

Détermination expérimentale des indicateurs de performance des systèmes de climatisation individuels en environnements contrôlés.

Olivier MARC*, Emmanuel DEDRICHE, Jean-François MARTIN, Thomas LE COCQ, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES.

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

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

Résumé - À La Réunion la climatisation représente environ 40 % de la consommation électrique globale de l'île. Les systèmes de climatisations individuels, qui représentent une grande majorité des climatisations installées, sont le plus souvent surdimensionnés par rapport aux besoins réels des utilisateurs. La question se pose donc quant à la pertinence d'utiliser des modèles avec une puissance nominale moins importante qui fonctionnerait à charge nominale plutôt qu'un modèle surdimensionné fonctionnant à charge partielle. Afin de mesurer et limiter l'impact de la consommation électrique due à la climatisation, un banc de test a été mis en place de telle sorte à caractériser les différents modèles présents sur le marché réunionnais. Il s'agit de privilégier l'émergence des modèles les plus performants et ainsi limiter la surconsommation électrique qu'engendraient les modèles les moins efficaces. Ce papier présente dans un premier temps le banc de test simulant les besoins thermiques d'un bâtiment d'un côté et les conditions climatiques réunionnaises de l'autre. Les résultats expérimentaux de quatre modèles de climatiseurs, testés sur ce banc, sont ensuite présentés et une comparaison des coefficients de performance EER (Energy Efficiency Ratio) est réalisée pour différents niveaux de charge.

Mots-clés : Climatiseurs individuels, banc de test, charge partielle, Energy Efficiency Ratio.

Abstract - In Reunion Island, air conditioning accounts for about 40% of the island's global electricity consumption. Split systems, which account for a large majority of air-conditioning systems installed in Reunion Island, are most often oversized in relation to the real needs of users. The question therefore arises as to the relevance of using models with a lower power rating that would operate at nominal load rather than an oversized model operating at partial load. In order to measure and limit the impact of electricity consumption due to air conditioning systems, a test bench has been set up so as to characterize the different models available on the Reunion Island market. The aim is to favor the emergence of the most efficient models and thus limit the overconsumption of electricity generated by the least efficient models. First, this paper presents the test bench which simulating thermal needs of a building on the one hand and climatic conditions of Reunion Island on the other hand. The experimental results of four air conditioners, tested on this test bench, are then presented and a comparison of Energy Efficiency Ratio (EER) is carried on for different load levels.

Keywords: Split system, test bench, part load, Energy Efficiency Ratio.

Nomenclature

EER	Energy Efficiency Ratio (Coefficient de performance)
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio (Coefficient de performance saisonnier européen)
RSEER	Reunion Seasonal Energy Efficiency Ratio (Coefficient de performance saisonnier réunionnais)
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
ζ	temps de fonctionnement [-]

1. Introduction

À La Réunion, le secteur du bâtiment représente 85 % de la demande en électricité et la climatisation 50 % de la consommation du bâtiment [1]. Par conséquent, les systèmes de climatisation consomment une part importante de l'électricité produite et avec un impact fort sur l'environnement. Dans le but de caractériser les performances des systèmes de climatisation individuels en climat tropical et en partenariat avec l'IUT, EDF Réunion et l'ADEME, un banc expérimental a été mis en place afin de reproduire à la fois les conditions climatiques de La Réunion et le besoin d'un bâtiment [2]. Il comporte deux enceintes d'environ 30 m³ contrôlées en température et en humidité relative par plusieurs systèmes. La climatisation à tester est installée à l'interface de ces deux zones climatiques et est soumise à la fois à plusieurs niveaux de températures extérieures (25, 30 et 35°C) et à différentes charges dans le bâtiment (1 kW, 1,5 kW, 2 kW et 2,5 kW).

Ce papier présente dans un premier temps le banc de test et ses différents systèmes énergétiques, son instrumentation et sa régulation. Les résultats expérimentaux sont ensuite exposés et analysés pour quatre modèles de climatiseur : un 7000 BTU/h en A+++, deux 9000 BTU/h en A++ et un 9000 BTU/h sans étiquette énergétique (modèle vétuste d'une dizaine d'années). L'imposition des charges thermiques du bâtiment permet en particulier de faire fonctionner les groupes à charge partielle et de comparer l'évolution du EER (Energy Efficiency Ratio) selon les cas, par la mesure de la puissance électrique absorbée par le climatiseur et la puissance frigorifique délivrée par l'évaporateur.

2. Banc expérimental

2.1 Moyens

Le banc de test, composé de deux enceintes aux conditions maîtrisées (Figure 1), a été dimensionné, monté, instrumenté, mis au point et utilisé afin de caractériser les performances de climatiseurs individuels. L'enceinte simulant les conditions intérieures est contrôlée en humidité et en température à l'aide d'un aérotherme et d'un humidificateur vapeur. L'environnement extérieur est contrôlé en température par le couplage d'un ventilateur-convecteur alimenté par un groupe de froid et d'un aérotherme pour la chaleur. Le split à tester se situe à l'interface et est constitué de son unité intérieure placée dans les habitations (Figure 1c) et contenant exclusivement l'évaporateur muni de son ventilateur et de son unité extérieure (Figure 1b) composée du compresseur ainsi que du condenseur et de son ventilateur.



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

Chaque enceinte est dotée d'une sonde d'ambiance qui sert à mesurer la température et l'humidité relative et à réguler les conditions de l'air dans les volumes correspondants. Plusieurs autres sondes permettent de mesurer la température, l'humidité relative et la vitesse en entrée et en sortie de l'unité extérieure et en sortie de l'unité intérieure du split. Il y a comme ceci, trois capteurs température/humidité à l'entrée d'air de l'évaporateur, trois à la sortie de

l'évaporateur et trois à la sortie du condenseur. Il est donc possible de calculer les propriétés thermodynamiques de l'air en entrée et en sortie de l'évaporateur, notamment les enthalpies spécifiques. Les sondes de vitesse permettent de mesurer la vitesse de sortie de l'air au niveau des unités extérieures et intérieures du split. Combinées avec les sondes de température et d'humidité, elles permettent de calculer la puissance frigorifique. En parallèle de ces mesures sur l'air, plusieurs capteurs concernent le fluide frigorigène. Ainsi, deux débitmètres Coriolis (Figure 1b) ont été placés en entrée et en sortie d'évaporateur et permettent de mesurer :

- La température du fluide frigorigène circulant dans le split (entrée et sortie),
- Les masses volumiques du fluide frigorigène (entrée et sortie),
- Les débits massiques du fluide frigorigène (entrée et sortie).

Deux sondes de pressions (Figure 1b), placées elles aussi en entrée et en sortie d'évaporateur permettent, couplées aux informations précédentes, de calculer les enthalpies d'entrée et de sortie du fluide frigorigène qui circule dans le split (au moyen de la bibliothèque de propriété des fluides CoolProp [3]) et d'en déduire la puissance frigorifique correspondante. Ainsi, pour réaliser l'ensemble des mesures, un nombre important de ces capteurs ont été installés :

- 11 sondes de Température/Humidité relative et 4 capteurs de vitesses pour réaliser l'ensemble des mesures sur l'air (entrée/sortie du condenseur et de l'évaporateur),
- 2 débitmètres Coriolis qui permettent de mesurer à la fois la température, la densité et le débit massique du fluide frigorigène à l'entrée et à la sortie de l'évaporateur, ainsi que 2 sondes de pressions pour compléter les mesures sur le fluide frigorigène,
- 4 compteurs de puissance électrique pour réaliser l'ensemble des mesures de puissance électrique absorbées par les différents appareils,

Un automate de contrôle permet de réguler en temps réel les conditions dans les enceintes intérieures et extérieures, d'acquérir toutes les données expérimentales de chaque capteur à intervalle de temps régulier (10 s) et assure la visualisation et le stockage des données.

2.2 Protocole expérimental

La façon dont sont évaluées les performances des climatiseurs s'appuie sur la norme européenne EUROVENT [4, 5, 6] en l'adaptant pour le climat tropical de La Réunion :

- Les climatiseurs sont testés pour une température de consigne de 27°C à différentes charges (1 kW, 1,5 kW, 2 kW et 2,5 kW),
- Les climatiseurs sont testés pour différentes températures extérieures (35°C, 30°C et 25°C),
- Les coefficients de performances EER (Energy Efficiency Ratio) correspondants sont évalués pour chaque test (équation 1). Le ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) est ensuite calculé selon l'équation 2 au moyen des coefficients de pondération issus du tableau 1.

RSEER (Réunion Seasonal Energy Efficiency Ratio)				
Charge	Température Extérieure (°C)	Temps de fonctionnement (%) (EUROVENT)	Temps de fonctionnement (%) (La Réunion)	Efficacité Énergétique
100 %	35	$\zeta_{E1}=3\%$	$\zeta_{R1}=2\%$	EER ₁
75 %	30	$\zeta_{E2}=33\%$	$\zeta_{R2}=41\%$	EER ₂
50 %	25	$\zeta_{E3}=41\%$	$\zeta_{R3}=57\%$	EER ₃
25 %	20	$\zeta_{E4}=23\%$	$\zeta_{R4}=0\%$	EER ₄

Tableau 1 : Tableau des coefficients de pondération nécessaires au calcul du SEER

$$EER = \frac{\text{Energie frigorifique produite}}{\text{Energie electrique consommee}} \quad (1)$$

$$ESEER = \sum_{i=1}^4 \zeta_{Ei} \cdot EER_i \quad (2)$$

Cependant il est évident que ce ESEER, plutôt adapté aux climats secs et tempérés, n'est pas représentatif des conditions tropicales. Aussi, l'analyse des données météorologiques a été réalisée sur une année moyenne, basée sur dix ans de données enregistrées sur le site de Saint-Pierre, et a permis de définir le RSEER (Réunion Seasonal Energy Efficiency Ratio) grâce à un nouveau jeu de données de pondération (Tableau 1).

Préalablement à chaque test, la consigne de température de l'enceinte extérieure est fixée (35°C, 30°C ou 25°C) et une charge thermique (1 kW, 1,5 kW, 2 kW et 2,5 kW) est appliquée à l'aérotherme situé dans l'enceinte intérieure. La température de consigne est alors sélectionnée sur le climatiseur. Atteindre un régime permanent ou périodiquement stable requiert ensuite quelques heures.

Pour obtenir l'ensemble des résultats présentés ci-dessous, 42 essais d'environ une demi-journée chacun ont été réalisés. À charge partielle, particulièrement les plus faibles, il est difficile de forcer le climatiseur à maintenir la puissance frigorifique désirée, ce qui a pour effet de rallonger les expérimentations afin d'obtenir des résultats satisfaisants en termes de répétabilité et reproductibilité. La partie suivante détaille un climatiseur en particulier avant de présenter l'ensemble des résultats.

3. Résultats

3.1 Analyse du climatiseur GSS 9000 BTU/h

Pour ce test, la consigne du climatiseur est fixée à 27°C, l'enceinte extérieure est soumise à une température de consigne de 35°C et l'aérotherme intérieur est réglé afin de délivrer une charge calorifique de 1 kW. Les résultats présentés concernent uniquement la dernière heure et demi correspondant à une évolution tendant vers un régime périodiquement stable.

La figure 2a représente la température et l'humidité relative dans l'enceinte extérieure. On peut noter que la température ambiante de l'enceinte extérieure oscille périodiquement autour de 34°C avec un écart maximum à cette température de ± 1 C. Les figures 2b, 2c et 2d représentent respectivement la température ambiante et l'humidité relative de l'enceinte intérieure, la puissance électrique instantanée consommée et la puissance frigorifique instantanée produite par le climatiseur calculé sur l'air (en rouge) et sur le fluide frigorigène (en noir). Ces différents graphiques sont corrélés : quand le climatiseur consomme de l'électricité, il produit une puissance frigorifique qui de ce fait compense l'apport de chaleur de l'aérotherme intérieur. Quand le climatiseur a une puissance frigorifique nulle, il consomme peu d'électricité et la température de l'enceinte intérieure augmente, car l'aérotherme apporte de la chaleur à l'enceinte intérieure. Le climatiseur n'a pas une consommation nulle car, le ventilateur de l'évaporateur reste en permanence allumé.

Par la suite, on s'intéresse à une période de fonctionnement, délimitée par les séparations (en pointillés rouges) sur les figures, correspondant à une évolution périodiquement stable.

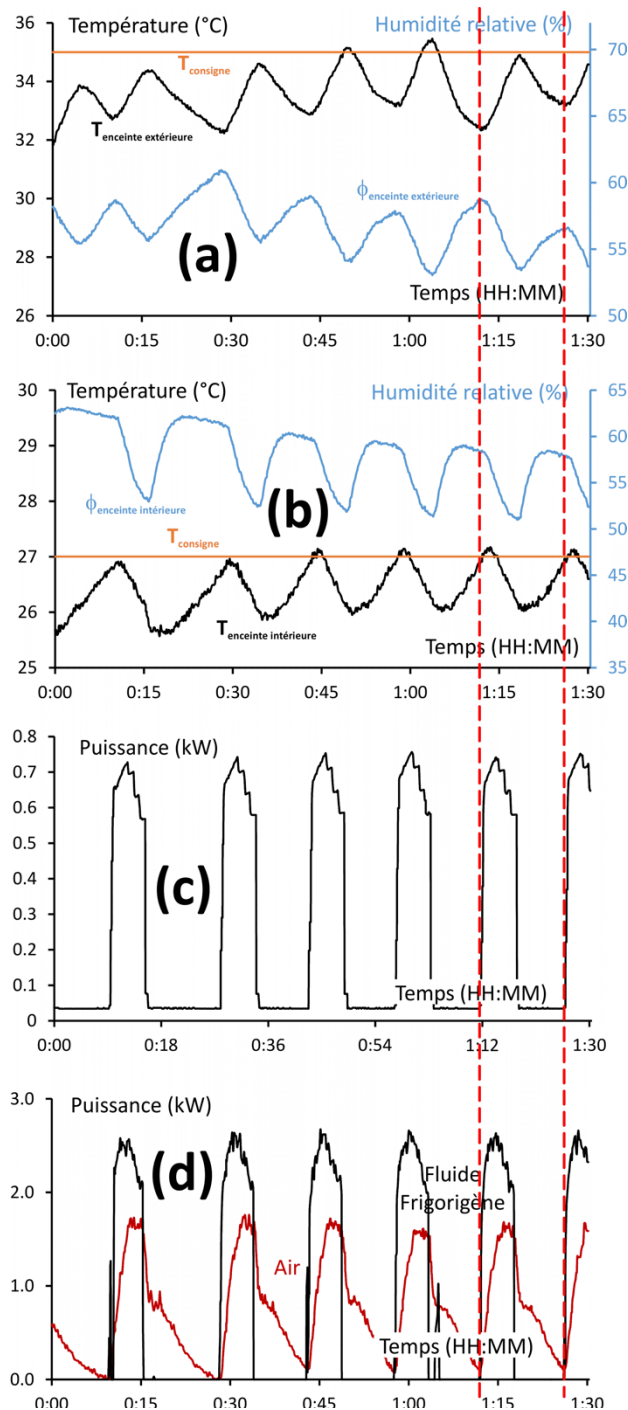


Figure 2 : Résultats d'une séquence périodiquement stable pour un split de 9000 BTU/h :
 (a) : Température et humidité des conditions extérieures, (b) : Température et humidité des conditions intérieures, (c) : Puissance électrique consommée par le split, (d) : Puissance frigorifique produite.

Sur ce point de mesure et après intégration des évolutions de puissance, le climatiseur produit 0,207 kWh de froid calculé sur le fluide contre 0,195 kWh calculé sur l'air et absorbe une énergie électrique de 0,068 kWh ce qui nous permet de calculer l'EER sur le fluide frigorigène et l'air qui sont respectivement de 3,05 et 2,87. Étant donné que les sondes de vitesses sont trop imprécises à basses vitesses, seuls les résultats sur le fluide frigorigène seront exploités dans les parties suivantes.

3.2 Synthèse

Durant la période d'essai, plusieurs climatiseurs individuels ont été testés :

- Deux modèles récents de marque Hitachi et GSS et de puissance 9000 BTU/h,
- Un modèle récent de marque Hitachi et de puissance 7000 BTU/h,
- Un modèle vétuste (2010) de marque Westpoint et de puissance 9000 BTU/h.

Les principales caractéristiques des climatiseurs sont synthétisées dans le tableau 2 :

Marque	HITACHI	HITACHI	GSS	Westpoint
Modèle	RAC-18WPD	RAC-25WED	Hi-wall 9K DCI	WSM-09.LHE
Fluide	R32	R32	R32	R410A
Charge de fluide (kg)	0.870	0.530	0.600	0.920
Puissance (BTU/h)	7000	9000	9000	9000
Puissance (kW)	2.0	2.5	2.5	2.5
$P_{\text{élec, max}}$ (W)	870	1200	1500	1200
Classe	A+++	A++	A++	n.a.
SEER	8.5	6.1	6.1	n.a.
kWh/an	82	143	143	n.a.

Tableau 2 : Synthèse des modèles de climatiseurs testés et principales caractéristiques.

Afin de comparer les différents modèles testés, la partie suivante présente l'analyse des différents splits pour différentes conditions de fonctionnement. La figure 3 représente l'évolution de l'EER et de la puissance frigorifique mesurée des différents modèles testés pour une charge de 2,5 kW (a); 2 kW (b) ; 1,5 kW (c) et 1 kW (d) et pour des températures extérieures de 25°C, 30°C et 35°C. On peut voir sur la figure 3a que, à 100 % de leur charge, le premier 9000 BTU/h testé (HITACHI) à des performances relativement similaires au climatiseur vétuste (Westpoint). On peut aussi remarquer que le second climatiseur 9000 BTU/h (GSS) a des performances bien supérieures aux deux autres climatiseurs. Il est ainsi jusqu'à environ deux fois plus efficace que le climatiseur vétuste pour produire la même quantité de froid.

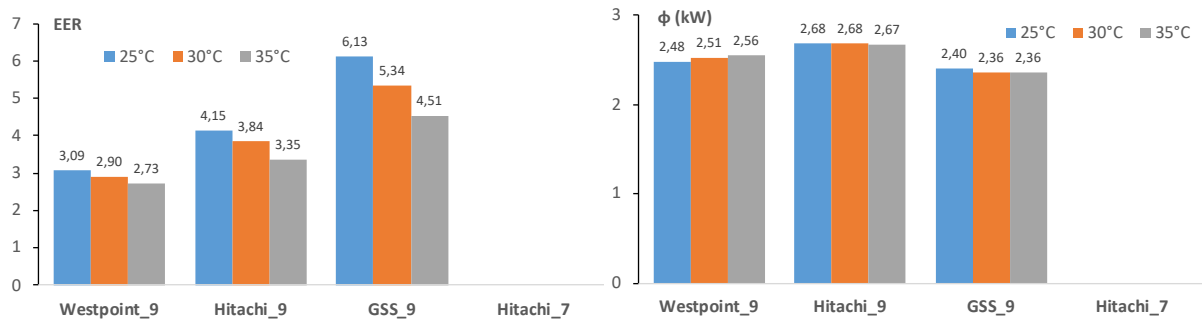
Sur la figure 3b, on observe une dégradation des performances du climatiseur vétuste. Celui-ci, n'étant pas de type inverter comme les trois autres, ses performances à charges partielles sont inférieures à celles à charge nominale. À cette charge (2 kW), c'est toujours le GSS 9000 BTU/h qui possède les meilleures performances, suivi par le climatiseur HITACHI 7000 BTU/h qui est environ 6% à 14% moins performant, bien que situé sur son point nominal. Le HITACHI 9000 BTU/h fonctionnant à 80 %, se situe quant à lui en troisième position.

Sur la figure 3c (1.5 kW), on remarque que le climatiseur HITACHI 7000 BTU/h (à 75 %) a des performances similaires au GSS 9000 BTU/h à 60 %. Le climatiseur vétuste est jusqu'à environ 3 fois moins performant que ces derniers.

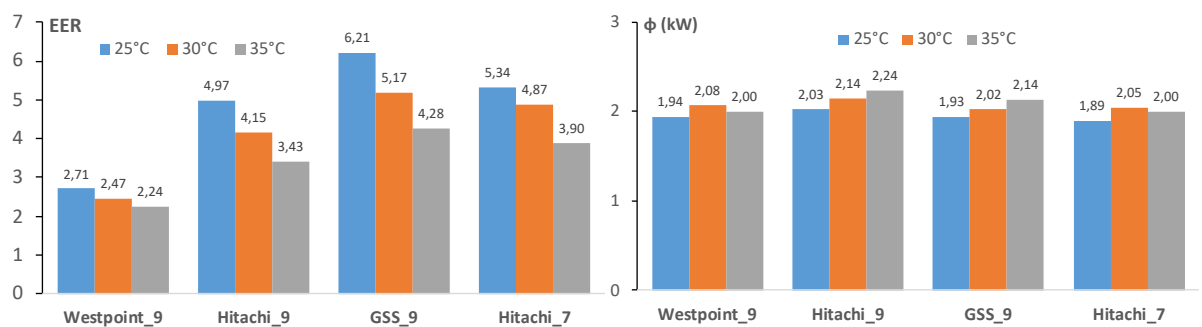
Sur la figure 4d (1 kW), on peut voir que le climatiseur HITACHI 7000 BTU/h (à 50 %) à des performances comprises entre les deux climatiseurs 9000 BTU/h (à 40 %). Le modèle vétuste fonctionne toujours avec des performances jusqu'à trois fois moindres par rapport aux autres climatiseurs.

D'une manière générale, le climatiseur GSS 9000 BTU/h fonctionne mieux pour toutes les charges testées, à l'exception de la charge 1kW où le HITACHI 9000 BTU/h fonctionne le plus

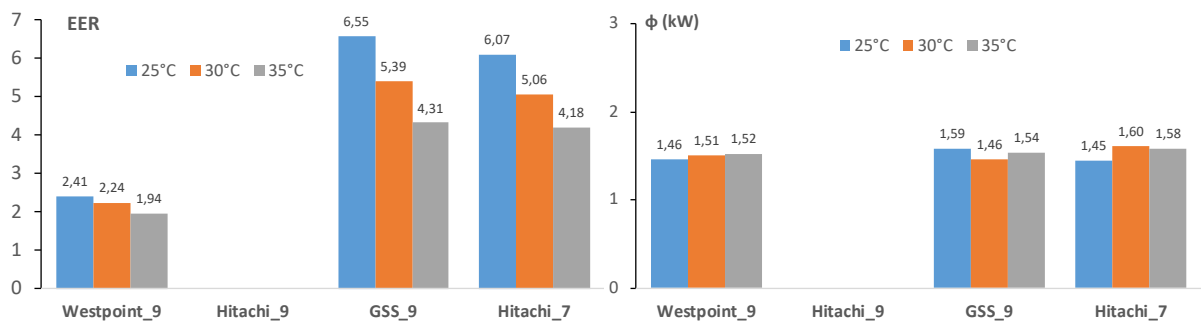
efficacement. On peut remarquer que le climatiseur 7000 BTU/h n'est jamais le plus efficace or il est noté A+++ alors que les deux autres climatiseurs testés sont en A++.



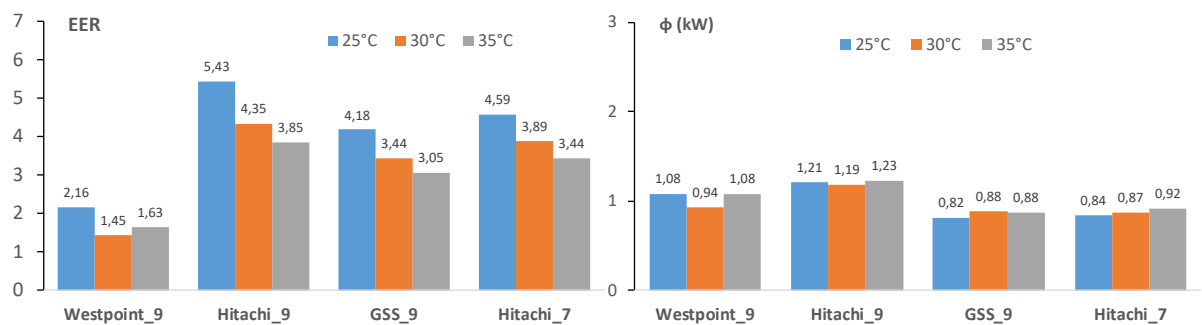
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3 : évolution de l'EER et de la puissance frigorifique en fonction du modèle et de la température extérieure pour une charge de (a) 2.5 kW, (b) 2 kW, (c) 1.5 kW, (d) 1 kW

4. Conclusion/Perspectives

Un protocole expérimental a été mis en place afin d'effectuer les mesures de performances de différents climatiseurs présents sur le marché réunionnais. Le banc de test mis en place est constitué de deux enceintes aux conditions contrôlées. Dans l'enceinte intérieure, on retrouve l'évaporateur testé, ainsi qu'un humidificateur pour contrôler l'humidité et un aérotherme pour contrôler la température. Dans l'enceinte extérieure où le condenseur testé est installé, un ventilateur convecteur relié à un groupe de froid contrôle la température de l'ambiance.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt des nouveaux climatiseurs individuels qui, dotés de la technologie inverter, offrent des performances nettement supérieures aux modèles plus anciens fonctionnant en mode tout ou rien, à pleine charge comme à charge partielle. Des conclusions plus marquées quant à la comparaison du fonctionnement à puissance équivalente mais à charge partielle selon les modèles et leurs puissances nominales restent pour l'instant relativement difficiles compte tenu du peu de modèles testés et de leurs performances affichées sur leurs étiquettes énergétiques. On retrouve cependant des comportements décrits dans la littérature [7, 8] où les EER décroissent avec la diminution du taux de charge mais en passant par un maximum aux environs de 75/80 % comme on peut le voir figure 3 pour le GSS 9000 BTU/h ou le Hitachi 7000 BTU/h. Aussi, plusieurs autres climatiseurs vont être testés prochainement afin d'aller plus loin dans l'analyse et préciser les domaines dans lesquels il est plus intéressant de sélectionner le modèle le plus adapté aux conditions climatiques plus sévères rencontrées en zone tropicale. À plus long terme, c'est l'influence de l'humidité que nous allons étudier plus en détail, car elle a certainement une influence non négligeable sur les résultats obtenus.

Références

- [1] Horizon Réunion, Bilan énergétique de la Réunion 2018, ed. 2019. <https://energies-reunion.com/publications/bilan-energetique-de-la-reunion-2/>
- [2] Franck Lucas, Pascal Ortega, Mathieu David, Frantz Sinama, Boris Brangeon, Fabien Picgirard. A method to evaluate energy performance of buildings cooled by room air conditioners. *Energy Procedia* 75 (2015) 1275 – 1283.
- [3] Ian H. Bell, Jorrit Wronski, Sylvain Quoilin, Vincent Lemort, Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014
- [4] Roger Hitchin, Christine Pout, David Butler. Realisable 10-year reductions in European energy consumption for air conditioning. *Energy and Buildings* 86 (2015) 478–491
- [5] Octávio Alves, Eliseu Monteiro, Paulo Brito, Pedro Romano. Measurement and classification of energy efficiency in HVAC systems. *Energy and Buildings* 130 (2016) 408–419.
- [6] Laurent Grignon-Masse, Philippe Riviere, Jerome Adnot. Strategies for reducing the environmental impacts of room air conditioners in Europe. *Energy Policy* 39 (2011) 2152–2164.
- [7] Dongliang Zhang; Xu Zhang; Jun Liu, Experimental study of performance of digital variable multiple air conditioning system under part load conditions, *Energy and Building* 2011
- [8] Carsten Palkowski; Stefan von Schwarzenberg; Anne Simo, Seasonal cooling performance of air conditioners: the importance of independent test procedures used for MEPS and labels, *International Journal of Refrigeration* 2019

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à l'ADEME et EDF Réunion pour le financement du banc d'essai et les différents professionnels qui ont fournis les climatiseurs à tester.