

Évaluation expérimentale du potentiel de la climatisation par eau de mer (SWAC) en climat tropical

Kanhan SANJIVY^{1,2*}, Olivier MARC³, Neil DAVIES^{4,5}, Franck LUCAS¹

¹Laboratoire de Géosciences du Pacifique Sud (GEPASUD) : Université de la Polynésie française

²Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), 20 avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

³Laboratoire 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

⁴Gump South Pacific Research Station : University of California, Moorea, French Polynesia

⁵Berkeley Institute for Data Science : University of California Berkeley, USA

*(auteur correspondant : kanhan.sanjivy@doctorant.upf.pf)

Résumé - La technologie SWAC (Sea Water Air Conditioning) utilise de l'eau de mer froide située dans les profondeurs pour refroidir les bâtiments. C'est une source d'énergie thermique renouvelable non-intermittente utilisée sans aucune transformation. Dans cet article, nous présentons les performances d'un système SWAC de 2,4 MW installé à l'hôtel The Brando sur l'atoll de Tetiaroa en Polynésie française. Fonctionnant en climat tropical, les résultats expérimentaux montrent que le ratio d'efficacité énergétique (EER) d'un système SWAC peut atteindre des valeurs comprises entre 20 et 150 en fonction de la longueur de la boucle de distribution de froid.

Nomenclature

cp	Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
P	Pression, bar	η	Rendement
\dot{Q}	Puissance thermique, W	ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
qv	Débit, $m^3.s^{-1}$	<i>Indices</i>	
T	Température, °C	1	Pompe/Échangeur n°1
\dot{W}	Puissance électrique, W	2	Pompe/Échangeur n°2
<i>Acronymes</i>		3	Pompe/Échangeur n°3
DC	<i>District Cooling</i>	CW	Eau glacée
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i>	glob	Global
HFCs	<i>Hydrofluorocarbones</i>	HEX	Échangeur de chaleur
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>	in	Entrée
PEHD	<i>Polyéthylène Haute Densité</i>	out	Sortie
SWAC	<i>Sea Water Air Conditioning</i>	prim	Primaire
		SW	Eau de mer

1. Introduction

La climatisation conventionnelle s'est largement implantée dans les pays développés depuis la fin du 20ème siècle. Aujourd'hui, son essor s'étend progressivement aux pays en développement comme l'Inde et la Chine, qui combine climat chaud et forte démographie [1]. Selon le rapport de l'agence internationale de l'énergie (IEA) [2], la consommation énergétique liée au rafraîchissement des bâtiments a triplé entre 1990 et 2016, devenant ainsi le poste de consommation d'énergie finale qui a le plus augmenté ces dernières années. Et elle devrait, entre 2010 et 2050, être multipliée par 1,3 pour les pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) et par 4,5 pour les pays non-membres [3].

Cette demande en constante augmentation exerce des contraintes fortes sur le réseau électrique des zones tropicales car elle est responsable de 70 % du pic de puissance électrique appelé par les bâtiments. De plus, la climatisation a aussi un très fort impact sur l'environnement avec des émissions de CO₂ qui ont également triplé depuis 1990, atteignant les 1130 millions de tonnes par an. La climatisation conventionnelle utilise des gaz HFCs comme fluides frigorigènes qui ont un haut potentiel de réchauffement global [4].

La technologie SWAC (Sea Water Air Conditioning) s'inscrit dans une démarche d'efficacité énergétique en proposant une alternative très performante à la climatisation conventionnelle pour les zones côtières dans la mesure où la mer est une source de froid inépuisable. L'objectif du travail présenté dans cet article est de réaliser un retour d'expérience détaillé permettant de déterminer précisément les performances d'une installation SWAC fonctionnelle depuis plusieurs années, ce qui n'a jusqu'à présent jamais été fait.

2. La technologie SWAC

2.1. Principe de fonctionnement

La technologie SWAC consiste à pomper de l'eau de mer naturellement froide située en profondeur via un pipeline posé sur le fond marin. L'eau profonde passe dans un échangeur thermique pour transmettre cette puissance frigorifique à un réseau d'eau glacée en boucle fermée qui assurera la distribution du froid dans l'ensemble des bâtiments à climatiser. Ce procédé échappe aux limites des cycles thermodynamiques habituels car il repose sur le transport d'un fluide froid en phase liquide et non sur le pompage de chaleur d'une source froide vers une source chaude dont les performances sont limitées par l'efficacité de Carnot.

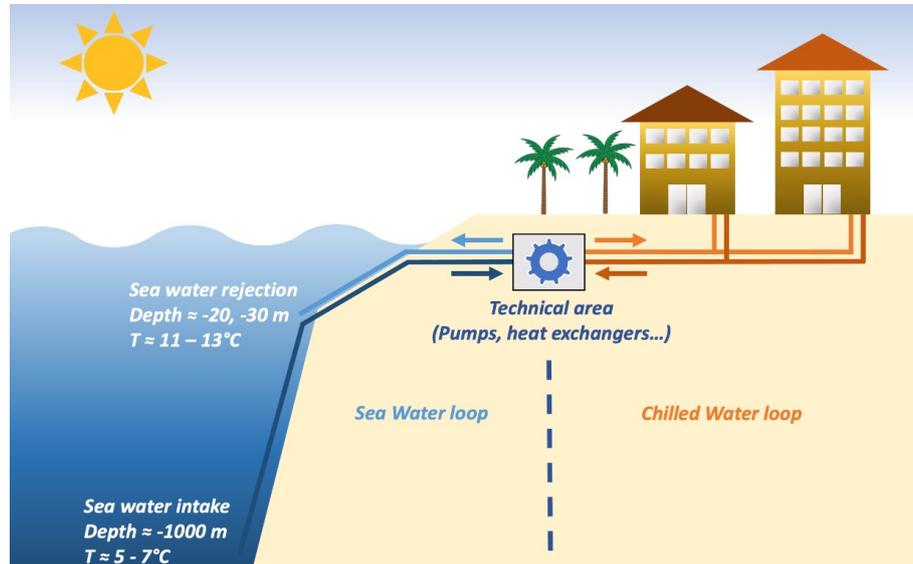


Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement du système SWAC

Le système SWAC se décompose en 3 parties (Figure 1) :

- La boucle SW (Sea Water Loop) dite primaire comprenant une canalisation de puisage descendant à environ 1000 m de profondeur et une canalisation de rejet à 20 m. L'eau de mer est d'environ 5 à 7°C en entrée et est rejetée à une température entre 11 et 13°C [5]. Le point de rejet est défini de manière à rejeter l'eau de mer à une température proche du milieu pour ne pas impacter la faune et la flore marine environnante, cette température de rejet n'est cependant pas soumise à des réglementations spécifiques.

- La boucle CW (Chilled Water Loop) dite secondaire servant de réseau de distribution de froid dans le bâtiment. La température de l'eau glacée est généralement fixée à 7°C pour le départ et 12°C pour le retour.

- Le local technique comprenant une ou plusieurs pompes pour chacune des deux boucles, ainsi que les échangeurs permettant le transfert du froid de la boucle SW vers la boucle CW. Les débits des pompes dépendent du besoin froid, ils sont de 210 m³/h par pompe dans chacune des boucles en fonctionnement nominal (2 pompes simultanément pour 2,4 Mwf) pour le SWAC de Tetiaroa.

2.2. L'installation SWAC de l'hôtel The Brando

L'hôtel The Brando est situé sur l'atoll de Tetiaroa. Cet atoll, d'une superficie de 6 km² répartie sur 12 îlots, fait partie de l'archipel de la Société et est localisée à 53 km au Nord de Tahiti. L'installation SWAC de Tetiaroa se présente comme ceci (Figure 2) :

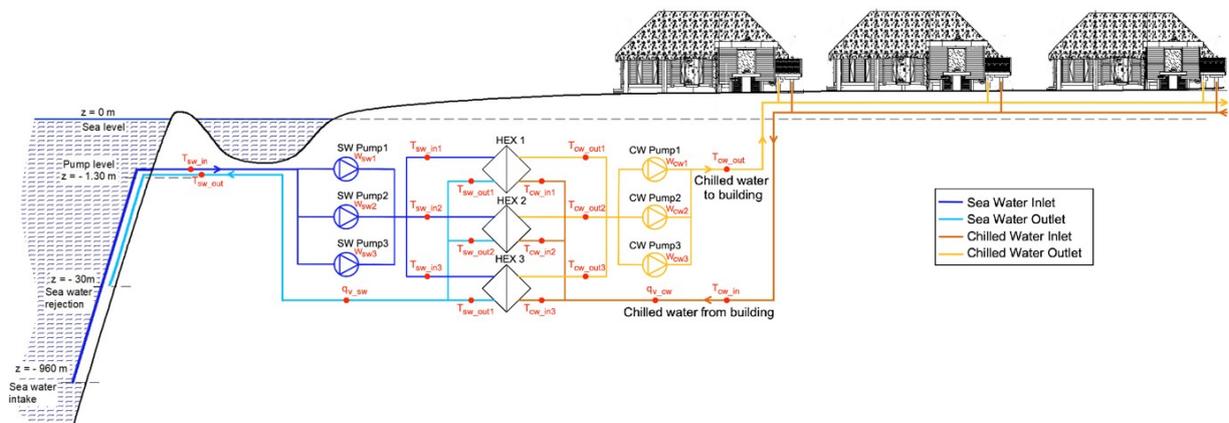


Figure 2 : Schéma de principe détaillé du SWAC de Tetiaroa et son instrumentation

Elle comporte deux pipelines en PEHD, trois pompes primaires, trois échangeurs de chaleur, trois pompes secondaires et un District Cooling alimentant l'hôtel.

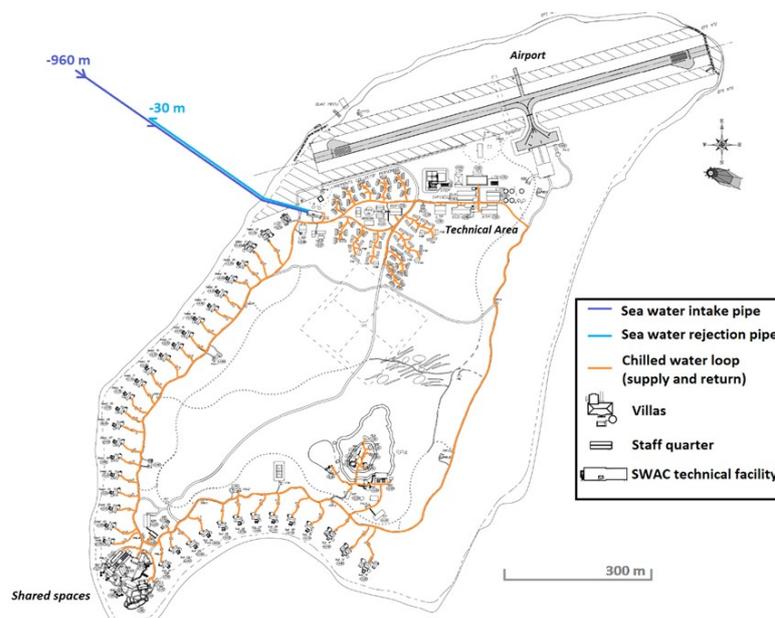


Figure 3 : Plan de masse du réseau de distribution de froid du Brando

La boucle d'eau glacée (District Cooling) mesure environ 3 km de long (Figure 3). Elle fournit du froid à l'ensemble de l'hôtel qui équivaut à une surface climatisée totale d'environ 7000 m². Il est à noter que la totalité des bungalows n'est pas encore construite, leur construction doit se poursuivre sur la côte Est le long du réseau d'eau glacée pour s'y raccorder. Le SWAC est donc, pour l'instant, surdimensionné car il a été conçu pour répondre aux besoins de l'hôtel complet en fin de construction. Un réseau de distribution aussi étendu génère d'importantes pertes thermiques et pertes de charges (bien plus élevées que celle de la boucle primaire), l'impact de celles-ci sur le système se manifeste par l'écart entre l'EER primaire et global.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Analyse expérimentale sur une courte période

Pour illustrer le fonctionnement de l'installation SWAC, les résultats expérimentaux sur une courte période allant du 10 au 21 juin 2021 sont présentés et analysés. L'objectif est de réaliser une étude expérimentale détaillée des différents composants de l'installation, de vérifier la fiabilité de l'instrumentation mise en place et de calculer les coefficients de performance du système SWAC.

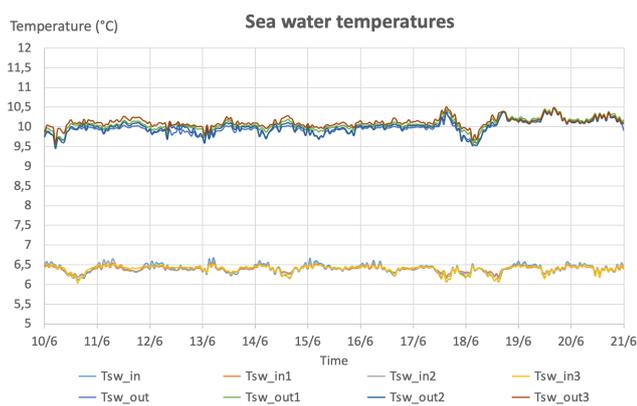


Figure 4 : Évolution des températures côté eau de mer

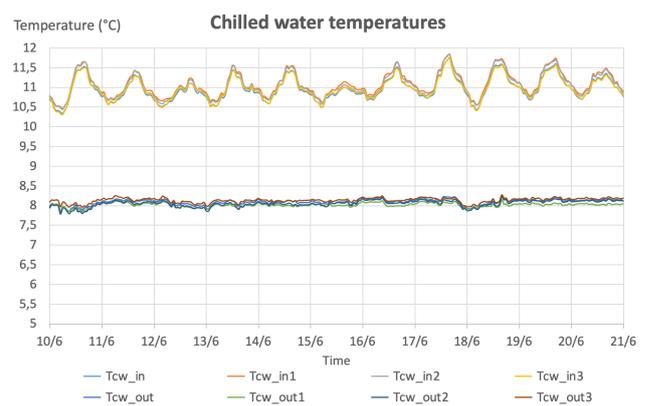


Figure 5 : Évolution des températures côté eau glacée

Les quatre températures de l'eau de mer à l'entrée des échangeurs de chaleur (Figure 4 : Tsw_in, Tsw_in_1, Tsw_in_2, Tsw_in_3) suivent sensiblement la même évolution avec des valeurs assez stables comprises entre 6 et 6,5°C tout au long de la période étudiée. Les températures de l'eau de mer à la sortie des échangeurs de chaleur (Figure 4 : Tsw_out, Tsw_out_1, Tsw_out_2, Tsw_out_3) quant à elles oscillent autour de 10°C et restent comprises entre 9,5 et 10,5°C sur la période étudiée.

En ce qui concerne les températures de l'eau glacée à la sortie des échangeurs (Figure 5 : Tcw_out, Tcw_out_1, Tcw_out_2, Tcw_out_3), elles restent très proche de 8°C et ne varient pratiquement pas dans le temps. En effet, cette température est régulée par la variation de débit d'eau de mer via un variateur de fréquence branché sur les pompes d'eau de mer, afin de rester au plus proche de sa consigne fixée à 8°C (bien que l'installation soit dimensionnée pour un régime 7/12°C) qui est la température de départ du réseau d'eau glacée qui n'est pas indexée sur la température extérieure. En revanche, les températures de l'eau glacée à l'entrée des échangeurs (Figure 5 : Tcw_in, Tcw_in_1, Tcw_in_2, Tcw_in_3) et donc la température de retour du réseau d'eau glacée, varient de manière plus significative, allant de 10,3 à 11,8°C. Ceci est dû à la demande en froid du réseau d'eau glacée (Figure 6 : \dot{Q}_{cw}) qui est plus

importante la journée avec un pic à 850 kW, entraînant une augmentation de la température de retour du réseau d'eau glacée. En effet, lors de la période expérimentale étudiée, l'occupation des bâtiments climatisés était quasi-constante ce qui implique une variation des besoins en froid du réseau d'eau glacée périodiquement stable allant de 550 kW la nuit à 850kW le jour.

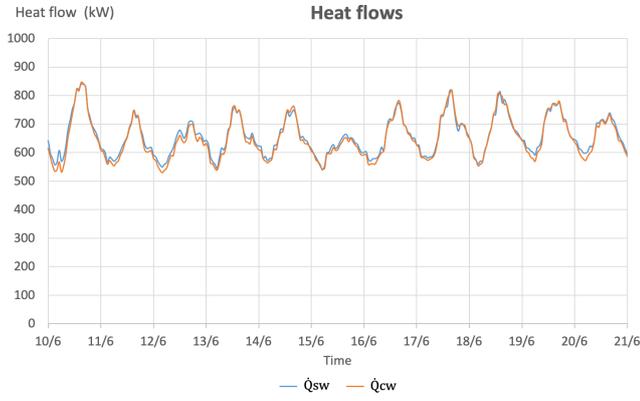


Figure 6 : Évolution des puissances thermiques primaire et secondaire

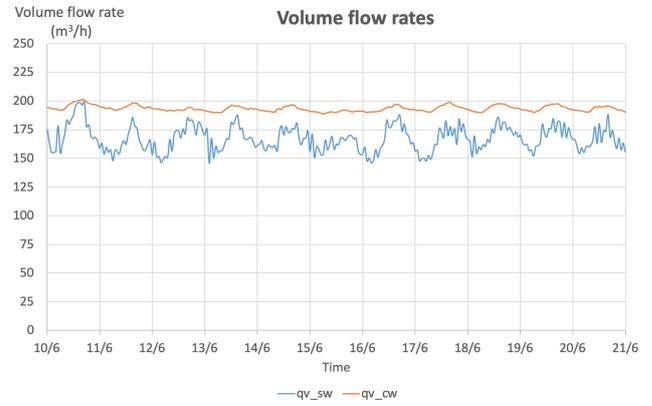


Figure 7 : Évolution des débits d'eau de mer et d'eau glacée

Les flux de chaleur échangés côté eau de mer (\dot{Q}_{sw}) et côté eau glacée (\dot{Q}_{cw}), présentés sur la Figure 6, sont calculés selon l'équation (1). De plus, les propriétés thermo-physiques de l'eau de mer dans l'équation (1) sont déterminés à partir des travaux de Sharqawy et al. [6] et de Nayar et al [7].

$$\dot{Q}_{sw} = \rho_{sw} \cdot qv_{sw} \cdot cp_{sw} \cdot (T_{out,sw} - T_{in,sw}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cw} = \rho_{cw} \cdot qv_{cw} \cdot cp_{cw} \cdot (T_{in,cw} - T_{out,cw})$$

On remarque que le flux de chaleur échangé côté eau de mer (\dot{Q}_{sw}) reste très proche de celui échangé côté réseau d'eau glacée (\dot{Q}_{cw}) ce qui est tout à fait normal puisque les pertes thermiques des échangeurs sont minimales (échangeurs à plaques en titane équipés de coque calorifuge) par rapport aux puissances thermiques mises en jeu (entre 550 et 850 kW). De la même manière, les débits d'eau de mer et d'eau glacée (Figure 7) suivent la même dynamique périodiquement stable et sont compris entre 150 et 200 m³/h pour le premier et 190 et 200 m³/h pour le second. Le débit d'eau de mer varie donc de manière plus significative pour compenser la baisse de puissance frigorifique appelée par le réseau d'eau glacée la nuit et stabiliser sa température de départ à sa consigne de 8°C.

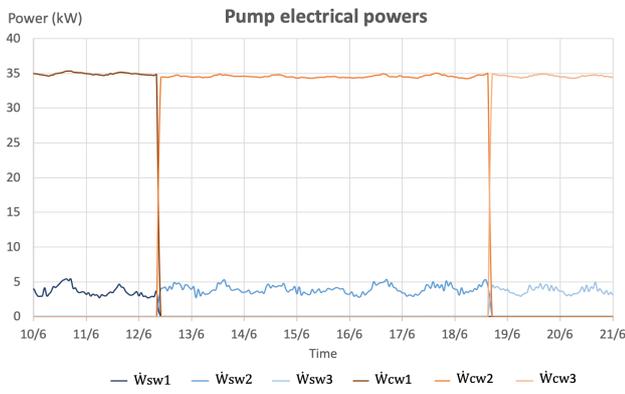


Figure 8 : Évolution des puissances électriques des pompes

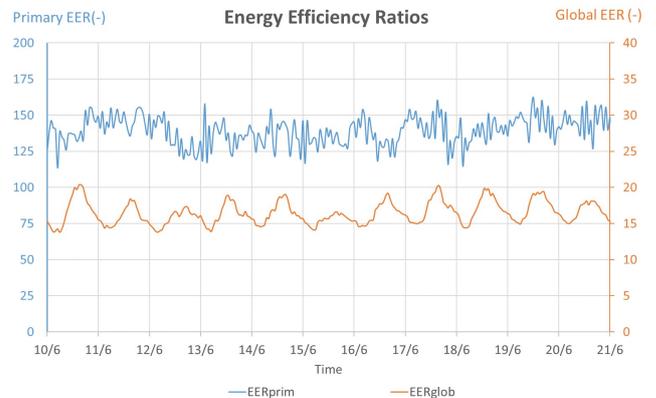


Figure 9 : Évolution des EER primaire et global

Les puissances électriques instantanées des pompes d'eau de mer et d'eau glacée sont présentées sur la Figure 8. Étant donné le besoin frigorifique sur la période étudiée ($\dot{Q}_{cw} \approx 15000$ kWh/jour), une seule pompe d'eau de mer et d'eau glacée est requise durant toute la séquence expérimentale. Lorsque la pompe n°1 d'eau de mer est allumée (du 10 au 12 juin), la pompe n°1 d'eau glacée l'est aussi, il en va de même pour les pompes n°2 (du 12 au 18 juin) et n°3 (du 18 au 21 juin). Toutes les semaines, l'opérateur change de pompes pour équilibrer leur temps de fonctionnement à l'échelle de l'année. La puissance électrique absorbée par les pompes du réseau d'eau glacée reste stable à environ 35 kW alors que celle absorbée par les pompes d'eau de mer varie entre 3 et 5 kW pour assurer la puissance frigorifique requise (Figure 6 : \dot{Q}_{cw}). Le réseau de distribution représente donc 87,5% de l'électricité consommée par l'installation SWAC contre 12,5% pour le réseau d'eau de mer.

Les indicateurs de performances de l'installation à savoir l'EER primaire et l'EER global sont présentés sur la Figure 9. Les EER primaire et global sont calculés grâce à l'équation (2) où les flux de chaleur et les puissances électriques sont intégrés sur une période d'une heure :

$$EER_{prim} = \frac{\int_0^t \dot{Q}_{cw} \cdot dt}{\int_0^t \dot{W}_{sw} \cdot dt} \quad (2)$$

$$EER_{glob} = \frac{\int_0^t \dot{Q}_{cw} \cdot dt}{\int_0^t \dot{W}_{sw} \cdot dt + \int_0^t \dot{W}_{cw} \cdot dt}$$

3.2. Analyse expérimentale sur une longue période

Les évolutions des consommations électriques journalières des boucles primaire et secondaire, de l'énergie frigorifique quotidienne appelée par le réseau d'eau glacée et des EER primaire et secondaire d'avril 2018 à juillet 2021 sont présentées sur la Figure 10. Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'installation et analyser ses performances, plusieurs séquences expérimentales (de A à E) ont été identifiées sur les Figures 10 et 11. Il est à noter que de mars à mai 2021, l'installation SWAC était en maintenance, entraînant une absence de données expérimentales (zone grisée sur les Figures 10 et 11).

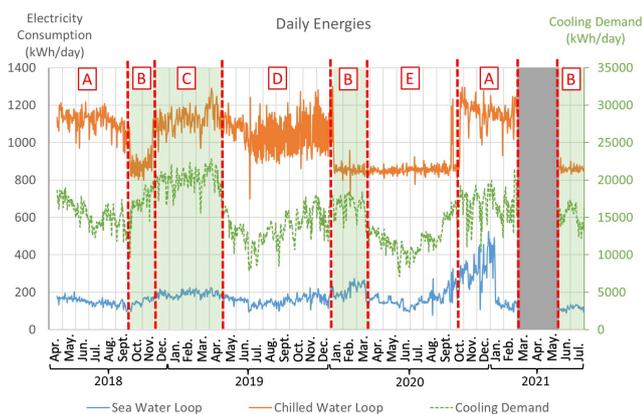


Figure 10 : Évolution des énergies journalières sur une longue période

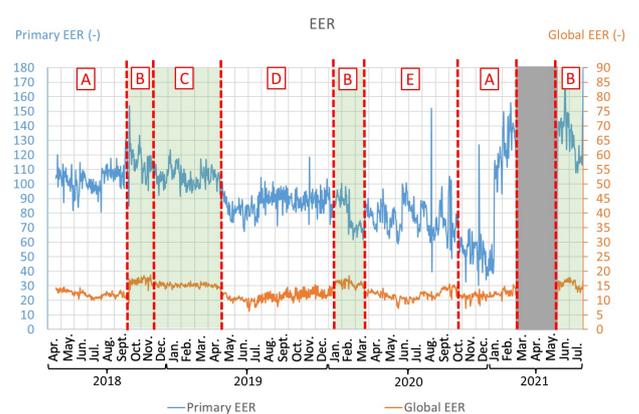


Figure 11 : Évolution des EER primaire et global sur une longue période

Lors de la première séquence expérimentale (A), une seule pompe fonctionne sur la boucle primaire et deux pompes fonctionnent simultanément sur la boucle secondaire conduisant à des consommations électriques journalières moyennes de 175 kWh/jour pour le primaire et 1150

kWh/jour pour le secondaire. Sur cette période, la demande en froid diminue progressivement pour passer de 18000 kWh/jour en avril 2018 à 13000 kWh/jour en septembre 2018. Cette diminution de la demande en froid entraîne une baisse de l'EER globale qui passe de 13,6 en avril à 10,3 en septembre avec une valeur moyenne de 12,2 sur la période. L'EER primaire quant à lui reste à peu près stable avec des valeurs comprises entre 90 et 110. Une séquence expérimentale assez similaire (A) est observée entre octobre 2020 et février 2021 où les EER globaux sont du même ordre de grandeur. Il est à noter que sur cette période la consommation des pompes primaires est plus importante due à un problème de régulation qui a conduit au fonctionnement simultané de 2 pompes primaires à très bas régime (50% du nominal) au lieu d'une seule en régime quasi-nominal, entraînant donc une surconsommation d'électricité. En effet, lorsqu'une pompe fonctionne à 50% de son régime nominal, ses performances peuvent chuter sensiblement [8].

Étant donnée la valeur de la demande en froid assez faible en septembre 2018 ($\dot{Q}_{cw} < 13000$ kWh/jour), le mode de fonctionnement a été changé pour passer à une seule pompe de distribution d'eau glacée et toujours une pompe d'eau de mer, amenant à la séquence expérimentale B allant d'octobre à novembre 2018. Pendant cette période, la consommation électrique de la boucle secondaire se stabilise à une valeur moyenne de 830 kWh/jour et celle de la boucle primaire est d'environ 150 kWh/jour. La demande en froid augmente progressivement et passe de 15000 début octobre à 20000 kWh/jour fin novembre 2018. Dans ces conditions l'EER global augmente sensiblement par rapport à la séquence expérimentale précédente (A) pour atteindre une valeur moyenne d'environ 16,2. L'EER primaire quant à lui est d'environ 110. On retrouve ce même comportement (séquence expérimentale B) de janvier à mars 2020 ainsi qu'en juin et juillet 2021 avec des EER globaux supérieurs à 15.

Le fonctionnement avec une seule pompe sur le réseau d'eau glacée est donc plus efficace lorsque la demande en froid est inférieure à 20000 kWh/jour. Lorsque ce seuil est franchi, les deux pompes du secondaire démarrent simultanément ce qui est le cas en décembre 2018 (début de la séquence expérimentale C). Lors de cette séquence, de décembre 2018 à avril 2019, le besoin en froid se stabilise autour de 20000 kWh/jour et les consommations électriques moyennes sont de 190 kWh/jour pour la boucle primaire et 1100 kWh/jour pour le secondaire. Dans ces conditions, les performances de l'installation sont plutôt bonnes avec des EER autour de 105 pour le primaire et 15,5 pour le global.

En mai 2019, la demande en froid diminue fortement et descend en dessous de 10000 kWh/jour en juin 2019 comme on peut l'observer lors de la séquence expérimentale D (de mai à décembre 2019). Malheureusement, le régime de fonctionnement reste inchangé, les 2 pompes sur le réseau d'eau glacée sont toujours allumées entraînant une baisse assez importante des performances de l'installation avec des EER autour de 90 pour le primaire et de 10 pour le global ce qui reste toutefois largement supérieur à la climatisation conventionnelle (5). Il aurait été intéressant de basculer sur une seule pompe sur le secondaire pour maintenir de bonnes performances.

Enfin, lors de la dernière période étudiée d'avril à septembre 2020 (séquence E), la demande en froid est très faible. Ceci est dû à la crise du COVID-19 pendant laquelle l'hôtel était fermé. Dans ces conditions, une seule pompe était en fonctionnement sur le secondaire. Les EER sont compris entre 60 et 90 pour le primaire et entre 10 et 15 pour le global.

Séquence	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Besoin froid	Moyen	Moyen	Fort	Faible	Faible
Pompes CW	2	1	2	2	1
EER global	12,2	16,2	15,5	10	11,9

Tableau 1 : Récapitulatif des séquences expérimentales étudiées

4. Conclusion

L'installation SWAC du Brando peut atteindre des EER de 140 à 150 pour le primaire et 15 à 20 en global. La différence entre ces deux EER s'explique par la consommation importante des pompes du réseau d'eau glacée, environ 7 fois plus grande que les pompes primaires, du fait de la configuration en District Cooling. Néanmoins, on observe que malgré la taille du réseau de distribution, les performances de l'installation SWAC restent très intéressantes comparées aux systèmes de climatisation classiques. La technologie SWAC a l'avantage de ne pas émettre de gaz fluorés dont l'impact environnemental est significatif. Elle se positionne donc comme une solution durable et efficace pour décarboner la production en froid dans le monde, en particulier dans les territoires ayant un facteur moyen d'émissions de CO₂ élevé (504 gCO₂/kWh pour la Polynésie Française en 2019 [9]).

Des améliorations et optimisations sont possibles et pourront être déterminés par une analyse de sensibilité paramétrique, principalement sur le diamètre de la conduite et le régime de température pour un point de puisage donné. Cependant la mise en place d'une conduite de puisage nécessite de disposer d'une bathymétrie favorable, c'est-à-dire d'une grande profondeur à proximité des côtes comme celle des îles polynésiennes, afin que la longueur de celle-ci reste raisonnable. En effet, la majeure partie du coût d'investissement d'un SWAC est dû à ce pipeline. Une solution pour exporter la technologie SWAC à des zones côtières moins propices comme en France, seraient de décaler le régime de température du secondaire, 11/17°C plutôt que 8/11°C, permettant ainsi de fonctionner avec un point de puisage moins profond et donc une conduite plus courte. La longueur de celle-ci étant un paramètre de dimensionnement fort du coût de l'installation et de son fonctionnement.

Références

- [1] Goetzler W, Guernsey M, Young J, Fujrman J and Abdelaziz A 2016 *The Future of Air Conditioning for Buildings*
- [2] International Energy Agency (IEA) 2018 *The Future of Cooling* 92
- [3] International Energy Agency 2013 *Transition to sustainable buildings: strategies and opportunities to 2050* (Paris: IEA Publ)
- [4] International Energy Agency (IEA) 2020 *Cooling Emissions and Policy Synthesis Report*
- [5] Makai Ocean Engineering, Inc and VanRyzin J 2004 *Seawater Air Conditioning: A Basic Understanding* 12
- [6] Sharqawy M H, Lienhard J H and Zubair S M 2010 Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data *Desalination and Water Treatment* **16** 354–80
- [7] Nayar K G, Sharqawy M H, Banchik L D and Lienhard V J H 2016 Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence *Desalination* **390** 1–24
- [8] Delgado J, Ferreira J P, Covas D I C and Avellan F 2019 Variable speed operation of centrifugal pumps running as turbines. Experimental investigation *Renewable Energy* **142** 437–50
- [9] Observatoire Polynésien de l'Énergie and ADEME 2019 *Bilan Énergétique de la Polynésie Française*

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le groupe Pacific Beachcomber pour avoir permis l'exploitation des données du SWAC de l'hôtel The Brando. Son instrumentation a été financé dans le cadre du projet COPSWAC par l'ADEME et le gouvernement polynésien, que nous remercions également. Les auteurs remercient le soutien financier apporté par la Région Réunion et le Fonds européen de développement régional (FEDER) dans le cadre de la subvention POE-FEDER 2014-2020 (n°2020-2497-0027544) pour la mobilité du Dr Olivier MARC en Polynésie française.