



HAL
open science

Consommations énergétiques des piscines collectives : modélisation, validation expérimentale et prédiction de la stratégie de chauffage des bassins

Maité Bernhard

► To cite this version:

Maité Bernhard. Consommations énergétiques des piscines collectives : modélisation, validation expérimentale et prédiction de la stratégie de chauffage des bassins. Thermique [physics.class-ph]. Université de la Réunion, 2023. Français. NNT : 2023LARE0008 . tel-04609224

HAL Id: tel-04609224

<https://theses.hal.science/tel-04609224>

Submitted on 12 Jun 2024

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.

Université de la Réunion

THESE

Pour obtenir le grade de docteur
Spécialité doctorale « Physique Energétique »

Consommations énergétiques des piscines collectives : modélisation, validation expérimentale et prédiction de la stratégie de chauffage des bassins.

Présentée et soutenue par

Maïté BERNHARD

le mardi 6 Juin 2023

Composition du jury

Pierre Neveu	Professeur, Université de Perpignan	Président du jury, rapporteur
Nolwenn Le Pierres	Professeure, Université Savoie Mont Blanc	Rapportrice
Patrick Salagnac	Professeur, Université de la Rochelle	Examinateur
Béatrice Morel	Maître de conférences Université de la Réunion	Examinatrice
Emmanuel Quilichini	Ingénieur, Président Sunny Shark (CIFRE)	Invité
Olivier Marc	Maître de conférences, Université de la Réunion	Encadrant
Jean Castaing-lasvignottes	Maître de conférences HDR, Université de la Réunion	Directeur de thèse

Résumé

Mots clés : piscines, modélisation, simulation, efficacité énergétique, validation expérimentale

L'objectif de cette thèse est de mettre en place des outils permettant d'évaluer les économies financières et énergétiques réalisables en utilisant un contrôle-commande prédictif pour le chauffage des piscines collectives extérieures tout en respectant le confort des nageurs. Pour cela, un modèle numérique a été développé afin de prédire la consommation énergétique du chauffage et l'évolution de la température de l'eau au cours de la journée (la zone de confort déterminée par l'exploitant se situe entre 27°C et 29°C). Une attention particulière a été portée au phénomène d'évaporation, identifié comme la principale source de refroidissement du bassin. La fiabilité des résultats de simulation des bassins a été établie grâce à plusieurs campagnes de mesures expérimentales réalisées sur un bassin en environnement réel sur l'île de la Réunion. Le modèle a ensuite permis de simuler l'impact de différentes solutions visant à réduire le coût de fonctionnement de l'installation et/ou l'énergie consommée tout en assurant le confort des usagers. Dans notre cas d'application le chauffage est assuré par une pompe à chaleur. En plus de la simulation du fonctionnement actuel qui fait office de référence dans la suite, plusieurs scénarii sont étudiés : la mise en place nocturne d'une couverture isolante, une régulation du chauffage qui interdit d'allumer la pompe à chaleur durant les heures de pointe (qui permet une économie financière uniquement), une régulation prédictive du chauffage qui prend en compte les horaires d'ouverture mais aussi la météo et le prix de l'électricité.

Des gains d'énergie de 46% à 51% et des réductions du coût de fonctionnement de 30% à 45% sont observés.

Abstract

Key words: swimming pools, modelling, simulation, energy efficiency, experimental validation

This thesis work aims to establish tools to assess the financial and energy savings possibilities that can be achieved with a Model-based Predictive Control (MPC) of the heating for collective outdoor swimming pools while respecting the swimmer's comfort. In that order, a numerical model based on physical consideration has been developed to predict the energy consumption of the heating and the water temperature evolution during the day (the comfort zone determined by the operator is between 27°C and 29°C). Particular attention has been given to evaporation, identified as the leading cause of energy losses. The reliability of the simulation results of the pools has been established by several experimentations realised on a real outdoor swimming pool in Reunion Island. The model has been used to simulate the impact of several solutions whose goal is to reduce the operating cost of the installation and/or the energy consumption and at the same time to ensure the swimmer's comfort. In our application case, the heating is produced by a heat pump. In addition to the simulation of the current operation strategy, which serves as a reference in the following work, several scenarii are studied: the installation of an insulating blanket at night, a heating regulation that banned the use of the heat pump during peak load periods (this option permits only economical savings), and a Model-based Predictive Control (MPC) of the heating that considers the opening hours, the weather and the electricity cost.

The energy saving goes from 46% to 51% and the financial one's from 30% to 45%.

Remerciements

Cette thèse n'aurait pas pu être menée à terme sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

Tout d'abord, je tiens à remercier Nolwenn Le Pierres et Pierre Neveu pour avoir accepté de rapporter cette thèse mais également Patrick Salagnac et Béatrice Morel pour leur participation au jury de thèse en tant qu'examineur.

Merci à Sunny Shark et l'ANRT pour le financement de cette thèse.

Je remercie Emmanuel Quilichini, Jean Castaing-lasvignottes et Olivier Marc de m'avoir fait confiance, donné l'opportunité de réaliser et les moyens de réaliser cette thèse. Mais aussi pour leur encadrement, leur soutien.

Je remercie la mairie de Saint Paul, pour avoir permis de mener les expérimentations sur leurs piscines. Willy Crescence et les équipes de la piscine du bois de nèfles et de Vue belle pour leur aide et leur accueil sur les différents sites.

Merci à Jérôme Vigneron, Paul Guillou, Emmanuel Quilichini et Jean Castaing-lasvignottes pour leur engagement dans la mise en place de l'expérimentation sur le site du Bois de Nèfles et les acrobaties au haut du mat d'éclairage. Merci à Xavier Curco pour l'installation des capteurs de température sur les canalisations.

Merci à Sylvain Serra, Mathieu David, Stéphane Gibout et Laetitia Adelard pour la participation et leur précieux conseils lors des différents comités de suivi de thèse.

Merci à Mickaël Malzani pour la relecture de ma thèse.

Merci à toute l'équipe de Sunny Shark, aux doctorants du laboratoire PIMENT pour les bons moments partagés et leur soutien.

Merci à mes amis, à ma famille, ma sœur, mes parents, ma mamie et mon beau-frère pour leur présence et soutien durant cette thèse.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Table des matières	6
Liste des figures	10
Liste des tableaux	14
Nomenclature	16
Introduction	21
Chapitre 1 : Etat de l'art des modèles de bassin de piscines collectives	27
I. Les performances énergétiques des piscines.....	29
1. Les indicateurs de performance énergétique des piscines	29
2. Les performances énergétiques des piscines.....	29
3. La modélisation des bassins de piscine dans la littérature	33
II. L'évaporation de l'eau du bassin.....	36
1. La modélisation de l'évaporation dans la littérature	36
2. L'analyse des modèles d'évaporation	40
III. Les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde (infrarouge) avec l'environnement 44	
1. La modélisation de la température équivalente du ciel dans la littérature.....	45
2. L'analyse des modèles de température du ciel.....	47
IV. Le gain solaire	50
1. La modélisation du flux radiatif solaire dans la littérature	50
2. L'analyse des modèles de flux radiatif solaire.....	51
V. La convection entre l'air et l'eau du bassin.....	52
VI. La conduction entre l'eau du bassin et le sol	55
VII. La couverture.....	56
VIII. L'utilisation	58
IX. Autres phénomènes physiques	62
X. L'impact du choix de modèle évaporatif et radiatif à grande longueur d'onde sur le bilan. 63	
XI. L'impact des différents phénomènes physiques sur le bilan énergétique du bassin dans la littérature	65

XII.	Conclusion	70
Chapitre 2 : L'expérimentation	73
I.	L'expérimentation sur les piscines dans la littérature	75
1.	Les mesures météorologiques dans la littérature.....	75
2.	Le flux radiatif descendant dans la littérature	76
3.	La mesure de l'évaporation de l'eau dans la littérature	77
4.	La validation expérimentale des modèles de bassins dans la littérature	79
II.	Présentation du site de Vue belle Saint Paul	79
1.	Le principe de fonctionnement d'une piscine à hydraulicité inversée partielle	81
2.	L'évaporation et les fuites sur le site de Vue Belle.....	83
3.	Les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde	84
4.	Nouvelle campagne de mesures	84
III.	Le site expérimental de bois de nêfles (Saint Paul).....	85
1.	L'utilisation de l'installation.....	87
2.	Les installations techniques.....	87
3.	L'instrumentation	88
IV.	Analyse des données mesurées.....	94
1.	Le fonctionnement des installations	95
2.	Mesure des fuites	99
3.	Mesure du débit d'eau évaporé	100
4.	Pertes radiatives à grande longueur d'onde	102
5.	Données sans occupation	104
6.	Données avec couverture.....	105
7.	Régulation du chauffage des bassins.....	107
8.	COP pompe à chaleur	109
V.	Conclusion	111
Chapitre 3 : La comparaison expérimentation/modèle validation du modèle du bassin	..	113
I.	Evaporation	115
II.	Pertes radiatives à grandes longueurs d'onde (infrarouge) avec l'environnement ...	121
III.	Le modèle du bassin	124
IV.	Convection et conduction.....	130
V.	Evolution de la température du bassin sans occupation	133
VI.	La couverture.....	135

VII.	L'occupation	136
VIII.	Prédiction de l'énergie nécessaire au chauffage.....	138
IX.	Conclusion	140
Chapitre 4 : Evaluation des économies financières et énergétiques réalisables tout en assurant le confort des usagers		143
I.	Les conditions de simulation	145
II.	Les indicateurs de confort et d'économies	147
1.	Confort.....	147
2.	Les indicateurs de la consommation d'énergie et du coût de fonctionnement	148
III.	Simulation du fonctionnement actuel.....	148
1.	Présentation de la régulation du chauffage	148
2.	Présentation du comportement du chauffage et de la température du bassin	149
3.	Performance et confort	150
4.	Bilan des flux.....	151
IV.	Simulation du fonctionnement avec une couverture	152
1.	Comparaison avec et sans couverture sur une nuit	152
2.	Choix de la période de mise en place de la couverture	154
3.	Performance et confort	155
4.	Bilan des flux.....	157
V.	Simulation avec une couverture et sans chauffage durant les heures de pointe... ..	158
1.	Présentation de la régulation du chauffage	158
2.	Présentation du comportement du chauffage et de la température du bassin	158
3.	Performance et confort	159
VI.	Simulation avec couverture d'une régulation prévisionnelle du chauffage	160
1.	Présentation de la régulation du chauffage	160
2.	Présentation du comportement du chauffage et de la température du bassin	162
3.	Performance et confort	164
VII.	Conclusion	165
Conclusion générale		169
Bibliographie		175
Annexe 1 : Matériel de mesure expérimentale sur le site de bois de nêfles		187
Annexe 2 : Matériel de mesure expérimentale sur le site de bois de nêfles		188
Annexe 3 : Débit d'eau évaporé.....		190

**Annexe 4 : The determination of the Evaporation model for an outdoor swimming pool:
the case of tropical climate. 191**

Liste des figures

Figure 1 : La part des communes gérant des piscines à gauche et la répartition des consommations énergétique des équipements communaux par poste à droite. Les données sont issues du rapport de 2019 sur les données de 2017 de l'ADEME sur les dépenses énergétiques des collectivités locales. EPCI : établissement Publics de Coopération Intercommunale et dans ce cas précis en particulier celles à fiscalité propre. [5].....	23
Figure 2 : Consommations et sources d'énergie utilisées pour le chauffage des piscines de communes françaises [5]	24
Figure 3 : Schéma des phénomènes physiques influençant le bilan thermique et massique du bassin.....	34
Figure 4 : Débit évaporatif surfacique en fonction respectivement de la température ambiante, de l'humidité ambiante et de la vitesse du vent	41
Figure 5 : Débit d'évaporation moyen, écart type , maximum et minimum des modèles présentés pour sept conditions météorologiques différentes.	42
Figure 6 : Vitesse du vent en fonction de la hauteur modélisée sur le site expérimental	43
Figure 7 : Température du ciel en fonction de la température ambiante pour une humidité de 50% et sans nuages	48
Figure 8 : Température du ciel en fonction de l'humidité relative ambiante pour une température ambiante de 15°C et sans nuages.....	48
Figure 9 : Température du ciel en fonction de l'ennuagement pour une température ambiante de 15°C et une humidité de 50%	49
Figure 10 : Absorbance de la piscine en fonction de l'angle d'incidence et de l'absorbance des parois (valeurs présentées de 0.2, 0.5 et 0.8)	51
Figure 11 : Angle d'incidence des rayons de soleil directs sur la piscine à La Réunion	52
Figure 12 : Couche limite au-dessus d'une plaque plane, représentation issue de [116].....	53
Figure 13 : Schéma des phénomènes physiques influençant le bilan du bassin avec une couverture	57
Figure 14 : Impact d'un nageur sur la surface de l'eau	58
Figure 15 : Modélisation des pertes d'un bassin de 12,5 m par 25 m dans les conditions présentées dans le Tableau 8 pour trois modèles évaporatif : Almanza et al., Raimundo et al. et McMillan et al. et 2 modèles de pertes radiatives : Wihlle et al. et Berdhal et al.	64
Figure 16 : Parts des pertes pour les différents phénomènes physiques pour les 6 cas présentés sur la Tableau 8.	64
Figure 17 : Pertes thermiques de bassin intérieur : Kuyumcu et al. [44] d'une piscine en Turquie avec une température de l'eau de 26°C et de l'air de 20°C, Brambley et al. [118] au Missouri (Etat-Unis d'Amérique), avec une température de l'eau de 29°C et celle de l'air à 28 C et des bassins extérieurs : le site 4 [26],7 [80], le site 10 [62], [141], [142] et le site 11 [94] décrits dans le Tableau 9.	67
Figure 18 : Carte mondiale des climats [145] et localisation des piscines ayant servis aux travaux du Tableau 9, en bleu ceux ayant fait l'objet d'expérimentation et en orange ceux ayant uniquement l'objet de modélisation.....	69

Figure 19 : Station météo de mesure de la vitesse du vent, de la température et l'humidité de l'air et pyranomètre installée pour l'expérimentation à 0.5 m de l'eau par Ruiz et al. [62]	76
Figure 20 : Les piscines expérimentales monitorées par Smith [139] et la jauge de mesure du niveau du bassin extérieur	78
Figure 21 : Dispositif expérimental développé par Inan [92]	78
Figure 22 : Photo du grand bassin (bassin sportif) du site de Vue Belle (Saint Paul)	80
Figure 23 : Schéma de fonctionnement d'une piscine à hydraulicité inversée partielle	82
Figure 24 : Un bac tampon et un filtre à sable du grand bassin de la piscine de Vue Belle	82
Figure 25 : Evolution du débit évaporatif mesuré au cours du temps (calculé à partir de l'évolution de la différence de niveau sur la période évalué et ramené à une surface de 1 m ²)	83
Figure 26 : Emplacement de la piscine expérimentale à La Réunion [159], Coordonnée GPS : 20°59'58.9"S 55°19'44.7"E	85
Figure 27 : Emplacement de la piscine dans le quartier de Bois de nèfles [159]	86
Figure 28 : Environnement proche du bassin de la piscine	86
Figure 29 : Pompe à chaleur et filtres à sable de la piscine du bois de nèfles à Saint Paul	88
Figure 30 : Photo de la station météorologique	89
Figure 31 : Exemple de mesures de la température, de l'humidité ambiante, du rayonnement solaire, du rayonnement à grandes longueurs d'onde, de la vitesse du vent et des précipitations sur le site expérimental pour la journée du 1 novembre 2020.	90
Figure 32 : Schéma de l'instrumentation	91
Figure 33 : Température de l'eau du bassin, à l'entrée et à la sortie de la pompe à chaleur, du débit dans la pompe en chaleur et de la consommation électrique cumulée de la pompe à chaleur le 1 novembre 2020	92
Figure 34 : Evolution du niveau dans le bac tampon et du débit dans le réseau de filtration le 1 novembre 2020	93
Figure 35 : Nombre de nageurs au cours d'une journée le 9 septembre 2020	93
Figure 36 : Température de l'eau de ville entre le 9 et le 28 juillet 2020	94
Figure 37 : Photo du mini bac et graphique de l'évolution du niveau dans le bac tampon	95
Figure 38 : Evolution du niveau dans le bac tampon et température de l'eau	96
Figure 39 : Evaluation des températures d'entrée et de sortie de la pompe à chaleur	97
Figure 40 : Evolution du nombre de nageurs et du niveau dans le bac tampon au cours du temps	98
Figure 41 : Débit évaporatif et conditions expérimentales en termes de température, d'humidité relative de l'air et de la vitesse du vent, mesures réalisées entre septembre et novembre 2020	101
Figure 42 : Evolution du rayonnement solaire et du flux descendant du ciel au cours du temps pour les journées du 21 et 22 novembre : une sans nuages et un jour nuageux	103
Figure 43 : Température de ciel et température ambiante du temps pour les journées du 21 et 22 novembre : une sans nuages et un jour nuageux	103
Figure 44 : Evolution de la température de l'eau du bassin et de la pompe à chaleur sans occupation	104

Figure 45 : Evolution de la température de l'eau sans (20 décembre) et avec couverture (11 novembre).....	106
Figure 46 : Chauffage de l'eau avec et sans couverture.	106
Figure 47 : Régulation classique du chauffage du bassin, en bleu la température de l'eau du bassin et en orange celle à la sortie du chauffage.	107
Figure 48 : Régulation du chauffage en journée en raison des nuisances occasionnées par la pompe à chaleur en novembre 2020.	108
Figure 49 : Période de chauffage et évolution de la température de l'eau du bassin sur 4 jours en septembre	109
Figure 50 : Mesure du COP de la pompe à chaleur en fonction de la température ambiante.	110
Figure 51 : Eau évaporée pour les 15 modèles pour la période 1 en bleu et le débit évaporatif expérimental horizontalement.	117
Figure 52 : Erreur relative moyenne par modèle.....	118
Figure 53 : Comparaison du modèle identifié (forme B) et des modèles de McMillan, ISO TC 180 et Smit	121
Figure 54 : Evolution de la température de ciel et du flux radiatif infrarouge descendant mesuré et modélisée au cours du temps pour une journée dégagée (21 novembre) et une couverte (22 novembre), les modèles sont présentés dans le chapitre 1.....	123
Figure 55 : Schéma de la modélisation de l'évolution du comportement du bassin au cours du temps.....	124
Figure 56 : Schéma de principe de la modélisation de l'évolution du comportement du bassin au cours du temps.....	125
Figure 57 : Evolution de la température de l'eau mesurée (croix) et modélisée (ligne) durant la nuit c avec chauffage.....	131
Figure 58 : Evolution de la température de l'eau mesurée (croix) et modélisée (ligne) durant la nuit j sans chauffage.....	131
Figure 59 : Sommes des flux convectifs et conductifs mesurés en bleu et modélisés en orange pour 14 nuits.	132
Figure 60 : Gain solaire modélisé et mesuré pour trois journées.....	133
Figure 61 : Evolution de la température de l'eau mesurée et modélisée pour les jours a, b et c dont les conditions météorologiques sont décrites dans le Tableau 22.....	134
Figure 62 : Nuit du 19 décembre et nuit du 20 décembre avec couverture.	135
Figure 63 : Impact simulé de l'occupation de la piscine sur la température de l'eau et sur les flux échangés sur 24h.....	137
Figure 64 : Schéma de la modélisation de la consommation de chauffage entre le 8 et le 18 septembre 2020	138
Figure 65 : Evolution de la température de l'eau mesurée (en croix) et simulé (en trait plein) entre le 10 septembre et le 12 septembre et des périodes de chauffages simulées (trait noir) et mesuré (croix bleues) sur la même période.	139
Figure 66 : Schéma de principe de la simulation d'une année	145
Figure 67 : Horaires d'utilisation de la piscine et de mise en place de la couverture et zone tarifaire pour une journée de semaine et le week-end.	146

Figure 68 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec la régulation actuelle (Température de consigne basse 27.5°C et température de consigne haute 29°C) scénario TOR_29 entre le 16 et 19 juin inclus.....	149
Figure 69 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec la régulation actuelle (Température de consigne basse 27.5°C et température de consigne haute 28.5°C) scénario TOR_28.5 entre le 16 et le 19 juin	150
Figure 70 : Part des différents phénomènes physiques (ensolleillement, convection, évaporation, conduction et les apports en eau neuve) dans les pertes globales sur l'année.....	152
Figure 71 : Evolution de la température de l'eau sur 24h avec et sans couverture.....	153
Figure 72 : Impact de la couverture sur les différents flux, bilan sur 24h	153
Figure 73 : Evolution de la température de l'eau du bassin au mois le plus chaud de l'année (janvier) avec couverture (scénario TOR_couv_12m).....	154
Figure 74 : Evolution de la température de l'eau du bassin au mois le plus chaud de l'année (janvier) sans couverture (scénario TOR_couv_9m)	155
Figure 75 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec la régulation actuelle (Température de consigne basse 27.5°C et température de consigne haute 28.5°C) et avec couverture entre le 16 et le 19 juin	156
Figure 76 : Énergie échangée par le bassin sur une année par phénomène physique pour les scénarii TOR_28.5 et TOR_couv_9m.....	157
Figure 77 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec une interdiction de chauffage durant les heures de pointe sur le réseau électrique (scénario TORéco_couv) et avec couverture entre le 16 et le 19 juin.....	159
Figure 78 : Schéma de principe de la sélection des créneaux de chauffage de l'eau du bassin.	161
Figure 79 : Evolution du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec un contrôle commande prédictif (scénario Prév_couv) et avec couverture entre le 16 et le 19 juin	163
Figure 80 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec un contrôle commande prédictif (scénario Prév_couv) et avec couverture au mois de janvier	163
Figure 81 : Consommation de chauffage et gains solaires sur une année, économies d'énergies et de coût et confort des usagers pour les différents scénarii	166

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs numériques des coefficients de modèles évaporatifs de la forme <1.4>	37
Tableau 2 : Valeurs numériques des coefficients de modèles évaporatifs de la forme <1.7>	38
Tableau 3 : Coefficient modèle empirique de convection	52
Tableau 4 : Coefficient modèle adimensionnel de convection	54
Tableau 5 : valeur de la conductivité	55
Tableau 6 : Valeurs numériques des modèles évaporatifs avec utilisation indépendants du nombre de nageurs	59
Tableau 7 : Valeurs numériques des modèles évaporatifs avec utilisation dépendants du nombre de nageurs	59
Tableau 8 : Conditions de modélisation	63
Tableau 9 : Localisation de plusieurs piscines expérimentales et simulées dans la littérature	68
Tableau 10 : mesures météorologiques	76
Tableau 11 : Débits de fuite mesurés	99
Tableau 12 : Conditions météorologiques sur la journée avec couverture et sans couverture	105
Tableau 13 : Mesures du COP de la pompe à chaleur	110
Tableau 14 : Hauteur de mesure du vent en fonction des modèles	116
Tableau 15 : Les modèles évaporatifs identifiés sur les périodes a à f	119
Tableau 16 : Moyenne de l'erreur relative sur les données de validation pour les modèles de la littérature et ceux identifiés.	120
Tableau 17 : 23246 points entre le 9 juillet 2020 et le 23 mai 2021	122
Tableau 18 : Modèle du bassin sans couverture	127
Tableau 19 : Modèle du bassin avec couverture	128
Tableau 20 : Valeurs numériques des différents paramètres physiques des modèles	129
Tableau 21 : Conditions météorologiques, puissance de chauffage et flux convectif et conductif mesuré et modélisé ainsi que l'erreur relative du modèle comparé à la mesure.	132
Tableau 22 : Donnée ayant servi à la validation du modèle du bassin sans occupation et sans couverture	133
Tableau 23 : Echelle de sensibilité des usagers servant pour évaluer le confort des usagers.	148
Tableau 30 : Prix de l'énergie en c€/kWh	148
Tableau 24 : Confort des usagers dans la situation actuelle et en passant la température de consigne haute à 28.5 °C (contre 29 °C initialement).	151
Tableau 25 : Consommation énergétique et financière du chauffage d'un tel bassin avec la régulation actuelle et en passant la température de consigne haute de la température à 28.5°C (contre 29°C initialement).	151
Tableau 26 : Flux par phénomène physique intégré sur l'année simulée.	152
Tableau 27 : Le confort des nageurs avec une couverture	156

Tableau 28 : Les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage avec une couverture (scénario TOR_couv_12m et TOR_couv_9m).	156
Tableau 29 : Énergie échangée par le bassin sur une année par phénomène physique pour les scénarii TOR_couv_12m et TOR_couv_9m.....	157
Tableau 31 : Les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage avec une couverture sans chauffage durant les heures de pointe (scénario TORéco_couv).	160
Tableau 32 : Le confort des usagers avec une couverture sans chauffage durant les heures de pointe (scénario TORéco_couv).	160
Tableau 33 : Le confort des usagers avec avec un contrôle commande prédictif du chauffage (scénario Prév_couv) et avec couverture.....	164
Tableau 34 : Les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage avec un contrôle commande prédictif du chauffage (scénario Prév_couv) et une couverture	164

Nomenclature

α	Absorbance de l'eau
A	Amplitude des variations de température sur la période considérée
A_{paroi}	Surface de paroi du bassin en m^2
$\alpha_{\text{w,visible}}$	absortivité de l'eau dans le spectre visible
COP	Coefficient de performance de la pompe à chaleur
C_p	Capacité thermique isobare massique en J/kg/K
$C_{p,\text{air}}$	Capacité thermique de l'air ambiant $\text{J}/(\text{kg.K})$
$C_{v,\text{eau}}$	Capacité calorifique de l'eau en $\text{J}/(\text{Kg K})$
E_{chauf}	Energie apportée par le chauffage en J
ϵ_{ciel}	Emissivité équivalente du ciel dans les infrarouges
$E_{\text{consommée}}$	Energie consommée en W
$\epsilon_{\text{eau,infrarouge}}$	Emissivité de l'eau dans les infrarouges
E_{utile}	Energie utile en W
G	Irradiation globale horizontale en W/m^2
H	Enthalpie de l'eau sortant du système ou de celle entrante en J/kg
h_{evap}	Coefficient d'échange évaporatif en $\text{W}/\text{m}^2/\text{Pa}$
K	Constante de Karman
k_{air}	conductivité de l'air en $\text{W}/\text{m}/\text{K}$
k_{couv}	Conductivité de la couverture en $\text{W}/\text{m}/\text{K}$
k_{sol}	Conductivité thermique du sol en $\text{W}/(\text{m K})$
l	Longueur caractéristique du bassin en m
L_c	Longueur caractéristique en m
L_{ciel}	Luminance en $\text{J}/\text{s}/\text{m}^2$
L_{evap}	Chaleur latente de changement d'état (évaporation) en J/kg
\dot{m}_e	Débit d'eau entrant par remplissage pour compenser les diverses pertes de masses d'eau en kg/s
m_{eau}	Masse d'eau dans le bassin en kg

\dot{m}_{evap}	Débit d'eau évaporé en L/s
\dot{m}_s	Débit d'eau sortant lié aux diverses pertes de masses d'eau (évaporation, nageurs, fuites...) en kg/s
\dot{m}_{pluie}	Débit d'eau de pluie entrant dans le bassin en kg/s
N	Nébulosité
n	Indice de réfraction de l'air
n'	Indice de réfraction de l'eau
Nbr	Nombre de personnes par m ²
Nu	Nombre de Nusselt
p	Profondeur de la piscine en m
P	Période de temps sur laquelle la température varie périodiquement (en fonction des cas : la journée ou l'année)
P _{atm}	Pression atmosphérique en Pa
Pr	Nombre de Prandtl
P _{PAC}	Puissance de la PAC en W
P _{sat} (T _{eau})	Pression de saturation à la température de l'eau en Pa
γ	Constante psychrométrique en mb/K
P _v	Pression de vapeur à la température ambiante en Pa
q̇	Flux en W/m ² de surface d'eau
q	Facteur de forme
\dot{Q}_{chauf}	Flux d'énergie apportée par le système de chauffage en W
\dot{Q}_{cond}	Flux conductif par les parois et le sol du bassin en W
\dot{Q}_{conv}	Flux convectif entre l'eau du bassin et l'air ambiant en W
\dot{Q}_{evap}	Flux évaporatif de l'eau du bassin en W
$\dot{q}_{\text{evap1}}, \dot{q}_{\text{evap2}}, \dot{q}_{\text{evap3}}$	Flux surfacique en W/m ²
$\dot{Q}_{\text{expérimental}}$	Flux obtenu à partir des données expérimentales en W
\dot{Q}_{model}	Flux modélisé en W
\dot{Q}_{rad}	Flux radiatif à grandes longueurs d'onde, entre l'eau et le ciel pour les piscines extérieures et avec les parois pour celle d'intérieur en W

\dot{Q}_{sol}	Flux solaire en W
$\dot{Q}_{nageurs}$	Flux d'énergie apportée par les nageurs en W
Re	Nombre de Reynolds
ρ_a	Masse volumique de l'air en kg/m ³
ρ_{air}	Masse volumique de l'air à la température et humidité ambiante
ρ_{eau}	Masse volumique de l'air à la température de l'eau et à saturation en Kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann en W / (m ² .K ⁴)
S_{parois}	Surface de paroi du bassin en m ²
S_{bassin}	Superficie du bassin en m ²
θ	Angle d'incidence du rayonnement solaire sur la surface de l'eau en degrés
θ'	Angle de réfraction du rayonnement en degrés
T_a	Température ambiante
t_{chauf}	temps où le chauffage doit être allumé en s
T_{eau}	Température de l'eau du bassin en °C
$T_{eau,froide}$	Température de l'eau dans le réseau de ville en °C
T_{ciel}	Température équivalente du ciel en K
$T_{déphasage}$	Déphasage entre l'évolution de la température à la surface et en profondeur due au temps de propagation du flux de chaleur dans le sol.
T_m	Température moyenne ambiante sur la période
T_{sol}	Température du sol en °C
$T_{rosée}$	Température de rosée en °C
v_0	vitesse du vent au raz du sol en m/s
v	Vitesse du vent en m/s
V_{bassin}	Volume du bassin en m ³
ν_c	viscosité cinématique en m ² /s
$\dot{V}_{évap}$	Débit volumique évaporé par m ² de surface d'eau
z	Distance en m
z_0	Rugosité de l'eau en m
w	Humidité spécifique de l'air en kg d'eau/kg d'air sec

Introduction

« Crise énergétique : la natation en milieu scolaire menacée par la fermeture des piscines »

Le figaro, 28/11/2022 [1]

Depuis l'ère préindustrielle, un réchauffement d'environ 1°C est imputé à l'activité humaine [2]. Selon le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), les prévisions d'augmentation de la température sont de 1.5°C avant 2050 en suivant la trajectoire actuelle. L'objectif de l'accord de Paris signé en 2015 [3] consistant à limiter le réchauffement en dessous de la barre des 1.5°C pour le siècle à venir, ne pourra être atteint qu'à condition de mettre en place une politique environnementale ambitieuse. Deux axes incontournables étant la décarbonisation de la production d'énergie ainsi que la diminution de la demande de cette dernière [4]. Face à ces enjeux, il est nécessaire de trouver des solutions pour réduire nos consommations énergétiques.

Les institutions publiques ont, de par leur nature, un devoir d'exemplarité. En 2017, le patrimoine bâti communal représentait 81% de la consommation d'énergie des communes en France métropolitaine, contre 50% dans les Départements et Régions d'Outre-Mer (DROM). La consommation des piscines des EPCI (établissement Publics de Coopération Intercommunale et dans ce cas précis en particulier celles à fiscalité propre) représentait 32% des consommations du bâtiment, soit le premier poste de dépense. La consommation énergétique des piscines des communes représente 10 % de la totalité alors même qu'une grande majorité de ces dernières ne sont pas concernées par ces équipements (Figure 1). Les piscines représentent une part importante de consommation énergétique qui impacte significativement le bilan énergétique mais aussi financier des communes et EPCI concernés.

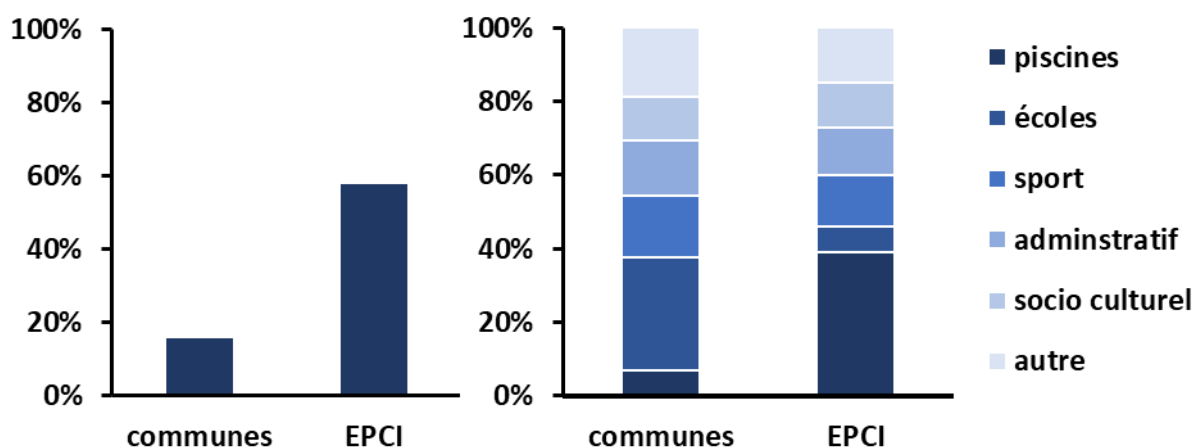


Figure 1 : La part des communes gérant des piscines à gauche et la répartition des consommations énergétique des équipements communaux par poste à droite. Les données sont issues du rapport de 2019 sur les données de 2017 de l'ADEME sur les dépenses énergétiques des collectivités locales. EPCI : établissement Publics de Coopération Intercommunale et dans ce cas précis en particulier celles à fiscalité propre. [5]

Dans les années 1970, le programme des 1 000 piscines avait pour objectif de favoriser la pratique de la natation, mais aussi de prévenir les noyades [6]. De ce fait, en 2017 la France possédait plus de 4 000 piscines soit plus de 6 000 bassins, correspondant à 1,6 million de m²

de plan d'eau [7]. Une majorité des sites ont été construits dans le cadre d'un plan national : « 1 000 piscines », dont 70% avant 1995 [7]. Le coût de fonctionnement est supérieur aux recettes dans 100% des cas étudiés par la Cour des comptes et impacte significativement les budgets des communes. En effet, le déficit d'exploitation des piscines représente en moyenne 25% de l'épargne des collectivités propriétaires. De plus, le parc vieillissant n'est plus adapté à la demande des usagers. Le quart de la population de plus de 25 ans nagent tous les ans faisant de ce sport l'un des plus pratiqués en France. Les attentes des usagers ont évolué les dernières années avec l'apparition de nouvelles activités en plus de la natation (toboggans, salles de sport, hammam, etc.). Ces nouvelles pratiques nécessitent des investissements de la part des communes pour des installations qui ne sont pas rentables [7].

La reprise de l'économie en 2021, à la suite de la crise de la pandémie de la COVID 19, a entraîné une augmentation de la demande sur le marché de l'énergie. En 2022, le déclenchement de la guerre en Ukraine a impacté le cours du gaz. Ces événements ont causé une forte augmentation du prix de l'énergie en Europe [8]. En France, la première source d'énergie utilisée pour le chauffage des piscines est le gaz [9], [10], suivi de l'électricité [5] dans les proportions présentées sur la Figure 2. Face à cet enjeu, plusieurs exploitants ont annoncé à l'automne 2022, leur intention de réduire la température de l'eau des piscines et également de fermer des établissements [10], [11], [1], [12]–[14]. L'actualité a mis en avant les consommations importantes des piscines déjà constatées en 2017 par la Cour des comptes, et donc la nécessité d'améliorer les performances énergétiques de ces établissements.

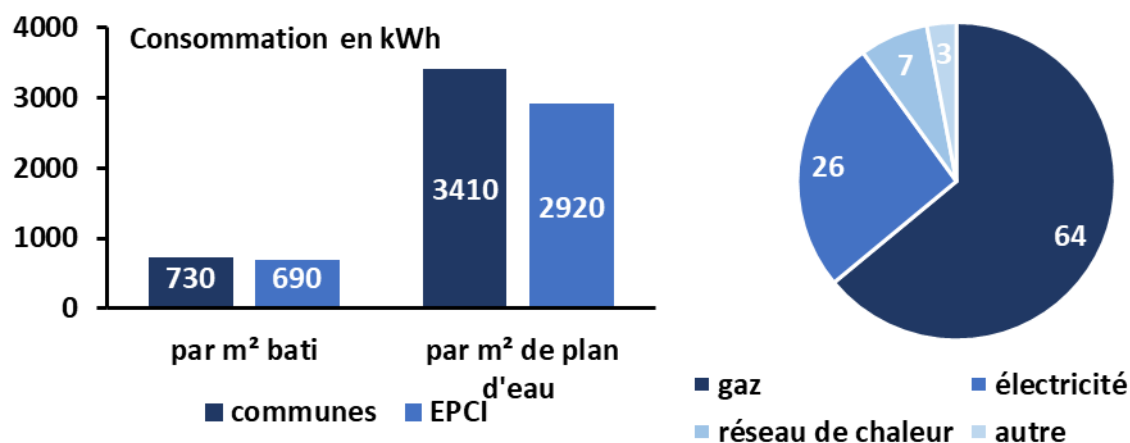


Figure 2 : Consommations et sources d'énergie utilisées pour le chauffage des piscines de communes françaises [5]



Les constats précédemment présentés ont amené Emmanuel Quilichini à créer la startup Sunny Shark en 2017 après plusieurs années d'incubation, avec pour objectif de développer un contrôle commande prédictif des installations des piscines collectives existantes pour diminuer le coût d'exploitation et/ou les consommations énergétiques de ces dernières. Pour atteindre cet objectif, la piscine de Vue

Belle (Saint Paul, La Réunion) a servi de premier site expérimental. La solution étudiée dans cette thèse répond à cet objectif de la société.

L'objectif de ces travaux de thèse est d'évaluer les économies financières et énergétiques réalisables en utilisant un contrôle commande prédictif pour le chauffage des piscines collectives extérieures à La Réunion tout en respectant le confort des nageurs. La zone de confort déterminée par l'exploitant entre 27.5°C et 28.5°C. Pour cela, le modèle développé devra être en mesure de prédire la consommation énergétique du chauffage, mais aussi l'évolution de la température de l'eau au cours de la journée. Le chapitre 1 présente la littérature sur la modélisation thermique des bassins qui comprend les phénomènes physiques (évaporation, rayonnement solaire, rayonnement à grandes longueurs d'ondes, convection, conduction), de la couverture et de l'occupation. Les résultats très différents de la littérature et l'absence d'informations ne permettent pas de choisir entre les différents modèles. En particulier en ce qui concerne celui de l'évaporation. Ce constat nous a mené à la mise en place d'une expérimentation qui est présentée dans le chapitre 2. Dans le chapitre 3 les mesures expérimentales sont confrontées aux modèles de la littérature et un modèle de bassin est validé. Pour finir, le chapitre 4 étudie les possibilités d'économies financières et/ou énergétiques possibles et propose un contrôle commande prédictif utilisant le modèle développé.

Chapitre 1 : Etat de l'art des modèles de bassin de piscines collectives

I. Les performances énergétiques des piscines

1. Les indicateurs de performance énergétique des piscines

L'évaluation des performances énergétiques des piscines collectives est un domaine de recherche [15], [16], [17], [18] et dans une moindre mesure celle des piscines privées [19], [20] également. Aucun indicateur n'est reconnu par l'ensemble de la communauté, chaque étude en détermine des différents : consommation par m² du bâtiment, par m² de plan d'eau ou par m² et par visiteur. D'après les travaux de Kampel et al. [15], [16], [21], la complexité des installations se rapproche de celle des sites en raison des nombreux paramètres à prendre en compte : la température et humidité du hall, l'évaporation due à l'usage, l'eau chaude des douches, le traitement de l'eau, le chauffage et les échangeurs, le comportement des usagers (employés, nageurs, visiteurs), les services annexes (salle de sport, sauna...), les heures d'ouverture et la fréquentation, les systèmes de contrôle, le niveau de consommation d'énergie. Il conseil d'utiliser des outils inspiré de l'industrie pour réaliser leur suivi. En suivant cette méthodologie, l'indicateur devrait être la consommation par visiteurs. Mais cet indice n'est pas utilisé en pratique et rarement disponible. A défaut, il préconise d'utiliser la consommation par m² de plan d'eau qui est la surface utile de l'installation et de tenir compte des heures d'utilisation lors de l'analyse. La température de l'eau ne semble pas être un paramètre important influençant la consommation des piscines (à noter que cette étude considère uniquement les piscines intérieures). Les installations les plus performantes sont celles qui disposent de systèmes de récupération des énergies grises, par exemple en récupérant l'énergie de l'air rejeté par la centrale de traitement de l'air et des eaux usées [22], [23]. Ce facteur n'est cependant pas suffisant, il doit être couplé à l'embauche et à la formation du personnel et à une volonté de tous les acteurs de réduire la consommation énergétique [21]. Pour permettre l'évaluation des performances d'une piscine existante, Nikolic et al. [24] proposent une méthodologie pour réaliser des audits des performances énergétiques des piscines collectives.

2. Les performances énergétiques des piscines

Actuellement la première source d'énergie utilisée en France dans les piscines est le gaz [9]. La littérature scientifique étudie l'utilisation de sources variées. L'objectif des travaux étant de rendre les installations moins coûteuses et diminuer leur impact sur le climat. Les sources d'énergie prises en compte sont : la géothermie [25], [26], [27], les panneaux solaires thermiques [9], [28]–[33], les panneaux solaires photovoltaïques [34], les pompes à chaleur [31], [35], la biomasse [30], [36]. Le couplage de deux énergies renouvelables est un autre sujet d'étude : les panneaux solaires thermiques et la biomasse [36], les panneaux solaires

thermiques et les pompes à chaleur [31], [37] ou une source d'énergie renouvelable associée à une énergie fossile en appoint comme les panneaux solaires thermiques couplés à une chaudière à gaz [9].

En plus du choix d'une source d'énergie peu émettrice de gaz à effet de serre, les économies d'énergies sont indispensables. Les méthodes pour y arriver sont nombreuses : l'amélioration structure et la conception des bâtiments, la mise en place de couvertures, le choix de la centrale de traitement de l'air (CTA) pour les piscines intérieures et du système de production d'énergie, leur contrôle commande que le comportement du personnel technique et des différents usagers [21], [38], [39]. Ces améliorations peuvent être combinées, pouvant amener à la conception de nouvelles piscines collectives passives [40]. Lors de travaux d'amélioration d'une installation, la question qui peut se poser est celle du meilleur investissement du budget. Une étude a comparé les gains qui peuvent être espérés sur leur cas d'étude pour différents travaux : l'installation d'une couverture, un chauffage par biomasse, un chauffage mixte par biomasse et panneaux solaires, ou par géothermie [64].

La structure et la conception des bâtiments

La structure et la conception des halls concerne particulièrement les piscines intérieures. On retrouve les mêmes opportunités que pour la majorité des bâtiments comme l'isolation des murs et des toitures, des vitrages performants, des masques en période estivale. Les auteurs mettent en évidence que de tels travaux peuvent être efficaces et amener des économies de chauffage et/ou de refroidissement conséquentes. Pour connaître l'intérêt de tels travaux sur le long terme une étude approfondie au cas par cas. En effet les coûts importants de mise en œuvre impactent significativement le retour sur investissement [41]. Certaines études proposent l'utilisation de matériaux innovants comme le Ethylene Tetrafluoroethylene pour isoler la toiture [42].

Le couplage à une installation aux besoins complémentaires

Pour améliorer les performances énergétiques des piscines, une des possibilités est de coupler le système énergétique avec un autre qui a des besoins opposés. Dans la pratique, cela consiste à coupler une piscine et une patinoire. En effet, ces premières ont des besoins de chauffage quand les secondes ont besoin de refroidissement [43]. Les installations sont complexes, 6 à 7 ans sont nécessaires pour obtenir le cycle de fonctionnement optimal [44]. Plus récemment, les besoins de refroidissement des data center se développent. La possibilité de coupler les piscines à ces derniers a été étudiée. Les résultats sont encourageants, les économies réalisables varient en fonction de la taille de ce dernier et de la configuration (en série ou en parallèle) du système de refroidissement. Les économies peuvent aller de 18% à 80% selon les cas étudiés [45].

Le stockage d'énergie est également utilisé pour atteindre différents objectifs. Dans le cadre du couplage d'une piscine et d'une patinoire, un stockage d'énergie souterrain peut être mis en place pour atteindre des conditions d'utilisation de la pompe à chaleur plus stable tout au long de l'année et assurer une stabilité du COP de cette dernière [44]. Dans le cas du couplage entre une piscine et un réseau de chaleur urbain, la piscine est utilisée pour stocker de l'énergie. L'importante capacité calorifique permet de stocker de l'énergie sans variation très importante de la température de l'eau : entre 26.5°C et 27.3°C [46]. Cela permet de stocker de l'énergie quand la demande est faible et de la remettre dans le réseau quand la demande est forte. L'étude a permis de mettre en évidence une économie faible de 1.1 % du coût du chauffage de la piscine, le retour sur investissement est entre 7 et 15 ans [46]. Une autre forme de stockage se développe, les matériaux à changement de phase, qui ont l'avantage de permettre de stocker de l'énergie dans un espace contraint et avec des différences de température entre le stockage et l'ambient faible. Dans l'étude proposant un système mixte solaire et une pompe à chaleur, le stockage par matériaux à changement de phase a pour objectif de permettre de faire fonctionner la pompe à chaleur durant la période de faible demande quand cela est nécessaire (en cas d'ensoleillement insuffisant) [37], [47].

La centrale de traitement de l'air

Pour les piscines intérieures, l'amélioration des performances des centrales de traitement de l'air (CTA) est une source d'économie possible. En effet, l'air doit être déshumidifié pour assurer le confort des usagers et l'absence de condensation sur les murs et les vitres. Cette dernière pouvant être à l'origine du développement de moisissures [48] et de la dégradation du bâti. Le renouvellement fréquent de l'air est indispensable pour éviter l'accumulation des polluants issus du traitement de l'eau [49]. La performance des centrales de traitement d'air est un enjeu important [50], [51].

Le système de production d'énergie

Le choix du mode de production de l'énergie thermique est important et détermine le coût, la performance et l'impact environnemental du système. Une étude comparative de 4 pompes à chaleur (à compresseur et entraînement électrique, par entraînement par un moteur diesel, une pompe à chaleur à absorption et une pompe à chaleur à entraînement par un moteur diesel et à absorption) prévoit un retour sur investissement de moins de 5 ans dans les 4 cas comparé au système existant [52]. Dans le contexte climatique actuel, de nombreuses études sont réalisées pour étudier l'insertion des panneaux solaires sur les installations existantes, mais d'autres sources d'énergie sont étudiées comme la géothermie, mais aussi le mix de différentes énergies [53], [54].

Pour les installations de panneaux solaires, les retours sur investissement diffèrent selon les travaux. Une étude italienne a permis de prévoir un retour de 1 à 5 ans (aides de l'état comprises). Sans aide, il est de 5 ans environ pour toutes les technologies [31]. Une autre étude a été menée sur une piscine extérieure initialement non chauffée. Les panneaux solaires

ont permis de l'ouvrir presque toute l'année et le retour sur investissement a été évalué à 10 ans [55]. Une troisième travail a été réalisée sur la faisabilité d'une installation solaire subvenir aux besoin de chauffage de l'eau et des batteries chaudes des CTA d'une piscine intérieure [56]. Pour diminuer la consommation de la pompe de circulation, une autre s'est intéressée à la réduction du débit dans les panneaux, mais cela entraîne une chute de la performance des panneaux [57]. Le bilan n'est pas concluant. Des travaux se sont intéressés à l'installation d'un chauffage par géothermie pour une localisation où le gradient de température de 0.03 K/m dans le sol est favorable à ce type d'installation. Le retour sur investissement est estimé à 15 ans [58]. Une installation mix de solaire thermique, d'une pompe à chaleur et un appoint assuré par une chaudière à gaz a permis un retour sur investissement de 7 ans [59].

Les études testent des situations variées pour trouver la meilleure conception pour un cas particulier. Les paramètres pour optimiser l'installation sont nombreux comme la technologie des panneaux [31], [33], [60], [61], la superficie de panneaux [59], [62], la puissance de la pompe à chaleur [59]. Une étude utilise un algorithme d'optimisation et un réseau de neurones pour trouver les caractéristiques optimales [63] pour une piscine chauffée par des panneaux solaires thermiques, une pompe à chaleur et un stockage constitué de matériaux à changement de phase pour une piscine extérieure soumise à un climat subtropical [37], [47].

Le contrôle-commande prédictif

L'étude de contrôles commandes, prenant en compte d'autres paramètres que la température instantanée de l'eau, ont été développés par des équipes de recherche. Mahmoudi et al. ont développé un algorithme de contrôle commande du chauffage de l'eau et de la régulation de la température de l'air et de l'eau. Pour cela, ils mesurent la température de l'eau et de l'air ainsi que l'humidité de la piscine. Si les conditions de confort sont respectées, le chauffage est désactivé, mais si ce n'est pas le cas alors il est allumé. Cette régulation est plus performante que le réglage des températures et humidité de l'air par un opérateur sur site, de 11% [65]. Cette régulation est une amélioration, mais elle ne prend pas en compte l'environnement, ni les spécificités du système de production d'énergie. Plusieurs études prennent en compte les réseaux soit de chaleur soit électrique. Une première s'intéresse au couplage d'un réseau de chaleur et d'une piscine et cette dernière s'adapte pour consommer de l'énergie durant la période de faible charge du réseau [46]. Une seconde étudie une piscine qui consomme de l'électricité pour faire fonctionner une pompe à chaleur quand la production des panneaux solaires thermiques est insuffisante. De plus, la mise en place d'un stockage permet de faire fonctionner cette dernière durant les heures creuses [37], [47]. Un autre algorithme de régulation développé permet d'utiliser l'inertie des bassins pour différer le chauffage qui sera uniquement allumé en dehors des heures de pointe [66]. Marin et al. ont étudiés la possibilité de mettre en place un contrôle commande prédictif pour une piscine intérieure en Espagne. Le développement d'un tel système nécessite une formulation et des algorithmes complexes. Les auteurs ont utilisé un « early switch OFF », algorithme associé à une prévision de la production d'énergie des panneaux solaires pour améliorer l'utilisation de cette énergie. Cette stratégie a permis de diminuer de 19% la demande en

énergie et de 43% l'utilisation du fuel [36]. Cette méthode se base sur les travaux et outils développés pour les bâtiments [67], [68].

Toute modification de la régulation doit s'assurer que le confort des usagers est toujours atteint. En effet la diminution de la température de l'eau entraîne une diminution du confort des usagers et de leur fréquentation des piscines en question [69]–[72]. La température de l'eau est un paramètre indispensable à maîtriser pour le confort des nageurs. Cependant aucun consensus n'existe sur le sujet. D'après ASHRAE, pour les piscines récréatives, la température de l'eau et de l'air doit être comprise entre 24°C et 29°C et la température de l'air doit être maintenue entre 1°C et 2°C au-dessus de la température de l'eau et l'humidité entre 50% et 60% [50], [73], [74]. Dans notre cas, l'exploitant maintient la température de l'eau autour de 28°C pour assurer le confort des usagers. Il considère que le confort est entre 27.5°C et 28.5°C.

Les exploitants de piscines collectives fixent une température de consigne de l'eau du bassin à plus ou moins 0,5°C pour assurer le confort des usagers. Afin de prédire précisément le comportement énergétique du bassin, une compréhension fine des phénomènes physiques impliqués aux bornes de ce système est nécessaire.

3. La modélisation des bassins de piscine dans la littérature

Bien qu'une partie de la littérature de la modélisation des piscines s'appuie sur des modèles de type « boîtes noires » reposant sur des outils comme les réseaux de neurones artificiels [75], ou des méthodes statistiques [76], une grande majorité de ces derniers se base sur une modélisation phénoménologique [55], [77], [78], [79], [80]. On trouve dans la littérature plusieurs types d'applications comme les bassins de centrales nucléaires [22] ou les bassins de natation [21], ceux-ci pouvant être occupés [24] ou inoccupés [23], intérieurs [5] ou extérieurs [2], enterrés [23] ou hors sol [25]. Deux approches coexistent dans la littérature :

- La première approche consiste à prendre en compte la discrétisation dans l'espace. Des méthodes de résolution numérique de mécanique des fluides (ou Computational Fluid Dynamics, CFD en anglais) sont alors utilisées pour modéliser la répartition des gradients de température et de concentration en chlore et polluant dans l'eau. Pour valider les modèles, des traceurs colorés sont utilisés [81] et dans de rares cas des mesures de température ont été effectuées [82]. Ces études ont pour objectif d'assurer en tout endroit et à tout instant une eau de qualité aux baigneurs.
- La seconde approche consiste en un bilan énergétique et massique sur l'eau du bassin sans discrétisation dans l'espace. Dans ce cas sa température est considérée comme homogène.

Des études en CFD se sont intéressées à l'écoulement de l'eau et montrent l'absence de gradients de température [54], [56]. L'eau du bassin est considérée comme homogène en température dans la littérature [53], [57]. Dans cette dernière, l'hypothèse est faite le plus souvent implicitement [36]. De plus les piscines en exploitation doivent assurer la qualité de

l'eau dans tout le bassin et il est à noter que la réglementation des piscines publiques françaises impose un renouvellement de l'eau du bassin en moins de 4h pour ceux de plus de 1.50 m de profondeur [55]. Pour toutes ces raisons, l'hypothèse d'homogénéité de la température de l'eau dans le bassin a été prise en compte. La seconde approche est donc utilisée, ce qui permet de réduire le temps de calcul également.

La modélisation des bassins nécessite la prise en compte de phénomènes physiques présentées sur la Figure 3. En réalisant le bilan énergétique et massique sur un bassin extérieur, en considérant la température de l'eau homogène, on obtient le système d'équations suivant :

$$m_{\text{eau}} C_p \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{nageurs}} + \dot{Q}_{\text{aux}} + \dot{m}_{\text{pluie}} H_{\text{pluie}} + \dot{m}_e H_e - \dot{m}_s H_s \quad \langle 1.1 \rangle$$

$$\frac{dm_{\text{eau}}}{dt} = \dot{m}_{\text{pluie}} + \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad \langle 1.2 \rangle$$

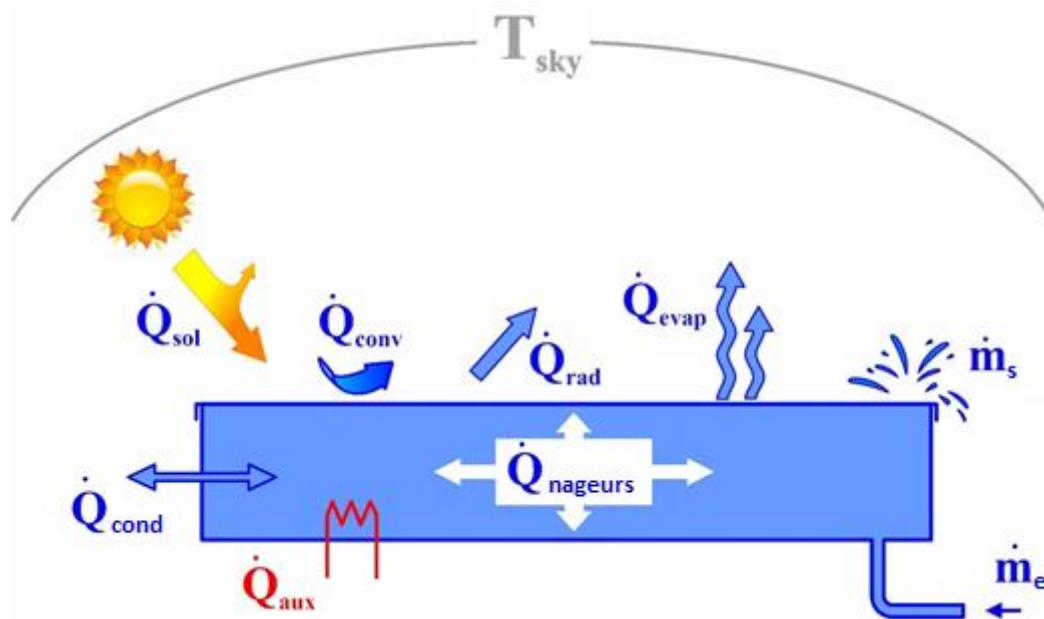


Figure 3 : Schéma des phénomènes physiques influençant le bilan thermique et massique du bassin.

Avec : \dot{Q}_{evap} : l'évaporation de l'eau du bassin en W

\dot{Q}_{rad} : le rayonnement à grandes longueurs d'onde, entre l'eau et le ciel pour les piscines extérieures et avec les parois pour celle d'intérieur en W

\dot{Q}_{sol} : le rayonnement solaire en W

\dot{Q}_{conv} : la convection entre l'eau du bassin et l'air ambiant en W

\dot{Q}_{cond} : la conduction par les parois et le sol du bassin en W

$\dot{Q}_{nageurs}$: l'énergie apportée par les nageurs en W

\dot{m}_s : les diverses pertes de masses d'eau (évaporation, nageurs, fuites...) en kg/s

\dot{m}_e : le remplissage pour compenser les diverses pertes de masses d'eau en kg/s

\dot{m}_{pluie} : le débit d'eau de pluie entrant dans le bassin en kg/s

\dot{Q}_{chauf} : L'énergie apportée par le système de chauffage en W

m_{eau} : la masse d'eau dans le bassin en kg

C_p : la capacité thermique massique en J/kg/K

H: l'enthalpie de l'eau sortant du système ou de celle entrante en J/kg

La modélisation de chacun de ces phénomènes fait l'objet d'une partie dans la suite du chapitre.

II. L'évaporation de l'eau du bassin

L'étude de l'évaporation des bassins dans la littérature a plusieurs objectifs. Celui qui nous intéresse est l'évaluation des pertes par évaporation dans le but de prédire les besoins de chauffage et l'évolution de la température de l'eau du bassin. Pour les piscines d'intérieur, elle permet de connaître la qualité de l'air [49] respiré par les usagers et les maîtres-nageurs, les risques de condensation, de moisissures et de dégradation du bâti [48], [23].

1. La modélisation de l'évaporation dans la littérature

L'eau s'évapore au contact de l'air ambiant non saturé. A l'interface, l'air se sature en eau. La température de l'air au contact de l'eau est considérée égale à la température de l'eau. La couche d'air saturé est alors renouvelée par le mouvement de l'air. L'évaporation dépend dans ce cas de deux phénomènes :

- L'écart entre la pression de saturation à la température de l'eau et la pression de vapeur du milieu environnant. L'équation a été développée par Dalton [83] :

$$\dot{q}_{evap} = h_{evap} (P_{sat}(T_{eau}) - P_v) \quad <1.3>$$

Avec : $P_{sat}(T_{eau})$ la pression de saturation à la température de l'eau en Pa

P_v la pression de vapeur à la température ambiante en Pa

\dot{q} le flux en W/m² de surface d'eau

h le coefficient d'échange évaporatif en W/m²/Pa

- La vitesse de renouvellement de l'air en contact avec la surface de l'eau dépend soit de la convection naturelle (différences des masses volumiques de l'air), soit de la convection forcée provoquée par le vent. L'équation la plus utilisée pour les sites extérieurs est la suivante :

$$h_{evap} = a v^n + b \quad <1.4>$$

Avec : v la vitesse du vent en m/s

Les coefficients a , b et n sont identifiés par de nombreux auteurs sur différents sites expérimentaux présentés dans le Tableau 1. Le coefficient a est lié à la convection forcée due au vent et le coefficient b à la convection naturelle. Les modèles sont empiriques et les coefficients sont très dépendants du site et de la méthode de mesure de la vitesse du vent [84], [85].

Tableau 1 : Valeurs numériques des coefficients de modèles évaporatifs de la forme <1.4>

Name	a	b	n	référence
McMillan	0.0182	0.044	1	[86]
McMillan	0.025	0.036	1	[86]
Govind	0.0494	0.0741	1	[86]
Taga	0.001296	0.088403	1	[86]
Almanza	0.03721	0	1	[78], [86]
Rohwer	0.0583	0.0803	1	[83], [86],
Smith	0.0669	0.0638	1	[86], [88]
Richter1	0.05652	0.04229	0.5	[77]
Richter2	0.05088	0.04523	0.84	[77]
ISO TC 180	0.0669	0.05058	1	[77]
Raimundo	0.07419	0.08567	1	[87], [89]

D'autres sources présentent des modèles proches qui prennent en compte des caractéristiques supplémentaires :

- Sartori [86], [90] propose de prendre en compte la longueur caractéristique de la surface d'eau.

$$\dot{q}_{evap} = 0.00407 l^{-0.2} v^{0.8} - 0.01107 l^{-1} \frac{(P_{sat}(T_w) - P_v)}{P_{atm}} \quad <1.5>$$

Avec : l la longueur caractéristique du bassin en m

- Szeicz [79], [86] met en avant la hauteur z de mesure du vent dans son équation

$$\dot{q}_{evap} = \frac{\rho_a C_p K}{\gamma r_a (\ln(z/z_0))^2} v (P_{sat}(T_w) - P_v) \quad <1.6>$$

Avec : ρ_a la masse volumique de l'air en kg/m³

C_p capacité thermique isobare massique en J/kg/K

γ la constante psychrométrique de 0.66 mb/K

K constante de Karman de valeur 0.41

z_0 la rugosité de l'eau en m

On trouve dans la littérature d'autres modèles plus complexes basés sur la forme de l'équation <1.3> qui suivent l'équation suivante. L'objectif des auteurs est d'améliorer la fiabilité des modèles mais les résultats ne sont pas concluants [91].

$$\begin{cases} \dot{q}_{evap} = h_{evap} (P_{sat}(T_w) - P_v)^n \\ h_{evap} = 2.778 \cdot 10^{-7} (b + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3) L_{evap} \\ n = n_0 + n_1 v + n_2 v^2 \end{cases} \quad <1.7>$$

Tableau 2 : Valeurs numériques des coefficients de modèles évaporatifs de la forme <1.7>

Name	a ₁	a ₂	a ₃	b	n ₀	n ₁	n ₂	Ref
Inan	0.000784	0	0	0.00028	0.695	0	0	[89], [92]
Tang	0.24644	0	0	0.2253	0.82	0	0	[89], [91]
Pauken	27.2*10 ⁻⁶	6.92*10 ⁻⁶	0	20.56*10 ⁻⁶	1.22	-0.19	0.038	[89], [93]
Jodat	13.38*10 ⁻⁵	5.039*10 ⁻⁵	9.062*10 ⁻⁵	6.289*10 ⁻⁵	1.186	-0.132	0.009	[83], [89]

Certains auteurs prennent en compte la différence de masse entre l'air dans la couche en contact avec l'eau et celle de l'air environnant, qui est à l'origine d'un phénomène de convection naturelle. Elle est particulièrement importante en l'absence de vent. Elle permet, dans ce cas, un renouvellement de l'air en contact avec l'eau et ainsi entretient de l'évaporation. Ces modèles sont principalement utilisés dans les piscines intérieures où les vitesses d'air sont faibles, mais plus rarement aussi dans le cas de piscines extérieures comme pour le modèle développé par Molineaux en 1994 [86], [89], [94], [95].

$$\begin{cases} \dot{q}_{evap} = h_{conv} (w_{sat}(T_{eau}) - w_a) \\ h_{conv} = \frac{(3.1 + 2.1 v) L_{evap}}{C_{p,a}} \end{cases} \quad <1.8>$$

Avec : w : l'humidité spécifique de l'air en kg d'eau/kg d'air sec

L_{evap} : la chaleur latente de changement d'état en J/kg

Le vent est pris en compte dans le coefficient h_{conv}. Watmuff [86] a utilisé cette même équation avec un autre coefficient d'échange :

$$h_{conv} = 2.8 + 3.0 v \quad <1.9>$$

La dernière équation présentée est celle de Shah [89], [96], [97] développée au début des années 2000 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q}_{evap} = \max(\dot{q}_{evap1}, \dot{q}_{evap2}, \dot{q}_{evap3}) \\ \dot{q}_{evap1} = \frac{35 \rho_{sat}(T_w) (\rho_a - \rho_{sat}(T_{eau}))^{1/3}}{3600} (w_{sat}(T_{eau}) - w_a) \\ \dot{q}_{evap2} = \frac{0.000005}{3600} (P_{sat}(T_{eau}) - P_v) \\ \dot{q}_{evap3} = \frac{0.000005}{3600} \left(\frac{v}{0,12} \right)^{0,8} (P_{sat}(T_{eau}) - P_v) \end{array} \right. \quad <1.10>$$

Le modèle est constitué de trois parties :

- \dot{q}_{evap1} modélise le phénomène de convection naturelle qui se met en place dans l'air. Ce phénomène prédomine quand les vitesses d'air sont faibles.
- \dot{q}_{evap2} est une équation qui prend en compte la différence de pression sans prendre en compte la vitesse de l'air.
- \dot{q}_{evap3} prend en compte la vitesse de l'air.

L'équation utilisée est celle qui donne la plus grande valeur. Dans le cas de \dot{q}_{evap2} et \dot{q}_{evap3} , on peut remarquer que quand le vent est supérieur à 0.12 m/s c'est \dot{q}_{evap3} qui domine et sinon \dot{q}_{evap2} .

Le modèle sépare les différents types de convection (naturelle et forcé) :

- \dot{q}_{evap3} sert à modéliser l'évaporation en présence de mouvement d'air plus important que \dot{q}_{evap2} .
- \dot{q}_{evap1} modélise la convection naturelle qui est prédominante en l'absence de mouvement d'air forcé.

La méthodologie ne permet pas de prendre en compte le couplage des deux types de convection.

2. L'analyse des modèles d'évaporation

L'objectif est de déterminer le modèle permettant de modéliser l'évaporation dans notre cas. Pour cela, les 20 modèles précédents sont comparés pour étudier la cohérence de leurs résultats. Dans cet objectif, on considérera dans la suite le cas de référence pour une température ambiante de 25°C, une humidité relative de 60% et une vitesse de vent de 2 m/s. La température de l'eau est toujours considérée à 28°C, cette dernière étant fixée par le confort des baigneurs.

Expérimentalement le débit évaporatif mesuré est celui de la quantité d'eau évaporée et non la quantité d'énergie. Les deux sont reliés par l'équation qui suit :

$$\dot{q}_{\text{évap}} = L_{\text{évap}} \rho_{\text{eau}} \dot{V}_{\text{évap}} \quad <1.11>$$

Avec $\dot{V}_{\text{évap}}$ le débit volumique évaporé par m² de surface d'eau

Les graphiques de la Figure 4 représentent l'impact de la température ambiante, de l'humidité ambiante et de la vitesse du vent sur le débit évaporatif pour chaque modèle. Un air sec aura une plus grande capacité d'absorption de la vapeur d'eau qu'un air humide. Une diminution de l'humidité relative entraîne une augmentation de la différence entre la pression de saturation à température de l'eau et la pression de vapeur partiel de l'air ambiant, impliquant une diminution du débit évaporatif visible sur la Figure 4 quel que soit le modèle. De la même manière, une augmentation de la température ambiante à humidité relative constante entraîne une augmentation de la pression partielle de l'air sans impacter la pression de saturation à la température de l'eau. La valeur de la différence de pression diminue et donc également le débit évaporatif. En présence de vent, l'air à la surface de contact air/eau est renouvelé, ce qui favorise les pertes par évaporation. Elles sont d'autant plus importantes que la vitesse de vent est élevée, comme cela est visible sur la Figure 4 et sur les équations d'évaporation présentées précédemment.

La Figure 5 représente la moyenne des 20 débits d'évaporation selon les différents modèles pour des conditions données. Le graphique met en évidence des variations importantes des débits d'évaporation modélisés en fonction des conditions ambiantes, par exemple avec une température ambiante de 15°C, le débit d'évaporation moyen est de 0,61 L.h⁻¹.m⁻², alors qu'à 35°C il est de 0,09 L.h⁻¹.m⁻². On constate également un écart très important des valeurs modélisées pour des conditions données en fonction du modèle, par exemple pour les conditions de référence : la valeur la plus élevée prédite par un modèle est 0,69 L.h⁻¹.m⁻² et la minimale de 0,11 L.h⁻¹.m⁻². L'influence du modèle, sur le débit évaporatif prédit, est très significative comparée à l'influence des conditions météorologiques.

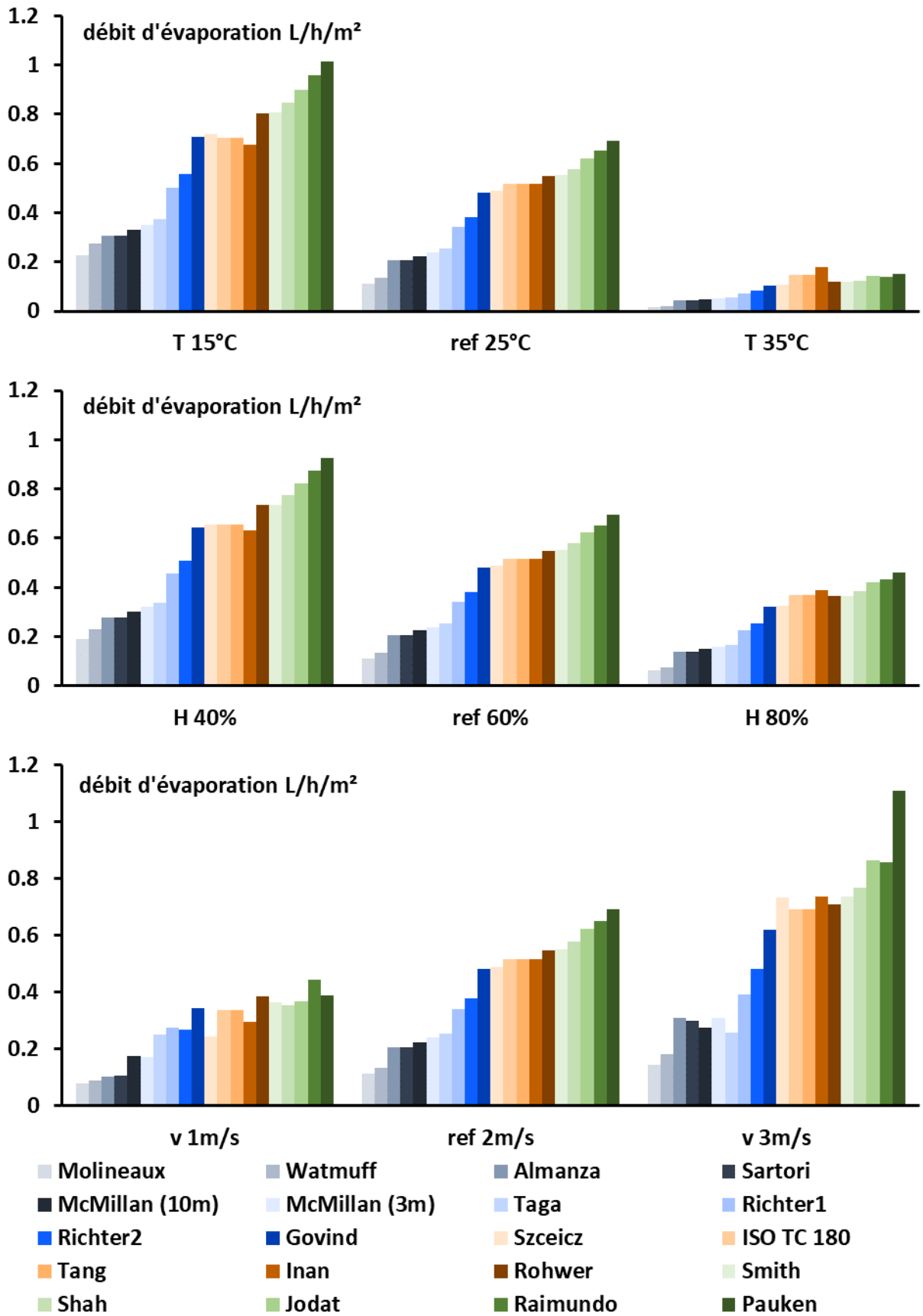


Figure 4 : Débit évaporatif surfacique en fonction respectivement de la température ambiante, de l'humidité ambiante et de la vitesse du vent

Les hypothèses pouvant expliquer les différences entre les modèles sont nombreuses :

- Sur les sites in situ comme les bassins ou les lacs, la présence de fuites peut induire des incertitudes dans la mesure du débit évaporé [86], [88].
- Les résultats obtenus en laboratoire à échelle réduite sont appliqués sans tenir compte d'éventuels effets d'échelle impactant les écoulements de l'air [92], [93].
- Le type d'écoulement d'air : laminaire, mixte, turbulent n'est pas discuté.
- La non prise en compte d'un paramètre : La pression atmosphérique peut faire varier l'évaporation entre deux site mais n'est que rarement mesurée et prise en compte.
- Les conditions de mesure de la vitesse du vent. En effet certaines études la mesurent à 10 m en extérieur quand d'autres ont eu lieu en laboratoire où la mesure est réalisée à 30 cm au-dessus de la surface de l'eau. La Figure 6 illustre l'impact de la hauteur de la station météo sur la vitesse du vent mesurée pour un site au milieu de champs, avec quelques arbres et bâtiments dont la rugosité est évaluée à 0.25 m [84] et le modèle utilisé est celui présenté dans les références [84], [85]. Quand la vitesse mesurée à 10 m est de 1 m.s⁻¹, elle n'est plus que de 0.2 m.s⁻¹ à 50 cm. Dans le cas des expérimentations réalisées en laboratoire, la hauteur de mesure du vent est inférieure à 1 m. La prise en compte de cette donnée semble prépondérante au vu de l'impact de la vitesse du vent sur le taux d'évaporation modélisé. Cette information est rarement mentionnée dans les articles.

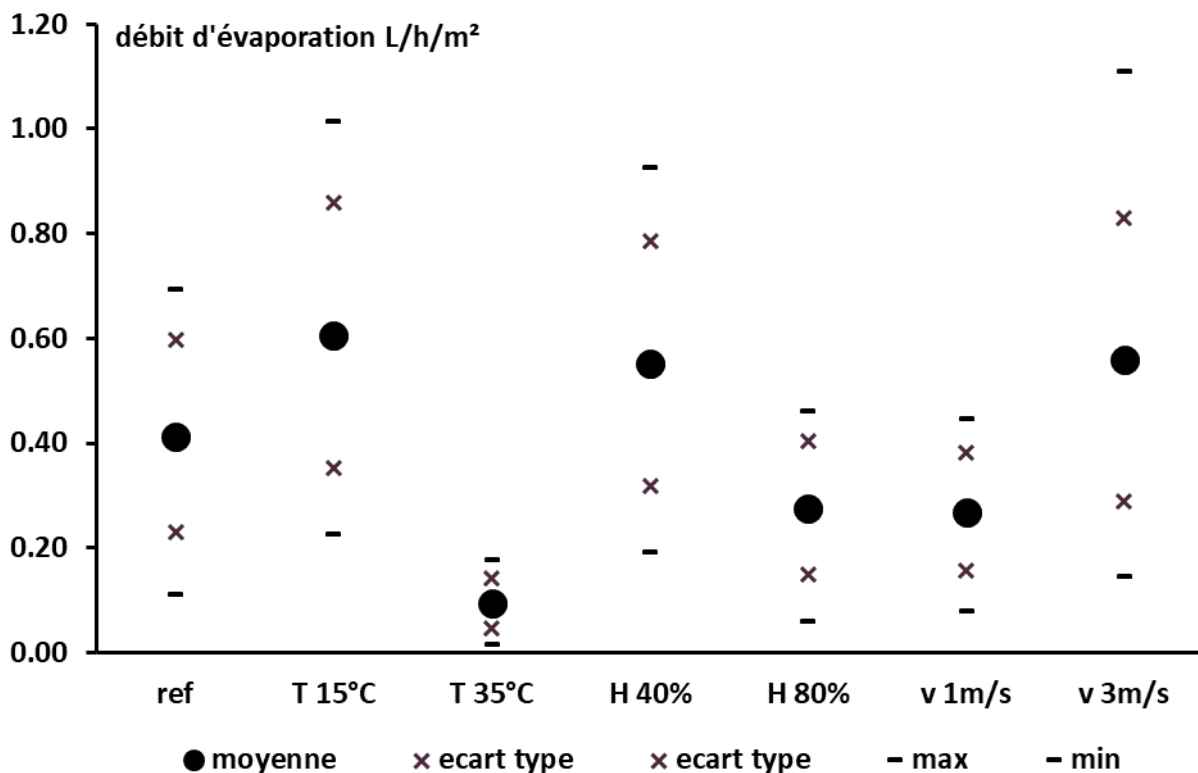


Figure 5 : Débit d'évaporation moyen, écart type, maximum et minimum des modèles présentés pour sept conditions météorologiques différentes.

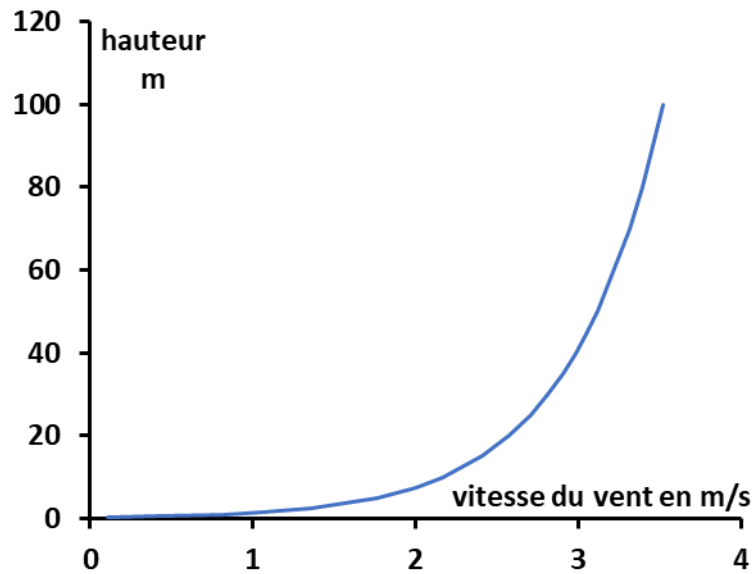


Figure 6 : Vitesse du vent en fonction de la hauteur modélisée sur le site expérimental

Un article présenté en annexe développe l'impact de la hauteur de mesure du vent sur le débit évaporatif selon les modèles. Des données expérimentales montrent une amélioration de la précision de la majorité des modèles en prenant en compte cette dernière information (annexe 5). L'erreur relative maximale passe de 200% sans prise en compte de la hauteur à 50%.

III. Les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde (infrarouge) avec l'environnement

La température du ciel est inférieure à la température ambiante. Elle dépend de nombreux facteurs comme la température ambiante, l'enneigement, l'humidité dans l'air, la position géographique [98]. Certains modèles théoriques basés sur l'émissivité de la vapeur d'eau en fonction des longueurs d'onde et des conditions atmosphériques ont été développés [99], mais la majorité de ces modèles est basée sur une méthode empirique [98]. Ces derniers ont pour objectif de décrire au mieux les échanges radiatifs tout en simplifiant la modélisation [98].

On considère une piscine extérieure dont la surface échange par rayonnement infrarouge avec le ciel. Si des bâtiments entourent la piscine, les échanges ont aussi lieu avec leurs façades.

La piscine est considérée comme un corps gris d'émissivité connue. Le modèle consiste à faire l'hypothèse que le ciel se comporte comme un corps noir (émissivité de 1) qui absorbe tout le rayonnement émis par la surface plane. D'après la théorie de Stéphan-Boltzmann, on obtient l'équation :

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon_{eau} \sigma (T_{ciel}^4 - T_{eau}^4) \quad <1.12>$$

Avec : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$: la constante de Stéphan-Boltzmann.

ε_{eau} : l'émissivité de l'eau dans les infrarouges

T_{ciel} : la température équivalente du ciel en K dans toutes cette sous partie

Hypothèse : On considère la surface du bassin comme une surface plane entourée d'un ciel de dimension infinie. Le facteur de forme du point de vue de la surface d'eau est alors de 1.

Une seconde approche équivalente considère que le ciel et l'atmosphère se comportent comme un corps gris avec une émissivité apparente et à la température ambiante. On obtient alors l'équation :

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon_{eau} \sigma (\varepsilon_{ciel} T_a^4 - T_{eau}^4) \quad <1.13>$$

Avec : T_a la température ambiante en K dans toute cette sous partie

ε_{ciel} émissivité équivalente du ciel dans les infrarouges

On peut alors déterminer la relation qui relie la température de ciel et l'émissivité du ciel. Certains modèles se basent plutôt sur cette seconde approche (EnergyPlus [98], [100], [101], Woolley [80], Berdahl [102]) :

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{0.25} T_a \quad <1.14>$$

1. La modélisation de la température équivalente du ciel dans la littérature

Les modèles empiriques ont des formes très variées. Les paramètres pris en compte sont divers. Pour les modèles de ciel clair, la température ambiante est systématiquement intégrée, mais souvent aussi celle de rosée ou la pression de vapeur d'eau [98]. Ces deux paramètres permettent de prendre en compte l'impact de l'atmosphère. Le ciel clair est le plus étudié, mais n'est pas suffisant pour prédire le comportement des échanges radiatifs sur une période quelconque. Ils sont impactés par les nuages. Leur modélisation s'intéresse à la part de nuages sur la surface totale vue par piscine mais aussi à leur altitude. En effet cette dernière impacte la température de la vapeur d'eau dont sont constitué les nuages et donc les échantent radiatif [102]. La difficulté provient de la mesure expérimentale de l'ennuagement qui est complexe et rarement réalisée.

La température ambiante fait partie de tous les modèles étudiés et trouvés dans la littérature. Certains utilisent uniquement cette donnée pour évaluer celle du ciel. Comme celui développé par Whiller [98], dont la forme est une fonction linéaire de la température ambiante :

$$T_{ciel} = 0.0552 T_a - 6 \quad <1.15>$$

D'autres modèles se basent sur la même forme, mais proposent des coefficients différentes en fonction du climat, comme ISO [98] :

$$\begin{cases} T_{ciel} = 0.0552 T_a - 11 \text{ (tempéré)} \\ T_{ciel} = 0.0552 T_a - 9 \text{ (sub-polaire)} \\ T_{ciel} = 0.0552 T_a - 13 \text{ (tropical)} \end{cases} \quad <1.16>$$

Rakopoulos [103] en utilise un qui dépend de la puissance 1.5 de la température ambiante.

$$T_{ciel} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad <1.17>$$

Fuentes [98] utilise une forme similaire :

$$T_{ciel} = 0.037536 T_a^{1.5} + 0.32 T_a \quad <1.18>$$

L'humidité de l'air est prise en compte dans de nombreux modèles. Ce but peut être atteint en utilisant différentes variables comme :

- La température de rosée qui est utilisée par Berdhal [98] :

$$\varepsilon_{ciel} = \left(0.711 + \frac{0.0056 T_{rosé}}{100} + 0.000073 \left(\frac{T_{rosé}}{100} \right)^2 \right)^{1/4} \quad <1.19>$$

Avec $T_{rosée}$ la température de rosée en °C

Et aussi par Sartori [102] dont le modèle est une version simplifiée de celui Duffie et Beckmann [104] :

$$T_{ciel} = T_a \left(\frac{T_{rosé} + 200}{250} \right)^{1/4} \quad <1.20>$$

Et une variante proposée par Woolley [80] :

$$\varepsilon_{ciel} = \left(0.787 + 0.764 \log \left(\frac{T_{rosé} + 273}{273} \right) \right) \quad <1.21>$$

- La pression de vapeur dans l'air ambiant comme dans le modèle proposé par Aubinet [78], [105] :

$$T_{ciel} = 94 + 12.6 \ln(P_{eau}) - 9.75 + T_a \quad <1.22>$$

Une fois le ciel clair modélisé, il est important de s'intéresser à l'impact des nuages sur les pertes radiatives. En effet, ils sont constitués d'une accumulation d'eau liquide dans l'air à une température qui dépend de l'altitude et de ses caractéristiques. La méthode la plus simple et courante pour les prendre en compte est d'utiliser le taux de couverture nuageuse du ciel visible par la surface d'échange :

- Almanza [78], dont le modèle est repris par Namenech [105], propose un modèle qui dépend de la couverture nuageuse et de la température de l'air.

$$\dot{q}_{rad,ciel} = 0.511 \cdot 10^{-12} (T_a + 273.2)^6 (1 + 0.17 N^2) \quad <1.23>$$

Avec N la nébulosité.

- Energyplus [98], [100], [101] utilise un modèle qui prend en compte le taux d'ennuagement et la température ambiante et l'humidité de l'air par l'intermédiaire de la température de rosée. Le modèle a été développé par Walton [98], [101], puis repris par Harrington [100] avant d'être intégré dans EnergyPlus.

$$\varepsilon_{ciel} = \left(0.787 + 0.764 \ln \left(\frac{T_{rosé} + 273}{273} \right) \right) (1 + 0.0224 N - 0.0035 N^2 + 0.00028 N^3) \quad <1.24>$$

D'autres caractéristiques de la couverture nuageuse permettent de modéliser son impact :

- La hauteur des nuages intégrée à la méthode de calcul des pertes radiatives en présence de nuages en plus du taux de couverture nuageuse par Martin et Berdahl [102]. Elle est disponible dans les modèles de prévision météo, mais rarement mesurée expérimentalement.
- Le type de nuages étudié par Kasten [106].

Le taux de couverture nuageuse n'est pas souvent mesuré sur les sites expérimentaux, Almanza [78] conseille alors de prendre la valeur de 0.5.

D'un autre côté, la modélisation du flux émis par la surface de l'eau dépend de la température de l'eau qui est connue, mais aussi de l'émissivité de l'eau. Un modèle de corps gris (indépendant de la longueur d'onde) est utilisé. La valeur de l'émissivité est de 0.96 pour Hahne et Kübler [77] et Nameche [105] ou de 0.97 pour Rakopoulos [103] et Szeicz [79].

2. L'analyse des modèles de température du ciel

Les figures qui suivent ont pour objectif de mettre en évidence l'influence de la température, de l'humidité de l'air et du taux de couverture nuageuse sur la température de ciel simulé par les modèles présentés précédemment. On prend un cas de référence de 30°C, 50% d'humidité relative et de ciel clair. On fait varier une variable à la fois : la température ambiante, puis l'humidité relative et finalement l'ennuage. L'objectif est d'étudier l'impact de chaque paramètre sur les prédictions de température de ciel en fonction du modèle.

La Figure 7 met en évidence que l'évolution peut être assimilée à celle d'une fonction linéaire de la température ambiante sur l'intervalle représenté pour tous les modèles. On remarque que selon les modèles, l'impact peut être plus ou moins important. Par exemple le passage de 0°C à 30°C a un impact de moins de 17°C sur la température de ciel de Fuentes, et de 30°C dans une majorité (comme avec Whiller ou ISO 13790).

La dispersion des températures de ciel prédite par les différents modèles est plus importante pour celle de l'air ambiant proche de 0°C, avec 26°C d'écart entre la plus grande et la plus petite, et seulement 14°C d'écart à 20°C et même 13°C d'écart à 30°C.

L'humidité relative de l'air impacte de manière variable, selon les modèles, la température de ciel prédite. Le passage, à température constante de 20% d'humidité à 80%, change T_{ciel} de 15°C pour celui Berdhal contre seulement 3°C pour celui de Wooley. Pour ceux de Wooley et de Sartori, l'impact de l'humidité relative est plus important pour les conditions sèches entre 20% et 50% que pour un climat humide de 50% à 80%. De manière générale, la variation de l'humidité de l'air a un impact moindre sur la température du ciel que la température ambiante. Le modèle proposé par ISO qui détermine une équation par climat, a pour conséquence de considérer que l'on peut déterminer la température de ciel en fonction de celle de l'air pour un climat et donc un intervalle d'humidité particulier mais non précisé.

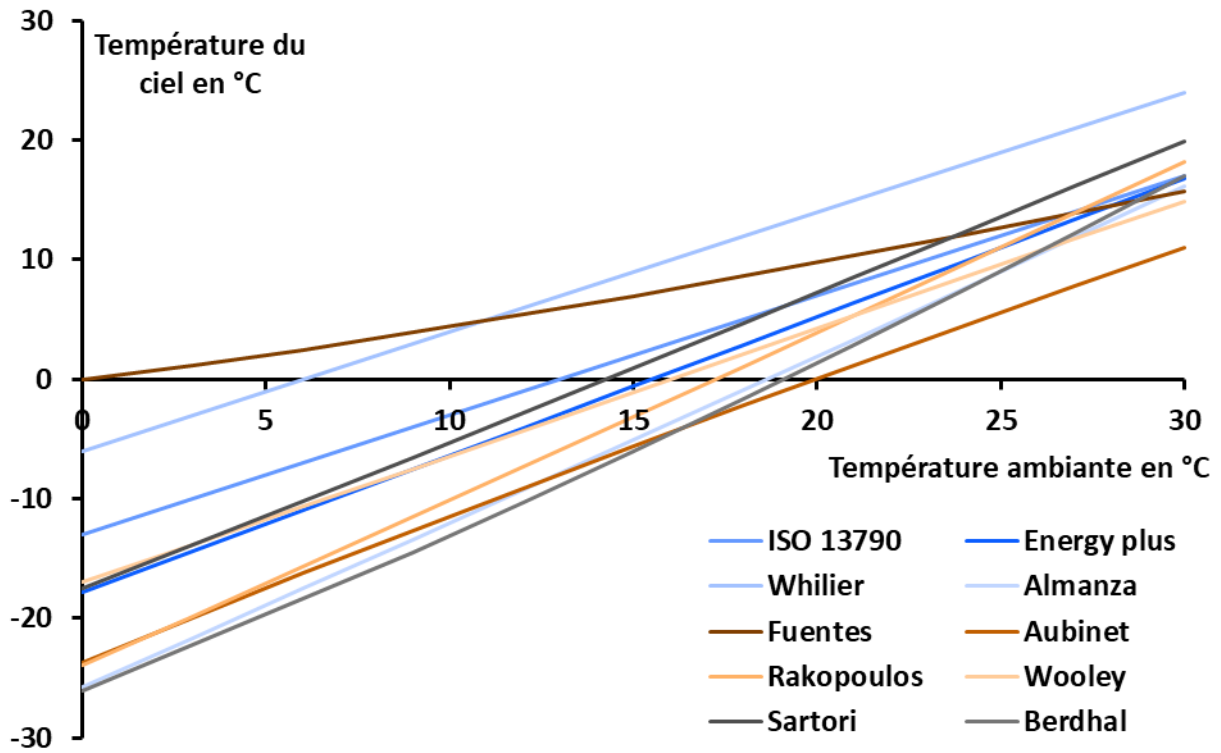


Figure 7 : Température du ciel en fonction de la température ambiante pour une humidité de 50% et sans nuages

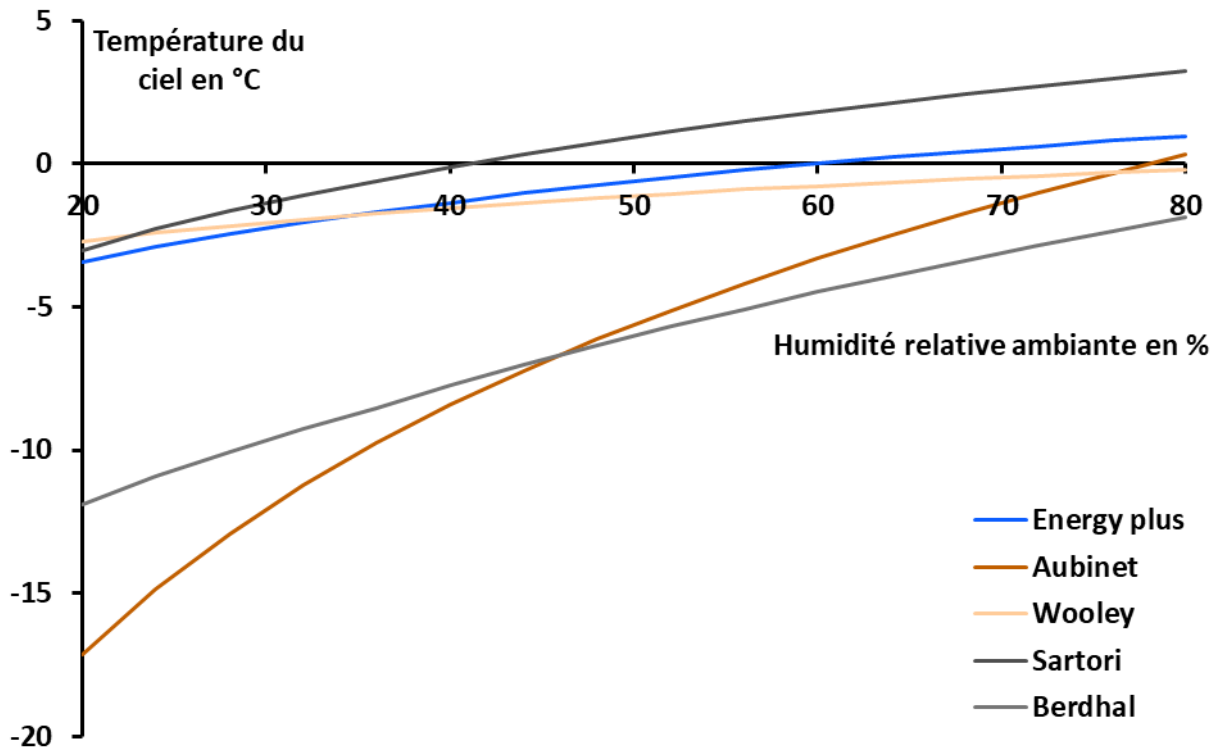


Figure 8 : Température du ciel en fonction de l'humidité relative ambiante pour une température ambiante de 15°C et sans nuages.

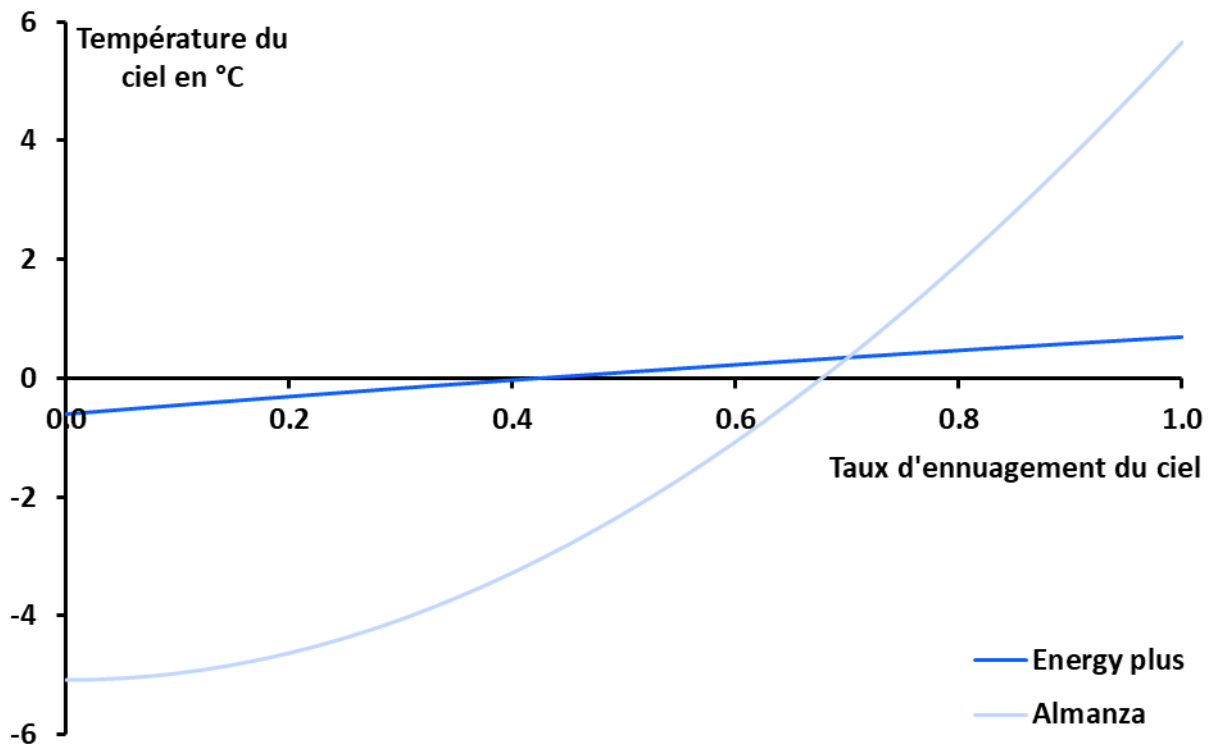


Figure 9 : Température du ciel en fonction de l'ennuagement pour une température ambiante de 15°C et une humidité de 50%

La Figure 9 présente l'impact de l'ennuagement sur la température de ciel pour le modèle Energie plus et d'Almanza. Les modèles prédisent des températures de ciel très proche pour un ennuagement proche de 0.7. Pour un ciel clair ou complètement couvert, les températures de ciel calculées présentent un écart important de 5°C.

Dans le cas de l'ennuagement supérieur à 0.7 l'impact sur le modèle utilisé par Energie plus prédit un impact similaire à précédemment contrairement à celui d'Almanza qui prédit une accélération de l'augmentation de la température de ciel dans ces conditions. La température de ciel augmente de 11°C entre le ciel clair et le ciel couvert pour le modèle d'Almanza et seulement de 1,5°C pour le modèle d'Energie plus.

Ces deux modèles mettent en évidence que la prise en compte de la couverture nuageuse est variable selon les modèles. Les écarts pourraient être expliqués par l'absence de prise en compte de la hauteur et du type de nuage.

IV. Le gain solaire

L'énergie apportée à l'eau par le soleil dépend de l'irradiation globale arrivant à la surface du bassin, mais aussi de la fraction de ce rayonnement effectivement absorbé par l'eau :

$$\dot{q}_{sol} = \alpha.G \quad <1.25>$$

Avec : G est l'irradiation globale horizontale
 α est l'absorbance de l'eau

1. La modélisation du flux radiatif solaire dans la littérature

Wu [107] a étudié l'absorbance de l'eau en divisant le flux entre le flux direct et le flux diffus. Notre travail comme la littérature sur la modélisation énergétique [77], [108], [34], [62], [80], [109], [27], [110], [22] des piscines se base sur l'hypothèse que cette information n'est pas connue.

La détermination de la part du rayonnement absorbée par l'eau dépend de la profondeur, de celle des parois du bassin [62], de l'angle d'incidence (pour le flux direct) [77] [34], [80]. Le rayonnement est réfléchi, absorbé et transmis successivement par l'eau, les parois et l'eau. Hahne [77] utilise un modèle théorique développé par Jamal [111] pour déterminer l'absorbance de l'eau en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. La méthode est appliquée au rayonnement global malgré le fait que cette équation est valable pour le rayonnement direct, mais pas pour le diffus.

$$\left\{ \begin{array}{l} n' \times \sin(\theta') = n \times \sin(\theta) \\ \rho = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \\ \rho_{\parallel} = \left[\frac{(n \times \cos(\theta') - n' \times \cos(\theta))}{(n \times \cos(\theta') + n' \times \cos(\theta))} \right]^2 \\ \rho_{\perp} = \left[\frac{(n' \times \cos(\theta') - n \times \cos(\theta))}{(n' \times \cos(\theta') + n \times \cos(\theta))} \right]^2 \\ x = p / \sin(\theta') \\ f(x) = 35.22x^{0.016} \exp(-0.05x) \exp(\exp(-2.08x^{0.48})) / 100 \\ \alpha = (1 - \rho) \left(1 - f(2x) \left(1 - \alpha_{carrelage} \right) 0.432 \right) \end{array} \right. \quad <1.26>$$

Avec : θ est l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la surface de l'eau en degrés
 θ' est l'angle de réfraction du rayonnement en degrés
n est indice de réfraction de l'air
n' est indice de réfraction de l'eau
p est la profondeur de la piscine en m

2. L'analyse des modèles de flux radiatif solaire

La Figure 10 représente l'absorbance de l'eau pour une piscine de 1.5 m de profondeur en fonction de l'angle d'incidence. Trois valeurs de l'absorbance des parois ont été testées : 0.2 qui est un matériau clair qui reflète une partie importante du rayonnement incident, 0.5, une valeur intermédiaire et 0.8 qui est un matériau foncé qui en absorbe une part importante. L'absorbance de l'eau est dans ce cas comprise entre 0.8 et 0.9 pour les rayons perpendiculaires à la surface et diminue doucement. Quand l'angle d'incidence devient supérieur à 60°, elle chute rapidement.

L'angle d'incidence du rayonnement direct est supérieur à 60° le matin et le soir quand l'énergie transportée est la plus faible et inférieur en milieu de journée quand l'énergie est la plus importante. La majorité des publications utilise un coefficient d'absorbance effectif de l'eau constant [22], [27], [34], [62], [80], [109], [110]. ISO TC 180 (1995) [62] recommande une valeur de 0.85 pour une piscine avec des parois claires. Cette valeur est reprise dans une majorité de publications [22], [34], [62], [109]. On retrouve des valeurs entre 0.9 et 0.8 avec le modèle précédent pour une absorbance des parois de 0.2 et un angle d'incidence entre 0° et 60°. Deux auteurs ont utilisé respectivement 0.74 [27] et 0.75 [110]. Les valeurs ne sont pas cohérentes avec les calculs précédemment réalisés pour une piscine de 1,5 m de profondeur moyenne. La profondeur des piscines concernées n'est pas précisée.

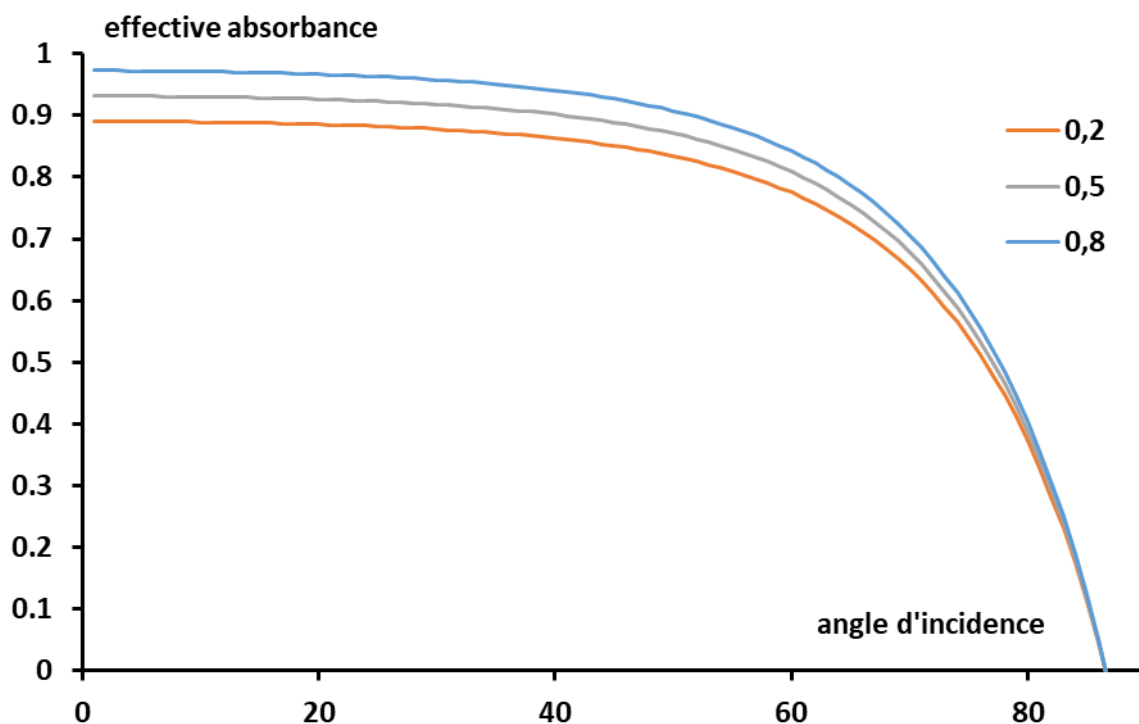


Figure 10 : Absorbance de la piscine en fonction de l'angle d'incidence et de l'absorbance des parois (valeurs présentées de 0.2, 0.5 et 0.8)

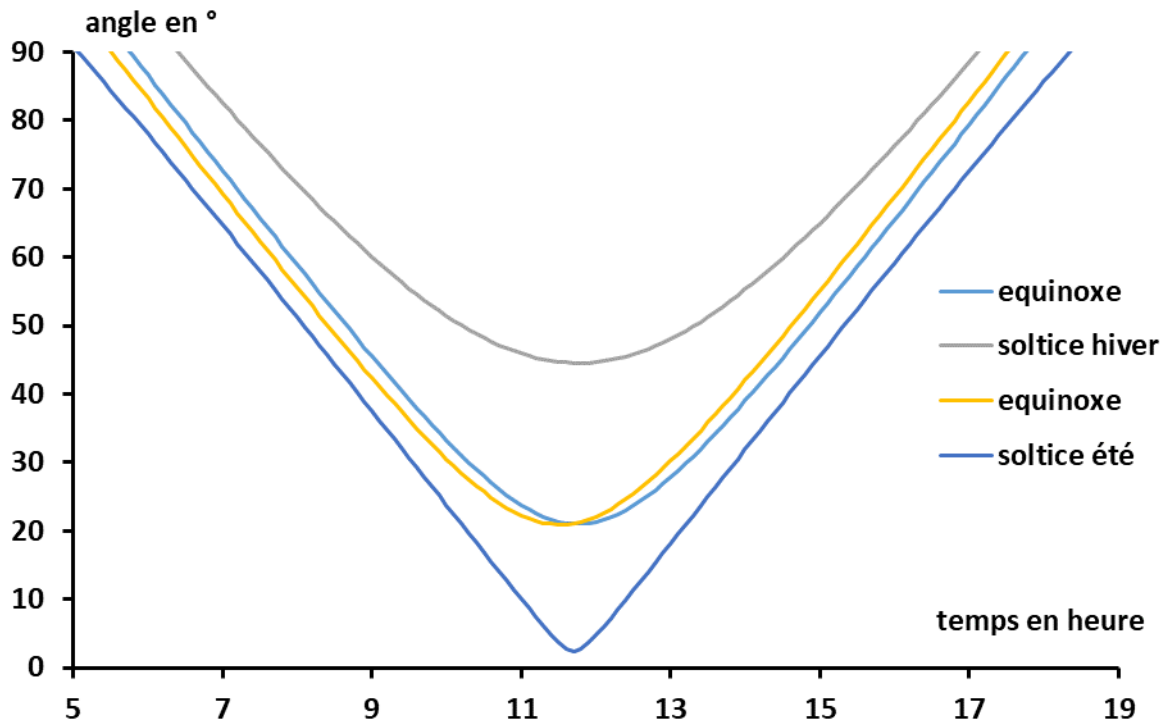


Figure 11 : Angle d'incidence des rayons de soleil directs sur la piscine à La Réunion

V. La convection entre l'air et l'eau du bassin

Pour la modélisation de la convection, seules les piscines extérieures soumises au vent sont considérées. Les piscines intérieures sont soumises à des régimes de convection différents qui ne seront pas présentés (convection naturelle, convection forcée créée par la ventilation). La configuration des bassins peut être assimilée à une plaque plane de la superficie de ce dernier.

Des modèles empiriques sont utilisés dans la littérature. Leur forme est analogue aux modèles d'évaporation dont le lien entre ces deux phénomènes a été montré par Bowen [112], [113], [114] :

$$\begin{cases} \dot{q}_{conv} = h_{conv} (T_a - T_{eau}) \\ h_{conv} = a v + b \end{cases} \quad <1.27>$$

Tableau 3 : Coefficient modèle empirique de convection

	a	b	note	reference
Jurges	3.8	5.7	0 < v < 5 m/s	[115]
Rowley	3	2.8	0 < v < 7 m/s	[115]
Australien standard	4.1	3.1		[77]

On peut constater que leurs domaines d'application sont importants (de 0 à 5 ou 7 m/s). Le régime de vent laminaire et/ou turbulent n'est pas précisé. Bien que le coefficient d'échange est fortement impacté par ce dernier [116].

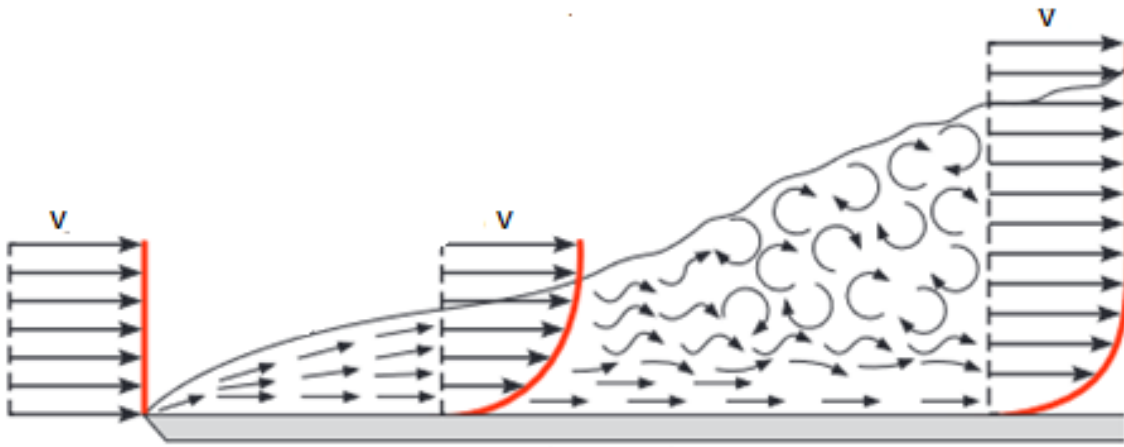


Figure 12 : Couche limite au-dessus d'une plaque plane, représentation issue de [116]

Rakopoulos [103] utilise un modèle empirique basé sur l'analogie entre les transferts de chaleur et de moment pour obtenir les équations qui suivent. Il utilise le nombre adimensionnel de Prandtl. Le coefficient de convection dépend aussi de la longueur caractéristique de la surface d'eau. Les auteurs ont mesuré expérimentalement le coefficient de réduction de la vitesse de l'air sur le site. L'équation de départ est un modèle général, mais les adaptations sur un site en particulier rendent la généralisation à un autre site compliqué.

$$\begin{cases} \dot{q}_{conv} = h_{conv} (T_a - T_{eau}) \\ h_{conv} = 0.0369 \rho_a C_{p,a} Pr^{-0.4} \left(\frac{L_c}{\nu_c} \right)^{-0.2} v^{0.8} \\ Pr = \frac{\nu_c C_{p,a}}{\rho_a k_a} \end{cases} \quad <1.28>$$

Avec : ρ_a : masse volumique de l'air en kg/m³

k_{air} : conductivité thermique de l'air W/(m.K)

$C_{p,air}$: Capacité thermique de l'air ambiant J/(kg.K)

Pr : le nombre de Prandtl

L_c : la longueur caractéristique en m

ν_c : viscosité cinématique en m²/s

Le modèle <1.29> [116] est basé sur la résolution de l'équation de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie dans des conditions particulières. La vitesse de l'air prise en compte est celle en-dehors de la couche limite. La vitesse du vent est considérée comme

constante en dehors de la couche limite de la plaque plane (cf. Figure 12). La vitesse est considérée comme nulle au contact de la plaque plane. Le coefficient d'échange convectif dépend de trois nombres adimensionnels :

- Nusselt qui est le rapport entre de transfert d'énergie par convection sur celui par conduction.
- Reynolds qui est le rapport entre l'énergie d'inertie due à la vitesse du fluide et la résistance au mouvement due à la viscosité du fluide.
- Prandtl qui est le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement et de celle de la chaleur.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{q}_{conv} = h_{conv} (T_a - T_{eau}) \\ h_{conv} = \frac{Nu k_{air}}{Lc} \\ Re_{Lc} = \frac{vLc}{\nu_c} \\ Pr = \frac{\nu_c C_p}{\nu_{air} k_{air}} \\ Nu = a Re_{Lc}^b Pr^{1/3} \end{array} \right. \quad <1.29>$$

Avec : Nu : le nombre de Nusselt

Re : le nombre de Reynolds

La base théorique nécessite tout de même l'identification expérimentale des coefficients a et b. Le Tableau 4 suivant présente la valeur empirique utilisée par certains des auteurs. Le premier modèle est repris dans de nombreuses applications pratiques et il permet de différencier les différents régimes de vent : laminaire pour les $Re < 3 \cdot 10^5$ et turbulent pour les $Re > 5 \cdot 10^5$.

Tableau 4 : Coefficient modèle adimensionnel de convection

	a	b	note	référence
Padet	0.664	0.5	$Re < 3 \cdot 10^5$	[116], [117],
	0.035	4/5	$Re > 5 \cdot 10^5$	[118]
Rabadya et Kirar	0.0723	0.773		[119]
Pohlhausen	0.664	0.5		[119]
RK2	0.931	0.5		[119]
Sparrow et Lau	0.86	0.5		[119]

On trouve historiquement de nombreux modèles convectifs dans la littérature, cependant les sources récentes s'accordent sur un même modèle [116], [27]. Ces conclusions ont été utilisées pour fixer le cadre de l'expérimentation présentée dans la partie II.

VI. La conduction entre l'eau du bassin et le sol

La conduction au travers des parois du bassin est souvent négligée dans la littérature [35], [29], [120], [103]. Les données issues de la littérature suggèrent qu'elle représente environ 2% des pertes totales du système [80], [100]. Des modèles simplifiés sont utilisés dans la littérature [37], [22], [121], [31]. Les modèles considèrent [116] un parallélépipède en contact avec un milieu semi-infini à la température du sol et de conductivité égale à celle du sol. Un facteur de forme q issu d'une modélisation du bassin est utilisé. Dans notre cas il prend la valeur 0.943 [116]. La forme de l'équation [37], [22], [121], [31] est :

$$\dot{Q}_{conduction} = q \cdot \frac{k_{sol} \cdot A_{paroi}}{2 \cdot L_c} \cdot (T_{sol} - T_{eau}) \quad <1.30>$$

Avec : k_{sol} : la conductivité thermique du sol en W/(m K)

q : le facteur de forme

T_{sol} : la température du sol en °C

A_{paroi} : la surface de paroi du bassin en m²

L_c : la longueur caractéristique du bassin en m

La conductivité du sol dépend de sa constitution minérale [122] qui dépend elle-même du lieu. La piscine expérimentale se situe à La Réunion qui est une île volcanique soumise à l'érosion en particulier lors de cyclones. Le volcan est à l'origine de coulées successives qui se superposent ou non, de composition variable en fonction de celle de la lave. Des études ont permis de classer la nature et les caractéristiques des sols en fonction de la localisation sur le territoire et de l'altitude [123], [124], [125]. Trois éléments principaux caractérisent le sol dans la région de la piscine : l'argile (55%), l'eau (35%) et le limon (10%) [125]. On traverse successivement de l'argile, de l'eau et du limon. Le modèle pour calculer la conductivité du sol est un modèle en série [122] :

$$k_{sol} = \frac{1}{\left(\frac{0.55}{k_{argile}} + \frac{0.35}{k_{eau}} + \frac{0.10}{k_{limon}} \right)} \quad <1.31>$$

Tableau 5 : valeur de la conductivité

Matériaux	Argile	Eau	Limon
k : conductivité (W/m/k)	1.28	0.56	1.26-1.33

Pour le limon la valeur moyenne de 1.30 W/m/K a été prise en compte dans les calculs. La conductivité du sol sur le lieu expérimental est estimée à 0.91 W/m/K [122].

D'après la littérature la température du sol peut se modéliser sous la forme suivante [126], [127], [128], [129]:

$$T_{sol}(z,t) = T_m + A(z) \times \sin(2\pi / P \times (t - t_{déphasage})) \quad <1.32>$$

Avec : T_m est la température moyenne ambiante sur la période,

z est la profondeur en m

P est la période de temps sur laquelle la température varie périodiquement (en fonction des cas : la journée ou l'année)

A est l'amplitude des variations de température sur la période considérée

$t_{déphasage}$ est le déphasage entre l'évolution de la température à la surface et en profondeur due au temps de propagation du flux de chaleur dans le sol.

Sur l'année quand la profondeur augmente, la température tend vers la température ambiante moyenne d'après l'équation <1.32> [130]. Dans notre cas on a considéré que la conduction se fait entre la piscine et le sol modélisé comme un milieu semi-infini, la température de sol est donc considérée comme la température moyenne ambiante sur l'année.

VII. La couverture

La couverture est un élément de base des piscines extérieures chauffées. Elle est mise en place durant les heures d'inoccupation des bassins. Elles sont composées d'un matériau isolant qui limite l'évaporation et les échanges thermiques entre la surface de l'eau et le milieu environnant [22], [28], [41], [121], [131], [132]. Une étude sur une piscine extérieure a mis en évidence des gains significatifs : une diminution du chauffage pouvant aller de 25% [17] jusqu'à 50% [120] et une diminution des besoins en eau. Les couvertures peuvent aussi être utilisées pour des piscines saisonnières non chauffées. En Inde, la période d'ouverture calculée est passée de 29 semaines sans à 36 semaines avec couverture, le tout sans recours au chauffage [108].

La composition et la conception des couvertures leur confèrent des propriétés différentes. Les différentes caractéristiques sont :

- La structure du matériau qui la constitue, qui peut être composé d'une simple couche, de deux couches séparées par une couche d'air ou d'isolant ou d'une ou deux couches avec des bulles d'air [22], [131], [133].
- L'épaisseur, la conductivité thermique et l'émissivité de la couverture. La conductivité thermique peut varier de 0.08 à 0.52 W/m/K selon les modèles [22].
- Des couvertures transparentes ont été développées pour permettre d'optimiser le gain solaire. Des travaux ont été menés pour étudier les propriétés radiatives des

couvertures : d'un côté l'impact sur les pertes radiatives ainsi que sur les gains solaires si la couverture est en place en journée [133], [134], d'un autre côté la possibilité de l'utiliser comme chauffage en permettant l'absorption du rayonnement solaire, mais en bloquant les pertes radiatives en utilisant la variation des caractéristiques des matériaux en fonction de la longueur d'onde [135].

L'impact de différentes couvertures est étudié de nuit et de jour [79].

Les couvertures sont principalement installées sur des piscines extérieures, ce qui implique une exposition aux ultraviolets qui dégradent les matériaux. Leur durée de vie est dans la majorité des cas de 3 à 5 ans [131]. La détérioration de celles d'entrée de gamme peut être rapide, impliquant la formation de trous qui diminueront leurs performances [136]. Une garantie minimale de 2 ans est conseillée [131].

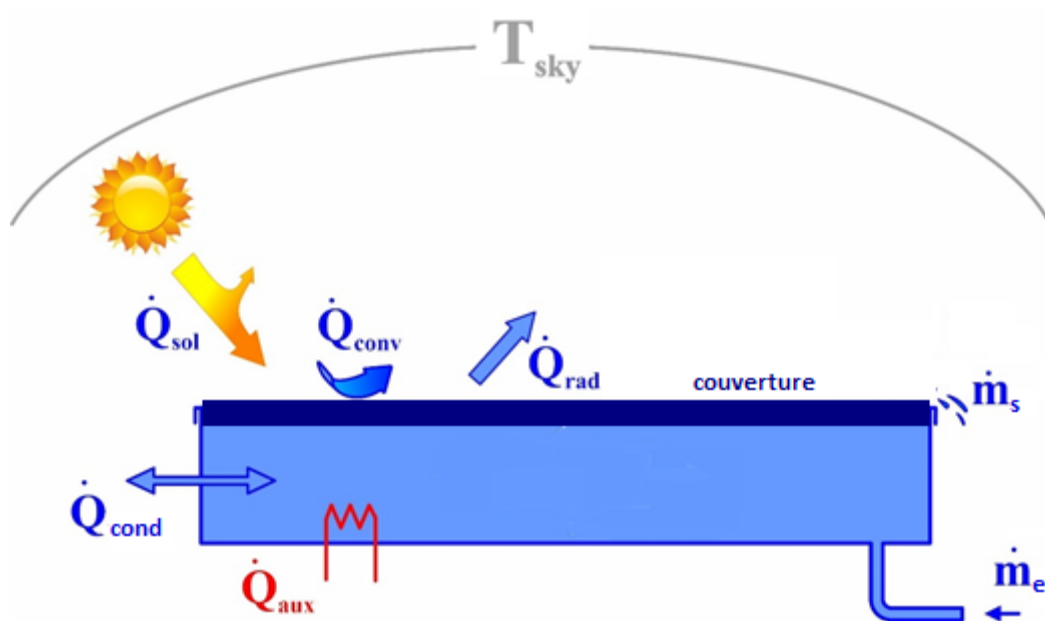


Figure 13 : Schéma des phénomènes physiques influençant le bilan du bassin avec une couverture

Les hypothèses de la modélisation de la couverture utilisées dans la littérature [79], [103], [118], [137] :

- La couverture atteint le régime permanent à chaque pas de temps, sa faible épaisseur lui confère une inertie faible par rapport au bassin.
- La couverture est opaque.
- La température de la couverture à la surface en contact avec l'eau est à la température de l'eau.
- Toute la surface de l'eau est recouverte, ce qui empêche totalement l'évaporation.

Ces hypothèses ne sont pas valables pour les couvertures transparentes à bulles. En effet il est nécessaire de connaître les radiations solaires et infrarouge transmises au travers du matériau [135].

Le bilan énergétique en régime permanent sur la couverture est traduit par l'équation suivante :

$$\dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond,couv} = 0 \quad <1.33>$$

Le gain solaire, les pertes radiatives et la convection se font entre l'environnement et la couverture et non plus entre l'environnement et l'eau. Les caractéristiques à prendre en compte sont celles du plastique constituant la couverture et non plus celles de l'eau (température, conductivité, émissivité, absorption). Le gain solaire est présenté, mais il est rarement pris en compte, car la couverture est mise en place lors de la fermeture qui se fait de nuit donc sans gain solaire. La conduction est celle au sein de la couverture.

VIII. L'utilisation



Figure 14 : Impact d'un nageur sur la surface de l'eau

Les baigneurs présents dans la piscine échangent thermiquement avec l'eau. Pour les activités sportives, l'énergie produite par une personne peut être évaluée à 150W d'après Nouanegue [121]. La chaleur apportée par les nageurs peut donc s'écrire comme suit :

$$\dot{q}_{nageurs} = 150 \text{ Nbr} \quad <1.34>$$

Avec Nbr : nombre de personnes par m²

L'occupation a une influence sur l'évaporation de l'eau du bassin. L'analyse des phénomènes physiques suppose que l'augmentation de l'évaporation est la conséquence de l'augmentation de la surface d'échange engendrée par les utilisateurs. Elle est due aux vagues, aux corps mouillés des baigneurs et aux plages mouillées par les utilisateurs. Toute la surface d'échange est supposée à la température de l'eau [138].

La première catégorie de modèles est celle de ceux qui sont indépendants du nombre de nageurs dans le bassin. C'est le cas du modèle de l'ASHRAE Handbook (2007) dont le modèle est une adaptation de la formule de Carrier (1918). Il est recommandé par les auteurs pour une vitesse d'air de 0.05 à 0.15 m/s et donc plus adapté à des piscines intérieures. La moitié des pertes évaporatives sont considérées comme la conséquence de l'occupation [138]. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) considère que l'occupation multiplie par 4 l'évaporation comparée à une piscine non occupée [138]. Aucune information n'est communiquée sur l'occupation pour les deux modèles.

$$\dot{q}_{\text{évap}} = a (P_{\text{sat}}(T_{\text{eau}}) - P_v) \quad <1.35>$$

Tableau 6 : Valeurs numériques des modèles évaporatifs avec utilisation indépendants du nombre de nageurs

Modèle	a	ref
ASHRAE Handbook	0.000144	[138]
Verein Deutscher Ingenieure (VDI)	0.000204	[138]

La seconde forme de modèle prend en compte le nombre de nageurs. L'évaporation d'une piscine occupée est considérée proportionnelle à celle d'une piscine inoccupée. Les auteurs s'intéressent alors au coefficient multiplicateur [138], [139]. Les modèles ont été validés sur des mesures de piscines collectives [138], [139].

$$\frac{\dot{Q}_{\text{évap,occupé}}}{\dot{Q}_{\text{évap,innoccupé}}} = a + b \text{ Nbr} \quad <1.36>$$

Tableau 7 : Valeurs numériques des modèles évaporatifs avec utilisation dépendants du nombre de nageurs

Modèle	a	b	ref
Smith (extérieure)	1.08	3.6	[139]
Smith (intérieure)	1.04	4.3	[138], [139]
Hens	1	8.46	[138]

Shah [138] a développé différents modèles, dont le dernier est présenté ci-dessous :

$$\frac{\dot{Q}_{\text{evap,occupé}}}{\dot{Q}_{\text{evap,innoccupé}}} = 1.9 + 21 (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{eau}}) + 5.3 \text{ Nbr} \quad <1.37>$$

Avec ρ_{air} la masse volumique de l'air à la température et humidité ambiante

ρ_{eau} la masse volumique de l'air à la température de l'eau et à saturation

$\text{Nbr} \geq 0.05$

Pour $\text{N} < 0.05$, une interpolation linéaire entre cette dernière et l'évaporation sans occupation est conseillée par l'auteur. Si $(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{eau}}) < 0$ il conseille de remplacer par $(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{eau}}) = 0$.

Shah avait précédemment [140] développé un modèle phénoménologique prenant 3 phénomènes en compte :

- l'eau sur les plages s'évapore dans l'air du hall,
- l'eau sur les corps,
- les vagues engendrées par les nageurs.

L'impact de l'occupation est modélisé comme une augmentation de la surface d'échange entre l'air et l'eau comme suit :

$$\frac{\dot{Q}_{\text{evap,occupé}}}{\dot{Q}_{\text{evap,innoccupé}}} = \frac{A_{\text{bassin}} + A_{\text{plages}} + A_{\text{nageurs}} + A_{\text{vagues}}}{A_{\text{bassin}}} \quad <1.38>$$

Shah définit un facteur d'utilisation des bassins : $U = 4.5 \text{ Nbr}$

Il fait l'hypothèse que la surface des plages est égale à celle du bassin et que la surface de la plage mouillée est proportionnelle au nombre de nageurs. Elle est complètement mouillée quand on a atteint l'occupation max. L'équation suivante est donc valable pour U allant de 0 à 1. Pour les $U > 1$, elle prend la valeur de la surface du bassin.

$$A_{\text{plages}} = U A_{\text{bassin}} \quad <1.39>$$

La surface de peau des nageurs moyenne, exposée à l'air, est estimée à 1.4 m^2 , ce qui ramené non plus au nombre de nageur mais au facteur d'activité correspond à un coefficient de 0.3 environ. Pour $U > 1$, le manque de place dans le bassin est supposé sur l'activité des nageurs. Les nageurs supplémentaires ne sont plus considérés comme provoquant une augmentation de l'évaporation.

$$A_{\text{nageurs}} = 0.3 U A_{\text{bassin}} \quad <1.40>$$

Pour l'augmentation de la surface due aux vagues, une valeur de 20% dès le premier nageur a été utilisée. Cette valeur est basée sur des vagues de 15 cm de hauteur et 90 cm de long. Un seul nageur crée des vagues sur toute la surface de la piscine (cf. photo). La formation de vagues ayant cette caractéristique est considérée valable quand $U > 0.1$.

$$A_{vagues} = 0.2 A_{bassin} \quad <1.41>$$

Pour l'intervalle entre $U = 0$ et $U < 0.1$, une interpolation linéaire a été réalisée par l'auteur. L'équation finale qu'il obtient est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\dot{Q}_{evap,occupé}}{\dot{Q}_{evap,innoccupé}} = 3.3 U + 1 \text{ pour } U < 0.1 \\ \frac{\dot{Q}_{evap,occupé}}{\dot{Q}_{evap,innoccupé}} = 1.3 U + 1.2 \text{ pour } 0.1 \leq U \leq 1 \\ \frac{\dot{Q}_{evap,occupé}}{\dot{Q}_{evap,innoccupé}} = 2.5 \text{ pour } U > 1 \end{array} \right. \quad <1.42>$$

Le modèle a été comparé à des valeurs expérimentales ainsi qu'à d'autres modèles issus de la littérature dans une publication ultérieure [138]. Les résultats montrent que dans 70% des cas, le modèle prédisait l'évaporation avec une erreur relative inférieure à 30%.

La surface d'échange entre l'air et l'eau par convection est la même que celle pour l'évaporation. Il sera donc considéré que la surface d'échange calculée avec les modèles présentés précédents l'est aussi pour la convection.

IX. Autres phénomènes physiques

L'entrée d'eau neuve dans le système provient de deux sources différentes :

- Celle de la pluie durant les précipitations. Le volume d'eau est considéré connu et sa température être celle de l'air ambiant [26].
- De l'apport d'eau neuf depuis le réseau de ville. La quantité est considérée comme maintenue constante dans le système à tout moment en ajoutant de l'eau neuve. La température de l'eau de ville est supposée égale à la température du sol dans lequel circule cette dernière pour arriver sur le site (cf. conduction).

Les sorties d'eau prises en compte dans le calcul proviennent de deux sources :

- L'évaporation de l'eau du bassin
- Les fuites dues aux défauts d'étanchéité du système hydraulique.

Les pertes occasionnées lors de l'entretien du système ne sont pas prises en compte dans la modélisation, ni les pertes qui pourraient avoir lieu entre l'eau circulant dans la canalisation et l'air [41].

X. L'impact du choix de modèle évaporatif et radiatif à grande longueur d'onde sur le bilan.

Les parties précédentes ont mis en évidence que la modélisation de l'évaporation et des pertes radiatives à grandes longueurs d'onde conduise à des écarts significatifs entre les différents modèles.

La Figure 16 présente la modélisation d'un bassin de 12,5 m par 25 m dans les conditions présentées dans le Tableau 8. La combinaison du modèle de Raimundo pour celui évaporatif et de Whiler pour celui radiatif à grandes longueurs d'onde estime les pertes totales à 271 kW, ce qui est la valeur calculée la plus importante. La combinaison du modèle d'Almanza (évaporatif) et Berdhal (pertes radiatives à grande longueur d'onde) donne l'estimation des pertes totales la plus faible avec une valeur de 163 kW. Cela fait un écart de 108 kW entre les deux extrêmes, à comparer à une moyenne de 203 kW pour la moyenne des pertes totales modélisées par les 6 modèles de bassin. Le choix d'un de ces derniers implique des écarts importants sur le bilan.

Tableau 8 : Conditions de modélisation

Température ambiante	Température de l'eau	Humidité ambiante	Vitesse du vent
20 °C	28 °C	60 %	2 m/s

Le cas 1 et le cas 6 donnent un résultat de pertes totales proche avec un écart de seulement 19 kW. La Figure 15 met en évidence que les parties des pertes liées aux différents phénomènes varient significativement en fonction du modèle. En effet la part de l'évaporation est de 29% dans le premier cas et de 37% pour le cas 6. Quant à la part des pertes radiatives à grandes longueurs d'onde, elles passent de 63% à 54%. La validation expérimentale des pertes et gains totaux ne permet pas de valider la connaissance de la répartition des pertes entre les différents phénomènes physiques.

Les applications des modèles phénoménologiques à un bassin montrent que l'évaporation et les pertes radiatives infrarouges représentent les deux phénomènes prépondérants, ils représentent à eux deux plus de 90% des pertes. Mais la répartition entre les deux phénomènes et les valeurs des différents flux varient significativement selon le modèle évaporatif et/ou radiatif utilisé. Les pertes convectives sont largement moins significatives avec un poids inférieur à 10%.

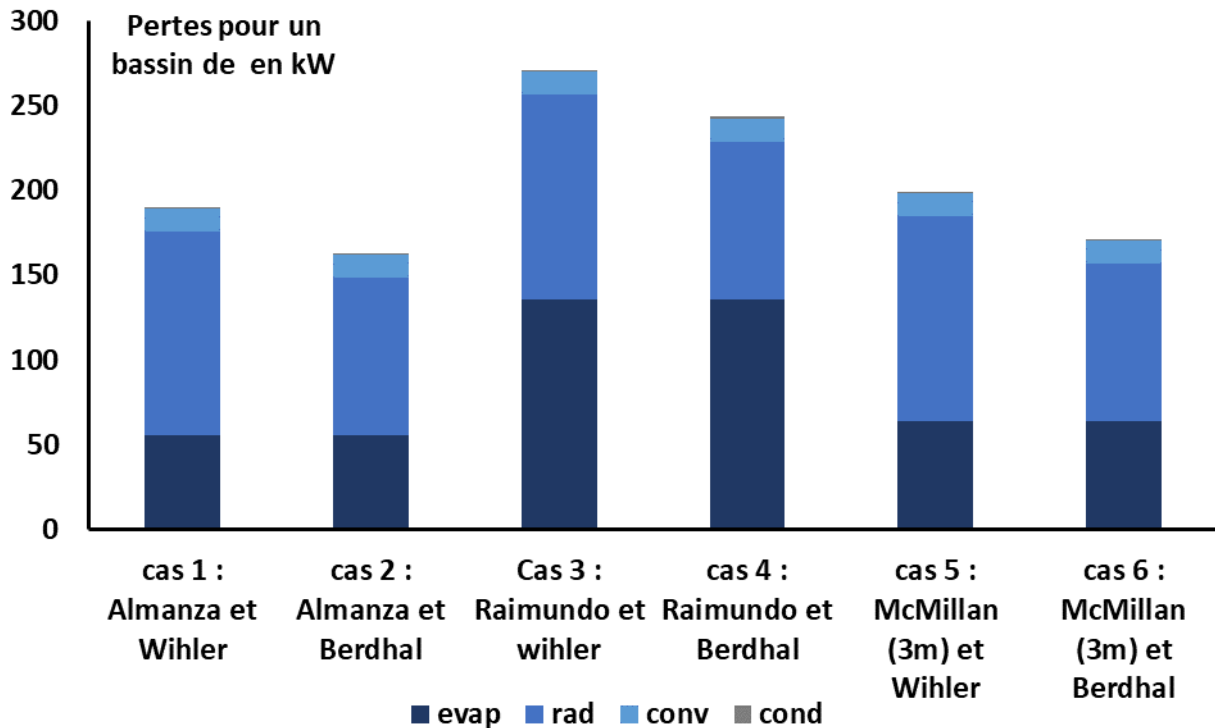


Figure 15 : Modélisation des pertes d'un bassin de 12,5 m par 25 m dans les conditions présentées dans le Tableau 8 pour trois modèles évaporatif : Almanza et al., Raimundo et al. et McMillan et al. et 2 modèles de pertes radiatives : Wihlle et al. et Berdhal et al.

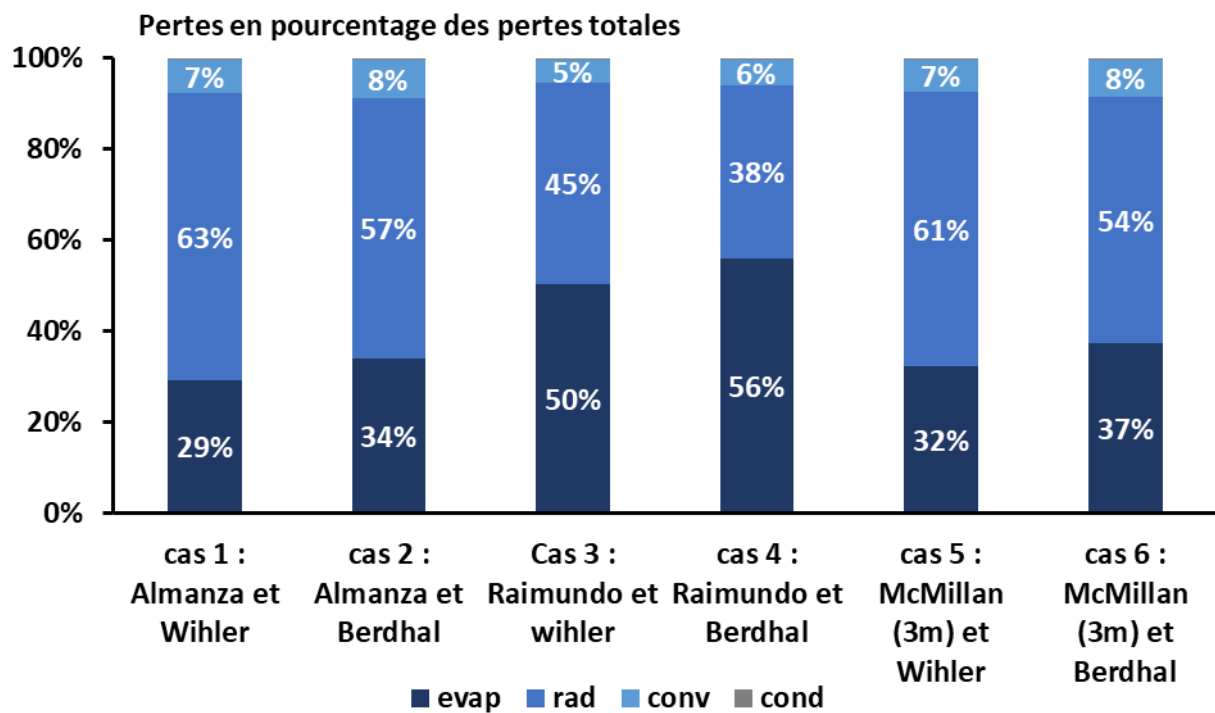


Figure 16 : Parts des pertes pour les différents phénomènes physiques pour les 6 cas présentés sur la Tableau 8.

XI. L'impact des différents phénomènes physiques sur le bilan énergétique du bassin dans la littérature

Les résultats de simulation en régime permanent montrent un poids très significatif des pertes évaporatives et radiatives à grandes longueurs d'onde sur les pertes totales du bassin et un impact significatif du choix du modèle sur la part respective de ces deux flux et leur valeur absolue. La Figure 17 représente les pertes de quatre bassins extérieurs et deux bassins intérieurs.

Dans le cas des bassins extérieurs, deux sources de pertes principales peuvent être identifiées : l'évaporation et les pertes radiatives. L'évaporation représente 57% dans le cas de Ruiz et al. [62] et seulement 35% pour la piscine de Molineaux et al. [94]. Les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur avec 53% pour Woolley et al. [80] et 29% dans le cas de Lam et al. [109]. Dans la littérature, Lovell et al. [26] les estiment à seulement 21% dans leur situation.

Les conditions environnementales sont différentes selon la publication comme représentée sur la Figure 18. On a plus de différence entre le cas de Ruiz et al. et de Woolley et al. [80] qui sont tous les deux dans un climat chaud qu'entre celui de Ruiz et al. [62] et de Lam [109] qui est soumis à un climat subtropical. Les conditions environnementales ne sont pas suffisantes pour expliquer les écarts de poids de l'évaporation en fonction des cas.

Les modèles utilisés pour chaque phénomène physique diffèrent selon les sources. Dans le cas de l'évaporation, Ruiz et al. [62] utilise le modèle de l'ASHRAE, Woolley celui de Mc Millan et al. [80]. Les résultats des modèles sont très différents dans des conditions similaires (cf Figure 4). Les modèles sont décrits et comparés entre eux dans la partie dédiée aux modèles évaporatifs.

La convection est la troisième source de pertes des bassins extérieurs. Elles peuvent représenter 4% pour Woolley et al. et jusqu'à 13% pour Ruiz et al. et Lam et al. Les autres phénomènes pris en compte dans les modélisations varient en fonction des sources. Molineaux et al. et Lam et al. prennent en compte la conduction entre l'eau et le sol au travers des parois. Ces pertes sont estimées à 4% pour Lam et al. et 8% pour Molineaux et al. Ruiz et al. et Woolley et al. quant à eux négligent ces dernières. Le renouvellement de l'eau est pris en compte par certains auteurs. En effet l'eau arrivant dans le système est à la température du réseau qui est différente de celle du bassin. Woolley et al. estime ce phénomène à 2% des pertes.

Mais l'incertitude persiste sur l'importance relative des pertes évaporatives et radiatives dans le comportement de l'installation. La modélisation du phénomène d'évaporation est reconnue comme une difficulté majeure, les modèles ne faisant pas consensus. Cette problématique est d'autant plus importante que l'évaporation est responsable d'une part importante des pertes [26]. La part respective des différentes pertes n'est pas validée expérimentalement dans la littérature.

De plus, la littérature présente des piscines extérieures issues de tous les continents et de tous les climats listés dans le Tableau 9 et représentées sur la Figure 18. Les conditions climatiques auxquelles sont soumis les bassins peuvent expliquer les différences d'impact. Par exemple, dans un climat sec, l'évaporation sera plus importante que dans un climat humide à toute autre condition égale. Les validations expérimentales de modèles ont lieu dans une majorité de cas dans des climats tempérés. Les conditions de validité des modèles présentés ne sont pas clairement déterminées et les modèles sont réutilisés pour les piscines dans des climats différents comme en climat chaud sans expérimentation pour valider les modèles dans ces nouvelles conditions (Figure 18 et Tableau 9).

La forme générale du modèle est valable pour les bassins intérieurs et extérieurs mais les conditions auxquels ils sont soumis sont différentes en termes de :

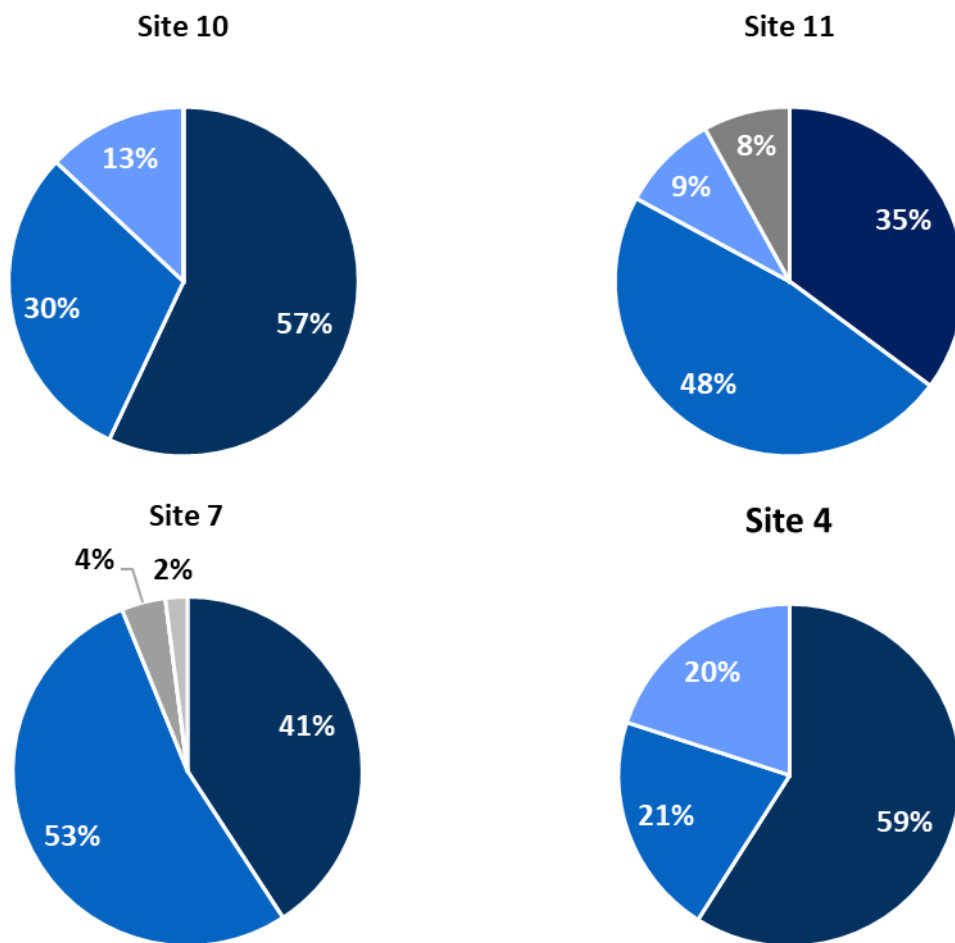
- Température de l'air
- Vitesse de l'air
- Humidité
- Rayonnement à grande longueur d'onde.

Les pertes radiatives à grande longueur d'onde sont moins importantes pour les bassins intérieurs qui échangent avec les murs qui sont à température ambiante ou proche alors que les bassins extérieurs échangent avec le fond du ciel. Dans les piscines intérieures, elles sont faibles, entre 4% [44] et 20% [118]. Elles représentent entre 20% [26], [62], [109] et 50% [80], [94], [100] en extérieur. Les pertes en absolu par évaporation sont plus fortes dans les piscines extérieures comparées à celles d'intérieures en raison de mouvement d'air plus important dans le premier cas où la surface de l'eau est soumise au vent. On note toutefois une part relative de ces dernières moins considérable en extérieure de 35% [80], [94], [100] à 65% [26], [62], [109] contre environ 75% [53], [45], [118], [44] pour celles en intérieure.

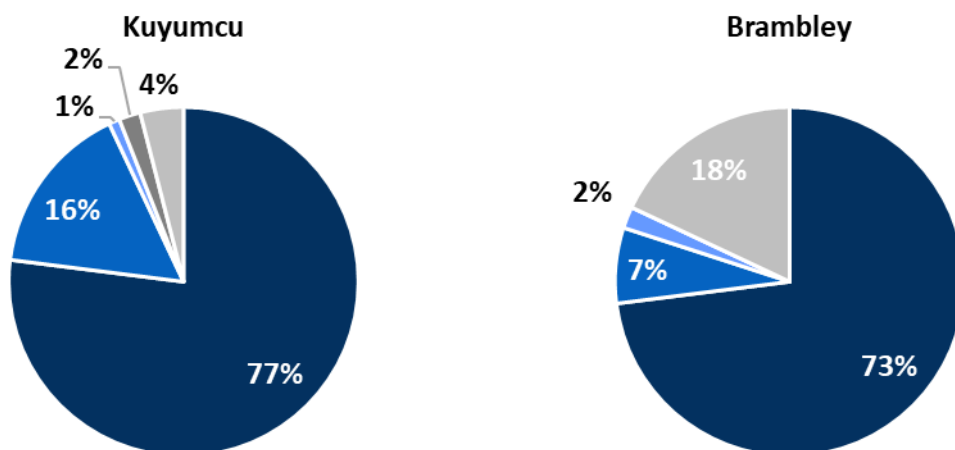
La première source de pertes est l'évaporation avec respectivement 77% et 73%. La seconde dépend du cas étudié : les pertes radiatives avec 16% dans le premier cas et 18% pour les pertes conductives avec le sol pour le second. Kuyumucu et al. évalue les pertes radiatives à 16% contre seulement 7% pour Brambley et al., cela peut s'expliquer par des conditions de température de l'air et de l'eau différentes dans les deux cas. En effet si la température de l'air est inférieure à celle de l'eau dans les deux cas, les consignes sont très différentes. Dans le premier cas, l'écart de température entre l'air et l'eau est de 6°C, contre 1°C dans le second. De plus, les températures sont plus faibles dans le premier cas (20°C et 26°C) que dans le second (28°C et 29°C).

L'étude réalisée est appliquée aux bassins extérieurs. Cependant la méthodologie peut s'appliquer aux bassins intérieurs en adaptant certains modèles des phénomènes physiques.

Bassins extérieurs



Bassins intérieurs



■ evaporation ■ radiation ■ convection ■ renouvellement de l'eau ■ conduction

Figure 17 : Pertes thermiques de bassin intérieur : Kuyumcu et al. [44] d'une piscine en Turquie avec une température de l'eau de 26°C et de l'air de 20°C, Brambley et al. [118] au Missouri (Etat-Unis d'Amérique), avec une température de l'eau de 29°C et celle de l'air à 28 °C et des bassins extérieurs : le site 4 [26], 7 [80], le site 10 [62], [141], [142] et le site 11 [94] décrits dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Localisation de plusieurs piscines expérimentales et simulées dans la littérature

Site	Pays	Ville	Validation expérimentale	Année	Réf
1	Allemagne	Inzell	Oui	1994	[143]
2	Allemagne	Möhringen/Leonberg	Oui	1994	[77]
3	Australie	Clayton (Victoria)	Oui	1980	[32], [134]
4	Australie	Perth	Oui	2019	[26]
5	Canada	Mont-Tremblant	Oui	2011	[121]
6	Grèce	Athènes	Oui	1987	[103]
7	États-Unis	Davis (California)	Oui	2011	[80]
8	États-Unis	Miami	Oui	1980	[55]
9	Royaume uni	Sud-est	Oui	2020	[135]
10	Spain	Alicante	Oui	2010	[62], [141], [142]
11	Suisse	Soleure/Burgdorf	Oui	1994	[94]
12	Suisse	Tenero	Oui	1994	[94]
13	Brésil	South East	Non	2013	[144]
14	Chine	Tianjin	Non	2008	[56]
15	Hong Kong	Hong Koong	Non	2020	[37]
16	Inde	Bangluru	Non	2013	[27]
17	Inde	Delhi	Non	1988	[108], [132]
18	Inde	Delhi	Non	2013	[27]
19	Inde	Jodhpur	Non	2013	[27]
20	Inde	Kolkata	Non	2013	[27]
21	Israël		Non	1981	[110]
22	Italie	Bologne	Non	2015	[61]
23	Maroc	Province de Nador	Non	2015	[29]
24	Mexique	Mexico (Ville)	Non	1994	[78]

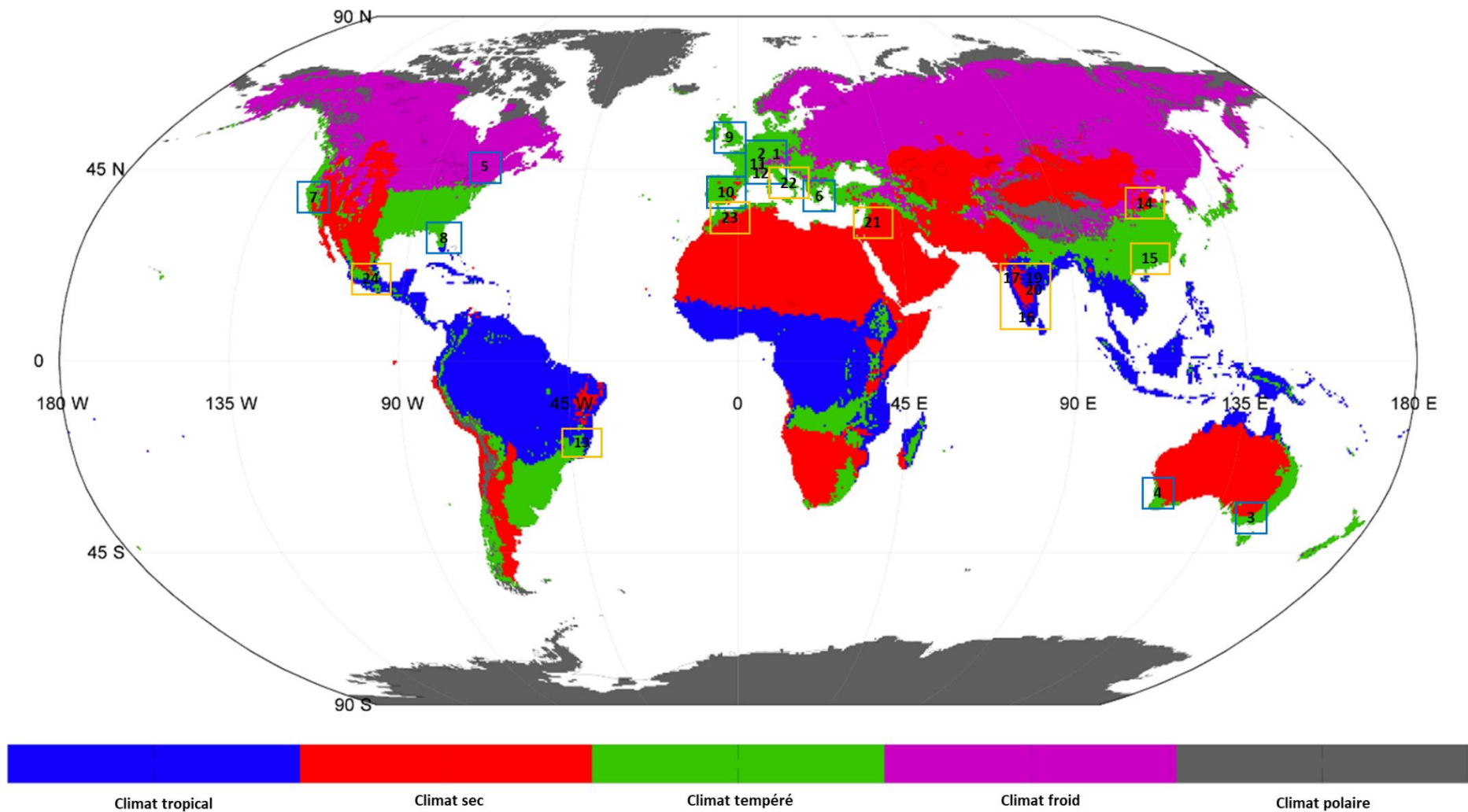


Figure 18 : Carte mondiale des climats [145] et localisation des piscines ayant servis aux travaux du Tableau 9, en bleu ceux ayant fait l'objet d'expérimentation et en orange ceux ayant uniquement l'objet de modélisation.

XII. Conclusion

L'objectif de la thèse est de modéliser le comportement dynamique du bassin, afin de pouvoir utiliser ce modèle dans un contrôle commande prédictif du chauffage du bassin. La modélisation de l'évaporation et des pertes radiatives à grandes longueurs d'ondes ont deux caractéristiques en commun :

- L'impact sur le bilan énergétique est majeur d'après la littérature
- Les pertes simulées dans de mêmes circonstances sont très significativement différentes en fonction du modèle choisi.

Ce constat est à l'origine de l'expérimentation présentée par la suite. Cette dernière a pour objectif non seulement de valider la modélisation de la consommation énergétique de chauffage et l'évolution de la température de l'eau au cours du temps, mais aussi les flux respectifs des principaux phénomènes physiques impactant le bilan.

Chapitre 2 : L'expérimentation

Le développement de l'expérimentation a pour objectif de valider le modèle du bassin, en particulier la capacité à prévoir la température à moins d'un degré près et la consommation de chauffage, mais aussi de connaître l'impact respectif des différents phénomènes physiques sur le bilan. La littérature a mis en évidence que l'évaporation est un phénomène dont la modélisation ne fait pas consensus dans le corpus scientifique. Une attention particulière à la validation d'un modèle évaporatif a donc été portée durant l'expérimentation. Les flux radiatifs à grande longueur d'onde, le flux solaire et le chauffage sont trois phénomènes dont l'impact est majeur au vu de la littérature étudiée dans le chapitre 1. Pour mettre en place l'expérimentation, deux éléments sont importants : d'un côté la connaissance du modèle à valider et d'un autre le fonctionnement de l'installation. Le modèle du bassin se base sur le bilan énergétique et de masse présenté dans le chapitre 1. L'impact de l'utilisation sur le bilan étant mal connu, un suivi des heures d'utilisations a été réalisé et des mesures ponctuelles de fréquentation.

Dans un premier temps, un état des lieux de la littérature sur l'expérimentation sur les piscines a été réalisé, suivi de la présentation succincte d'une expérimentation qui s'est déroulée précédemment à cette thèse. Cette dernière n'a pas permis la validation d'un modèle pour cette thèse mais a servi à améliorer le protocole de mesure en particulier en ce qui concerne les fuites et les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde. Le principe de fonctionnement et la technologie des deux sites sont similaires et sont présentés dans cette première partie.

La piscine du bois de nèfles à Saint Paul est l'expérimentation principale qui sert à valider le modèle du bassin dans le chapitre 3. Ce chapitre se concentre sur la présentation du site, de l'instrumentation, des mesures réalisées et l'analyse de son fonctionnement.

I. L'expérimentation sur les piscines dans la littérature

1. Les mesures météorologiques dans la littérature

Les stations météo peuvent avoir été installées spécifiquement pour les expérimentations comme [103], [62], [80] et elles se trouvent alors directement à proximité du bassin. Dans d'autres cas, les données de la station météorologique la plus proche peuvent être utilisées. Elles sont alors plus éloignées des bassins [26], [121], qui se situent à plusieurs kilomètres de distance.

La hauteur de mesure n'est pas toujours communiquée [95] et quand elle l'est, on trouve des installations au bord de l'eau à 0.5 m [62], [80] ou à plusieurs mètres de hauteur par exemple à 9,3 m [103]. La vitesse du vent mesurée par un capteur n'est représentative que de cette dernière à une altitude donnée. Les différences dans le protocole de mesure influencent donc significativement les données d'entrées des modèles.



Figure 19 : Station météo de mesure de la vitesse du vent, de la température et l'humidité de l'air et pyranomètre installée pour l'expérimentation à 0.5 m de l'eau par Ruiz, et al. [62]

Les mesures météorologiques et méthodes sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10 : mesures météorologiques

Mesures	Méthode de mesure
Température Humidité de l'air	Humidité n'est pas toujours mesurée [77], [146], les capteurs sont mis dans des abris prévus pour cela comme montré sur la Figure 19 qui permettent de s'affranchir de l'influence du rayonnement solaire.
Vitesse du vent	Mesure réalisée avec un anémomètre, mais ce n'est pas le cas dans toutes les études car elle n'est pas toujours mesurée [146],
Rayonnement solaire Global Horizontal	Mesure réalisée avec un pyranomètre
Pluviométrie	Mesure réalisée avec un pluviomètre comme dans le cas [95], mais cette donnée n'est pas toujours prise en compte [62]

2. Le flux radiatif descendant dans la littérature

La mesure des échanges radiatifs à grande longueur d'onde s'effectue avec un pyrgéomètre. Cet instrument mesure le flux radiatif pour les longueurs d'onde de 4 500 à 42 000 nm et est équipé d'un filtre pour le rayonnement solaire. Le flux mesuré est le flux net échangé entre le pyrgéomètre et l'environnement [147]. Le flux souhaité est le flux descendant, un capteur de température permet de mesurer la température du capteur et de se ramener à ce dernier à l'aide de l'équation de rayonnement <1.12> .

3. La mesure de l'évaporation de l'eau dans la littérature

La validation des modèles d'évaporation de l'eau liquide en contact avec de l'air a d'abord été validée par des expérimentations sur des lacs. Mc Millan [148] dans les années 1970 a réalisé des expériences sur un lac dans le pays de Galles pendant plusieurs années. Le modèle d'évaporation a été validé avec un bilan énergétique du lac. Ils ont mesuré la vitesse du vent à 3 m et 10 m. Les auteurs proposent une adaptation en fonction de cette hauteur, mais l'environnement n'est pas pris en compte. Harbeck [149] a également validé son modèle sur des lacs en réalisant un bilan énergétique. Il a installé l'anémomètre à 2 m de hauteur et le thermomètre et l'hygromètre entre 8 et 10 m. Richter [77] a validé son modèle sur un lac en mesurant la vitesse du vent à 0.5 m et 2 m.

Cette méthode suppose que les autres pertes et gains sont connus. Ce ne sera pas notre cas. En effet nous souhaitons non seulement valider le modèle évaporatif, mais aussi le modèle thermique global. Cette méthode ne peut pas être appliquée dans notre cas.

Calise [31] a utilisé les mesures de température et humidité de l'air pour valider un modèle d'évaporation pour une piscine intérieure en réalisant un bilan sur l'air ambiant dans le bâtiment.

Smith [88], [139], [150], a réalisé des expérimentations sur 4 bassins de la Figure 20. Une piscine intérieure composée de trois bassins dans un même hall et un bassin extérieur. Pour les 3 bassins intérieurs, la méthode utilisée a consisté à mesurer la température de l'eau du bassin et son évolution au cours du temps. Tous les autres pertes et gains étaient considérés comme connus sur le site, les différences éventuelles entre le modèle et l'expérimentation sont dues à la modélisation de l'évaporation. La mesure de la vitesse d'air a été réalisée à l'aide de ballons d'hélium lâchés au milieu du bassin et dont le déplacement a été chronométré. La procédure a été répétée avec et sans ventilation. Pour le bassin extérieur, cette méthode n'a pas été appliquée en raison de l'incertitude sur la modélisation des autres phénomènes physiques. La variation de niveau dans une jauge directement reliée au bassin a permis de mesurer la variation de niveau dans ce dernier visible sur la Figure 20. La piscine ayant été en activité, une erreur est commise, les pertes d'eau par éclaboussures provoquées par les nageurs ne pouvant être mesurées. L'anémomètre a été installé à 30 cm au-dessus du niveau du bassin.

Les conditions expérimentales s'approchent de notre situation. Pour nous affranchir de l'erreur occasionnée par l'utilisation, nous avons fait le choix de valider dans un premier temps un modèle sans occupation.



Figure 20 : Les piscines expérimentales monitorées par Smith [139] et la jauge de mesure du niveau du bassin extérieur

Inan [92] a réalisé une expérimentation en laboratoire pour évaluer l'évaporation en conditions contrôlées. Dans un tunnel, de l'air circule au-dessus d'un récipient d'eau, le dispositif expérimental est celui photographié sur la Figure 21. La vitesse de l'air est contrôlée à l'aide d'un ventilateur. La vitesse du vent est faible et le nombre de Reynolds (Re) détermine que le mode d'écoulement est laminaire. L'évaporation est mesurée à l'aide d'une balance qui mesure la variation de masse de l'eau au cours de l'expérimentation.



Figure 21 : Dispositif expérimental développé par Inan [92]

D'autres auteurs ont réalisé des expérimentations en laboratoire, par exemple Pauken [93] qui a utilisé également la mesure de la masse pour évaluer l'évaporation ou Tang [91] qui a utilisé une mesure de pression. Les mesures de laboratoire permettent de maîtriser les conditions expérimentales, mais les conditions sont différentes de celles in situ. En particulier, aucun obstacle ne perturbe le mouvement de l'air avant son passage au-dessus de la surface d'eau, ce qui n'arrive jamais dans une piscine.

4. La validation expérimentale des modèles de bassins dans la littérature

Deux données peuvent être utilisées pour valider la capacité du modèle à prédire le fonctionnement du système. La capacité de prédiction de l'évolution de la température de l'eau ou celle de prédire la consommation du chauffage de l'eau du bassin sur une période (un jour, un mois, une année donnée).

La méthode la plus utilisée est la comparaison des données de température de l'eau mesurée à celles simulées dans les mêmes conditions de température et d'humidité ambiante, de vitesse de l'air, de chauffage, d'utilisation [95], [143], [80], [62], [146], [26].

Cette analyse est complétée par certains auteurs [77], [151] par une comparaison de la consommation des systèmes de chauffage simulé et mesuré sur une période donnée. Cette approche nécessite de connaître le mode de régulation de l'installation de chauffage. Marin et al. ont appliqué cette dernière méthode à 4 bassins [151].

Une dernière méthode a été adaptée sur un cas de bassins intérieurs. Elle consiste à mesurer les conditions ambiantes : température et humidité de l'air et à les comparer aux valeurs simulées par le modèle du bassin couplé au bâtiment [31].

II. Présentation du site de Vue belle Saint Paul

La piscine de Vue Belle à Saint Paul dans le quartier de la Saline Les Hauts (La Réunion) à 510m d'altitude a été instrumentée en 2015, deux ans avant le début de la thèse. Deux bassins extérieurs font l'objet de l'expérimentation : le grand bassin (ou bassin sportif) et celui d'initiation. La pataugeoire n'était plus utilisée en raison de fuites trop importantes constatées par l'exploitant. Les bassins sont chauffés par des pompes à chaleur. La température de l'eau est maintenue à 28°C toute l'année. La piscine est ouverte 7 jours sur 7 sauf fermeture exceptionnelle ou pour maintenance. Les deux bassins sont couverts irrégulièrement durant l'hiver par une bâche de protection thermique.

Le grand bassin mesure 25 m de long et de large soit une surface de bassin de 625 m² et un volume d'eau d'environ 1500 m³.



Figure 22 : Photo du grand bassin (bassin sportif) du site de Vue Belle (Saint Paul)

Une station météo iMETOS 3.3 a été installée à proximité immédiate des bassins. Elle mesure : la température ambiante, le rayonnement global horizontal, l'humidité relative, la pluviométrie et la vitesse du vent avec une période d'acquisition de quinze minutes.

La température caractéristique de l'eau est mesurée après débordement et passage dans un bac tampon avant la traversée de la Pompe A Chaleur (PAC) chargée de la chauffer (Figure 23). Les apports en eau ont lieu dans le bac tampon, ce qui influence la température de l'eau mesurée durant quelques minutes pendant les phases de remplissage.

Le niveau dans le bac tampon a été mesuré en continu grâce à un capteur optique. Le capteur a été protégé par un plastique pour prolonger sa durée de vie. En effet l'environnement fortement chloré et non ventilé entraîne une oxydation rapide des capteurs.

1. Le principe de fonctionnement d'une piscine à hydraulité inversée partielle

La piscine est à débordement à hydraulité inversée partielle dont le principe est schématisé sur la Figure 23. Le retour d'eau se fait par débordement du bassin dans des goulottes (hydraulité inversé) qui ramènent cette dernière par gravité dans le bac tampon (Figure 24) comme présenté sur le schéma de la Figure 23, ainsi qu'une partie de l'eau qui sort du bassin par la bonde de fond. Plusieurs pompes font circuler l'eau qui sort de la bonde de fond et puise le complément dans le bac tampon pour la faire circuler dans les filtres à sables (Figure 24). Après le passage dans les filtres, une partie de l'eau passe dans l'échangeur du système de chauffage (dans notre cas une pompe à chaleur de 205 kW pour le grand bassin et 56 kW pour le petit bassin) avant de retourner dans le circuit principal. Deux technologies existent pour réguler le débit dans le circuit de chauffage : une vanne de bridage ou une pompe de circulation. Elle est finalement réinjectée dans le bassin par des buses réparties sur ses parois.

L'eau fait également l'objet de mesures de qualité (en particulier le chlore et le pH) et si nécessaire traitée chimiquement.

Un bac tampon remplit plusieurs fonctions :

- Séparer le réseau d'eau de ville et l'eau du bassin pour éviter tout risque potentiel de retour d'eau de la piscine dans le réseau urbain. La déconnexion des réseaux est imposée par la réglementation des piscines collectives [152].
- Absorber les variations de niveau de quantité d'eau dans le bassin et le circuit dues à l'utilisation (nombre et activité des nageurs) mais aussi celles dues aux lavages de filtres et autres événements de maintenance des installations [153]. Il permet d'automatiser le remplissage à partir de l'eau du réseau. En son absence pour assurer la séparation strictement entre le réseau de la piscine et celui du réseau d'eau de ville, le remplissage avec un tuyaux dans le bassin devrait être réalisé manuellement.

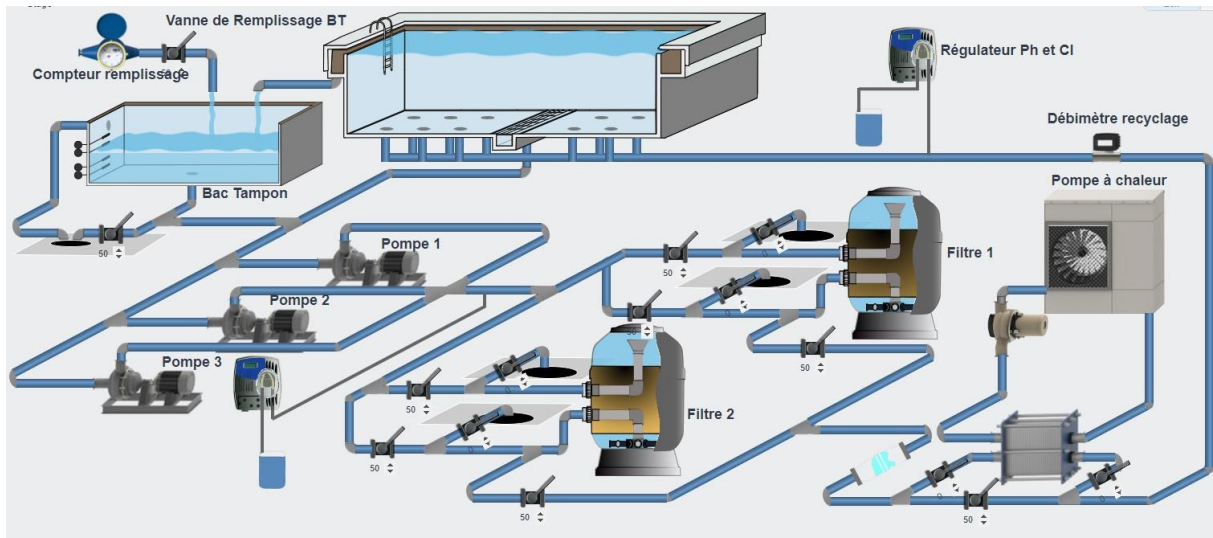


Figure 23 : Schéma de fonctionnement d'une piscine à hydraulité inversée partielle



Figure 24 : Un bac tampon et un filtre à sable du grand bassin de la piscine de Vue Belle

2. L'évaporation et les fuites sur le site de Vue Belle

La mesure du niveau du bac tampon a été installée pour évaluer les quantités d'eau évaporées du bassin. Connaissant la surface du bac tampon, l'étude de l'évolution du niveau dans le bac tampon au cours du temps permet de remonter à la quantité d'eau sortante du système. Comme aucune mesure de fuite n'avait été réalisée, l'hypothèse de l'absence de fuites a été prise. L'eau sortante du système en l'absence d'utilisateur est du uniquement à l'évaporation.

La mesure du débit évaporatif entre deux remplissages du bac tampon a été réalisée une fois par mois sur la période d'octobre 2016 à décembre 2017. Une donnée mensuelle est disponible entre le mois octobre 2016 à décembre 2017. Le graphique de la Figure 25 représente la mesure du débit évaporatif mesuré chaque mois. On remarque une augmentation importante du flux au cours du temps. L'hypothèse d'une augmentation des fuites a été vérifiée avec l'exploitant de l'installation. Des travaux de rénovation ont été programmés par l'exploitant dont un des objectifs était d'améliorer l'étanchéité des installations et en particulier des bassins.

L'absence de mesure des fuites ainsi que leur évolution au cours du temps n'a pas permis d'estimer les fuites sur le site sur la période de mesure.

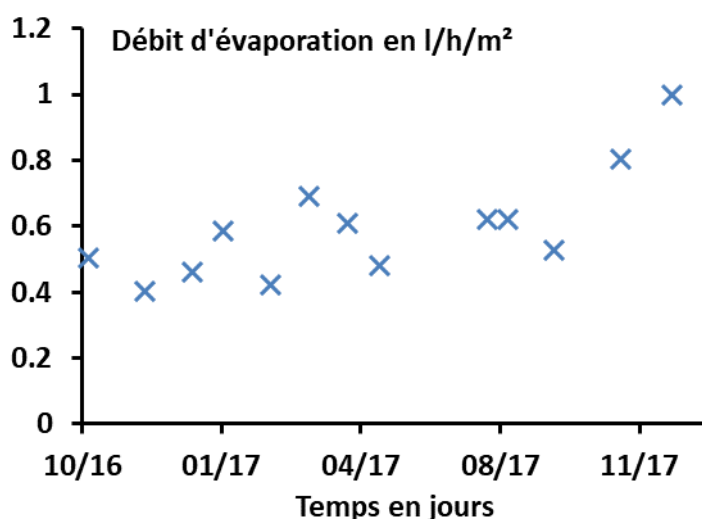


Figure 25 : Evolution du débit évaporatif mesuré au cours du temps (calculé à partir de l'évolution de la différence de niveau sur la période évalué et ramené à une surface de 1 m²)

Les données de niveau de 2016 où les fuites étaient moins importantes ont servi à identifier un modèle évaporatif de la forme de l'équation <1.3> et <1.4>. Cependant, la réalisation d'un bilan thermique sur plusieurs nuits avec le modèle identifié et des modèle radiatif, convectif et conductif de la littérature a permis d'évaluer l'énergie perdue par évaporation. La comparaison de ces deux méthodes a mis en évidence que les pertes évaluées avec le modèle évaporatif identifiées étaient une fois et demi plus importantes que celles attendues par

l'analyse du bilan thermique. L'impact énergétique de l'eau des fuites n'est pas du même ordre de grandeur que celui de l'eau supposément évaporée.

L'hypothèse de fuites nulles n'est pas réaliste sur le site expérimental de Vue Belle. La nécessité de réaliser de nouvelles campagnes de mesures en évaluant les fuites est apparue indispensable.

3. Les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde

L'objectif final est de pouvoir simuler le comportement du bassin en utilisant les prévisions météorologiques en entrée. Or le flux descendant à grandes longueurs d'ondes est une donnée accessible auprès des fournisseurs de prévisions météorologiques (c'est le cas de météo France [154]). La donnée mesurable et la valeur disponible dans les prévisions est le flux radiatif à grandes longueurs d'ondes descendant qui correspond à la luminance par m² [154] :

$$L_{ciel} = \sigma T_{ciel}^4 \quad <2.1>$$

On peut alors relier la valeur issue des prévisions météorologiques et le flux radiatif net à grandes longueurs d'onde comme suit :

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon_{eau} (L_{ciel} - \sigma T_{eau}^4) \quad <2.2>$$

La décision de mesurer le flux descendant avec un pyrgéomètre a été prise pour les futures campagnes de mesures.

4. Nouvelle campagne de mesures

Les points rapportés précédemment ont amené la décision de réaliser une nouvelle campagne de mesures. Cependant, l'exploitant nous a annoncé la fermeture de la piscine en juin 2018 pour travaux pour 6 mois. Le mauvais déroulement du chantier a amené une prolongation des travaux puis des poursuites judiciaires. La longueur des procédures entamées ne permettait plus de réaliser l'expérimentation sur le site. La décision a alors été prise d'instrumenter un autre site présenté dans la suite et dont les données ont servi à la validation du modèle du bassin. La seconde expérimentation, présentée dans la suite, tient compte des constats réalisés sur l'expérimentation de Vue Belle.

III. Le site expérimental de bois de nèfles (Saint Paul)

Le site expérimental se trouve sur l'île de La Réunion (France), dans l'océan Indien à l'est de Madagascar. Cette île est située au-dessus d'un point chaud et est le lieu régulièrement d'éruptions volcaniques effusives. Cette caractéristique est à l'origine du relief important. Le Piton des Neiges, le plus haut sommet, culmine à 3 069 m [155].

Le climat de l'île de la Réunion est tropical et humide [156]. Deux saisons caractérisent ce climat : la saison humide (janvier à mars) et la saison sèche (mai à novembre). Les mois de décembre et d'avril sont des mois de transition.

Le site expérimental se situe dans le quartier de Bois de nèfles de la commune de Saint Paul [157] au nord-est de l'île à une altitude de 470 m. Le relief du piton de la fournaise et du piton des neiges protège cette partie de l'île des alizées, des nuages et des précipitations qu'ils apportent. La pluviométrie est d'environ 1 000 mm par an dans cette partie de l'île contre 12 000 mm par an au sud-est [158]. Les températures varient en fonction de l'altitude et peuvent devenir négatives au sommet du Piton des neiges durant les nuits d'hiver.

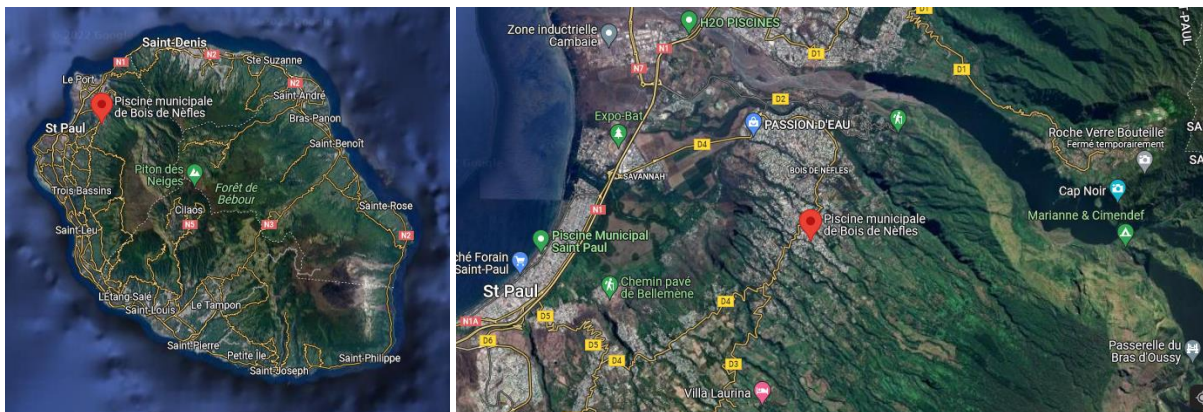


Figure 26 : Emplacement de la piscine expérimentale à La Réunion [159], Coordonnée GPS : 20°59'58.9"S 55°19'44.7"E

L'environnement proche de la piscine est constitué d'arbres et de bâtiments au maximum de 2 niveaux. La piscine est dans la pente du flanc du volcan et est orientée vers le sud-ouest. Les obstacles et l'environnement sont présentés sur la Figure 27 et la Figure 28.



Figure 27 : Emplacement de la piscine dans le quartier de Bois de nèfles [159]

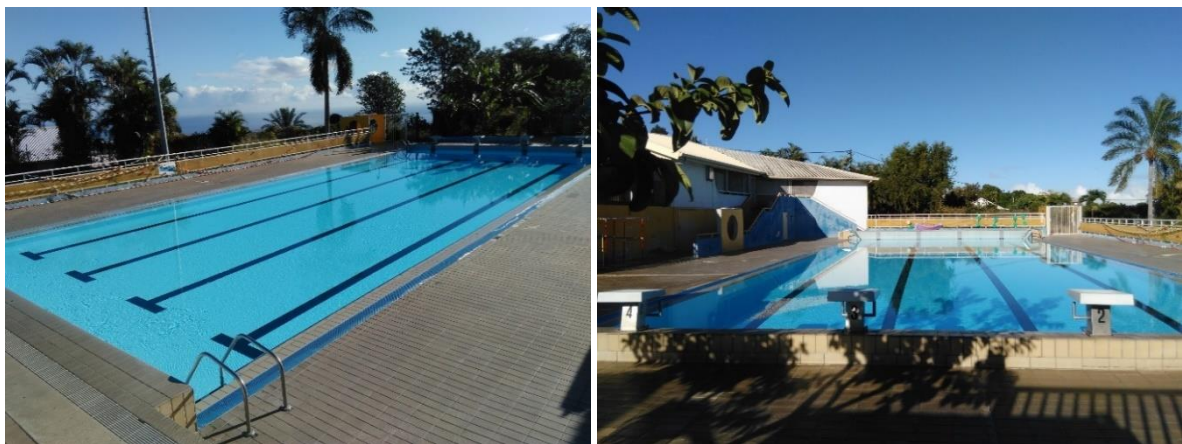


Figure 28 : Environnement proche du bassin de la piscine

1. L'utilisation de l'installation

Cette piscine est utilisée par des écoles primaires/collèges en journée pendant la semaine et par des clubs de natation et de natation synchronisée le soir et le samedi. Le reste du temps, les installations sont ouvertes au grand public. La piscine est en utilisation de 8 h à 20 h tous les jours, dimanche compris.

Cependant durant la période d'expérimentation l'utilisation et les horaires ont été adaptés en fonction de l'évolution de la pandémie de COVID 19. La piscine a été fermée, retardant de 4 mois l'installation de l'instrumentation. Suite à la levée du confinement, la piscine a été réouverte en juin 2020 avec des horaires et une fréquentation adaptée aux restrictions sanitaires. L'utilisation de l'installation durant l'expérimentation n'est pas représentative des années précédentes.

La température de l'eau attendue par l'exploitant est de 28°C toute l'année.

2. Les installations techniques

Le bassin, photographié sur la Figure 28, mesure 12.5 m de large et 25 m de long. La profondeur est de 1.04 m au minimum et 2.04 m au maximum. La pente est régulière tout au long du bassin à l'exception des extrémités où il y a des replats. Le volume du bassin est de 469 m³. Le bassin est constitué d'une structure en béton et d'une étanchéité recouverte d'un carrelage. La technologie est la même que sur le site précédent à savoir une hydraulique inversée partielle. Le bac tampon mesure 3 m par 3 m et à une hauteur utile d'environ 3 m. Le chauffage du bassin est assuré par une pompe à chaleur air/eau de la marque ETT [160] et d'une puissance de 114,60 kW.

Une couverture existe pour limiter les pertes la nuit. Cependant, le frottement de la couverture sur le rebord du bassin a engendré une usure prématurée de cette dernière. Elle n'est plus mise en place au quotidien, par crainte par les opérateurs qu'elle ne puisse plus être retirée. L'installation d'une nouvelle couverture est prévue dans les mois à venir.

Particularité du site : une petite quantité de l'eau arrivant des goulottes passe en continu dans une chambre d'analyse de la qualité chimique de cette dernière. Elle est alors stockée dans un petit bac (135 L). Lorsque ce dernier est plein, une pompe de relevage renvoie l'eau dans le bac tampon.



Figure 29 : Pompe à chaleur et filtres à sable de la piscine du bois de nèfles à Saint Paul

3. L'instrumentation

a. Les données météorologiques

La collecte de données météorologiques a été réalisée avec une station météo Imetos 3.3 [161] décrite en annexe et d'un pyrogéomètre [147] pour le rayonnement à grande longueur d'onde. Le matériel a été installé sur le poteau d'éclairage qui se situe à côté de la piscine à une hauteur de 10 m. Les données sont disponibles à un pas de temps de 10 minutes.

La station météo installée à proximité du bassin est présentée sur la Figure 30. Une valeur pour chaque donnée mesurée est remontée toutes les 10 minutes par Imétéos grâce à une connexion 4G. La température et l'humidité ambiante, la vitesse du vent, les précipitations et l'ensoleillement (Figure 30), sont mesurés par la station météo. Les données ont été remontées sur presque une année entre le 11 juin 2020 à 12 h 30 et le 26 mai 2021 à minuit. Les données sont remontées avec une grande fiabilité, seul 0.5% des données sont manquantes.



Figure 30 : Photo de la station météorologique

Le rayonnement à grande longueur d'onde est mesuré avec le pyrgéomètre (Figure 30). Ce dernier est connecté à l'automate DISTECH qui remonte les données mesurées sur la piscine. Il a remonté des données sur la même période. Cependant, des dysfonctionnements du système et de la connexion internet ont mené à des absences de données ou des données aberrantes pouvant durer plusieurs jours. Des modifications ont été apportées tout au long de l'expérimentation pour fiabiliser la remontée de ces données sans succès. La seule méthode qui fonctionnait pour refaire fonctionner le système suite aux dysfonctionnements était de redémarrer l'automate sur site. La nécessité d'aller sur place pour procéder à la remise en route a été à l'origine d'importantes absence de données. Ce dysfonctionnement est à l'origine de la volonté de déterminer le modèle radiatif le plus pertinent pour notre site, permettant ainsi de l'utiliser pour remplir les données manquantes. La détermination de ce dernier est présentée dans la partie III.

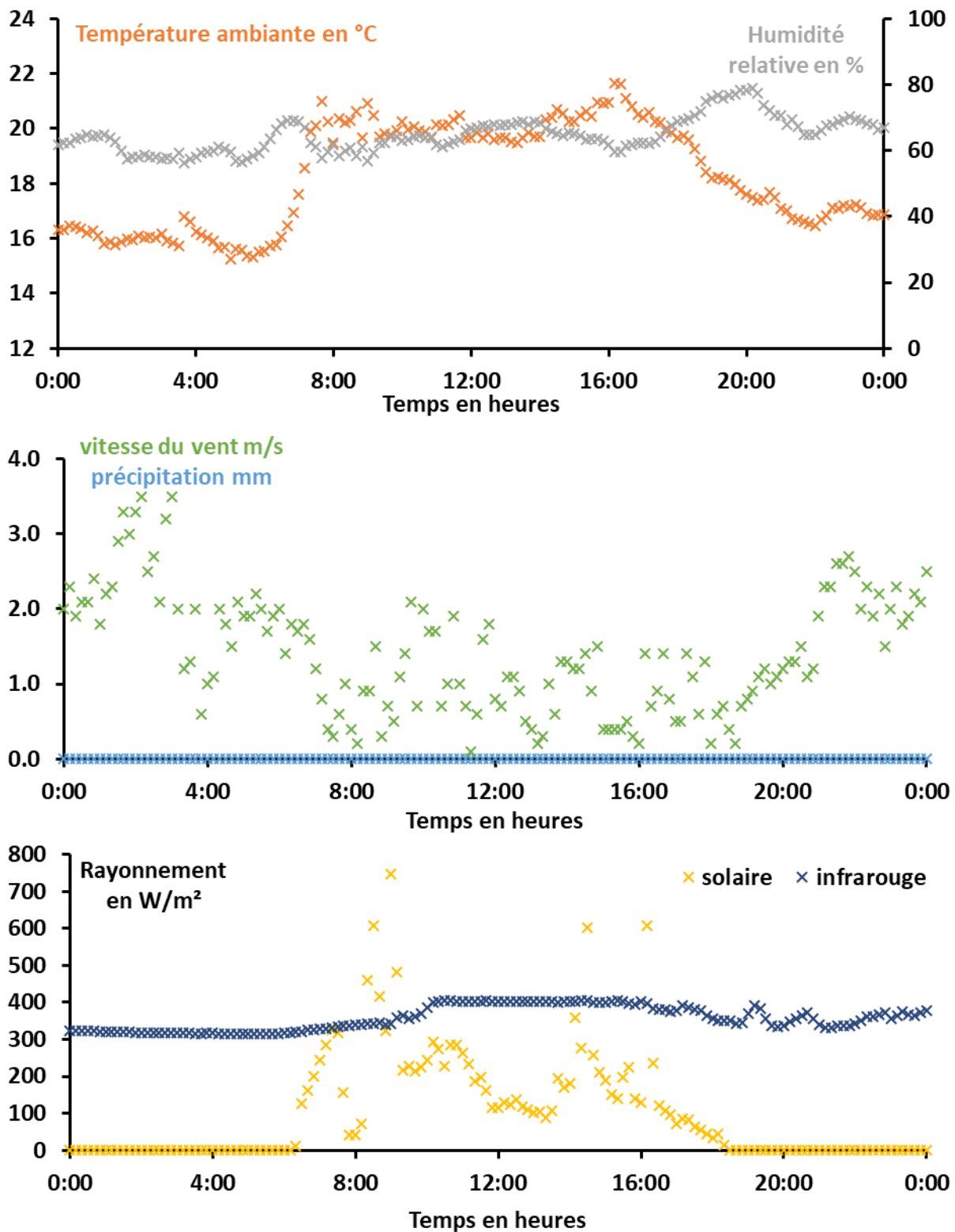


Figure 31 : Exemple de mesures de la température, de l'humidité ambiante, du rayonnement solaire, du rayonnement à grandes longueurs d'onde, de la vitesse du vent et des précipitations sur le site expérimental pour la journée du 1 novembre 2020.

b. Les mesures de fonctionnement du système

En parallèle, des mesures sur le circuit de filtration et de chauffage du bassin ont été réalisées sur la même période :

- Le niveau dans le bac tampon (Figure 34)
- La température de l'eau du bassin (Figure 33)
- La température de l'eau à l'entrée de la pompe à chaleur (Figure 33)
- La température de l'eau à la sortie de la pompe à chaleur (Figure 33)
- Le débit dans le circuit de filtration avant son retour dans le bassin (Figure 34)
- Le débit dans la pompe à chaleur (Figure 33)
- La température de l'eau de ville (Figure 36)
- La consommation électrique de la pompe à chaleur (Figure 33)

Le matériel, sa précision et les caractéristiques techniques précises utilisées, est listé en annexe.

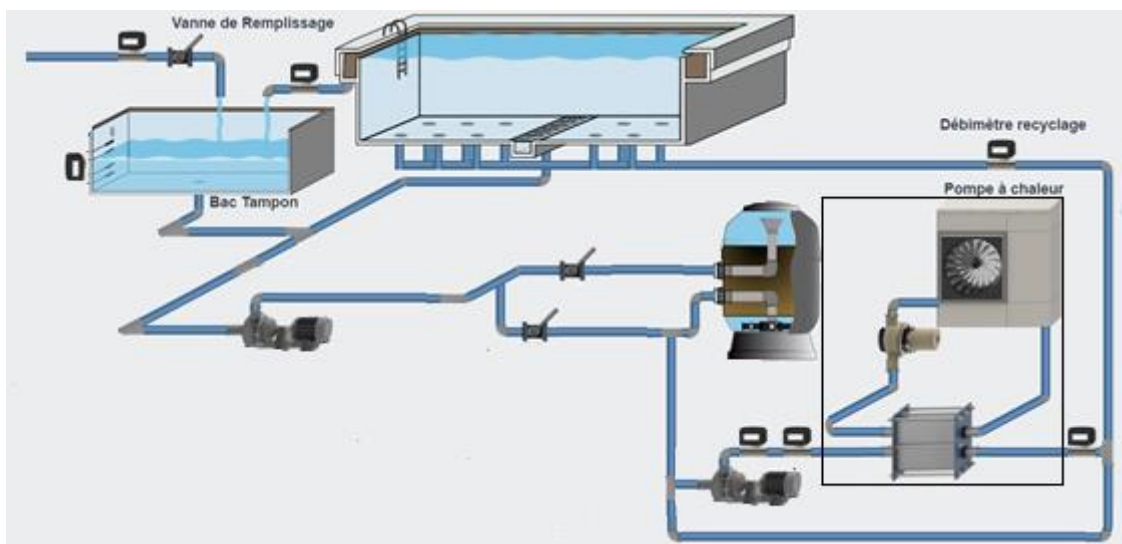


Figure 32 : Schéma de l'instrumentation

La détection des évènements suivants est également réalisée :

- Le nombre d'utilisateurs : nombre d'utilisateurs au cours de la journée [121], cette mesure est rarement réalisée. Nous avons décidé d'installer des caméras pour pouvoir compter les nageurs.
- L'utilisation ou non de la couverture, l'état de la couverture n'a pas permis sa mise en place régulière. L'information n'était donc pas nécessaire.
- L'identification des remplissages (apports en eau neuve) et lavage de filtres [121]
- La puissance du système de chauffage [77], [95], [103], [121], [151].

Les données sont enregistrées toutes les minutes entre le 29/06/2020 et le 20/04/2021, avec au total 261 701 points. On considère un point de données si au moins une des données est disponible. On peut remarquer pour 40% du temps qu'aucune donnée n'est remontée en raison du dysfonctionnement de l'automate et/ou de la connexion internet. L'impact sur la disponibilité des données de validation est important. Les données étant peut nombreuses, fractionnées et même quand elles existent incomplètes et avec des incohérences manifestes. Dans un premier temps les données utilisées sont uniquement celles en périodes d'inoccupation réduisant encore les données exploitables. Tous ces éléments expliquent la taille de l'échantillon de données exploité dans les parties qui suivent.

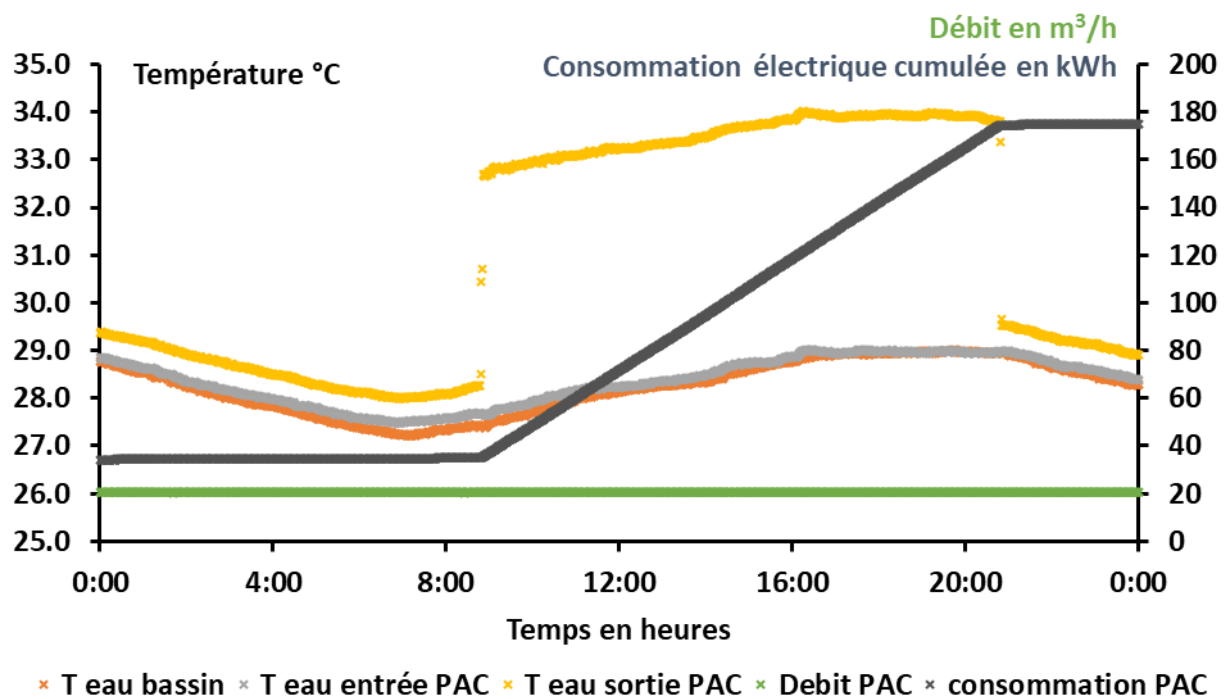


Figure 33 : Température de l'eau du bassin, à l'entrée et à la sortie de la pompe à chaleur, du débit dans la pompe en chaleur et de la consommation électrique cumulée de la pompe à chaleur le 1 novembre 2020

Toutes les données ne sont pas directement nécessaires pour valider les modèles. En effet le débit de filtration n'est pas nécessaire pour les modèles. Cependant cette donnée est utile pour comprendre les variations de niveau dans le bac tampon. En effet les changements de débits sont à l'origine de changements d'équilibres dans le système et entraînent une variation du niveau dans le bac tampon (Figure 34). Les légères remontées du niveau toutes les 4 heures environ sont du à la présence d'un mini bac tampon pour l'analyse de la qualité de l'eau dont le fonctionnement est décrit en détail dans les pages qui suivent. En aidant à l'analyse des données expérimentales nécessaires à la validation des autres données, elles servent indirectement à la validation des modèles.

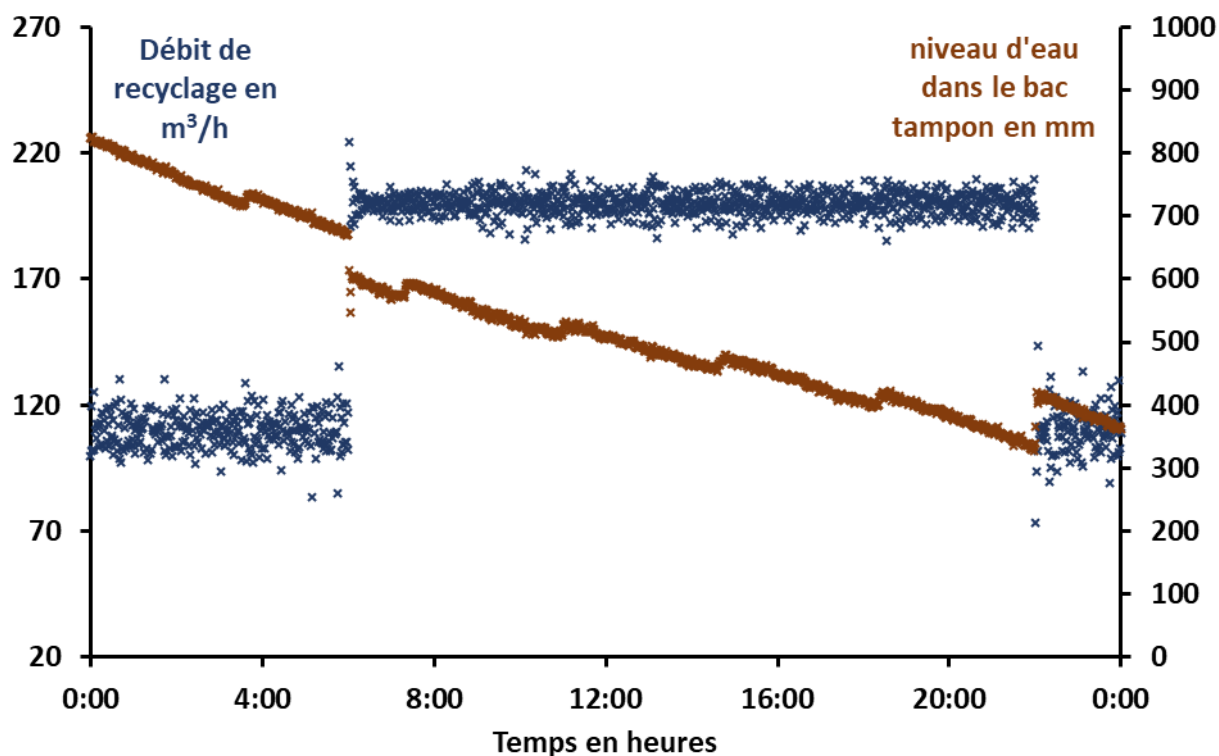


Figure 34 : Evolution du niveau dans le bac tampon et du débit dans le réseau de filtration le 1 novembre 2020

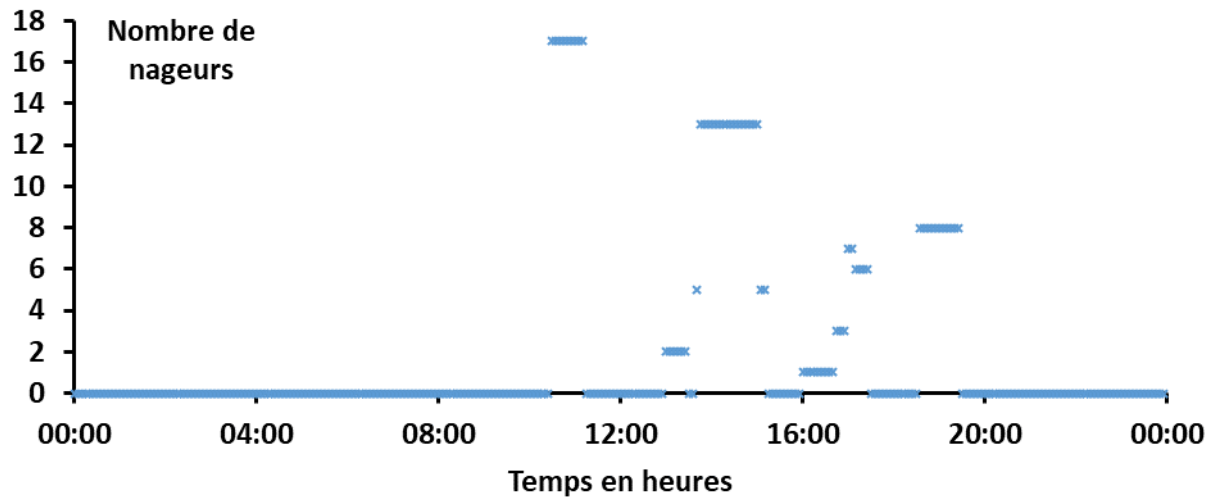


Figure 35 : Nombre de nageurs au cours d'une journée le 9 septembre 2020

La dernière donnée mesurée et la température de l'eau de ville. La mesure a été fonctionnelle uniquement durant les premières semaines. La Figure 36 montre qu'elle est entre 18°C et 24°C durant toute la période. La moyenne sur la période est de 21°C. Cette valeur sera utilisée

comme température de l'eau de ville pour les simulations, la donnée n'étant disponible que sur une courte période.

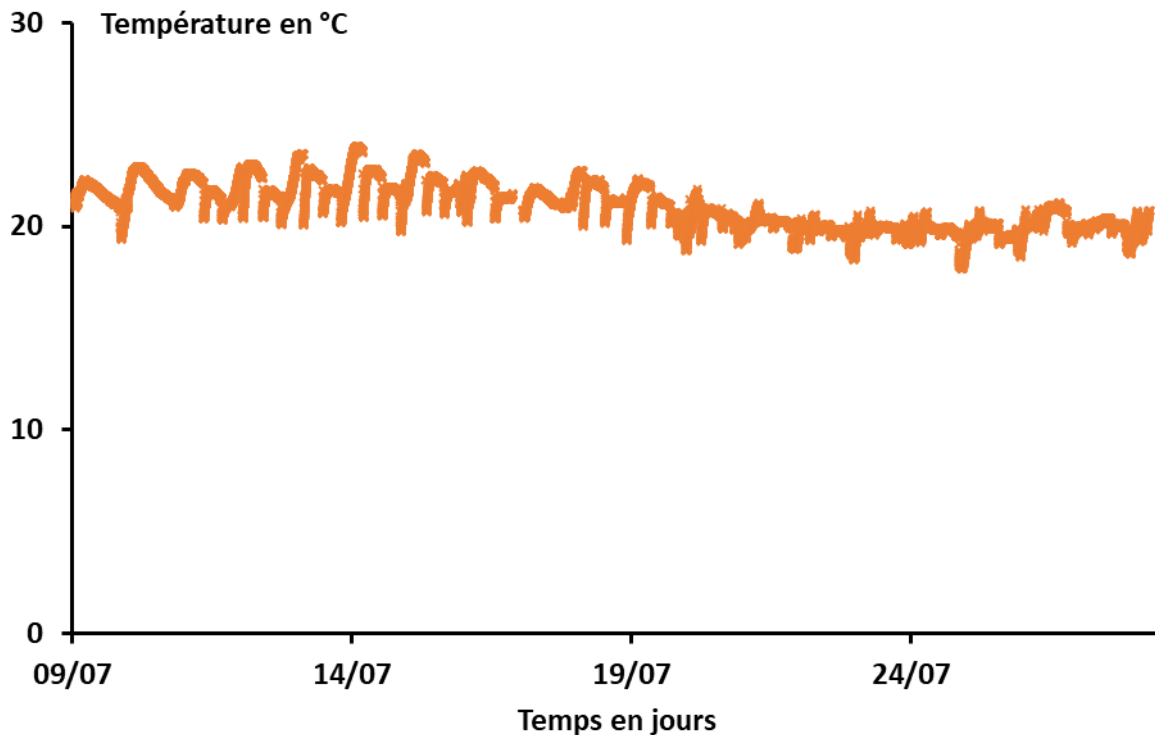


Figure 36 : Température de l'eau de ville entre le 9 et le 28 juillet 2020

IV. Analyse des données mesurées

Une analyse des données est nécessaire pour extraire les données fiables pour valider les modèles. Par exemple, la Figure 34 représente la variation du niveau dans le bac tampon. Cette dernière est utilisée pour évaluer le débit de fuites ainsi que le débit d'évaporation. Sans autre information que le niveau, on voit des changements brutaux inexplicables. Il est nécessaire de les comprendre pour être en mesure de calculer les débits.

1. Le fonctionnement des installations

a. *Mesure de la qualité de l'eau*

La qualité de l'eau est mesurée en continu dans une chambre de mesure alimentée par un piquage sur la canalisation qui va par gravité dans le bac tampon. Pour assurer un débit constant au cours du temps dans la chambre de mesure, l'eau qui sort de cette dernière va dans un mini bac (Figure 37). Quand ce dernier est plein, une pompe renvoie l'eau dans le bac tampon.

Le graphique suivant présente son impact sur l'évolution du niveau du bac tampon dans le temps. En effet, la remontée d'une quinzaine de millimètres du niveau est due à la vidange du mini bac dans le bac tampon. Avant la remontée le mini bac est systématiquement plein et vide après. En l'absence de précipitation, on peut alors connaître le débit d'eau sortie du système entre deux vidanges du mini bac en se fixant sur les points où le mini bac est dans la même configuration. Cette vidange a lieu à intervalles réguliers (Figure 34).

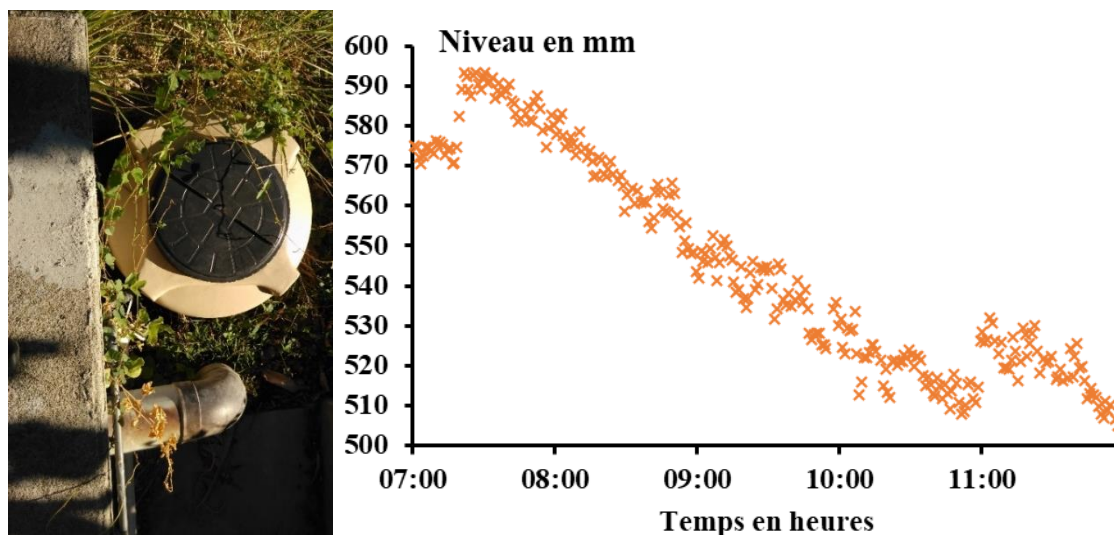


Figure 37 : Photo du mini bac et graphique de l'évolution du niveau dans le bac tampon

b. *Le débit de filtration*

Une variation dans le débit de filtration entraîne une variation du niveau dans le bac tampon (Figure 34). En effet, une augmentation du débit de filtration entraîne un débit de débordement plus important. Pour cela, le niveau du bassin augmente de manière imperceptible, ce qui se répercute sur le niveau du bac tampon qui diminue. La mesure du débit est importante pour s'assurer qu'il ne varie pas durant les périodes de mesure servant à mesurer les fuites et le débit évaporatif.

c. Le remplissage

De l'eau sort en continu du système par les fuites, l'évaporation, les nageurs, les maintenances. Cette eau est remplacée par de l'eau du réseau de la ville quand le niveau dans le bac tampon atteint le capteur de niveau bas et remplit le bac jusqu'au capteur de niveau haut.

Sur la Figure 38, se retrouvent les vidanges du mini bac à minuit 30 minutes, 4 h 15 et 8h ainsi que le changement du débit de filtration responsable de la baisse de niveau à 6 h. Le niveau atteint alors le niveau bas qui déclenche le remplissage du bac tampon à 6 h 45. Le remplissage du bac tampon impacte momentanément la température de l'eau mesurée, le temps que l'eau se mélange, la mesure étant réalisée dans une canalisation à proximité du bac tampon. Les variations brutales de niveau entre 10h et 12h sont dues aux nageurs dont l'impact est décrit en détails dans les pages qui suivent.

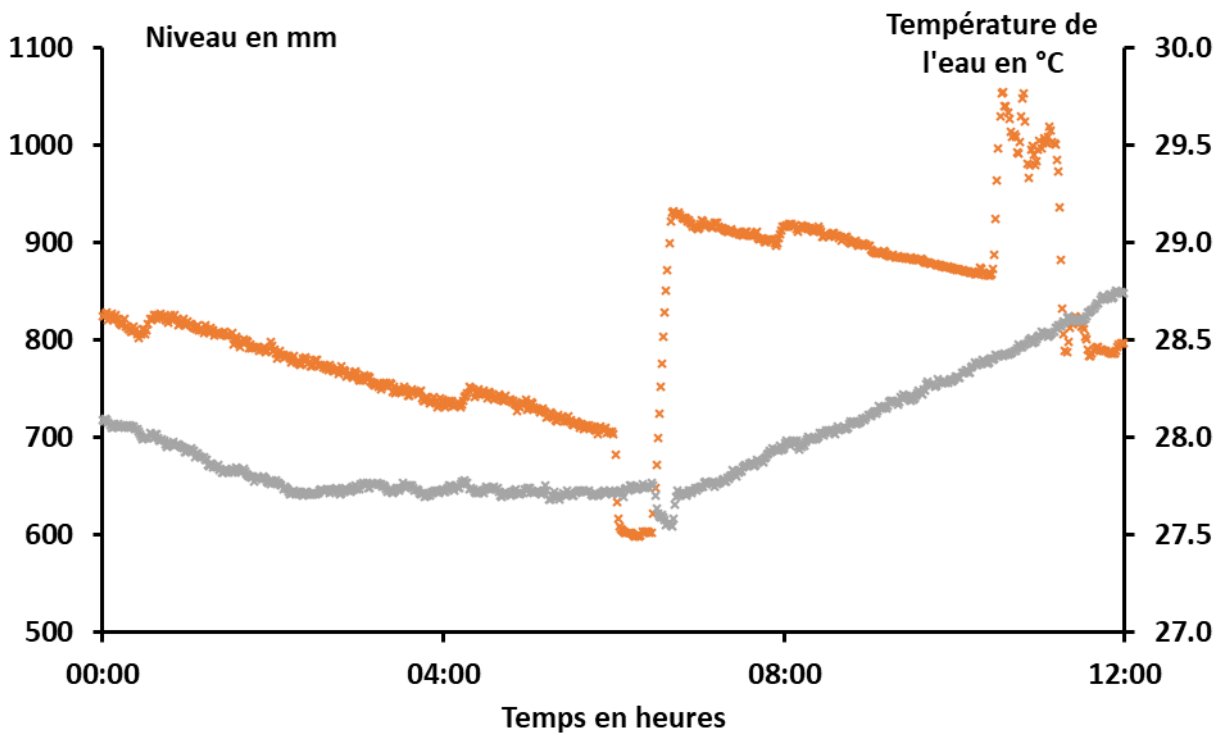


Figure 38 : Evolution du niveau dans le bac tampon et température de l'eau

d. Chauffage

Pour maintenir la température à 28°C, le chauffage est nécessaire toute l'année et surtout en hiver. Le mauvais état de la couverture qui ne peut plus être mise en place les nuits augmente le besoin de chauffage. La technologie utilisée sur ce site est une pompe à chaleur air/eau.

Pour connaître la puissance de chauffage apportée à l'eau, les températures de l'eau en entrée et sortie (Figure 39) sont mesurées ainsi que le débit dans la canalisation (Figure 33). Ce dernier est maintenu constant à 20 m³/h grâce à une pompe de circulation. Un écart constant (de calibration) de 0.5°C entre la mesure de température d'entrée et de sortie est présent, il est corrigé avant le calcul de la puissance de chauffage. L'allumage du chauffage entraîne une hausse de la température de l'eau de sortie d'environ 5°C. Toutes les informations nécessaires sont disponibles pour calculer la puissance apportée à l'eau.

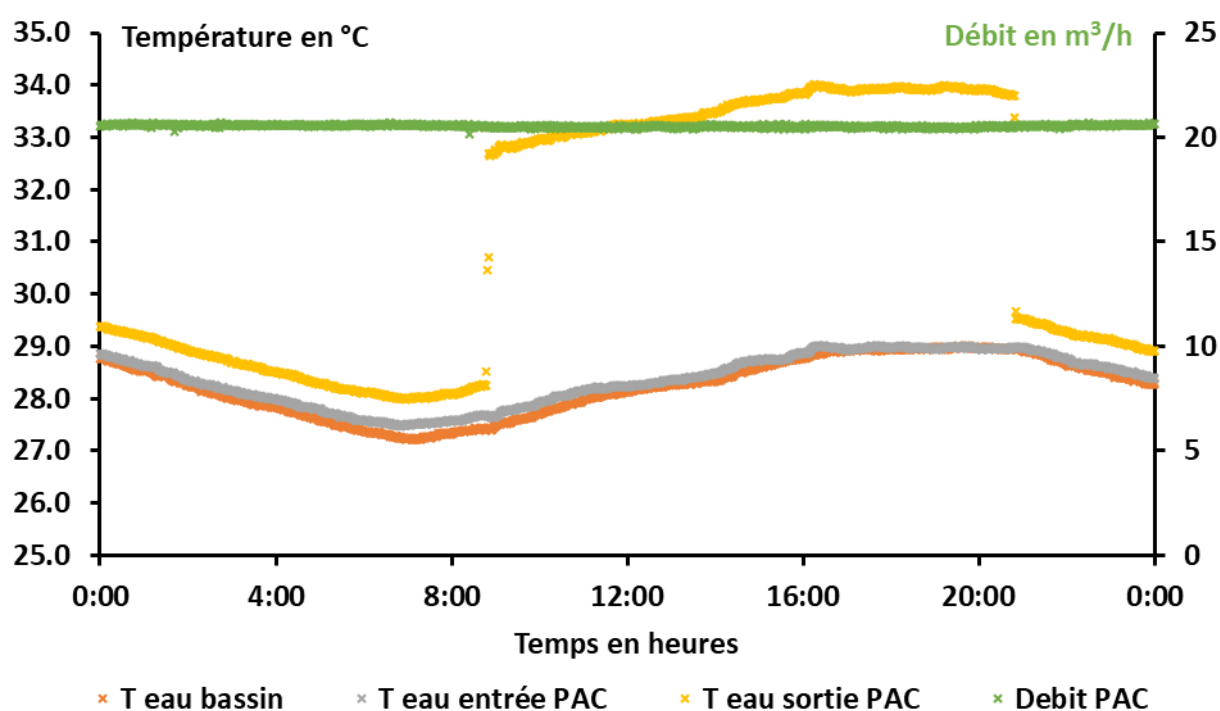


Figure 39 : Evaluation des températures d'entrée et de sortie de la pompe à chaleur

e. Occupation

La piscine est occupée 7 jours sur 7 en journée. Le nombre de nageurs varie fortement au cours de la journée. On peut identifier trois types de public :

- Les scolaires
- Les clubs
- Le grand public

La Figure 40 met en évidence des grandes variations du nombre de nageurs au cours de la journée avec des alternances de groupe nombreux de 10 à 20 nageurs à l'absence de nageurs ou des nageurs isolés. La présence des nageurs impacte significativement le niveau dans le bac tampon comme le montre la Figure 40. L'occupation implique une augmentation ponctuelle du niveau ainsi qu'une augmentation des pertes en eau. Cependant, il n'est pas possible d'évaluer les pertes durant les périodes d'occupation à partir de la courbe de niveau. Ces derniers déplaçant une quantité d'eau variable non seulement en fonction de leurs caractéristiques physiques mais aussi de leurs activités et comportements. En effet, on peut remarquer un décrochage de la courbe de niveau après la première période d'activité par rapport à la période précédente. Mais par la suite, on observe une remontée du niveau sans occupation sans qu'une période de remplissage soit identifiable. Les perturbations dues aux nageurs ne permettent plus d'identifier, les remplissages et le retour de l'eau depuis le mini bac avec certitude.

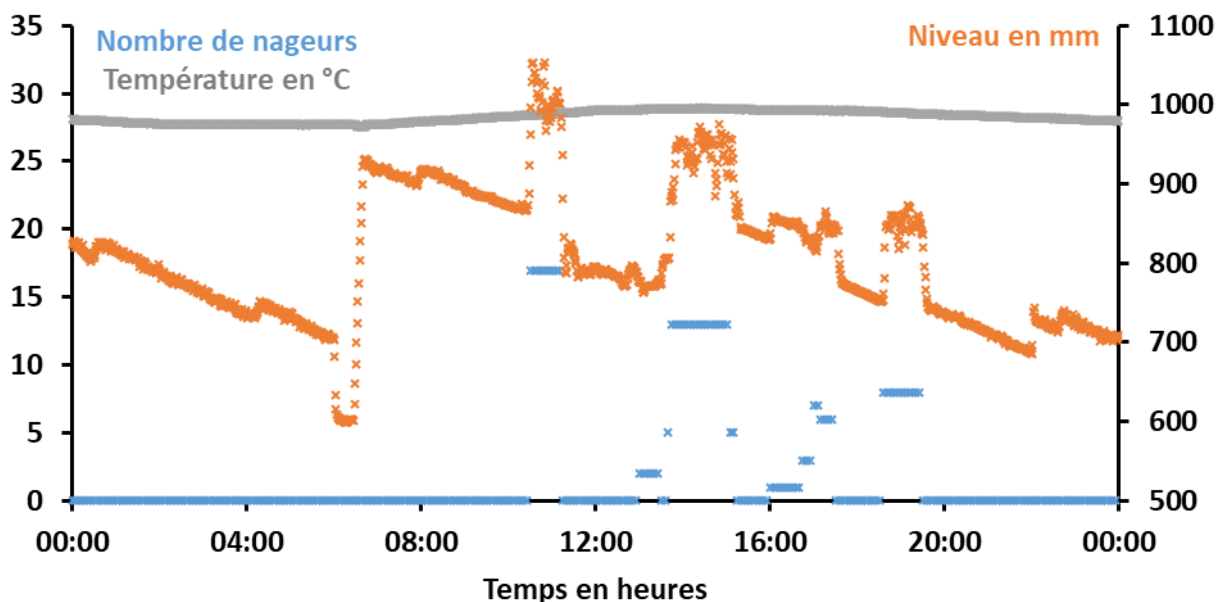


Figure 40 : Evolution du nombre de nageurs et du niveau dans le bac tampon au cours du temps

L'impact de l'occupation est très significatif sur le niveau du bac tampon, mais pas sur la température de l'eau. La modélisation sera utilisée pour étudier son impact sur le bilan énergétique de la piscine. En effet les nageurs agissent d'un côté en augmentant les gains par la chaleur dégagée par les corps et en augmentant les pertes par évaporation et convection décrits dans la première partie.

2. Mesure des fuites

L'objectif est dans un premier temps, d'évaluer les fuites du système (bassin et réseau hydraulique). Le bilan massique dans le cas d'un bassin non occupé est impacté par l'évaporation, la pluie, les actions de maintenance, les remplissages et les fuites causées par un défaut d'étanchéité du bassin et du réseau hydraulique. Si le débit de circulation de l'eau et la position des différentes vannes sont constants, le niveau d'eau est en équilibre dans le bassin en régime permanent. Dans ces conditions, la variation de niveau dans le bac tampon est représentative de la variation de quantité d'eau dans le système. La procédure utilisée pour prendre en compte le mini bac de mesure de la qualité de l'eau est décrit précédemment.

Ces conditions sont réunies si on se place dans les conditions particulière suivantes :

- L'occupation a lieu en journée du lundi au dimanche à l'exception des jours fériés. Les opérations de maintenance sur l'installation ont lieu sur les mêmes périodes. Pour s'affranchir de ces évènements, les données utilisées seront celles mesurées de nuit ou des jours fériés.
- La pluviométrie est mesurée, cela permet de connaître le débit d'eau entrant dû à ce phénomène météorologique.
- Les remplissages ont lieu plusieurs fois par semaine et durent quelques minutes. La courbe de niveau remonte très rapidement et est facilement identifiable. Les mesures utilisées se situent entre deux remplissages du bac tampon.

En faisant l'hypothèse que la couverture empêche complètement l'évaporation et en se positionnant dans les conditions précédemment présentées, la variation de niveau dans le bac tampon est la conséquence des fuites du système. L'analyse des données de niveau permet de connaître le débit de fuite du système. En raison de la détérioration de la couverture, elle n'a pu être mise en place qu'à deux occasions : la nuit du 29 au 30 septembre et entre le 10 au soir et le 12 novembre au matin, la piscine étant fermée les jours fériés. Les débits de fuites mesurés sont présentés dans le Tableau 11. Le débit moyen de fuite est de 0.377 l/h/m². Cette valeur sera utilisée par la suite.

Tableau 11 : Débits de fuite mesurés

Début	Fin	Niveau début en mm	Niveau fin en mm	Différence de niveau en mm	Débit de pertes en l/h/m²
30/09 01:20	30/09 04:52	941.58	890.89	50.69	0.413
11/11 01:44	11/11 05:50	1418.14	1368.06	50.08	0.352
11/11 09:54	11/11 14:12	1292.67	1248.87	43.81	0.293
12/11 02:03	12/11 05:48	1139.62	1087.82	51.80	0.398

3. Mesure du débit d'eau évaporé

L'objectif est de déterminer le flux évaporatif, pour cela il est possible de se placer dans des conditions particulières présentées précédemment mais sans couverture. Le débit de fuite est considéré connu et constant à la valeur précédemment déterminée.

Le niveau permet de mesurer le débit massique d'eau, la relation de l'équation <2.3> permet de déterminer le flux évaporatif à partir du débit.

$$\dot{Q}_{\text{évap}} = L_{\text{évap}} \dot{m}_{\text{évap}} \quad \text{<2.3>}$$

Les débits ainsi mesurés sont présentés dans l'annexe 3. Pour obtenir le débit d'eau évaporé, le débit de fuite est soustrait. La Figure 41 représente le débit d'eau évaporé par période, ainsi que la moyenne de température et de l'humidité relative ambiante et de la vitesse de l'air. Les conditions climatiques sont comprises entre 15°C et 22°C pour la température, entre 60% et 80% pour l'humidité relative et entre 1 m/s et 2.5 m/s pour la vitesse du vent. Le débit évaporatif par période est compris entre 0.1 l/h/m² et 0.3 l/h/m². L'analyse des graphiques permet de retrouver la dépendance de l'évaporation à la vitesse du vent que la littérature met en avant.

L'objectif du modèle étant à terme de l'utiliser avec des prévisions météorologiques pour réaliser un contrôle commande prédictif du chauffage. Le flux radiatif descendant étant une donnée disponible auprès des fournisseurs de prévisions météorologiques, cette valeur est considérée comme une entrée du modèle du bassin. Cependant, les mesures ne sont pas disponibles sur une année entière. Pour être en mesure de réaliser des simulations sur cette durée, la validation d'un modèle radiatif est nécessaire pour compléter la base de données météorologiques mesurées.

L'objectif est de mesurer le flux radiatif descendant à grande longueur d'onde et valider un modèle de température de ciel. La mesure du flux descendant est réalisée avec un pyrgéomètre.

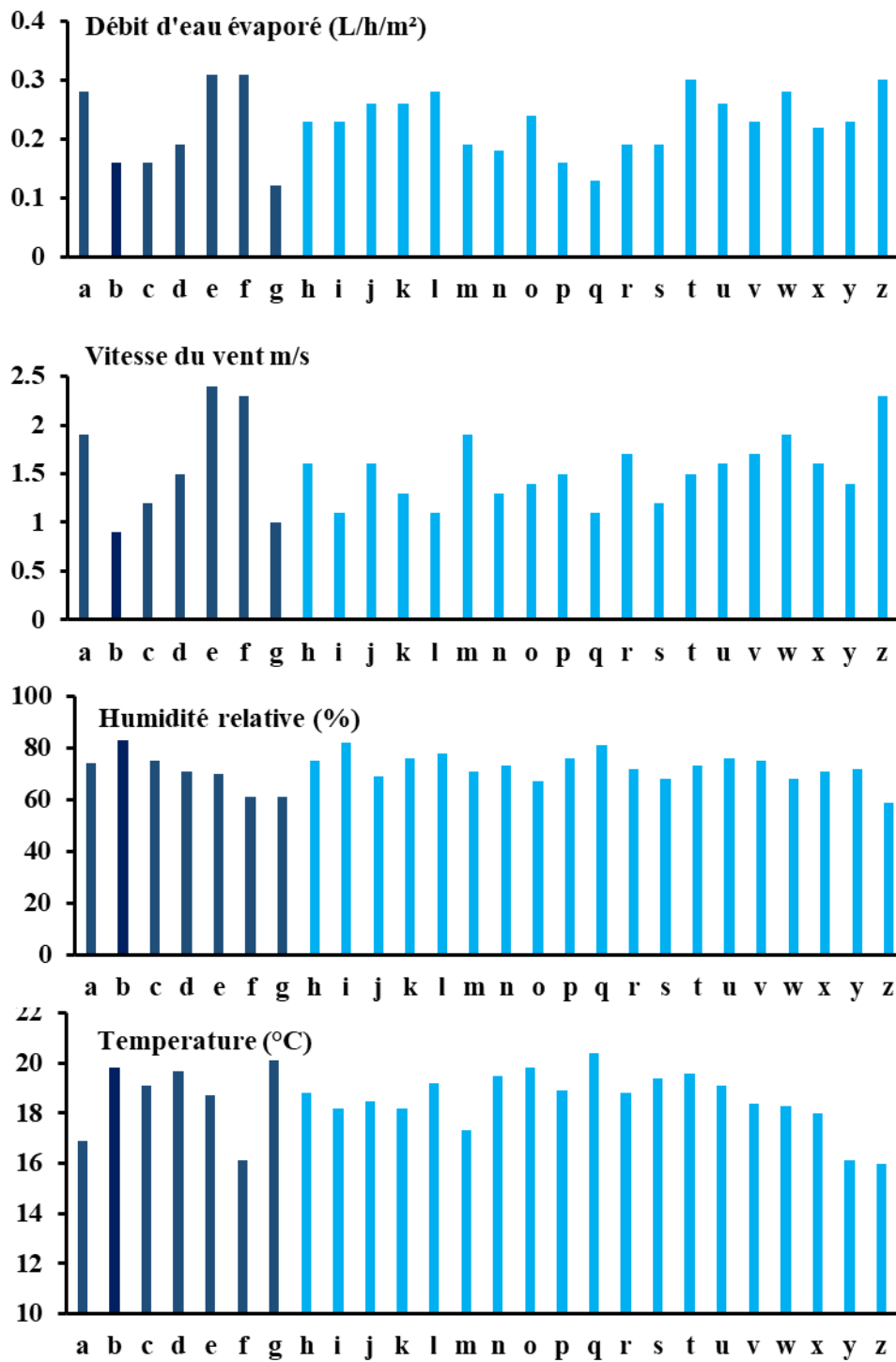


Figure 41 : Débit évaporatif et conditions expérimentales en termes de température, d'humidité relative de l'air et de la vitesse du vent, mesures réalisées entre septembre et novembre 2020

4. Pertes radiatives à grande longueur d'onde

La Figure 42 représente les mesures des flux radiatifs descendants du ciel et le rayonnement solaire pour deux journées. En bleu une journée ensoleillée et en brun une journée nuageuse comme le montre l'ensoleillement. Un flux descendant plus important est observé en cas de ciel ennuagé. La température de ciel est alors plus élevée que lors d'une journée sans nuages. Cette variation est de l'ordre de 20% supplémentaires en présence de nuages par rapport à une journée dégagée.

Une donnée utilisée dans la littérature est la température de ciel qui est présentée dans le premier chapitre et représentée sur la Figure 43. En l'absence de nuage sur la journée représentée la température équivalente de ciel est proche de 5°C la nuit et de 10°C en journée. On remarque une augmentation de la température ambiante en journée et en parallèle de celle de ciel ce qui est cohérent avec les modèles de la littérature. En présence de nuages la seconde journée, la température équivalente de ciel se rapproche de la température ambiante mais reste inférieure : environ 20°C contre 21°C pour la température ambiante. On peut remarquer qu'après la tombée de la nuit la température de ciel avec nuages reste proche de la température ambiante, en supposant la présence de nuages bien que ceci ne puisse pas être vérifié.

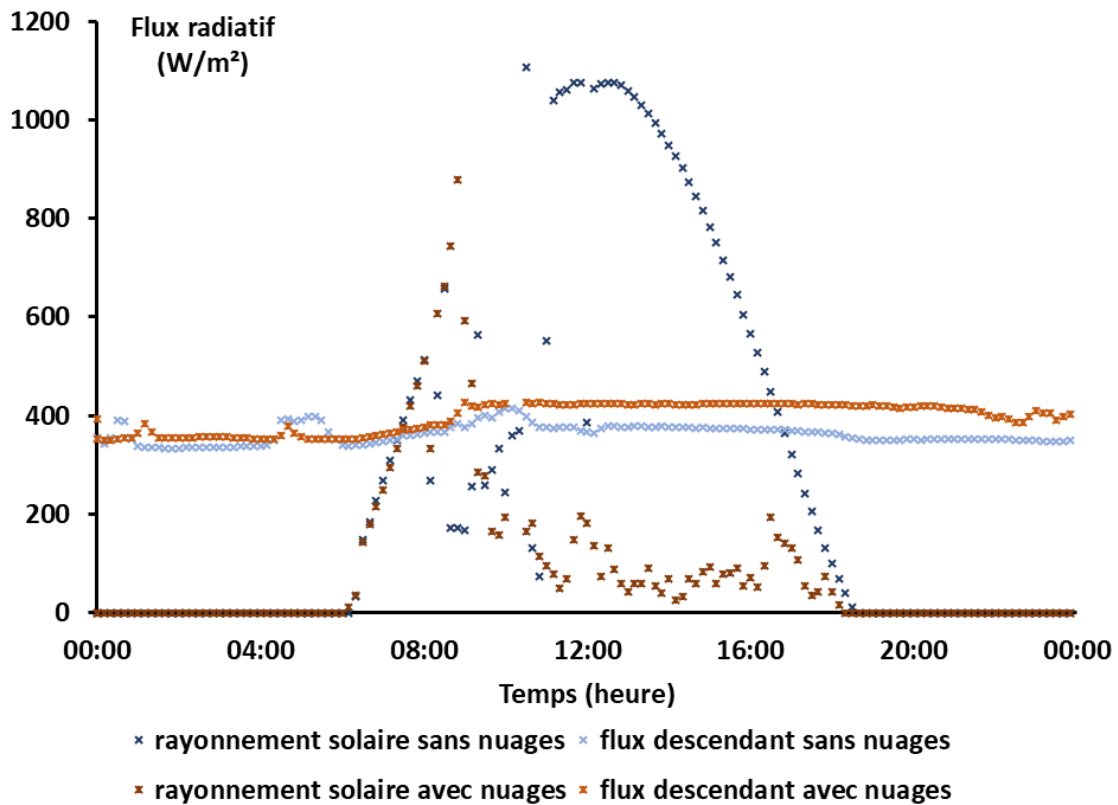


Figure 42 : Evolution du rayonnement solaire et du flux descendant du ciel au cours du temps pour les journées du 21 et 22 novembre : une sans nuages et un jour nuageux.

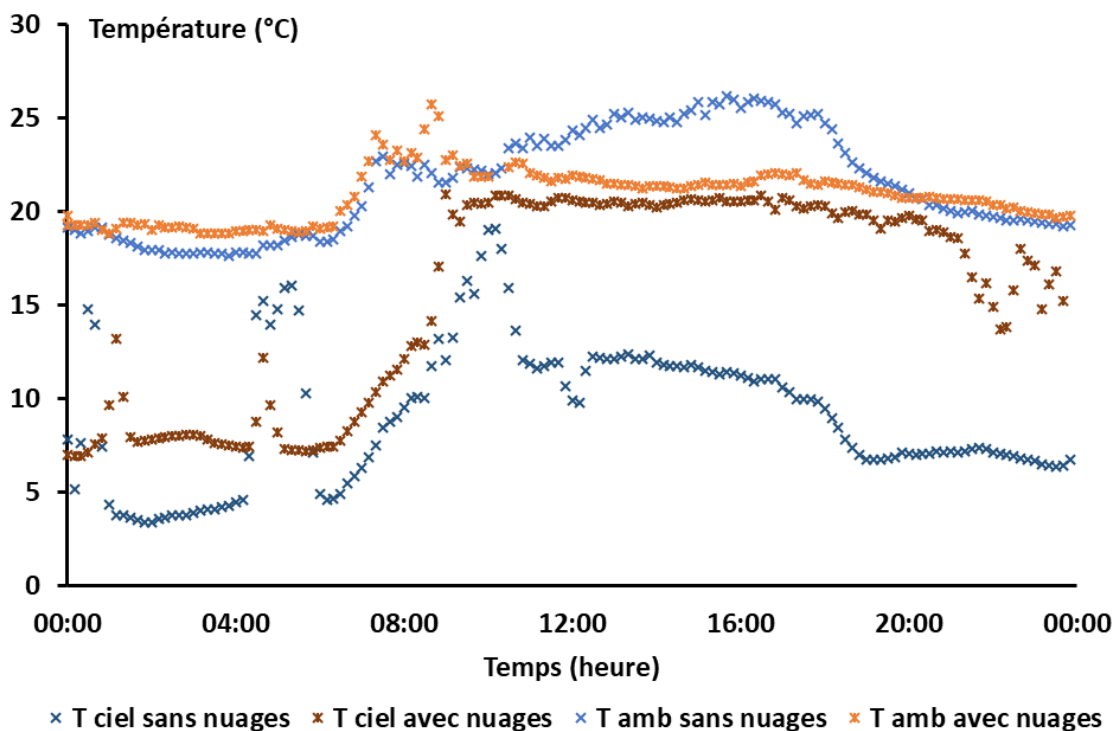


Figure 43 : Température de ciel et température ambiante du temps pour les journées du 21 et 22 novembre : une sans nuages et un jour nuageux.

5. Données sans occupation

Les sélections de données précédemment présentées permettent de déterminer les fuites et de valider un modèle évaporatif et radiatif à grandes longueurs d'onde. Pour les validations suivantes, un bilan énergétique sera réalisé. La donnée dont on souhaite suivre l'évolution est cette fois la température de l'eau du bassin.

Les données de nuit sont nombreuses, par contre concernant les données en journée et donc sur 24h, seuls deux jours sont disponibles. En effet, la piscine est ouverte 7 jours sur 7. Seules des journées fériées permettent de suivre le fonctionnement sans occupation et intervention des techniciens. Dans notre cas, les données pour 3 jours sont disponibles : le 1 novembre, le 11 novembre et le 20 décembre. La journée du 11 novembre, la couverture était en place pour évaluer les fuites. La Figure 44 présente la température de l'eau du bassin pour deux journées : en bleu la journée du 11 novembre et en brun celle du 20 décembre. Durant la journée du 11 novembre, le chauffage a été nécessaire pour maintenir la température à 28°C. En effet, la température a atteint 27.5°C en fin de nuit, ou la température de l'eau est la plus froide, le chauffage s'est mis en fonctionnement. Il s'est arrêté en fin de journée quand la température de l'eau a atteint 29°C. La journée du 20 décembre, le gain solaire a suffi à maintenir la température au-dessus de 28.5°C, le chauffage n'a pas été nécessaire.

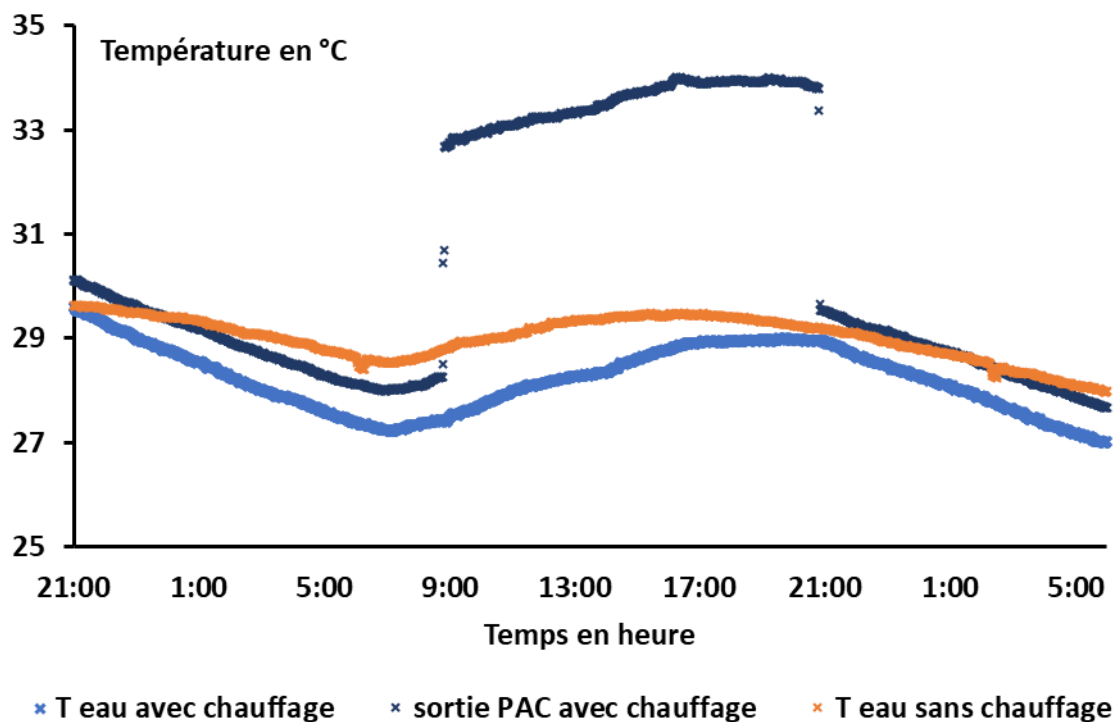


Figure 44 : Evolution de la température de l'eau du bassin et de la pompe à chaleur sans occupation.

Le chauffage se déclenche en début de journée quand la température de l'eau est la plus froide. C'est aussi le moment où le soleil commence à chauffer l'eau et que la température remonte naturellement. La température atteint son maximum et l'arrêt du chauffage le soir quand le bassin n'est plus utilisé, ce qui augmente les pertes durant la période nocturne. De plus, le chauffage a lieu en journée quand le réseau électrique est le plus sollicité.

6. Données avec couverture

Les données avec couverture sont disponibles pour une nuit et une journée. Cette dernière est celle du 11 novembre où la couverture a été mise en place. La Figure 45 présente l'évolution de la température de l'eau pour deux journées. Les conditions météorologiques sont similaires (Tableau 12) et ainsi que le chauffage (Figure 46) qui était éteint la nuit. Les pertes sont moins importantes durant la nuit en présence de la couverture : 0.5°C contre 1.5°C sans (Figure 45). La couverture permet de diminuer les pertes et donc les besoins en chauffage. Le gain sur l'année sera évalué dans la dernière partie en comparant le besoin en chauffage avec ou sans sur une année. Le chauffage étant allumé en journée (Figure 46) et la puissance différente selon la journée, il n'est pas possible de conclure sur l'impact de la couverture sur les gains solaires avec les données expérimentales. Les données expérimentales sont influencées à la fois par la présence ou l'absence de la couverture mais aussi les conditions météorologiques. La modélisation servira dans la suite à s'affranchir des conditions météorologiques et d'évaluer l'impact spécifique de la couverture.

Tableau 12 : Conditions météorologiques sur la journée avec couverture et sans couverture

	moyenne température	moyenne humidité	moyenne rayonnement	moyen précipitation	moyenne vitesse du vent	moyenne pyrgéomètre
Unité	°C	%	W/m ²	mm	m/s	W/m ²
avec couverture	21	67	128	0	2	374
sans couverture	18	63	75	0	2	350

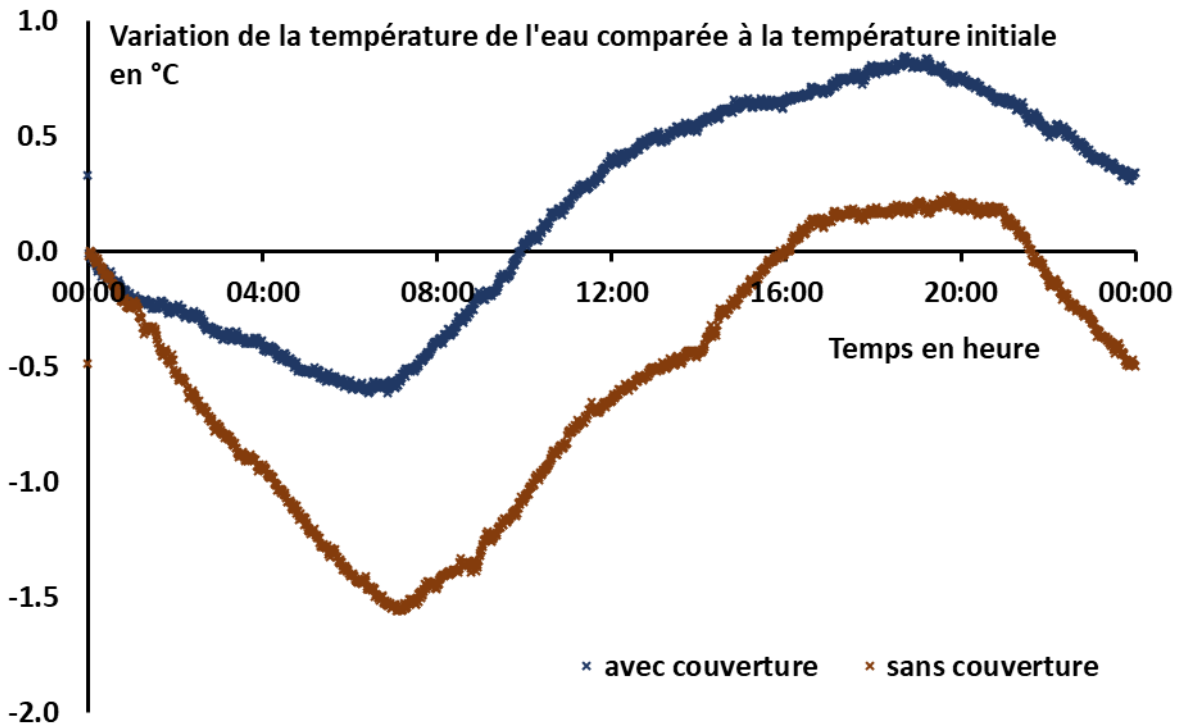


Figure 45 : Evolution de la température de l'eau sans (20 décembre) et avec couverture (11 novembre).

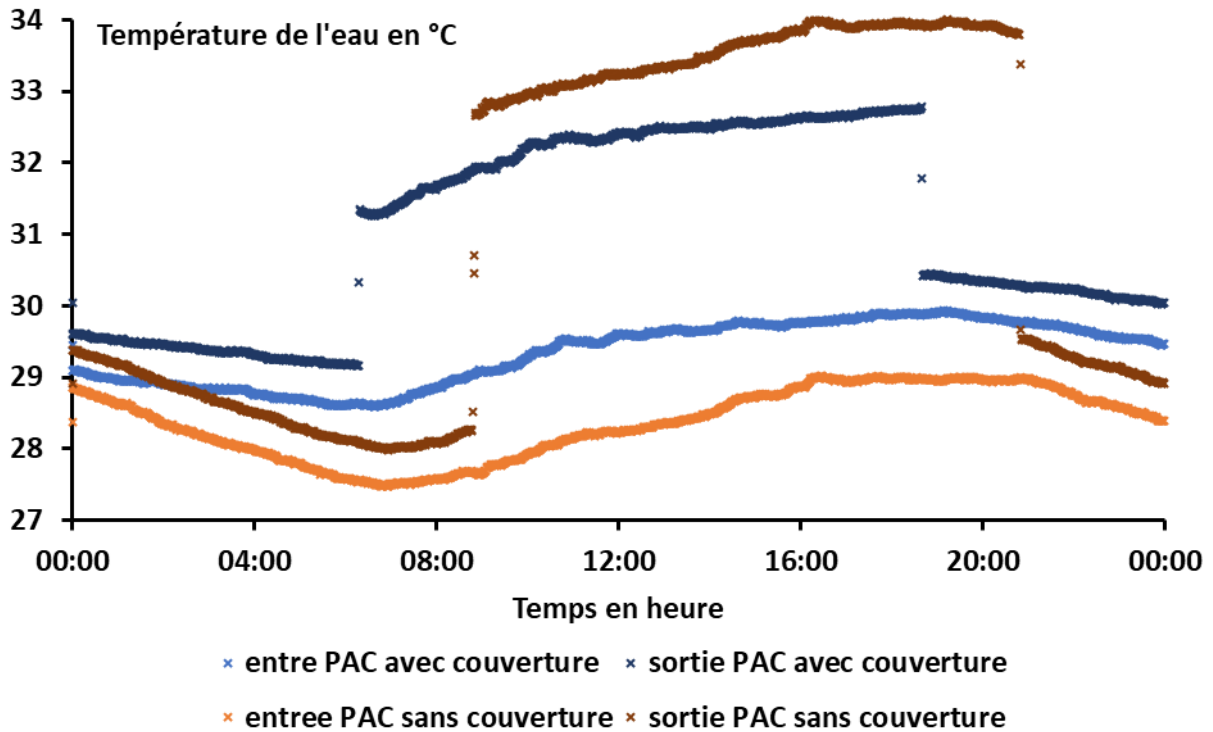


Figure 46 : Chauffage de l'eau avec et sans couverture.

7. Régulation du chauffage des bassins

Le chauffage du bassin est assuré par une pompe à chaleur présentée précédemment. La régulation de base sur site est une régulation tout ou rien, elle fonctionne à pleine puissance ou elle ne fonctionne pas du tout sur une période donnée. Le chauffage s'allume quand la température de l'eau passe sous une température de consigne basse (27.5°C) et s'éteint quand la température de consigne haute est atteinte (29°C dans notre cas) comme présenté sur la Figure 47.

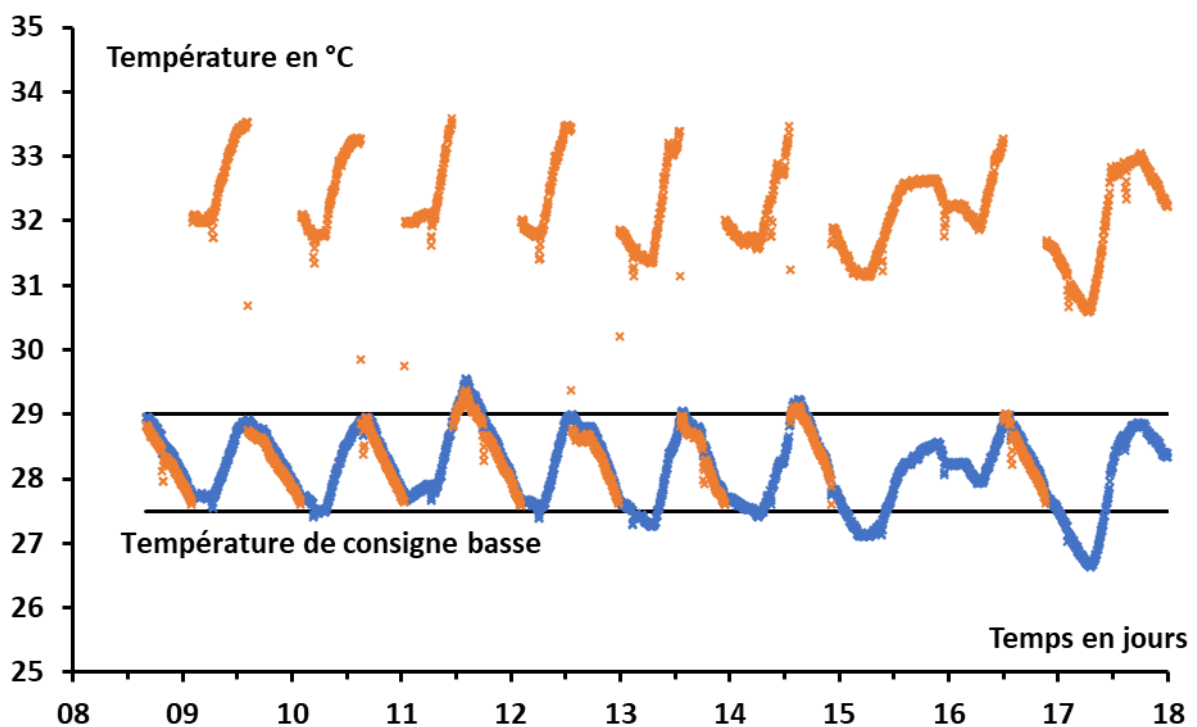


Figure 47 : Régulation classique du chauffage du bassin, en bleu la température de l'eau du bassin et en orange celle à la sortie du chauffage.

La pompe à chaleur installée quelques mois avant le début de l'expérimentation était à l'origine de nuisances sonores pour le voisinage. Pour diminuer ces dernières, le constructeur a baissé le débit de ventilation. Cependant cela n'a pas suffi et par la suite le chauffage a provisoirement été allumé en journée uniquement, en attendant qu'une solution soit trouvée. L'allumage du chauffage sur plusieurs jours est présenté sur la Figure 48. Il peut être noté que la température de l'eau ne respecte plus le confort des nageurs avec des périodes où la température peut aller jusqu'à 30°C. Sur d'autres journées, l'allumage toute la journée n'est pas suffisant pour assurer à tout moment la température minimale définie. C'est cohérent avec les données de la Figure 47 où l'on peut remarquer que le chauffage doit parfois être

allumé en continu nuit et jour pour assurer le confort, comme du 15 septembre au matin au 16 septembre au soir. Cette régulation ne permet ni d'optimiser la consommation du chauffage ni d'assurer le confort des nageurs.

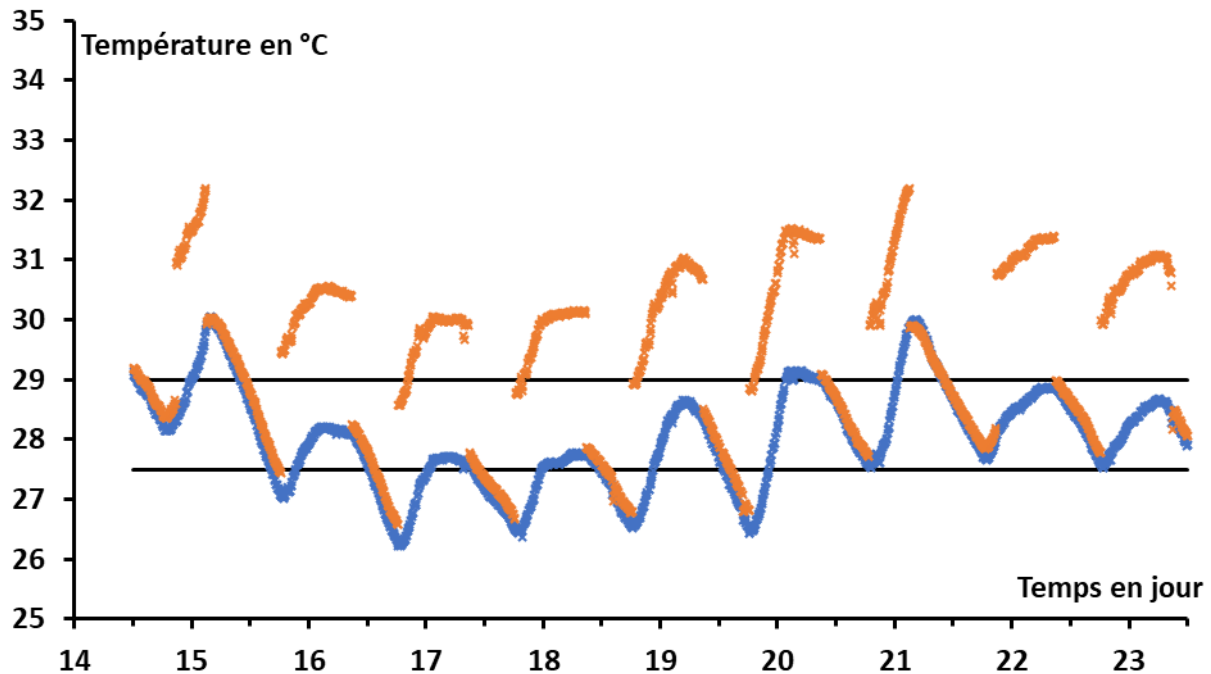


Figure 48 : Régulation du chauffage en journée en raison des nuisances occasionnées par la pompe à chaleur en novembre 2020.

L'analyse des données permet de mettre en avant deux éléments récurrents produits par la régulation classique :

- La Figure 49 présente la température de l'eau ainsi que les périodes d'allumage du chauffage en pointillé. La première journée, le chauffage s'allume durant la nuit quand la température atteint la consigne basse et s'éteint un peu avant le milieu de la journée quand l'eau atteint la consigne haute. Cependant à cette période de la journée l'ensoleillement suffit pour que la température continue à augmenter significativement. La température de confort de 28°C est dépassée allant jusqu'à 29,5°C et la consommation est plus importante que nécessaire.
- La nuit la température de l'eau diminue, la température de consigne basse est souvent atteinte en milieu de nuit ou au matin. Le chauffage s'allume alors durant les heures pleines et la première période d'heures de pointe entre 9H et 12H30. Chauffer durant la première partie de la nuit quand c'est nécessaire permettrait de réduire le coût du chauffage du bassin.

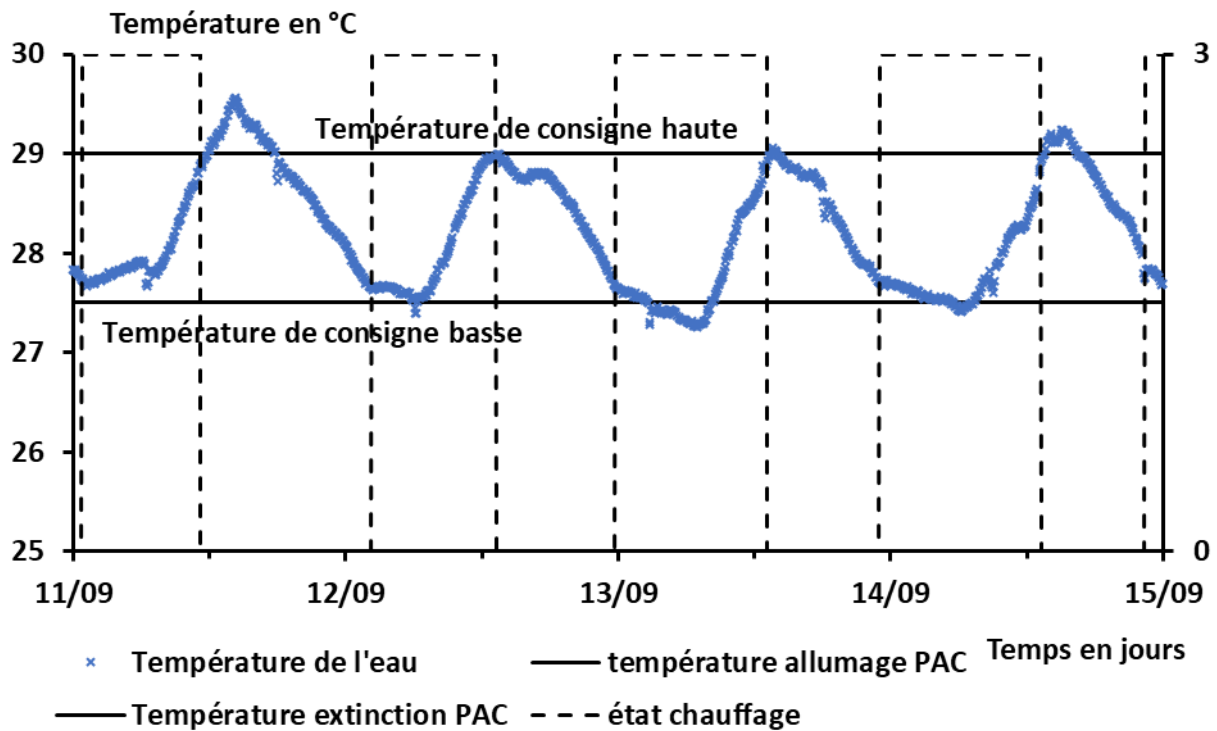


Figure 49 : Période de chauffage et évolution de la température de l'eau du bassin sur 4 jours en septembre

8. COP pompe à chaleur

Le coefficient de performance de la PAC dépend de l'énergie utile (dans notre cas la chaleur apportée à l'eau) et de l'énergie consommée (dans notre cas l'énergie électrique consommée) comme dans l'équation qui suit :

$$\text{COP} = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{consommée}}} \quad \langle 2.4 \rangle$$

Les pompes à chaleur sont des cycles thermodynamiques dithermes dont le COP dépend des conditions des deux sources, dans notre cas : d'un côté l'air ambiant et de l'autre l'eau du bassin. Dans notre cas, l'hypothèse d'une température de la source chaude constante est faite. En effet la température est maintenue proche de 28°C pour assurer le confort des usagers. Le COP dépend alors uniquement de la température ambiante. Le COP fourni par le constructeur est de 7.58 (pour une température de l'air extérieur de 28°C). Des données de mesures entre le 29 Août et le 3 septembre 2020 sont présentées dans le Tableau 13 et représentées sur la Figure 50. On peut noter une corrélation entre le COP et la température extérieure comme on pouvait s'y attendre. Les données ont permis de déterminer l'équation du COP en fonction de la température extérieure selon la méthode des moindres carrés :

$$\text{COP} = 0.1434 T_a + 4.341 \quad \langle 2.5 \rangle$$

Tableau 13 : Mesures du COP de la pompe à chaleur

	Durée	T _a	Energie électrique	Energie thermique	COP
Unité	h	°C	kWh	kWh	
Période 1	12.9	18.3	153	1090	7.12
Période 2	8.5	17.1	103	688	6.70
Période 3	7.6	20	88	651	7.38
Période 4	8.9	17.8	108	731	6.75
Période 5	3.5	23.7	40	309	7.65

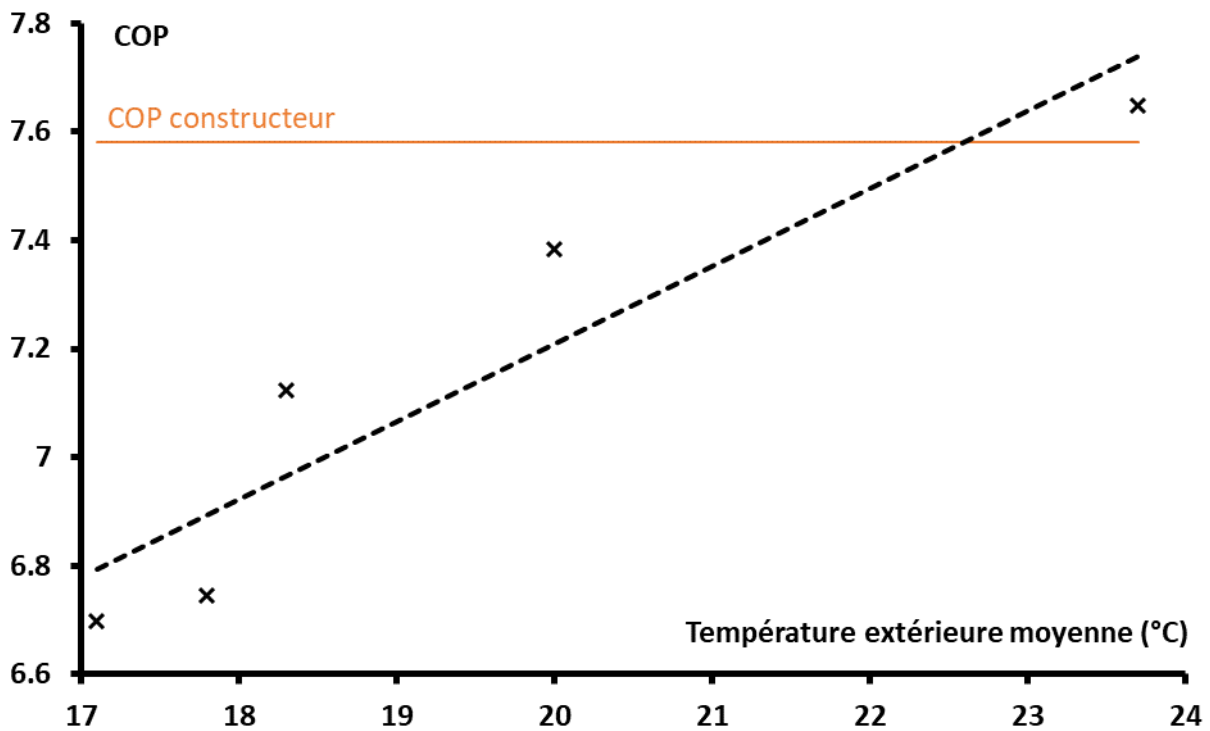


Figure 50 : Mesure du COP de la pompe à chaleur en fonction de la température ambiante.

V. Conclusion

L'expérimentation sur la piscine de Vue Belle n'a pas permis d'acquérir des données exploitables mais le retour d'expérience a permis d'améliorer celle mise en place sur le site de bois de nèfles. Cette seconde expérience a permis l'acquisition de données conséquentes, qui ont permis d'évaluer les différents flux impactant le bilan énergétique du bassin ainsi que le comportement du chauffage et de sa régulation et la température de l'eau. Ces données serviront dans le troisième chapitre à la validation du modèle du bassin.

De plus, une base de données météorologique d'une année permettra de faire des simulations sur cette base de temps dans le chapitre 4.

Chapitre 3 : La comparaison expérimentation/modèle validation du modèle du bassin

Dans le premier chapitre, les modèles de bassin disponibles dans la littérature ont été présentés et comparés. Dans le second chapitre, l'expérimentation développée et les mesures obtenues ont été décrites et analysées. Ce troisième chapitre présente la comparaison des modèles de la littérature et des données mesurées sur le bassin de la piscine de Bois de nèfles. L'objectif est de déterminer un modèle permettant de simuler le comportement du bassin et de valider ce modèle, qui servira dans le dernier chapitre à mettre en place un contrôle commande du chauffage du bassin.

Dans un premier temps la comparaison des données expérimentales et des modèles permettra la sélection des modèles pour chaque phénomène physique, puis le modèle du bassin sera étudié dans sa globalité. La comparaison de mesures aux données simulées permet la validation du modèle.

La première partie sur l'évaporation est un résumé des informations importantes développé dans un article présenté en annexe 4.

I. Evaporation

La littérature présentée dans le chapitre 1 a mis en évidence des fortes variations des débits évaporatifs prédits selon le choix du modèle. L'article présenté en annexe 4 a montré que la prise en compte de la hauteur de mesure du vent permettait de diviser par 2 l'erreur relative entre les valeurs prédites et mesurée. 4 modèles présentaient des résultats qui se détérioraient avec la prise en compte de la hauteur de mesure du vent. Ils n'ont pas été retenus pour la suite. L'erreur relative moyenne était alors plus que de 50% contre 200% initialement. La suite tient compte de cette conclusion. Avant d'utiliser les différents modèles, la vitesse du vent est ajustée en fonction de la hauteur de mesure initiale (cf Tableau 14). L'équation <3.1> [84] a permis d'estimer la vitesse du vent à différentes hauteurs sur notre site en fonction de la vitesse mesurée. La rugosité prise en compte est de 0.055 [85] pour des conditions de morphologie de l'environnement proche présentées sur la Figure 28 .

Tableau 14 : Hauteur de mesure du vent en fonction des modèles

	z en m
McMillan (10m)	10
McMillan (3m)	3
Rohwer	0.3
Smith1 (1994)	0.3
Richter1	2
Richter2	2
ISO TC 180	0.3
Raimundo	0.3
Shah	0.3
Molineaux	10
Watmuff	10
Tang	0.55
Jodat	0.3
Pauken	0.3
Inan	0.3

$$\frac{v_z}{v_{10}} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad <3.1>$$

L'objectif est de se placer dans les conditions des expérimentations des périodes a à z (Figure 41) et de simuler les flux évaporatifs avec les modèles de la littérature. La comparaison avec les mesures expérimentales permettra de connaître les capacités des modèles à prédire les flux évaporatifs mesurés sur notre site expérimental.

Les mesures sont réalisées toutes les 10 minutes pour les données météo. Un pas de temps de calcul de 10 minutes a été utilisé pour la simulation des flux évaporatifs. Les conditions sont considérées comme constantes sur les dix minutes à la valeur mesurée. Le flux évaporatif calculé est intégré sur la période entière.

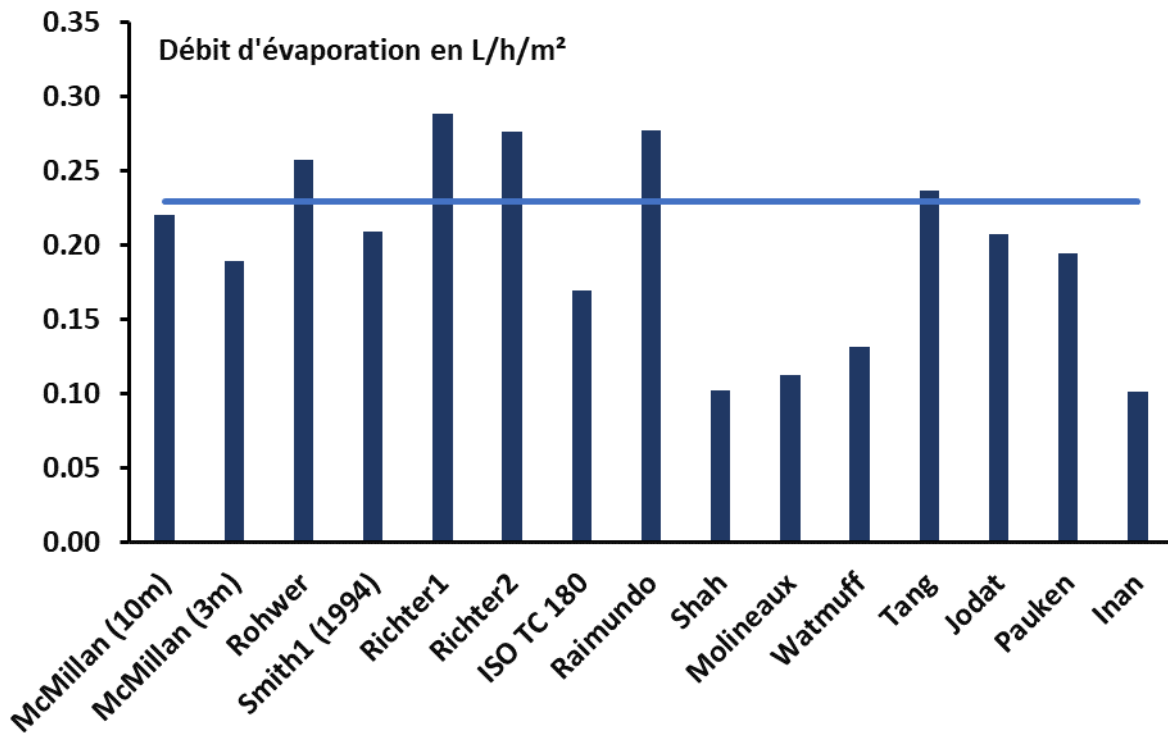


Figure 51 : Eau évaporée pour les 15 modèles pour la période 1 en bleu et le débit évaporatif expérimental horizontalement.

Cette démarche est réalisée pour les 15 modèles et 26 périodes, les valeurs numériques par modèle et période sont présentées dans l'annexe 1. L'erreur relative a été calculée avec l'équation <3.2>.

$$\text{erreur relative} = \left| \frac{\dot{q}_{\text{modèle}} - \dot{q}_{\text{expérimental}}}{\dot{q}_{\text{expérimental}}} \right| \quad <3.2>$$

L'objectif est de déterminer le meilleur modèle pour tous les points. La moyenne des erreurs relatives par modèle a été calculée pour permettre la comparaison des différents modèles sur l'ensemble des périodes représentées sur la Figure 51. 7 modèles ont une erreur relative moyenne proche de 20% : McMillan (3m et 10m), Smith, ISO TC, Pauken, Jodat, Tang. Les neuf autres modèles ont une erreur relative moyenne entre 32% et 50%. Pauken, Jodat et Tang sont des modèles qui dépendent de plus de paramètres mais leur précision n'est pas supérieure aux autres sur notre cas d'application.

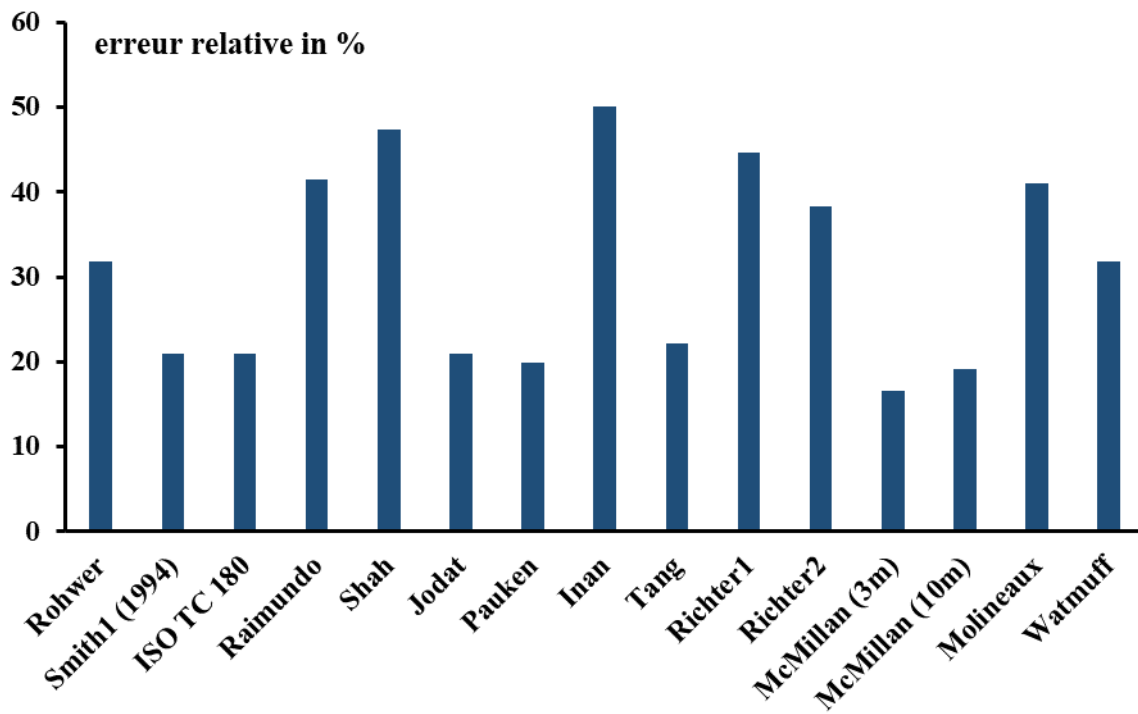


Figure 52 : Erreur relative moyenne par modèle

La Figure 52 met en évidence des résultats sensiblement meilleurs avec le modèle de McMillan 3m plutôt que McMillan 10m. La mesure de la vitesse du vent a été réalisée à deux hauteurs différentes. L'évolution de la vitesse du vent en fonction de la hauteur peut être différente dans leur cas par rapport à notre site, l'environnement proche étant différent. Le modèle de Shah présente une erreur relative moyenne de 47%, d'autres modèles permettent d'obtenir de meilleurs résultats. Cependant, il est à noter que l'on n'étudie pas tout le domaine de définition de ce dernier qui a été étudié non seulement en cas de convection forcée, mais aussi de convection naturelle.

Le modèle qui prédit le mieux le comportement de l'évaporation sur notre site expérimental est le modèle de McMillan (3 m) avec une erreur relative moyenne de 17% sur les 16 périodes. Dans l'objectif de déterminer si l'erreur relative peut être plus petite avec un modèle de la forme de l'équation <1.3> et <1.4>, une identification paramétrique a été réalisée.

L'étude de la littérature, présentée dans le premier chapitre, a mis en évidence :

- Le paramètre b est parfois considéré comme nul [78], la convection naturelle n'est alors pas prise en compte. Le bassin est soumis au vent toute l'année. L'identification a été réalisée avec un facteur b nul ou variable.
- Le paramètre n est souvent égal à 1, mais d'autres cas existent [77]. Bowen a démontré que les flux évaporatif et convectif sont liés par une constante. De plus, comme montré

dans la partie bibliographie sur la convection, les modèles ne prennent pas en compte une dépendance linéaire en fonction de la vitesse du vent. L'identification a été menée pour la valeur fixée à 1 ou variable entre 0 et 1.

Les 26 périodes, présentées dans la partie précédente, sont disponibles pour l'identification et la validation. 7 valeurs ont été choisies pour l'identification, les autres ont servi à la validation du modèle. Les valeurs choisies sont représentatives de l'ensemble des conditions mesurées :

- Des flux évaporatifs élevés de l'ordre de 0.3 L/h/m² à faible avec 0.1 L/h/m²
- Des vitesses de vent moyennes allant de 1 m/s à 2.4 m/s à 10 mètres de hauteur
- Une humidité relative de 60% à 80%
- Des températures ambiantes de 16°C à 20.4°C

Les périodes retenues pour l'identification sont celle nommée de a à f et celle pour la validation de g à z. L'identification paramétrique est réalisée en minimisant la moyenne des erreurs relatives sur les 7 périodes servant à l'identification. Les valeurs obtenues pour chaque forme ainsi que l'erreur relative moyenne sur les 7 périodes d'identification sont présentées dans le Tableau 15. Les trois formes présentent des résultats similaires, la forme B avec les trois paramètres a été retenue.

Tableau 15 : Les modèles évaporatifs identifiés sur les périodes a à f.

	a	b	n	Erreur relative moyenne
Forme A	0.04526	0	0.78	11 %
Forme B	0.04526	0.00002	0.78	11 %
Forme C	0.03050	0.01621	1	12 %

Sur les données de validation, l'erreur est légèrement plus importante. Elle est de 18% pour les modèles identifiés. C'est la même valeur que les modèles de McMillan, Smith et proche de celle de ISO TC 180, Tang, Pauken et Jodat. Les modèles de McMillan, Smith et ISO TC 180 sont les meilleurs pour prédire le comportement de l'évaporation dans notre cas. Ils sont comparés au modèle identifié de la forme B sur la Figure 53.

L'identification ne montre pas d'intérêt particulier, les prévisions de notre modèle ne diminuant pas significativement l'erreur relative moyenne. Pour la suite, le modèle identifié à l'aide des données expérimentales (forme B) a été utilisé, mais les modèles de McMillan et Smith seraient aussi pertinents.

Tableau 16 : Moyenne de l'erreur relative sur les données de validation pour les modèles de la littérature et ceux identifiés.

	Erreur relative moyenne %
McMillan (10m)	18
McMillan (3m)	18
Rohwer	28
Smith	18
Richter1	41
Richter2	34
ISO TC 180	20
Raimundo	37
Forme A	18
Forme B	18
Forme C	18
Shah	49
Molineaux	43
Watmuff	34
Tang	20
Jodat	19
Pauken	19
Inan	52

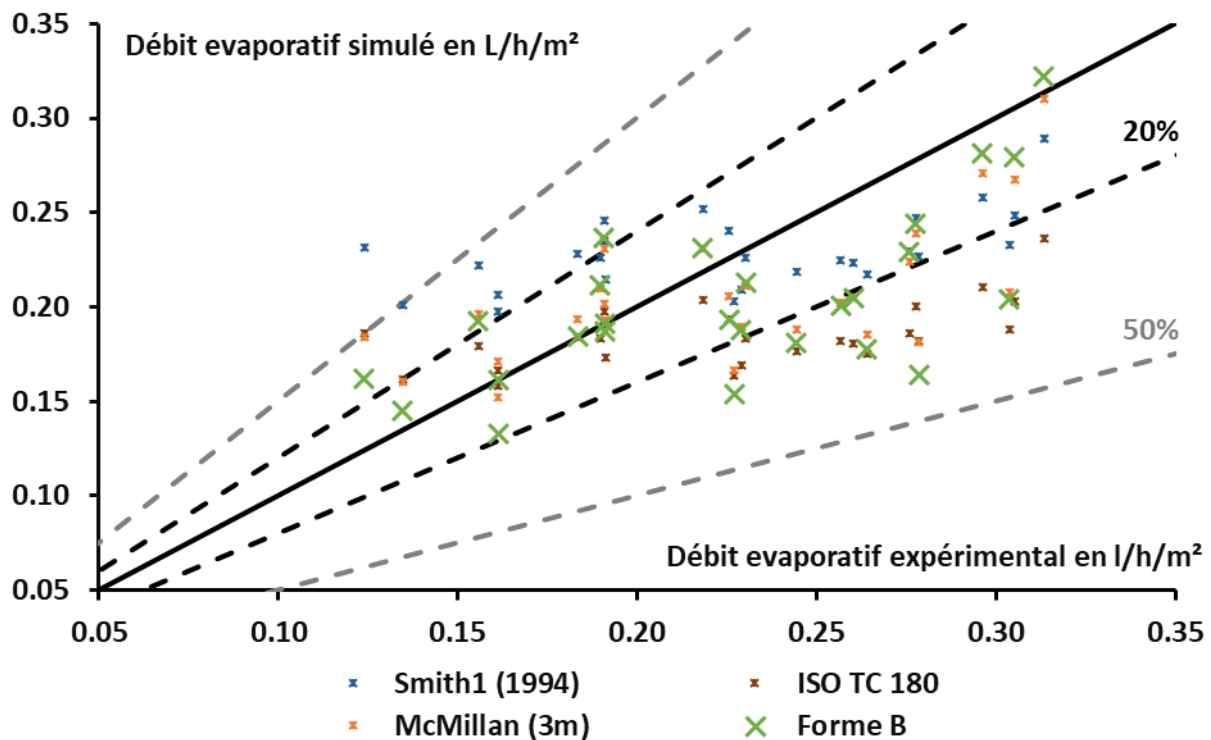


Figure 53 : Comparaison du modèle identifié (forme B) et des modèles de McMillan, ISO TC 180 et Smit

II. Pertes radiatives à grandes longueurs d'onde (infrarouge) avec l'environnement

Le flux radiatif descendant est une donnée disponible dans les prévisions météorologiques de météo France. Cette donnée a été mesurée sur le site de bois de nèfles. La remontée des données n'a pas permis d'obtenir la mesure sur une année en raison de nombreuses coupures dans la remontée des données. La détermination d'un modèle a pour objectif de compléter les données mesurées par des données modélisées dans le but de pouvoir simuler le comportement du bassin sur une année.

La valeur mesurée est le flux infrarouge descendant, cependant une autre grandeur est souvent utilisée dans la littérature, la température équivalente de ciel. Cette dernière est définie dans la partie I de ce document. La Figure 54 présente l'évolution de la température de ciel équivalente mesurée en fonction du temps en brun. La première journée est une journée globalement dégagée alors que pour la seconde le temps était couvert. La première journée la température de ciel est d'environ 13°C sauf lors de passages nuageux aux alentours de 10 h du matin. La température du ciel nuageux est quant à elle plus élevée, autour de 20°C.

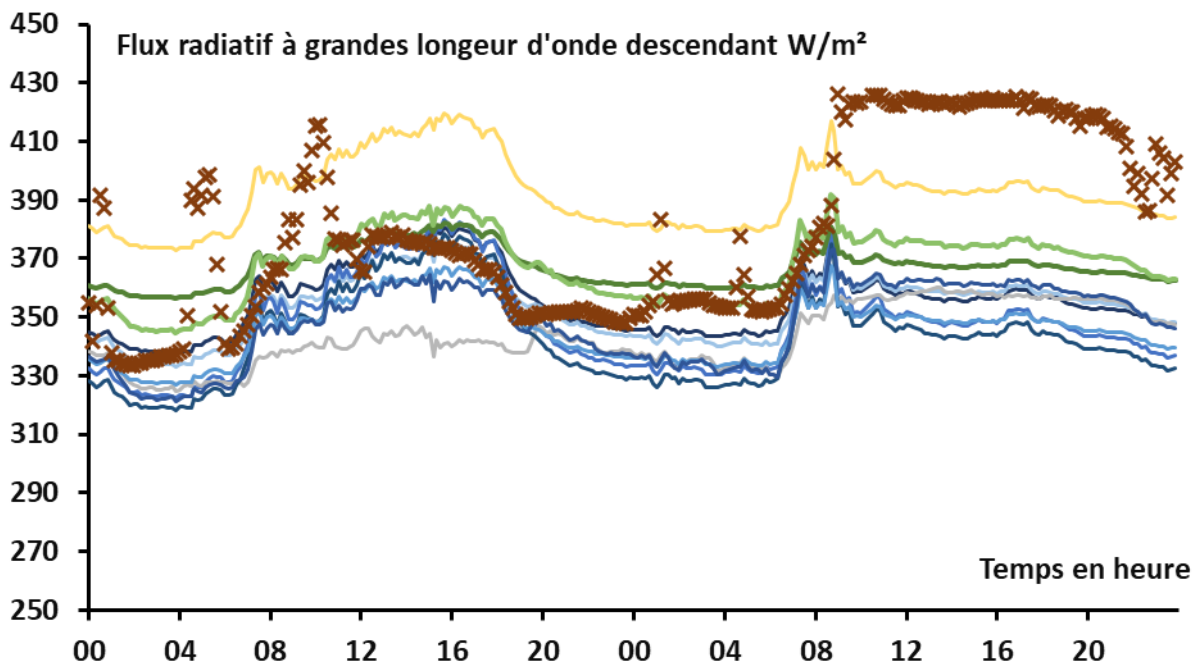
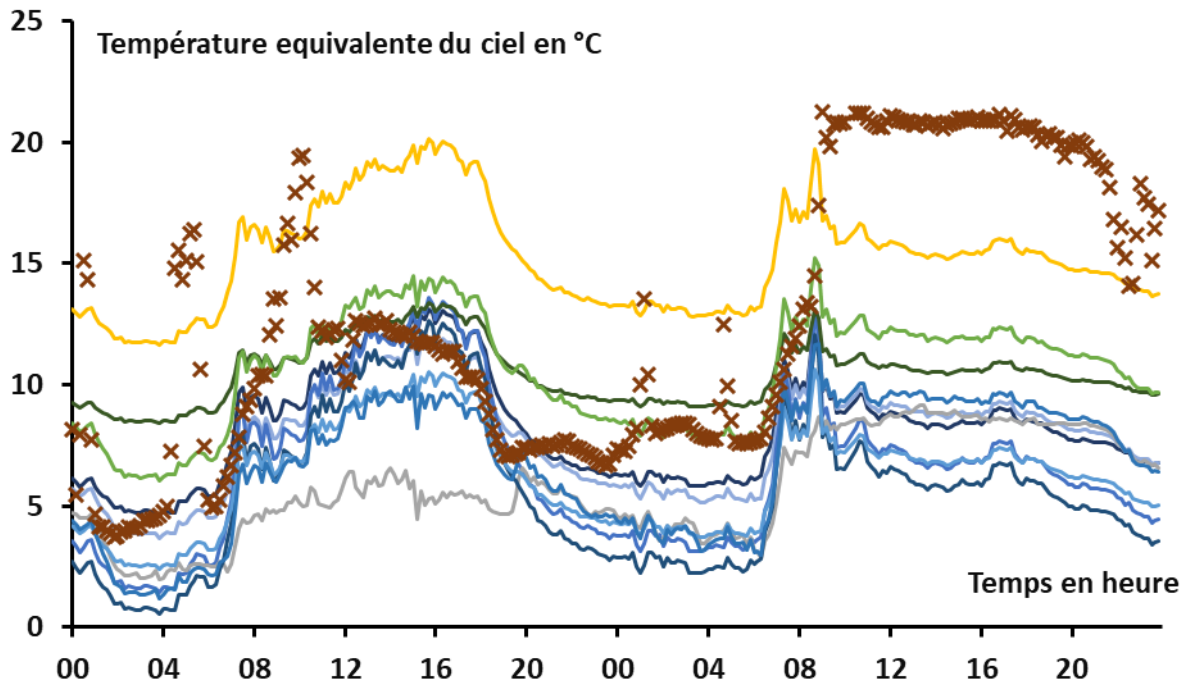
La température de ciel est impactée par le fond du ciel, mais aussi par l'atmosphère. En présence de nuages, le flux infrarouge provient principalement des nuages dont la température varie en fonction du type, de l'altitude et de la météo, mais en leur absence le flux émis par l'atmosphère est moindre et la température de ciel est plus faible [162].

La Figure 54 présente aussi la température de ciel modélisée. La majorité des modèles sont des modèles de ciel clair. Sinon l'ennuage est considéré comme constant à 0.5 comme conseillé pour le modèle d'Almanza [78]. La température de ciel clair est utile pour la comparer à la température de notre surface d'eau qui est maintenue par une pompe à chaleur autour de 28°C. Le flux infrarouge émis est supérieur à celui reçu, les échanges radiatifs à grande longueur d'onde sont donc des pertes. La valeur du flux est requise pour la simulation. Elle est représentée sur la Figure 54 pour les deux mêmes journées que précédemment. Le modèle de Whilier est celui qui prédit le mieux le flux pour les journées couvertes, mais il s'éloigne des valeurs pour les journées dégagées et les nuits. Les modèles de Sartori et de Fuentes sont les deux modèles qui, tout en étant proches des flux mesurés les nuits et durant la journée dégagée, se rapprochent le plus du flux par temps couvert. Les autres modèles suivent avec succès le comportement du flux la nuit et par ciel dégagé, mais sont plus éloignés en cas de ciel couvert. Aucun des modèles n'est capable de s'adapter aux variations de flux dues à l'ennuage, ce dernier paramètre n'étant pas disponible. Cela explique que le flux réel présente des pics de flux par exemple le 21 novembre à 10 h qui ne sont pas prédits par les modèles.

Les données de la Figure 54 présentent un petit échantillon des mesures exploitées pour la validation d'un modèle de flux radiatif infrarouge. 23 246 points entre le 9 juillet et le 23 mai sont exploitables. Le critère d'erreur relative (équation <3.2> moyenne sur tous les points) a été utilisé pour définir le modèle qui est le mieux amené à prédire le flux radiatif. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 17. Les trois modèles les plus proches des valeurs mesurées sont les modèles de Sartori, Fuentes et de Whilier. La Figure 54 montre que pour les deux premiers leur prédiction du flux radiatif par ciel clair est proche de la réalité, et qu'ils sont les plus proches du flux en cas de ciel couvert. Le modèle de Whilier quant à lui surestime le flux en cas de ciel clair, mais sous-estime moins le flux radiatif en cas de ciel couvert. Sur notre site le modèle de Sartori donne des résultats les plus proches des mesures avec 5.9% d'erreur relative moyenne contre 6.1% pour le modèle Whilier. Le modèle retenu pour remplacer les données manquantes est celui de Sartori (équation <1.20>).

Tableau 17 : 23246 points entre le 9 juillet 2020 et le 23 mai 2021

modèle	ISO	Energy+	Whilier	Almanza	Fuentes	Aubinet	Rakopoulos	Wooley	Sartori	Berdhal
Erreur relative moyenne en %	8	8.1	6.1	9.7	7.2	10.6	10.8	10.1	5.9	9.3



- | | | |
|--------------------|--------------|-----------|
| × pyrgeometre W/m2 | — ISO | — Energy+ |
| — Whilier | — Almanza | — Fuentes |
| — Aubinet | — Rakopoulos | — Wooley |
| — Sartori | — Berdhal | |

Figure 54 : Evolution de la température de ciel et du flux radiatif infrarouge descendant mesuré et modélisée au cours du temps pour une journée dégagée (21 novembre) et une couverte (22 novembre), les modèles sont présentés dans le chapitre 1.

III. Le modèle du bassin

La modélisation du bassin (cf Figure 55) suit le schéma présenté sur la Figure 56. Pour la validation du modèle du bassin, les mesures de puissance de chauffage sont utilisées en entrée du modèle. La programmation de la régulation du système de chauffage actuel sera présentée et utilisée pour la simulation, et le calcul des coûts de fonctionnement est présenté dans le chapitre 4.

La modélisation a été programmée avec le langage de programmation Pascal sous l'environnement Delphi.

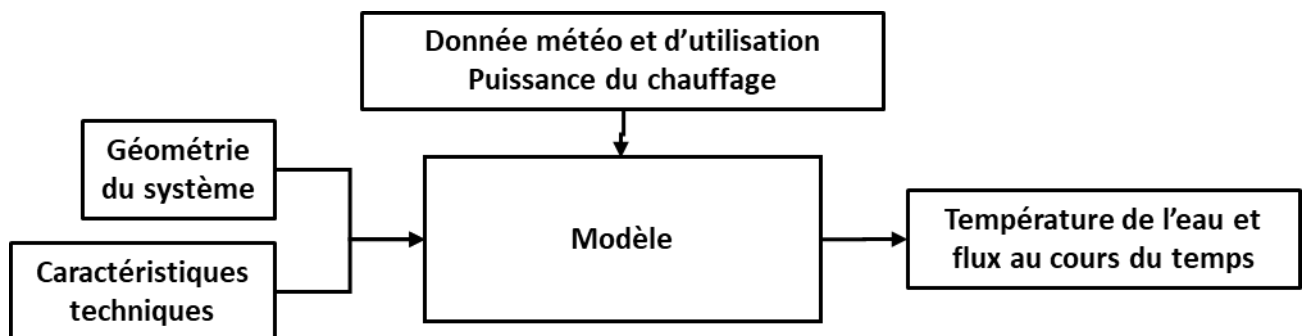


Figure 55 : Schéma de la modélisation de l'évolution du comportement du bassin au cours du temps

Bloc 1 : les données d'entrée

Les conditions météorologiques sont considérées comme constantes sur le pas de temps de mesure, dans notre cas sur 10 minutes. Les propriétés physiques et thermiques de l'eau sont considérées constantes, la température de l'eau étant maintenue à 28°C à moins d'un degré près. L'eau de pluie est à la température ambiante.

Bloc 2 : Le chauffage

La validation du modèle est réalisée en comparant la température de l'eau mesurée et modélisée en connaissance de la puissance de chauffage apportée. Cette dernière est lue dans les fichiers de données mesurées pour cette partie. La méthode de régulation du chauffage actuelle est présentée dans le chapitre précédent. Cette option sera utilisée pour les simulations du chapitre suivant.

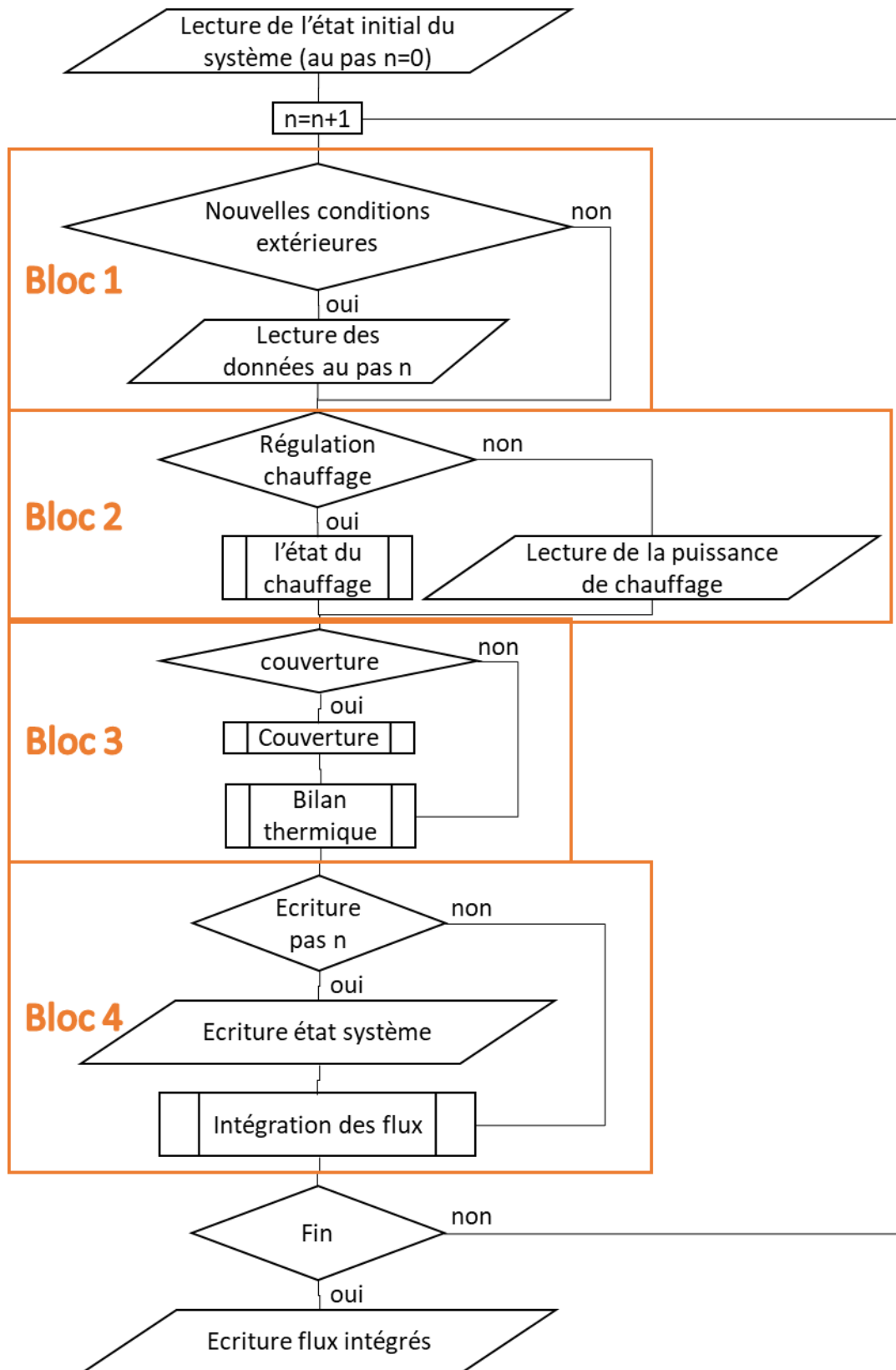


Figure 56 : Schéma de principe de la modélisation de l'évolution du comportement du bassin au cours du temps

Bloc 3 : le modèle physique du bassin

Comme présenté dans le premier chapitre, le modèle du bassin se base sur le premier principe appliqué à l'eau du bassin. On obtient une équation différentielle qui est résolue par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4 explicite avec un pas de temps de 60 s. L'eau sortant est considérée comme remplacée à tout moment par de l'eau neuve, la quantité d'eau dans le système reste constante au cours du temps. Pour la modélisation deux cas se présentent :

- Premier cas sans couverture

Bilan énergétique sur le bassin

$$m_{\text{eau}} C_p \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{nageurs}} + \dot{Q}_{\text{aux}} + \dot{m}_{\text{pluie}} H_{\text{pluie}} + \dot{m}_e H_e - \dot{m}_s H_s \quad <1.1>$$

Bilan massique sur le bassin

$$\dot{m}_{\text{pluie}} + \dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad <1.2>$$

Ce dernier est utilisé pour déterminer le flux d'eau entrant dans le système. Le Tableau 18 regroupe les modèles utilisés pour décrire les différents phénomènes physiques impactant le bilan thermique.

- Second cas avec couverture

Bilan énergétique sur le bassin

$$m_{\text{eau}} C_p \frac{dT_{\text{eau}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{cond,couv}} + \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{aux}} + \dot{m}_e H_e - \dot{m}_s H_s \quad <1.33>$$

Bilan massique sur le bassin

$$\dot{m}_{\text{pluie}} + \dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad <1.3>$$

Bilan énergétique sur la couverture

$$\dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{cond,couv}} = 0 \quad <3.4>$$

La couverture est considérée en équilibre, son inertie étant négligeable devant celle du bassin. La température de la couverture en contact avec l'air n'est pas connue. Pour résoudre l'équation, l'algorithme d'optimisation du nombre d'or a été utilisé. Pour être en cohérence avec la méthode de résolution de l'équation différentielle qui est explicite, la température de l'eau au pas précédent est utilisée pour résoudre l'équation de la couverture. Les modèles de phénomènes physiques sont les mêmes que ceux sans couverture, mais les échanges sont réalisés entre l'environnement et la couverture à l'exception de la conduction pour laquelle rien ne change. Les modèles appliqués à ce cas sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 18 : Modèle du bassin sans couverture

	Modèle	n° de l'équation	Référence
Evaporation	$\begin{cases} \dot{Q}_{evap} = h_{evap} (P_{sat}(T_{eau}) - P_v) \\ h_{evap} = a v^n + b \end{cases}$	<1.3>, <1.4>	
Rayonnement radiatif infrarouge	$\begin{cases} \dot{Q}_{rad} = \varepsilon_{eau} \sigma ((T_{ciel} + 273.15)^4 - (T_{eau} + 273.15)^4) \\ T_{ciel} = (T_a + 273.15) ((T_{rose} + 200)/250)^{1/4} - 273.15 \end{cases}$ <p>Toutes les températures sont en °C</p>	<1.20>	[102]
Convection	$\begin{cases} \dot{Q}_{conv} = A \times h_{conv} (T_a - T_{eau}) \\ h_{conv} = \frac{Nu k_{air}}{Lc} \\ Re_{Lc} = \frac{v Lc}{\nu_c} \\ Pr = \frac{\nu_c C_p}{\nu_{air} k_{air}} \\ Nu = a Re_{Lc}^b Pr^{1/3} \end{cases}$	<1.29>	[116]
Rayonnement solaire	$\dot{Q}_{sol} = \alpha_{eau} . G . A$	<1.25>	
Conduction	$\dot{Q}_{cond} = q . \frac{k_{sol} . A_{paroi}}{2 . L_c} . (T_{sol} - T_{eau})$	<1.30>	[37], [22], [121], [31]
Impact des nageurs sur l'évaporation et la convection	$\begin{cases} \frac{\dot{Q}_{occupé}}{\dot{Q}_{innoccupé}} = 3.3 U + 1 \text{ pour } U < 0.1 \\ \frac{\dot{Q}_{occupé}}{\dot{Q}_{innoccupé}} = 1.3 U + 1.2 \text{ pour } 0.1 \leq U \leq 1 \\ \frac{\dot{Q}_{occupé}}{\dot{Q}_{innoccupé}} = 2.5 \text{ pour } U > 1 \\ U = 4.5 Nbr \text{ avec } Nbr \text{ le nombre de nageur par } m^2 \end{cases}$	<1.42>	[140], [138].
Nageurs	$\dot{Q}_{nageurs} = 150 N$	<1.34>	[121]
Sorties d'eau	$\begin{cases} \dot{m}_{sortie} = \dot{m}_{évap} + \dot{m}_{fuites} \\ \dot{m}_{évap} = \dot{Q}_{évap} / L_{évap} \\ \dot{m}_{fuites} = \text{constante} \end{cases}$	<3.5>	
Entrée d'eau	$\dot{m}_e = \dot{m}_s \text{ d'après le bilan massique}$	<3.6>	

Tableau 19 : Modèle du bassin avec couverture

	Modèle	n° de l'équation	Référence
Rayonnement radiatif infrarouge	$\begin{cases} \dot{Q}_{rad} = \varepsilon_{eau} \sigma ((T_{ciel} + 273.15)^4 - (T_{couv} + 273.15)^4) \\ T_{ciel} = (T_a + 273.15) ((T_{rosé} + 200)/250)^{1/4} - 273.15 \end{cases}$ <p>Toutes les températures sont en °C</p>	<1.20>	[102]
Convection	$\begin{cases} \dot{Q}_{conv} = A \times h_{conv} (T_a - T_{couv}) \\ h_{conv} = \frac{Nu k_{air}}{Lc} \\ Re_{Lc} = \frac{v Lc}{\nu_c} \\ Pr = \frac{v_c C_p}{\nu_{air} k_{air}} \\ Nu = a Re_{Lc}^b Pr^{1/3} \end{cases}$	<1.29>	[116]
Rayonnement solaire	$\dot{Q}_{sol} = \alpha_{couv} \cdot G \cdot A$	<1.25>	
Conduction	$\dot{Q}_{cond} = q \cdot \frac{k_{sol} \cdot A_{paroi}}{2 \cdot L_c} \cdot (T_{sol} - T_{eau})$	<1.30>	[37], [22], [121], [31]
Sorties d'eau	$\dot{m}_s = \dot{m}_{fuites} = \text{constante}$	<3.7>	
Entrée d'eau	$\dot{m}_e = \dot{m}_s$ d'après le bilan massique	<3.6>	

Bloc 4 : L'écriture des résultats et l'intégration des flux sur le temps simulé

Le pas de temps utilisé est de 10 minutes, le même que pour la mesure des conditions météorologiques. Les flux sont intégrés sur l'intégralité de la période de simulation pour permettre de connaître l'impact de chaque phénomène sur le bilan du bassin.

Les valeurs numériques des constantes physiques utilisées lors des simulations sont listées dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Valeurs numériques des différents paramètres physiques des modèles

Constante	Valeur	Unité	Référence
σ	5.670400 10 ⁻⁸	W / (m ² .K ⁴)	[163]
ρ_{eau}	997	kg/m ³	[164]
$C_{v,\text{eau}}$	4186	J/(Kg.K)	[164]
L_{evap}	2436000	J/kg	[164]
T_{sol}	21	°C	Mesure
P_{atm}	101325	Pa	[164]
$C_{p,\text{air}}$	1007	J/(kg.K)	[164]
u_c	0.00001562	m ² /s	[116]
k_{air}	0.02551	W/m/K	[116]
$T_{\text{eaufroide}}$	21	°C	Mesure
k_{couv}	6	W/m/K	Fabricant
S_{bassin}	312.5	m ²	Exploitant
V_{bassin}	469	m ³	Exploitant
S_{parois}	425	m ²	Exploitant
a	0.04526		Identification
b	0.00002		Identification
n	0.78		Identification
q	0.943		[116]
k_{sol}	0.91	W/m/K	[122], [123], [124], [125]
Débit de fuite	0.377	l/h/m ²	Mesure
$\alpha_{w,\text{solaire}}$	0.9		[22], [34], [62], [109]
$\epsilon_{w,\text{infrarouge}}$	0.96		[77], [105]

IV. Convection et conduction

En l'absence de couverture sur les bassins, 5 phénomènes physiques sont responsables des pertes énergétiques la nuit : l'évaporation, les pertes radiatives dans les infrarouges, la conduction, la convection et les apports en eau neuve. Le modèle d'évaporation a été étudié en début de chapitre. Les pertes radiatives sont mesurées par un pyrgéomètre. Le bilan de masse permet de déterminer les pertes énergétiques dues à l'apport d'eau du réseau de ville dont la température a été mesurée durant plusieurs jours.

Les phénomènes précédemment étudiés sont considérés comme connus, il reste deux phénomènes à étudier : la convection et la conduction au travers des parois. La mesure de ces pertes n'est pas possible mais en réalisant le bilan énergétique global du bassin dans ces conditions précise et l'évaluation des autres pertes réalisées précédemment, les pertes par convection et conduction ont été évaluées. Les expérimentations menées ne permettent pas de différencier l'impact respectif de ces deux phénomènes, mais seulement les deux en même temps durant les nuits où ils sont les seuls phénomènes non encore déterminés. Pour cela l'évolution de la température de l'eau sur 14 nuits disponibles a été modélisée et comparée à celle mesurée. Les figures qui suivent représentent des exemples de cette évolution pour une nuit avec chauffage puis pour une nuit sans chauffage. Les puissances de chauffage sont mesurées comme décrit dans le chapitre 2.

Les évolutions des valeurs mesurées et modélisées sont similaires. Sur la Figure 57 une petite diminution brutale de la température mesurée est identifiable à 22 h. Elle est due au remplissage du bac tampon avec de l'eau de ville plus froide qui influence la mesure de la température de l'eau qui est réalisée à proximité du bac tampon.

Le détail des conditions météorologiques moyennes sur les 14 nuits modélisées ainsi que la comparaison de la somme des flux convectif et conductif mesurés et modélisés sont présentés dans le Tableau 21. Les erreurs relatives sont les plus importantes pour les nuits e, g, j et l, qui sont aussi celles où les flux mesurés étaient les plus faibles. Ceci n'est donc pas lié à des erreurs absolues plus élevées. L'erreur relative moyenne est de 45% sur les 14 nuits. La Figure 59 représente graphiquement les flux mesurés et modélisés pour les 14 nuits.

Le modèle permet de prédire l'évolution de la température de l'eau sur la nuit comme présentée sur les Figure 57 et Figure 58. L'erreur sur les flux convectif et conductif est de 45% en moyenne sur les 14 nuits, avec des erreurs relatives plus importantes sur les mesures de flux faible

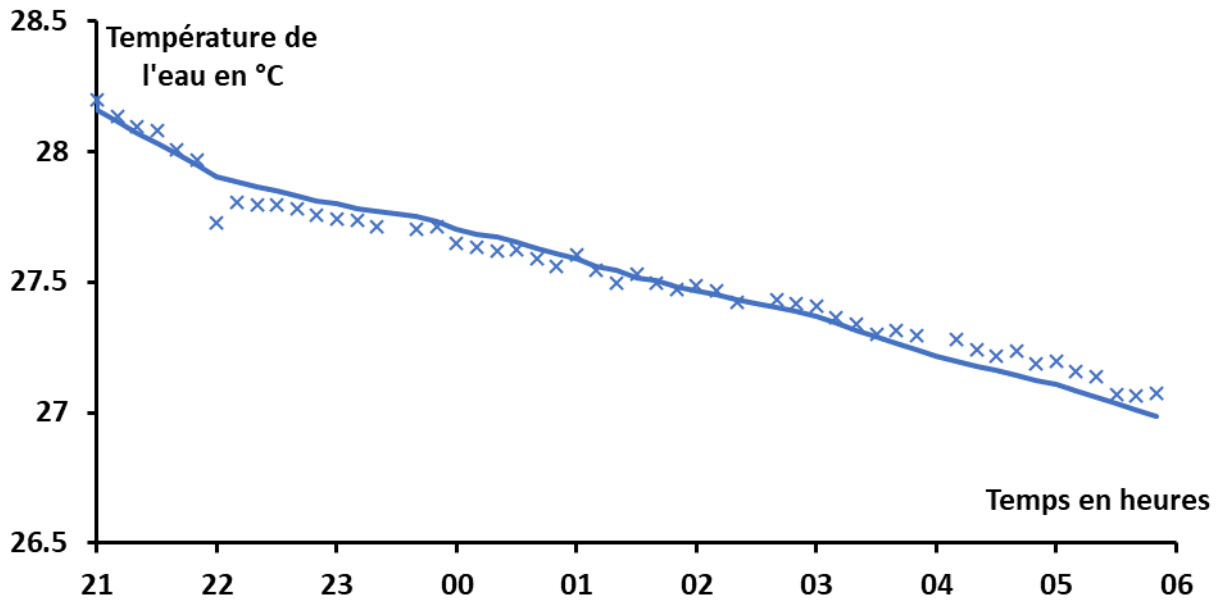


Figure 57 : Evolution de la température de l'eau mesurée (croix) et modélisée (ligne) durant la nuit c avec chauffage.

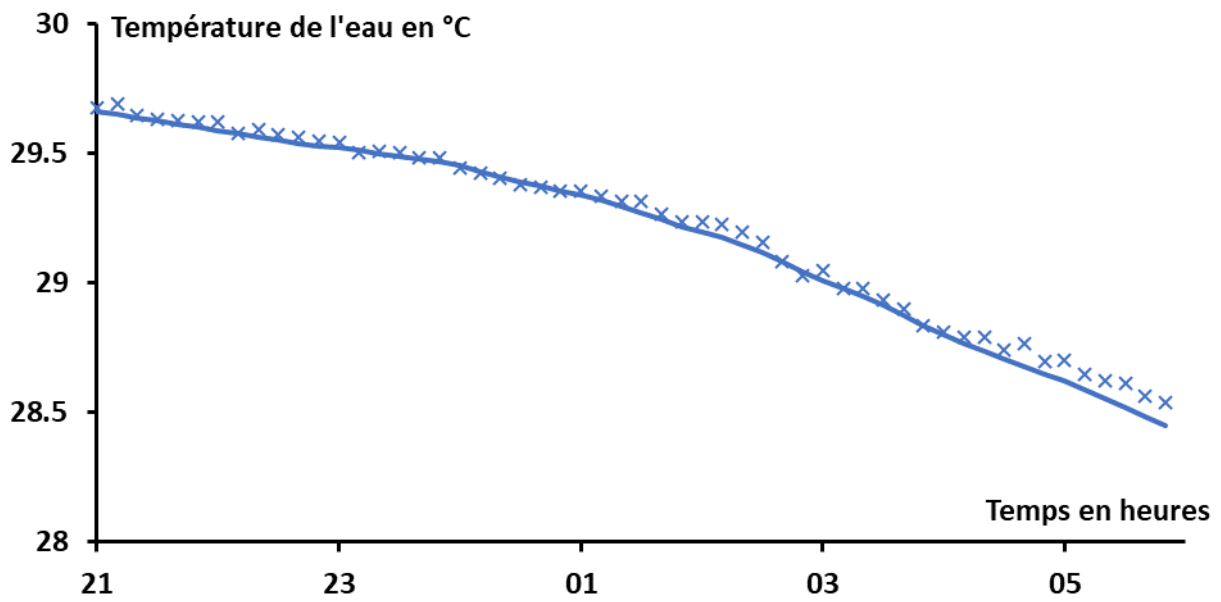


Figure 58 : Evolution de la température de l'eau mesurée (croix) et modélisée (ligne) durant la nuit j sans chauffage.

Tableau 21 : Conditions météorologiques, puissance de chauffage et flux convectif et conductif mesuré et modélisé ainsi que l'erreur relative du modèle comparé à la mesure

Nom	date	T _a	humidité	vent	Flux	Flux	Chauffage	erreur
					conv+cond mesuré	Conv+cond modélisé		
unité		°C	%	m/s	kWh	kWh	kWh	%
nuit a	09/09/2020	17.73	80.86	1.52	217.66	124.77	359.58	43
nuit b	15/09/2020	16.27	62.16	2.13	205.87	190.68	777.80	7
nuit c	22/09/2020	16.36	56.91	2.73	189.35	218.72	682.67	16
nuit d	31/10/2020	16.19	60.04	2.17	149.49	198.81	0.00	33
nuit e	03/11/2020	17.79	72.03	1.50	51.63	116.10	0.00	125
nuit f	07/11/2020	18.81	71.06	1.71	102.85	135.14	0.00	31
nuit g	12/11/2020	19.95	69.92	1.52	52.77	110.53	0.00	109
nuit h	13/11/2020	20.38	73.94	1.05	85.13	81.82	0.00	4
nuit i	01/12/2020	22.07	84.05	0.79	42.53	43.08	0.00	1
nuit j	04/12/2020	21.24	79.65	1.34	36.85	86.85	0.00	136
nuit k	18/12/2020	21.32	83.00	1.17	70.08	76.36	0.00	9
nuit l	13/01/2021	23.07	91.78	0.71	48.15	36.04	0.00	25

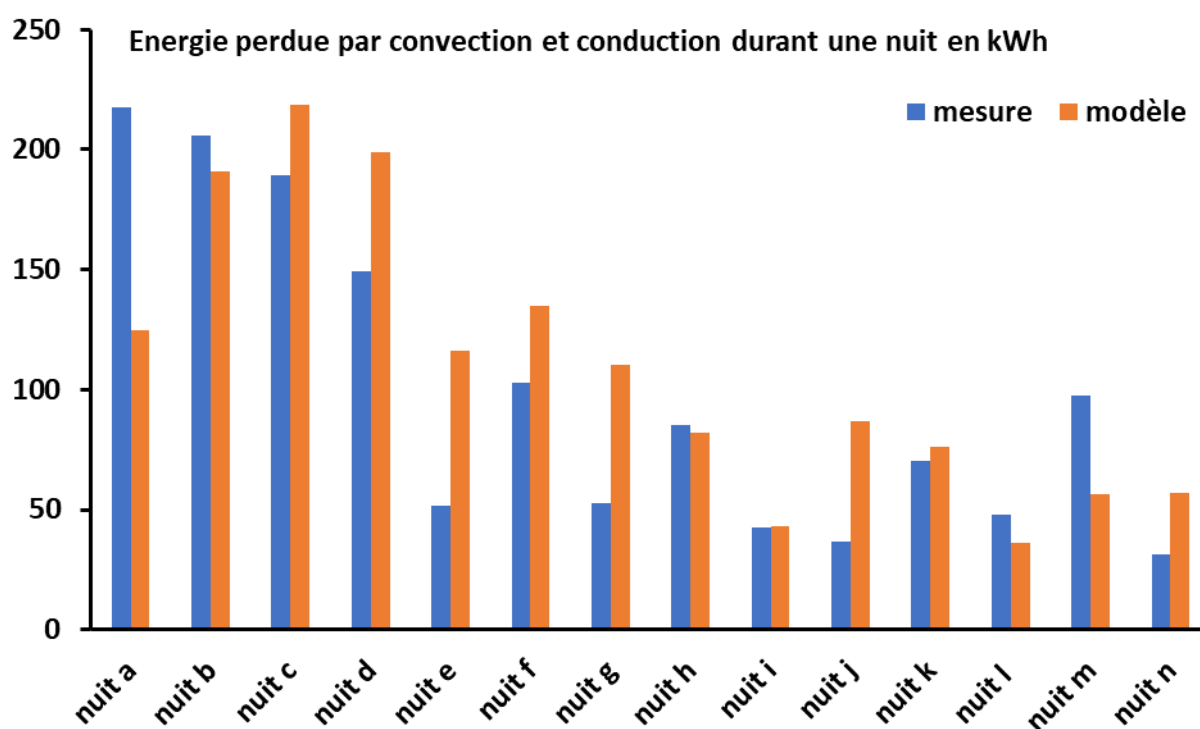


Figure 59 : Sommes des flux convectifs et conductifs mesurés en bleu et modélisés en orange pour 14 nuits.

V. Evolution de la température du bassin sans occupation

Trois jours fériés ont permis d'obtenir des données d'évolution de la température de l'eau sans occupation en journée. Les journées et leurs conditions météorologiques sont présentées dans le Tableau 22. L'évolution de la température de l'eau mesurée et modélisée sont proches pour les trois jours. L'écart est au maximum de 0.3°C pour le jour b en milieu de journée. L'écart maximum en fin de simulation est de 0.2°C. Le modèle est donc en mesure de prédire l'évolution de la température de l'eau au cours du temps.

Les gains solaires sont prédits avec une erreur relative sur une journée inférieure à 10% des gains solaires mesurés comme présentés dans le Tableau 22 et sur la Figure 60.

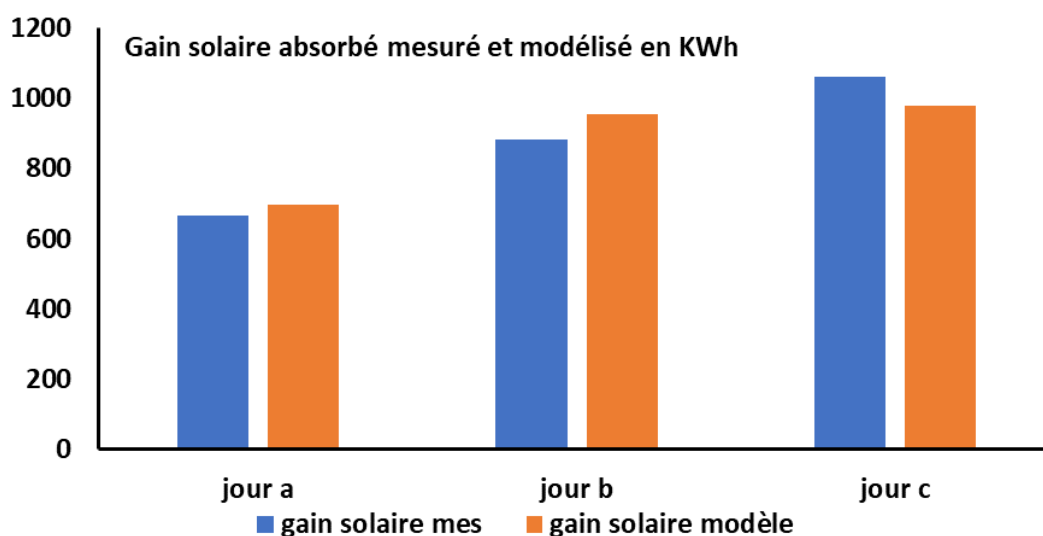


Figure 60 : Gain solaire modélisé et mesuré pour trois journées

Tableau 22 : Donnée ayant servi à la validation du modèle du bassin sans occupation et sans couverture

	Jour a	Jour b	Jour c
Date	31/10/2020	10/10/2020	19/12/2020
Température en °C	18.1	20.6	22.5
Humidité en %	64	76	80
Vent en m/s	1.5	1.3	1.2
Flux radiatif infrarouge en W/m²	354	377	398
Energie de chauffage en kWh	1278	1478	0
Gain solaire en kWh	666	881	1062
Gain solaire modèle en kWh	698	953	980
Erreur relative moyenne	5%	8%	8%

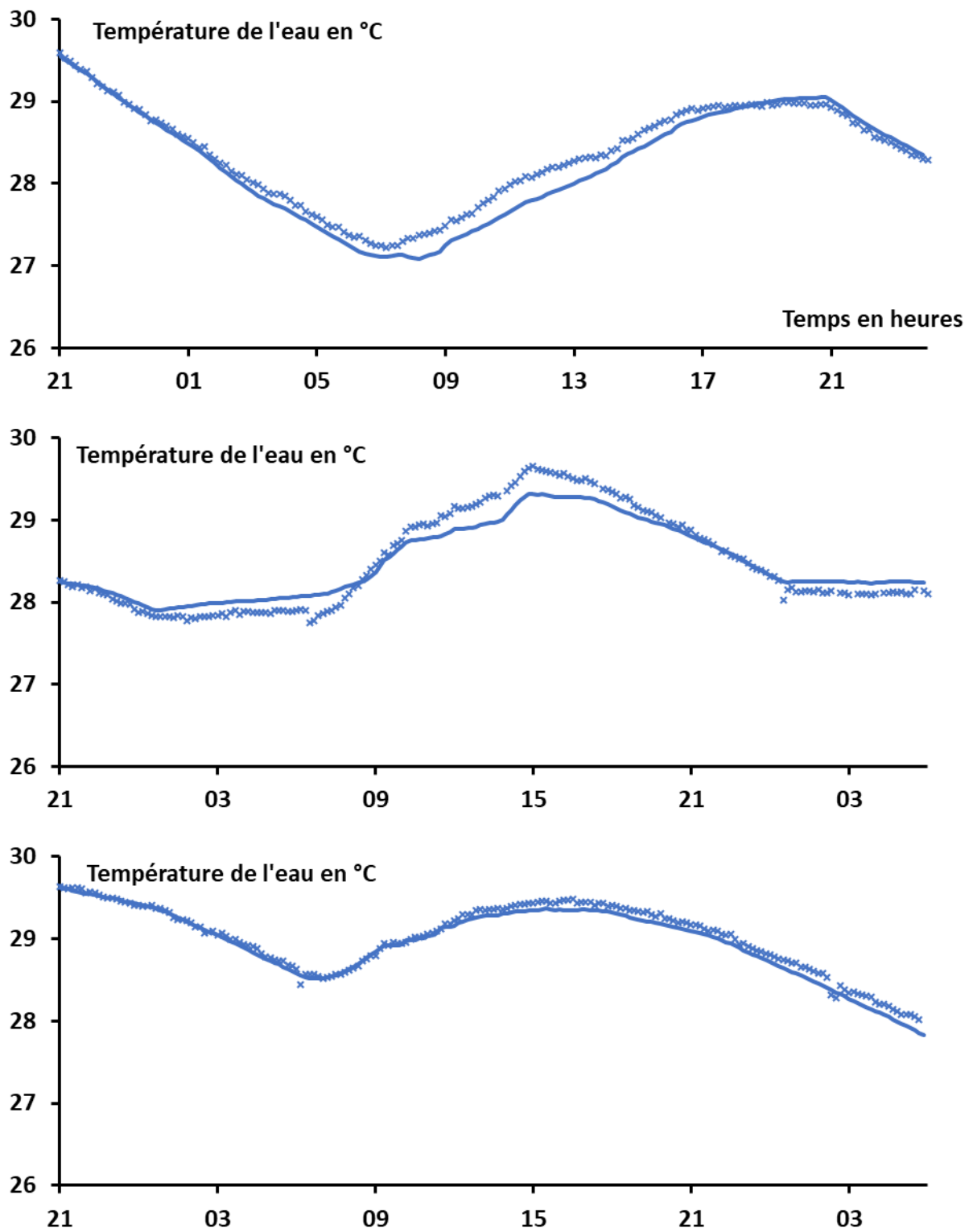


Figure 61 : Evolution de la température de l'eau mesurée et modélisée pour les jours a, b et c dont les conditions météorologiques sont décrites dans le Tableau 22

VI. La couverture

La conductivité et l'épaisseur de la couverture sont connues (fournies par le constructeur), cependant l'émissivité de la couverture n'est pas connue. L'évolution de la température la nuit est disponible pour les nuits du 10 et du 11 novembre. La Figure 62 donne les résultats obtenues pour ces deux nuits avec une émissivité de 0.9 [135], [165].

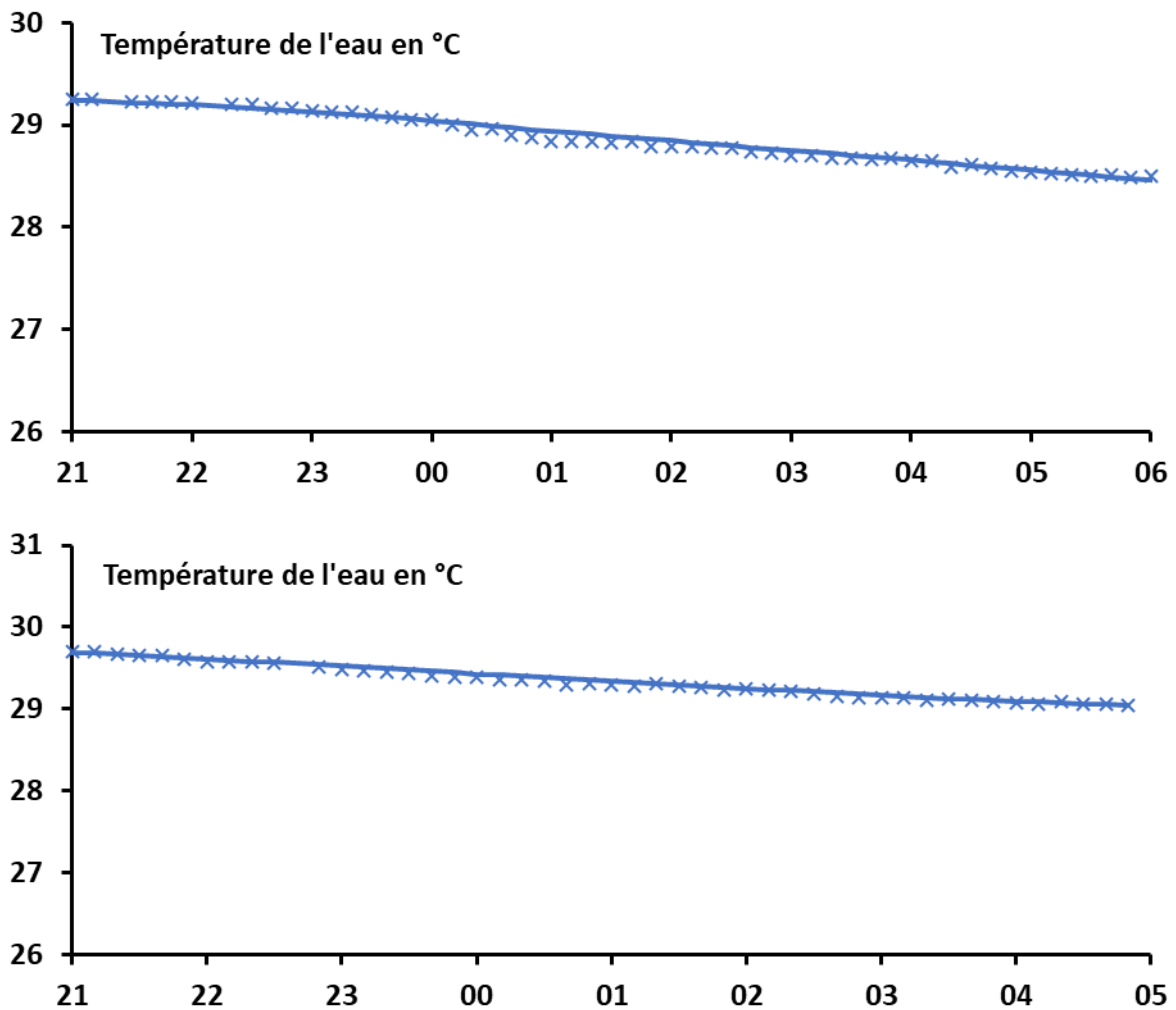


Figure 62 : Nuit du 19 décembre et nuit du 20 décembre avec couverture.

VII. L'occupation

Les modélisations présentées dans le premier chapitre permettent de simuler un bassin sur une journée avec et sans occupation. L'occupation utilisée pour la simulation présentée sur la Figure 63 est celle mesurée la journée sur le bassin de bois de nêfles. L'occupation est au maximum de 25 personnes sur une période d'une heure. En milieu d'après-midi le bassin était inoccupé pendant 2 h. L'occupation est faible comparée à la superficie du bassin. En raison de la pandémie de COVID-19, le nombre de nageurs était limité à 62 nageurs dans le bassin, cependant la fréquentation est significativement inférieure, étant comprise entre 0% durant 2 h à 40% durant une heure. L'occupation est représentative d'une journée durant la période d'expérimentation.

La seule donnée expérimentale à notre disposition pour valider un modèle d'occupation est la température de l'eau, or l'impact sur cette dernière est significativement inférieur à 0.1°C d'après la comparaison du modèle avec et sans occupation (cf Figure 65). La précision de mesure ne permet donc pas de valider le modèle d'occupation du bassin.

Le bilan des pertes simulées est de 949 kWh sur les 24 h et celui des gains est de 1003 kWh en l'absence de nageurs. L'augmentation des pertes si on prend en compte l'occupation est de 21 kWh et celle des gains de 18 kWh soit respectivement 2.2% et 1.8%. De plus, les pertes engendrées par les nageurs sont compensées à 83% par les gains, ce qui représente une perte nette de 3 kWh.

Le modèle d'utilisation ne peut pas être validé sur le site expérimental en raison de la faible occupation de la piscine et des données mesurées. D'un autre côté, l'impact sur les pertes et les gains est de l'ordre de 2% et se compensent à 83%. Ces éléments ont amené à prendre la décision de simuler les bassins sans modèles d'occupation par la suite.

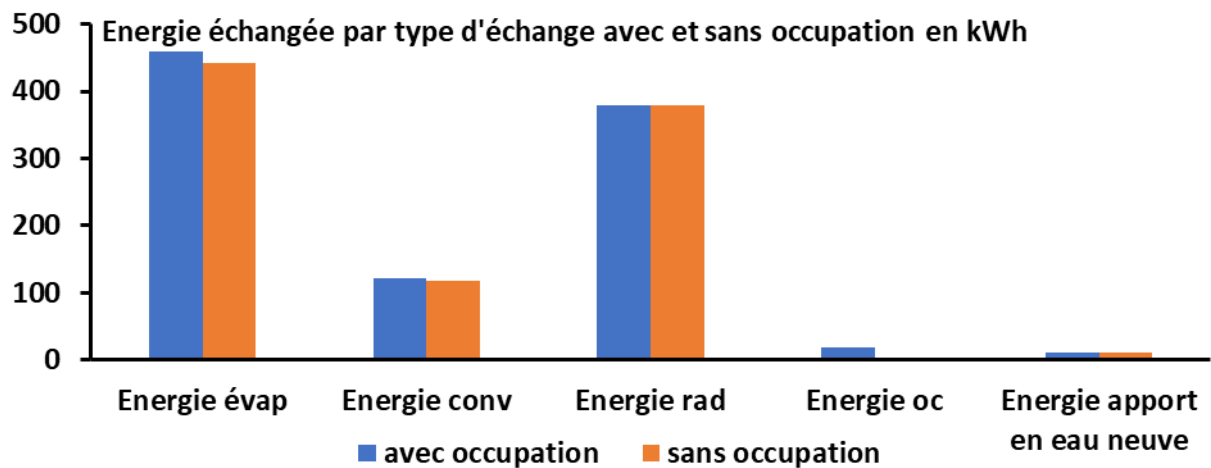
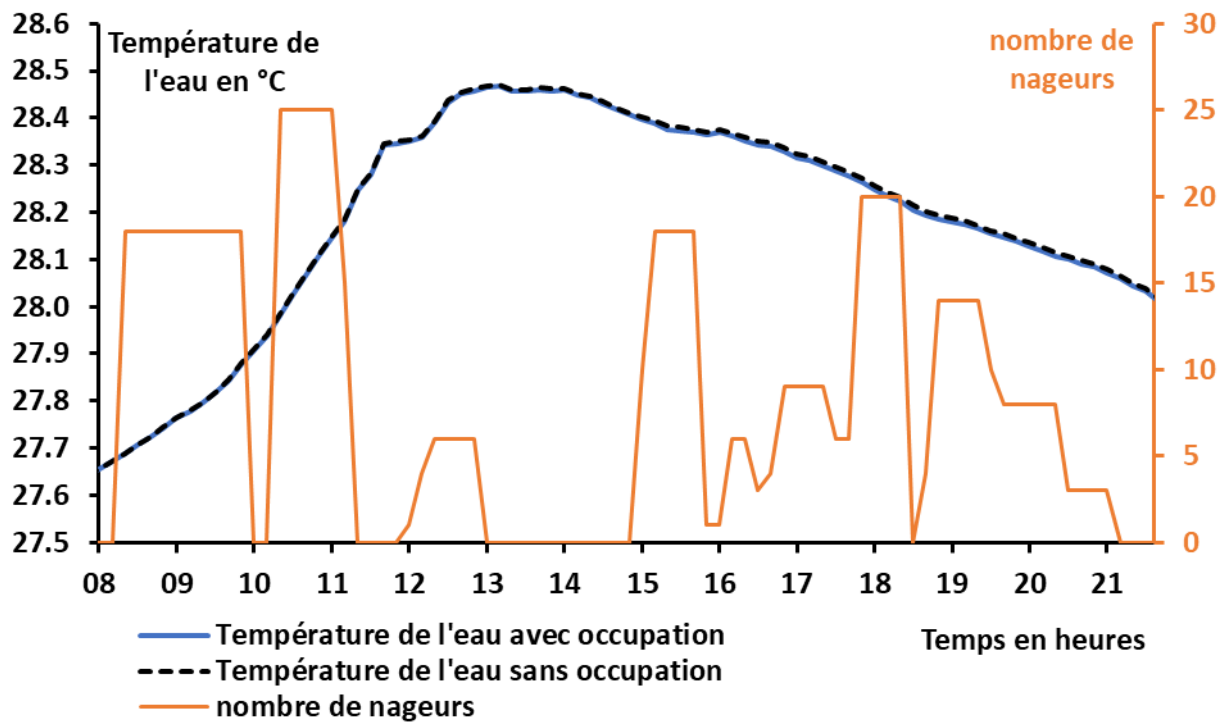


Figure 63 : Impact simulé de l'occupation de la piscine sur la température de l'eau et sur les flux échangés sur 24h.

VIII. Prédiction de l'énergie nécessaire au chauffage

L'objectif du travail est d'étudier la consommation en énergie du chauffage et les pistes pour faire des économies en énergies et/ou financières. La dernière étape de validation consiste à comparer le flux de chauffage mesuré à celui simulé avec la régulation du chauffage actuellement utilisée comme présenté dans le chapitre 2. La puissance de chauffage n'est plus une entrée du modèle mais une sortie comme présenté sur la Figure 64.

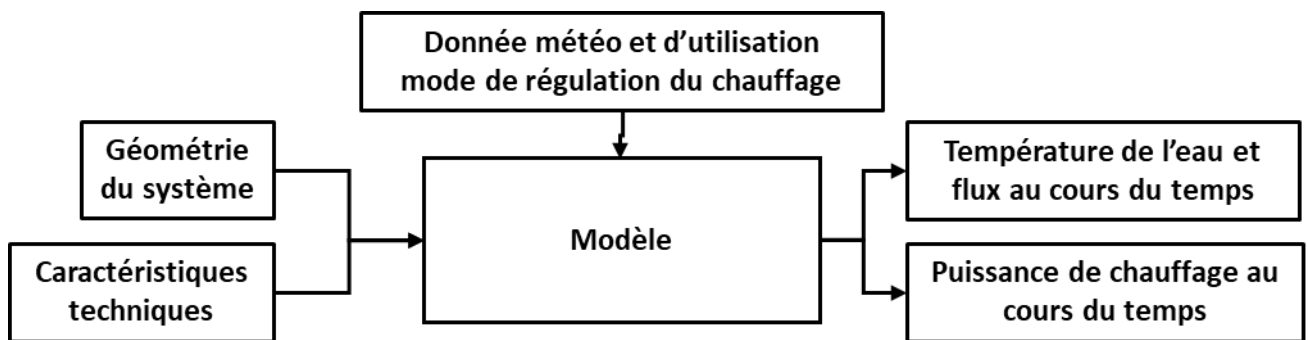


Figure 64 : Schéma de la modélisation de la consommation de chauffage entre le 8 et le 18 septembre 2020

Sur la période du 8 septembre au 18 septembre le flux de chauffage mesuré a été de 12932 kWh et celui simulé de 13759 kWh soit une erreur relative de 6%. La Figure 65 présente l'évolution de la température de l'eau du bassin en fonction du temps, comparée à la température simulée.

Le comportement de la température de l'eau mesurée et simulée est similaire. En particulier, le phénomène de surchauffe peut être constaté autant dans les données mesurées que dans celles simulées. En effet, si la température de consigne est atteinte en journée, l'ensoleillement va engendrer une augmentation supplémentaire de la température de l'eau. Elle dépasse alors les 29°C, ce qui n'est pas souhaité par l'exploitant. Ce phénomène est visible sur la seconde journée présentée sur la Figure 63.

Le modèle permet de prédire la consommation de chauffage mais aussi l'évolution de la température de l'eau. La première est nécessaire pour atteindre l'objectif de diminuer le coût et/ou la consommation électrique et la seconde pour assurer le confort des usagers.

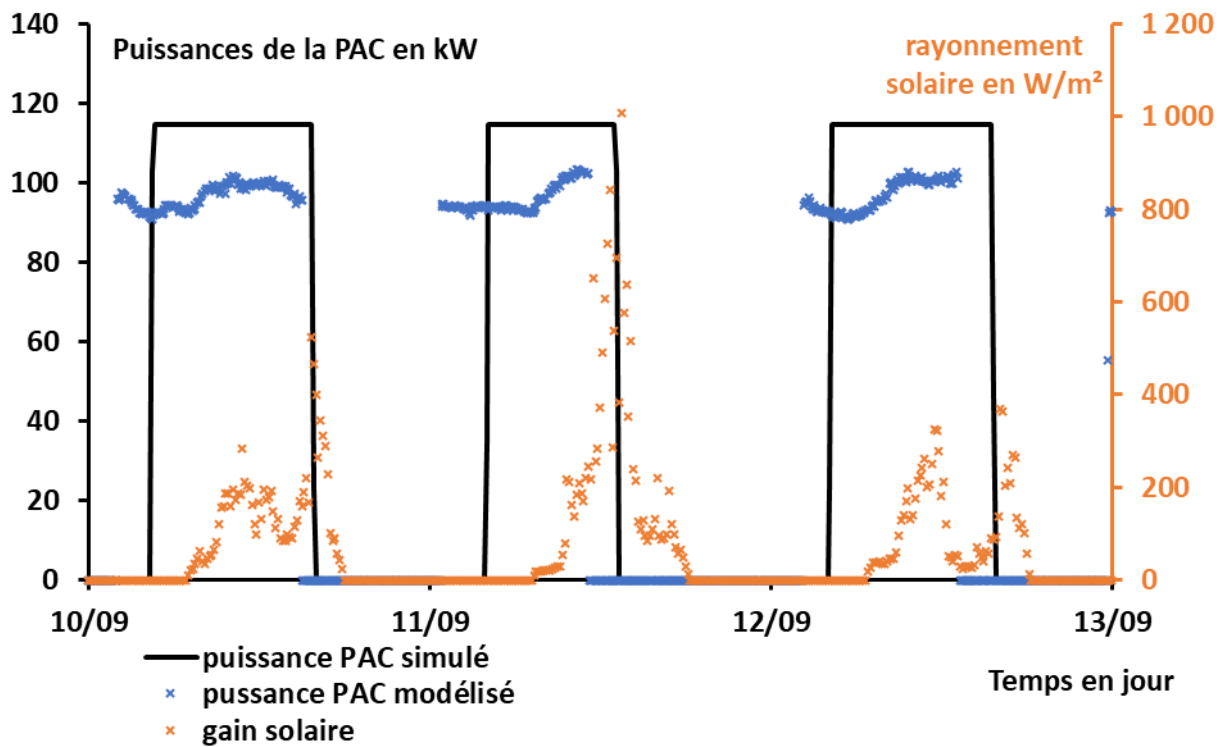
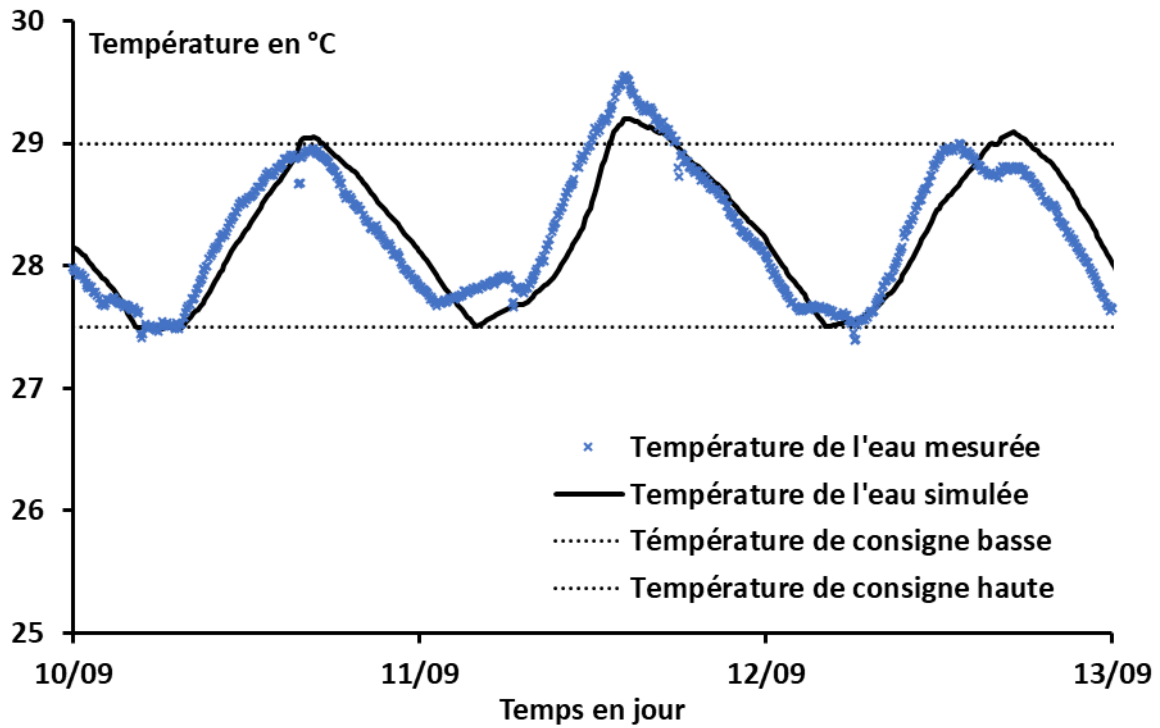


Figure 65 : Evolution de la température de l'eau mesurée (en croix) et simulé (en trait plein) entre le 10 septembre et le 12 septembre et des périodes de chauffages simulées (trait noir) et mesuré (croix bleues) sur la même période.

IX. Conclusion

La validation du modèle de bassin, autant sur sa capacité à prédire la température de l'eau du bassin que la consommation énergétique en chauffage (6% près), a été montrée dans ce chapitre. De plus, la validation expérimentale des principaux flux (évaporatif, radiatif à grandes longueurs d'onde et le rayonnement solaire) permet de s'assurer de la capacité de ce dernier à modéliser le comportement du bassin. De plus, le modèle permet également de prédire l'évolution de la température de l'eau avec une couverture.

Les étapes préliminaires sont remplies, il est maintenant possible de simuler le comportement du bassin sur une année et d'étudier les économies réalisables entre autres par la mise en place d'un contrôle commande prédictif qui est présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : Evaluation des économies financières et énergétiques réalisables tout en assurant le confort des usagers

L'objectif du travail est de développer un contrôle commande prédictif diminuant le coût de fonctionnement et si possible la consommation d'électricité tout en respectant le confort des usagers. Pour cela, la première étape a été de développer et valider un modèle phénoménologique de bassin et de le confronter aux mesures réalisées sur le site de bois de nêfles (Saint Paul). Le modèle est capable de prédire avec une précision de 6% la consommation de chauffage et peut être associé au modèle de COP de la pompe à chaleur présenté au chapitre 2 comme présenté sur la Figure 66.

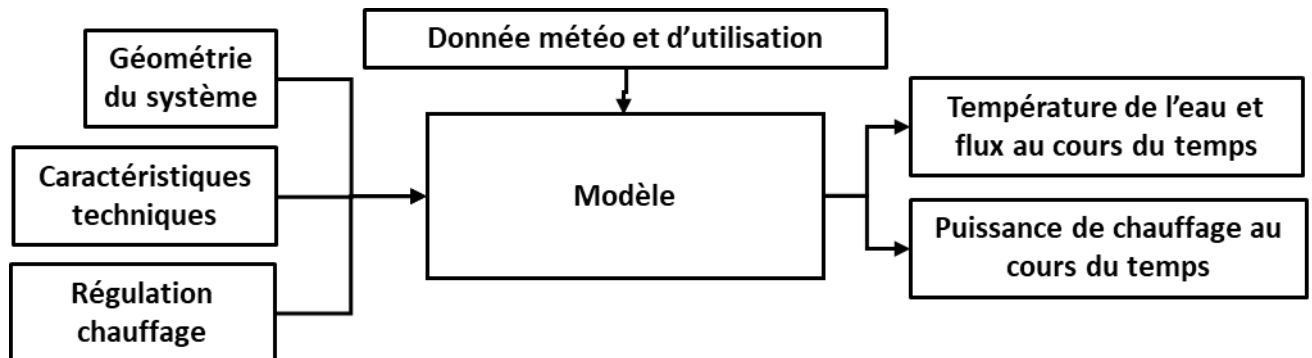


Figure 66 : Schéma de principe de la simulation d'une année

Ce modèle servira dans la suite pour simuler le comportement du bassin et de son chauffage durant une année (du 11 juin 2020 12h30 au 11 juin 2021). Cependant au préalable il est nécessaire d'explicitier les conditions prises en comptes pour la simulation qui servent d'entrée au modèle, ainsi d'un autre côté, les indicateurs permettant d'analyser et de comparer les résultats des différentes simulations. Ces derniers ont pour objectif d'évaluer trois axes : l'énergie consommée, le coût financier d'exploitation ainsi que le confort.

I. Les conditions de simulation

Les conditions météorologiques utilisées pour la simulation sont les données mesurées sur site et présentées précédemment. Pour remplacer les données manquantes dans les données de radiations à grande longueur d'onde, le modèle utilisé est celui de Sartori pour les raisons présentées dans le chapitre précédent. Pour les rares données manquantes dans les autres données, une approximation linéaire entre la donnée précédente et la suivante a été utilisée.

Les données de prévision météorologique utilisées dans la dernière simulation sont la condition mesurée, ce qui revient à considérer des prévisions parfaites. L'incertitude des prévisions n'est pas discutée dans cette thèse.

Il est important de noter que l'île de la Réunion est située dans l'hémisphère sud et que les saisons sont inversées comparées à la métropole. Les mois les plus chauds sont de décembre à février et les plus froids sont ceux de juillet et d'août.

Les conditions d'utilisation : les horaires d'ouverture et planning de mise en place de la couverture sont présentés sur la Figure 67 et sont basées sur le planning de la piscine du Bois de nèfles (Saint Paul).

Pour évaluer le coût de fonctionnement de l'installation, le prix de l'électricité doit être connu et sert d'entrée au modèle. Le site du bois de nèfles (Saint Paul) a un abonnement électrique avec un prix invariant sur la journée et l'année. Pour pouvoir développer le contrôle commande prédictif qui diminue le coût de fonctionnement lié au chauffage PAC, un site avec des tarifs variant sur la journée est souhaitable. Un bassin qui correspond à celui du grand bain de Vue Belle (Saint Paul) a été utilisé avec la PAC présente sur le site. Le prix des plages horaires tarifaires est présenté sur la Figure 67 et les tarifs dans le Tableau 24.

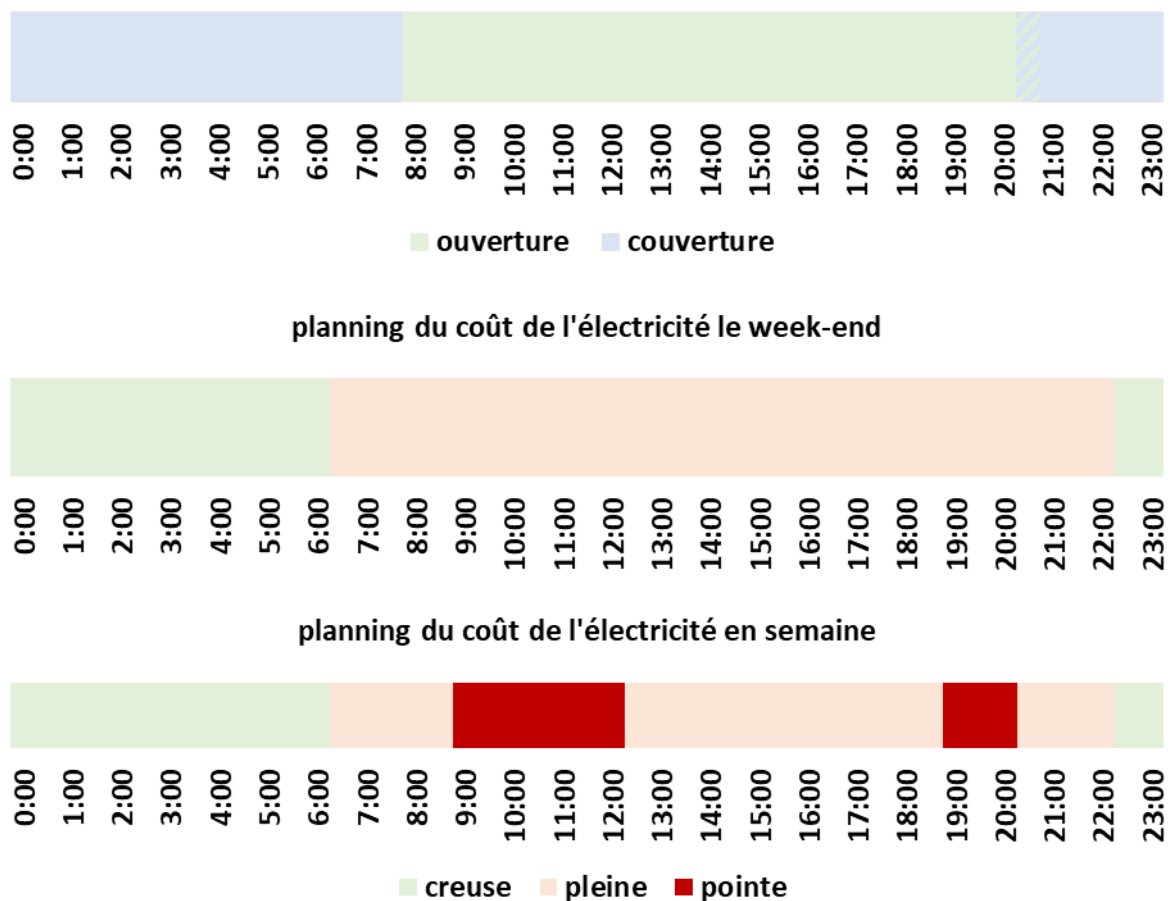


Figure 67 : Horaires d'utilisation de la piscine et de mise en place de la couverture et zone tarifaire pour une journée de semaine et le week-end.

II. Les indicateurs de confort et d'économies

Trois axes vont être évalués pour comparer les scénarii :

- Le confort des usagers en particulier des nageurs qui permettra de déterminer l'acceptabilité du scénario par les usagers
- L'énergie électrique consommée par la pompe à chaleur
- Le coût financier engendré par le chauffage de la piscine

D'autres indicateurs pourraient être utilisés comme la production de tonne équivalente de CO₂, cependant l'énergie et le coût d'exploitation sont les principaux indicateurs utilisés par les exploitants, ils ont donc été utilisés pour s'assurer d'atteindre les objectifs souhaités par les exploitants de piscines. Le confort est une contrainte forte qui doit être respectée en priorité pour le bon fonctionnement des installations.

Pour évaluer les économies réalisables la comparaison avec la consommation de référence, la situation avec la régulation actuelle et sans couverture, sera utilisée. Si une autre référence est utilisée, elle sera systématiquement explicitée.

1. Confort

Le respect du confort est indispensable. En effet, les exploitants qui ont diminué la température de l'eau en hiver 2022/2023 en métropole ont constaté une diminution de la fréquentation de leurs établissements [69]–[72]. Aucune norme précise n'existe pour déterminer la température de l'eau des piscines. D'après ASHRAE, pour les piscines récréatives, la température de l'eau et de l'air doit être comprise entre 24°C et 29°C. Dans notre cas, l'exploitant maintient la température autour de 28°C pour assurer le confort des usagers. Il considère que le confort est acceptable entre 27°C et 29°C mais que l'intervalle idéal est entre 27.5°C et 28.5°C.

En se référant aux échelles de confort dans l'habitat et aux échanges avec l'exploitant, nous avons déterminé l'échelle de sensation thermique présentée dans le Tableau 23. Cette échelle servira dans la suite à comparer le confort en fonction des différents scénarii et de déterminer leur acceptabilité ou non par l'exploitant et les usagers. Les catégories légèrement froid, neutre et légèrement chaud sont les catégories acceptables ou le confort est assué mais la catégorie neutre doit être atteinte aussi souvent que possible. Pour les autres catégories, elles doivent être évitées car elles sont considérées comme inconfortables par les usagers.

Tableau 23 : Echelle de sensibilité des usagers servant pour évaluer le confort des usagers.

Température	<26	26	27	27.5	28.5	29	30	>30
Sensation thermique	Très froid	Froid	Légèrement froid	Neutre		Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
	---	--	-	=		+	++	+++

2. Les indicateurs de la consommation d'énergie et du coût de fonctionnement

L'indicateur de consommation énergétique est la consommation électrique de la pompe à chaleur en kWh.

L'indicateur de coût de fonctionnement est composé de deux parties :

- La partie fixe qui dépend de la puissance souscrite, dans notre cas la puissance électrique consommée par la PAC
- La partie variable qui dépend de la consommation électrique instantanée et prend en compte les variations tarifaires sur la journée et l'année.

Le coût total est la somme des deux coûts pour une année.

Le coût de l'abonnement pour le chauffage est de 5314 €/an dans notre cas. Cette valeur sera utilisée dans la suite pour le coût fixe. Le coût variable est calculé avec les données du Tableau 24.

Tableau 24 : Prix de l'énergie en c€/kWh

	Heures creuses	Heures pleines	Heures de pointe
Été	6.047	8.908	13.027
Hiver	4.210	4.835	

III. Simulation du fonctionnement actuel

1. Présentation de la régulation du chauffage

La régulation du chauffage actuellement en fonctionnement est celui visible sur la Figure 49 présentée dans le chapitre 2. La pompe à chaleur s'allume quand une consigne de température basse de 27.5°C est atteinte et chauffe jusqu'à ce que la température de consigne haute de 29°C soit mesurée. La pompe à chaleur a un variateur, mais elle fonctionne toujours à pleine puissance. Ce scénario sera nommé TOR_29 dans la suite.

2. Présentation du comportement du chauffage et de la température du bassin

Le comportement du bassin a été simulé sur une année complète avec la régulation précédemment décrite qui est celle en fonctionnement actuellement sur le site. On peut en voir le fonctionnement sur 4 jours sur la Figure 68. On retrouve bien la température de consigne basse de 27.5°C pour laquelle le chauffage s'allume et son arrêt quand la température de 29°C est atteinte, puis la redescente naturelle de la température.

Du fait du choix de la température de consigne haute, pendant une proportion importante du temps la température est légèrement plus chaude que souhaitée par l'exploitant. De plus, si le chauffage amène la température de l'eau à 29°C au courant de la journée, le soleil continue à chauffer cette dernière et elle passe au-dessus de 29°C où le confort n'est plus assuré. Cette augmentation de la température de l'eau augmente les pertes d'énergie entre le bassin et l'environnement. La diminution de la température haute de consigne de 29°C à 28.5°C peut permettre de diminuer légèrement l'énergie consommée tout en améliorant le confort des usagers. Ce scénario sera nommé TOR_28.5 par la suite. Cette option est simulée et le comportement du bassin sur les mêmes jours que le scénario précédent est présenté sur la Figure 69. Dans ce cas la température ne dépasse plus significativement la température de 28.5°C et jamais celle de 29°C sur les 4 jours.

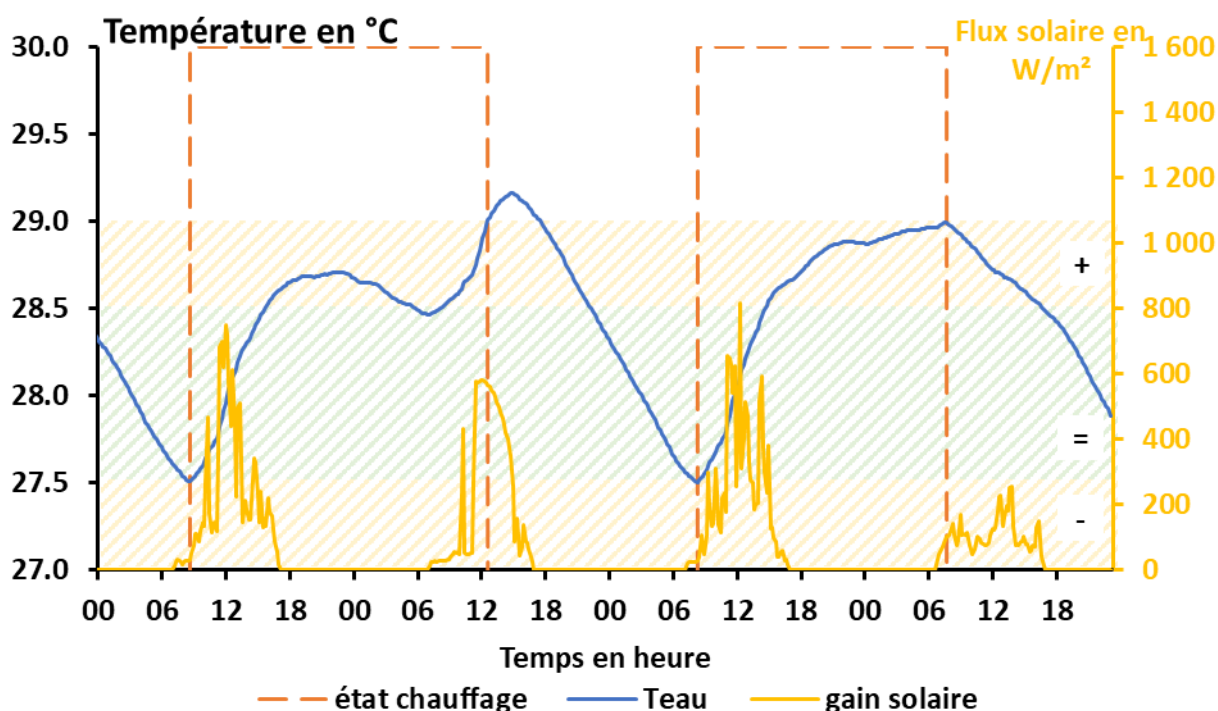


Figure 68 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec la régulation actuelle (Température de consigne basse 27.5°C et température de consigne haute 29°C) scénario TOR_29 entre le 16 et 19 juin inclus.

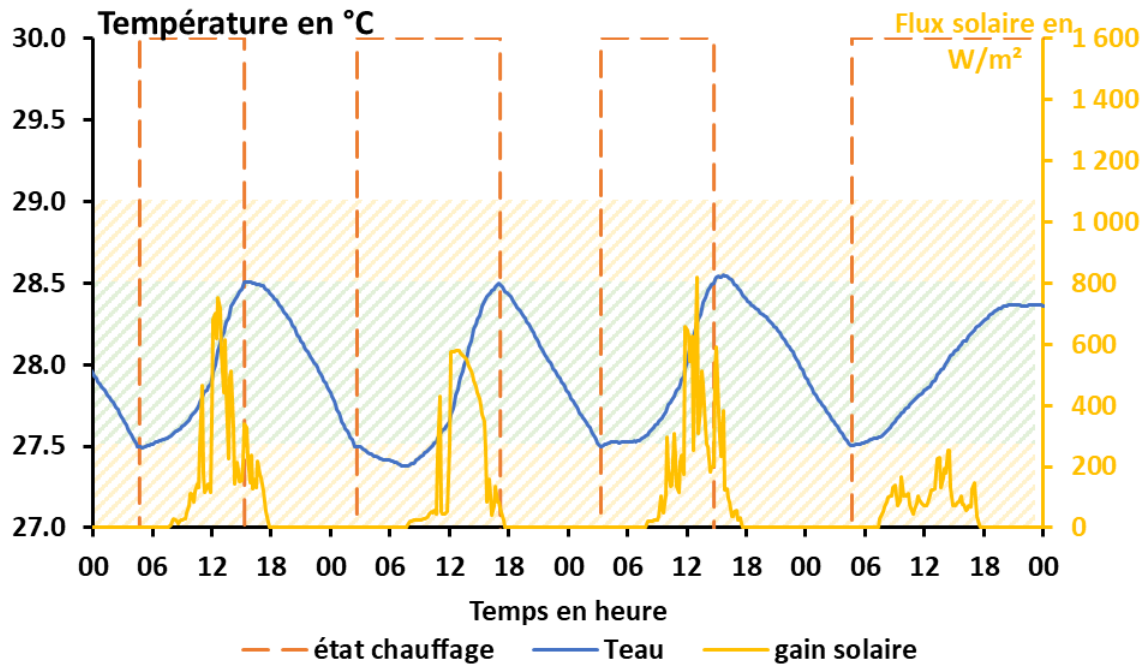


Figure 69 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec la régulation actuelle (Température de consigne basse 27.5°C et température de consigne haute 28.5°C) scénario TOR_28.5 entre le 16 et le 19 juin

3. Performance et confort

On étudie le comportement du système dans sa globalité sur l'année. Le premier cas simulé (scénario TOR_29) correspond au comportement actuel. Les surchauffes de l'eau au-dessus de 29°C représentent 11% du temps d'utilisation. La modification de la température de consigne haute par 28.5°C (contre 29°C initialement) permet de diminuer ces dernières qui ne représentent plus que 3% du temps d'utilisation (scénario TOR_28.5). Les périodes où la température est optimale entre 27.5 °C et 28.5 °C augmentent significativement, passant de 54% à 75% du temps d'utilisation. Ceci permet une amélioration significative du confort des usagers (Tableau 25). En effet le cumul du chauffage et du soleil engendre toujours des dépassements de la température de consigne haute mais dans le deuxième cas, la température reste toujours dans la zone de confort quand elle atteignait la zone d'inconfort dans le premier cas.

Tableau 25 : Confort des usagers dans la situation actuelle et en passant la température de consigne haute à 28.5 °C (contre 29 °C initialement).

Sensation thermique	Très froid	Froid	Légèrement froid	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
	---	--	-	=	+	++	+++
TOR_29	0 %	0 %	1 %	54 %	34 %	11 %	0 %
TOR_28.5	0 %	0.03 %	3 %	75 %	19 %	3 %	0.1 %

La diminution des périodes de surchauffe de l'eau n'impacte que faiblement la consommation énergétique qui diminue de 4%, et abaisse uniquement de 1% le coût de fonctionnement de l'installation.

Tableau 26 : Consommation énergétique et financière du chauffage d'un tel bassin avec la régulation actuelle et en passant la température de consigne haute de la température à 28.5°C (contre 29°C initialement).

	Énergie de chauffage	Énergie économisée	Coût variable	Coût total	Économie financière absolue	Économie financière relative sur la part variable	Économie financière relative sur le coût total
	MWh	%	€	€	€	%	%
TOR_29	747 232	0	10 752	16 066	0	0	0
TOR_28.5	715 662	4	10 602	15 916	-150	1	1

La température de consigne haute à 28.5°C est conseillée, en effet bien que les économies d'énergies et financières soient faibles, elle améliore significativement le confort des usagers. De plus, sa mise en œuvre est facile et rapide car elle ne demande que de modifier un réglage.

4. Bilan des flux

L'étude des flux intégrés sur l'année (Tableau 27) et plus particulièrement des pertes (Figure 70) met en évidence :

- Que l'énergie apportée par le chauffage est supérieure à celle apportée par le soleil sur l'année. Le chauffage est indispensable pour assurer le confort des usagers.
- La première source de pertes est celle par évaporation.
- La seconde celle par pertes radiatives.

Les couvertures permettent de diminuer les pertes par évaporation. C'est la première solution étudiée dans la suite.

Tableau 27 : Flux par phénomène physique intégré sur l'année simulée.

	E sol	E chauf	E evap	E rad	E conv	E ap	E cond
TOR_29	550	747	643	482	160	10	1
TOR_28.5	550	716	626	475	155	9	1

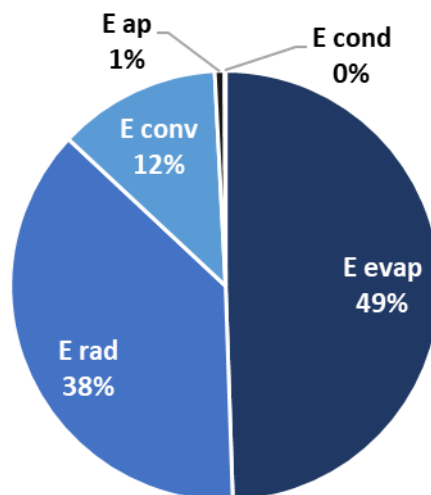


Figure 70 : Part des différents phénomènes physiques (ensolleillement, convection, évaporation, conduction et les apports en eau neuve) dans les pertes globales sur l'année.

IV. Simulation du fonctionnement avec une couverture

1. Comparaison avec et sans couverture sur une nuit

La Figure 71 représente l'évolution de la température de l'eau pour une même journée sans chauffage, dans un cas sans couverture et dans l'autre avec une couverture durant la nuit. On peut remarquer que le refroidissement de la température de l'eau du bassin est nettement freiné par la couverture. L'écart est d'environ 1 degré à la fin de la nuit. Cette différence est due à une diminution de l'évaporation visible sur la Figure 72 d'environ 2/3. Les pertes, dues à l'apport d'eau neuve plus froide que la piscine, diminuent aussi significativement, l'eau neuve compensant entre autres les pertes d'eau par évaporation. Cependant elles impactent beaucoup moins le bilan global du bassin. Les pertes par convection et conduction augmentent d'environ 10% en raison de la différence de température engendrée par la présence de couverture. La couverture diminue significativement le besoin de chauffage du bassin, mais aussi la consommation d'eau. La régulation du chauffage est toujours celle présentée précédemment avec une température de consigne basse de 27.5°C et une température haute de 28.5°C.

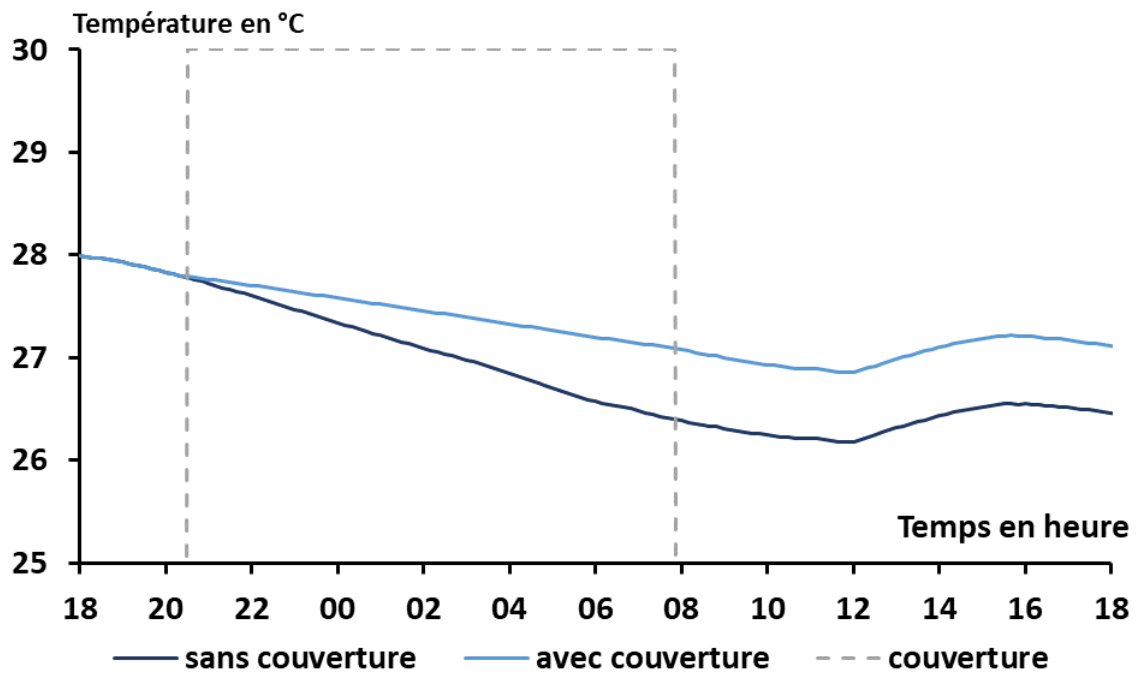


Figure 71 : Evolution de la température de l'eau sur 24h avec et sans couverture.

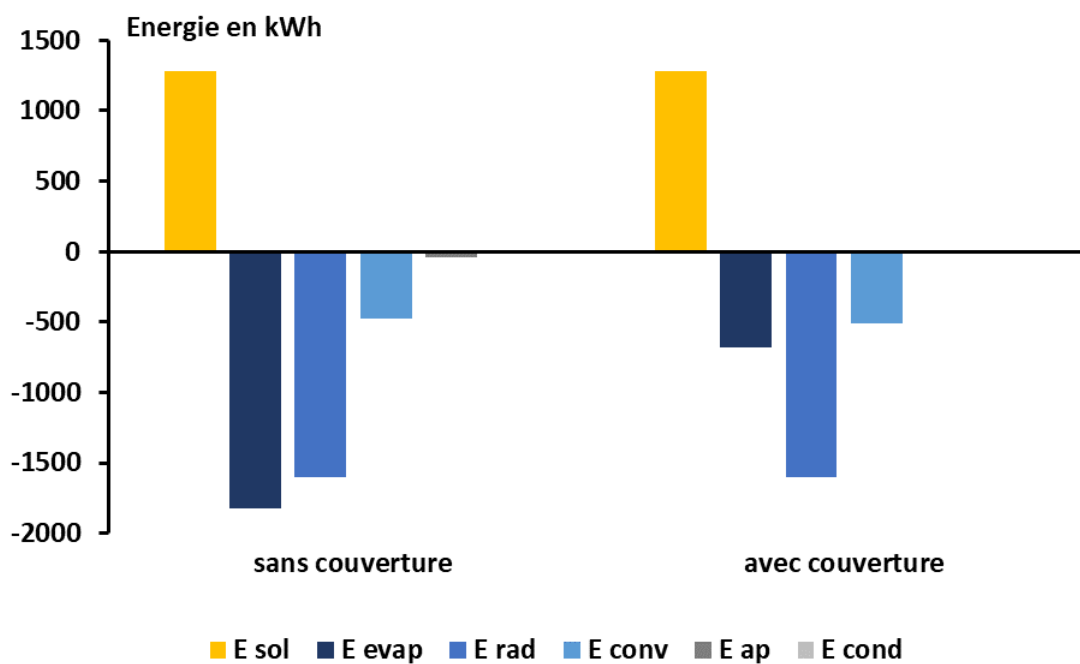


Figure 72 : Impact de la couverture sur les différents flux, bilan sur 24h

2. Choix de la période de mise en place de la couverture

Dans un premier scénario, la couverture est considérée comme mise en place toute la nuit tous les jours sur les 12 mois de l'année (scénario TRO_couv_12m). La simulation met en évidence une surchauffe de l'eau du bassin (Figure 73). La couverture diminuant les pertes, la température de l'eau du bassin augmente jusqu'à un pic de 32°C qui n'est pas acceptable par les nageurs. 100% des périodes très chaudes (ou la température est supérieure à 30°C) ont lieu entre décembre et janvier et 92% des périodes chaudes (ou la température est comprise entre 29°C et 30°C) entre décembre et février. Ces deux catégories sont les situations considérées comme inacceptables. Pour des questions d'organisation, il n'est pas envisageable par l'exploitant de donner les consignes de mise en place de la couverture le jour même. La couverture est considérée non mise en place durant ces trois mois d'été austral (scénario TORcouv_9m).

La simulation du comportement du bassin dans le scénario TOR_couv_9m diminue l'inconfort comme on peut le voir sur la Figure 74. La température ne dépasse que très brièvement les 30°C. Cependant les périodes de chauffage augmentent significativement sur la période sans couverture.

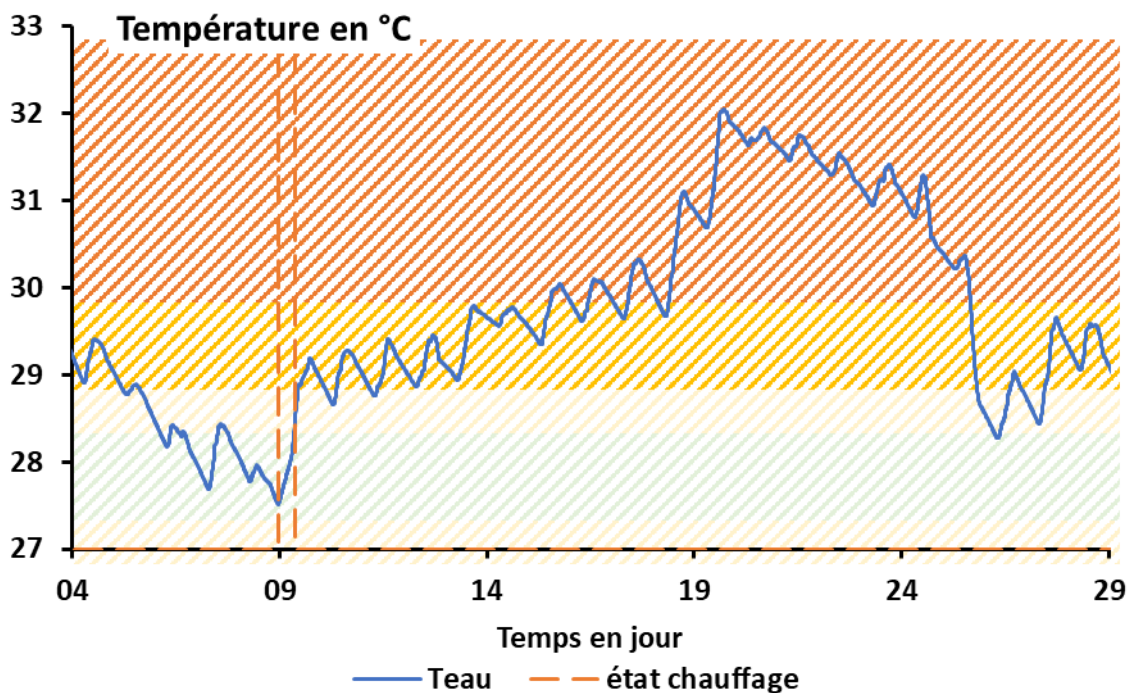


Figure 73 : Evolution de la température de l'eau du bassin au mois le plus chaud de l'année (janvier) avec couverture (scénario TOR_couv_12m)

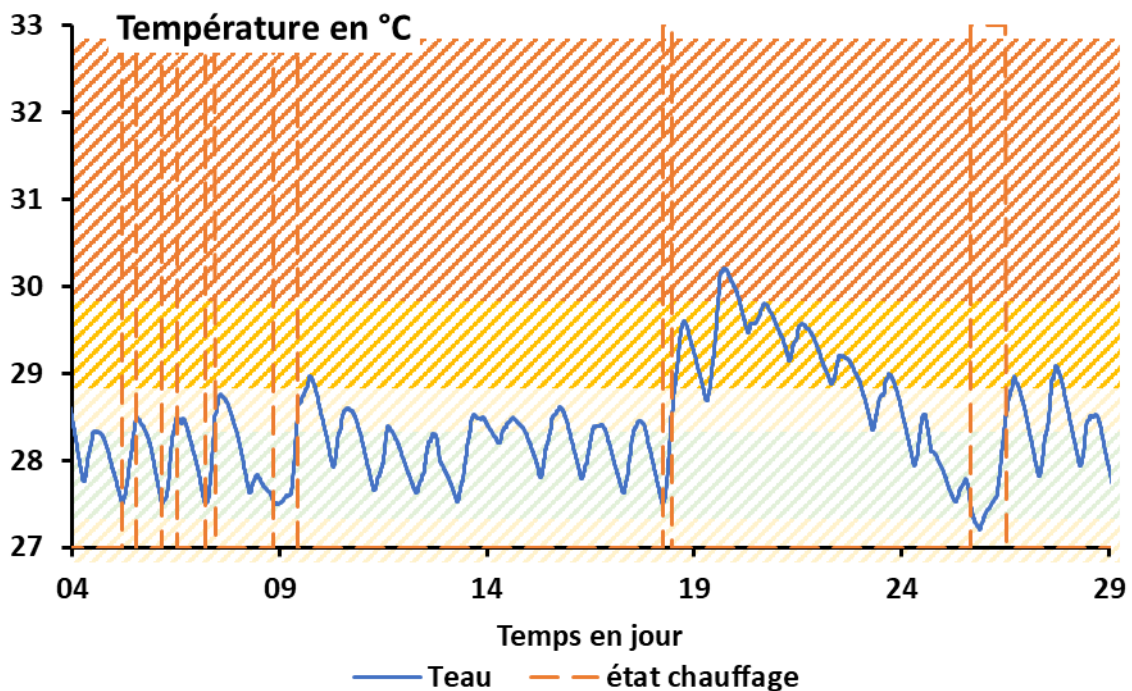


Figure 74 : Evolution de la température de l'eau du bassin au mois le plus chaud de l'année (janvier) sans couverture (scénario TOR_couv_9m)

3. Performance et confort

La pompe à chaleur s'allume moins souvent avec la couverture (Figure 75) que sans (Figure 69) sur les mêmes journées. Les pics de surchauffe dus à la montée de température de l'eau à 28.5°C en journée et l'énergie supplémentaire apportée par le soleil sont toujours présents.

La mise en place de la couverture durant 12 mois nuit significativement au confort des nageurs puisque pendant 17% du temps ils sont en inconfort (zone chaud et très chaud), et qu'ils ne sont dans la zone neutre que 64% du temps. De plus durant 3% du temps, la température est au-dessus de 30°C (Tableau 28). Le passage à 9 mois d'utilisation nocturne de la couverture rétablit le confort qui est assuré 97% du temps et 77% du temps la température est dans la zone neutre (Tableau 28). Cette diminution de la durée d'utilisation de la couverture est donc indispensable, mais elle impacte la consommation d'énergie liée au chauffage. En effet, elle augmente de 15% et le coût de fonctionnement suit la même tendance. Cependant, malgré tout, la couverture reste un moyen très efficace de diminuer la consommation d'énergie et de faire des économies. En effet, l'économie d'énergie est de 43% et celle financière de 45% (Tableau 29).

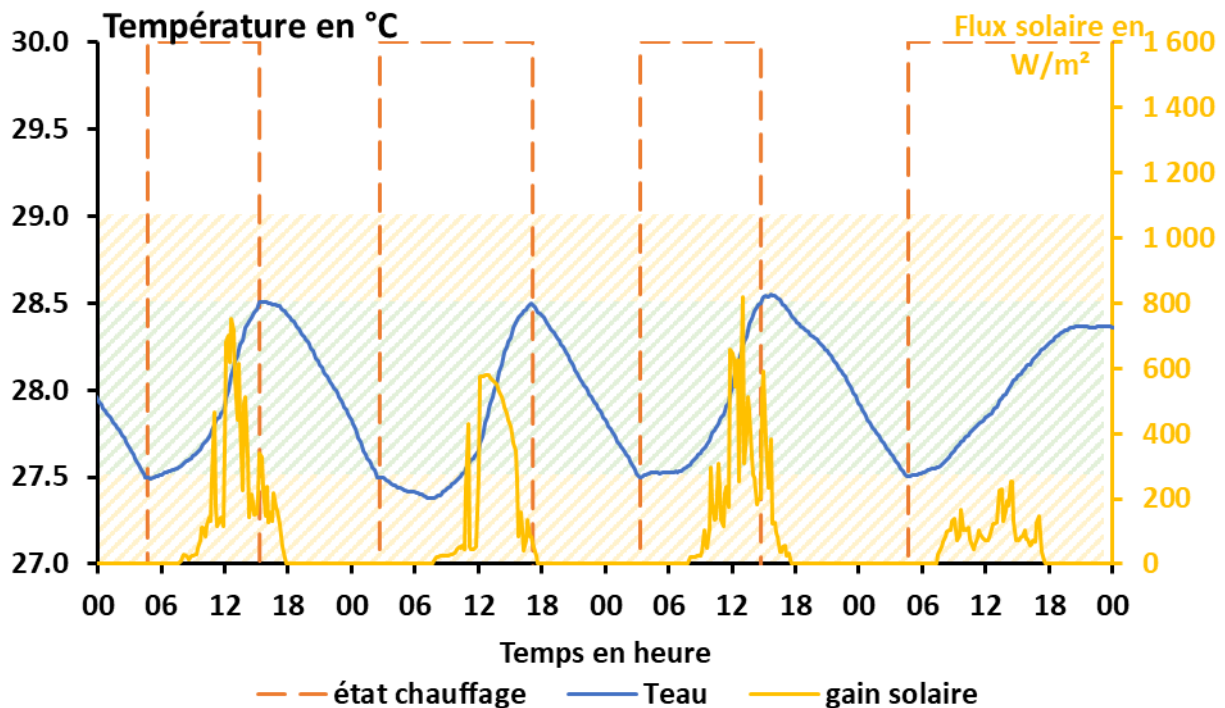


Figure 75 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec la régulation actuelle (Température de consigne basse 27.5°C et température de consigne haute 28.5°C) et avec couverture entre le 16 et le 19 juin

Tableau 28 : Le confort des nageurs avec une couverture

Sensation thermique	Très froid	Froid	Légèrement froid	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
	---	--	-	=	+	++	+++
TOR_couv_12m	0 %	0 %	0.1 %	64 %	18 %	14 %	3 %
TOR_couv_9 m	0 %	0 %	0.2 %	77 %	20 %	3 %	0.1 %

Tableau 29 : Les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage avec une couverture (scénario TOR_couv_12m et TOR_couv_9m).

	Énergie de chauffage	Énergie économisée	Coût variable	Coût total	Économie financière absolue	Économie financière relative sur la part variable	Économie financière relative sur le coût total
	MWh	%	€	€	€	%	%
TOR_couv_12m	352 525	53	5 001	10 315	-5 751	53	36
TOR_couv_9 m	406 296	46	5 900	11 214	-4 852	45	30

4. Bilan des flux

L'augmentation de la consommation de chauffage s'explique par une augmentation des pertes par évaporation : directement en engendrant un flux d'énergie, mais aussi en nécessitant un apport en eau neuve plus important (Tableau 30). Les autres flux restent sensiblement les mêmes. Une diminution significative du flux évaporatif peut être constatée suite à la mise en place de la couverture (Figure 76). L'évaporation n'est plus la première source de refroidissement du bassin, mais les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde.

Tableau 30 : Énergie échangée par le bassin sur une année par phénomène physique pour les scénarii TOR_couv_12m et TOR_couv_9m.

	E sol	E chauff	E evap	E rad	E conv	E ap	E cond
TOR_couv_12m	536	353	268	461	156	2	1
TOR_couv_9 m	543	406	329	461	155	3	1

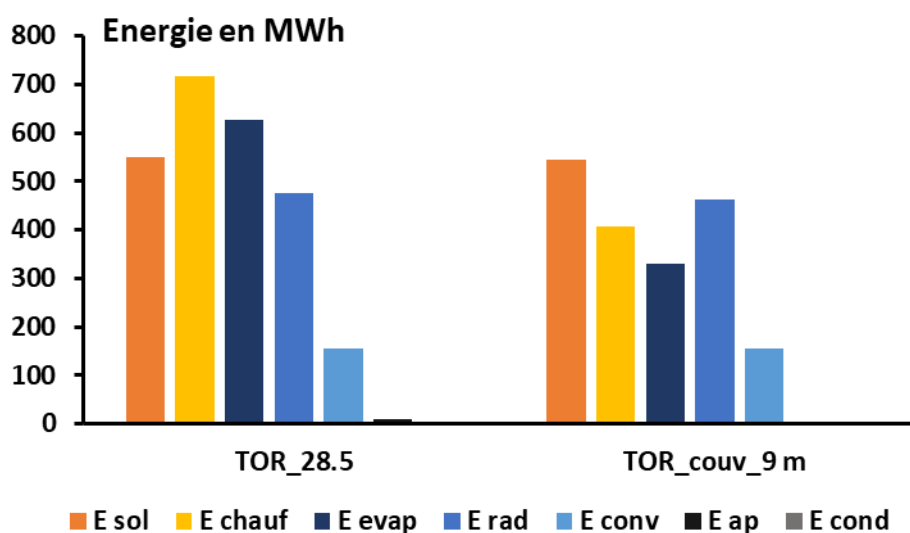


Figure 76 : Énergie échangée par le bassin sur une année par phénomène physique pour les scénarii TOR_28.5 et TOR_couv_9m.

La mise en place de la couverture permet de diminuer les besoins en chauffage et donc le coût de fonctionnement, dans un second temps, une régulation permettant de réduire le coût de fonctionnement du chauffage en utilisant l'alternance des périodes creuse, pleine et de pointe

V. Simulation avec une couverture et sans chauffage durant les heures de pointe

1. Présentation de la régulation du chauffage

L'objectif premier de l'exploitant est de diminuer le coût de fonctionnement de son installation. Pour cela, l'utilisation des variations de tarification au cours de la journée peut être utilisée.

On peut constater que la différence de prix entre les heures de pointe et les heures creuses est de 115% ou 209% selon la saison et que cette période représente uniquement 5 heures sur la journée. De plus, la période la plus conséquente est entre 9h et 12h quand le soleil chauffe naturellement l'eau. Les périodes d'heures pleines ont un surcoût de 15% à 46% uniquement et représentent des périodes de durées plus importantes. L'interdiction de chauffer durant les heures de pointe permettrait de diminuer le coût de l'électricité consommée et donc du chauffage. De plus l'inertie du bassin permet de décaler le chauffage d'une heure ou deux sans impact immédiat sur le confort des nageurs. La régulation proposée est la même que précédemment avec en plus une interdiction de chauffage durant les heures de pointe. On nommera ce scénario TORéco_couv dans la suite.

2. Présentation du comportement du chauffage et de la température du bassin

Durant la première période de chauffage présentée sur la Figure 77, la régulation se comporte comme précédemment. En effet, le chauffage s'est déclenché en début de nuit ou il n'y a pas de périodes de pointe. Durant la seconde période, il se déclenche en fin de nuit et le chauffage s'éteint deux fois dans la journée durant les heures de pointe. La température de l'eau ne passe pas significativement en dessous de 27.5°C, les périodes de chauffage, les gains solaires et l'inertie de l'eau du bassin arrivent à maintenir le confort. L'eau est chauffée sans jamais allumer le chauffage durant les heures de pointe.

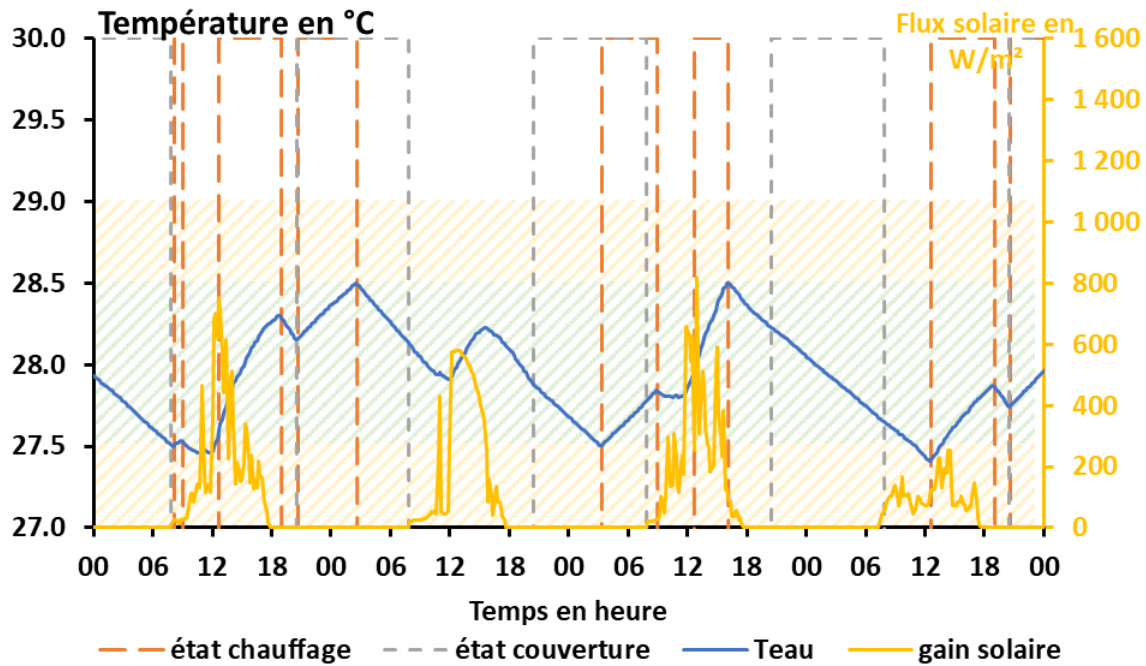


Figure 77 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec une interdiction de chauffage durant les heures de pointe sur le réseau électrique (scénario TORéco_couv) et avec couverture entre le 16 et le 19 juin

3. Performance et confort

Ce scénario atteint son objectif de diminuer le coût de fonctionnement lié au chauffage de 10% supplémentaire par rapport au scénario TOR_couv_9m, sans modifier significativement l'énergie nécessaire au chauffage du bassin qui reste sensiblement les mêmes (Tableau 31). Les économies sont uniquement dues à une meilleure utilisation des variations tarifaires au cours de la journée. De plus, les constatations réalisées sur la Figure 77 se retrouvent dans le bilan du confort sur l'année présenté dans le Tableau 32. Les périodes où la température de l'eau est légèrement froide augmentent et passent de 0% à un 1%, mais elle ne passe jamais dans la zone d'inconfort en dessous de 27°C, les périodes dans la zone optimale entre 27.5 et 28.5 augmentent même légèrement (de 4%). De même les périodes en inconfort chaud diminuent. Cette régulation atteint ses objectifs de diminuer le coût de fonctionnement lié au chauffage sans augmenter l'inconfort des usagers.

Tableau 31 : Les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage avec une couverture sans chauffage durant les heures de pointe (scénario TORéco_couv).

	Énergie de chauffage	Énergie économisée	Coût variable	Coût total	Économie financière absolue	Économie financière relative sur la part variable	Économie financière relative sur le coût total
	MWh	%	€	€	€	%	%
TORéco_couv	402 125	46	4 410	9 724	-6 342	59	39

Tableau 32 : Le confort des usagers avec une couverture sans chauffage durant les heures de pointe (scénario TORéco_couv).

Sensation thermique	Très froid	Froid	Légèrement froid	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
	---	--	-	=	+	++	+++
TORéco_couv	0 %	0 %	1 %	81 %	16 %	2 %	0.05 %

En conclusion, l'impact de la couverture sur les économies réalisables et le confort a été étudié, ainsi qu'une méthode permettant de diminuer significativement le coût de fonctionnement sans modification des installations en interdisant le chauffage durant les heures de pointe. Il s'est avéré que ces deux méthodes n'ont non seulement pas impacté négativement le confort, mais également amélioré ce dernier. Il peut être mis en œuvre sur tous les sites similaires et ne demande pas de compétence particulière.

VI. Simulation avec couverture d'une régulation prévisionnelle du chauffage

1. Présentation de la régulation du chauffage

L'objectif principal est de tester la faisabilité et les gains qui peuvent être atteints avec une régulation prédictive du chauffage qui prend en compte les horaires d'ouverture, mais aussi la météo et le prix de l'électricité. Pour assurer le confort des usagers, la température de l'eau doit être maintenue dans la zone de confort et le plus possible dans la zone de confort optimal durant les heures d'ouverture, mais aucune contrainte n'est imposée durant les heures de fermeture. Les horaires utilisés sont ceux présentés sur la Figure 67.

Pour connaître le besoin de chauffage minimum pour assurer le confort des usagers sur les 24h à venir, le comportement du bassin est simulé sur cette même période, grâce aux données de prévision météorologiques supposées connues et fiables. La température minimale durant les heures d'ouverture est comparée à la température basse de confort optimal, soit 27.5°C dans notre cas. Si elle est supérieure alors le chauffage n'est pas nécessaire, sinon la différence entre les deux températures et les caractéristiques du bassin permettent de calculer le besoin de chauffage pour que la température de l'eau atteigne la température de confort optimal :

$$E_{\text{chauf}} = \rho_{\text{eau}} V C_p (27.5 - T_{\text{eau,min}}) \quad <4.1>$$

En utilisant la puissance calorifique de la pompe à chaleur, on calcule le temps de fonctionnement correspondant de la pompe à chaleur :

$$t_{\text{chauf}} = \frac{E_{\text{chauf}}}{P_{\text{PAC}}} \quad <4.2>$$

Le parti a été pris d'allumer la PAC sur des pé de riodes 10 minutes minimum. Pour permettre de satisfaire les usagers, le chauffage doit avoir lieu avant l'heure où la température est la plus froide. Les périodes sont classés d'abord selon le critère du coût qui dépend de la tarification du réseau électrique (heures creuses, heures pleines, puis heures de pointe Figure 78). De nombreux créneaux sont à égalité selon ce critère. Les périodes ex-aeco sont alors classés du plus proche de l'heure critique au plus éloigné (comme représenté par les flèches). Les périodes sont sélectionnés successivement dans cette liste jusqu'à dépasser le temps de chauffe nécessaire. Ce qui revient à sélectionné le nombre de créneaux de 10 minutes nécessaire en commençant par suivre la flèche verte puis la flèche orange jusqu'à dépasser le temps de chauffage calculé.

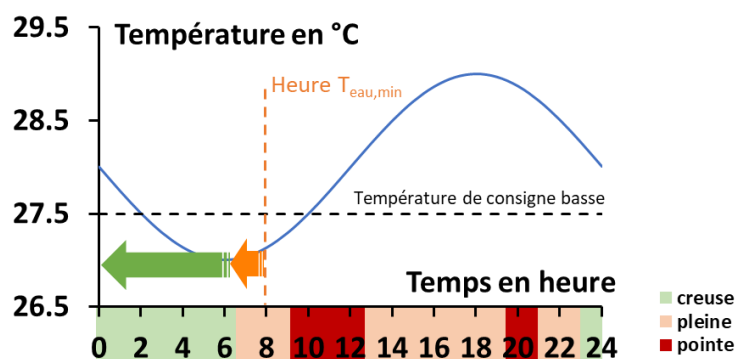


Figure 78 : Schéma de principe de la sélection des créneaux de chauffage de l'eau du bassin.

Une nouvelle simulation est alors réalisée, si la température minimale durant les heures d'ouverture est supérieure à 27.5°C alors ce scénario est sélectionné. Sinon, la nouvelle différence entre les deux températures est utilisée pour calculer l'énergie puis le temps de chauffe supplémentaire nécessaire. Le nombre correspondant de créneaux est sélectionné dans la liste. Une nouvelle simulation est réalisée jusqu'à ce que la température de l'eau soit supérieure à 27.5°C sur toutes les périodes d'ouverture.

Cette procédure est nécessaire, car la température de l'eau augmente quand on chauffe l'eau, les pertes aussi et donc le besoin également. Cela justifie la nécessité de mettre en place une procédure itérative.

Le scénario de chauffage ainsi choisi est sélectionné pour réaliser le contrôle commande de la pompe à chaleur.

Cette procédure est répétée toutes les 6 heures, ce qui permet dans un cas réel de prendre en compte les déviations entre la modélisation et la réalité. Sur une régulation sur un site en activité, une sécurité qui allume de force le chauffage quand la température descend trop serait à ajouter pour s'assurer de prévenir tout dysfonctionnement de la régulation (simulation, accès aux données météo...).

Les résultats présentés dans cette sous partie sont ceux obtenus avec cette méthode de régulation. Le scénario sera nommé Prév_couv dans la suite.

2. Présentation du comportement du chauffage et de la température du bassin

La température de l'eau est supérieure à 27.5°C sur les heures d'ouverture sur la période représentée. Pas contre durant les nuits il arrive que la température passe en dessous de 27.5°C comme on peut le constater sur la Figure 79. La température est en majorité entre 27.5°C et 28°C durant les heures d'ouverture. Le confort est bien respecté durant ces périodes, le chauffage de l'eau a lieu majoritairement de nuit sur les jours présentés et jamais durant les heures de pointe. Le fait de chauffer moins en été permet de diminuer les périodes en inconfort durant le mois de janvier (Figure 80) comparé à la régulation actuelle (Figure 74). La température de l'eau n'est plus jamais dans la zone très chaude et les périodes en zone chaude diminuent également. Le confort d'été en est amélioré.

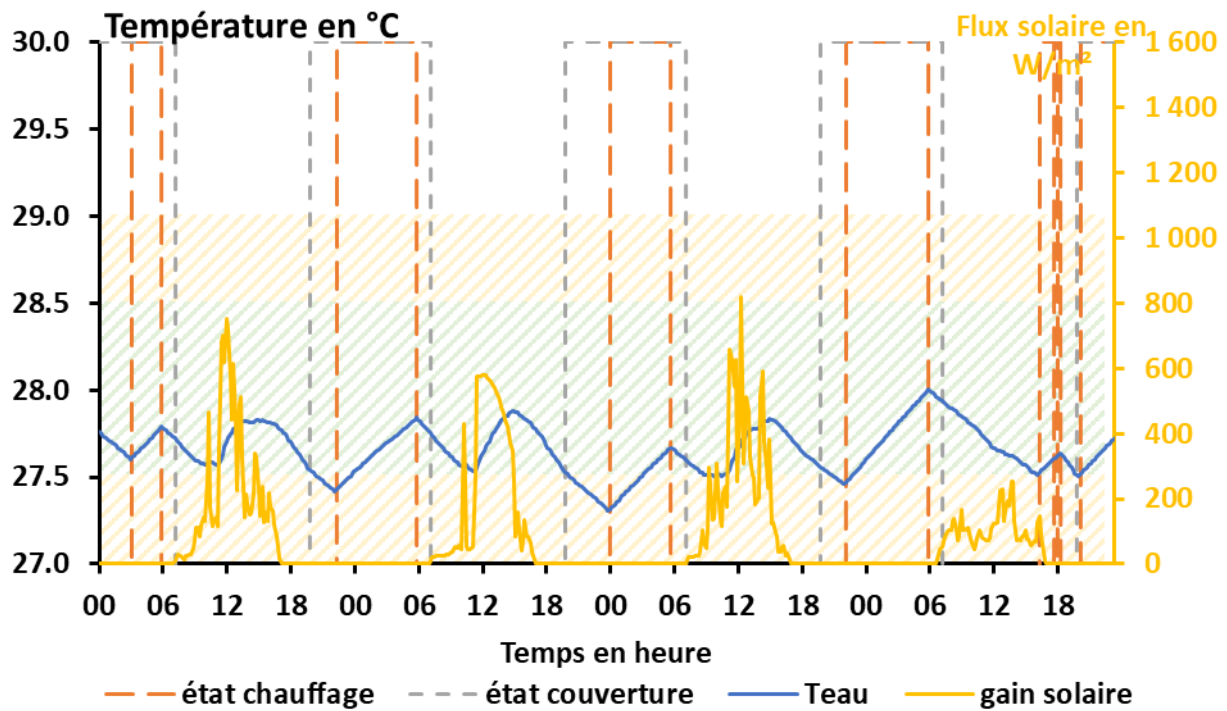


Figure 79 : Evolution du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec un contrôle commande prédictif (scénario Prév_couv) et avec couverture entre le 16 et le 19 juin

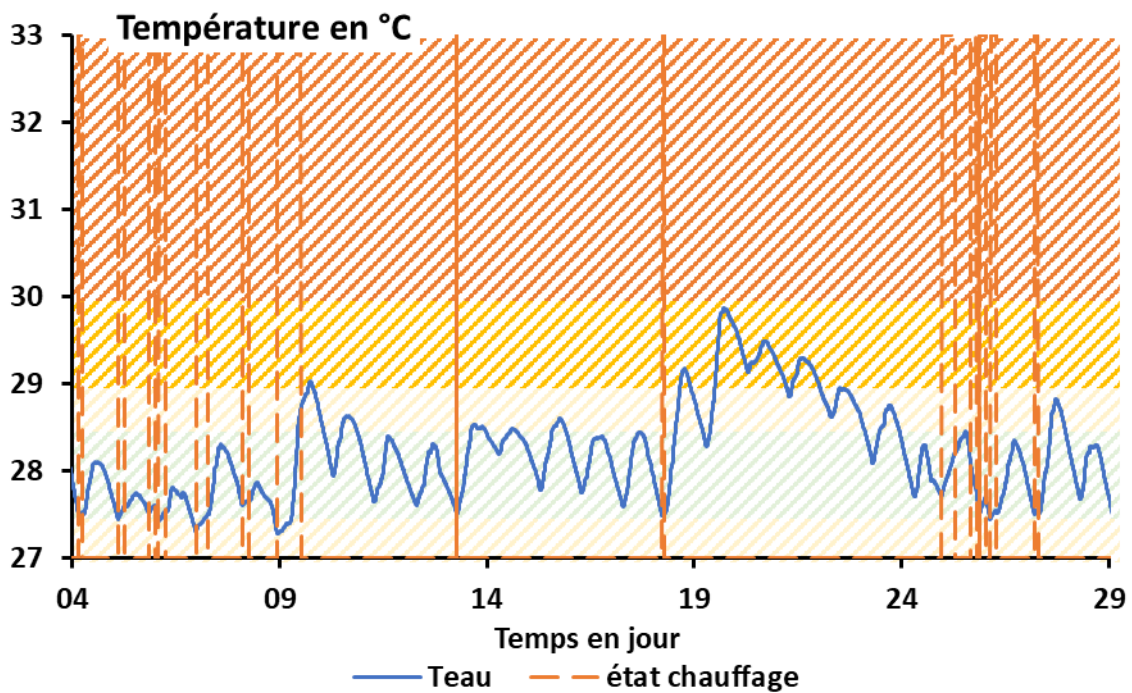


Figure 80 : Comportement du chauffage et de la température de l'eau du bassin avec un contrôle commande prédictif (scénario Prév_couv) et avec couverture au mois de janvier

3. Performance et confort

Concernant le bilan sur l'année, le confort est augmenté. 94% du temps la température de l'eau est dans la zone neutre entre 27.5°C et 28.5°C et seulement 1% du temps dans la zone d'inconfort (zone chaude dans ce cas) (Tableau 33). Les périodes d'inconfort sont systématiquement dues à une température d'eau trop chaude. Les températures de l'eau montent dans la zone chaude en raison d'un fort ensoleillement en été plusieurs jours d'affilés (au minimum deux jours). La régulation prévisionnelle sur 24h ne permet pas de prendre en compte ces phénomènes bien qu'elle améliore le confort en gardant systématiquement la température de l'eau le plus proche possible de 27.5°C comme on peut le voir sur la Figure 79.

Dans le même temps, cette méthode permet les économies d'énergies, mais aussi financières, les plus importantes (Tableau 34). Cette régulation permet non seulement de diminuer les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage en assurant le confort des usagers, mais aussi d'améliorer le confort des usagers comparé à la situation actuelle et même par rapport à tous les scénarii précédemment présentés.

Tableau 33 : Le confort des usagers avec avec un contrôle commande prédictif du chauffage (scénario Prév_couv) et avec couverture

Sensation thermique	Très froid	Froid	Légèrement froid	Neutre	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud
	---	--	-	=	+	++	+++
Prév_couv	0 %	0 %	0 %	94 %	5 %	1 %	0 %

Tableau 34 : Les consommations d'énergie et le coût de fonctionnement lié au chauffage avec un contrôle commande prédictif du chauffage (scénario Prév_couv) et une couverture

	Énergie de chauffage	Énergie économisée	Coût variable	Coût total	Économie financière absolue	Économie financière relative sur la part variable	Économie financière relative sur le coût total
	MWh	%	€	€	€	%	%
Prév_couv	367 189	51	3 550	8 863	-7 202	67	45

VII. Conclusion

La couverture est une solution qui permet des économies énergétiques importantes sur le chauffage du bassin (Figure 81). La mise en place de la couverture les nuits sur les 12 mois de l'année permet une économie de consommation d'énergie de 53% (Figure 81), mais elle impacte significativement le confort des usagers durant les mois d'été entre décembre et février, ce qui est visible sur le bilan du confort de l'année. La température est dans la zone d'inconfort chaud durant 17% du temps. Le confort des usagers est une contrainte forte qui doit être respecté. L'eau est trop chaude et seule la non-mise en place de la couverture permet d'augmenter les pertes thermiques et donc de diminuer la température de l'eau. La mise en place de la couverture durant 9 mois sur l'année permet d'améliorer le confort (Figure 81) tout en diminuant la consommation d'électricité de 46%. Les économies financières sont similaires quand on regarde le coût variable. Cette option est très efficace pour diminuer la consommation électrique et le coût, mais nécessite un investissement initial.

La régulation qui interdit l'utilisation du chauffage durant les heures de pointe (TORéco_couv) a pour objectif de diminuer le coût en agissant sur la temporalité du chauffage. Cet objectif est bel et bien atteint en diminuant le coût variable du chauffage de 13% supplémentaire, soit un total de 59%. Cela a été possible sans impacter le confort des usagers (Figure 81). Cette option permet des économies financières sans nécessiter d'investissement, ni de travaux, ni de diminution du confort, son défaut est de ne pas diminuer la consommation électrique.

Les meilleures économies, acceptable par l'exploitant, ont lieu avec un contrôle commande prévisionnel, qui permet de faire jusqu'à 51% d'économies d'énergie, mais aussi des économies financières jusqu'à 67% du coût variable. Elle permet d'agir sur deux plans :

- Minimiser la quantité de chauffage nécessaire pour assurer le confort des usagers
- Prioriser l'utilisation du réseau électrique durant les périodes les moins onéreuses

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du système, des capteurs en particulier de température, l'accès aux prévisions météorologiques. Cette méthode ne peut être totalement standardisée actuellement, mais reste une solution permettant des économies importantes et le meilleur confort des usagers.

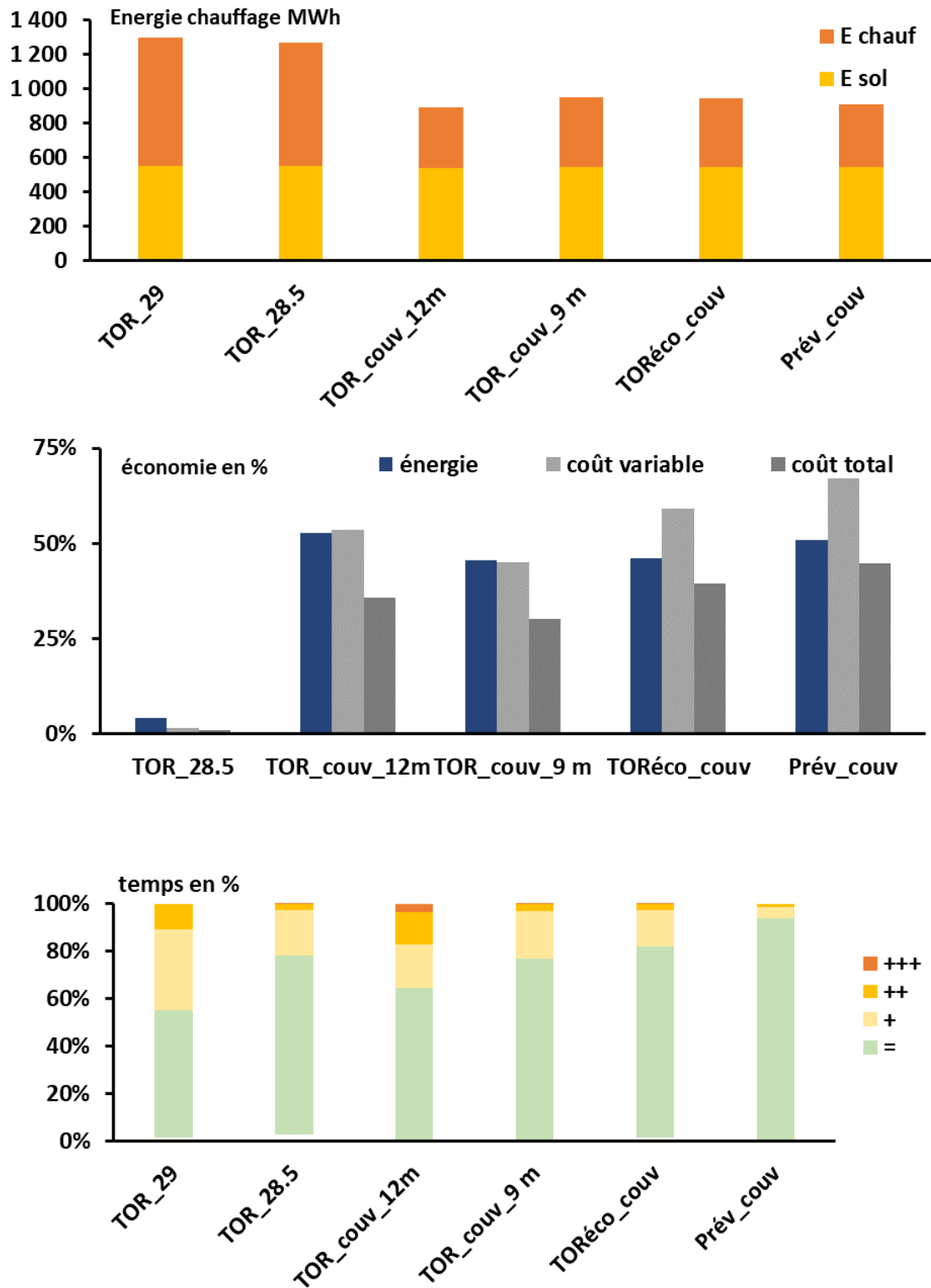


Figure 81 : Consommation de chauffage et gains solaires sur une année, économies d'énergies et de coût et confort des usagers pour les différents scénarii

Conclusion générale

L'objectif de ces travaux de thèse CIFRE est d'évaluer les économies financières et énergétiques réalisables en utilisant un contrôle commande prédictif pour le chauffage des piscines collectives extérieures tout en respectant le confort des nageurs. Pour atteindre cet objectif dans un premier temps un état de l'art des différentes contributions aux bilans énergétiques et massique a été réalisé et une piscine en environnement réel a été instrumentée pour analyser le comportement dynamique des piscines collectives. Un modèle de bassin a été proposé et validé à l'échelle de quelques heures à quelques jours. Il a été nécessaire de mettre en place une expérimentation pour valider le modèle, la littérature ne permettant pas de choisir un modèle fiable à elle seule. La piscine expérimentale était située au Bois de nèfles (Saint Paul, La Réunion). Les données (de température, niveau, débit, météorologiques) ont permis de valider un modèle de bassin mais aussi d'avoir une base d'un an de données météorologiques. Le modèle de bassin validé permet de prédire la température de l'eau, mais aussi la consommation énergétique due au chauffage. Les données mesurées ont également permis de valider les modèles des différents phénomènes physiques, en particulier l'évaporation et les pertes radiatives à grandes longueurs d'onde dont la modélisation avait été identifiée comme des verrous secondaires suite à l'étude bibliographique. Le modèle validé a permis de simuler différents scénarii et d'évaluer leur performance sur trois axes : la consommation énergétique, le coût de fonctionnement lié au chauffage et le confort des nageurs. Le site simulé est un bassin de 25 m par 25 m chauffé par pompe à chaleur. Le comportement du bassin a été simulé sur une année et des propositions de solutions d'économies d'énergie de de coût de fonctionnement ont été étudiée soit en mettant en place une couverture isolante ou en prenant en considération les périodes de tarification électrique. Enfin la mise en place d'un contrôle commande prédictif qui calcul le besoin minimum de chauffage nécessaire pour assurer le confort des usagers mais aussi en utilisant les périodes tarifaires des contrats électriques.

Le premier scénario simulé est le fonctionnement actuel du site sur une année. Son étude a pour objectif de connaître la consommation du site lié au chauffage et le coût de fonctionnement ainsi que le confort actuel des nageurs. Il sert de cas de référence pour évaluer l'efficacité des scénarii proposés mais aussi le respect de la contrainte du confort des nageurs. Il ressort de la simulation que les pertes par évaporation représentent 49% des pertes totales sur l'année. La mise en place d'une couverture permet de diminuer ces pertes, cette possibilité a été étudiée dans un second temps.

Le second scénario simulé est le même bassin sur une même période avec la même régulation du chauffage mais avec une couverture mise en place la nuit entre 20h30 et 8h. La simulation a mis en évidence que durant l'été, la mise en place systématique de la couverture entraîne une surchauffe de l'eau et donc un inconfort inacceptable pour les usagers. Pour pallier ce problème, une simulation avec la couverture mise en place 9 mois, d'avril à novembre inclus, a été réalisée. Cette fois le confort est respecté. De plus, des économies d'énergie de 46% sont réalisées. Comme attendu, cette diminution est due en quasi-totalité à la diminution des pertes par évaporation. Cette méthode est efficace autant énergétiquement

qu'économiquement, mais nécessite un investissement initial pour l'achat de la couverture mais aussi un changement de comportement des employés qui seront amenés à la mettre en place tous les soirs.

Le troisième scénario simulé s'intéresse à une modification mineure de la régulation du chauffage qui est forcé à être éteint durant les heures de pointe. La simulation a été réalisée avec une mise en place d'une couverture 9 mois sur 12 comme dans le scénario précédent. Cette fois, les économies sont uniquement financières, de 10% comparé au scénario 2. Le confort est toujours respecté 98% du temps. Cette méthode permet des économies financières non négligeables sans nécessiter d'investissement significatif, ni de modification du comportement des employés.

Le quatrième scénario simulé est une simulation toujours avec une couverture 9 mois par an, mais où la régulation du chauffage est assurée par un contrôle commande prédictif pour le chauffage des piscines collectives extérieures tout en respectant le confort des nageurs. Son fonctionnement permet d'agir sur deux plans : la quantité de chauffage nécessaire pour assurer le confort des usagers et la priorisation de l'utilisation du réseau électrique durant les périodes les moins onéreuses. Il permet de réaliser des économies financières supplémentaires comparé au scénario de 2 de 15% tout en diminuant également la consommation d'énergie de 5%. De plus, c'est le scénario qui assure le meilleur confort aux usagers. Le quatrième scénario permet de faire des économies financières mais aussi énergétiques, tout en assurant un meilleur confort aux usagers. Le contrôle commande permet de répondre aux objectifs et donc aux besoins du client et de l'entreprise Sunny Shark. Cependant, il faut noter une limite. La simulation a été réalisée avec les données météorologiques mesurées, ce qui revient à des prévisions météorologiques parfaites. Il serait intéressant dans des travaux ultérieurs d'étudier l'impact de l'incertitude des prévisions météorologiques sur le contrôle commande prédictif du chauffage. De plus, cette étude s'intéresse uniquement à un bassin extérieur, or une majorité des piscines françaises sont intérieures. Pour permettre un développement à grande échelle d'un tel contrôle commande, le couplage avec un modèle du bâtiment est nécessaire. De plus, la prise en compte de l'efficacité énergétique doit s'allier à une prise en compte des polluants liés au traitement de l'eau de baignade. Différentes approches existent dans le cas des piscines couvertes. Une première catégorie d'études se concentre sur la consommation énergétique du système dans son ensemble. Les simulations sont réalisées avec des logiciels spécialisés dans les constructions : EnergyPlus [66] ou TRNSYS [53], [25], [9], [31], [58], [151]. La seconde catégorie d'études se focalise sur la répartition dans l'air du hall des gradients de température, d'humidité et de concentration de CO₂ ou de chloroforme. Les logiciels utilisés sont ceux de mécanique des fluides (computational fluid dynamics, CFD) : OpenFOAM [166], [167], FLUENT [168], [169], et STREAM [170]. La désinfection de l'eau par chloration engendre des co-produits volatils. L'étude de leur concentration dans l'espace a pour finalité d'améliorer la sécurité des usagers et surtout des maîtres-nageurs [171], [172]. La répartition en trois dimensions de la température et de l'humidité dans le hall est utilisée pour connaître les

risques de condensation sur les parois de la structure [73], [169], [173]. Le couplage du modèle de bassin et de ces différentes approches est nécessaire pour assurer une efficacité énergétique, la sécurité (durabilité du bâti, qualité de l'air) et le confort des usagers.

Bibliographie

- [1] « Crise énergétique: la natation en milieu scolaire menacée par la fermeture des piscines », *LEFIGARO*, 28 novembre 2022. <https://www.lefigaro.fr/actualite-france/crise-energetique-la-natation-en-milieu-scolaire-menacee-face-a-la-fermeture-des-piscines-20221128> (consulté le 13 février 2023).
- [2] Masson-Delmotte *et al.*, « An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty », In Press., 2018.
- [3] U. Nations, « L'Accord de Paris | Nations Unies », *United Nations*. <https://www.un.org/fr/climatechange/paris-agreement> (consulté le 14 février 2023).
- [4] J. Rogelj *et al.*, « Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development », p. 82.
- [5] B.-B. Marie-Odile, « Dépenses énergétiques des collectivités locales : état des lieux en 2017 », p. 108.
- [6] P. N. G. L. 20 août 2019 à 10h18, « Piscines «Tournesol» : une révolution à l'architecture particulière », *leparisien.fr*, 20 août 2019. <https://www.leparisien.fr/essonne-91/lisses-91090/piscines-tournesol-une-revolution-a-l-architecture-particuliere-20-08-2019-8136171.php> (consulté le 21 février 2023).
- [7] « 13 piscines centres aquatique publics », Cour des comptes, févr. 2018.
- [8] « Crise Énergétique Mondiale – Topics », *IEA*. <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis> (consulté le 13 février 2023).
- [9] A. Natali, M. Bottarelli, et P. Fausti, « A Methodology of Energy Optimization in Indoor Swimming Pool », *Tec. Ital.-Ital. J. Eng. Sci.*, vol. 64, n° 2-4, p. 8, juin 2020.
- [10] S. fr avec AFP, « Prix de l'énergie : baisse de la température de l'eau ou fermetures partielles, la sobriété s'impose dans les piscines », 3 septembre 2022. Consulté le: 13 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sudouest.fr/economie/prix-de-l-energie-baisse-de-la-temperature-de-l-eau-ou-fermetures-partielles-la-sobriete-s-impose-dans-les-piscines-12120455.php>
- [11] J. SCHITTLY, « Crise énergétique. Vannes aggro va baisser la température de l'eau d'un degré dans ses cinq piscines », *Ouest-France.fr*, 15 décembre 2022. <https://www.ouest-france.fr/bretagne/vannes-56000/crise-energetique-vannes-agglo-va-baisser-la-temperature-de-l-eau-d-un-degre-dans-ses-cinq-piscines-c61990b6-7c8b-11ed-9ce8-d142ab264f7c> (consulté le 13 février 2023).
- [12] cham75, « Les piscines municipales fortement impactées par la crise énergétique », *Mediapart*. <https://blogs.mediapart.fr/cham75/blog/021022/les-piscines-municipales-fortement-impactees-par-la-crise-energetique> (consulté le 13 février 2023).
- [13] « Crise de l'énergie : la multiplication des fermetures de piscines fait craindre le pire à la ligue de natation », *France 3 Centre-Val de Loire*, 2 décembre 2022. <https://france3-regions.francetvinfo.fr/centre-val-de-loire/loiret/crise-de-l-energie-la-multiplication-des->

fermetures-de-piscines-fait-craindre-le-pire-a-la-ligue-de-natation-2666088.html
(consulté le 13 février 2023).

- [14] S. Prak, « Crise énergétique : une piscine de l'Essonne en parfait état va définitivement fermer ses portes », *Capital.fr*, 14 octobre 2022. <https://www.capital.fr/economie-politique/crise-energetique-une-piscine-de-lesonne-en-parfait-etat-va-definitivement-fermer-ses-portes-1448999> (consulté le 13 février 2023).
- [15] W. Kampel, S. Carlucci, B. Aas, et A. Bruland, « A proposal of energy performance indicators for a reliable benchmark of swimming facilities », *Energy Build.*, vol. 129, p. 186-198, oct. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.033.
- [16] W. Kampel, B. Aas, et A. Bruland, « Characteristics of energy-efficient swimming facilities – A case study », *Energy*, vol. 75, p. 508-512, oct. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.08.007.
- [17] A. Mousia et A. Dimoudi, « Energy performance of open air swimming pools in Greece », *Energy Build.*, vol. 90, p. 166-172, mars 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.01.004.
- [18] R. M. Lazzarin et G. A. Longo, « Comparison of heat recovery systems in public indoor swimming pools », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, n° 7, p. 561-570, 1996.
- [19] Enertech, « Campagne de mesures de la consommation électrique de 20 piscines individuelles », Ademe, 2007.
- [20] J. M. Cardemil, W. Schneider, M. Behzad, et A. R. Starke, « Thermal analysis of a water source heat pump for space heating using an outdoor pool as a heat source », *J. Build. Eng.*, vol. 33, p. 101581, janv. 2021, doi: 10.1016/j.jobte.2020.101581.
- [21] W. Kampel, « Energy Efficiency in Swimming Facilities », Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2015.
- [22] Y. Li, N. Nord, G. Huang, et X. Li, « Swimming pool heating technology: A state-of-the-art review », *Build. Simul.*, août 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0669-3.
- [23] P. Ciuman et J. Kaczmarczyk, « Numerical Analysis of the Energy Consumption of Ventilation Processes in the School Swimming Pool », *Energies*, vol. 14, n° 4, p. 1023, janv. 2021, doi: 10.3390/en14041023.
- [24] J. Nikolic, D. Gordic, N. Jurisevic, V. Vukasinovic, et D. Milovanović, « Energy auditing of indoor swimming facility with multi-criteria decision analysis for ranking the proposed energy savings measures », *Energy Effic.*, vol. 14, n° 4, p. 36, avr. 2021, doi: 10.1007/s12053-021-09949-w.
- [25] M. Barbato, L. Cirillo, L. Menditto, R. Moretti, et S. Nardini, « Feasibility study of a geothermal energy system for indoor swimming pool in Campi Flegrei area », *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 6, p. 421-425, juin 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.02.013.
- [26] D. Lovell *et al.*, « Thermal performance prediction of outdoor swimming pools », *Build. Environ.*, vol. 160, p. 106167, août 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106167.
- [27] A. Somwanshi, A. K. Tiwari, et M. S. Sodha, « Feasibility of earth heat storage for all weather conditioning of open swimming pool water », *Energy Convers. Manag.*, vol. 68, p. 89-95, avr. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2012.12.024.
- [28] K. M. Bataineh, « Transient Analytical Model of a Solar-Assisted Indoor Swimming Pool Heating System », *J. Energy Eng.*, vol. 141, n° 4, p. 04014048, déc. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000233.

- [29] D. Abdelkader, A. Mohamed, A. Moussa, et E. H. Mohamed, « Modeling of swimming pools heated with solar energy in the eastern Morocco- Nador province », p. 3, 2015.
- [30] D. Katsaprakakis, « Introducing a solar-combi system for hot water production and swimming pools heating in the Pancretan Stadium, Crete, Greece », *Energy Procedia*, vol. 159, p. 174-179, févr. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.12.047.
- [31] F. Calise, R. Figaj, et L. Vanoli, « Energy and Economic Analysis of Energy Savings Measures in a Swimming Pool Centre by Means of Dynamic Simulations », *Energies*, vol. 11, n° 9, p. 2182, août 2018, doi: 10.3390/en11092182.
- [32] D. Govaer et Y. Zarmi, « Solar energy utilization for heating indoor swimming pool », *Sol. Energy*, vol. 29, n° 4, p. 239-244, janv. 1989.
- [33] G. N. Tiwari et S. B. Sharma, « Design parameters for indoor swimming-pool heating using solar energy », *Energy*, vol. 16, n° 6, p. 971-975, juin 1991.
- [34] A. Buonomano, G. De Luca, R. D. Figaj, et L. Vanoli, « Dynamic simulation and thermo-economic analysis of a PhotoVoltaic/Thermal collector heating system for an indoor-outdoor swimming pool », *Energy Convers. Manag.*, vol. 99, p. 176-192, juill. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.04.022.
- [35] A. H. Tarrad, « Heating Mechanism and Energy Analyses for Over-Ground Outdoor Swimming Pool Technology », *Asian J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 1, n° 6, p. 16, 2017.
- [36] J. P. Delgado Marín, F. Vera García, et J. R. García Cascales, « Use of a predictive control to improve the energy efficiency in indoor swimming pools using solar thermal energy », *Sol. Energy*, vol. 179, p. 380-390, févr. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.004.
- [37] Y. Li, N. Nord, H. Wu, Z. (Jerry) Yu, et G. Huang, « A study on the integration of air-source heat pumps, solar collectors, and PCM tanks for outdoor swimming pools for winter application in subtropical climates », *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 13, n° 6, p. 662-683, nov. 2020, doi: 10.1080/19401493.2020.1813198.
- [38] X. Yuan, Z. Chen, Y. Liang, Y. Pan, J. Jokisalo, et R. Kosonen, « Heating energy-saving potentials in HVAC system of swimming halls: A review », *Build. Environ.*, vol. 205, p. 108189, nov. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108189.
- [39] P. R. D. Isaac, C. R. Hayes, et R. K. Akers, « Optimisation of water and energy use at the Wales National Pool », *Water Environ. J.*, vol. 24, n° 1, p. 39-48, mars 2010, doi: 10.1111/j.1747-6593.2008.00150.x.
- [40] Soeren Peper, J. Grove-Smith, et E. Gollwitzer, *Passivhaus-Konzept für Hallenbäder: Datenauswertung und Empfehlungen Passivhaus-Konzept für Hallenbäder: Datenauswertung und Empfehlungen*. Unpublished, 2019. doi: 10.13140/rg.2.2.10037.12002.
- [41] E. TRIANTI-STOURNA *et al.*, « Energy conservation strategies for sports centers Part B Swimming pools », *Energy Build.*, n° 27, p. 123-135, 1998.
- [42] A. Bellazzi et S. Galli, « Energy performances of an etfe roof applied to a swimming pool », p. 7.
- [43] X. Yuan, L. Lindroos, J. Jokisalo, R. Kosonen, et Y. Pan, « Study on waste heat recoveries and energy saving in combined energy system of ice and swimming halls in Finland », *Energy Build.*, vol. 231, p. 110620, janv. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110620.
- [44] M. E. Kuyumcu, H. Tutumlu, et R. Yumrutaş, « Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank »,

- Energy Convers. Manag.*, vol. 121, p. 349-357, août 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.049.
- [45] E. Oró, R. Allepuz, I. Martorell, et J. Salom, « Design and economic analysis of liquid cooled data centres for waste heat recovery: A case study for an indoor swimming pool », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 36, p. 185-203, janv. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.10.012.
- [46] X. Yuan, L. Lindroos, J. Jokisalo, R. Kosonen, Y. Pan, et H. Jin, « Demand response potential of district heating in a swimming hall in Finland », *Energy Build.*, vol. 248, p. 111149, oct. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111149.
- [47] Y. Li, G. Huang, T. Xu, X. Liu, et H. Wu, « Optimal design of PCM thermal storage tank and its application for winter available open-air swimming pool », *Appl. Energy*, vol. 209, p. 224-235, janv. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.095.
- [48] P. Ciuman et B. Lipska, « Experimental validation of the numerical model of air, heat and moisture flow in an indoor swimming pool », *Build. Environ.*, vol. 145, p. 1-13, nov. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.009.
- [49] F. Gérardin, A. Cloteaux, et N. Midoux, « Modeling of variations in nitrogen trichloride concentration over time in swimming pool water », *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 94, p. 452-462, mars 2015, doi: 10.1016/j.psep.2014.10.004.
- [50] P. Sun, J. Y. Wu, R. Z. Wang, et Y. X. Xu, « Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools », *Energy Build.*, vol. 43, n° 5, p. 1071-1080, mai 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.08.004.
- [51] L. Johansson et L. Westerlund, « Energy savings in indoor swimming-pools: comparison between different heat-recovery systems », *Appl. Energy*, vol. 70, n° 4, p. 281-303, 2001.
- [52] R. Lazzarin, « Alternative heating of municipal swimming pool », *Int J Refrig*, vol. 6, n° 2, p. 118-122, mars 1983.
- [53] M. Mancic, D. Zivkovic, P. Milosavljevic, et M. Todorovic, « Mathematical modelling and simulation of the thermal performance of a solar heated indoor swimming pool », *Therm. Sci.*, vol. 18, n° 3, p. 999-1010, 2014, doi: 10.2298/TSCI1403999M.
- [54] R. Fuller, P. Rajagopalan, et J. J. Duverge, « Assessment and modelling of the viability of a solar heating system for aquatic centres in southern Australia », *Energy Effic.*, vol. 10, n° 5, p. 1269-1278, oct. 2017, doi: 10.1007/s12053-017-9517-4.
- [55] A. I. Alkhamis et S. A. Sherif, « Feasibility study of a solar-assisted heating/cooling system for an aquatic centre in hot and humid climates », *Int J Energy Res*, vol. 21, n° 9, p. 823-839, juill. 1997.
- [56] H. Qiao et D. Gao, « The Integration Of Shallow Solar-Pond and Swimming Pool », in *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*, D. Y. Goswami et Y. Zhao, Éd., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 2211-2214. doi: 10.1007/978-3-540-75997-3_446.
- [57] L. N. Cunio et A. B. Sproul, « Performance characterisation and energy savings of uncovered swimming pool solar collectors under reduced flow rate conditions », *Sol. Energy*, vol. 86, n° 5, p. 1511-1517, mai 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.02.012.
- [58] M. Barbato, L. Cirillo, L. Menditto, R. Moretti, et S. Nardini, « Geothermal energy application in Campi Flegrei Area: The case study of a swimming pool building », *Int. J. Heat Technol.*, vol. 35, n° Special Issue1, p. S102-S107, sept. 2017, doi: 10.18280/ijht.35Sp0114.

- [59] T. T. Chow, Y. Bai, K. F. Fong, et Z. Lin, « Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating », *Appl. Energy*, vol. 100, p. 309-317, déc. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.05.058.
- [60] 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, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.282.
- [61] M. Dongellini, S. Falcioni, A. Martelli, et G. L. Morini, « Dynamic Simulation of Outdoor Swimming Pool Solar Heating », *Energy Procedia*, vol. 81, p. 1-10, déc. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.053.
- [62] 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, doi: 10.1016/j.solener.2009.10.015.
- [63] Y. Li, N. Nord, N. Zhang, et C. Zhou, « An ANN-based optimization approach of building energy systems: Case study of swimming pool », *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 124029, déc. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124029.
- [64] D. Al. Katsaprakakis, « Comparison of swimming pools alternative passive and active heating systems based on renewable energy sources in Southern Europe », *Energy*, vol. 81, p. 738-753, mars 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.01.019.
- [65] R. Mahmoudi, M. Aliasghary, et M. Mokarram, « Design and fabrication of an intelligent management and control system to optimize energy consumption in indoor swimming pools », *Energy Effic.*, vol. 14, n° 6, p. 55, août 2021, doi: 10.1007/s12053-021-09976-7.
- [66] O. Kim, M. D. Knudsen, et S. Petersen, « Peak load reduction of district heating by control of indoor public swimming pool », p. 6, 2018.
- [67] M. Mieziš, D. Jaunzems, et N. Stancioff, « Predictive Control of a Building Heating System », *Energy Procedia*, vol. 113, p. 501-508, mai 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.04.051.
- [68] B. Coffey, F. Haghghat, E. Morofsky, et E. Kutrowski, « A software framework for model predictive control with GenOpt », *Energy Build.*, vol. 42, n° 7, p. 1084-1092, juill. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.022.
- [69] « Sobriété énergétique: les piscines lilloises moins fréquentées depuis la baisse de température de l'eau », *BFMTV*. https://www.bfmtv.com/grand-lille/sobriete-energetique-les-piscines-lilloises-moins-frequencees-depuis-la-baisse-de-temperature-de-l-eau_AV-202301200341.html (consulté le 13 février 2023).
- [70] V. ENÉE, « À Rennes, chute de fréquentation des piscines depuis la diminution de la température de l'eau », *Ouest-France.fr*, 21 janvier 2023. <https://www.ouest-france.fr/bretagne/rennes-35000/a-rennes-chute-de-frequentation-des-piscines-depuis-la-diminution-de-la-temperature-de-l-eau-24823a90-973f-11ed-816c-f199c789eb53> (consulté le 13 février 2023).
- [71] « Piscines moins chauffées : et pourtant, ils nagent ! », *Le Monde.fr*, 19 novembre 2022. Consulté le: 13 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lemonde.fr/m-perso/article/2022/11/19/piscines-moins-chauffees-et-pourtant-ils-nagent_6150617_4497916.html

- [72] « La température de l'eau des piscines de Rennes refroidit certains nageurs », *ici, par France Bleu et France 3*, 25 janvier 2023. <https://www.francebleu.fr/infos/economie-social/la-temperature-de-l-eau-des-piscines-de-rennes-semble-avoir-refroidi-les-nageurs-7205533> (consulté le 13 février 2023).
- [73] P. Rajagopalan et E. Jamei, « Thermal comfort of multiple user groups in indoor aquatic centres », *Energy Build.*, vol. 105, p. 129-138, oct. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.037.
- [74] D. Ofidou, « Solar thermal systems for zero energy swimming halls », p. 118, 2016.
- [75] B. Yuce, H. Li, Y. Rezgui, I. Petri, B. Jayan, et C. Yang, « Utilizing artificial neural network to predict energy consumption and thermal comfort level: An indoor swimming pool case study », *Energy Build.*, vol. 80, p. 45-56, sept. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.052.
- [76] O. Ø. Smedegård, T. Jonsson, B. Aas, J. Stene, L. Georges, et S. Carlucci, « The Implementation of Multiple Linear Regression for Swimming Pool Facilities: Case Study at Jøa, Norway », *Energies*, vol. 14, n° 16, p. 4825, août 2021, doi: 10.3390/en14164825.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] G. Szeicz et R. C. McMonagle, « The heat balance of urban swimming pools », *Sol. Energy*, vol. 30, n° 3, p. 247-259, 1983.
- [80] J. Woolley, C. Harrington, et 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, n° 1, p. 187-195, janv. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.07.014.
- [81] A. Cloteaux, F. Gérardin, et N. Midoux, « Influence of Swimming Pool Design on Hydraulic Behavior: A Numerical and Experimental Study », *Engineering*, vol. 05, n° 05, p. 511-524, 2013, doi: 10.4236/eng.2013.55061.
- [82] A. Doudou, « Modeling of flow field and heat transfer in a swimming pool », *J. Mech. Eng. Res.*, vol. 2, n° 1, juin 2019, doi: 10.30564/jmer.v2i1.508.
- [83] A. Jodat, M. Moghiman, et M. Anbarsooz, « Experimental comparison of the ability of Dalton based and similarity theory correlations to predict water evaporation rate in different convection regimes », *Heat Mass Transf.*, vol. 48, n° 8, p. 1397-1406, août 2012, doi: 10.1007/s00231-012-0984-z.
- [84] J. F. Manwell, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd Edition. Wiley, 2009.
- [85] C. G. Justus et A. Mikhail, « Height variation of wind speed and wind distributions statistics », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 3, n° 5, p. 261-264, mai 1976, doi: 10.1029/GL003i005p00261.
- [86] 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.
- [87] A. M. Raimundo, A. R. Gaspar, A. V. M. Oliveira, et D. A. Quintela, « Wind tunnel measurements and numerical simulations of water evaporation in forced convection airflow », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 86, p. 28-40, déc. 2014, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.026.

- [88] C. C. Smith, G. Löf, et R. Jones, « Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 3-7, juill. 1994.
- [89] T. Poós et E. Varju, « Dimensionless Evaporation Rate from Free Water Surface at Tubular Artificial Flow », *Energy Procedia*, vol. 112, p. 366-373, mars 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1069.
- [90] E. Sartori, « Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors », *Sol. Energy*, vol. 56, n° 2, p. 199-206, 1996.
- [91] R. Tang et Y. Etzion, « Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface », *Build. Environ.*, vol. 39, n° 1, p. 77-86, janv. 2004, doi: 10.1016/j.buildenv.2003.07.007.
- [92] M. INAN et S. ÖZGÜR ATAYILMAZ, « Experimental investigation of evaporation from a horizontal free water surface », *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, p. 119-131, 2017.
- [93] M. T. Pauken, « An experimental investigation of combined turbulent free and forced evaporation », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 18, n° 4, p. 334-340, déc. 1998, doi: 10.1016/S0894-1777(98)10038-9.
- [94] B. Molineaux, B. Lachal, et O. Guisan, « Thermal analysis of five outdoor swimming pools heated by unglazed solar collectors », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 21-26, juill. 1994, doi: 10.1016/S0038-092X(94)90599-1.
- [95] B. Molineaux, B. Lachal, et O. Guisan, « Thermal analysis of five unglazed solar collector systems for the heating of outdoor swimming pools », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 27-32, juill. 1994, doi: 10.1016/S0038-092X(94)90600-9.
- [96] M. M. Shah, « Evaluation of methods for prediction of evaporation from water pools », *J. Build. Phys.*, p. 174425912110341, juill. 2021, doi: 10.1177/17442591211034193.
- [97] M. M. Shah, « Improved method for calculating evaporation from indoor water pools », *Energy Build.*, vol. 49, p. 306-309, juin 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.026.
- [98] L. Evangelisti, C. Guattari, et F. Asdrubali, « On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review », *Energy Build.*, vol. 183, p. 607-625, janv. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.11.037.
- [99] J. W. Ramsey, H. D. Chiang, et R. J. Goldstein, « A Study of the Incoming Longwave Atmospheric Radiation from a Clear Sky », *J. Appl. Meteorol.*, vol. 21, n° 4, p. 566-578, avr. 1982, doi: 10.1175/1520-0450(1982)021<0566:ASOTIL>2.0.CO;2.
- [100] C. Harrington et M. Modera, « Swimming pools as heat sinks for air conditioners: California feasibility analysis », *Energy Build.*, vol. 59, p. 252-264, avr. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.038.
- [101] G. Walton, « Thermal analysis research program reference manual ». National Bureau of Standards, NBSIR, 1983.
- [102] M. Martin et P. Berdahl, « Characteristics of infrared sky radiation in the United States », *Sol. Energy*, vol. 33, n° 3, p. 321-336, janv. 1984, doi: 10.1016/0038-092X(84)90162-2.
- [103] C. D. Rakopoulos et E. Vazeos, « A model of the energy fluxes in a solar heated swimming pool and its experimental validation », *Energy Convers. Manag.*, vol. 27, n° 2, p. 189-195, janv. 1987, doi: 10.1016/0196-8904(87)90075-6.
- [104] J. A. Duffie et W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4. ed. New York: Wiley, 2013.

- [105] T. Nameche et J. L. Vassel, « Bilan thermique sous climat tempéré des lagunes aérées et naturelles », *Rev. Sci. Eau*, vol. 12, n° 1, p. 65, 1999, doi: 10.7202/705344ar.
- [106] F. Kasten et G. Czeplak, « Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud », *Sol. Energy*, vol. 24, n° 2, p. 177-189, 1980, doi: 10.1016/0038-092X(80)90391-6.
- [107] H. Wu, R. Tang, Z. Li, et H. Zhong, « A mathematical procedure to estimate solar absorptance of shallow water ponds », *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, n° 7, p. 1828-1833, juill. 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2009.03.005.
- [108] M. S. Sodha, A. Kumar, et Govino, « Solar heating of open swimming pools », *Int J Energy Res*, vol. 12, n° 3, p. 511-519, juill. 1988.
- [109] J. C. Lam et W. W. Chan, « Life cycle energy cost analysis of heat pump application for hotel swimming pools », *Energy Convers. Manag.*, vol. 42, n° 11, p. 1299-1306, 2001.
- [110] D. Govaer et Y. Zarmi, « Analytical evaluation of direct solar heating of swimming pools », *Sol. Energy*, vol. 27, n° 6, p. 529-533, 1981.
- [111] M. A. Jamal et J. A. Muaddi, « Solar energy at various depths below a water surface », *Int. J. Energy Res.*, vol. 14, n° 8, p. 859-867, 1990.
- [112] Bowen, « The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface », *Phy Rev*, 1926.
- [113] E. K. Webb, « On estimating evaporation with fluctuating Bowen ratio », *J Geophys Res*, vol. 65, n° 10, p. 3415-3417, oct. 1960.
- [114] E. K. Webb, « Letter Further Note on Evaporation with Fluctuating Bowen Ratio », *J Geophys. SEARCH*, vol. 69, n° 12.
- [115] J. H. Watmuff, W. W. S. Charters, et D. Proctor, « Solar and Wind Induced external Coefficients Salor Collectors », *Rev. Int. Heiotechnique*, 1977.
- [116] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, et A. S. Lavine, Éd., *Principles of heat and mass transfer*, 7. ed., International student version. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- [117] J. Padet, « Convection thermique et massique - Nombre de Nusselt : partie 1 », *Techniques de l'ingénieur Transferts thermiques*. p. 27, 2005.
- [118] M. R. Brambley et S. E. Wells, « Energy-conservation measures for indoor swimming pools », *Energy*, vol. 8, n° 6, p. 403-418, 1983.
- [119] A. V. Rabadiya et R. Kirar, « Comparative Analysis of Wind Loss Coefficient (Wind Heat Transfert Coefficient) For Solar Flat Plate Collector », *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Engeneering*, 2012.
- [120] F. Zuccari, A. Santiangeli, et F. Orecchini, « Energy analysis of swimming pools for sports activities: cost effective solutions for efficiency improvement », *Energy Procedia*, vol. 126, p. 123-130, sept. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.131.
- [121] H. F. Nouanegue, S. Sansregret, B. L. Lostec, et A. Daoud, « Energy model validation of heated outdoor swimming pools in cold weather », p. 6.
- [122] N. Zhang et Z. Wang, « Review of soil thermal conductivity and predictive models », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 117, p. 172-183, juill. 2017, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013.
- [123] « Les andosols de l'île de la Réunion : préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires », p. 198.
- [124] F. Feder et G. Bourgeon, « Updating the soil map of Réunion island: methodology and problems to be overcome », p. 4.

- [125] C. Zebrowski, « Etude d'une climatoséquence dans l'île de la Réunion », n° 314, p. 24, 1975.
- [126] F. Al-Ajmi, D. L. Loveday, et V. I. Hanby, « The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate », *Build. Environ.*, vol. 41, n° 3, p. 235-244, mars 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.01.027.
- [127] M. M. S. El-Din, « On the heat flow into the ground », *Renew. Energy*, p. 18, 1999.
- [128] O. Ozgener, L. Ozgener, et J. W. Tester, « A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 62, p. 473-480, juill. 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.031.
- [129] T. T. Chow, H. Long, H. Y. Mok, et K. W. Li, « Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variables », *Energy Build.*, vol. 43, n° 12, p. 3568-3575, déc. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.026.
- [130] R. da S. Brum, J. Vaz, L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos, et L. A. Isoldi, « A new computational modeling to predict the behavior of Earth-Air Heat Exchangers », *Energy Build.*, vol. 64, p. 395-402, sept. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.05.032.
- [131] « Conserving energy and heating your swimming pool with solar energy by Energy Efficiency and Renewable Energy Clearinghouse (U.S.) (z-lib.org).pdf ». U.S. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, juillet 2000.
- [132] 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.
- [133] J. L. A. Francey et P. Golding, « The optical characteristics of swimming pool covers used for direct solar heating », *Sol. Energy*, vol. 26, n° 3, p. 259-263, 1981.
- [134] J. L. A. Francey, P. Golding, et R. Clarke, « Low-cost solar heating of community pools using pool covers », *Sol. Energy*, vol. 25, n° 5, p. 407-416, 1980.
- [135] R. Waché *et al.*, « Selective light transmission as a leading innovation for solar swimming pool covers », *Sol. Energy*, vol. 207, p. 388-397, sept. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.022.
- [136] J. L. A. Francey et P. Golding, « The weathering of solar pool covers », *Sol. Energy*, vol. 26, n° 3, p. 237-242, 1981.
- [137] T. Auer, « Assessment of an indoor or outdoor swimming pool », Energietechnik GmbH, 1996.
- [138] M. M. Shah, « New Correlation for Prediction of Evaporation from Occupied Swimming Pools », vol. 119, p. 7, 2013.
- [139] C. C. Smith, G. O. G. Löf, et R. W. Jones, « Rates of Evaporation from Swimming Pools in Active Use », *ASHRAE Trans.*, p. 10.
- [140] M. M. Shah, « Prediction of evaporation from occupied indoor swimming pools », *Energy Build.*, vol. 35, n° 7, p. 707-713, 2003.
- [141] M. Jordaan et R. Narayanan, « A numerical study on various heating options applied to swimming pool for energy saving », *Energy Procedia*, vol. 160, p. 131-138, févr. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.128.
- [142] Y. Li, Z. Ding, M. Shakerin, et N. Zhang, « A multi-objective optimal design method for thermal energy storage systems with PCM: A case study for outdoor swimming pool

- heating application », *J. Energy Storage*, vol. 29, p. 101371, juin 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101371.
- [143] W. Haaf, U. Luboschik, et B. Tesche, « Solar swimming pool heating: description of a validated model », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 41-46, 1994.
- [144] E. T. Santos, L. E. Zárata, et E. M. D. Pereira, « Hybrid thermal model for swimming pools based on artificial neural networks for southeast region of Brazil », *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, n° 8, p. 3106-3120, juin 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2012.12.026.
- [145] D. Chen et H. W. Chen, « Using the Köppen classification to quantify climate variation and change : An example for 1901-2010. », 2013. Consulté le: 21 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://hanschen.org/koppen#data>
- [146] M. S. Sodha et others, « Thermal model of solar swimming pools », *Energy Convers. Manag.*, vol. 23, n° 3, p. 171-175, 1983.
- [147] « CGR 3 pyrgéomètre - Kipp & Zonen ». <https://www.kippzonen.com/Product/120/CGR3-Pyrgeometre#.YuwqOOzP3IU> (consulté le 5 août 2022).
- [148] H. E. Sweers, « A nomogram to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature », *J. Hydrol.*, vol. 30, n° 4, p. 375-401, 1976.
- [149] C. J. Marciano et G. E. Harbeck, « Mass-Transfer Studies, water-loss investigations, Lake Hefner studies. In Tech. », *Geol. Surv. Prof. Pap.*, vol. 1, n° 229, p. 46-70, 1952.
- [150] C. C. Smith, R. W. Jones, et G. O. G. Lsf, « Energy requirements and potential savings for heated indoor swimming pools », p. 11.
- [151] J. P. Delgado Marín et J. R. Garcia-Cascales, « Dynamic simulation model and empirical validation for estimating thermal energy demand in indoor swimming pools », *Energy Effic.*, vol. 13, n° 5, p. 955-970, juin 2020, doi: 10.1007/s12053-020-09863-7.
- [152] *Arrêté du 26 mai 2021 modifiant l'arrêté du 7 avril 1981 modifié relatif aux dispositions techniques applicables aux piscines*. Consulté le: 21 décembre 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/download/file/tnDkLomDEXzUnDetotFJNc_OUQhfJxi51qxhpxaJwr8=/JOE_TEXTE
- [153] « Concevoir et dimensionner un bac tampon de piscine | LinkedIn ». <https://www.linkedin.com/pulse/concevoir-et-dimensionner-un-bac-tampon-de-piscine-kirchhoffer/> (consulté le 15 octobre 2019).
- [154] « Données Publiques de Météo-France - Données de modèle atmosphérique global ». https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=130&id_rubrique=51 (consulté le 2 septembre 2022).
- [155] F. Feder, « Soil map update: Procedure and problems encountered for the island of Réunion », *CATENA*, vol. 110, p. 215-224, nov. 2013, doi: 10.1016/j.catena.2013.06.019.
- [156] « CLIMAT LA REUNION par Météo-France - Normales et relevés sur la Réunion ». <https://meteofrance.re/fr/climat> (consulté le 21 juillet 2022).
- [157] « Piscines municipales », *Ville de Saint-Paul*. <https://www.mairie-saintpaul.re/piscines-municipales/> (consulté le 5 août 2022).

- [158] Météo-France, « PLUVIOMÉTRIE ET TEMPÉRATURES À LA RÉUNION par Météo-France ». <https://meteofrance.re/fr/climat/pluviometrie-et-temperatures-la-reunion> (consulté le 27 juillet 2022).
- [159] « Google Maps », *Google Maps*. <https://www.google.fr/maps/place/Piscine+municipale+de+Bois+de+N%C3%A8fles/@-21.132922,55.2215283,91585m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x218285ecf6581bd1:0xb769ff57ba61353d!8m2!3d-20.999748!4d55.3290996> (consulté le 21 juillet 2022).
- [160] « ETT : Climatisation, chauffage, déshumidification, retail, piscine, industrie », *ETT - Energie Transfert Thermique*. <https://www.ett-hvac.com/> (consulté le 5 août 2022).
- [161] « iMETOS 3.3 », *METOS by Pessl instruments*. <https://metos.at/es/imetos33/> (consulté le 5 août 2022).
- [162] M. Li, Y. Jiang, et C. F. M. Coimbra, « On the determination of atmospheric longwave irradiance under all-sky conditions », *Sol. Energy*, vol. 144, p. 40-48, mars 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.01.006.
- [163] Y. A. Çengel et A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*, 5th edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [164] « ASHRAE Fundamental 2017 (SI Units) ». ASHRAE, 2017.
- [165] B. K. Sarker, A. B. M. O. Islam, F. Ahmed, et A. H. Bhuiyan, « Optical and Dielectric Properties of PVC, PVA and Their Blends », *Polym. Polym. Compos.*, vol. 14, n° 7, p. 741-746, oct. 2006, doi: 10.1177/096739110601400708.
- [166] A. Limane, H. Fellouah, et N. Galanis, « Three-dimensional OpenFOAM simulation to evaluate the thermal comfort of occupants, indoor air quality and heat losses inside an indoor swimming pool », *Energy Build.*, vol. 167, p. 49-68, mai 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.037.
- [167] A. Limane, H. Fellouah, et N. Galanis, « Simulation of airflow with heat and mass transfer in an indoor swimming pool by OpenFOAM », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 109, p. 862-878, juin 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.030.
- [168] Z. Li et P. Heiselberg, « CFD Simulations for Water Evaporation and Airflow Movement in Swimming Baths », Institutet for Bygningsteknik: Aalborg Universitet., 2005.
- [169] F. Pouranian, H. Akbari, et S. M. Hosseinalipour, « Performance assessment of solar chimney coupled with earth-to-air heat exchanger: A passive alternative for an indoor swimming pool ventilation in hot-arid climate », *Appl. Energy*, vol. 299, p. 117201, oct. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117201.
- [170] J. Liu, Y. Aizawa, et H. Yoshino, « Experimental and numerical study on indoor temperature and humidity with free water surface », *Energy Build.*, vol. 37, n° 4, p. 383-388, avr. 2005, doi: 10.1016/j.enbuild.2004.07.008.
- [171] T. B. Nitter et K. v.H. Svendsen, « Modelling the concentration of chloroform in the air of a Norwegian swimming pool facility-A repeated measures study », *Sci. Total Environ.*, vol. 664, p. 1039-1044, mai 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.113.
- [172] L. Tsamba, O. Correc, et A. Couzinet, « +Chlorination by-products in indoor swimming pools: Development of a pilot pool unit and impact of operating parameters », *Environ. Int.*, vol. 137, p. 105566, avr. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105566.

[173] S. You, W. Li, T. Ye, F. Hu, et W. Zheng, « Study on moisture condensation on the interior surface of buildings in high humidity climate », *Build. Environ.*, vol. 125, p. 39-48, nov. 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.08.041.

Annexe 1 : Matériel de mesure expérimentale sur le site de bois de nêfles

	Exp	McMillan (10m)	McMillan (3m)	Rohwer	Smith1 (1994)	Richter1	Richter2	ISO TC 180	Raimundo	Shah	Molineaux	Watmuff	Tang	Jodat	Pauken	Inan
Periode a	0.28	0.26	0.22	0.28	0.23	0.33	0.33	0.19	0.3	0.11	0.14	0.17	0.27	0.23	0.22	0.11
Periode b	0.16	0.18	0.15	0.25	0.2	0.24	0.22	0.16	0.26	0.1	0.08	0.09	0.21	0.2	0.18	0.09
Periode c	0.16	0.2	0.17	0.26	0.21	0.27	0.25	0.17	0.27	0.1	0.1	0.11	0.22	0.21	0.19	0.1
Periode d	0.19	0.22	0.19	0.26	0.21	0.3	0.28	0.17	0.28	0.11	0.12	0.14	0.24	0.21	0.2	0.1
Periode e	0.31	0.31	0.27	0.3	0.25	0.38	0.39	0.2	0.33	0.12	0.17	0.21	0.3	0.25	0.24	0.12
Periode f	0.31	0.36	0.31	0.35	0.29	0.43	0.45	0.24	0.38	0.14	0.24	0.29	0.34	0.3	0.29	0.14
Periode g	0.12	0.22	0.18	0.29	0.23	0.29	0.27	0.19	0.31	0.12	0.12	0.14	0.24	0.24	0.22	0.1
Periode h	0.23	0.22	0.19	0.26	0.21	0.29	0.28	0.17	0.28	0.1	0.11	0.13	0.24	0.21	0.19	0.1
Periode ci	0.23	0.2	0.17	0.25	0.2	0.26	0.24	0.16	0.27	0.1	0.09	0.11	0.22	0.2	0.19	0.1
Periode j	0.26	0.24	0.21	0.27	0.22	0.31	0.3	0.18	0.3	0.11	0.13	0.15	0.25	0.22	0.21	0.11
Periode k	0.26	0.22	0.19	0.27	0.22	0.29	0.27	0.18	0.29	0.11	0.11	0.13	0.24	0.22	0.2	0.1
Periode l	0.28	0.21	0.18	0.28	0.23	0.29	0.26	0.18	0.3	0.11	0.11	0.12	0.24	0.23	0.21	0.1
Periode m	0.19	0.27	0.23	0.29	0.24	0.34	0.34	0.19	0.31	0.11	0.15	0.18	0.27	0.24	0.22	0.11
Periode n	0.18	0.23	0.19	0.28	0.23	0.3	0.28	0.18	0.3	0.11	0.12	0.14	0.24	0.23	0.22	0.1
Periode o	0.24	0.22	0.19	0.27	0.22	0.29	0.27	0.18	0.29	0.11	0.11	0.12	0.24	0.22	0.21	0.1
Periode p	0.16	0.23	0.2	0.27	0.22	0.3	0.29	0.18	0.29	0.11	0.12	0.14	0.25	0.22	0.21	0.1
Periode q	0.13	0.19	0.16	0.25	0.2	0.25	0.23	0.16	0.27	0.1	0.08	0.09	0.21	0.2	0.19	0.09
Periode r	0.19	0.24	0.21	0.28	0.23	0.32	0.31	0.18	0.3	0.11	0.13	0.15	0.26	0.23	0.21	0.11
Periode s	0.19	0.24	0.2	0.3	0.25	0.32	0.29	0.2	0.33	0.12	0.12	0.14	0.26	0.25	0.24	0.11
Periode t	0.3	0.24	0.21	0.29	0.23	0.32	0.3	0.19	0.31	0.11	0.12	0.15	0.26	0.24	0.22	0.11
Periode u	0.26	0.24	0.2	0.28	0.23	0.31	0.3	0.18	0.3	0.11	0.12	0.14	0.25	0.23	0.21	0.11
Periode v	0.23	0.24	0.21	0.28	0.23	0.32	0.31	0.18	0.3	0.11	0.13	0.15	0.26	0.23	0.21	0.11
Periode w	0.28	0.28	0.24	0.3	0.25	0.35	0.35	0.2	0.33	0.12	0.16	0.19	0.28	0.25	0.24	0.12
Periode x	0.22	0.27	0.23	0.31	0.25	0.35	0.34	0.2	0.33	0.12	0.15	0.18	0.28	0.26	0.24	0.12
Periode y	0.23	0.24	0.21	0.3	0.24	0.32	0.3	0.19	0.32	0.12	0.14	0.16	0.26	0.25	0.23	0.11
Periode z	0.3	0.31	0.27	0.31	0.26	0.39	0.39	0.21	0.34	0.12	0.2	0.24	0.31	0.26	0.25	0.12

Annexe 2 : Matériel de mesure expérimentale sur le site de bois de nêfles

Station météo : Imeteos 3.3 par PESSL et pyrgéomètre installé sur le poteau d'éclairage à côté de la piscine (environ 10 m de hauteur)

Mesure	Capteur	Précision	Unité	Plage de valeur
Température ambiante	hygroclip, PT1000 1/3 de DIN Class B	Class B, à 23°C et 10, 35, 80 % rh \pm 0.1 °C, 0.1°C / année	°C	-100...200 °C
Humidité relative ambiante	Hygroclip, ROTRONIC Hygromer® IN-1	à 23°C et 10, 35, 80 % rh \pm 0.8% rh, < 1 % rh / année	%	0...100 %
Vitesse et direction du vent	Anémomètre sonique bidimensionnel : ultrasons meter group atmos 22	Vitesse du vent : 0.3 m/s or 3%	Vitesse du vent : m/s , Direction du vent : °	Vitesse du vent : 0-30 m/s , Direction du vent : 0°-359°
Rayonnement avec le ciel	Pyrgéomètre, CGR3 Kipp & zonen, 4.5/42 μ m		W/m ²	4.5/42 μ m
Rayonnement global	Pyranomètre, photodiode, LI-200SZ	Erreur absolue max. 5%, typiquement 3%, 2% de dérive sur 2 ans d'utilisation	W/m ²	300-1100 nm
Pluie	Pluviomètre a bascule	\pm 5%	mm	Max : 12 mm / minute

Mesure sur le circuit de filtration et de chauffage du bassin

Mesure	Type de capteur	Précision	Position	Unité	Plage de valeur
niveau dans le bac tampon	Capteur de niveau à pression avec tube de relaxation : LMP 307 option 2	full scale output : 0,1%	Dans le bac tampon	mm	0/2.5 m
nombre de nageurs	Camera				
température de l'eau du bassin	Pt100 3 fils classe B 1/10 DIN, (-50/+250) de marque ecothermes mesures de Type 81VI dans un doigt de gant en inox et un convertisseur de tension en 4-20 mA TiXo2 de la marque Georgin	classe B 1/10 DIN	Canalisation d'analyse de l'eau (à côté du bac tampon)	°C	10/50 °C
température de l'eau à l'entrée de la PAC			Canalisation amont de la PAC	°C	10/50 °C
température de l'eau à la sortie de la PAC			Canalisation aval de la PAC	°C	10/50 °C
température de l'eau de ville			Canalisation générale eau de ville	°C	10/50 °C
Débit dans la PAC	Marque sectoriel Débit mètre électromagnétique DN80	+/- 0,2% (vitesse entre 0,5 et 10 m/s), 1% (vitesse entre 0,1 et 0,5 m/s)	Canalisation PAC	m ³ /h	9/100 m ³ /h
Débit général	Débit mètre ultra sonique / à palette		Canalisation générale	m ³ /h	0/999 m ³ /h
Puissance électrique consommée par la PAC	Capteur de puissance, Type EM21 72D de marque Carlo Gavazzi		Tableau électrique		

Annexe 3 : Débit d'eau évaporé

Période	Heure de début	Heure de fin	Variation du niveau (mm)	Debit d'eau (L/h/m ²)	Debit évaporation (L/h/m ²)	T _a (°C)	H (%)	v m/s
a	13/09 23:04	14/09 02:47	82,6	0,64	0,28	16,9	74	1,9
b	09/10 22:36	10/10 02:13	66	0,53	0,16	19,8	83	0,9
c	11/10 00:30	11/10 04:03	64,7	0,53	0,16	19,1	75	1,2
d	15/10 00:11	15/10 03:53	71,3	0,56	0,19	19,7	71	1,5
e	21/10 22:57	22/10 02:38	85,6	0,67	0,31	18,7	70	2,4
f	01/11 00:07	01/11 03:44	85,1	0,68	0,31	16,1	61	2,3
g	01/11 07:32	01/11 11:05	60,1	0,49	0,12	20,1	61	1
h	09/09 00:41	09/09 04:18	74,5	0,59	0,23	18,8	75	1,6
i	09/09 22:45	10/09 02:25	75,3	0,59	0,23	18,2	82	1,1
j	11/09 00:42	11/09 04:17	77,7	0,62	0,26	18,5	69	1,6
k	11/09 22:41	12/09 02:24	81	0,63	0,26	18,2	76	1,3
l	12/09 17:22	12/09 21:07	83,7	0,64	0,28	19,2	78	1,1
m	02/10 01:08	02/10 04:56	73,2	0,55	0,19	17,3	71	1,9
n	07/10 23:32	08/10 03:23	73,2	0,55	0,18	19,5	73	1,3
o	08/10 23:34	09/10 03:35	84,9	0,61	0,24	19,8	67	1,4
p	10/10 02:13	10/10 05:58	67,7	0,52	0,16	18,9	76	1,5
q	11/10 19:03	11/10 22:50	65,5	0,5	0,13	20,4	81	1,1
r	12/10 02:29	12/10 06:19	73,7	0,55	0,19	18,8	72	1,7
s	13/10 01:45	13/10 05:51	79	0,55	0,19	19,4	68	1,2
t	13/10 22:02	14/10 01:54	89,7	0,67	0,3	19,6	73	1,5
u	15/10 22:25	16/10 02:06	79,4	0,62	0,26	19,1	76	1,6
v	17/10 00:19	17/10 03:59	75,7	0,59	0,23	18,4	75	1,7
w	21/10 00:49	21/10 04:29	81,7	0,64	0,28	18,3	68	1,9
x	26/10 00:27	26/10 04:27	80,9	0,58	0,22	18	71	1,6
y	31/10 01:27	31/10 05:18	78,8	0,59	0,23	16,1	72	1,4
z	02/11 01:55	02/11 05:31	82,5	0,66	0,3	16	59	2,3

Annexe 4 : The determination of the Evaporation model for an outdoor swimming pool: the case of tropical climate.

The determination of the Evaporation model for an outdoor swimming pool: the case of tropical climate.

Maïté BERNHARD^{a,b}, Olivier MARC^a, Emmanuel QUILICHINI^b, Jean CASTAING-LASVIGNOTTES^a

^aPIMENT Laboratory, 117 rue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon, REUNION ISLAND, France

^bSunny Shark SAS, 10 Rue de Daniel Pongerard, 97419 La Possession, REUNION ISLAND, France

Abstract

Public swimming pools have an important energy consumption that is rarely optimized. The long-term objective of the current work is to find the best daily heating strategy to apply to an outdoor swimming pool by simulating its dynamic evolution. One of the most important contributions to the thermal losses of swimming pools is due to water evaporation. This phenomenon occurring in outdoor swimming pools has been experimentally investigated and compared to the various models available in the scientific literature. The experimentation took place on La Reunion, a French overseas department located in the Indian Ocean close to Mauritius. It appeared in the work that the height of the wind speed measurement had a high impact on the results and that a correction had to be taken into account to increase the zone of confidence.

I. Introduction

Human activity since the end of the XIX siècle has caused an increase of around 1°C and is likely to cause a growth of 1.5°C between 2030/2050 with the current trend according to the GIEC report of 2018 [1]. The Parliament of the European council edited guidelines to reduce greenhouse gas emissions in the territory by 40% by 2030 [2]. Two directions have to be developed: the use of decarbonized energy sources and the diminution of the final consumption. By the same guideline [2] the European Union indicates that almost 50% of the energy consumption is eventually used for thermal applications.

Public swimming pools have an important energy consumption (heating, dehumidification, and hot water production): around $2800 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ [3] in France. In the Mediterranean climate, the consumption is evaluated at 4300 kWh and in the continental climate the consumption can reach $5200 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ [4]. Different ways are possible to increase on the efficiency of swimming pool facilities: to improve the building and heating system efficiency of swimming pools [5], to use covers [6], and to optimize the cover characteristics [7], to regulate the installations [8]. All these possibilities can be applied simultaneously to develop synergies. The long-term objective of the current work is to find the best daily heating strategy to apply to an outdoor swimming pool by simulating its dynamic evolution. The ability to attain the target depends on the quality of the predictive model, taking into account all the significant following elements, that are schematically present in Figure 82:

- Heat losses: evaporation, convection between water and ambient air, conduction between water and the soil through the walls, long waves radiative heat transfer;
- Heat gain from solar radiation or auxiliary systems (heat pump or solar panels for instance);
- Activity: number of people in the water and human behaviour (sport or pleasure, regular use of the thermal cover protection...).

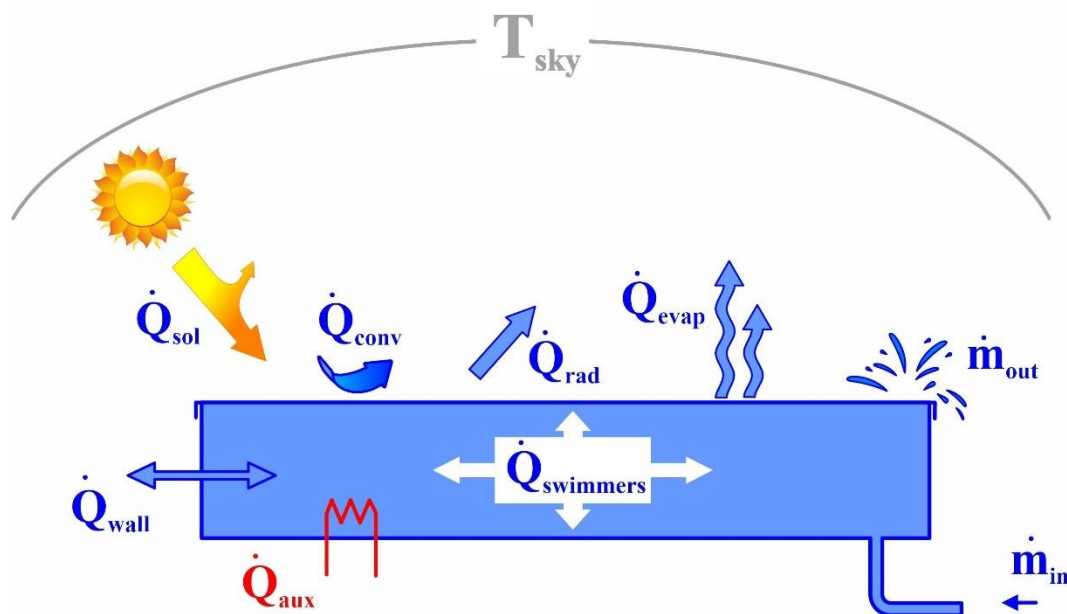


Figure 82: schematic diagram of the heat and mass exchanges between the swimming pool and the environment

The evaporation phenomenon is the most intense and is generally responsible for 35% to 73% [4], [9] of heat losses for outdoor swimming pools and therefore of the heat consumed to

maintain a comfortable temperature of water (28°C in our case). Since the middle-term objective of this work is to simulate the dynamic behaviour of the pool, attention is first paid to evaporation. Lots of studies have been done in this area and the first part of this work consists in presenting the majority of models encountered in the literature. The next part presents the experimentation the installation, the sensors and the measures being used. These latter have been obtained on a real swimming pool located on Reunion Island, a French overseas department situated in the Indian Ocean close to Mauritius and Madagascar. The last one is the comparison between simulation and experiments.

II. Literature on evaporation modelling

a. A little history

Dalton is the first Author, in 1803, to have established a correlation linking the amount of water being evaporated to the difference between saturation pressure at the water temperature and the partial water pressure in the ambient air [10]. This was mainly applied to free-water surfaces in the context of agriculture (lakes or irrigation tanks), hydroelectric dams or climate studies. In 1870/1880s, other works were conducted, following an empirical approach to investigate the influence of altitude and wind speed on the evaporation process [11], [12], [13], [14]. Later on, in parallel to research activity in the field of convection, Bowen (1926) published a theoretical analysis linking those two phenomena [15]. He demonstrated that the ratio between both was leading to a constant coefficient c represented by the following equation:

$$\frac{\dot{Q}_{cov}}{\dot{Q}_{evap}} = c P_{atm} \frac{(T_w - T_a)}{(P_{sat}(T_w) - P_v)} \quad (1.1)$$

The order of magnitude for c identified by Bowen (0.000605) was confirmed later, in particular by Webb [16], [17].

The investigation relative to swimming pools, started in the 1970s by authors like Root [18] and Czarnecki [19], but most of the works describing the role of evaporation on the thermal and water impact on pools [9], [20]–[22] was really developed in the 1990s. Since that time, lots of reviews appeared in the 2000s, focusing on various conditions such as: indoor [23] and outdoor pools [9], [24], occupied [25] and unoccupied pools [24] and even nuclear ones [26]. According to this and more recent work from Shah [27] and Sartori [28], [29] it appears a lack of consensus to determine the model to apply whatever the context and the conditions, in particular, in the case of tropical climate.

Since our goal is to find the best model to apply in our case (outdoor pool summited to tropical climate), a non-exhaustive list of models, we intend to choose from, is presented hereafter.

b. Various models of evaporation

Following works from Dalton and Bowen, a great number of models have appeared in the literature over the years and can be grouped into a family whose generic equation is given by:

$$\dot{q}_{evap} = h_{evap} (P_{sat}(T_w) - P_v) \quad (1.2)$$

Even if the h coefficient was considered constant in the first papers, it appeared that the air velocity was playing an important role in the evaporation process [11], [12], [13], [14]. Lots of models integrate this behaviour in a specific equation whose general form is given by:

$$h_{evap} = a v^n + b \quad (1.3)$$

And where v stands for air velocity and a, n and b are coefficients generally identified thanks to experiments. As an example, Table 1 summarises a dozen of cases, among which very few have an exponent n different from 1. In the case where the air velocity reaches 0 m.s⁻¹, h_{evap} becomes equal to b, corresponding to free convection, illustrated in Table 1 by values of the same order of magnitude. The last information is the height where the wind velocity is measured and will be discussed in the last part.

Table 1: parameters of the equation (1.3) identified by different authors

Name	a	b	n	Ref	z (m)
McMillan (10 m)	0.0182	0.044	1	[28]	10
McMillan (3 m)	0.025	0.036	1	[28]	3
Govind	0.0494	0.0741	1	[28]	5
Taga	0.001296	0.088403	1	[28]	0.3
Almanza	0.03721	0	1	[21], [28]	0.3
Rohwer	0.0583	0.0803	1	[28], [30], [31]	0.3
Smith	0.0669	0.0638	1	[24], [28]	0.3
Richter1	0.05652	0.04229	0.5	[20]	2
Richter2	0.05088	0.04523	0.84	[20]	2
ISO TC 180	0.0669	0.05058	1	[20]	0.3
Raimundo	0.07419	0.08567	1	[31], [32]	0.3

Recently, Sartori [28], [33] proposed a model that considers the pool length. The equation form remains similar to the general equation (1.2):

$$\dot{q}_{evap} = \frac{(0.00407 v^{0.8} l^{-0.2} - 0.01107 l^{-1})}{P_{atm}} (P_{sat}(T_w) - P_v) \quad (1.4)$$

This model has a second feature, the rate of evaporation without wind becomes negative and the equation cannot be considered valid in this case.

Probably for accuracy increase, few authors propose a new version (1.5) of the equations (1.2) and (1.3) with much more coefficients. Table 2 summarised the above-mentioned coefficients.

$$\begin{cases} \dot{q}_{evap} = h_{evap} (P_{sat}(T_w) - P_v)^n \\ h_{evap} = 2.778 \cdot 10^{-7} (b + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3) L_{evap} \\ n = n_0 + n_1 v + n_2 v^2 \end{cases} \quad (1.5)$$

Table 2: parameters of the equation (1.5) identified by different authors

Name	a ₁	a ₂	a ₃	b	n ₀	n ₁	n ₂	Ref	z (m)
Inan	0.000784	0	0	0.00028	0.695	0	0	[32], [34]	0.3
Tang	0.24644	0	0	0.2253	0.82	0	0	[32], [35]	0.55
Pauken	27.2 · 10 ⁻⁶	6.92 · 10 ⁻⁶	0	20.56 · 10 ⁻⁶	1.22	-0.19	0.038	[32], [36]	0.3
Jodat	13.38 · 10 ⁻⁵	5.039 · 10 ⁻⁵	9.062 · 10 ⁻⁵	6.289 · 10 ⁻⁵	1.186	-0.132	0.009	[30], [32]	0.3

Another set of equations takes into account the difference in humidity ratio between saturated air at the water temperature and the air above the pool.

The one presented by Molineaux [9], [22], [28], [32] in 1994 gives :

$$\begin{cases} \dot{q}_{evap} = \frac{h_{conv} L_{evap}}{C_{p,a}} (W_{sat}(T_w) - W_a) \\ h_{conv} = (3.1 + 2.1 v) \end{cases} \quad (1.6)$$

As previously, the wind speed is also considered in the coefficient of exchange. This equation has also been used by Watmuff [28] with another h coefficient : $h_{conv} = 2.8 + 3.0 v$

The one from Shah [29], [32], [37], that has been developed in early 2000, is written as :

$$\begin{cases} \dot{q}_{evap} = \max(\dot{q}_{evap1}, \dot{q}_{evap2}, \dot{q}_{evap3}) \\ \dot{q}_{evap1} = \frac{35 \rho_{sat}(T_w) (\rho_a - \rho_{sat}(T_w))^{1/3}}{3600} (W_{sat}(T_w) - W_a) \\ \dot{q}_{evap2} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3600} (P_{sat}(T_w) - P_v) \\ \dot{q}_{evap3} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3600} \left(\frac{v}{0,12} \right)^{0,8} (P_{sat}(T_w) - P_v) \end{cases} \quad (1.7)$$

The first equation predicts evaporation due to free convection. The second has been developed by the author for an indoor swimming pool with forced ventilation, where the free water surface

is under a small constant airflow. The third is for the case where variable wind speed, is considered corresponding generally to outdoor conditions.

c. Analysis of the model of the literature

To study the impact of the model on evaporation prediction, all the previous models have been compared, for constant given conditions : ambient air temperature of 25°C, relative humidity of 60%, a wind speed of 2 m/s and a water temperature of 28°C. It can be seen in Figure 83, that the evaporation rate goes, in the studied cases from 0.1 to 0.7 l.h⁻¹.m⁻² without any particular tendency. As a consequence, setting up experimentation reveal necessary. The following part presents the experimentation developed to identify the model.

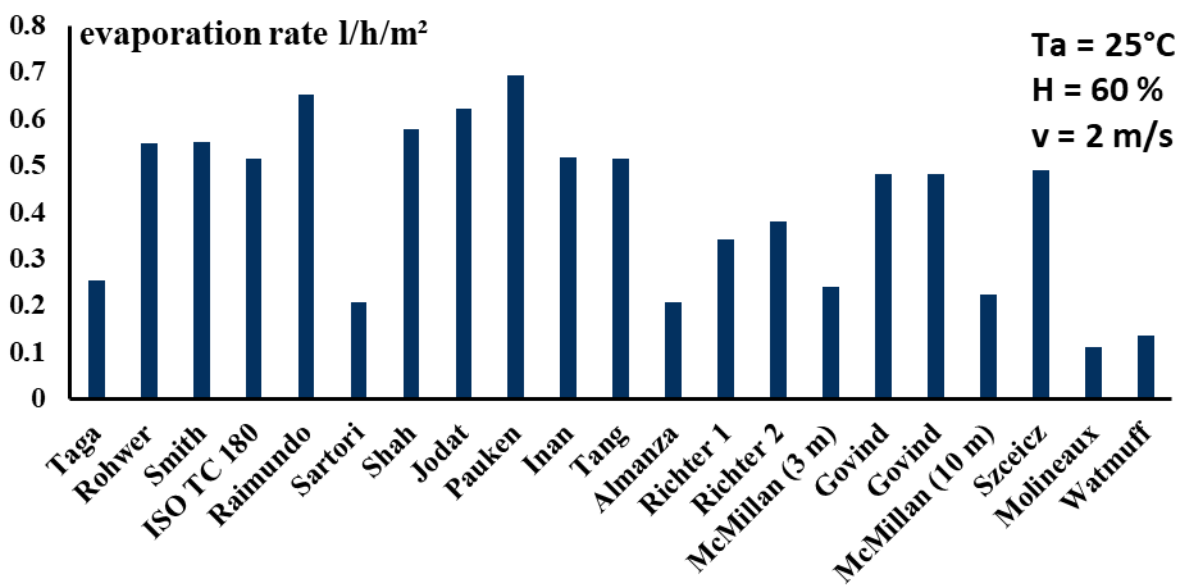


Figure 83: Simulated evaporation rate for different modes in given conditions.

III. Experimental setup and results

Thanks to the previous literature review, both models and experiments have been looked at in this paper and a few conclusions have been set up. Firstly there exists a lot of different cases that have been experimented and among which: lakes [28], [38], swimming pools [39], [40] and pounds [28], [41], [42]. Secondly, the experimental conditions can be very different such as outdoor and indoor pools [28], [38], [39] or tests in laboratories [23], [41]. For instance, in the last case, temperature, air humidity and wind speed are controlled, while this is absolutely not the case in real situations.

Depending on the conditions, evaluating the evaporation rate is done through several meanings:

- water level survey (optical or pressure sensors). This can be done at very different scales, from ponds located outside or in laboratories [38], [42] to swimming pools [39], [24]. It requires generally a long period (some hours) of test to overcome uncertainty due to very limited variation of height (a few mm) (i.e. when the evaporating surface is important or in the case of little waves appearing due to wind or human activity).
- weight survey. This can be done only for a little amount of water as in the case of ponds in laboratories [41].
- heat and mass balance on the air. This can be done only for indoor swimming pools and wind tunnels, where temperature and humidity are perfectly well measured [43]. In this case, particular attention has to be paid to the influence of showers and pool deck evaporation on the global balance.
- heat balance on the water. This method evaluates the indirect effect of evaporation on the water temperature due to its endothermal effect. Unfortunately, it supposes that the other heat exchanges are perfectly known [40] and this is rarely the case.
- filling of water estimation. This method evaluates the amount of water required to maintain a constant level of water in the pond during the experimental period [10]. It applies mainly in the case of laboratories and reveals complicated to set up in outdoor situations, for lakes or swimming pools for instance.

a. Experimental setup

The swimming pool under investigation here is a 12.5 m x 25 m outdoor model located on Reunion Island (latitude: S 20° 59' 59", longitude: E 55° 19' 45"). The swimming pool site is at a height of 470 m and the water temperature is maintained at least above 28°C using a heat pump. This pool is yearly used during the week by pupils of surrounding schools and by public and swimming clubs during the remaining time (holidays, weekends and some evenings).

A weather station located on site allows knowing the air temperature, relative humidity, the direction and intensity of wind as well as rainfall at a height of 10 meters every 10 minutes. Experiment were done in 2020.



Figure 84: The swimming pool used for the experimentation (Saint Paul/ Reunion Island)

The swimming pool under study is an overflowing type and the water leaving the pool is firstly stored in a specific tank (area of 9 m^2 , volume of approximately 15 m^3). The amount of water in this buffer tank decreases as water is consumed (evaporation, splashes, leaks, or carried away by swimmers) until it reaches a low-level limit that triggers the filling of the tank with fresh water from the network. The level of water inside this tank is measured thanks to a pressure level sensor and allows evaluation of the water consumed over time, with a rather good accuracy thanks to the scale effect of the tank surface compared to the pool surface. When done during the night without rain, the decrease of water in the pool is only due to evaporation and leakage and if a cover is implemented on the pool, only leakage can be considered.

b. Measures

Figure 85 represents the water level and the temperature measured in this tank. As expected, the water level decreases during the experimentation, globally from point A to C. The light increase of level between A and B is due to the continuous water quality measurement. This requires a very small receiver whose volume is flushed back by a pump to the storage tank from time to time (here after a period ranging from 3 to 4 hours).

The temperature of the water in the pool is also represented in *Figure 85*. This value is measured by the mean of a Pt100 probe situated between the pool and the buffer tank. A slight increase in temperature (0.3°C) can be observed during the period, due to solar gain.

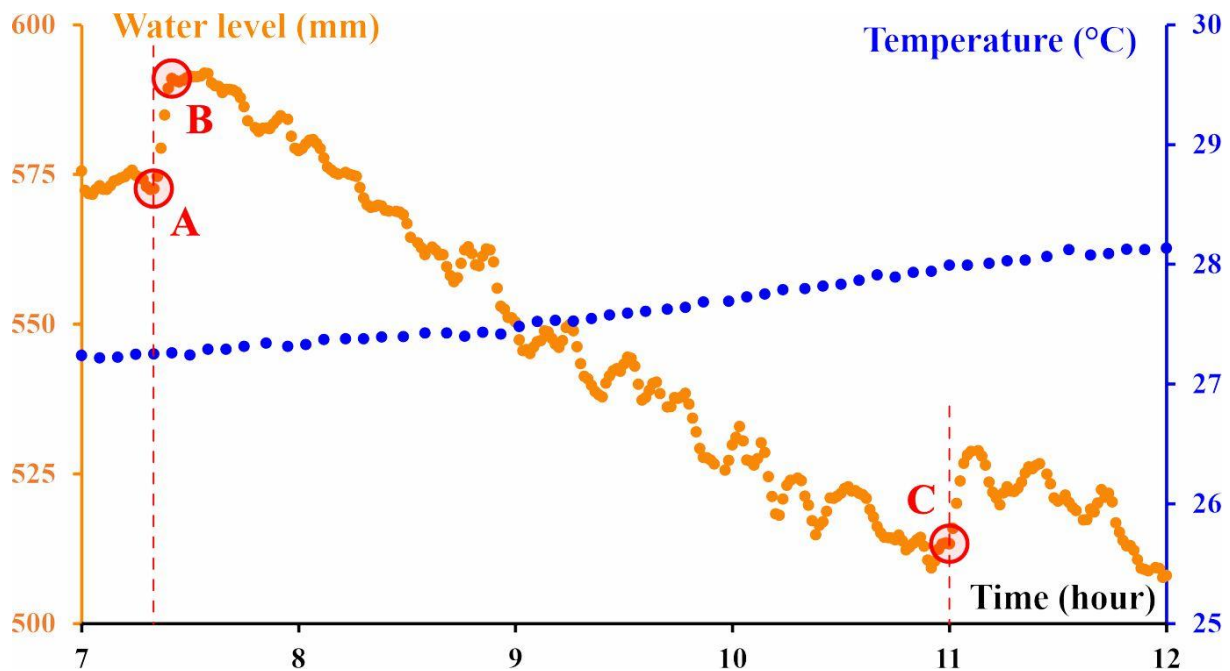


Figure 85: evolution of the water level in the buffet tank and of the pool's water temperature the 1 November 2020

The level difference measured between points A and C in Figure 85, is due to 2 phenomena: water leakage and evaporation. To overcome the influence of evaporation on the leakage evaluation, the water surface has been covered to block the evaporation and four different periods have been selected. The integration of level over time led to the water flow calculation and the corresponding data are summarised in Table 3. From these values, a constant water flow due to leakage of $0.36 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ has been defined (mean value) and kept for the following analysis.

Table 3 : Identified measured leakage

	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4
Date	30/09 0	11/11	11/11	12/11
Beginning time	01:20	01:44	09:54	02:03
End time	04:52	05:50	14:12	05:48
Water flow ($\text{l.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$)	0.41	0.35	0.29	0.40

The experiments on this pool were done from September to December 2020 and among which 24 periods (same as Figure 85) have been selected. These choices have been made considering experiments without:

- rain
- human activity (at night or during off days)
- maintenance

The high number of periods is here to ensure a representative diversity of climate conditions applied to the pool. These conditions are summarised in the annexe in terms of mean temperature, mean relative humidity and mean wind speed calculated over each period. Figure 86 represents these mean conditions that are ranging between 15 to 22 °C for temperature, 60 to 85 % for relative humidity and 1 to 2.5 m/s for wind speed at 10 m. Figure 86 presents the mean evaporation rate (leakage having been subtracted) during those periods, which is ranging between 0.1 to 0.3 l.h⁻¹.m⁻². The relative high dependency of wind speed on evaporation can be clearly observed in Figure 86. After studying the model of evaporation in the literature and measured the evaporation rate on our experimental site, both will be compared in the next part in order to identify the most accurate model.

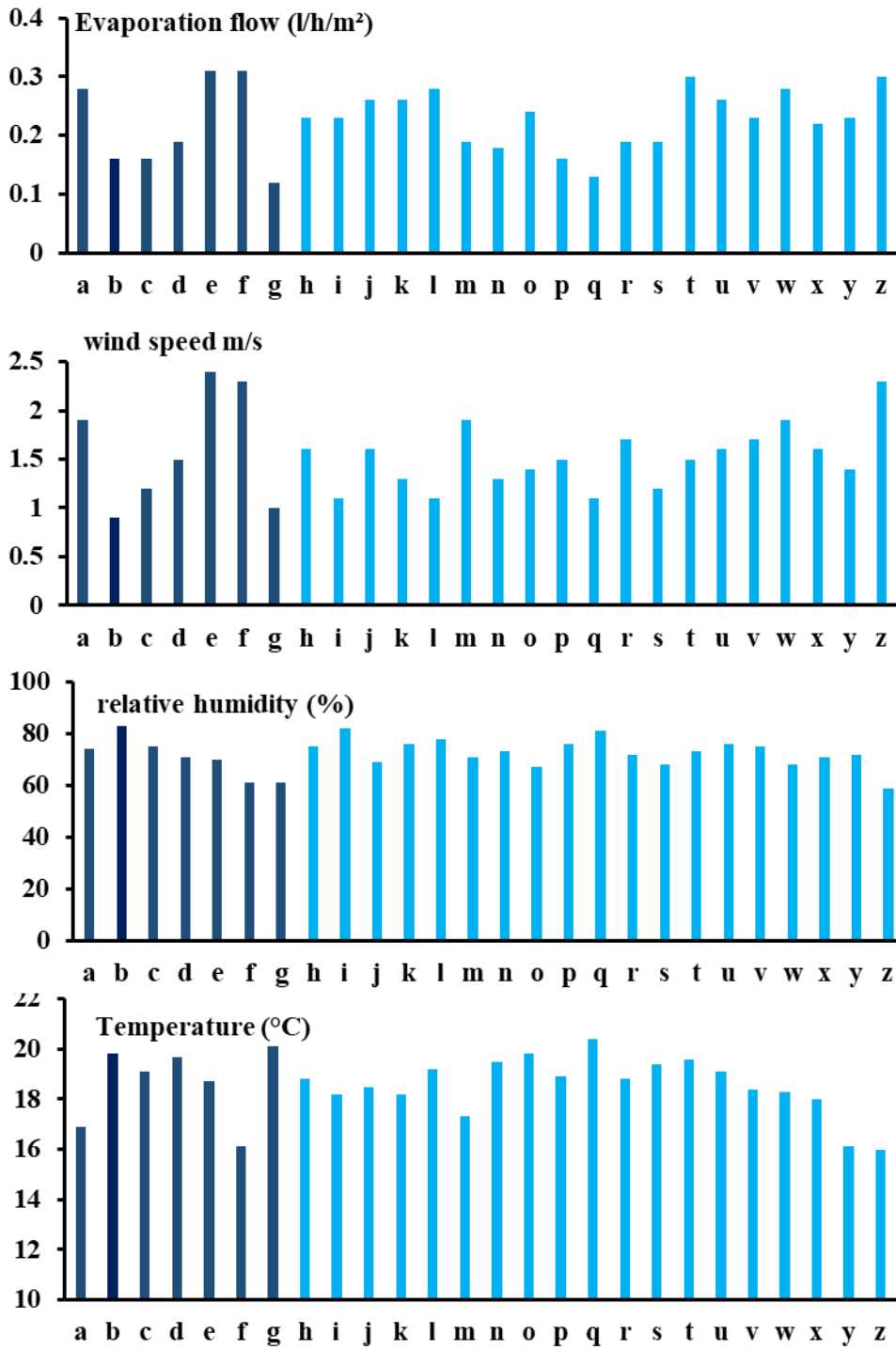


Figure 86: mean evaporation rate, wind speed, air temperature and humidity for the 24 studied experimental periods.

IV. Comparison of the model and the experiments

I. Methodology

To determine the most adapted model of evaporation of the literature, the measured values have been compared to the prediction of the latter. The meteorological data and water temperature are measured every 10 minutes. The evaporated rate is calculated at the same time step and integrated over the period to obtain an amount of water evaporated for each model. The results are compared to the measurement as can be seen in *Figure 87* shows on. The relative error between both has been calculated thanks to the equation (1.8) and is also presented in *Figure 87*.

$$\text{relative error} = \left| \frac{\dot{q}_{\text{evap, model}} - \dot{q}_{\text{evap, experimental}}}{\dot{q}_{\text{evap, experimental}}} \right| \quad (1.8)$$

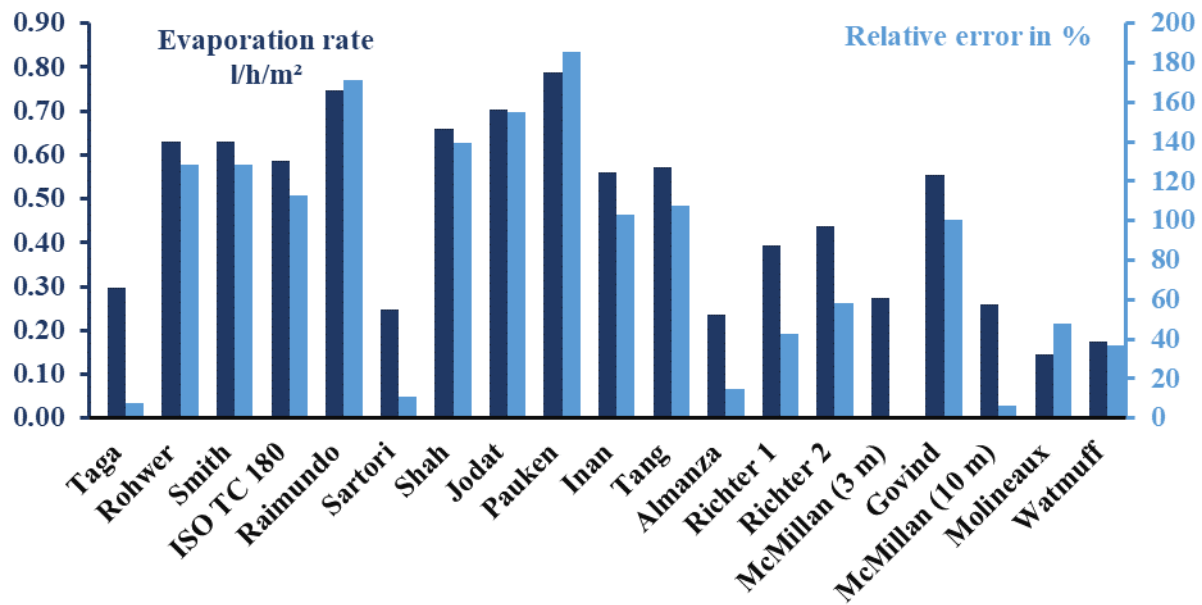


Figure 87: evaporation rate for each model and the relative error to experimental data on the period a

Figure 87 highlights that the relative error goes from 0 to 185 % in function of the model for this particular period and that the models from McMillan, Taga, Almanza and Sartori seems to be the most accurate to predict evaporation during this period. Since, the aim is to do it at any time, the same method has been applied for each period of *Figure 86* (26). To be able to compare the different models, *Figure 88*. Presents the mean relative error for the 26 cases for each model. The range is significant from 19% for McMillan to 205 % for Raimundo. The curve on the same graph represents the height where wind speed is measured. A correlation between the height of the measure and the relative error can be noticed and the highest values are found for

the models developed in a laboratory where the wind speed is measured near the water surface. Szeicz [28], [44] identified the importance of height to measure the wind speed and integrated it into the equation (1.9) :

$$\begin{cases} \dot{q}_{evap} = \frac{\rho_a C_p}{\gamma r_a} (P_{sat}(T_w) - P_v) \\ r_a = \frac{(\ln(z/z_0))^2}{\kappa v} \end{cases} \quad (1.9)$$

Nevertheless, the roughness is taken into account here (0.0001 m) is the one of the water while the direct environment (trees, buildings) has a much deeper impact on the evolution of the wind speed. The corresponding analysis is done in the following part.

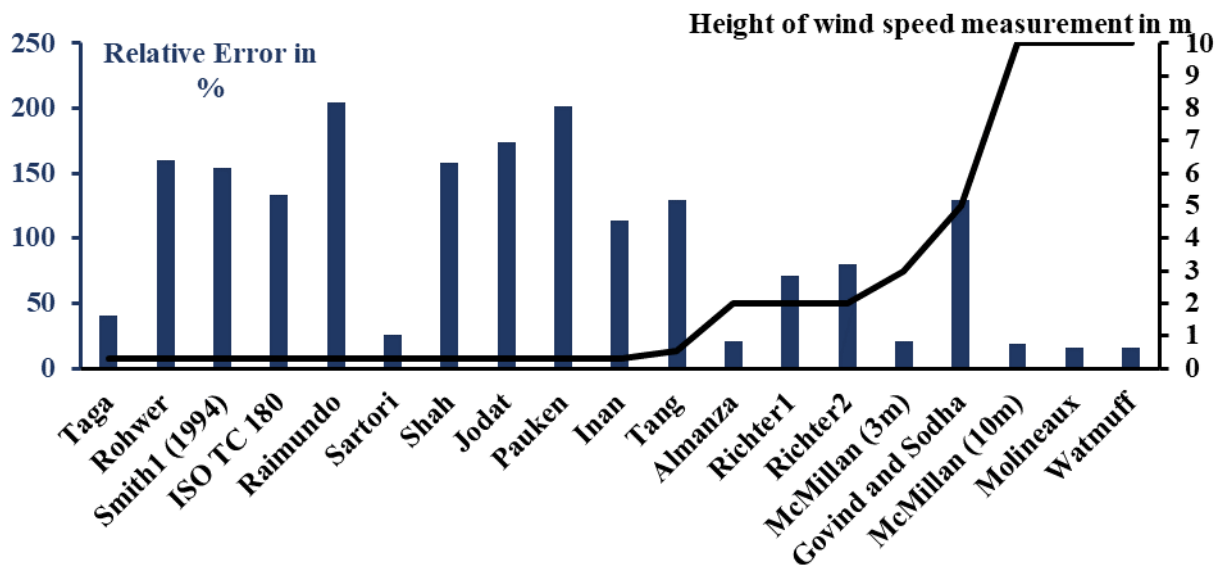


Figure 88: means relative error on the 26 periods for each model and the height of wind measured in the original experimentation.

II. Wind speed height measurement impact

Data from several experimental studies [10], [45], [34] and the analogy of evaporation with convection suggest that wind speed has a significant influence on the rate of evaporation. It has to be mentioned that most of the literature studies suffer from a lack of knowledge concerning the condition in which measures are done, in particular the height [46], [47]. The previous models have been selected in function of the availability of the information.

Hence, two main categories can be defined from the analysis of the literature:

- Laboratory experimentations where the height of the airflow measurement is 0.3 m as in a tunnel for instance. In the case of the lack of the height in laboratory contests, the height of 0.3 m has been used.

- Outdoor experimentation where the height of measure of the wind speed is generally between 1 and 10 m.

The equation (1.10) [48] is used to estimate wind speed from a reference height to another level. The roughness, z_0 , is estimated to be 0.055 m with the scale proposed by Justus and al. [49].

$$\frac{v_z}{v_{10}} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (1.10)$$

The evaporation rate for each model and period has been redone after calculating the wind speed at the height of the wind speed measurements in the original experimentation. The means relative error presented in Figure 89 highlights a significant decrease in the mean relative error for most of the models. Figure 89 reveals that after the correction of the height, the relative difference between the experimental values and the model in the majority of the cases is under 50%.

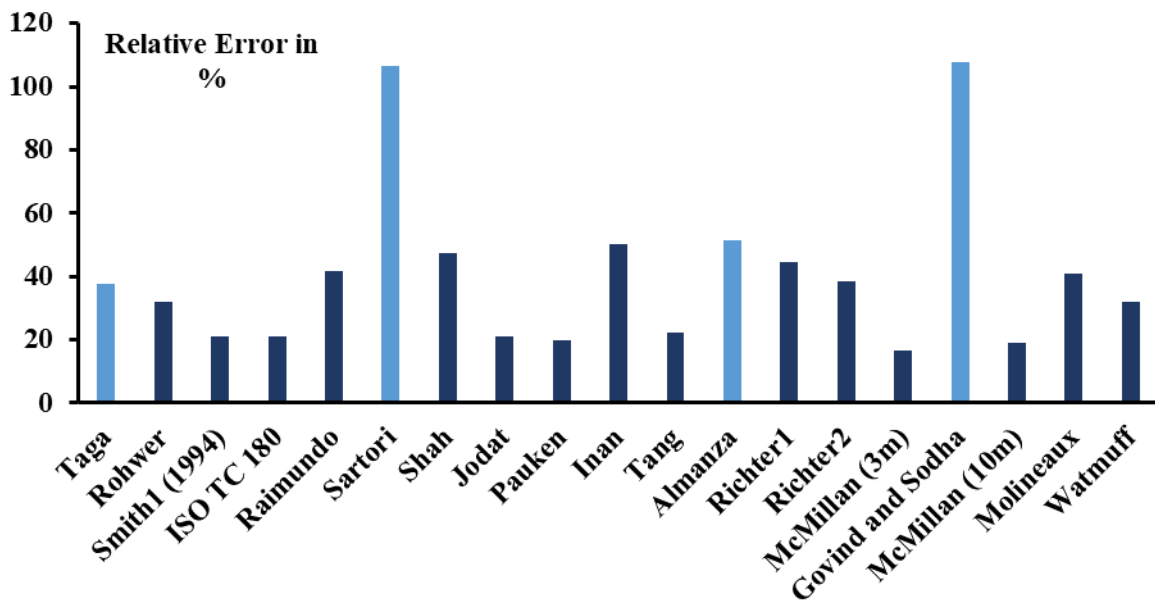


Figure 89: means relative error on the 26 periods for each model with the wind speed correction.

It is apparent from Figure 89 that 4 models do not follow the global trend:

- Taga is a model from the most common form. The specificity of the model is that this dependence on the wind speed of the air is low. That is the explanation of the little impact of the correction on the relative difference.
- Sartori can give uncoherent results for very low airflows as explained previously. In this case, the adaptation to the height of measure of the wind decreases the wind

speed values. That can be the reason for the increase in the relative difference with the correction.

- Almanza is a model of the first form where the b coefficient is null (only forced convection is considered) leading to a high dependency on wind in the h coefficient. That can be the reason for the increase in the relative difference with the correction.
- Govind and Sodha overestimated the evaporation. Their model is based on the one from Carrier which is known as suffering from the same weakness in the case of still water [50]. The carrier equation is nowadays recommended for occupied pools [14].

As a result, those 4 models are not considered hereafter.

In the end, the means relative error with the correction falls from 200% to 50% for all the models (except the 4 previous ones). Taking into account the height of wind measure reveals of been of high importance to have a good estimation of evaporation.

The most efficient model for our case is the McMillan (3 m) one, where the relative error is of 21%. It has to be noted that this model has been developed in outdoor conditions, like ours, for the evaporation of a lake.

III. Identification

Since a lot of experiments were measured during the campaign (26 different cases from September to December 2020), we investigated the case of a new model to fit them so as to reduce the relative error. From Figure 86, seven representative points (a to g) were selected to serve as inputs for identification. Three different forms for the h coefficient (equation (1.11)) and results are provided in

Table 4. The method, for identification is based on the Nelder-Mead algorithm (simplex) and the criteria used is the mean relative error. Applying these new models to the remaining experiments (h to z) lead to poor improvement since only 20% of accuracy was obtained.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{form A : } h_{\text{evap}} = a v^n \\ \text{form B : } h_{\text{evap}} = a v^n + b \\ \text{form C : } h_{\text{evap}} = a v + b \end{array} \right. \quad (1.11)$$

Table 4: The identified model in our experimentation

	a	b	n	Relative error %
Form A	0.04526	0	0.78	11%
Form B	0.04526	0.00002	0.78	11%
Form C	0.03050	0.01621	1	12%

Conclusion

The evaporation rate obtained thanks to the models found in the literature are covering a wide range of values and it appeared quite difficult to choose the one that suits the best to our case. Hence, an experimental site was chosen to evaluate this evaporation in real conditions. Therefore a swimming pool located in La Réunion has been equipped with sensors (temperature, levels) and with a weather station so as to be able to access meteorological conditions around the pool and to measure the amount of water being evaporated. The swimming pool under investigation is a collective outdoor swimming pool of 25m by 12.5m. As this is generally the case, those kinds of swimming pools suffer from water leakage and the first work consisted in evaluating this latter. 26 different periods of at least four hours were selected and later relative experimental conditions well as the evaporation rate were collected. The comparison between these experiments and the simulated results obtained for each model submitted to the same condition reveals that the difference is quite important with mean relative error as high as 200%. Analysing in detail the model where the high of wind speed measure was mentioned, the different models which referring to, it appeared that this height has a tremendous influence. Correcting the wind speed thanks to a profile given by a logarithm law, the simulated results become closer to the experiments with means relative error not higher than 50%. Among all the models, the best results were obtained with McMillan's one with an error of 21%. In an objective to reduce this gap and thanks to the important set of data obtained experimentally, an identification process has been set up to determine the most suitable coefficient appearing in the most widespread model relative to evaporate rate. Unfortunately, the validation leads to poor improvement since the obtained relative error reached only 20%. It appeared in the work that the height of the wind speed measurement had a high impact on the results and that a correction had to be taken into account so as to increase the zone of confidence.

Since the long-term objective of our work is to simulate the thermal behaviour of an entire swimming pool, this first step contributed to select the most accurate model for the evaporation phenomenon which is responsible for most heat losses in swimming pools.

V. Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: MAITE BERNHARD reports financial support was provided by National Association of Technical Research.

VI. Nomenclature

<u>Constant</u>		V	Volume m ³
K	Karman's constant = 0.41	W	specific humidity kg moisture/kg air
γ	psychrometric constant = 0.66 mb.K ⁻¹	z	Height in m
σ	Stephan Boltzmann's constant W.m ⁻² .K ⁻⁴	z ₀	roughness in m
<u>Variable</u>		α	absorption coefficient (water)
a, b, c, n	parameters of equation...	ε	emissivity
A	Surface m ²	ρ	density kg.m ⁻³
C _p /C _v	heat capacities J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	ϕ	Relative humidity of air %
e	thickness mm	<u>subscript</u>	
G	global radiation at the water level W.m ⁻²	a	ambient
h _{conv}	convective heat exchange J.m ⁻² K ⁻¹	atm	atmosphere
h _{evap}	evaporative heat exchange J.m ⁻² Pa ⁻¹	conv	convection
H	specific enthalpy J.kg ⁻¹	evap	evaporation
k	conductivity W.m ⁻¹ .K ⁻¹	heat	heating
l	specific length m	in	input
L	latent heat of evaporation J.kg ⁻¹	out	output
m	mass flow kg.s ⁻¹	rad	longwave radiation
M	molar mass kg.mol ⁻¹	sat	saturated
Num	Number of swimmers	sky	sky
P	Pressure Pa	soil	soil
\dot{q}	heat flow W/m ²	sol	solar
ra	aerodynamic resistance to turbulent	S _w	swimmers
exchange		v	vapour
T	Temperature K	w	water
v	wind speed m.s ⁻¹	wall	walls of the pool

VII. Experimental data

Period	Beginning time	End time	Water level variation (mm)	Water flow (L.h ⁻¹ .m ⁻²)	Evaporation flow (L.h ⁻¹ .m ⁻²)	T _a (°C)	φ (%)	v (m.s ⁻¹)
a	13/09 23:04	14/09 02:47	82.6	0.64	0.28	16.9	74	1.9
b	09/10 22:36	10/10 02:13	66	0.53	0.16	19.8	83	0.9
c	11/10 00:30	11/10 04:03	64.7	0.53	0.16	19.1	75	1.2
d	15/10 00:11	15/10 03:53	71.3	0.56	0.19	19.7	71	1.5
e	21/10 22:57	22/10 02:38	85.6	0.67	0.31	18.7	70	2.4
f	01/11 00:07	01/11 03:44	85.1	0.68	0.31	16.1	61	2.3
g	02/11 01:55	02/11 05:31	82.5	0.66	0.3	16	59	2.3
h	09/09 00:41	09/09 04:18	74.5	0.59	0.23	18.8	75	1.6
i	09/09 22:45	10/09 02:25	75.3	0.59	0.23	18.2	82	1.1
j	11/09 00:42	11/09 04:17	77.7	0.62	0.26	18.5	69	1.6
k	11/09 22:41	12/09 02:24	81	0.63	0.26	18.2	76	1.3
l	12/09 17:22	12/09 21:07	83.7	0.64	0.28	19.2	78	1.1
m	02/10 01:08	02/10 04:56	73.2	0.55	0.19	17.3	71	1.9
n	07/10 23:32	08/10 03:23	73.2	0.55	0.18	19.5	73	1.3
o	08/10 23:34	09/10 03:35	84.9	0.61	0.24	19.8	67	1.4
p	10/10 02:13	10/10 05:58	67.7	0.52	0.16	18.9	76	1.5
q	11/10 19:03	11/10 22:50	65.5	0.5	0.13	20.4	81	1.1
r	12/10 02:29	12/10 06:19	73.7	0.55	0.19	18.8	72	1.7
s	13/10 01:45	13/10 05:51	79	0.55	0.19	19.4	68	1.2
t	13/10 22:02	14/10 01:54	89.7	0.67	0.3	19.6	73	1.5
u	15/10 22:25	16/10 02:06	79.4	0.62	0.26	19.1	76	1.6
v	17/10 00:19	17/10 03:59	75.7	0.59	0.23	18.4	75	1.7
w	21/10 00:49	21/10 04:29	81.7	0.64	0.28	18.3	68	1.9
x	26/10 00:27	26/10 04:27	80.9	0.58	0.22	18	71	1.6
y	31/10 01:27	31/10 05:18	78.8	0.59	0.23	16.1	72	1.4
z	01/11 07:32	01/11 11:05	60.1	0.49	0.12	20.1	61	1

VIII. Bibliography

- [1] Masson-Delmotte *et al.*, « An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty », In Press., 2018.
- [2] « Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency ».
- [3] « 13 piscines centres aquatique publics », Cour des comptes, févr. 2018.
- [4] M. R. Brambley et S. E. Wells, « Energy-conservation measures for indoor swimming pools », *Energy*, vol. 8, n° 6, p. 403-418, 1983.
- [5] L. Johansson et L. Westerlund, « Energy savings in indoor swimming-pools: comparison between different heat-recovery systems », *Appl. Energy*, vol. 70, n° 4, p. 281-303, 2001.
- [6] C. D. Rakopoulos et E. Vazeos, « A model of the energy fluxes in a solar heated swimming pool and its experimental validation », *Energy Convers. Manag.*, vol. 27, n° 2, p. 189-195, janv. 1987, doi: 10.1016/0196-8904(87)90075-6.
- [7] R. Waché *et al.*, « Selective light transmission as a leading innovation for solar swimming pool covers », *Sol. Energy*, vol. 207, p. 388-397, sept. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.022.
- [8] J. P. Delgado Marín, F. Vera García, et J. R. García Cascales, « Use of a predictive control to improve the energy efficiency in indoor swimming pools using solar thermal energy », *Sol. Energy*, vol. 179, p. 380-390, févr. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.004.
- [9] B. Molineaux, B. Lachal, et O. Guisan, « Thermal analysis of five outdoor swimming pools heated by unglazed solar collectors », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 21-26, juill. 1994, doi: 10.1016/S0038-092X(94)90599-1.
- [10] M. Lurie et N. Michailoff, « Evaporation from free water surface », *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, n° 3, 1936.
- [11] F. H. Bigelow, « Papers on climatology in relation to agriculture, transportation, water resources, etc.: important problems in climatology », *Mon. Weather Rev.*, vol. 37, n° 11, p. 979-982, nov. 1909, doi: 10.1175/1520-0493(1909)37[979:POCIRT]2.0.CO;2.
- [12] R. E. Horton, « A new evaporation formula developpe », *Eng. News-Rec.*, vol. 78, n° 4, 1917.
- [13] C. Rohwer, *Evaporation from free water surfaces*. US Department of Agriculture, 1931.

- [14] M. M. Shah, « Analytical formulas for calculating water evaporation from pools », *ASHRAE Trans.*, vol. 114, part 2, 2008.
- [15] Bowen, « The ratio of heat losses by conduction and evaporation from any water surface », *Phy Rev*, 1926.
- [16] E. K. Webb, « On estimating evaporation with fluctuating Bowen ratio », *J Geophys Res*, vol. 65, n° 10, p. 3415-3417, oct. 1960.
- [17] J. Woolley, C. Harrington, et 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, n° 1, p. 187-195, janv. 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.07.014.
- [18] D. E. Root, « A simplified engineering approach to swimming pool heating », *Sol. Energy*, vol. 3, n° 1, p. 60-63, 1959.
- [19] J. T. Czarnecki, « A method of heating swimming pools by solar energy », *Sol. Energy*, vol. 7, n° 1, p. 3-7, janv. 1963, doi: 10.1016/0038-092X(63)90129-4.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] B. Molineaux, B. Lachal, et O. Guisan, « Thermal analysis of five unglazed solar collector systems for the heating of outdoor swimming pools », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 27-32, juill. 1994, doi: 10.1016/S0038-092X(94)90600-9.
- [23] J. L. Foncubierta Blázquez, I. R. Maestre, F. J. González Gallero, et P. Álvarez Gómez, « Experimental test for the estimation of the evaporation rate in indoor swimming pools: Validation of a new CFD-based simulation methodology », *Build. Environ.*, vol. 138, p. 293-299, juin 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.008.
- [24] C. C. Smith, G. Löf, et R. Jones, « Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool », *Sol. Energy*, vol. 53, n° 1, p. 3-7, juill. 1994.
- [25] M. M. Shah, « New Correlation for Prediction of Evaporation from Occupied Swimming Pools », vol. 119, p. 7, 2013.
- [26] A. Wahid, T. Sundari, et R. Ratiko, « Dynamic modeling and controlling of a spent nuclear fuel storage pool under periodic operation and station blackout conditions », *Ann. Nucl. Energy*, vol. 166, p. 108751, févr. 2022, doi: 10.1016/j.anucene.2021.108751.

- [27] M. M. Shah, « Evaluation of Available Correlations for Rate of Evaporation from Undisturbed Water Pools to Quiet Air », *HVACR Res.*, vol. 8, n° 1, p. 125-131, janv. 2002, doi: 10.1080/10789669.2002.10391292.
- [28] 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.
- [29] M. M. Shah, « Improved method for calculating evaporation from indoor water pools », *Energy Build.*, vol. 49, p. 306-309, juin 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.026.
- [30] A. Jodat, M. Moghiman, et M. Anbarsooz, « Experimental comparison of the ability of Dalton based and similarity theory correlations to predict water evaporation rate in different convection regimes », *Heat Mass Transf.*, vol. 48, n° 8, p. 1397-1406, août 2012, doi: 10.1007/s00231-012-0984-z.
- [31] A. M. Raimundo, A. R. Gaspar, A. V. M. Oliveira, et D. A. Quintela, « Wind tunnel measurements and numerical simulations of water evaporation in forced convection airflow », *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 86, p. 28-40, déc. 2014, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.026.
- [32] T. Poós et E. Varju, « Dimensionless Evaporation Rate from Free Water Surface at Tubular Artificial Flow », *Energy Procedia*, vol. 112, p. 366-373, mars 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1069.
- [33] E. Sartori, « Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors », *Sol. Energy*, vol. 56, n° 2, p. 199-206, 1996.
- [34] M. INAN et S. ÖZGÜR ATAYILMAZ, « Experimental investigation of evaporation from a horizontal free water surface », *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, p. 119-131, 2017.
- [35] R. Tang, Y. Etzion, et I. A. Meir, « Estimates of clear night sky emissivity in the Negev Highlands, Israel », *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, n° 11-12, p. 1831-1843, juill. 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.033.
- [36] M. T. Pauken, « An experimental investigation of combined turbulent free and forced evaporation », *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 18, n° 4, p. 334-340, déc. 1998, doi: 10.1016/S0894-1777(98)10038-9.
- [37] M. M. Shah, « Evaluation of methods for prediction of evaporation from water pools », *J. Build. Phys.*, p. 174425912110341, juill. 2021, doi: 10.1177/17442591211034193.
- [38] C. J. Marciano et G. E. Harbeck, « Mass-Transfer Studies, water-loss investigations, Lake Hefner studies. In Tech. », *Geol. Surv. Prof. Pap.*, vol. 1, n° 229, p. 46-70, 1952.
- [39] C. C. Smith, G. O. G. Löf, et R. W. Jones, « Rates of Evaporation from Swimming Pools in Active Use », *ASHRAE Trans.*, p. 10.

- [40] H. F. Nouanegue, S. Sansregret, B. L. Lostec, et A. Daoud, « Energy model validation of heated outdoor swimming pools in cold weather », p. 6.
- [41] F. Asdrubali, « A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools », *Energy Build.*, vol. 41, n° 3, p. 311-319, mars 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.10.001.
- [42] Q. Béchet, B. Sialve, J.-P. Steyer, A. Shilton, et B. Guieysse, « Comparative assessment of evaporation models in algal ponds », *Algal Res.*, vol. 35, p. 283-291, nov. 2018, doi: 10.1016/j.algal.2018.08.022.
- [43] W.-K. Song et Y. Chen, « Modelling of evaporation from free water surface », p. 10.
- [44] G. Szeicz et R. C. McMonagle, « The heat balance of urban swimming pools », *Sol. Energy*, vol. 30, n° 3, p. 247-259, 1983.
- [45] G. W. Himus et J. W. Hinchley, « The effect of a current of air on the rate of evaporation of water below the boiling point », *J. Soc. Chem. Ind.*, vol. 43, n° 34, p. 840-845, 1924, doi: 10.1002/jctb.5000433402.
- [46] O. G. Sutton, « Wind Structure and Evaporation in a Turbulent Atmosphere », *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 146, n° 858, p. 701-722, oct. 1934, doi: 10.1098/rspa.1934.0183.
- [47] V. P. Singh et C.-Y. Xu, « Evaluation and Generalization of 13 Mass-Transfer Equations for Determining Free Water Evaporation », *Hydrol. Process.*, vol. 11, n° 3, p. 311-323, mars 1997, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<311::AID-HYP446>3.0.CO;2-Y.
- [48] J. F. Manwell, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd Edition. Wiley, 2009.
- [49] C. G. Justus et A. Mikhail, « Height variation of wind speed and wind distributions statistics », *Geophys. Res. Lett.*, vol. 3, n° 5, p. 261-264, mai 1976, doi: 10.1029/GL003i005p00261.
- [50] M. M. Shah, « Calculation of Evaporation from Indoor Swimming Pools: Further Development of Formulas », *ASHRAE*, p. 9, 2012.