



# Etat de l'art de la modélisation de l'évaporation de l'eau des piscines et comparaison expérimentale

Maité Bernhard, Olivier Marc, Emmanuel Quilichini, Jean  
Castaing-Lasvignottes

## ► To cite this version:

Maité Bernhard, Olivier Marc, Emmanuel Quilichini, Jean Castaing-Lasvignottes. Etat de l'art de la modélisation de l'évaporation de l'eau des piscines et comparaison expérimentale. Congrès Annuel de la Société Française de Thermique SFT 2018, May 2018, Pau, France. hal-03271093

**HAL Id: hal-03271093**

**<https://hal.univ-reunion.fr/hal-03271093>**

Submitted on 25 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Etat de l'art de la modélisation de l'évaporation de l'eau des piscines et comparaison expérimentale

Maité BERNHARD<sup>1,2,\*</sup>, Olivier MARC<sup>2</sup>, Emmanuel QUILICHINI<sup>1</sup>, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire 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

<sup>2</sup> Société Sunny Shark, 87, Route de la Confiance, 97438, Sainte-Marie

\* (auteur correspondant : maite.bernhard@univ-reunion.fr)

**Résumé** - Les piscines collectives sont l'objet d'importantes consommations énergétiques. Pouvoir anticiper le meilleur moment pour actionner le système de chauffage est une piste de sobriété énergétique mais suppose une bonne connaissance du comportement de la piscine et une anticipation des conditions météorologiques. L'énergie liée à l'évaporation de l'eau du bassin constitue la part la plus importante dans les bilans et doit donc être estimée avec justesse. Ce travail présente la grande majorité des modèles d'évaporation aujourd'hui disponibles dans la littérature et les compare aux résultats expérimentaux obtenus sur un site pilote situé à La Réunion.

## Nomenclature

$T$	Température, K		
$P$	Pression, Pa		
$h_{\text{évap}}$	Coefficient d'échange évaporatif, W/m <sup>2</sup> /Pa	rad	radiatif
$h_{\text{conv}}$	Coefficient d'échange convectif, W/m <sup>2</sup> /K	evap	évaporation
$\dot{Q}$	Flux de chaleur, W	conv	convection
$\dot{m}$	Débit massique, kg/s	pa	paroi
$C_p$	Capacité calorifique, J/kg/K	aux	auxiliaire
$L_c$	Longueur caractéristique, m	e	entrée
$L$	Chaleur latente d'évaporation, J/kg	s	sortie
$A$	Superficie du bassin, m <sup>2</sup>	w	eau
$M$	Masse molaire, kg/mol	a	ambient
$v$	vitesse du vent, m/s	sky	ciel
		sat	saturé
		r	point de rosée
		v	vapeur
		atm	atmosphérique
		air	air
<i>Symboles grecs</i>			
$\rho$	Masse volumique, kg/m <sup>3</sup>		
$\omega$	Humidité spécifique, -		

## 1. Introduction

Dans le contexte énergétique actuel, une bonne gestion des installations est indispensable pour atteindre l'objectif, pris notamment à la COP21 de Paris de 2015, de limiter à 2°C l'augmentation de la température mondiale. Les piscines collectives ont une consommation énergétique importante, d'environ 2800 kWh/m<sup>2</sup> de plan d'eau [1] : chauffage, déshumidification et production d'eau chaude sanitaire des douches. L'optimisation de la conception (dimensionnement des dispositifs de chauffage, de la ventilation et de la déshumidification) et du fonctionnement des installations est un enjeu pour atteindre les objectifs de sobriété énergétique. Le but de notre travail est d'anticiper la meilleure stratégie de chauffage des piscines de natation/loisir par simulation du comportement dynamique de la

piscine au cours du temps et le contrôle du chauffage. Plusieurs phénomènes physiques complexes et couplés entrent en jeu dans le système (Figure 1) :

- les pertes : par évaporation  $\dot{Q}_{\text{evap}}$ , par convection entre l'eau et l'air ambiant  $\dot{Q}_{\text{conv}}$ , par conduction entre l'eau et le sol au travers des parois  $\dot{Q}_{\text{pa}}$ , par rayonnement à grandes longueurs d'onde  $\dot{Q}_{\text{rad}}$  ;
- les apports solaires  $\dot{Q}_{\text{sol}}$  ;
- le type d'utilisation des installations comme le nombre de personnes dans l'eau ( $\dot{Q}_{\text{nageurs}}$ ,  $\dot{m}_s$ ), le remplissage  $\dot{m}_e$ , le chauffage  $\dot{Q}_{\text{aux}}$ , la présence et la mise en place régulière d'une couverture de protection thermique.

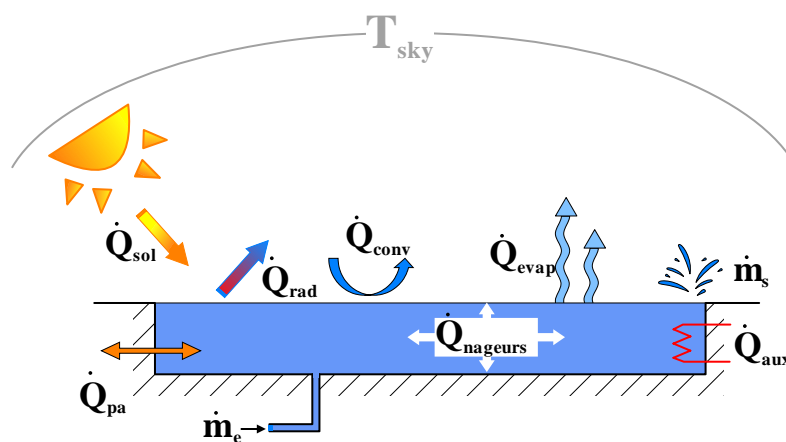


Figure 1 : Représentation schématique des différents échanges de chaleur et de matière au sein d'une piscine

La littérature présente de nombreuses modélisations de piscines ajustées au cas par cas pour des piscines inoccupées [2] et quelques pistes d'adaptation aux piscines occupées [3]. Les différents travaux effectués dans ce domaine ont montré que l'évaporation présente l'influence la plus importante sur le bilan énergétique (plus de 50% [4]). Les modèles issus de l'analogie avec la convection ont des constantes ajustées par identification paramétrique à l'aide d'expérimentations et présentent une dépendance forte à la vitesse d'écoulement de l'air. Ces études ont montré que la transposition de ces modèles à d'autres piscines engendre de grands écarts, même dans le cas d'un climat similaire. La comparaison entre des résultats expérimentaux issus d'une piscine extérieure située à La Réunion et ceux provenant de la simulation permet de mettre en évidence les modèles les plus adaptés à notre cas.

## 2. Le dispositif expérimental et la mesure de l'évaporation

### 2.1. Présentation des installations

Pour approfondir les connaissances sur le comportement des piscines, la piscine de Vue Belle à Saint Paul dans le quartier de la Saline Les Hauts (La Réunion) à 510 m d'altitude a été instrumentée. Deux bassins extérieurs font l'objet de cette étude : le grand bassin (ou bassin sportif) et celui d'initiation. La piscine est chauffée par une pompe à chaleur. La température est maintenue entre 27° et 28° toute l'année. La piscine est ouverte 7 jours/7

jours sauf fermeture exceptionnelle ou pour vidange. Les deux bassins sont couverts irrégulièrement durant l'hiver par une bâche de protection thermique.



Figure 2 : Photo du grand bassin (bassin sportif)

Pour pouvoir faire des études tenant compte de tous les phénomènes cités en introduction, la piscine a été équipée de différents moyens de mesure. Ainsi, une station météo iMETOS 3.3 a été installée à proximité immédiate des bassins. Elle mesure notamment la température ambiante, le rayonnement global incident, l'humidité relative et la vitesse du vent avec une période d'acquisition de quinze minutes.

Pour ce qui est des quantités d'eau, les bassins fonctionnent à débordement et sont alimentés à partir du fond par des grilles où l'eau circule à faible vitesse. Des essais préliminaires ont permis de constater que la température des bassins reste homogène à la fois dans les sens de la longueur et de la largeur mais aussi de la profondeur (écart maximum d'environ  $0.25^{\circ}\text{C}$ ). La température caractéristique de cette eau est mesurée après débordement et passage dans un bac tampon (cf Figure 3) avant la traversée de la Pompe A Chaleur (PAC) chargée de la chauffer. Compte tenu des débits de circulation importants principalement imposés par la réglementation (supérieur à  $150\text{ m}^3/\text{h}$  dans notre cas [5]), cette prise de température est fiable et représente fidèlement la température de l'eau du bassin pour chaque cas (en-dehors des périodes de remplissage automatique du bac tampon avec l'eau de ville). Le capteur a une incertitude de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ .

A cause de l'évaporation ou des pertes d'eau du fait des baigneurs, le niveau d'eau du bac tampon a tendance à baisser au cours du temps. Sa valeur fait également l'objet d'une acquisition et permet de suivre son évolution au cours du temps. A noter que lorsque ce niveau atteint le point le plus bas, un remplissage est effectué à partir de l'eau du réseau de ville (cf Figure 3). Le capteur a une incertitude de  $\pm 0.5\text{ mm}$ .

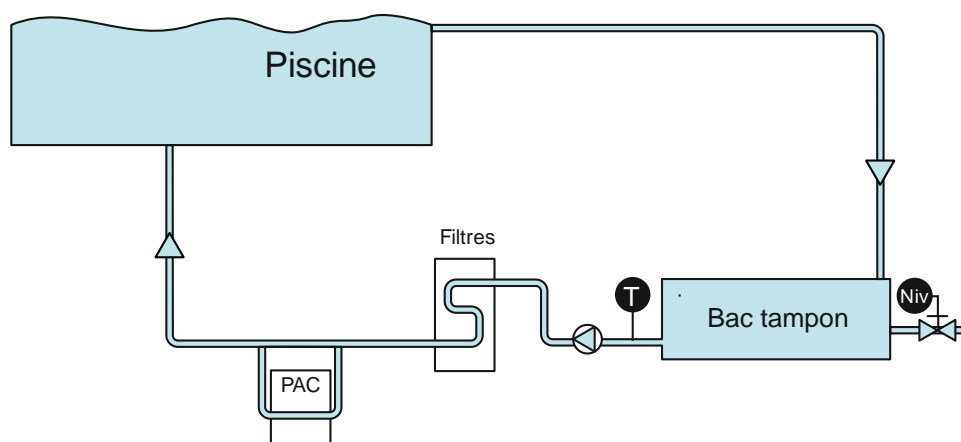


Figure 3 : Schéma de principe de fonctionnement des bassins et instruments de mesure

La présence d'une fuite d'eau sur le bassin d'initiation ne nous a pas permis de l'intégrer à cette étude qui ne traite que du grand bassin. Ce dernier est sensiblement aussi large que long (25 m) et conduit à une surface de bassin d'environ 625 m<sup>2</sup> et un volume d'eau d'approximativement 1500 m<sup>3</sup>.

## 2.2. Mesures de l'évaporation

La mesure de la variation du niveau au cours du temps permet d'évaluer l'évaporation du grand bassin, en respectant les conditions suivantes :

- Absence de couverture flottante isolante sur la surface du bassin ;
- Absence d'utilisateurs dans le bassin ;
- Absence de pluie sur la période occupée ;
- Absence de remplissage du bac tampon ;

Cette méthode a permis de sélectionner les périodes de mesures présentées dans le *Tableau 1*. Majoritairement les essais qui ont été retenus se déroulent en fin de soirée ou durant la nuit parce qu'ils permettent de s'affranchir des perturbations liées aux baigneurs.

Date des essais	Plage horaire	Quantité évaporée (l/m <sup>2</sup> /h)	Température ambiante (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse du vent (m/s)
11/12 octobre 2016	21h - 7h	0.526±0.008	17,2	66	1,5
20/21 novembre 2016	19h - 7h	0.423±0.006	19,9	75	1,2
24/25 décembre 2016	14h30 - 4h30	0.455±0.005	22,1	73	1,5

Tableau 1 : Périodes étudiées et évaporation du grand bassin

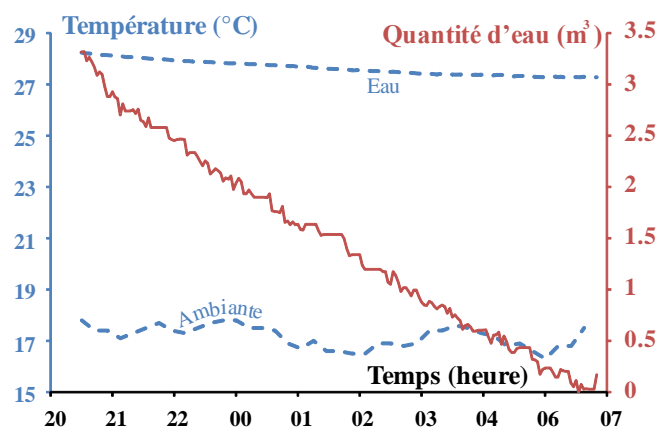


Figure 4 : Variation de la température ambiante, de l'eau et de la quantité d'eau évaporée pour la période du 11/12 octobre 2016

La Figure 4 présente l'évolution de la température du bain et la température ambiante pour la période du 11/12 octobre 2016 ainsi que la variation de la quantité d'eau perdue au cours de la même période. Sur toute la durée (10h), on constate une perte diminution mais progressive de la température de l'eau d'environ 1°C liée aux déperditions thermiques du bassin, une température ambiante dont la valeur se situe autour de 17°C et un niveau d'eau dans le bac tampon qui baisse régulièrement. Sur toute la durée, il s'est évaporé environ 3.32 m<sup>3</sup> d'eau dans le grand bain. Pour s'affranchir des caractéristiques géométriques, ces valeurs sont

converties en débit et rapportées à la surface du bassin et conduisent à une évaporation de  $0.526 \text{ l/h/m}^2$ .

Ce même calcul, effectué sur les 3 périodes concernées, conduit aux valeurs reportées dans le *Tableau 1* avec des taux d'évaporation du même ordre de grandeur mais dont les variations s'expliquent par la différence des conditions climatiques. La prise en compte de ces dernières dans l'évolution de l'évaporation fait l'objet de plusieurs modèles qui sont répertoriés et présentés dans la partie suivante.

### 3. Les modèles d'évaporation

Les modèles présentés par la suite sont pour des piscines non occupées. Ils permettent, selon les auteurs, de calculer soit le flux de chaleur  $\dot{Q}_{\text{évap}}$ , soit le débit massique d'évaporation  $\dot{m}$ . Les deux sont liés par  $\dot{Q}_{\text{évap}} = \dot{m}.L$  où  $L$  représente la chaleur latente d'évaporation.

Par analogie avec la convection, certains modèles d'évaporation prennent la forme de l'équation 1. La différence de température est remplacée par l'écart entre la pression de vapeur saturante à la température de l'eau et la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air. Le *Tableau 2* présente les valeurs des coefficients  $a$ ,  $b$  et  $n$  de l'équation 1 obtenues par les auteurs dans la littérature.

$$\begin{cases} \dot{Q}_{\text{évap}} = A \times h_{\text{évap}} (P_{\text{sat}}(T_w) - P_v) \\ h_{\text{évap}} = a \times v^n + b \end{cases} \quad (1)$$

	a	b	n	référence
Alagao <i>et al.</i>	0.040	0.074	1	[4]
Carrier	0.0782	0.089	1	[3]
Czarnecki	0.06683	0.05053	1	[4]
Hahne et Kübler	0.0583	0.0803	1	[4]
ISO TC 180	0.0669	0.0506	1	[6]
Madan Singh <i>et al.</i>	0	0.0741	1	[7]
McMillan	0.0250	0.0360	1	[6]
Rafael Almanza	0.03721	0	1	[8]
Richter (1)	0.05652*	0.04229	0.5	[9]
Richter (2)	0.05088	0.04523	0.84	[9]
Rohwer	0.0508	0.0850	1	[4]
Smith <i>et al.</i> (1)	0.0669	0.0638	1	[4]
Smith <i>et al.</i> (2)	0,059432	0.06764	1	[3]
Taga <i>et al.</i>	0.001296	0.088403	1	[4]
WMO (USSR)	0.0266	0.0369	1	[4]
WMO (USA)	0.0372	0	1	[4]
Y. P. YADAV <i>et al.</i>	0.0494	0.0741	1	[10]

Tableau 2 : Modèles d'évaporation basés sur une analogie avec la convection

Malgré leur écriture différente, c'est sensiblement la même approche d'analogie avec la convection qui est développée dans les modèles de Bowen et Kishore et Joshi qui figurent dans le *Tableau 3*. On trouve dans ce même tableau les modèles de Cooper et Rafeal Almanza qui prennent en compte de manière directe la différence de température entre l'eau et l'air.

D'autres modèles qui figurent dans le *Tableau 3*, élaborés plus récemment, prennent en compte des paramètres supplémentaires comme la longueur caractéristique pour le modèle de Sartori (2000) [4] et les régimes d'écoulement de l'air pour Shah (2014) [3]. Ce dernier auteur recommande dans ce cas de ne conserver que l'expression donnant la valeur la plus importante. Il propose en outre une adaptation pour les piscines occupées.

	Equation	référence
Cooper	$\dot{m} = A.0,0144 \frac{(P_{sat}(T_w) - P_v)}{L} \left[ (T_w - T_a) + \frac{(T_w + 273)(P_{sat}(T_w) - P_v)}{268900 - P_{sat}(T_w)} \right]^{1/3}$	[4]
Kishore et Joshi	$\dot{m} = A. \frac{h_{conv} M_w}{M_{air} P_a C_{pv}} (P_{sat}(T_w) - P_v) \quad h_{conv} = 5,7 + 3,8v$	[4]
Rafeal Almanza (1)	$\dot{Q}_{\text{évap}} = A \times 0,0075 \left( 3.53 \times \theta^{1/3} + 4.08 \times v \right) (P_{sat}(T_w) - P_v)$ $\theta = T_w^v - T_a^v \quad T_w^v = \frac{(T_w + 273.2)}{1 - 0.378 \frac{P_{sat}(T_w)}{P_{atm}}} \quad T_a^v = \frac{(T_a + 273.2)}{1 - 0.378 \frac{P_v}{P_{atm}}}$	[8]
Ratio de Bowen	$\frac{\dot{Q}_{conv}}{\dot{Q}_{\text{évap}}} = 0,000605 \times P_{atm} \frac{(T_w - T_a)}{(P_{sat}(T_w) - P_{sat}(T_a))}$	[11]
Sartori	$\dot{m} = A.(0,00407 \times v^{0,8} Lc^{-0,2} - 0,01107 \times Lc^{-1}) \times \frac{(P_{sat}(T_w) - P_r)}{P_{atm}}$	[4]
Shah	Convection naturelle : $\dot{m} = A.5\rho_w(\rho_r - \rho_w)^{(1/3)}(\omega_w - \omega_r)$ Convection forcée (vitesse < 0.15m/s) : $\dot{m} = A.0,00005(P_w - P_r)$ Convection forcée (> 0.15m/s) : $\dot{m} = A.0,00005 \left( \frac{v}{0,15} \right)^{0,7} (P_w - P_r)$	[3]

Tableau 3 : Modèles d'évaporation plus élaborés

## 4. Discussion et conclusion

Pour chacun des modèles, les quantités d'eau évaporées sont évaluées à chaque pas de temps et pour les conditions météorologiques des essais (données par la station météo : température, vitesse du vent et humidité relative principalement). La quantité évaporée totale est calculée par intégration numérique au moyen de la méthode des trapèzes sur la période considérée des essais (soit 10, 12 et 14 heures, cf tableau 1).

La Figure 5 compare les valeurs calculées par les différents modèles (histogramme) avec celles obtenues expérimentalement (droites horizontales). Elle montre que 7 modèles se rapprochent du comportement observé : Smith et al. [4] , ISO TEC 180 [6] , Rohwer [4] , Y. P. Yadav et al. [10] , Czarnecki [4] , Hahne and Kübler [4] et Shah [3]. Le modèle de Carrier [3] surestime l'évaporation et tous les autres la sous-estiment, en particulier les modèles de Madan Singh *et al.* [7] et Cooper [4], qui sont indépendants de la vitesse du vent.

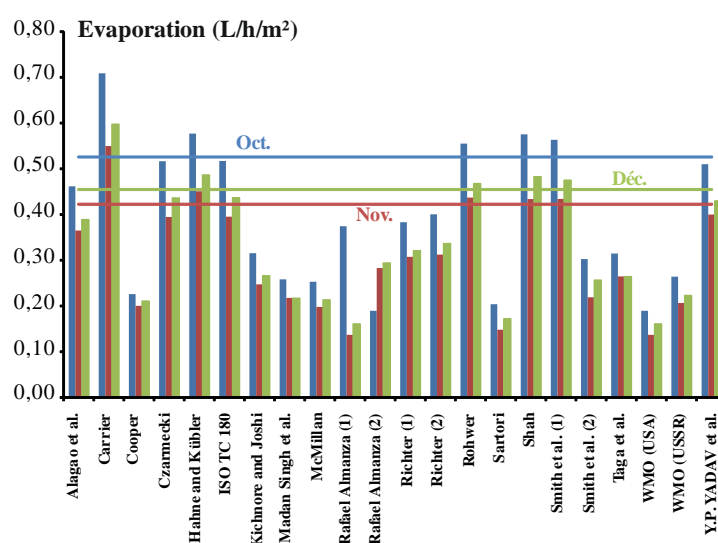


Figure 5 : Comparaison de l'évaporation mesurée expérimentalement et des valeurs issues des modèles

Sur ces 7 meilleurs modèles, 6 sont de la forme de l'équation 1 et ne prennent pas en compte les différents régimes d'écoulement de l'air et seul le modèle développé par Shah [3] le fait. Cette particularité ajoutée à la qualité de la comparaison avec l'expérience nous font retenir cette option dans un premier temps.

Beaucoup des modèles présentés sont construits dans des conditions expérimentales propres et nécessairement différentes des nôtres, ce qui explique les disparités de résultats. Un des objectifs à terme pourrait constituer en la détermination de coefficients propres (a, b, n) à la piscine étudiée (équation 1). Nous envisageons prochainement de réaliser des essais durant l'hiver austral où les conditions météorologiques sont assez différentes de celles présentées (en termes de température ambiante et d'humidité relative) afin de valider ou non ces choix. Parallèlement et pour compléter ces travaux, une nouvelle campagne d'essais a déjà démarré de sorte à affiner notre sélection : mesure au plus près du niveau de l'eau de la température de l'air, de son humidité et de sa vitesse d'écoulement.

Une fois le modèle choisi, les paramètres déterminés et la validation effectuée, il sera intégré à la simulation globale de la piscine qui tient compte de l'ensemble des transferts en régime transitoire que nous avons présentés par ailleurs [12].



## Références

- [1] Enertech, « Campagne de mesures de la consommation électrique de 20 piscines individuelles ». Ademe, 2007.
- [2] K. Kaci, M. Merzouk, N. K. Merzouk, M. El Ganaoui, S. Sami, et R. Djedjig, « Dynamic simulation of hybrid-solar water heated olympic swimming pool », *Energy Procedia*, vol. 139, p. 750- 757, déc. 2017.
- [3] M. M. Shah, « Methods for calculation of evaporation from swimming pools and other water surfaces », *ASHRAE Trans.*, vol. 120, n° 2, p. 3–17, 2014.
- [4] E. Sartori, « A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces », *Sol. Energy*, vol. 68, n° 1, p. 77–89, 2000.
- [5] *Code de la santé publique - Article D1332-6*, vol. D1332-6. .
- [6] E. Ruiz et P. J. Martínez, « Analysis of an open-air swimming pool solar heating system by using an experimentally validated TRNSYS model », *Sol. Energy*, vol. 84, n° 1, p. 116- 123, janv. 2010.
- [7] M. Singh, G. N. Tiwari, et Y. P. Yadav, « Solar energy utilization for heating of indoor swimming pool », *Energy Convers. Manag.*, vol. 29, n° 4, p. 239–244, 1989.
- [8] R. Almanza et J. Lara, « Energy requirements for a swimming pool through a water-atmosphere energy balance », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 37–39, 1994.
- [9] E. Hahne et R. Kübler, « Monitoring and simulation of the thermal performance of solar heated outdoor swimming pools », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 9–19, 1994.
- [10] Y. P. Yadav et G. N. Tiwari, « Analytical model of solar swimming pool: Transient approach », *Energy Convers. Manag.*, vol. 27, n° 1, p. 49- 54, janv. 1987.
- [11] E. K. Webb, « On estimating evaporation with fluctuating Bowen ratio », *J Geophys Res*, vol. 65, n° 10, p. 3415- 3417, oct. 1960.
- [12] D. Hoarau, O. Marc, E. Quilichini, et J. Castaing-Lasviguottes, « Simulation et analyse des consommations énergétiques des piscines en milieu tropical. », in *Actes du congrès de la société française de thermique*, 2016.

## 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. Ces remerciements vont aussi à Monsieur Willy Crescence pour son soutien précieux à la mise en œuvre opérationnelle des essais et à Monsieur Jérôme Vigneron pour son appui technique dans le projet.