthétise les différents essais expérimentaux réalisés avec différentes températures et débits d'air extrait, dans le but d'observer l'influence des conditions météorologiques. En effet, la configuration de référence est fixée à 20 °C et 2000 m^3/h , ce qui correspond à des conditions inter-saisons pour un bâtiment collectif d'une douzaine d'habitations. Le changement du débit d'air extrait entraîne également une variation de la taille du bâtiment ainsi que du nombre d'habitations simulées. De même, lorsque la température de l'air extrait est plus faible, cela signifie que le système se trouve dans des conditions hivernales. Les incertitudes de mesure des sondes Pt100 sont de $\pm 0,54\text{ °C}$ et celles du débitmètre électromagnétique sont de $\pm 0,5\%$ [3].

Tableau 1 : Présentations des différents essais expérimentaux.

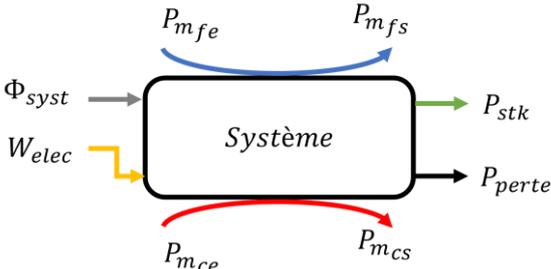
Noms	T_{air} (°C)	$q_{v_{air}}$ (m^3/h)	Commentaire
Essai 1	$20 \pm 0,54$	1000 ± 5	Variation du débit de l'air
Essai 2	$20 \pm 0,54$	$1500 \pm 7,5$	Modification du débit de l'air
Essai 3	$20 \pm 0,54$	2000 ± 10	Cas de référence
Essai 4	$15 \pm 0,54$	2000 ± 10	Changement de la température de l'air
Essai 5	$25 \pm 0,54$	2000 ± 10	Modification de la température de l'air

3. Description du modèle

3.1 Bilan énergétique

Un bilan énergétique est appliqué pour déterminer les pertes thermiques du système. Le bilan enthalpique tient compte de la puissance contenue dans l'eau P_m pour les fluides chauds et froids. Les puissances électriques W_{elec} , les apports des flux de chaleur Φ_{syst} et la puissance stockée P_{stk} sont également mis en jeu. Les puissances en entrée P_{in} et en sortie P_{out} du dispositif sont exprimées dans le tableau 2. Les bilans dépendent du débit \dot{m} , des puissances électriques et des températures qui sont déterminés expérimentalement. L'énergie interne massique u , l'enthalpie massique h , l'entropie massique s et la masse volumique ρ sont des fonctions de la température et sont déterminées grâce aux données du NIST [5].

Tableau 2 : Résumé du bilan de puissance du système.

Nom	Bilan de puissance
	$P_{in} = P_{m_{fe}} + P_{m_{ce}} + W_{elec} + \Phi_{syst}$ $P_{out} = P_{m_{fs}} + P_{m_{cs}} + P_{stk}$ <p>avec</p> $P_{m_{ce}} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{ce})$ $P_{m_{cs}} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{cs})$ $P_{m_{fe}} = \dot{m}_{puis} \cdot (h_{fe})$ $P_{m_{fs}} = \dot{m}_{puis} \cdot (h_{fs})$

De plus, la consommation électrique du système provient du compresseur, du ventilateur et des 4 circulateurs W_{elec} . La puissance du compresseur W_{comp} est fournie à l'aide d'un wattmètre. Les puissances des circulateurs W_{circ} ont été déterminées expérimentalement avec des valeurs constantes égales à 50 W. La puissance du ventilateur W_{vent} est déterminée à l'aide d'un capteur de pression différentiel et d'un débitmètre.

$$W_{elec} = W_{comp} + W_{vent} + 4 \cdot W_{circ} \quad (1)$$

avec

$$W_{vent} = \dot{q}_{v_{air}} \cdot \Delta p_{vent} \quad (2)$$

où Δp_{vent} correspond à la différence de pression provoquée par le ventilateur. De plus, les apports des flux de chaleur Φ_{syst} correspondent à la somme des échanges de chaleur de l'environnement vers le système pour chacun des composants.

$$\Phi_{syst} = \Phi_{br} + \Phi_{pac} + \Phi_{ec} + \Phi_{stk} \quad (3)$$

En ce qui concerne la puissance stockée P_{stk} dans le ballon d'ECS, elle est déterminée par la somme des variations d'énergie interne dans chaque strate.

$$P_{stk} = \sum_{i=1}^{N_{capt}} P_{stk}^i = \sum_{i=1}^{N_{capt}} \left(\rho_{eau}^i V_{ballon}^i \cdot \frac{d(u^i)}{dt} \right) \quad (4)$$

Par ailleurs, les pertes thermiques sont déterminées en combinant les entrées et les sorties du bilan enthalpique :

$$P_{in} = P_{out} + P_{perte} \quad (5)$$

Les performances énergétiques du système permettent de quantifier les pertes thermiques, à partir du rendement énergétique.

$$\eta_{syst} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (6)$$

Le coefficient de performance permet de quantifier les performances du système global, il est déterminé à l'aide du rapport entre le flux stocké et la puissance électrique consommée.

$$COP_{syst} = \frac{P_{stk}}{W_{elec}} \quad (7)$$

3.2 Bilan exergetique

Un bilan exergetique est appliqué au système complet, en faisant la différence entre le bilan enthalpique et le bilan entropique multipliée par une température de référence T_0 . Cette

température est fixée par les conditions de l'environnement. Le tableau 3 présente les formulations des flux d'exergie en entrée $P_{ex_{in}}$ et en sortie $P_{ex_{out}}$ du système.

Tableau 3 : Résumé du bilan de flux d'exergie du système.

Nom	Bilan de flux d'exergie
	$P_{ex_{in}} = P_{ex_{m_{fe}}} + P_{ex_{m_{ce}}} + W_{ex_W} + P_{ex_{\Phi}}$ $P_{ex_{out}} = P_{ex_{m_{fs}}} + P_{ex_{m_{cs}}} + P_{ex_{stk}}$ <p>avec</p> $P_{ex_{m_{fe}}} = \dot{m}_{puis} \cdot (h_{fe} - T_0 s_{fe})$ $P_{ex_{m_{fs}}} = \dot{m}_{puis} \cdot (h_{fs} - T_0 s_{fs})$ $P_{ex_{m_{ce}}} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{ce} - T_0 s_{ce})$ $P_{ex_{m_{cs}}} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{cs} - T_0 s_{cs})$

Le bilan exergetique fait intervenir l'exergie des flux de matière P_{ex_m} des fluides chauds (air) et des fluides froids (eau du réseau). De plus, l'exergie totale des flux électriques correspond à la somme des exergies provenant du compresseur, du ventilateur et des 4 circulateurs P_{ex_W} et l'exergie total des flux de chaleur $P_{ex_{\Phi}}$ correspond à la somme des exergies provenant des flux de chaleur entrant dans chacun des composants. De même, la puissance d'exergie stockée dans le ballon d'ECS est définie par la somme des variations des flux d'exergie dans chacune des strates.

$$P_{ex_{stk}} = \sum_{i=1}^{N_{capt}} P_{ex_{stk}}^i = \sum_{i=1}^{N_{capt}} \left(\rho_{eau}^i V_{ballon}^i \cdot \frac{d(u^i - T_0 s^i)}{dt} \right) \quad (8)$$

Par ailleurs, le bilan exergetique est obtenu à partir du flux d'exergie entrant et sortant du système en combinant les termes.

$$P_{ex_{in}} = P_{ex_{out}} + P_{ex_{des}} \quad (9)$$

Le flux d'exergie détruit $P_{ex_{des}}$ provoque une diminution de la puissance exergetique due aux irréversibilités telles que les pertes de charges ou les transferts de chaleur. Pour améliorer les performances du système, il est important de réduire son flux d'exergie détruit, ce qui engendre une augmentation du rendement exergetique. Il est exprimé par le rapport entre la puissance d'exergie sortante et entrante.

$$\eta_{ex} = \frac{P_{ex_{out}}}{P_{ex_{in}}} \quad (10)$$

4. Résultats et interprétations

Les paramètres du système sont le débit et la température d'air extrait qui varient entre $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ et $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ et entre $15 \text{ }^\circ\text{C}$ et $25 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivement. Les autres paramètres sont fixés à leur valeur de référence avec un débit des circulateurs à $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$ et un débit de puisage nul. Cette configuration correspond à la chauffe du ballon.

4.1 Analyse énergetique

Une analyse énergetique a été réalisée à partir des essais du dispositif expérimental pour différentes températures et débits d'air extrait. En effet, les conditions météorologiques et la

taille du bâtiment peuvent exercer une influence sur les critères énergétiques tels que le rendement énergétique et le coefficient de performance définis dans la section 3.

La figure 2 à gauche, montre que le rendement instantané du système diminue entre 0,95 et 0,8. De même, cette grandeur diminue plus rapidement pour des températures et des débits d'air faibles, comme l'illustrent les différentes courbes de la figure 2. Effectivement, le système est moins performant, car les échanges thermiques sont moindres. Par ailleurs, la figure 2 à droite, montre que le COP_{syst} est superposé, à une incertitude de mesure près, pour les différentes températures et débits d'air, puisque le système garantit la même performance quelle que soit la valeur de ΔT_{pac} . On peut noter que le COP_{syst} est plus faible que celui de la PAC, car le dispositif prend en compte l'ensemble de la consommation d'électricité, mais aussi des pertes thermiques.

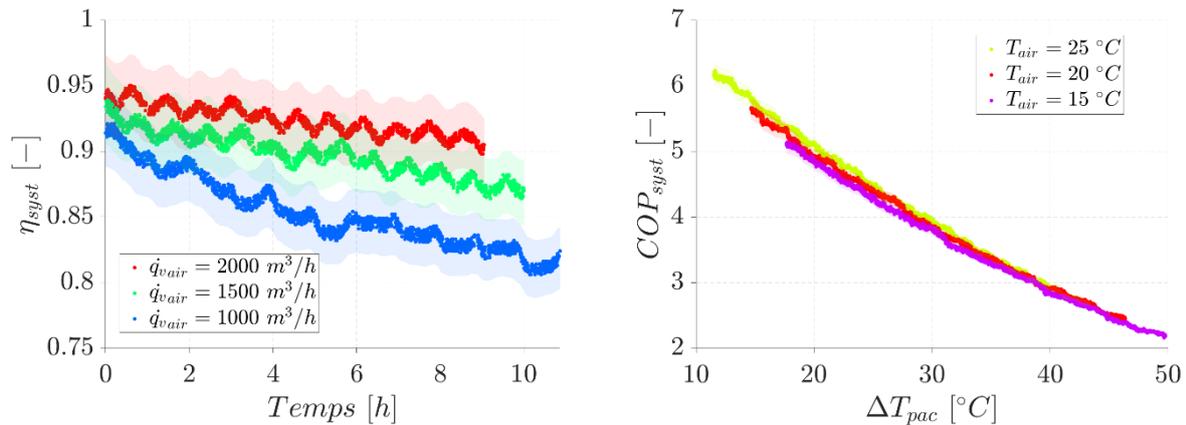


Figure 2 : Variation du rendement énergétique en fonction du temps pour différents débits $\dot{q}_{v\text{air}}$. Evolution du COP_{syst} du système en fonction de $\Delta T_{pac} = T_{cond}^{in} - T_{evap}^{in}$ pour différentes températures de l'air T_{air} . Les ombres colorées correspondent aux incertitudes de mesures.

Le tableau 4 présente les valeurs des énergies et des différents critères du système complet pour les différents essais. L'énergie en entrée est de l'ordre de 140 kWh et celle en sortie de 130 kWh, donc les pertes thermiques sont de l'ordre de 10 kWh. De même, le rendement du système est de 0,92, donc le système subit peu de pertes thermiques. Par ailleurs, l'énergie thermique stockée dans le ballon est bien plus élevée que la consommation électrique, puisque l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des composants sont de 18 kWh, ce qui a permis de stocker 64 kWh dans le ballon d'ECS. En outre, le COP du système est de l'ordre de 3,5, donc l'énergie stockée est plus élevée que la consommation électrique du système.

Tableau 4 : Valeurs globales des critères énergétiques pour les essais expérimentaux.

Noms	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
COP_{pac} [-]	4,202	4,521	4,921	4,431	5,415
E_{in} [kWh]	93,55	121,1	140,9	123,2	155,9
E_{out} [kWh]	79,69	108,6	130,1	112,7	145,3
η_{syst} [-]	0,852	0,897	0,923	0,915	0,933
E_{stk} [kWh]	63,45	65,19	63,56	63,33	64,00
E_{elec} [kWh]	19,34	18,63	17,57	19,50	15,90
COP_{syst} [-]	3,281	3,499	3,618	3,248	4,024
Perte [kWh]	13,86	12,48	10,79	10,45	10,51

La variation du débit et de la température exerce une certaine influence sur les critères énergétiques du système. En effet, quand le débit augmente et la température de l'air croît, le rendement devient plus élevé. En effet, la quantité d'énergie thermique échangée dans la batterie de récupération est plus faible. De même, plus le débit est élevé et plus la température de l'air accroît, plus le COP augmente, car la performance de la PAC augmente quand la différence de température entre la source chaude et la source froide diminue.

4.2 Analyse exergetique

L'analyse est à présent effectuée par des bilans exergetiques du système complet pour les mêmes essais (voir tableau 1).

La figure 3 à gauche présente la variation du rendement exergetique du système varie pour différentes valeurs de débits d'air extrait et pour une température constante de 20 °C. La figure 3 à droite montre l'évolution temporelle de ce même rendement pour un débit constant de 2000 m³/h et trois températures d'air.

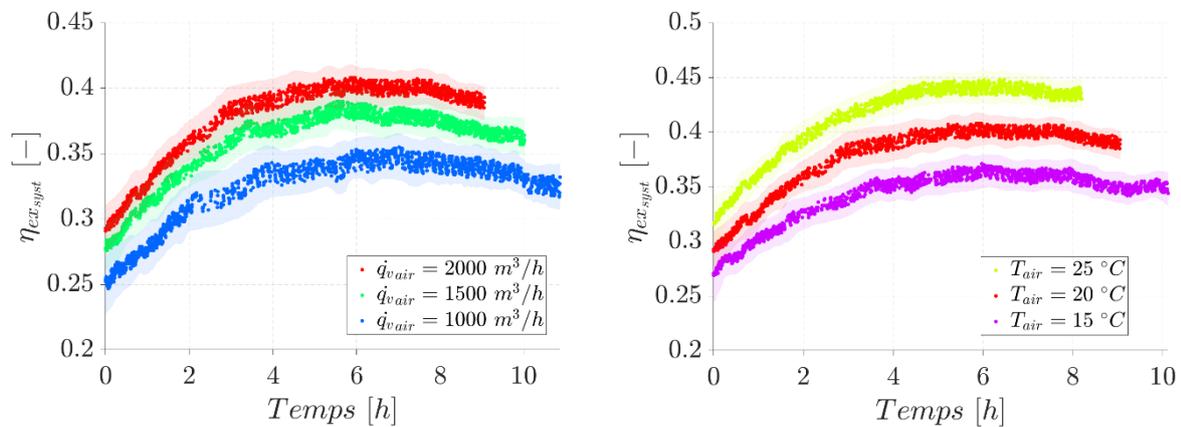


Figure 3 : Rendement exergetique global du système en fonction et du temps pour différents débits et températures d'air extrait. Les ombres colorées correspondent aux incertitudes de mesures.

Le tableau 5 regroupe les valeurs des exergies et du rendement exergetique pour le système complet pour les différents essais expérimentaux intégrés sur la période nécessaire pour que le système remplisse la même fonctionnalité, à savoir la même température finale d'eau chaude dans le ballon. La valeur de l'exergie est de l'ordre de 22 kWh en entrée et 8 kWh en sortie, ce qui correspond à une destruction d'exergie de 14 kWh. Le rendement exergetique du système est compris entre 32 % et 41 % soit une variation significative de 27 % pour les différentes valeurs de débits et de températures. Les composants qui subissent les plus fortes irréversibilités sont la pompe à chaleur, puis la batterie de récupération alors que l'échangeur de chaleur et le stockage d'ECS sont ceux qui en créent le moins.

Tableau 5 : Valeurs globales des critères exergetiques pour les différents essais.

Noms	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
$E_{ex\ in}$ [kWh]	21,95	22,25	21,93	22,31	21,97
$E_{ex\ out}$ [kWh]	7,179	8,039	8,361	7,694	9,162
$\eta_{ex\ syst}$ [-]	0,327	0,361	0,381	0,345	0,417
$E_{ex\ stk}$ [kWh]	7,010	7,324	7,006	6,994	7,013
$E_{ex\ elec}$ [kWh]	19,34	18,63	17,57	19,50	15,90
E_{des} [kWh]	14,78	14,22	13,57	14,61	12,81

Les valeurs moyennes ainsi que les valeurs instantanées montrent clairement que pour un débit donné, l'augmentation de la température accroît les valeurs des rendements et que pour une température donnée l'élévation du débit augmente les valeurs du rendement. L'analyse des rendements exergetiques au cours du temps semble proposer une valeur maximale. Celle-ci pourrait être due à deux effets antagonistes. En effet, comme on le voit sur la figure 2 le rendement énergétique diminue avec le temps. La température du système augmente au fur et à mesure du stockage entraînant celle des pertes avec le milieu ambiant. En parallèle, l'exergie stockée est « meilleure » puisque la chaleur stockée l'est à plus haute température.

5. Conclusion et perspectives

Dans cette étude, une analyse énergétique et exergetique a été appliquée à un système expérimental dédié à la production d'ECS. Ce système est constitué d'une pompe à chaleur, d'un stockage thermique et de deux échangeurs de chaleur. L'influence de la variation du débit et de la température de l'air extrait sur le système a été étudiée. Les critères d'évaluation sont le coefficient de performance, les rendements énergétiques et exergetiques. Les résultats de l'analyse montrent que les rendements sont plus élevés avec l'augmentation du débit et de la température de l'air extrait. Cependant, le système subit des fortes destruction d'exergie malgré des pertes thermiques relativement faibles. La pompe à chaleur est le composant qui est principalement responsable de la dégradation de la qualité de l'énergie.

Pour des futurs travaux, il serait intéressant de réaliser une procédure d'optimisation sur ce dispositif expérimental de production d'eau chaude sanitaire dans le but d'améliorer les rendements énergétiques et exergetiques du système en déterminant les valeurs optimales du débit et de la température d'air extrait. Cette approche permettrait de maximiser la récupération d'énergie et d'augmenter l'efficacité globale du système.

Références

- [1] E. Fuentes, L. Arce, 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.org/10.1016/j.rser.2017.05.229.
- [2] Ademe (2016). the domestic hot water, <https://expertises.ademe.fr/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/leau-chaude-sanitaire>, accessed 15 Juillet 2022.
- [3] Segond, Guillaume, 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 Tadriss, Lounès et Launay, Stéphane Energétique Aix-Marseille 2015, 2015AIXM4722, <http://www.theses.fr/2015AIXM4722>.
- [4] Arnaud Lapertot, Guillaume Segond, Thomas Fasquelle, Benjamin Kadoch, Olivier Le Métayer, Multi-criteria optimization of an experimental system for the production of domestic hot water, *Energy Conversion and Management*, 267 (2022) 115875, doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115875.
- [5] National Institute of Standards and Technology, 2022, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>, Accessed on 15 July 2022.