

Simulation et analyse des consommations énergétiques des piscines en milieu tropical.

Damien HOARAU^{1,2}, Olivier MARC², Emmanuel QUILICHINI³, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES^{2,*}.

¹École Centrale de Marseille, 38 rue Joliot Curie, 13013, Marseille

²Laboratoire de Physique Et Ingénierie Mathématique pour l’Energie et l’environnement (PIMENT), 117 rue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon, Ile de La Réunion, France

³Société Sunny Shark, 87, Route de la Confiance, 97438, Sainte-Marie

(*auteur correspondant: jean.castaing-lasvignottes@univ-reunion.fr)

Résumé – Les piscines collectives ouvertes sont des lieux de consommation énergétique importante. Maîtriser et être capable de prédire ce comportement est un enjeu important afin de minimiser la consommation énergétique par des procédures de contrôle/commande efficaces. Ainsi, la société Sunny Shark, porteuse du projet partenarial avec notre laboratoire PIMENT souhaite proposer une solution industrielle de maîtrise des consommations en déterminant *a priori* le moment optimal de démarrage, la durée de fonctionnement et la puissance du système de chauffage. Le modèle retenu et utilisé résulte de l’écriture du bilan énergétique en système ouvert. Compte tenu de la variabilité temporelle des conditions climatiques, il s’agit également de prendre en compte le caractère transitoire des échanges et des conséquences sur la variation de la température du bassin. Les différents choix en termes de modèles pour les phénomènes physiques ont été choisis parmi les références bibliographiques disponibles sur le sujet. Les premiers résultats de simulation ont permis l’analyse énergétique d’une piscine à l’échelle d’une journée et d’identifier les principaux postes de déperdition thermiques. Nous nous sommes servis de données expérimentales obtenues sur une piscine privée située en bord de mer afin d’affiner les choix de modèles. Les confrontations réalisées permettent de vérifier la bonne fiabilité du modèle.

Nomenclature

T	Température, K	<i>Indices et exposants</i>	
P	Pression, Pa	<i>sol</i>	solaire
h	Enthalpie spécifique, $J.kg^{-1}$	<i>rad</i>	radiatif
\dot{Q}	Flux de chaleur, W	<i>evap</i>	évaporation
u	Energie interne spécifique, $J.kg^{-1}$	<i>conv</i>	convection
\dot{m}	Débit massique, $kg.s^{-1}$	<i>pa</i>	paroi
V	Volume, m^3	<i>nageur</i>	nageurs
t	Temps, s	<i>aux</i>	auxiliaire
C_p	Capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>e</i>	entrée
L	Longueur, m	<i>s</i>	sortie
<i>Symboles grecs</i>		<i>w</i>	eau
ρ	Masse volumique, $kg.m^{-3}$	<i>a</i>	ambient
ε	Emissivité	<i>sky</i>	ciel
α	Coefficient d'absorption	<i>sat</i>	saturé

1. Introduction

La consommation énergétique des piscines collectives est importante (elle est estimée en France à environ 2800 kWh.m⁻² de plan d’eau et par an: chauffage, déshumidification et production d’ECS des douches comprises) et on estimait à environ 2000 GWh/an la consommation du parc de piscines individuelles [1] en 2007. Ces valeurs sont similaires à celles obtenues en climat méditerranéen avec par exemple dans le cas de la Grèce une valeur moyenne

annuelle de 2250 kWh.m⁻² [2]. Dans des conditions climatiques plus sévères, elle peut atteindre des valeurs très importantes comme par exemple en Norvège [3] où des niveaux annuels de 8000 kWh.m⁻² ont été relevés et où la moyenne nationale se situe à environ 4000 kWh.m⁻². Dotées de caractéristiques géométriques variées, de systèmes de chauffage différents et enfin soumises à des conditions climatiques variables dans le temps et l'espace, le comportement thermique des piscines est relativement complexe à appréhender. Pouvoir prédire et maîtriser ce comportement est un enjeu important afin de minimiser la consommation énergétique par des procédures de contrôle/commande efficaces et adéquates. L'absence de prise en compte de l'évolution naturelle de la température de l'eau du bassin amène souvent à chauffer inutilement. Le laboratoire PIMENT, en partenariat avec la société Sunny Shark porteuse du projet, se charge de développer un outil de calcul permettant dans un premier temps de simuler le comportement de la piscine et dans un deuxième temps de proposer une stratégie de maîtrise de l'énergie. De plus, l'étude menée permettra de fournir des conseils et de la valeur ajoutée à l'expérimentation réalisée par la société. Cette phase doit se dérouler au grand bassin de la piscine de Vue-Belle, située sur la commune de Saint-Paul, à La Réunion.

Le comportement thermique dynamique d'un bassin est déterminé à partir d'un bilan d'énergie en régime instationnaire. Afin de procéder à la modélisation des piscines, il faut étudier un à un tous les phénomènes d'échanges de chaleur aux frontières du bassin (radiation, convection, évaporation et conduction). Cependant, dans la littérature, les phénomènes d'échanges ayant lieu à la surface libre du bassin sont souvent décrits par des modèles empiriques linéaires [4], [5], [6] ou sont déduits par analogie (convection-évaporation [7], [8]). La principale difficulté réside alors dans leur utilisation très dépendante du domaine de validité dans lequel ils ont été établis. Pour pallier en partie ces problèmes, l'expérimentation est souvent utile afin de pouvoir tester le modèle numérique et contribuer à sa validation.

Dans cet article, les équations d'échange et de transfert régissant le comportement thermodynamique du bassin seront présentées. Ces équations ont été retenues à la suite d'une revue bibliographique menée sur le sujet de notre étude. Celles-ci ont permis la construction d'un modèle numérique dont les premiers résultats seront mis en évidence dans un second temps grâce aux données expérimentales d'une piscine privée de plus petite taille située à Sainte-Marie (La Réunion). Cet article s'attachera à confronter les températures de l'eau de la piscine mesurées et celles calculées afin de tester la fiabilité du modèle développé.

2. Modélisation

2.1. Bilan énergétique global

Le modèle résulte de l'écriture du bilan énergétique en système ouvert, c'est-à-dire en prenant en compte les entrées et sorties de matière de la piscine avec son environnement et également des différents échanges de chaleur auxquels elle est soumise. Compte tenu de la variabilité temporelle des conditions climatiques et de l'utilisation de la piscine, il s'agit également de prendre en compte le caractère transitoire des échanges et des conséquences sur la variation de la température et donc de l'énergie interne du bassin. Au niveau de la variabilité dans l'espace, on observe assez peu de stratification et des campagnes de mesures ont été menées sur le site de Vue Belle afin de s'en assurer. Nous avons opté pour l'écriture du 1^{er} principe de la thermodynamique en système ouvert et en régime transitoire illustré par ailleurs dans la figure 1 :

$$\frac{dU_w}{dt} = \rho_w \cdot V \cdot C_v \cdot \frac{dT_w}{dt} = \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{\acute{e}vap} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_{nageurs} + \dot{Q}_{aux} + \dot{m}_e \cdot h_e - \dot{m}_s \cdot h_s \quad (1)$$

Et où :

- U_w représente l'énergie interne de l'eau de la piscine à la température T_w , piscine d'un volume V d'eau, dotée d'une masse volumique ρ_w et d'une capacité calorifique C_v ;
- \dot{Q}_{sol} représente le flux de chaleur solaire reçu par la piscine ;
- \dot{Q}_{rad} représente le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la piscine et l'environnement direct et lointain ;
- $\dot{Q}_{\text{évap}}$ représente le flux de chaleur dû à l'évaporation de l'eau ;
- \dot{Q}_{conv} représente le flux de chaleur échangé par convection entre la piscine et l'air ambiant ;
- \dot{Q}_{pa} représente le flux de chaleur échangé entre la piscine et le sol (convection et conduction) ;
- $\dot{Q}_{nageurs}$ représente le flux de chaleur apporté par les nageurs lors de leur activité dans l'eau du bassin ;
- \dot{Q}_{aux} représente le flux de chaleur apporté par le système de chauffage ;
- \dot{m}_e représente le débit d'eau liquide entrant dans la piscine et est égal à la somme de toutes les sorties d'eau (évaporation, éclaboussures, renouvellement, eau retenue par les baigneurs : maillot, peau, chevelure). h_e représente l'enthalpie massique de cette eau (généralement à la température du réseau d'eau potable) ;
- \dot{m}_s représente le débit d'eau liquide (hors évaporation donc) quittant la piscine (éclaboussures, eau retenue par les baigneurs : maillot, peau, chevelure, renouvellement,...). h_s représente l'enthalpie massique de cette eau liquide (généralement à la température d'eau du bassin).

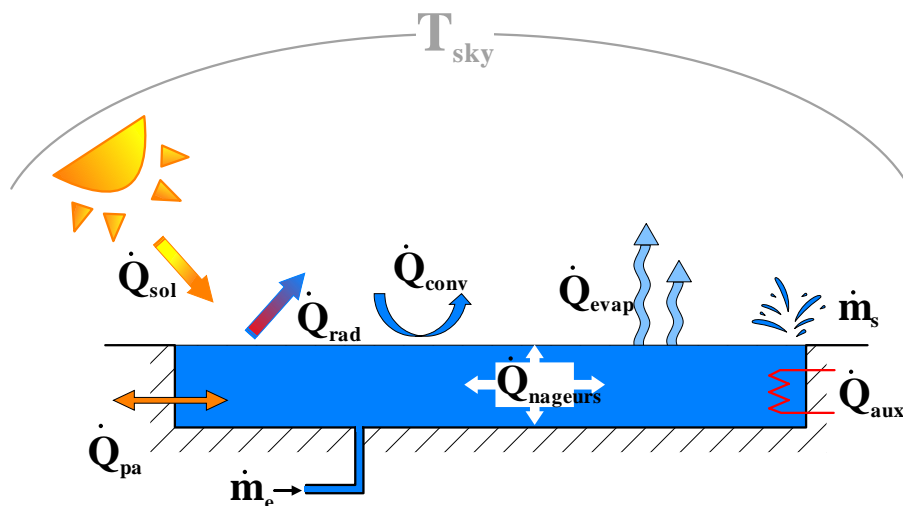


Figure 1 : Représentation schématique des différents échanges de chaleur et de matière au sein d'une piscine

2.2. Définition des flux et des modèles associés

Ce paragraphe s'attachera à présenter les modèles de transfert retenus pour la construction du modèle de calcul. Les expressions des différents flux énumérés dans le paragraphe précédent sont détaillées dans le tableau 1.

Flux (W)	Expressions	Equation
Irradiation globale	$\dot{Q}_{sol} = \alpha.G.A$	(2)
Échange par radiation	$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_w^4) \cdot A$	(3)
Échange par convection	$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot (T_a - T_w) \cdot A$	(4)
Échange par évaporation	$\dot{Q}_{évap} = h_{évap} \cdot (P_{sat}(T_w) - P_v) \cdot A$	(5)
Échange aux parois	$\dot{Q}_{pa} = U \cdot A_{pa} \cdot (T_s - T_w)$	(6)

Tableau 1: Les expressions des puissances en jeu dans le système

où :

- A est la surface libre du bassin, G l'irradiation globale ;
- ε_w est l'émissivité de l'eau, σ la constante de Stefan-Boltzmann ;
- P_a est la pression de vapeur de l'air ambiant à T_a la température de l'air ambiant ;
- U est le coefficient global de transfert par conduction-convection aux parois du bassin, et A_{pa} la surface des parois du bassin ;
- α est le coefficient d'absorption du bassin ;
- T_{sky} est la température de la voûte céleste ;
- T_w est la température de l'eau du bassin ;
- T_s est la température du sol ;
- h_{conv} et $h_{évap}$ sont respectivement les coefficients de transfert par convection et par évaporation.

Irradiation globale : malgré une littérature importante sur le sujet [9], [10], nous nous trouvons dans un cas remarquable où le coefficient d'absorption du bassin peut être considéré comme constant lorsque la profondeur du bassin dépasse un mètre [11]. Si on ajoute à cela l'importante réflexion au niveau de la surface libre le soir et le matin on peut encore écrire :

$$\alpha = 0,9 \cdot (1-r) \quad (7)$$

Où r est l'albédo du plan d'eau dépendant des phénomènes de réflexion à la surface du bassin et de l'angle des rayons solaires incidents qui est fonction du jour de l'année, de l'heure et de la latitude du site (21°S à La Réunion) [12].

Transfert par radiation : dans le cadre de l'échange radiatif et de la détermination de la température de la voûte céleste, le modèle de Walton, cité par Woolley [6], est retenu. Celui-ci a l'avantage de relier T_{sky} à la température de l'air ambiant, à la température de rosée T_{dew} et à la nébulosité du ciel N , c'est-à-dire à l'état de la couverture nuageuse. La nébulosité N est une grandeur physique comprise entre 0 (ciel clair) et 1 ciel totalement couvert. D'où :

$$T_{sky} - 273,15 = (T_a + 273,15) \cdot \left[0,787 + 0,764 \cdot \log \left(\frac{T_{dew} + 273,15}{273,15} \right) \right]^{0,25} \cdot E_{sky}^{0,25} \quad (8)$$

$$E_{sky} = 1 + 0,0224 \cdot N - 0,0035 \cdot N^2 + 0,00028 \cdot N^3$$

Ce modèle permet donc de tenir compte de nombreux facteurs climatiques et, notamment, du rayonnement de la couverture nuageuse qui est souvent présente en climat tropical humide.

Transfert par convection : le phénomène de convection à la surface de l'eau se base sur la théorie des similitudes et l'utilisation de nombres adimensionnés adaptés (Nusselt, Reynolds, Prandtl, Grashof et Rayleigh) et peut, dans notre cas, être décrit par le modèle de l'écoulement d'un fluide sur une plaque horizontale plane. La surface de l'eau est supposée alors indéformable sous l'effet du vent. Cette approximation est valable lorsque la piscine est inoccupée et le vent faible. Ainsi :

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{Nu * k_{air}}{L_c} (T_a - T_w) A \text{ avec } \begin{cases} Nu = f(Re, Gr, Pr, Ra) \\ h_{conv} = Nu \frac{k_{air}}{L_c} \end{cases} \quad (9)$$

Où Nu, Re, Gr, Pr et Ra sont les nombres adimensionnés de Nusselt, de Reynolds, de Grashof, de Prandtl et de Rayleigh. k_{air} est la conductivité thermique de l'air et L_c est la longueur caractéristique de la piscine. La fonction qui relie Nu à Gr, Re ou Pr tient compte du caractère forcé ou naturel de la convection et du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent). Notre choix final en termes de corrélations s'est porté sur celle de Rabadya et Kirar [13].

Transfert par évaporation : la construction de l'équation de l'évaporation est basée sur une démarche analogue où l'étude du nombre adimensionné de Sherwood (Sh) remplace celle du nombre de Rayleigh. Les dimensions des bassins et la vitesse de l'écoulement mesurable minimale placent le système dans un régime turbulent dans la plupart des cas. Les équations de l'évaporation retenues sont principalement issues de [8] et [14] :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{evap} = AL_v (0,00407v^{0,8}L_c^{-0,2} - 0,01107L_c^{-1}) \frac{P_a - P_w}{P} \quad (Sartori) \\ \dot{Q}_{evap} = 0,14AL_v \left[\frac{gk_{air}^2 \beta (T_{v,w} - T_{v,a})}{\nu_{air} * (\rho_{air} c_{p,air})^2} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{P_a - P_w}{P} \quad (Adams) \end{cases} \quad (10)$$

Où L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, L_c la longueur caractéristique du bassin dans la direction de l'écoulement, P la pression atmosphérique, v la vitesse du vent, β le coefficient de dilatation, ν_{air} la viscosité cinématique de l'air, ρ_{air} sa masse volumique, $T_{v,w}$ la température virtuelle de la parcelle d'air à la surface de l'eau, $T_{v,a}$ la température virtuelle de l'air ambiant et $C_{p,air}$ la capacité calorifique de l'air. La notion de température virtuelle T_v est issue des travaux de Brutsaert [15] et intègre température réelle T et humidité spécifique ω au travers de l'expression empirique $T_v = (1 + 0,608 \cdot \omega)T$.

Autres flux : Le phénomène de transfert aux parois, décrit par Woolley [6], tient compte de la géométrie du bassin dans l'expression de U. Les autres flux tels que les précipitations ou l'apport calorifique des nageurs ne sont pas étudiés dans cet article.

3. Résultats de simulation et comparaison expérimentale

3.1. Cas n°1 : piscine collective de Vue Belle

Le modèle a été utilisé pour simuler le comportement du grand bassin de la piscine de Vue Belle, située à environ 520 m d'altitude dotée d'une surface de 625 m² et d'une profondeur moyenne de 2 m. La figure 2 présente l'évolution de la température de l'eau au cours de la journée du 20 juillet 2015 (hiver) et des flux échangés. On note la corrélation entre cette température et l'irradiation solaire qui apporte la chaleur au système. Les autres flux constituent les pertes vers l'extérieur et dont les influences sur la température sont notables surtout de nuit lorsque l'apport solaire est nul. La figure 3 présente la répartition proportionnelle des pertes où on note l'importance des deux principaux postes de déperditions que sont l'échange radiatif de la piscine vers l'extérieur et l'évaporation sur le bilan énergétique global.

Cette piscine est actuellement en cours d'équipement de moyens de mesure afin d'une part de valider le modèle et d'autre part de tester ultérieurement des protocoles de commande de chauffage visant à économiser la facture électrique. Dans le laps de temps, nous avons pu néanmoins confronter le modèle à l'expérience mais sur une piscine individuelle et les principaux résultats font l'objet de la suite.

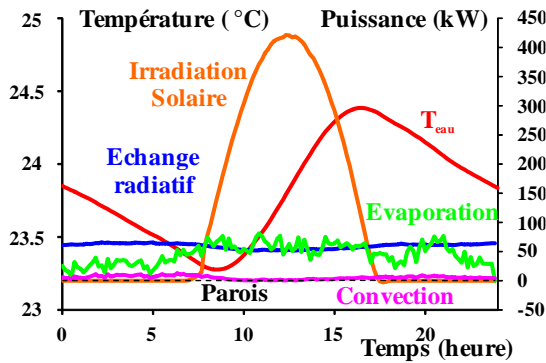


Figure 2 : Température de l'eau et flux échangés au cours de la journée du 20/07/2015

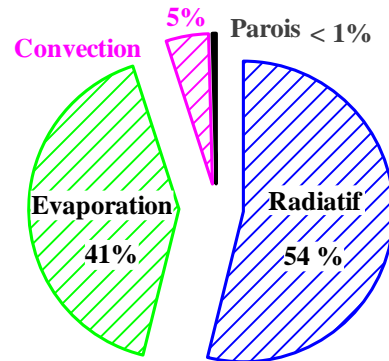


Figure 3 : Proportion des énergies mises en jeu au cours de la journée du 20/07/2015

3.2. Cas n°2 : piscine individuelle et comparaison expérimentale

Cette partie est consacrée à la confrontation des résultats de simulation à l'expérience afin de confirmer les choix d'équations explicités plus haut. Le protocole expérimental et l'analyse des résultats sont présentés.

La piscine instrumentée est un bassin privé aux dimensions modestes (8x4x1.5m) situé sur la commune de Sainte-Marie, ville côtière du Nord de la Réunion. Il est équipé de panneaux solaires mais qui n'ont pas été volontairement mis en service lors des campagnes de mesure présentées. Les données nécessaires aux simulations ont été acquises de janvier à mars 2015 par plusieurs capteurs de mesures. Les grandeurs mesurées sont la température de l'eau, l'irradiation globale, la température de l'air ambiant et son humidité relative ainsi que la vitesse du vent. Une sonde de température PT100 installée en sortie de la pompe du système de filtration du bassin permet l'acquisition heure par heure de la température de l'eau. Étant donné que la pompe ne fonctionne que de 9 h à 22 h, la température de l'eau n'est connue que sur cette plage horaire. Les données climatiques proviennent d'une station météorologique DAVIS Vantage Pro installée au bord du bassin. Ces données sont enregistrées au pas de temps de la minute.

Deux journées sont présentées et le comportement du bassin est caractérisé en pleine saison chaude (6 janvier 2015 Fig.4.a) et à la fin de celle-ci (11 mars 2015 Fig.4.b). Le modèle est initialisé par la température de l'eau mesurée à 9h du matin dans les deux cas étudiés.

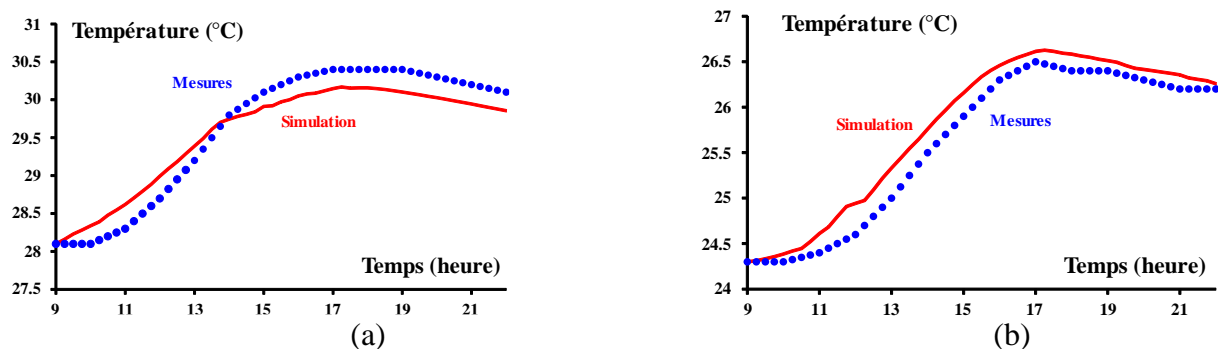


Figure 4 : Température de l'eau mesurée et simulée pour les journées du 6 janvier 2015 (a) et du 11 mars 2015.

Les évolutions des températures de l'eau mesurées (points bleus) et celle calculées (traits pleins rouges) montrent le comportement de la piscine pendant et à la fin de l'été austral (période chaude et humide). Dans les deux cas, les profils des températures sont similaires. La

température de l'eau augmente progressivement jusqu'à 15 ou 16 heures. Elle atteint sa valeur maximale vers 17 ou 18 heures selon les cas. Le début de soirée est alors marqué par une baisse de la température due à la diminution de l'apport solaire et un maintien des déperditions dues à l'évaporation et aux échanges radiatifs. Sur les 2 figures, un déphasage d'environ une heure est relevé. On l'observe principalement lors de la montée en température de l'eau et disparaît ensuite.

4. Discussion - Conclusion

L'observation des valeurs mesurées et celles calculées de la température de l'eau montrent une assez bonne fiabilité du modèle (écarts maximum de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$) pour les deux journées étudiées. Les modèles d'échanges et de transferts choisis semblent représenter assez fidèlement le comportement thermique de la piscine par rapport à nos objectifs et en tout cas avec une qualité identique aux travaux antérieurs menés par Woolley [6] ou par Hahne et Kübler [11].

Cependant, plusieurs faits peuvent expliquer les écarts et relativiser la qualité du protocole expérimental et des résultats. L'instrumentation a été réalisée sur une piscine privée de dimension réduite et ne bénéficie donc pas de l'effet d'inertie qu'aurait un bassin collectif et présente par conséquent quelques limites. Ainsi, la température de la piscine est représentée par un capteur de température placé en sortie de la pompe. Or, cette dernière ne fonctionne que de 9h à 22h pendant la campagne de mesure et l'eau du bassin est donc au repos durant la nuit et nous laisse à penser qu'un gradient thermique s'établit dans le bassin entre ces deux instants séparés de 11 h. Ainsi, la pompe installée n'est pas capable d'assurer en quelques minutes après son démarrage, une homogénéité de la température de l'eau dans la piscine. La partie supérieure est celle qui subit les phénomènes de transfert les plus importants et est par conséquent la plus froide [16], [17], [18]. Selon la configuration de l'installation, il peut s'agir de la température mesurée et elle n'est pas représentative de celle du bassin entier et explique principalement le retard observé entre la simulation et l'expérience au début de la journée. Des tests expérimentaux menés sur le grand bassin de la piscine municipale de Vue-Belle (qui fera l'objet de tests in situ prochainement) où les pompes sont en fonctionnement permanent, ont montré que le gradient thermique y est négligeable. Par ailleurs, d'autres biais ont été relevés. La piscine étudiée est entourée de murs et de végétation qui créent un masque solaire en début et fin de journée et réduisent par conséquent les apports solaires réels. De plus, la vitesse du vent est mesurée à 4 mètres de hauteur et n'est pas toujours représentative de l'écoulement au voisinage de la surface du bassin. Enfin, les modèles théoriques d'échange par radiation, évaporation et convection évaluent plus ou moins fidèlement les transferts à la surface.

Une campagne expérimentale sera menée sur la piscine municipale de Vue-Belle par le laboratoire et la société Sunny Shark durant la prochaine saison de chauffage (hiver austral 2016). Son instrumentation est actuellement en cours (station météorologique, capteurs de débit et de température). Elle permettra de modéliser l'apport calorifique des systèmes de chauffage, d'étudier d'éventuels phénomènes d'échelles, d'autres types de transferts thermiques non étudiés ici (activité humaine) et d'affiner et de valider le modèle tout en s'affranchissant des problèmes évoqués plus haut. A terme, l'objectif consistera à définir la meilleure stratégie de commande des systèmes de chauffage.

Références

- [1] Enertech, 'Campagne de mesures de la consommation électrique de 20 piscines individuelles'. Ademe, 2007.
- [2] A. Mousia and A. Dimoudi, 'Energy performance of open air swimming pools in Greece', *Energy Build.*, vol. 90, pp. 166–172, Mar. 2015.

- [3] W. Kampel, B. Aas, and A. Bruland, 'Energy-use in Norwegian swimming halls', *Energy Build.*, vol. 59, pp. 181–186, Apr. 2013.
- [4] C. D. Rakopoulos and E. Vazeos, 'A model of the energy fluxes in a solar heated swimming pool and its experimental validation', *Energy Convers. Manag.*, vol. 27, no. 2, pp. 189–195, Jan. 1987.
- [5] T. T. Chow, Y. Bai, K. F. Fong, and Z. Lin, 'Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating', *Appl. Energy*, vol. 100, pp. 309–317, Dec. 2012.
- [6] J. Woolley, C. Harrington, and M. Modera, 'Swimming pools as heat sinks for air conditioners: Model design and experimental validation for natural thermal behavior of the pool', *Build. Environ.*, vol. 46, no. 1, pp. 187–195, Jan. 2011.
- [7] Bowen, 'The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface', *Phys. Rev.*, 1926.
- [8] E. Sartori, 'A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces', *Sol. Energy*, vol. 68, no. 1, pp. 77–89, Jan. 2000.
- [9] H. Wu, R. Tang, Z. Li, and H. Zhong, 'A mathematical procedure to estimate solar absorptance of shallow water ponds', *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 7, pp. 1828–1833, Jul. 2009.
- [10] M. A. Jamal and J. A. Muaddi, 'Solar energy at various depths below a water surface', *Int. J. Energy Res.*, vol. 14, no. 8, pp. 859–867, 1990.
- [11] E. Hahne and R. Kübler, 'Monitoring and simulation of the thermal performance of solar heated outdoor swimming pools', *Sol. Energy*, vol. 53, no. 1, pp. 9–19, Jul. 1994.
- [12] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman*, 4th ed. Hoboken: John Wiley, 2013.
- [13] A. V. Rabadiya and R. Kirar, 'Comparative Analysis of Wind Loss Coefficient (Wind Heat Transfer Coefficient) For Solar Flat Plate Collector', *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2012.
- [14] E. E. Adams, D. J. Cosler, and K. R. Helfrich, 'Evaporation from heated water bodies: Predicting combined forced plus free convection', *Water Resour. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 425–435, Mar. 1990.
- [15] W. Brutsaert, *Evaporation into the Atmosphere Theory, History and Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982.
- [16] I. Bozkurt and M. Karakilcik, 'The daily performance of a solar pond integrated with solar collectors', *Sol. Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 1611–1620, May 2012.
- [17] I. Bozkurt and M. Karakilcik, 'The effect of sunny area ratios on the thermal performance of solar ponds', *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 323–332, Feb. 2015.
- [18] M. A. Hassab, I. A. Tag, I. A. Jassim, and F. Y. Al-Juburi, 'Solar pond design for Arabian gulf conditions', *Appl. Energy*, vol. 28, no. 3, pp. 191–213, Jan. 1987.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Commune de Saint-Paul pour la mise à disposition de la piscine municipale de Vue-Belle qui sert d'outil de mesure et de validation expérimentale dans le projet, et notamment Monsieur Willy Crescence pour son soutien précieux à la mise en œuvre opérationnelle des essais et Monsieur Jérôme Vigneron pour son aide technique dans le projet.

Nous remercions également la Technopole de La Réunion qui a soutenu et incubé ce projet, Nexa, ainsi que L'Europe, L'Etat, la Région Réunion et la CINOR qui ont participé à son financement.