

Étude des performances d'un climatiseur individuel en climat tropical.

Performance study of a split system in tropical climate.

Étienne BILLARD¹, Thomas LE COCQ¹, Fabien PICGIRARD², Guillaume HOARAU³, Jean-François MARTIN¹, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES¹, Olivier MARC^{1*}

¹Laboratoire Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'environnement et le bâtiment (PIMENT) : Université de la Réunion, 15 Avenue René Cassin, Sainte-Clotilde 97715, La Réunion.

²ADEME : 3 avenue Théodore Drouhet, Le Port 97829, La Réunion.

³EDF Réunion : 14 rue de Sainte Anne, 97744, Saint-Denis MESSAG Cedex 9, La Réunion.

* (auteur correspondant : olivier.marc@univ-reunion.fr)

Résumé – L'île de La Réunion présente un contexte énergétique particulier dans la mesure où l'équilibre production – consommation se fait à l'échelle de l'île. La climatisation constituant 40% de la demande totale en électricité, il est intéressant d'identifier les climatiseurs individuels les moins énergivores et les plus adaptés au climat réunionnais. Une étude expérimentale est menée par le laboratoire PIMENT en collaboration avec EDF et l'ADEME afin de caractériser les performances de ces appareils. Cet article présente le banc expérimental avec lequel sont réalisés les essais, puis l'influence des conditions de fonctionnement sur les indicateurs de performances est analysée.

Mots-clés : Climatiseur individuel; Banc de test ; Energy Efficiency Ratio (EER); EER Saisonnier.

Abstract – Reunion Island has a particular energy context, the balance between production and consumption is achieved on the scale of the island. Air conditioning accounts for 40% of the total electricity demand, it is interesting to identify which individual air conditioners consume the least energy and are the most adapted to the climate of Reunion Island. An experimental study is carried out by the laboratory PIMENT in cooperation with EDF and ADEME in order to characterize the performance of these appliances. This article presents the experimental bench and the influence of the operating conditions on the performance indicators is analysed.

Keywords: Split system; Test bench; EER; SEER.

Nomenclature (11 points, 2 colonnes)

E	Energie électrique, J	<i>Indices</i>	
\dot{E}	Puissance électrique, W	a	air
h	Enthalpie, J.kg ⁻¹	CK	mode chauffage carter
\dot{m}	Débit massique kg.s ⁻¹	<i>design</i>	charge de conception
N	Nombre d'heure	e	évaporateur
Q	Energie thermique, J	f	fluide frigorigène
\dot{Q}	Flux de chaleur, W	in	entrée
<i>Abréviations</i>		j	indice de sommation
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i>	l	liquide
$ESEER$	<i>SEER en Europe</i>	OFF	mode arrêt
$RSEES$	<i>SEER à La Réunion</i>	ON	mode marche
$SEER$	<i>EER Saisonnier</i>	out	sortie
<i>Symboles grecs</i>		SB	mode veille
w	humidité spécifique, kg.kg ⁻¹	TO	mode arrêt par thermostat

1. Introduction.

L'île de La Réunion présente un contexte énergétique particulier, étant une zone non interconnectée, l'équilibre production – consommation se fait à l'échelle de l'île. Le secteur du bâtiment représente 80% de la consommation électrique dont la moitié pour la climatisation, qui est un des postes les plus énergivores de l'île. Le mix énergétique est très carboné (719 gCO₂/kWh électrique) car il est constitué à 69% d'énergies fossiles (fioul, charbon) et à 31% d'énergies renouvelables [1]. Face à ce constat, un projet visant à réduire la consommation électrique des systèmes de climatisation individuels sur l'île est mené par le laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion en partenariat avec EDF et l'ADEME. Pour cela une étude expérimentale a été lancée afin de déterminer les performances des systèmes de climatisation individuels du marché réunionnais. L'objectif final étant d'identifier les appareils les plus efficaces afin de favoriser leur émergence sur le territoire.

Cet article fait suite à une publication au congrès de la SFT 2020 [2], pour laquelle il était question de mesurer les performances des différents modèles de climatiseurs individuels en comparant leurs efficacités énergétiques saisonnières SEER (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*). Ce coefficient permet d'associer une classe énergétique à un système de climatisation, il est obtenu en pondérant des efficacités énergétiques EER (*Energy Efficiency Ratio*) avec un pourcentage d'utilisation selon les conditions de tests décrits par la norme NF EN 14511 [3]. Cependant, depuis la première publication, la norme a changé NF EN 14825 [4] et propose maintenant un post-traitement donnant des résultats plus précis, mais elle n'est pas représentative du climat réunionnais car elle ne tient pas compte de l'humidité et des températures plus élevées sur l'île. C'est pourquoi nous proposons d'adapter la norme au contexte local en modifiant le nombre d'heures d'utilisation du climatiseur selon les conditions climatiques réunionnaises, ainsi qu'en réalisant les tests en prenant en compte une humidité relative dans le bâtiment plus proche de la réalité.

Cet article présente dans un premier temps le banc d'essai ainsi que le protocole expérimental suivi pour réaliser les tests. Ensuite, l'influence de l'humidité relative sur le fonctionnement d'un système de climatisation est analysée. Enfin, l'effet du taux de charge et de la température extérieure sur l'efficacité du climatiseur est décrit et les SEER déclarés par les fabricants et ceux obtenus expérimentalement sont comparés.

2. Matériel et méthode

2.1. Banc expérimental

L'expérimentation consiste à tester le climatiseur en condition réelle de fonctionnement, pour cela les charges thermiques d'un bâtiment ainsi que des conditions climatiques réunionnaises sont simulées. Pour mener à bien ce projet, un banc de test a été conçu et installé à l'IUT de Saint-Pierre (Figure 1.a). Il est composé de deux enceintes adiabatiques mitoyennes où l'une reproduit le climat extérieur, et l'autre le bâtiment à climatiser. L'appareil étudié est installé entre les deux pièces, l'évaporateur dans celle simulant les charges du bâtiment (Figure 1.b) et l'unité extérieure (groupe de condensation) dans celle simulant les conditions climatiques (Figure 1.c).

L'enceinte simulant les conditions intérieures est contrôlée en température et en humidité par un aérotherme et un humidificateur vapeur. La chambre extérieure est contrôlée en température par un ventilo-convecteur alimenté par un groupe froid et un aérotherme. Ces appareils de contrôle sont asservis grâce à des sondes d'ambiance qui mesurent la température

et l'humidité relative dans les pièces. Un logiciel assure le suivi et la visualisation en temps réel des différentes variables (températures, humidités relatives, pressions, puissances ...), il sert aussi d'interface pour imposer des consignes aux appareils de contrôle.



Figure 1 : Banc d'essai : (a) vue globale des deux chambres climatiques, (b) unité intérieure du climatiseur instrumenté, (c) unité extérieure du climatiseur instrumenté

Le banc de test est équipé en instruments de mesure qui permettent le calcul des grandeurs utiles à la caractérisation des systèmes de climatisation étudiés. Il possède deux débitmètres Coriolis et des sondes de pression, placés en entrée et en sortie de l'évaporateur, servant à relever la température, la masse volumique, le débit massique et la pression du fluide frigorigène. Le tout permet de calculer, via la bibliothèque de propriété des fluides CoolProp [5], les enthalpies du fluide de travail en entrée et en sortie d'évaporateur. La puissance frigorifique calculée côté fluide frigorigène est donnée par la formule (1) :

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f (h_{f \text{ out}} - h_{f \text{ in}}) \quad (1)$$

La consommation électrique du split est relevée via un compteur de puissance, ainsi l'EER est calculé d'après la formule (2) :

$$EER = \frac{\text{Energie frigorifique produite}}{\text{Energie électrique consommée}} \quad (2)$$

En parallèle des mesures sur le fluide, des relevés sont aussi réalisés sur l'air grâce à des sondes de vitesse, de température et d'hygrométrie en entrée et en sortie d'évaporateur. Ces données permettent de calculer les enthalpies spécifiques, humidités spécifiques et débits volumiques. La puissance frigorifique calculée côté air est donnée par la formule (3) :

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a (h_{a \text{ in}} - h_{a \text{ out}} - h_{l \text{ out}}(\omega_{in} - \omega_{out})) \quad (3)$$

Dans la suite de l'article, les puissances frigorifiques présentées sont calculées uniquement du côté du fluide frigorigène.

2.2. Protocole expérimental et calcul du SEER

Le protocole expérimental s'appuie sur la norme NF EN 14825 [3].

Ratio de la charge partielle (%)	Température sèche de l'air extérieur(°C)	Température sèche (humide) de l'air intérieur (°C)	EER (-)
100	35	27 (19)	EER ₁
74	30	27 (19)	EER ₂
47	25	27 (19)	EER ₃
21	20	27 (19)	EER ₄

Tableau 1 : Conditions de charge partielle pour la norme NF EN 14825

La norme NF EN 14825 décrit la démarche nécessaire au calcul du SEER d'un système de climatisation individuel. Pour chaque température extérieure allant de 17°C à 40°C avec un pas de 1°C, un EER est attribué puis pondéré par un nombre d'heures d'utilisation de l'appareil. Quatre EER sont obtenus expérimentalement d'après les conditions présentées dans le Tableau 1, puis les efficacités restantes sont interpolées linéairement à partir des valeurs expérimentales.

Le SEER en mode actif ($SEER_{ON}$) est calculé d'après la formule suivante :

$$SEER_{ON} = \frac{\sum_{j=1}^n N_j \times \dot{Q}_e(T_j)}{\sum_{j=1}^n N_j \times \frac{\dot{Q}_e(T_j)}{EER(T_j)}} \quad (4)$$

Finalement, afin de prendre en compte le fonctionnement en mode veille, arrêt par thermostat, arrêt et chauffage de carter, le SEER est obtenu selon la formule 5 :

$$SEER = \frac{\dot{Q}_{design} \times N_{ON}}{\frac{\dot{Q}_e}{SEER_{ON}} + \dot{E}_{TO} \times N_{TO} + \dot{E}_{SB} \times N_{SB} + \dot{E}_{CK} \times N_{CK} + \dot{E}_{OFF} \times N_{OFF}} \quad (5)$$

D'après la norme NF EN 14825, le SEER est donc calculé grâce aux tests à charges partielles en pondérant les EER obtenus expérimentalement avec le nombre d'heures d'utilisation du climatiseur pour une température extérieure associée. L'analyse du climat Réunionnais montre des différences notables entre les heures d'utilisation données par la norme et celles rencontrées localement. A l'image du calcul du SCOP pour les pompes à chaleur qui tient compte de l'hétérogénéité des climats européens, nous avons choisi de prendre en compte le type d'usage selon que le climatiseur est utilisé en mode résidentiel ou en mode tertiaire.

De plus, les conditions intérieures de l'air imposées par la norme à savoir 27°C de température sèche et 19°C de température humide conduisent à une humidité relative de 50% (de type « climat sec »). Nous avons constaté que dans ce cas les climatiseurs testées ne produisent pas de condensats. Afin de se rapprocher des conditions climatiques réunionnaises, nous avons choisi de modifier les paramètres intérieurs de l'air en imposant une température sèche de 27°C et une humidité relative de 65% plus proche de la réalité (de type « climat humide »). Dans ce cas, les climatiseurs testées produisent des condensats.

Enfin, pour qualifier la performance de ces climatiseurs et afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement et reproduire le comportement d'un usager, nous avons choisi de ne pas interagir avec le climatiseur autrement qu'en imposant la température de consigne via la télécommande. En effet, les tests effectués à charge partielle selon la norme NF EN 14825 et conduisant aux SEER affichés par les constructeurs sont réalisés en fixant la fréquence du courant alimentant le compresseur et donc en s'affranchissant complètement de la régulation du système de climatisation ce qui n'est pas représentatif de la réalité [6, 7].

En résumé, pour étudier les performances du climatiseur nous allons faire varier les paramètres suivants :

- Le taux de charge : 21%, 47%, 74%, 100% de la charge nominale du climatiseur.
- La température extérieure : 20°C, 25°C, 30°C, 35°C.
- L'humidité relative : 50% (« climat sec ») et 65% (« climat humide »).

3. Résultats

Le système de climatisation étudié dans cet article est un modèle de classe énergétique A+++ (SEER = 8,6), réversible, doté de la technologie inverter et d'une puissance nominale 2 kW.

3.1. Influence de l'humidité relative intérieure sur l'efficacité du climatiseur

Le climat tropical de La Réunion étant plus humide qu'en Europe, il est donc pertinent d'évaluer l'effet de l'humidité relative sur le fonctionnement d'un système de climatisation. D'après Setyawan et al. [8], l'impact de la variation de l'hygrométrie extérieure sur le fonctionnement du condenseur est très faible, nous nous intéressons alors uniquement à étudier l'influence de l'humidité relative intérieure sur les performances du climatiseur.

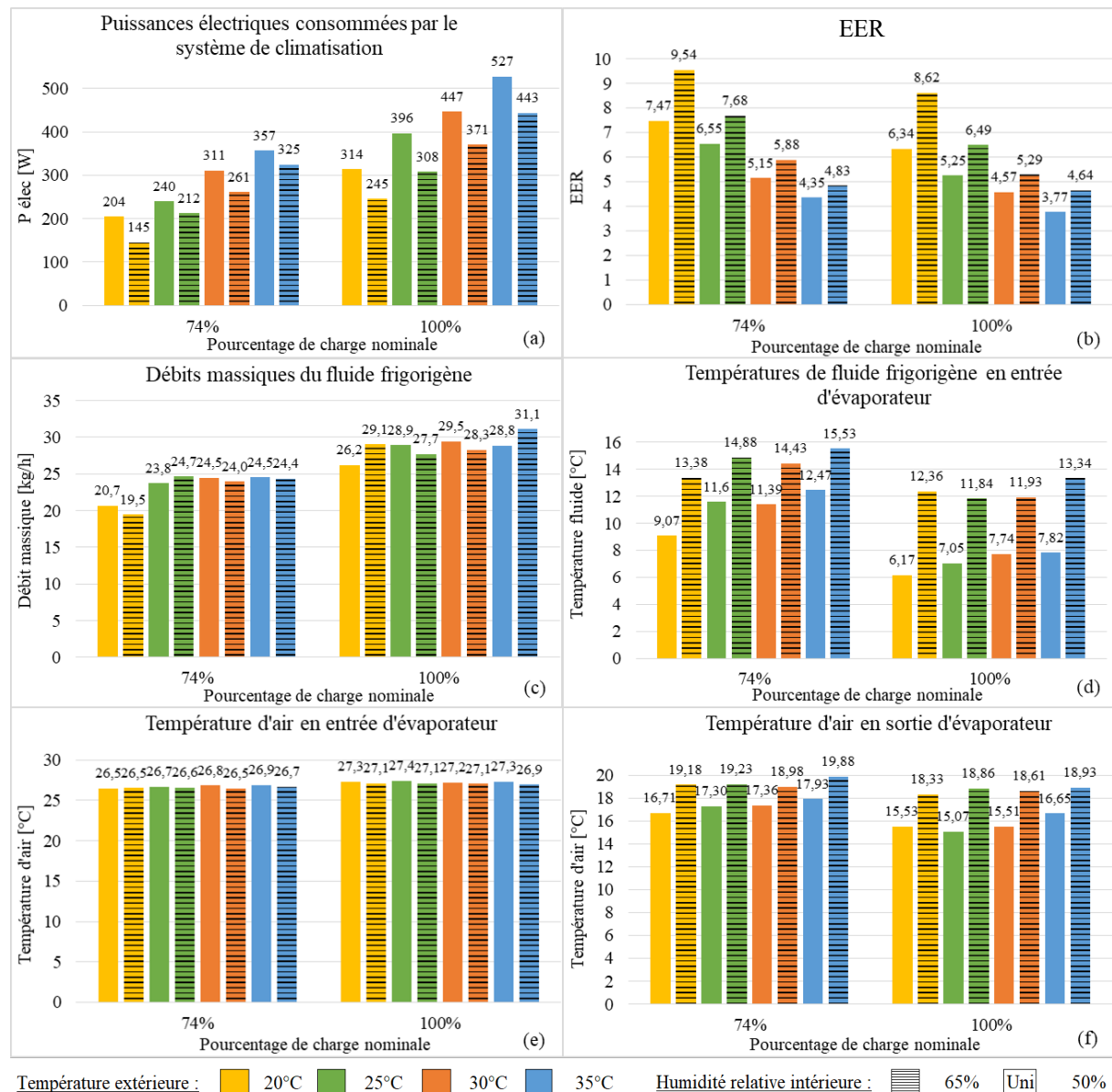


Figure 2 : Évolution des puissances électriques (a), des EER (b), des débits massiques du fluide (c), des températures du fluide (d), des températures d'air en entrée (e) et en sortie (f) de l'évaporateur.

La Figure 2 présente l'évolution des puissances électriques, des EER, des principaux paramètres du fluide frigorigène et de l'air au cours de 16 tests correspondant à 2 taux de charge

(74% soit 1,5 kW et 100% soit 2 kW), 4 températures extérieures (20°C, 25°C, 30°C, 35°C) et 2 humidités relatives intérieures ($HR_{int} = 50\%$, $HR_{int} = 65\%$).

D'après la Figure 2.a, le système consomme moins d'électricité lorsque l'humidité relative est plus élevée (à 65%), ainsi à puissance frigorifique constante, les EER sont supérieurs (Figure 2.b). De plus, le débit massique de fluide frigorigène ne varie pas en fonction de l'humidité relative (Figure 2.c) alors que sa température à l'entrée de l'évaporateur augmente sensiblement avec celle-ci (Figure 2.d). La température de l'air en entrée d'évaporateur quant à elle ne varie pas au cours des différents tests, elle est égale à la température de consigne de $27^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, alors qu'en sortie d'évaporateur la température d'air est plus élevée lorsque l'humidité relative l'est aussi. Ceci vient du fait que le froid produit par l'évaporateur sert en partie à condenser la vapeur d'eau présente dans l'air et donc le refroidit moins. Cela a pour conséquence d'augmenter la pression d'évaporation et probablement de diminuer le taux de compression, en considérant que la haute pression reste inchangée. Ainsi le climatiseur consomme moins d'électricité pour produire la même puissance frigorifique et donc son EER est supérieur lorsque l'humidité relative augmente. Il est à noter que la haute pression n'étant pour le moment pas instrumentée, cette question reste encore à l'étude.

3.2. Tests à charge partielle et calcul du SEER

La Figure 3 présente les évolutions des puissances électriques et les EER pour les 4 taux de charge (21%, 47%, 74% et 100%), les 4 températures extérieures (20°C, 25°C, 30°C et 35°C) et pour 2 humidités relatives intérieures ($HR_{int} = 50\%$, $HR_{int} = 65\%$).

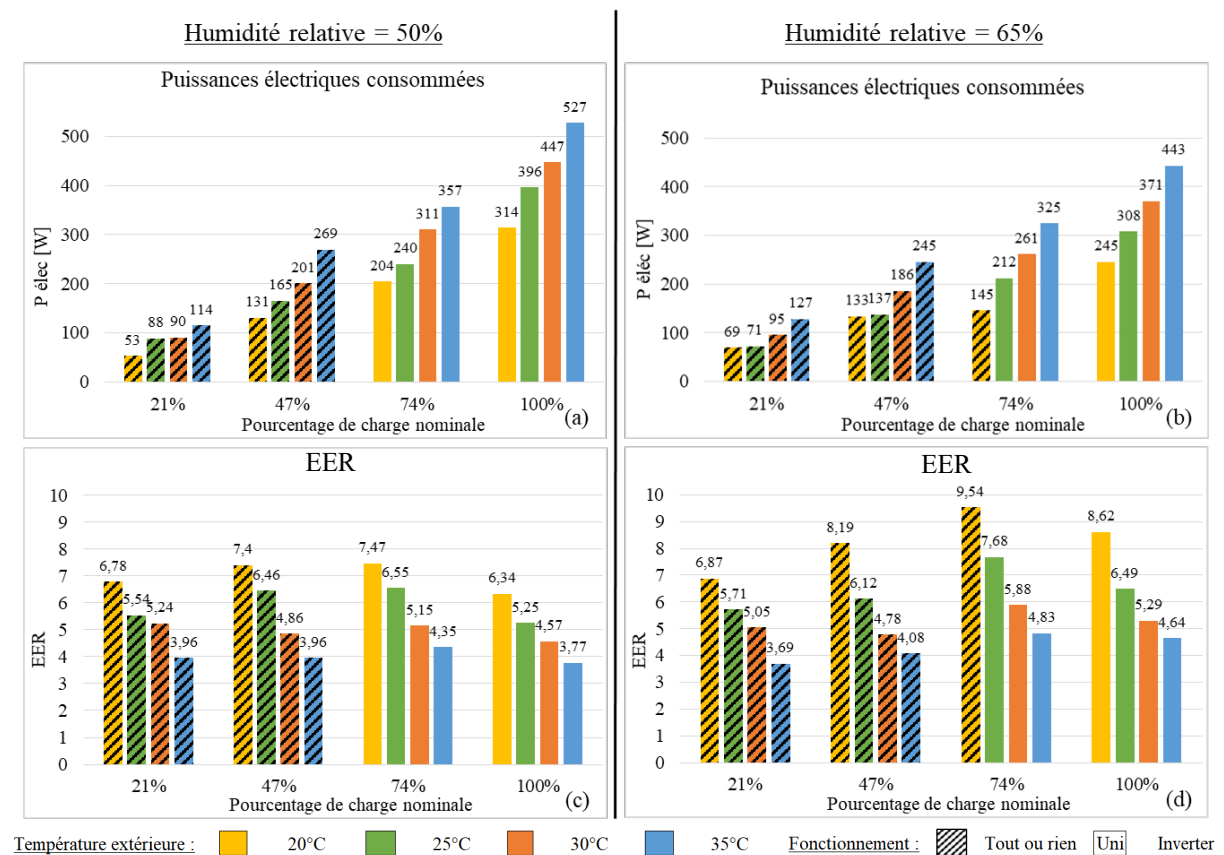


Figure 3 : Évolution de la puissance électrique consommée et de l'EER à charge partielle pour 2 humidités relatives intérieures ($HR_{int} = 50\%$, $HR_{int} = 65\%$)

A température extérieure constante, la consommation électrique du système de climatisation augmente avec la puissance frigorifique et à charge constante, cette même consommation électrique augmente avec la température de l'air extérieur (Figure 3.a et 3.b). Ces résultats ne sont pas surprenants et reflètent le fonctionnement classique d'une pompe à chaleur. En revanche, l'évolution de l'EER en fonction du taux de charge n'est pas monotone contrairement à la puissance électrique consommée, mais passe par un maximum situé entre 50% et 100% de la charge nominale. Ces résultats ont été observés dans des précédents travaux et sont typiques des climatiseurs de type inverter où les performances de ces systèmes ne sont pas maximales à charge nominale [7, 9]. En outre, les consommations électriques sont moins élevées, et les EER meilleurs lorsque les tests sont réalisés avec une humidité relative plus importante comme expliqué précédemment. De plus, le mode de fonctionnement du climatiseur varie selon le taux de charge et passe d'un mode de type inverter, à taux de charge élevé, avec une variation fine de l'alimentation électrique des différents composants (compresseur et ventilateur du condenseur) à un mode de type tout ou rien lorsque le taux de charge est plus faible. En effet, le variateur de fréquence permettant de moduler les vitesses de rotation du compresseur et du ventilateur du condenseur et donc la puissance frigorifique produite, atteint son seuil bas à environ 50% de sa fréquence nominale. En dessous de ce seuil (à faible fréquence) ce type de fonctionnement n'est plus efficace car le rendement du moteur chute considérablement [10], le mode tout ou rien est alors activé.

À partir des résultats expérimentaux de la Figure 3 nous pouvons calculer le SEER du climatiseur individuel. Comme expliqué précédemment (partie 2.2. Protocole expérimental), la norme NF EN 14825 a été adaptée au contexte local et prend en compte le climat réunionnais en modifiant à la fois l'humidité relative dans l'enceinte intérieure ainsi que les heures d'utilisation du climatiseur en fonction de la température extérieure pour deux usages tertiaire et résidentiel :

- l'usage de type tertiaire : le climatiseur est allumé entre 8h et 20h tous les jours sauf le week-end, 45 semaines par an (en enlevant juillet et août).
- l'usage de type résidentiel : le climatiseur est allumé entre 21h et 5h tous les jours et entre 12h et 15h le week-end, 45 semaines par an (en enlevant juillet et août).

De plus, afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement, nous interagissons avec le climatiseur en imposant la température de consigne via la télécommande. Le système de régulation est donc pris en compte.

Tous ces éléments conduisent aux résultats présentés dans le Tableau 2 :

ESEER fabricant	ESEER adapté	RSEER Tertiaire	RSEER Résidentiel
8,6	5,28	5,36	5,54

Tableau 2 : Comparaison des SEER donnés par le fabricant et mesurés sur le banc de test

Le Tableau 2 présente l'ESEER donné par le fabricant et correspondant à l'étiquette énergétique A+++ . L'ESEER adapté correspond aux tests issus de la norme NF EN 14825 pour un climat européen (sec) et prend en compte la régulation du climatiseur. Il est à noter que l'intégration de la régulation dans la mesure des performances du système fait chuter la valeur du ESEER d'environ 3,3 points. Les valeurs affichées par le constructeur sont donc largement surestimées par rapport aux mesures réalisées dans des conditions réelles d'utilisation. En plus de la régulation du climatiseur, les RSEER tertiaire et résidentiel prennent en compte les conditions climatiques réunionnaises (températures extérieures et humidité relative intérieure plus élevées). Les résultats montrent que les valeurs des RSEER tertiaire et résidentiel sont

supérieures au ESEER adapté du fait d'une humidité relative plus élevée. Enfin, le RSEER résidentiel est supérieur à celui du tertiaire car il correspond à un fonctionnement de nuit où les températures extérieures sont plus faibles donc le système est plus efficace dans ces conditions.

Conclusion/Perspectives

La campagne d'étude expérimentale d'un système de climatisation individuel menée sur un banc de test composé de deux enceintes aux conditions contrôlées, a permis d'analyser et d'expliquer l'influence des conditions de fonctionnement sur le comportement d'un appareil. Les résultats montrent qu'à conditions de température extérieure et de puissance frigorifique identiques l'EER augmente avec l'humidité relative intérieure car la température d'évaporation est plus élevée et donc potentiellement le taux de compression est plus faible, entraînant une baisse de la consommation électrique. De plus, les résultats obtenus montrent que l'EER passe par un maximum pour un taux de charge compris entre 50% et 100%. Enfin, les SEER mesurés sur le banc de test sont éloignés de celui affiché par le constructeur, du fait de la prise en compte à la fois du climat réunionnais et des conditions réelles d'utilisation du climatiseur.

Références

- [1] Horizon Réunion, Bilan énergétique de la Réunion 2019, ed. 2020. <https://energies-reunion.com/nos-actions/observation/ber-2019-edition-2020/> (site consulté le 12/01/2021).
- [2] O. Marc, E. Dedriche, J-F. Martin, T. Le Cocq, J. Castaing-Lasvignottes. Détermination expérimentale des indicateurs de performance des systèmes de climatisation individuels en environnements contrôlés, *Congrès français de thermique* (2020), https://www.sft.asso.fr/DOEditions/CFT2020/PDF/16_doi.pdf.
- [3] Norme Afnor NF EN 14511, https://cobaz.afnor.org/notice/norme/nf-en-14511-2/FA179950?rechercheID=977323&searchIndex=1&activeTab=all#id_lang_1_descripteur, (site consulté le 19/01/2021).
- [4] Norme Afnor NF EN 14825, <https://cobaz.afnor.org/viewer-docs?urn=FA187180&type=norme&cleID=8930896> (site consulté le 19/01/2021).
- [5] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, V. Lemort, Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, (2014).
- [6] S. P. Mavuri, Field behaviour of inverter air conditioners effect on seasonal performance, *International journal of application or innovation in engineering and management*, 4 (2015), 18-25.
- [7] C. Palkowski, S. Von Schwarzenberg, A. Simo, Seasonal cooling performance of air conditioners: the importance of independent test procedures used for MEPS and labels, *International Journal of Refrigeration*, 104 (2019), 417-425.
- [8] A. Setyawan, A. Badarudin, Performance of a residential air conditioning unit under constant outdoor air temperature and varied relative humidity, *Materials Science and Engineering*, 830 (2020).
- [9] D. Zhang, X. Zhang, J. Liu, Experimental study of performance of digital variable multiple air conditioning system under part load conditions, *Energy and buildings*, 43 (2011), 1175-1178.
- [10] N. Grech, M. Farrugia, Experimental investigation on variable speed operation of air conditioning, *9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics* (Malta, 16 – 18 July, 2012).

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à l'ADEME et EDF Réunion pour le financement du banc d'essai.