

Analyses préliminaires de la réduction de l'énergie consommée par les spectacles itinérants du Cirque du Soleil

par

Hugo BERNARD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 13 JUILLET 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Hugo Bernard, 2017



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel R. Rousse, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Simon Joncas, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 JUIN 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Ce mémoire a été réalisé dans le but d'obtenir la validation de mon double-diplôme réalisé en partenariat avec l'école des Arts et Métiers ParisTech en France et l'École de technologie supérieure de l'Université du Québec.

L'entreprise Le Cirque du Soleil, basée à Montréal, a fait appel aux services du Groupe de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (t3e) de l'école de technologie supérieure pour réaliser un projet d'analyse et de diminution de la consommation énergétique de ses spectacles itinérants. C'est dans ce cadre plus général que j'ai été mandaté par mon directeur de recherche, M. Daniel R. Rousse, pour réaliser ce mémoire.

Il est tout d'abord important de préciser que la mission première du Cirque du Soleil ne concerne pas l'efficacité énergétique, mais bien de créer des spectacles les plus attirants possibles aux yeux des spectateurs. Ainsi, bien que l'équipe technique nous proposant ce projet puisse élaborer une politique de développement durable qui incorpore des mesures de réduction de la consommation d'énergie, l'équipe artistique domine lors des décisions finales. Il leur suffit par exemple de vendre cinq billets de plus par représentation grâce à des investissements publicitaires, engendrant alors des recettes dépassant de loin la somme de toutes les économies réalisées par l'ensemble de mesures proposées par la suite. Toutefois, ce projet a permis d'initier un mouvement avec l'équipe du Cirque du Soleil, qui devrait à terme, permettre de réduire leur empreinte écologique.

Ce travail a fait l'objet d'une publication dans un congrès scientifique international et une version augmentée de ce dernier sera soumise à une revue technique.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire, Monsieur Daniel R. Rousse, pour avoir suivi et encadré avec rigueur, compétence et intérêt ce travail réalisé avec l'entreprise du Cirque du Soleil (CDS).

Je souhaite également vivement remercier Madame Claudiane Ouellet-Plamondon, à la fois pour sa disponibilité et l'aide qu'elle a pu m'apporter tout au long de la réalisation de ce projet, mais aussi pour avoir accepté de d'examiner et de juger ce travail. Je remercie aussi M. Joncas, pour accepter d'examiner cette étude et d'assurer la présidence de la présentation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier énormément Jean-François Michaud et Patrick Giguère, mes principaux contacts au CDS, qui m'ont aidé et accompagné avec disponibilité et envie durant tout le projet. À cette occasion, je souhaite remercier toute l'équipe technique du CDS, et plus particulièrement Philippe Massé pour son aide incroyable et sa présence lors de mes visites pendant les spectacles du spectacle Luzia, présenté à Montréal au printemps 2016.

Il est également important pour moi de remercier les personnes du Groupe de recherche t3e dont Pierre-Luc, Jérémie, Frédéric, Charlotte, Abdoulaye et Sergio, pour leur aide, leurs connaissances et les nombreuses discussions que j'ai pu avoir avec eux concernant ce projet.

Je tiens finalement à exprimer toute ma gratitude envers mes parents, Françoise et Jean-François, et ma sœur, Charlotte, pour leur soutien constant, leurs idées et leur grande aide concernant la relecture de ce mémoire. Je souhaite aussi remercier mon amie, Chloé, pour m'avoir grandement soutenu et encouragé. Je remercie également mes amis de l'équipe de tennis de l'ÉTS, surtout Arthur et Yann, qui m'ont permis d'apprendre des valeurs essentielles telles que la persévérance et la rigueur. Enfin, je remercie du fond du cœur mes colocataires, Julien et Adrien, et mes amis, Brice, Alix, Pierrick, Pierre D., Pierre S. et Ludovic, pour m'avoir supporté pendant ces deux années, et surtout pour m'avoir apporté une aide précieuse sur des questions techniques à multiples reprises.

ANALYSES PRÉLIMINAIRES DE LA RÉDUCTION DE L'ÉNERGIE CONSOMMÉE PAR LES SPECTACLES ITINÉRANTS DU CIRQUE DU SOLEIL

Hugo BERNARD

RÉSUMÉ

Le Cirque du Soleil (CDS) cherche à diminuer sa consommation énergétique, par le biais d'énergies propres ou avec l'aide de nouvelles technologies, pour s'inscrire dans une optique de développement durable. Toutefois, le contexte des opérations énergétiques actuel du CDS n'est pas simple. En effet, les spectacles sont pour la plupart itinérants, ce qui ne facilite pas l'installation de systèmes de production d'énergie verte, qui peuvent être encombrants, fragiles, difficilement montables/démontables comme c'est par exemple le cas pour des panneaux photovoltaïques. De plus, le CDS doit faire face à des réglementations qui diffèrent pour chacun des sites où il s'installe, et qui peuvent parfois rajouter des contraintes et ainsi limiter leurs possibilités. En observant la consommation actuelle d'énergie au CDS sur les différents sites, il est important de noter que lors de la plupart des représentations, il y a jusqu'à cinq génératrices qui peuvent être utilisées pour fournir de l'électricité aux différentes installations. Ces génératrices, pouvant fournir chacune une puissance de 500kW, font monter la consommation d'énergie jusqu'à une puissance potentielle de 2,5 MW en conditions réelles de spectacles, pendant plus de quatre heures. Cependant, il est encore plus impressionnant de noter qu'une génératrice est également utilisée la nuit pour les besoins du site, notamment pour éclairer les allées ou faire sécher les costumes de scène, et qu'elle fonctionne entre 20 et 40% de sa puissance maximale. Il est ainsi important de diminuer la charge par le biais de la sobriété énergétique, ou bien en proposant des solutions qui permettraient de lisser cette demande et ainsi diminuer le pic de puissance, qui pose le plus de problèmes. Ce pic de puissance survient principalement pendant les périodes de spectacles, puisqu'il faut maintenir de manière constante la température à 24°C à l'intérieur de la tente où se déroule le spectacle, en été comme en hiver, tant pour les artistes que pour les spectateurs.

Un des premiers objectifs du projet consiste ainsi à réaliser des campagnes de sensibilisation à la sobriété énergétique auprès de la communauté du CDS, dans l'optique de prendre des mesures pour diminuer toutes les consommations inutiles, surtout pour la consommation de nuit, ou encore supprimer certaines installations fonctionnant à temps plein, comme certains systèmes d'éclairage, utilisés sans interruption, 24h/24. Les économies potentielles de ces réductions d'utilisation s'élèvent à plus de 0,6 M\$ par année pour tous les spectacles (environ une trentaine par année). De plus, l'utilisation d'une tente blanche à forte réflectivité solaire est une solution passive qui permettrait également de réduire grandement la charge de climatisation en été, d'environ 140 MWh soit près de 1,2M\$ par année pour tous les spectacles. D'autres solutions concernent la production alternative (comme l'énergie solaire, éolienne, ou d'autres énergies renouvelables), le stockage (thermique, électrique, mécanique, chimique) pour réduire la pointe de puissance, ou encore l'efficacité énergétique dite classique.

Parmi la panoplie de solutions envisagées, une option basée sur la brumisation a aussi été développée, analysée et fait l'objet d'un article. La brumisation ou « evaporative cooling » est

un procédé de climatisation qui consiste à refroidir une surface grâce à l'enthalpie d'évaporation de l'eau. Appliqué aux installations du CDS, le procédé endothermique de ce changement de phase permet de refroidir la surface externe de la toile de tente lors des spectacles. Ce phénomène d'évaporation permet de réduire la charge de climatisation nécessaire au refroidissement des tentes pendant les spectacles, durant les périodes de chaleur et de rayonnement intense. Pour pouvoir mettre en place une analyse efficace des solutions proposées, il est nécessaire de connaître certaines données telles la température à l'intérieur des chapiteaux, les débits des ventilateurs, les propriétés optico-radiatives des toiles ou bien encore la consommation électrique heure par heure. Ces données n'étant pas toutes connues et enregistrées par le CDS, différents systèmes de mesures (dataloggers, débitmètres,...) ainsi que des tests expérimentaux (protocole de mesure de la réflectivité et de l'émissivité de la toile et des tests de brumisation en situation réelle) ont été mis en place pour les obtenir. Finalement, les résultats expérimentaux fournissent des résultats d'économies pouvant s'élever jusqu'à 2,2 k\$ par mois pour le spectacle de Luzia à Montréal ce qui procurerait des économies annuelles de 0,4 M\$ par année pour tous les spectacles. Les tests mis en place sur une toile du CDS confirment le potentiel de cette solution.

Mots-clés : consommation énergétique, énergies renouvelables, sobriété énergétique, efficacité énergétique, brumisation, rayonnement solaire

PRELIMINARY ANALYSES FOR THE REDUCTION IN ENERGY CONSUMPTION FOR THE TOURING SHOWS OF THE CIRQUE DU SOLEIL

Hugo BERNARD

ABSTRACT

It is with sustainable development in mind that the Cirque du Soleil (CDS) is looking for reducing its energy consumption, through renewable energies or with new technologies. However the CDS current energy context is not this simple. Indeed, for the most part, tours are travelling which does not facilitate the installation of green energies production systems, which are often bulky such as photovoltaic panels. Besides, the circus has to face several laws and regulations in the different places they are moving to, which often add constraints and requirements and limit the opportunity to settle new systems. By observing the current energy consumption of the CDS on the different tours, it is really important to note that for most of the shows there is up to five generators which are used to supply electricity for the different installations. Each of these generators can provide a power of 500kW which raises the energy usage up to 2,5MW in real conditions during the shows for more than four hours. Yet, it is even more impressive to see that a generator is also used during the night for the site needs, in particular to light the ways or dry the artist costumes, and that it is operating between 20 and 40 percent of its maximal power. Thus, it is important to reduce the load through energy sobriety or by using systems able to shave the peak load and so, to reduce the peak power which is causing the most troubles. This power peak mainly occurs during show times since a temperature of 24°C has to be kept constant in the inside of the tent where the show is running, whether it is summer or winter.

In this way, one of the main goals is to run energy sobriety awareness campaigns in order to take actions to decrease all of the unnecessary energy uses, above all the ones concerning the night uses or even to remove some systems running full-time such as some lights which are use nonstop. The potential savings of these cuts amounts to more than 0.6 M\$ per year for all shows. Besides, using a white tent with a high solar reflectivity is a passive solution which would also allow to highly reduce the cooling load of about 140 MWh, which represents almost 1.2M\$ per year for all the shows. Other solutions concern the alternative production, such as solar energy, wind energy or other renewable energies; the energy storage, such as thermal, electrical, mechanical and chemical storage, in order to reduce the power peak; or even classic energy efficiency.

Among the multitude of considered solutions, an option based on fogging has been developed, analyzed and is the subject of a conference article paper. Fogging, or also called evaporative cooling, is a cooling process which consists in cooling off a surface using the water vaporization enthalpy. Applied to the CDS facilities, the endothermic reaction of this phase change allows to chill the external surface of the tent during the shows. This evaporation phenomenon permits to reduce the air-conditioning load necessary for the tent cooling during hot and sunny periods. As a matter of fact, in order to set up an efficient analysis of the solutions proposed, it is necessary to know a certain number of parameters and data's such as the

temperature inside of the tents, the fan flows, the optico-radiatives properties of the canvas as well as the power consumption hour by hour. Such important data's are not all recorded and some parameters are not even known by the CDS. This is why quite a few measuring systems (using DataLoggers sensors or flow sensors) and experimental tests (measurement of the canvas emissivity and reflectivity and misting tests in real conditions) have been set up. Experimental results show economical results which can be up to 0.4 M\$ per year for all the shows. The full scale tests carried-out on a head office CDS facility tend to confirm the potential of the misting solution.

Actually, the solutions proposed using renewables energies are definitely very interesting since they are relying on an ability to get rid of the usual energies use. Yet, they are far away from being all applicable, especially when it comes to a travelling tour show like the one of the Cirque du Soleil. Finally, reducing the unnecessary energy consumptions of the Cirque du Soleil seems to be the key point to start with this project.

Key words : energy consumption, renewable energies, energy sobriety, energy efficiency, misting, solar radiation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
1.1 Introduction à la revue de littérature.....	7
1.2 Lissage de la consommation par processus de stockage.....	9
1.3 Les différents types de stockage thermique.....	11
1.3.1 Stockage par chaleur sensible ou sensible heat storage (SHS).....	12
1.3.1.1 Matériaux sous forme liquide	13
1.3.1.2 Matériaux solides.....	14
1.3.2 Stockage par chaleur latente ou latent heat storage (LHS).....	15
1.3.3 Bond Energy Storage (BES) ou Stockage thermochimique.....	18
1.4 Stockage électrochimique.....	19
1.4.1 Batteries à flux (ou circulation).....	20
1.4.2 Batteries conventionnelles.....	22
1.4.3 Supercondensateurs.....	22
1.5 Stockage chimique sous forme d'hydrogène.....	23
1.6 Stockage électromagnétique.....	24
1.7 Stockage mécanique.....	25
1.8 Stockage d'air comprimé.....	26
1.9 Conclusion sur les différents types de stockage.....	27
1.10 Revue concernant le rafraîchissement par évaporation.....	29
1.10.1 Principe du rafraîchissement par évaporation.....	29
1.10.2 Limites et restrictions.....	30
CHAPITRE 2 CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES UTILISABLE.....	35
2.1 Objectifs.....	35
2.2 Données des consommations électriques jour/nuit.....	35
2.3 Relevés de températures – humidité relative.....	36
2.4 Températures de surface des toiles.....	40
2.5 Propriétés optico-radiatives de la toile.....	41
2.6 Conclusion.....	46
CHAPITRE 3 SÉLECTION DE LA TOILE DE TENTE.....	47
3.1 Différentes couleurs proposées et utilisées.....	47
3.2 Analyse des flux nets de chaleur par la réflectivité de la toile.....	49
3.3 Analyse des flux nets de chaleur par les températures d'équilibre des toiles.....	52
3.4 Influence de la couleur de la tente sur l'utilisation des systèmes CVCA.....	55
3.4.1 Première analyse de la consommation – journées ensoleillées.....	56
3.4.2 Deuxième analyse – Tournées entières.....	59
3.5 Impact de la réflectivité sur les rejets de CO ₂	66
3.6 Conclusion.....	67

CHAPITRE 4	RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION.....	71
4.1	Besoin d'énergie pour la climatisation	71
4.2	Méthode d'analyse	71
4.3	Obtention des données techniques et météorologiques	72
4.3.1	Données relatives aux équipements	72
4.3.2	Obtention des données météorologiques des sites de spectacle.....	73
4.4	Sélection des sites de spectacle.....	75
4.5	Bilan thermique sur l'enceinte de la tente.....	77
4.6	Résultats	86
4.7	Tests expérimentaux	91
4.8	Conclusion	94
CHAPITRE 5	AUTRES AXES DE SOLUTION	95
5.1	Génération de solutions.....	95
5.2	Solutions retenues	95
5.3	Efficacité énergétique	96
5.3.1	Production par panneaux photovoltaïques (panneaux PV).....	96
5.3.2	Déstratification thermique de l'air chaud ou froid.....	99
5.3.3	Écrans solaires	104
5.4	Sobriété énergétique.....	106
5.4.1	Réduction des consommations nocturnes	106
5.4.2	Identification des systèmes en fonctionnement la nuit	107
5.4.3	Systèmes d'éclairage.....	111
5.4.4	Systèmes de climatisation et de chauffage.....	115
5.4.5	Séchage des costumes	117
5.5	Conclusion	118
CONCLUSION	119
6.1	Rappel des objectifs de la méthodologie	119
6.2	Principaux résultats.....	120
6.3	Recommandations.....	121
6.4	Remarques de clôture.....	122
ANNEXE I	FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR OMEGA EL-USB-2	123
ANNEXE II	RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE BRUMISATION POUR LE SPECTACLE KURIOS	125
ANNEXE III	NOUVELLE PROPOSITION DE PLAGES HORAIRES POUR LES LUMIERES.....	127
ANNEXE IV	ÉCONOMIES POTENTIELLES RELATIVES A LA NOUVELLE PLAGE D'UTILISATION DE L'ÉCLAIRAGE.....	131
ANNEXE V	ARTICLE PUBLIÉ DANS LE COLLOQUE CIFQ 2017	133

ANNEXE VI	ARTICLE PRÉPARÉ POUR LA REVUE APPLIED THERMAL ENGINEERING	149
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	169

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Analyse de l'écart des coûts en climatisation engendrés par les différentes valeurs de réflectivité (et donc de couleur) de la toile selon le flux solaire G reçu : blanc – toile idéale; jaune – toile Luzia 2016, toile de référence blanche et jaune; gris – toile Volta 2017 grise et blanche; bleu – toile originale bleue et jaune.....51
Tableau 3.2	Analyse de la consommation journalière des CVCA selon leur pourcentage d'utilisation58
Tableau 3.3	Économies énergétiques et monétaires réalisées grâce à l'utilisation de la tente blanche au moins d'août sur le spectacle de Luzia à Toronto ..60
Tableau 3.4	Économies énergétiques et monétaires réalisées grâce à l'utilisation de la tente blanche durant tout le spectacle de Luzia à Toronto63
Tableau 3.5	Économies énergétiques et monétaires pouvant être réalisées si une tente blanche était utilisée durant une partie du spectacle de Kurios à New York.....65
Tableau 3.6	Analyse de la réduction des rejets de CO ₂ réalisés grâce à l'utilisation de la tente blanche et jaune67
Tableau 3.7	Tableau récapitulatif des économies potentielles réalisées en employant une toile plus réfléchissante au rayonnement solaire : comparaison des trois méthodes d'analyse68
Tableau 4.1	Liste des appareils de la galerie technique et leur puissance73
Tableau 4.2	Exemple de sélection pour l'analyse des spectacles sur la tournée Kurios.....76
Tableau 4.3	Tableau récapitulatif des paramètres utilisés dans l'étude, avec leur signification, leur valeur et leur unité78
Tableau 4.4	Table des propriétés thermophysiques de l'air à différentes températures Tiré de Kalogirou, S. A. (2013)81
Tableau 4.5	Résultats de l'analyse Python pour Luzia du 4 mai au 7 juin 201689
Tableau 4.6	Analyse des résultats des tests expérimentaux de brumisation.....92
Tableau 5.1	Comparaison du prix au kWh des modèles PK-1, PK-3 et MS-375 proposés par l'entreprise Solar Mobile98

XVIII

Tableau 5.2	Exemple d'analyse de la consommation des éclairages pour les néons sanitaires	113
Tableau 5.3	Résultats de l'analyse de la réduction de l'utilisation des éclairages.....	114
Tableau 6.1	Conclusion sur la rentabilité des solutions proposées pour la diminution de la consommation d'énergie des spectacles itinérants du Cirque du soleil.....	124

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1.1	Émissions de CO ₂ dues à la combustion par secteurs en 1979 et 2014. Tiré de IEA (2016).....1
Figure 1.1	Comparaison des moyens de stockage selon leur de temps de décharge et la puissance emmagasinée Tiré de Jacquelin, L. M., Lacroix, O., & Bordeleau, N. (2012).....9
Figure 1.2	Exemple de stockage de nuit et déstockage durant la journée Tiré et adapté de Rapin, P., Jacquard, P., & Desmons, J. (2015).....10
Figure 1.3	Comparaison des différentes formes de stockage thermique Tiré de N'tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009)11
Figure 1.4	Liste des matériaux solides et liquides pour le stockage de chaleur sensible Tiré de Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009).....13
Figure 1.5	Principe de fonctionnement d'une batterie à circulation Tiré de Multon, B., Robin, G., Erambert, E., & Ben Ahmed, H. (2003) repéré à www.smartgrids-cre.fr21
Figure 1.6	Système d'osmose inverse Tiré et adapté du site www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/schema-osmose_zoom.png32
Figure 2.1	Variations de température et d'humidité dans la tente principale sur Luzia à Montréal entre le 28 juin et le 4 juillet.....38
Figure 2.2	Répartition finale des DataLoggers dans la tente principale (BigTop).....39
Figure 2.3	Relevé des écarts de températures entre les bandes bleues et jaunes de la tente40
Figure 2.4	Spécifications des paramètres optico-radiatifs pour la toile précontrainte opaque 1002-T2 Low-Emissivity42
Figure 2.5	Analyse de la valeur de l'émissivité du canvas bleu à partir de sa température45
Figure 3.1	Principaux canevass utilisés par le Cirque du Soleil : (a) Toile 2016, Luzia, blanche et jaune; (b) Toile originale bleue et jaune; (c) Toile 2017, Volta, blanche et grise.....48

Figure 3.2	Analyse de la quantité de chaleur passant par la toile à partir des températures de surfaces moyennes mesurées de la toile	54
Figure 3.3	Corrélation entre la consommation du CDS en MWhe (en rouge) dédiée aux CVCA et la température maximale journalière sur le spectacle Luzia à Toronto au moins d'août (en bleu).....	62
Figure 4.1	Sélection des données utilisées sur le logiciel TRNSYS	75
Figure 4.2	Courbe de variation horaire de la température de surface T_{Sn} (en °C) du 4 mai au 7 juin pour le spectacle Luzia à Montréal	82
Figure 4.3	Tracé de $V_{day,eau}$ pour chaque jour de spectacles avec la limite de 2000 litres d'eau par jour	87
Figure 4.4	Tracé de $V_{day,eau}$ pour chacun des jours de spectacles sans limite d'eau ..	88
Figure 4.5	Analyse des températures avant brumisation (à gauche) et après brumisation (à droite) pour les tests de brumisation réalisés, avec la caméra thermique.....	91
Figure 5.1	Modèle PK-1 (gauche) et modèle MS-375 (droite) de Mobile Solar Tiré du site www.mobilesolarpower.net/products	97
Figure 5.2	Variations de températures selon la hauteur dans le BigTop pour le mois de mai, en profil de climatisation.....	100
Figure 5.3	Analyse de la stratification en profil de chauffage Tiré et adapté de Izquierdo, A. (2016).....	103
Figure 5.4	Exemple de toiles d'ombrages superposées (www.belategui.fr).....	105
Figure 5.5	Tracé de la courbe de consommation de courant de nuit pour le disjoncteur CB-20	109
Figure 5.6	Variation du courant du disjoncteur CB-34 pour les nuits du 29 mai au 4 juin.....	110
Figure 5.7	Utilisation des néons dans la tente sanitaire en après-midi.....	113
Figure 5.8	Jeux de lumières en fonctionnement en matinée dans la tente d'entrée..	113
Figure 5.9	Porte grande ouverte en pleine journée en phase de climatisation	116

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANL	Argonne National Laboratory
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
ATER	Aquifer Thermal Energy Storage
BES	Bond Energy Storage
CDS	Cirque du Soleil
CIFQ	Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois
COP	Coefficient de Performance
COP21	21ème Conférence des Parties sur le climat à Paris
CVCA	Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'air
GES	Gaz à Effet de Serre
IEA	International Energy Agency
IWEC	International Weather for Energy Calculations
LHS	Latent Heat Storage
MCP	Matériau à Changement de Phase
MWT	Magnetic Water Treatment
PCI	Pouvoir Calorifique Intérieur
PEACE	Programme d'Efficacité et d'Amélioration Continue en Énergie
PRI	Période de Retour sur Investissement
SHS	Sensible Heat Storage
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TES	Thermal Energy Storage
TMY	Typical Meteorological Year

XXII

TOHU Nom de la Cité des Arts du Cirque du Soleil

USGS United States Geological Survey

UV Ultra-Violet

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Aire de la surface considérée (m^2)
c_p	Capacité thermique massique du matériau considéré ($J/kg.K$)
E	Émission radiative de la toile (W/m^2)
E	Énergie électrique (kWh)
G	Flux solaire ou irradiance (W/m^2)
h_{conv}	Coefficient de convection ($W/m^2.K$)
h_{rad}	Coefficient de radiation ($W/m^2.K$)
I	Courant (A)
I	Irradiation solaire (W/m^2)
k	Conductivité thermique du matériau considéré ($W/m.K$)
l_c	Longueur caractéristique de la tente (m)
L	Chaleur latente (J/kg)
L_{people}	Chaleur latente unitaire, dégagée par une personne ($W/personne$)
\dot{m}	Débit massique (kg/s)
$m_{CO_2\acute{e}q}$	Quantité de rejets de $CO_2\acute{e}q$ (tonnes)
N_{bair}	Nombre de changements d'air par seconde (chg air/sec)
$N_{bheures}$	Nombre d'heures considérées (h)
p	Périmètre de la surface considérée (m)
P	Puissance électrique (W)
P_{app}	Puissance électrique apparente (kVA)
P_{net}	Puissance électrique nette d'une installation (W)
PRI	Période de retour sur investissement considérée (année)
Q	Énergie échangée sous forme de chaleur (kWh)
q	Puissance thermique (W)
q''	Flux thermique (W/m^2)
Q_{se}	Énergie traversant la tente sans écran solaire (kWh)
Q_{1e}	Énergie traversant la tente avec un écran solaire (kWh)
Q_{2e}	Énergie traversant la tente avec un double écran solaire (kWh)
$R_{eq,int}$	Résistance équivalente interne de la tente ($m^2.K/W$)

XXIV

T	Température du corps considéré (K)
V_{vent}	Vitesse du vent sur le site (m/s)
V	Tension (V)
V	Volume de la tente (m ³ ou L)
\dot{V}	Débit volumique (L/s)
\dot{V}''	Débit d'eau surfacique unitaire (L/s.m ²)
$\$$	Coûts/Économies monétaires (\$)

Lettres grecques

α	Absorptivité de l'objet considéré
α	Diffusivité thermique du fluide (m ² /s)
ΔT	Variation de température (K ou °C)
ε	Émissivité du corps considéré
φ	Facteur de puissance électrique cos(φ)
λ	Longueur d'onde d'émission type pour le rayonnement solaire
μ	Viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)
ν	Viscosité cinématique du fluide (m ² /s)
ρ	Réflexivité de l'objet considéré
ρ	Masse volumique du corps considéré (kg/m ³)
τ	Transmissivité de l'objet considéré
σ	Constante de Stefan Boltzmann (W/m ² .K ⁴)

Nombres adimensionnels

Nb_{equip}	Nombre d'appareils installés dans la galerie technique
Nb_{max}	Nombre maximal de spectateurs dans la tente
Nu_L	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Re_{Lc}	Nombre de Reynolds critique
$TauxOccup_{moy}$	Taux d'occupation moyen de la tente pendant les spectacles

Indices

<i>abs</i>	Absorbé par la toile ou la tente
<i>achat</i>	Relatif au prix d'achat
<i>air</i>	Relatif à l'air
<i>amb</i>	Ambiant
<i>art</i>	Relatif à la tente artistique
<i>bas</i>	Relatif à la partie basse des tentes
<i>clim</i>	Climatisation
<i>conv</i>	Par convection, convectif
<i>day</i>	Pour une journée, quotidienne, quotidien
<i>direct</i>	Direct, de manière directe
<i>e</i>	Électrique
<i>E</i>	Énergie
<i>EJ</i>	Par effet joules
<i>eau</i>	Relatif à l'eau
<i>écran</i>	Relatif à l'écran solaire qui fait ombrage à la toile
<i>élec</i>	Électricité, de l'électricité
<i>emit</i>	Relatif à la chaleur émise par une surface
<i>env</i>	Surface imaginaire pour déterminer les échanges radiatifs avec l'environnement, les forêts, les bâtiments, etc
<i>équip</i>	Relatif aux équipements installés dans la galerie technique
<i>évap</i>	Par évaporation
<i>ext</i>	Extérieure, extérieur
<i>f</i>	Finale, final
<i>gr</i>	Ground, sol
<i>haut</i>	Relatif à la partie haute des tentes
<i>heat</i>	Chauffage
<i>heure</i>	Heure par heure, de manière horaire
<i>i</i>	Initiale, initial
<i>i</i>	Itération

XXVI

<i>int</i>	Intérieure, intérieur, vers l'intérieur de la tente
<i>kWh</i>	Relatif au prix de revient en kWh
<i>l</i>	Liquide
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>people</i>	Par personne, relatif à une personne
<i>ph</i>	Relatif au changement de phase d'un matériau
<i>prod</i>	Produite, production
<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>rad</i>	Par radiation, rayonnement
<i>s</i>	Solide
<i>S</i>	Surface
<i>sol</i>	Solaire, du soleil, relatif au soleil
<i>sky</i>	Surface imaginaire appelée ciel pour déterminer les échanges radiatifs avec l'environnement que constitue la voute céleste
<i>sto</i>	Stockage, stockée
<i>tente</i>	Relatif à la tente principale, BigTop
<i>th</i>	Thermique
<i>top</i>	Relatif au sommet de la tente
<i>tot</i>	Total, totale
<i>vol</i>	Par unité de volume
<i>yr</i>	Annuel, annuelle, année

INTRODUCTION

0.1 Contexte énergétique actuel

De nos jours, les entreprises prennent de plus en plus conscience des défis environnementaux auxquels le monde doit faire face actuellement. L'augmentation incessante des besoins mondiaux en énergie ainsi que leurs prix, ou bien encore l'augmentation importante des émissions de gaz à effet de serre rejetés lors de la combustion des matières premières mènent à se poser de réelles questions d'éthique concernant le développement économique à venir. Ainsi, il est important de noter que ces émissions augmentent sans cesse et que les rejets de dioxyde de carbone (CO₂) ont ainsi doublés (figure 0.1) entre 1973 et 2014, jusqu'à atteindre 32 281 Mt de CO₂ rejetés en 2014 (IEA, 2016).

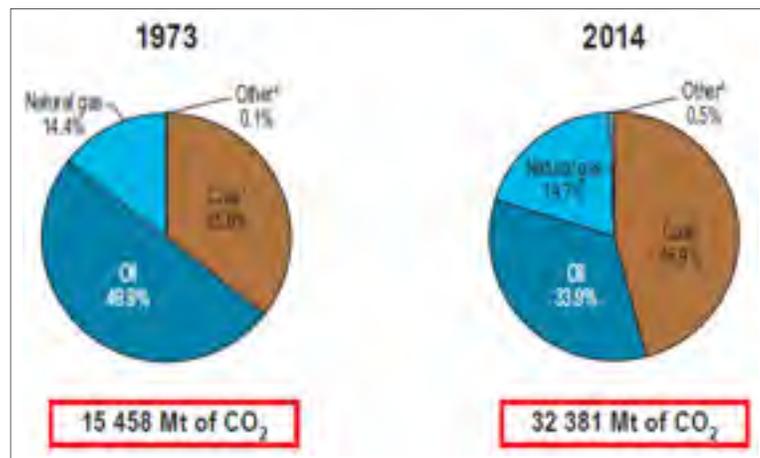


Figure 0.1.1 Émissions de CO₂ dues à la combustion par secteurs en 1979 et 2014. Tiré de IEA (2016).

Face à cette situation, les grandes puissances mondiales se sont engagées durant les dernières années à réduire les rejets de ces polluants, lors de conférences concernant le changement climatique. Le protocole de Kyoto, signé en 1997 mais entré en vigueur tardivement, en 2005, est une des premières bases de cet édifice. Il visait à réduire d'au moins 5% les émissions de GES entre 2008 et 2012 par rapport à 1990 (COP3, 1997). Plus récemment, c'est l'accord de Paris, ratifié en 2015 lors de la COP 21 et réunissant 195 états signataires, qui a fixé comme

objectif de limiter le réchauffement climatique global à 2°C, en s'efforçant de tendre vers une valeur cible de 1,5°C (COP21, 2015). Pour pouvoir satisfaire les demandes énergétiques actuelles et futures, sans mettre en danger les ressources restantes, en respectant de tels accords et en limitant l'impact sur les écosystèmes, il faudrait entre autres pouvoir développer un système énergétique mondial combinant à la fois une énergie plus verte basée sur une production alternative et un stockage de cette énergie souvent très variable sur de plus longues durées.

C'est dans ce contexte que le Cirque du Soleil cherche à diminuer sa consommation énergétique, par le biais d'énergies propres ou avec l'aide de nouvelles technologies, telles que le stockage d'énergie qui pourrait permettre de répondre à la différence entre l'offre et la demande de ces énergies.

0.2 Contexte énergétique appliqué au Cirque du Soleil

Lorsque l'on considère la consommation énergétique actuelle du CDS sur les différents sites, il est remarquable de constater que lors de la plupart des représentations, il y a jusqu'à cinq génératrices de 500 kW qui peuvent être utilisées pour fournir de l'électricité aux différentes installations. Cette consommation d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 2,5 MW se produit pendant plus de quatre heures, que cela soit lors de périodes de chauffage ou de climatisation. Par ailleurs, une génératrice de 500 kW est également utilisée la nuit pour les besoins du site, notamment pour éclairer les allées pour la sécurité ou faire sécher les costumes des artistes, et fonctionne entre 20 et 40% de sa puissance maximale. L'utilisation de ces génératrices montre que la consommation du CDS peut être très importante. Cependant, dans certaines villes, principalement en Amérique du Nord, le CDS est en mesure de brancher les installations au réseau électrique de la ville, permettant ainsi de réduire à la fois leur facture énergétique et supprimer l'utilisation du diesel.

D'après les données de consommation électrique fournies, la consommation énergétique du CDS peut atteindre plus de 12 000 kWh pour une journée ensoleillée en été à Toronto et plus

de 20 000 kWh à Tysons, Virginie, USA. Globalement, la majeure partie de cette consommation est liée à la climatisation et au chauffage des tentes, des bureaux et de la cuisine, dépendamment des périodes. La moitié de la charge totale est utilisée pour climatiser ou chauffer le BigTop, la tente principale où ont lieu les spectacles. Ainsi, analyser les charges de chauffage et de climatisation semble s'avérer être une étape essentielle vers la création d'un système permettant la diminution de la consommation du Cirque du Soleil pendant les heures de spectacle. Cependant, le contexte de fonctionnement du Cirque n'est pas simple. En effet, les spectacles sont pour la plupart itinérants, ce qui ne facilite pas l'installation de systèmes de production d'énergie verte, qui peuvent parfois être encombrants et/ou fragiles et/ou fastidieux et donc onéreux à monter et démonter à chaque spectacle. De plus, le CDS doit faire face à des réglementations qui diffèrent pour chacun des sites où il s'installe, et qui peuvent parfois limiter les possibilités de production énergétique.

Ainsi, la problématique majeure à laquelle doit répondre le CDS dans un futur proche est le développement et l'implantation de solutions de réduction de consommation, de production d'énergie « propre » et de stockage, respectant l'environnement et qui entraîneront le remplacement progressif des génératrices utilisées actuellement.

0.3 Objectifs

0.3.1 Projet global

Dans un premier temps, l'objectif global du projet avec le CDS consiste à bien définir le problème avec le client, puis de proposer un large panel de solutions (Rousse, 2016a). Par la suite, la sélection des solutions retenues se fait en prenant en compte les critères définis à la formulation du problème et qui sont approuvés par le CDS. Cependant, pour documenter le problème, il faut connaître certains paramètres et données à ce jour inconnus par le CDS, ce qui requiert d'implanter un système de mesure de données. Cette campagne de mesure est nécessaire pour quantifier les économies réalisables et pour faciliter la programmation des futures tournées. De plus, ces mesures permettront également de vérifier s'il n'y a pas d'installations fonctionnant de manière inappropriée. Enfin, une fois les idées générées et

analysées, il s'agit de développer celles qui présentent le potentiel le plus élevé d'économie d'énergie. Ce mémoire se veut ainsi être une présentation des campagnes de mesures qui ont été menées, mais aussi des analyses qui ont été réalisées concernant les différentes solutions pouvant répondre au cahier des charges qui a été créé de concert avec l'équipe du CDS.

0.3.2 Objectifs du projet de maîtrise

Dans le contexte du projet global présenté ci-dessus, les objectifs qui se dégagent pour cette étude sont séparés en cinq catégories :

- La première concerne la documentation du problème afin d'identifier des ressources permettant de mieux appréhender le projet dans sa globalité. Cette documentation se sépare elle-même en deux étapes. Dans un premier temps, il s'avère nécessaire de présenter une revue concernant les différents types de stockage d'énergie qui peuvent être actuellement développés, sous quelque forme que ce soit, dans le but de pouvoir atténuer la pointe de consommation en phase de chauffage et de climatisation. La deuxième revue concerne la solution de brumisation, qui permettrait quant à elle de diminuer la consommation, mais aussi la pointe électrique, uniquement lors des périodes de climatisation.
- La mise en place d'une campagne de mesures qui doit permettre d'obtenir un certain nombre de paramètres indispensables pour réaliser un système de mesures des transferts d'énergie thermique à partir d'un bilan thermique, comme l'acquisition des températures intérieures et les propriétés optico-radiatives des toiles. De plus, comme le système actuel d'enregistrement des données du CDS présente des lacunes, il s'avère également nécessaire de modifier les séquences de mesures et de sauvegardes des consommations électriques des différents spectacles.
- La supervision de plusieurs équipes et l'intégration des différentes conclusions des rapports produits au projet présenté au CDS. La première étape a été d'assister et d'intégrer au projet final les conclusions d'une équipe de Projet de Fin d'Études qui a effectué un premier dégrossissage du projet dans un rapport intitulé « Conception d'un système de production et de stockage d'énergie » concernant l'efficacité énergétique

(Lévesque, Roy, Sauvageot & Trudel, 2016). Par la suite, un deuxième projet mené par une stagiaire a été encadré, proposant cette fois une étude de déstratification de l'air chaud dans la tente des artistes dans un rapport intitulé « Measures of energy efficiency in itinerant show » (Izquierdo, 2016). Finalement, la dernière étape consistait à assister Daniel Rousse lors de la remise des trois rapports techniques remis au CDS pendant la durée du projet (Rousse, 2016a; Rousse, 2016b; Rousse, 2016c).

- L'analyse du fonctionnement global des spectacles du CDS lors de l'implantation du nouveau spectacle Luzia à Montréal. Cette étude a notamment pour but d'effectuer des analyses de sobriété et d'efficacité énergétique sur les différents systèmes installés, ainsi qu'une analyse de la variation des propriétés intrinsèques de la toile utilisée. L'objectif final de ces analyses est de proposer au CDS des solutions de réduction de la charge.
- Le dernier objectif de ce projet réside dans la conception d'un système de brumisation ayant pour but d'atténuer la consommation et la pointe électrique en phase de climatisation. Ce procédé de refroidissement par évaporation a tout d'abord été analysé pour le spectacle Luzia à Montréal, pour démontrer de manière quantitative sa rentabilité, avant d'être validé expérimentalement.

0.4 Méthodologie

Dans le but de répondre à tous les objectifs cités dans la partie précédente, une méthodologie précise en deux étapes a été mise en place. La première étape concerne la cueillette de toutes les informations nécessaires à la réalisation de ce projet : revue de littérature et campagne de mesure. Dans un premier temps, un état de l'art actuel concernant les technologies actuelles de stockage d'énergie sous toutes ces formes et les procédés de refroidissement par évaporation est réalisé. Une fois les différents types de stockage potentiellement utilisables dans le contexte particulier du CDS dégagés, une proposition d'implantation leur sera faite. Dans un second temps, un stage sous la tutelle du CDS a été réalisé en avril 2016 pour permettre d'effectuer des analyses concernant les différents systèmes installés, mais surtout pour permettre la mise en place de campagnes de mesures pour compléter les données requises. Ce stage in-situ est

également l'occasion d'inventorier les consommations énergétiques du CDS dans le but de proposer un diagnostic futur quant aux solutions de réduction de la charge. C'est à cette occasion que toutes les données nécessaires aux futures analyses doivent être récoltées.

La deuxième partie de la méthodologie concerne cette fois la conception et l'intégration des solutions proposées au CDS. Un large panel de solutions est tout d'abord proposé, et parmi celles-ci, seules certaines seront retenues pour être développées plus en profondeur. Viennent ensuite les parties conception et programmation de la solution, qui nécessitent la mise en place d'une étude précise concernant son utilisation, ses économies potentielles énergétiques, ainsi que sa rentabilité. Pour les solutions présentant des économies prometteuses lors de leurs analyses, des mesures expérimentales in-situ seront ensuite réalisées. L'objectif final est d'intégrer ces systèmes aux installations du CDS pour permettre de réduire leur consommation énergétique globale.

0.5 Contenu de ce mémoire

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Dans un premier temps, la revue de littérature propose une liste exhaustive des différents types de stockage d'énergie qui sont actuellement utilisés et développés, ainsi qu'une introduction aux systèmes existants de refroidissement par évaporation. Le deuxième chapitre concerne la mise en place d'une campagne de mesure visant à installer des systèmes d'acquisition et de mesure pour les différentes données qui sont nécessaires pour réaliser les études proposées par la suite. La troisième partie présente ensuite une étude sur l'influence des propriétés de la toile de la tente sur la charge de climatisation du CDS. S'en suit une discussion sur la brumisation d'eau dans le but d'absorber la charge solaire qui vient frapper la toile. Le chapitre 5 fait un inventaire de solutions mises de l'avant par la groupe t3e et auxquelles l'auteur de ce mémoire a contribué. Le document se termine par un classique chapitre de conclusion et de présentation des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction à la revue de littérature

L'électricité est une énergie qu'il est pratiquement impossible de stocker en grandes quantités, à l'inverse des énergies primaires qui peuvent être stockées de manière simple avant d'être transformées en énergie. Lorsque le CDS est en mesure de se brancher au réseau local de l'endroit où il s'installe, les tarifs de l'électricité sont imposés et augmentent durant la journée lors des fortes périodes de consommation. De plus, lorsque la demande de puissance dépasse une certaine valeur de pointe fixée par les fournisseurs, le coût de la pointe peut-être de loin supérieur à celui de la consommation.

Il semble donc pertinent d'envisager le stockage de l'énergie au moment de faible consommation et de faibles tarifs et de l'employer lors des grands appels de puissance qui peuvent être déterminés à l'avance. Cependant, face à la difficulté de stocker de l'électricité en grande quantité, il pourrait être intéressant de stocker de l'énergie sous d'autres formes et par d'autres méthodes, dans l'optique de la restituer lors des pointes ou « peaks » de consommation ayant lieu durant les représentations.

Il existe actuellement plusieurs moyens permettant de mettre en place des alternatives à cette problématique de stockage de l'énergie électrique :

- Il est ainsi possible de stocker de l'énergie sous forme thermique, c'est-à-dire de stocker de la chaleur ou du froid dans le but de restituer cette énergie plus tard, par exemple en période de chauffage ou de climatisation.
- Le stockage gravitaire se retrouve à grande échelle, notamment avec les stations de transfert d'énergie par pompage, qui peuvent être terrestres ou marines.
- Le stockage sous forme mécanique se développe également plus largement, et donne la possibilité d'emmagasiner de l'énergie sous forme potentielle ou cinétique, avec l'arrivée

de volants d'inertie de plus grandes tailles. Le stockage de l'air comprimé (CAES) permet également de stocker une grande puissance pour une décharge sur une durée longue.

- L'énergie sous forme magnétique est maintenant également stockable, grâce aux procédés de stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) qui se sont développés dernièrement.
- Il est finalement possible d'utiliser le stockage chimique qui permet de stocker de petites quantités d'énergie, principe qui est d'ores et déjà utilisé avec l'hydrogène. Le stockage électrochimique se développe également avec les batteries utilisant différents éléments, ou encore les supercondensateurs qui peuvent stocker puis fournir de petites quantités d'électricité.

La figure 1.1 présente une comparaison entre les différents moyens de stockage cités précédemment, qui ont été utilisés et développés durant les dernières années, en prenant en considération leur temps de décharge ainsi que la puissance qu'il leur est possible d'emmagasiner. En dehors des batteries, qui ont connues des améliorations en termes de puissance stockée récemment et qui sont maintenant plus largement commercialisées, les capacités ont peu évoluées depuis 2012. Le stockage thermique est le moyen de stockage qui est encore un des moins développés, avec le stockage d'air comprimé sous-marin ou sous forme d'air liquide.

Toutes ces technologies permettraient d'emmagasiner l'énergie électrique lors des périodes de faible consommation ou bien de l'énergie provenant du solaire et de l'éolien, qui sont actuellement abondantes mais très difficile à stocker, puis de restituer cette énergie plus tard. Cette revue de littérature a ainsi pour but de présenter le processus de stockage/déstockage ainsi que les technologies qui ont pu à ce jour être développées pour stocker de l'énergie sous différentes formes, et de la restituer lors des périodes de consommation importante, sur de courtes ou longues périodes.

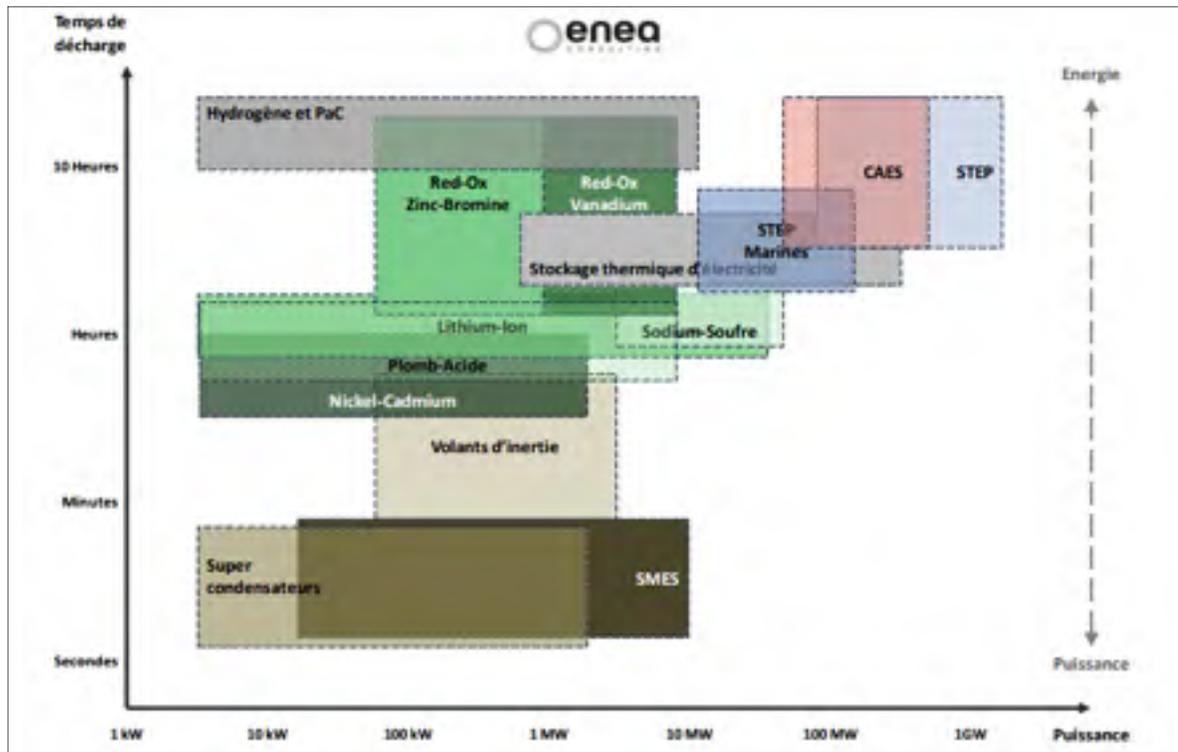


Figure 1.1 Comparaison des moyens de stockage selon leur de temps de décharge et la puissance emmagasinée

Tiré de Jacquelin, L. M., Lacroix, O., & Bordeleau, N. (2012).

1.2 Lissage de la consommation par processus de stockage

La figure 1.2 présente un exemple de demande de puissance durant une journée entière lorsque les besoins réels en électricité sont confinés entre 8h et 19h. La figure montre notamment un pic de demande entre 15h et 19h. En calculant la quantité totale d'énergie produite, il est possible de déterminer quelle est la valeur de puissance maximale à ne pas dépasser (ici environ 225 kW) pour ne pas dépasser la pointe imposée par le fournisseur. Pour déplacer cette pointe, il y a tout d'abord une phase de stockage de 19 h la veille à minuit et de minuit à 8 heures (chiffre 1 sur le graphique 1.2), où de l'énergie est stockée en dehors des périodes de pointe. Dans le cas du CDS, ces périodes se trouvent essentiellement la nuit et en matinée (de 22h à 9h) puisque les répétitions ont lieu en fin de matinée et début d'après-midi et les spectacles ont lieu en fin d'après-midi et soirée. Vient ensuite la phase de déstockage (chiffre 2 sur le graphique 1.2), où toute l'énergie emmagasinée est fournie aux installations pendant les

périodes de pointe pour limiter celle-ci à la valeur prédéterminée. Ainsi, l'énergie emmagasinée durant les périodes de stockage (1) est directement fournie aux installations pendant la période de pointe (2) et l'énergie manquante est produite par le réseau (2'). Si la consommation en kWh demeure la même, le coût de l'énergie demeure beaucoup plus faible en limitant la pointe de consommation maximale à environ 225 kW (figure 1.2) par rapport à 600 kW.

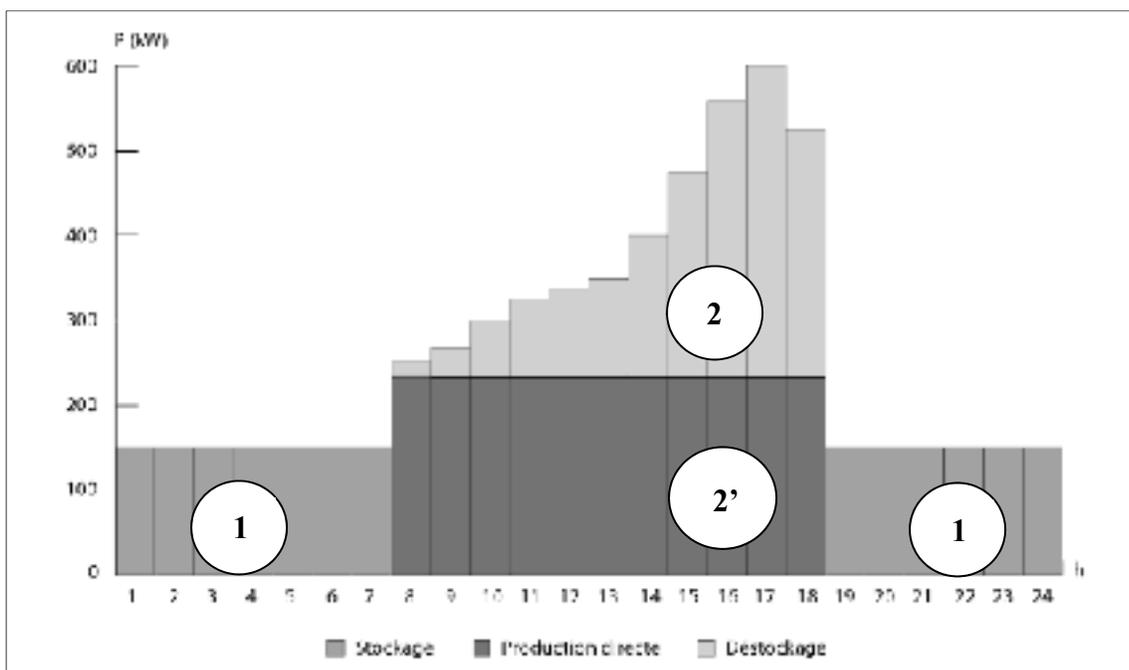


Figure 1.2 Exemple de stockage de nuit et déstockage durant la journée
Tiré et adapté de Rapin, P., Jacquard, P., & Desmons, J. (2015).

En outre, le lissage de la demande grâce au stockage permet de diminuer de manière significative les coûts en approvisionnement, mais aussi d'augmenter la qualité de production de l'énergie grâce à une diminution des variations de demande, diminuant également les pertes et améliorant l'efficacité du système (Xu, 2013). La suite de la revue de littérature concerne cette fois les différents moyens utilisables pour stocker de l'énergie, sous quelque forme que ce soit.

1.3 Les différents types de stockage thermique

Il existe différents types de stockage thermique :

- le stockage de chaleur sensible,
- le stockage de chaleur latente, aussi appelé stockage d'énergie de changement de phase,
- le stockage d'énergie de liaison (par sorption ou réaction).

La figure 1.3 présente les différents types de stockage thermique, en fonction de la quantité d'énergie qu'ils peuvent stocker dans 1m^3 , ainsi que leur stade de développement actuel.

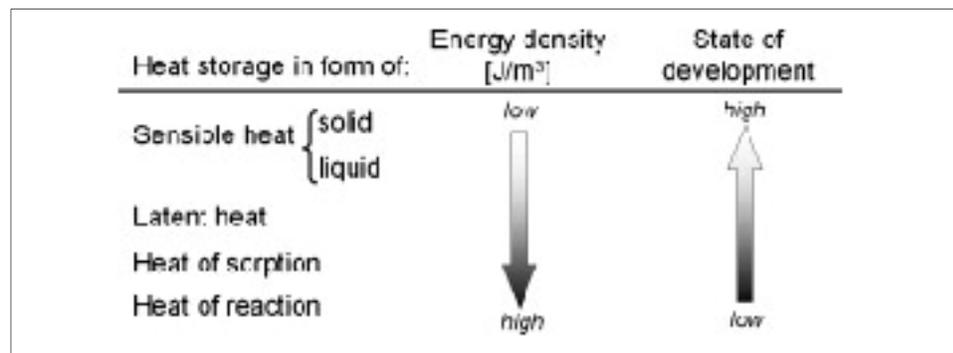


Figure 1.3 Comparaison des différentes formes de stockage thermique
Tiré de N'tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009)

Le stockage d'énergie de liaison est le plus prometteur puisque c'est celui qui permet de stocker les plus grandes quantités d'énergie par unité de volume, mais c'est aussi le type le moins développé, contrairement au stockage par chaleur sensible. Ces différentes technologies peuvent être aussi bien utilisées dans le cas du stockage de froid que du stockage de chaleur. En revanche, le stockage à haute température peut se révéler difficile à mettre en place car le système doit être assez bien dimensionné pour pouvoir encaisser des variations fréquentes de températures, allant parfois jusqu'à plus de 900°C . Ce sont cependant des systèmes qui sont assez encombrants, surtout concernant le stockage à froid, et qui sont relativement chers en termes de coûts d'investissement comparé à des systèmes de conditionnement d'air conventionnels.

1.3.1 Stockage par chaleur sensible ou sensible heat storage (SHS)

Le stockage par chaleur sensible est un procédé de stockage de chaleur qui emmagasine de la chaleur ou du froid dans un matériau, sans provoquer de changement de phase de celui-ci, simplement en faisant varier sa température. La quantité d'énergie qui est stockée par le matériau dépend ainsi uniquement de la variation de température ΔT ainsi que des propriétés intrinsèques du matériau, telles que sa masse volumique ρ , son volume V et sa chaleur spécifique c_p . La quantité d'énergie stockée est donnée par les équations suivantes (1.1 et 1.2):

$$Q_{sto} = \int_{T_i}^{T_f} \rho \times V \times c_p \times dT \quad (1.1)$$

$$Q_{sto} = \rho \times V \times c_p \times \Delta T \quad (1.2)$$

Cependant, il existe plusieurs inconvénients à ce type de stockage. En effet, ces systèmes sont souvent de taille imposante, ce qui les rend difficilement implantable. De plus, ils ne peuvent pas délivrer ou stocker de l'énergie à une température constante, il faut impérativement leur faire subir une variation de température. Enfin, les matériaux utilisés se doivent d'avoir une faible inertie thermique afin de permettre des variations de température rapides (Ataer, 2006) et en même temps une forte diffusivité thermique pour permettre la densité d'énergie la plus importante possible. Le système entier doit être conçu de manière à avoir la capacité de supporter de très hautes températures, en utilisant un matériau qui ne change pas de phase pendant l'opération. C'est pourquoi la plupart des matériaux utilisés ne peuvent travailler que sur certaines plages de températures, ce qui justifie leur choix en fonction de l'application recherchée. La figure 1.4 résume ainsi les différents matériaux pouvant être utilisés, leur plage de température d'utilisation, ainsi que leur chaleur spécifique qui permet de quantifier la quantité d'énergie échangée.

Medium	Fluid type	Temperature range (°C)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg K)
Rock		20	2560	879
Brick		20	1600	840
Concrete		20	1900-2300	880
Water		0-100	1000	4190
Caloria HE43	Oil	12-260	867	2200
Engine oil	Oil	Up to 160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	Up to 78	790	2400
Propanol	Organic liquid	Up to 97	800	2500
Butanol	Organic liquid	Up to 118	809	2400
Isotanol	Organic liquid	Up to 110	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	Up to 148	831	2200
Octane	Organic liquid	Up to 126	704	2400

Figure 1.4 Liste des matériaux solides et liquides pour le stockage de chaleur sensible
Tiré de Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009)

Outre la chaleur spécifique, il faut également prendre en compte la conductivité thermique du matériau qui quantifie les aptitudes d'un matériau à transmettre la chaleur. Plus globalement, l'inertie thermique du matériau est caractérisée par sa diffusivité qui est le rapport de sa conductivité sur sa capacité thermique (Dincer & Rosen, 2002).

1.3.1.1 Matériaux sous forme liquide

Le stockage sous forme thermique peut être réalisé à l'aide de matériaux liquides. Un exemple naturel est le stockage dans les aquifères (Aquifer Thermal Energy Storage : ATER), qui se présentent sous forme de réservoirs liquides souterrains contenant de l'eau la plupart du temps et qui emmagasinent de la chaleur, maintenant l'eau à température constante grâce à la porosité du sol, et pouvant la restituer par la suite. Ce type de système naturel peut être adapté directement à l'aide d'un réservoir chauffé, qui déstocke ensuite cette chaleur pour différentes applications. L'eau est un des meilleurs liquides de stockage puisqu'elle est peu coûteuse, non toxique et possède une grande chaleur spécifique (Sharma, Tyagi, Chen & Buddhi., 2009). En revanche, l'inconvénient majeur de cette technique de stockage est le changement possible de phase du matériau, il faut donc faire attention à travailler dans des plages évitant tout changement de phase ou avec des réservoirs capables de contenir l'eau à sa pression de vapeur saturante. C'est notamment le principal problème avec l'utilisation de l'eau, puisqu'elle peut geler ou bouillir dans une plage de température relativement faible (entre 0°C et 100°C à pression atmosphérique). D'autres liquides peuvent être utilisés pour fonctionner à des plages

de températures plus élevées, à partir de 100°C, c'est le cas pour certaines huiles ou certains sels inorganiques. Mais ces liquides posent aussi leur part de problèmes de par leur utilisation puisque la plupart de ces huiles sont corrosives et peuvent se dégrader avec le temps ou bien même s'enflammer si la température d'utilisation est trop élevée. L'usage de gaz inertes avec les huiles permet de pallier à ce problème, mais la combinaison augmente le coût et limite de ce fait le système à de petits systèmes de stockage (Ataer, 2006). De plus, pour pouvoir stocker ces liquides, souvent à hautes températures, il faut utiliser des réservoirs pouvant résister à ces températures élevées et qui permettent de garder la température à des valeurs relativement constantes pour limiter les pertes par échange thermique avec l'extérieur. Les systèmes de stockage pour les liquides étant de meilleure qualité, ils sont ainsi souvent plus onéreux que ceux pour les matériaux solides (Dincer & Rosen, 2002). Une remorque complète devrait être destinée au réservoir isolé qui pourrait être rempli d'eau afin de constituer une réserve d'énergie pour les spectacles itinérants du CDS avec un ΔT maximal d'environ 90°C.

1.3.1.2 Matériaux solides

Le stockage d'énergie thermique dans des matériaux solides, dits réfractaires, peut également être utilisé. Le but est toujours de stocker de l'énergie sous forme thermique, mais cette fois dans des solides, poreux et intégrés ou non à un système de stockage. Ce type de système est plus avantageux sur plusieurs points puisqu'il n'est pas toxique ni inflammable et qu'il fonctionne à une pression constante, contrairement à la plupart des matériaux de stockage liquide. Malgré des chaleurs spécifiques souvent basses pour ces solides qui affectent la quantité d'énergie pouvant être stockée, leurs densités plus élevées et leur capacité à fonctionner sur de plus larges plages de températures (de 100°C à 1000°C) sans provoquer de changements de phases peuvent les rendre intéressants à utiliser (Tomlinson & Kannberg, 1990). De plus, même s'il est nécessaire d'utiliser une plus grande quantité de ces solides que d'eau, le matériau en lui-même demeure relativement peu coûteux et les éléments solides agissent à la fois comme surface d'échange thermique (grande surface avec peu de pertes) et comme moyen de stockage (Ataer, 2006). Les matériaux pour ce type de stockage sont nombreux : il est possible d'utiliser de la céramique, des briques et des alliages d'acier, de fer

et de fonte. Les alliages d'acier se révèlent être un excellent compromis puisqu'ils présentent à la fois une grande capacité de chauffage et une conductivité thermique élevée, permettant des cycles de charge et de décharge rapides (Dincer & Rosen, 2002). Le principal problème réside dans la grande taille de ces systèmes, nécessaire pour pouvoir stocker les matériaux, ce qui rend leur transport relativement difficile et plus onéreux. Ce genre de stockage est difficilement adaptable à des applications pour le CDS.

1.3.2 Stockage par chaleur latente ou latent heat storage (LHS)

Le stockage par chaleur latente est quant à lui un système de stockage basé sur la quantité de chaleur absorbée ou relâchée lorsqu'un matériau est soumis à un changement de température qui occasionne le plus souvent un seul changement de phase de solide à liquide, de liquide à gaz, ou inversement. Les matériaux de stockage utilisés dans ce cas-ci sont appelés matériaux à changement de phase (MCP). Pour répondre à une demande de chauffage, il est par exemple possible de faire fondre un MCP à l'aide d'une source de chaleur externe en période de basse consommation. Le matériau stocke ainsi la chaleur reçue sous sa forme liquide et la chaleur qui a été emmagasinée au cours de ce processus est finalement absorbée par la charge lors du procédé inverse de solidification. Il est également possible de répondre à une demande de climatisation, toujours en utilisant le mécanisme de changement de phase, mais de manière inversée. Le MCP absorbe ainsi de la chaleur lors de sa liquéfaction, ce qui a pour effet de contribuer à refroidir l'environnement immédiat, diminuant ainsi la charge de climatisation. Il faut cependant noter que tout changement de phase se fait de manière isotherme, c'est-à-dire sans variation de température. À ce moment-là, seule de l'énergie correspondant au changement de phase est absorbée ou libérée. Les MCP sont un très bon moyen de stockage, puisqu'ils sont capables de stocker environ 5 à 14 fois plus de chaleur par unité de volume que les matériaux utilisés pour le stockage sensible (SHS) comme l'eau ou la pierre (Sharma, Tyagi, Chen & Buddhi, 2009). Pour un matériau initialement à une température inférieure à sa température de fusion/solidification et qui est finalement amené à une température finale supérieure à celle-ci, il y aura stockage à la fois sensible et latent. Les variables mises en jeu sont les mêmes que précédemment, avec en plus la chaleur latente de changement de phase L_{ph}

qui a lieu à la température T_{ph} . L'équation donnant la quantité d'énergie stockée est alors (équations 1.3 et 1.4) :

$$Q = \int_{T_i}^{T_{ph}} \rho \times V \times c_{p,s} \times dT + \rho \times V \times L_{ph} + \int_{T_{ph}}^{T_f} \rho \times V \times c_{p,l} \times dT \quad (1.3)$$

$$Q = \rho \times V \times [c_{p,s} \times (T_{ph} - T_i) + L_{ph} + c_{p,l} \times (T_f - T_{ph})] \quad (1.4)$$

S'il s'avère que deux changements de phase surviennent pendant l'opération, il est alors nécessaire de rajouter de nouveaux termes à la formule, avec une deuxième chaleur latente de changement de phase et un dégagement de chaleur dû à la troisième variation de température. Le principe est aussi applicable de manière inverse pour stocker ou déstocker de l'énergie et peut aussi concerner le changement de phase liquide/vapeur.

Il est important de choisir un matériau ayant une bonne stabilité pour chacune de ses phases, possédant une chaleur latente de changement de phase la plus grande possible, ainsi que des chaleurs massiques de phases les plus élevées possibles, ce qui permet de diminuer la surface d'échange thermique, donc la quantité de matériau utilisée et ultimement le coût de la solution. La température de changement de phase demeure bien sûr un élément clé et doit être comprise dans des plages de températures raisonnables et utilisables pour le système. Le dernier point important concerne la conductivité thermique du matériau, qui doit être grande afin de minimiser le gradient de température requis pour charger le matériau de stockage (Socaciu, 2012).

Cependant, travailler avec des MCP nécessite également de prendre certaines précautions quant à leur utilisation et dans le type de système qui leur est associé. Il est par exemple primordial de travailler avec des petits volumes de stockage et faire attention à ce que le changement de phase n'occasionne pas de trop grandes variations de volume et de pression, ce qui rendrait le système trop complexe à utiliser, notamment pour le dimensionnement du réservoir. C'est d'ailleurs le cas pour les transformations aboutissant à des phases gazeuses, la quantité de chaleur de changement de phase est grande, mais occasionne des variations de

volumes importants, ce qui rend les systèmes difficilement utilisables (Ataer, 2006). Il faut également veiller à utiliser des MCP non inflammables, non explosifs et surtout non corrosifs, pour éviter de rendre leur utilisation dangereuse à la fois pour les techniciens et pour la durée de vie du matériel de stockage tel que le conteneur (Socaciu, 2012). De plus, le matériel de stockage de chaleur par LHS est plus onéreux que celui par SHS, de par son besoin de résister aux changements de phases fréquents, il est donc important de bien choisir le MCP utilisé dans ce type de stockage.

Il existe principalement trois types de matériaux à changements de phases : les MCP organiques, dont les paraffines, les acides gras, esters et alcools, et les MCP inorganiques, comme les sels hydratés et les métaux. La dernière catégorie est celle des MCP eutectiques, qui sont l'association de deux composants ou plus, organiques ou non organiques, et qui forment un mélange lors de la cristallisation (Sharma, Tyagi, Chen & Buddhi, 2009 ; Dutil, Rousse, Ben Salah, Lassue & Zalewski, 2011). Les MCP les plus typiques commercialisés actuellement sont les paraffines, comme le RT26 par exemple, qui possèdent une grande chaleur latente de fusion, d'environ 250 kJ/kg (Socaciu, 2012). Cependant, un des MCP les plus répandu également est une nouvelle fois l'eau, puisqu'elle est n'est pas chère, abondante, non toxique et qu'elle présente des bonnes caractéristiques pour ce fonctionnement, notamment sous la forme de banque de glace, qui absorbe la chaleur lors de sa fusion puis la restitue. En effet, convertir 1 kg d'eau en glace à 0°C permet de récupérer 152 kJ de chaleur, qui pourraient être utilisés pour le chauffage. De la même manière, si 1 kg de glace à 0°C absorbe en tout 152 kJ de chaleur pendant une certaine durée, elle se transforme en eau, ce qui permet par exemple de refroidir l'air qui pourrait ensuite être utilisé pour la climatisation. Les quantités d'énergie en jeu ici sont intéressantes. En effet, un réservoir de 10 m³ d'eau (soit 10 000 kg d'eau) permettrait d'absorber ou de libérer environ 422 kWh sur un cycle de plusieurs heures par le changement de phase d'eau en glace ou inversement. Cependant, il faut noter que la glace met plus de temps à se reformer qu'à fondre, il est donc nécessaire de prendre en compte cette durée supplémentaire. S'il s'avère que le système est suffisamment bien dimensionné pour pouvoir contenir de l'eau à vapeur saturante, lorsque l'eau se transforme en

vapeur ou inversement, la chaleur latente de changement de phase est d'environ 2 MJ soit environ 0,55 kWh par kilogrammes d'eau (Dincer & Rosen, 2002).

Finalement, le stockage de chaleur à l'aide des MCP est une technique tout de même plus prometteuse que le stockage par SHS, puisque les quantités d'énergie mises en jeu sont plus conséquentes, malgré un prix plus élevé. Il faut cependant dans un premier temps trouver un système capable de réaliser de grands nombres de cycles, et donc capable de contrer les problèmes de dégradation du matériel qui rendent la période d'utilisation d'un conteneur de MCP plutôt courte. Il faut aussi un matériau qui n'induit pas de surfusion de manière à pouvoir compter sur une température de fusion effective près de la valeur théorique. Ce type de stockage requiert aussi une remorque supplémentaire dans le transport des spectacles itinérants du CDS.

1.3.3 Bond Energy Storage (BES) ou Stockage thermochimique

Le fonctionnement pour un stockage de type thermochimique réside dans les interactions de liaisons entre des atomes qui peuvent alors créer de l'énergie sous forme de chaleur ou en absorber, par sorption d'autres éléments ou non. Le terme sorption désigne à la fois l'absorption d'un gaz/liquide dans un liquide/solide, et l'adsorption qui lie un gaz à un solide. Plus précisément, le but est de stocker de l'énergie dans des systèmes comportant des composants chimiques qui absorbent ou relâchent de l'énergie lors de réactions chimiques de liaisons, entre des atomes, à une certaine température de transformation. Cela implique de ce fait que la réaction chimique doit absolument être réversible, puisque c'est lorsque la réaction chimique inverse a lieu que la chaleur qui a été emmagasinée dans la liaison atomique est ensuite relâchée, ou inversement. Dans l'équation 1.5, le couple A/B représente une paire d'atomes, qui se décomposent en atomes A et B distincts et stockables de manière séparée. Cette décomposition peut se faire lors d'un apport de chaleur, c'est-à-dire lors d'une réaction endothermique, ou bien en libérant de la chaleur, lors d'une réaction exothermique (N'Tsoukpoe, Liu, Le Pierrès, & Luo, 2009), comme dans la relation 1.5.



Les avantages non négligeables de cette technique de stockage résident dans le fait que les composants obtenus peuvent être séparés après la réaction, mais aussi facilement transportés et stockés. Cela limite grandement les pertes thermiques habituelles puisque les composants sont devenus stables suite à la réaction et que l'énergie est stockée sous forme de potentiel chimique. Le sulfate de magnésium, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, est par exemple un matériau de stockage thermochimique, qui se décompose en MgSO_4 et H_2O à une température de 122°C , capable de stocker jusqu'à $2,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, soit $778 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ (N'Tsoukpoé, Liu, Le Pierrès et Luo, 2009). Cependant, pour que ce stockage soit viable, l'énergie stockée lors de la réaction doit être assez grande pour de petits volumes de réactifs, et que ces derniers soient peu coûteux. De plus, le système doit pouvoir récupérer 99,9 % des composants qui réagissent lors de la réaction chimique pour que ce procédé soit viable. Il faut en revanche prendre des précautions avec ce type de stockage car son efficacité diminue avec le temps, du fait d'interactions chimiques entre le matériel de stockage et le conteneur. Une nouvelle fois, ce type de stockage est difficilement implantable dans le contexte du CDS puisqu'il serait nécessaire de créer un espace et un transport uniquement dédié à ce système de stockage.

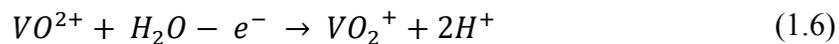
1.4 Stockage électrochimique

Le stockage électrochimique est un des plus répandu puisque le stockage par batteries en fait partie. Le principe de ce stockage réside dans l'utilisation d'énergie chimique générée lors de réactions chimiques, avant d'être stockée dans la batterie, puis convertie en énergie électrique, directement utilisable dans le réseau. Ces batteries peuvent fonctionner durant plusieurs heures, voire plusieurs jours pour les plus performantes et sont créées pour un certain nombre de cycles de charge/décharge équivalent à leur durée de vie. Ce type de stockage permet principalement de lisser la demande d'énergie durant la journée, ou même de combler une partie de la demande lors du pic d'utilisation de puissance. Il existe différents types de batteries telles que les batteries à hydrogène, les batteries Lithium-ion, pour n'en nommer que deux, mais les batteries les plus utilisées pour une application de stockage sont actuellement les batteries à flux,

également appelées batteries à circulation. Il existe différents moyens pour charger la batterie avant son utilisation, il est ainsi possible d'utiliser l'énergie créée par la biomasse (cycle naturel de la Terre), l'énergie créée par une installation photovoltaïque ou éolienne, ou bien tout simplement en la chargeant sur le réseau en dehors des pics importants de consommation, la nuit par exemple. Cependant, ce sont des systèmes qui, pour la plupart, ne permettent de stocker que de faibles quantités d'énergie pour de petits espaces.

1.4.1 Batteries à flux (ou circulation)

La batterie à flux est un des stockages de type électrochimique les plus utilisés. Son fonctionnement est basé sur une réaction d'oxydoréduction, soit un échange entre des électrons contenus dans les ions circulant dans la batterie, qui est réalisé par l'intermédiaire d'une membrane d'échange. Les électrons, qui possèdent une certaine charge, créent ainsi un courant en se déplaçant. Ce phénomène permet ainsi de stocker de l'énergie grâce au potentiel chimique, avant de le restituer lorsqu'il y a besoin. Les ions sont contenus dans deux électrolytes liquides, un négatif et un positif, qui constituent un couple électrochimique pour l'échange des ions. Les couples plus répandus sont le couple Zn/Br (Zinc/Brome), ou encore le couple Vanadium/Vanadium, qui empêche la contamination interne puisque c'est le même composant, et qui servira d'exemple ici. Le couple Vanadium/Vanadium met en place une réaction de réduction à l'électrode positive avec les espèces VO_2^+/VO^{2+} (équation 1.6) et une réaction d'oxydation à l'électrode négative avec les espèces V^{2+}/V^{3+} (équation 1.7), respectivement selon les équations de réactions suivantes (Xie, 2012) :



La batterie au vanadium permet de stocker, puis générer jusqu'à 20 Wh/kg. Ce type de système est réversible, puisque l'échange des charges permet d'absorber ou de produire de l'électricité, dépendamment du sens de fonctionnement, en charge et décharge. La durée de vie de la batterie

correspond au nombre de cycles de charge/décharge réalisables. Un schéma du principe de fonctionnement de la batterie est présenté en figure 1.5.

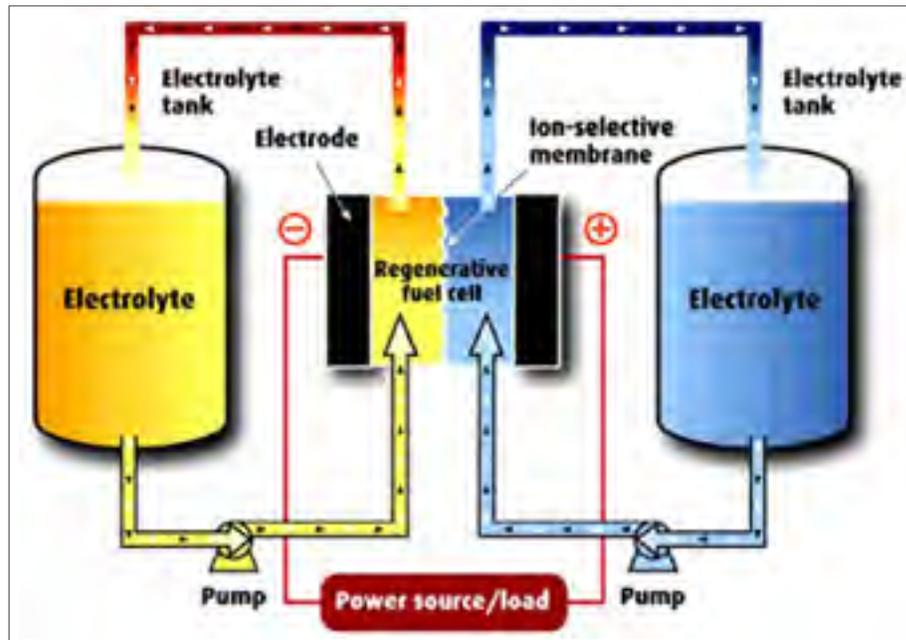


Figure 1.5 Principe de fonctionnement d'une batterie à circulation
Tiré de Multon, B., Robin, G., Erambert, E., & Ben Ahmed, H. (2003)
repéré à www.smartgrids-cre.fr

Les avantages des batteries à flux résident dans leur grande durée de vie, leur temps de charge/décharge rapide et leur bon rendement énergétique (70 à 80%). Cependant, leurs capacités sont plutôt faibles, ces batteries doivent donc souvent être utilisées de manière couplées pour permettre d'atteindre une capacité non négligeable (Dincer & Rosen, 2002). Certaines installations fixes utilisant des batteries en série peuvent ainsi permettre de stocker jusqu'à plusieurs 100 MW. Cependant, leur prix relativement élevé et la quantité de batteries nécessaires pour obtenir des puissances approchant 1 MW rend ce procédé difficilement utilisable dans le contexte du CDS.

1.4.2 Batteries conventionnelles

Les batteries, aussi appelées accumulateurs, plus conventionnelles comme les batteries sodium ou les batteries lithium-ion sont également populaires. Leur fonctionnement est similaire aux batteries à flux, puisqu'il y a toujours un échange entre les charges des ions à travers une réaction d'oxydo-réduction, dans un empilement de différents éléments chimiques. Dans le cas de la batterie lithium-ion, il y a échange de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative en graphite. Grâce aux ions se déplaçant dans le système et qui transportent une certaine quantité de charge, il est possible de générer un courant. L'empilement est ensuite relié à un système qui convertit le tout en énergie électrique et qui peut être utilisé de manière réversible pour recharger la batterie. Le lithium est un matériau qui possède une grande énergie massique, permettant de créer des accumulateurs avec une capacité allant jusqu'à 200 Wh/kg, ce qui rend son utilisation intéressante (Multon & Ruer, 2003). En revanche, les accumulateurs lithium-ions nécessitent l'utilisation d'un autre matériau au niveau de la cathode, qui possède un potentiel standard proche du lithium et qui est placé à l'anode. Le matériau utilisé à l'anode est souvent du graphite, qui possède de bonnes propriétés d'insertions dans le lithium (Vinh, 2010). La capacité de stockage finale dépend ensuite de la taille des électrodes et du système, puisque ces batteries peuvent également être utilisées en série pour stocker une plus grande quantité d'énergie électrochimique. Cependant, malgré une maturité technologique reconnue, les batteries souffrent d'un inconvénient majeur au niveau de leur durée de vie pour des cycles de grandes amplitudes, qui ne dépassent que rarement 1000 cycles. Ce procédé de stockage est ainsi plus souvent utilisé pour des solutions portatives, pour une capacité allant jusqu'à une dizaine de kWh (Robin, Ruellan, Multon, Ben Ahmed & Glorennec, 2004). Les plus grosses batteries li-ion couplées peuvent aller jusqu'à 20 MW rendus sur 4 h (en Chine), sous réserve que la production d'énergie avant stockage soit assez importante. L'utilisation des batteries paraît difficile à mettre en place, concernant le transport et les problèmes de place.

1.4.3 Supercondensateurs

Le supercondensateur présente un fonctionnement similaire à celui d'un condensateur ou d'une batterie, mais ne met pas en jeu une réaction d'oxydo-réduction pour produire et stocker

l'électricité. Le stockage d'énergie se fait grâce au déplacement des ions, soumis à un champ électrique, qui vont se fixer ou se détacher des électrodes, imprégnées dans les électrolytes qui contiennent les ions. Le champ électrostatique ainsi créé permet d'emmagasiner l'énergie. Plus la surface des électrodes est grande, plus la quantité d'ions qui peuvent s'y fixer est grande, ce qui augmente la quantité d'énergie qu'il est possible de stocker. De plus, le fait de ne pas avoir de réaction chimique dans le système a pour effet d'accroître la durabilité des supercondensateurs et donc le nombre de cycles réalisables, mais aussi leur vitesse de charge et de décharge. Leur puissance spécifique est plus élevée que pour des batteries, jusqu'à 2 kW/kg environ, mais leur vitesse de charge/décharge étant très rapide, leur énergie massique n'atteint qu'environ 10Wh/kg (Robin, Ruellan, Multon, Ben Ahmed & Glorennec, 2004), ce qui ne permet de stocker qu'une quantité d'énergie limitée, plus faible que pour des batteries. Ainsi, leur utilisation se fait souvent à court terme, pour répondre à des pics de demande ou dans des situations d'urgence.

1.5 Stockage chimique sous forme d'hydrogène

Comme son nom l'indique, ce procédé est un type de stockage qui utilise l'hydrogène comme matériau de stockage d'énergie, avant de l'utiliser pour récupérer cette énergie qui a été emmagasinée. Dans un premier temps, de l'eau H_2O est décomposée en oxygène O_2 et en hydrogène H_2 à l'aide d'une réaction mettant en jeu une électrolyse, durant les périodes de faible consommation en électricité. L'élément hydrogène H_2 obtenu est ensuite stocké, sous forme liquide ou sous forme gazeuse. L'hydrogène peut également être comprimé afin d'occuper de plus petits volumes, mais son conteneur doit être dimensionné de manière à pouvoir encaisser les variations de pression. Il existe ensuite plusieurs moyens permettant la conversion de l'hydrogène en énergie électrique. Le premier moyen et qui s'avère être le plus simple dans le contexte actuel du CDS, réside dans l'utilisation d'une pile à combustible qui opère la transformation inverse de l'électrolyse, c'est-à-dire qui transforme l'hydrogène obtenu précédemment combiné à de l'oxygène pour obtenir en énergie électrique (Multon & Ruer, 2003). Ce fonctionnement est en quelque sorte similaire à l'utilisation d'une batterie. La quantité d'énergie électrique stockée et obtenue au final est dimensionnée par la capacité de la

pile et principalement par la taille des réservoirs qui stockent l'hydrogène. Le second moyen est d'utiliser l'hydrogène H_2 obtenu, de le comprimer et de le stocker dans un espace clos ou de l'envoyer directement dans une usine de gaz prévue à cet effet et qui transforme l'hydrogène gazeux en électricité à l'aide de turbines (Dincer & Rosen, 2002). Cette dernière solution s'avère être difficile à mettre en place, puisqu'elle nécessite des installations spéciales, qui ne sont pas forcément disponibles sur les sites où se déplace le CDS. De plus, le faible rendement de ce procédé et son prix élevé le rend inintéressant dans ce cas, malgré la facilité à se procurer et transporter de l'hydrogène sous forme liquide ou gazeuse.

1.6 Stockage électromagnétique

Le stockage électromagnétique est aussi appelé stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES en anglais). Ce procédé permet le stockage de l'énergie sous forme électrique, dans un champ magnétique qui est créé par un courant continu traversant une bobine, dite supraconductrice, se présentant sous forme de tore ou de solénoïde. Habituellement, les pertes par effet joule créées par la résistance électrique de la bobine dispersent l'énergie magnétique emmagasinée en quelques secondes (Multon & Peter, 1996). Ainsi, pour que le système fonctionne sans créer de pertes par effet joule, il faut que la bobine dans laquelle circule le courant soit refroidie à une température très basse, en dessous de sa température critique de transition, la transformant vers un état dit « supraconducteur ». À cette température, souvent proche du zéro absolu, certains matériaux n'ont aucune résistance électrique, et ne créent donc pas de pertes par effet joule lorsqu'un courant circule en leur sein (Dincer & Rosen, 2002). L'hélium liquide est souvent employé avec des alliages NbTi, à basse température (4,2 K soit -268,95 °C environ) ou encore l'azote liquide à des températures plus élevées (30 K environ, soit -243,15 °C) avec des céramiques (Robin, Ruellan, Multon, Ben Ahmed & Glorennec, 2004). Une fois l'énergie emmagasinée dans la bobine via le champ magnétique, il suffit alors de brancher le système au réseau pour décharger l'énergie sous forme électrique. Des pertes peuvent toutefois apparaître au niveau du convertisseur lors de la conversion de l'électricité sous forme de courant continu en courant alternatif. Finalement, tout comme les supercondensateurs, ces systèmes possèdent une faible densité énergétique (1 à 5

Wh/kg) et donc de très grandes puissances spécifiques (jusqu'à quelques MW/kg) du fait de leur vitesses de charge et de décharge très élevées (Robin, Ruellan, Multon, Ben Ahmed & Glorennec, 2004). Ce procédé est par conséquent principalement utilisé également lors de demandes de pics de puissance, ou pour des besoins très rapides. En revanche, la nécessité d'un système de cryogénéisation rend le système global très couteux et difficilement implantable dans le contexte d'un spectacle itinérant, malgré leurs très bons rendements et les quantités d'énergie mises en jeu.

1.7 Stockage mécanique

Il existe différentes sortes de stockage mécanique, mais toutes ne sont pas applicables dans le contexte actuel du CDS. C'est notamment le cas pour des systèmes de stockage sous forme d'énergie potentielle, tels que les stations de pompage ou les installations de stockage par air comprimé, qui nécessitent des installations de grandes envergures comme des retenues d'eau pour le pompage ou encore des cavités souterraines pour l'air comprimé. Ces procédés permettent de stocker de grandes quantités d'énergie mais s'avèrent être impossibles à adapter dans des installations d'un spectacle itinérant, et encore moins à déplacer. Le seul système de stockage mécanique qui pourrait stocker de l'énergie mécanique réside dans le stockage inertiel, aussi appelé stockage par volant d'inertie, puisqu'il n'est pas nécessaire de posséder des installations naturelles ou de grande envergure.

Le stockage par volant d'inertie utilise l'énergie cinétique qui se crée lors de la rotation d'un disque ou d'une masse pour emmagasiner temporairement de l'énergie. Son fonctionnement repose d'abord sur une mise en rotation de la masse à des vitesses très élevées par un apport d'énergie externe, tel qu'un moteur. La quantité d'énergie qu'il est possible d'emmagasiner est directement reliée à l'inertie de la masse en rotation, et donc à sa masse, ainsi qu'au carré de la vitesse de rotation (Ben Ahmed, Multon, Bernard & Kerzreho, 2007). L'énergie fournie au départ est alors stockée dans le volant d'inertie en rotation, et la masse continue ensuite sa rotation à la même vitesse sans avoir besoin d'un apport supplémentaire par le moteur (jusqu'à 50 000 tours/min). Pour récupérer l'énergie emmagasinée dans le volant sous forme cinétique,

il faut alors freiner le disque, qui restitue ainsi l'énergie. Le même moteur qui a imprimé la rotation initiale peut être utilisé afin de récupérer l'énergie lors de la baisse de vitesse de rotation de la masse, il agit alors comme une génératrice électrique. Cependant, il est nécessaire pour cela d'utiliser le volant d'inertie dans une enceinte basse pression pour éviter les pertes par autodécharge. De plus, pour diminuer au maximum les pertes occasionnées par les frottements entre les paliers et le volant, il est nécessaire d'utiliser des coussinets magnétiques, qui sont plus coûteux, mais qui maintiennent une haute efficacité mécanique, supérieure à 90% (Multon, Robin, Erambert & Ben Ahmed, 2004). Les matériaux utilisés pour le volant d'inertie sont souvent des composites, car ils possèdent une énergie massique supérieure aux autres matériaux (5 Wh/kg environ) ainsi qu'une bonne résistance en traction, qui est nécessaire pour encaisser les fortes vitesses de rotation. Ce type de stockage possède une grande longévité, qui peut aller jusqu'à 100 000 cycles, ainsi qu'une faible constante de temps, de l'ordre de la minute à l'heure, ce qui rend leur charge et décharge rapide et facile à contrôler, mais aussi capable d'encaisser d'importantes variations de puissance (Robin, Ruellan, Multon, Ben Ahmed & Glorennec, 2004). Ces systèmes sont ainsi comparables aux SMES et sont plutôt utilisés pour réaliser un lissage de la demande de puissance, jusqu'à plusieurs MW, sur de faibles durées. Cependant, leurs performances massiques réelles sont faibles, et des effets gyroscopiques peuvent venir compliquer leur utilisation (Ben Ahmed, Multon, Bernard & Kerzreho, 2007). Les volants d'inertie actuels les plus répandus sont capables d'emmagasiner jusqu'à quelques dizaines de kWh, ce qui reste relativement faible, sans compter que le prix de cette technologie est élevé, augmentant les périodes de retour sur investissement.

1.8 Stockage d'air comprimé

Les systèmes de stockage par air comprimé (CAES en anglais) se sont plus largement développés ces dernières années, dans le but de stocker l'énergie sous forme hydropneumatique et de la restituer lors des périodes de forte consommation. Ce type de stockage présente de nombreux avantages, comme le fait d'utiliser de l'air et de l'eau qui sont des fluides de travail propres, sa grande durabilité et sa capacité à réaliser des inversions stockage/déstockage de manière rapide (Iglesias, 2013). Plusieurs systèmes sont développés à

ce jour. Le premier présente des grandes centrales avec des compresseurs destinés à comprimer de l'air ambiant (jusqu'à 300 bars), une chambre de stockage de l'air, ainsi qu'une chambre de combustion où l'air comprimé est injecté avec du gaz dans le but d'entraîner des turbines à gaz classiques pour produire de l'électricité. Les puissances mises en jeu sont importantes, de 10 à 300 MW dépendamment du volume de stockage, avec un temps de réponse de quelques minutes et une efficacité variant de 50% pour les systèmes conventionnels à 95% pour les nouveaux systèmes isothermes. Le prix reste toutefois élevé, entre 400 et 1 200 euros le kW (Connaissance des énergies, 2013). Des projets allant jusqu'à plus de 2 000 MW sont prévus aux États-Unis et autour du Golfe du Mexique (Multon & Ruer, 2003). Le second, de taille plus raisonnable, utilise des pistons hydrauliques ou de l'eau qui sont placés dans un tube, pour comprimer l'air dans l'espace restant. L'air à haute pression est ensuite conservé dans des bouteilles jusqu'au moment où il sera nécessaire de générer de l'électricité grâce à la détente de l'air dans le cylindre (Enerzine, 2014). Les puissances mises en jeu ici peuvent varier de 25 kW à 2 500 kW prochainement, en faisant varier le nombre de bouteilles stockant l'air comprimé.

Le but final est de raccorder ces systèmes à des parcs éoliens, solaires, ou même au réseau lors des périodes de basse consommation, dans le but d'emmagasiner de l'énergie puis de la restituer plus tard. Un tel système serait cependant bien trop encombrant à transporter dans le contexte du CDS, et nécessiterait l'achat d'un nouveau camion, ce qui mettrait en danger la rentabilité du projet.

1.9 Conclusion sur les différents types de stockage

Le stockage de l'énergie sous différentes formes représente un moyen intéressant de diminuer la consommation énergétique du CDS, mais aussi de diminuer la demande de puissance lors des périodes de pointe, ce qui permet de lisser la demande, et donc de réduire les coûts globaux d'approvisionnement en énergie. En outre, le stockage d'énergie permet également la performance et la fiabilité des systèmes énergétiques, puisque cela permet de réduire de manière effective toutes les pertes énergétiques et d'augmenter la conservation de l'énergie.

Le rendement est donc souvent meilleur en utilisant de l'énergie qui a été stockée, dépendamment du type de stockage qui est utilisé.

Cependant, ces technologies sont difficilement utilisables par le Cirque du Soleil, principalement pour deux raisons. La première réside dans le fait que les spectacles sont itinérants, ils se déplacent ainsi tous les deux mois, voire plus fréquemment, ce qui rend complexe l'implantation, ainsi que le transport de ces systèmes, qui sont pour la plupart encombrants (volants d'inerties, stockage dans les MCP). Sans compter que ces systèmes sont souvent fragiles et résisteraient donc mal à de fréquents déplacements, montages et démontages. De plus, les zones allouées au Cirque sont souvent restreintes dans les villes, il est donc impossible d'utiliser certaines technologies sur place. La deuxième raison réside dans le prix et la quantité d'énergie emmagasinée par ces procédés et la capacité d'investissement du CDS. En effet, pour pouvoir répondre à la demande en période de spectacles, il faudrait pouvoir fournir 5 MWh pendant deux heures, ce qui est extrêmement élevé. Il faudrait ainsi plus de cinq tonnes de batteries très performantes à 100 kWh emmagasiné par kg, pour pouvoir compenser cette demande, ce qui demanderait des remorques supplémentaires en plus d'un coût d'achat important et d'une durée de vie relativement faible. De plus, la plupart des autres systèmes de stockage qui ont été proposés présentent un coût relativement élevé pour des quantités d'énergie stockée relativement faible. Certaines applications permettraient toutefois de répondre à des demandes de pic de puissance, mais leur prix est trop souvent prohibitif (batteries, stockage électromagnétique). Le stockage thermique peut présenter une alternative s'il était possible de récupérer de l'énergie pour le chauffage grâce à la chaleur dégagée par les lampes, les systèmes CVCA ou d'autres applications. Par manque de place et de moyens octroyés par le CDS, aucune solution de stockage ne sera retenue pour de plus amples analyses par la suite. Seules des analyses concernant la sobriété énergétique ou des solutions visant à réduire la consommation énergétique du Cirque seront développées dans les prochains chapitres.

1.10 Revue concernant le rafraîchissement par évaporation

Au cours du projet global avec le CDS, l'une des solutions retenues concernait l'abaissement de la pointe et de la consommation en climatisation des spectacles lors des journées chaudes et ensoleillées. Il s'est avéré prépondérant de pallier ce problème plutôt que de nombreux autres (Rousse, 2016b). Puisque l'étude des différentes options de stockage a rapidement démontré l'impraticabilité de ce type de solutions, une solution de rafraîchissement de la toile par évaporation de gouttelettes d'eau en surface de la toile a été envisagée.

1.10.1 Principe du rafraîchissement par évaporation

La solution de rafraîchissement par évaporation, également appelée brumisation, cherche à utiliser l'évaporation d'un fluide dans le but d'absorber la chaleur qui atteint la surface de la toile de la tente et qui est absorbée par celle-ci. Ce fluide va être ainsi « brumisé » sur la toile pour absorber de la chaleur lors de son évaporation qui autrement aurait été en partie transférée à l'intérieur. La brumisation est choisie par rapport à une simple projection pour augmenter la surface de contact avec la toile et ainsi le taux de transfert thermique. Ce phénomène d'évaporation va ainsi permettre de réduire la charge dédiée à la climatisation qui est nécessaire au refroidissement des tentes pendant les spectacles. La chaleur absorbée par un fluide lors de son changement de phase liquide-vapeur est quantifiée par sa chaleur latente de vaporisation, aussi appelée enthalpie d'évaporation, L_{vap} , mais aussi par la chaleur sensible qui est absorbée lors de la variation de température de l'eau. Dans le cas de cette étude, l'eau est choisie pour sa grande chaleur latente de vaporisation (2 264 kJ/kg) mais surtout pour sa disponibilité, son faible coût et son absence d'impact sur l'environnement. Les systèmes de brumisation d'eau (misting en anglais) sont déjà très présents dans le commerce actuel et dans des domaines très variés. En effet, le refroidissement par évaporation de l'eau est utilisé depuis quelques temps déjà, notamment pour le refroidissement de serres (Lagier, 1988), ou encore pour le refroidissement d'ambiance pour des porcheries d'engraissement (Dutertre, Massabie, Ginestet & Granier, 1998). Ces systèmes se retrouvent maintenant dans des véhicules, pour refroidir l'habitacle (Hale, 2000), dans les magasins, pour la réfrigération des fruits et des légumes (Brown, Corry & James, 2004), mais aussi dans l'arrosage urbain pour réduire

l'intensité des îlots de chaleur durant les périodes caniculaires (Hendel, 2015; Hendel, Colombert, Diab & Royon, 2015). Cependant, malgré ses nombreux avantages, l'eau présente quelques contraintes qui ne sont pas à négliger lors de son utilisation, et encore plus dans le contexte particulier du CDS.

1.10.2 Limites et restrictions

Le problème principal d'implantation réside dans la dureté de l'eau qui se caractérise par un pourcentage plus ou moins grand, en fonction du site où est puisée cette eau, en ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et Cl^- (sel) qui précipitent lors de l'évaporation de l'eau. Cela provoque ainsi la création de résidus sur la surface de la toile lorsque celle-ci est chaude, telle que des marques blanches de calcaire (Powell, 1998). L'image du CDS en serait affectée. Le principal défi dans la solution de brumisation réside donc dans la nécessité de garder une tente dans un état irréprochable malgré l'utilisation de l'eau. Pour pallier à ce problème, deux possibilités existent actuellement : le magnétisme d'adoucissement, aussi appelé Magnetic Water Treatment (MWT) en anglais, et le système d'osmose inverse.

La première solution d'adoucissement par magnétisme consiste à supprimer le dépôt provoqué par la précipitation des ions sur la surface lors de l'évaporation de l'eau. Ce traitement d'eau par magnétisme peut s'apparenter au système d'adoucissement d'eau par échanges d'ions, mais ce dernier ne permet pas de supprimer les résidus qui laissent des traces sur la toile. En effet, l'échange d'ions supprime principalement les particules Fe et Mn de l'eau, mais ce ne sont pas celles qui participent à la dégradation de la toile comme les particules de Ca, Mn, Na et Cl. Le magnétisme d'adoucissement met, lui, en œuvre une première précipitation par magnétisme de ces ions. Deux types de traitement sont alors possibles pour cette précipitation. Le premier cas propose une précipitation par magnétisme des ions sous forme de particules grossières à l'intérieur de l'eau. Le précipité ainsi engendré est charrié par l'eau tout au long du circuit sous forme solide, et ne se dépose donc pas sur la surface lors de l'évaporation de l'eau sur la toile. Les particules résiduelles sont ensuite dispersées par le vent ou glissent le long de la pente de la toile. Le deuxième traitement transforme, également par magnétisme, les

ions présents en une flaque liquide non adhérente à la paroi et non miscible avec l'eau, qui s'écoulera par la suite le long de la toile. En ce qui concerne le traitement magnétique utilisé dans les deux cas présentés, le principe du procédé est de faire circuler l'eau dans une alternance de zones magnétisées et non magnétisées, pour plus d'efficacité, dans le but de faire réagir les ions (Powell, 1998). Ce type de traitement ne nécessite pas un investissement aussi conséquent que celui du système d'osmose inverse. Cependant, le principal problème de cette solution réside dans le manque de résultats tangibles présentés jusqu'à maintenant. En effet, il n'existe pas d'analyses de résultats publiées, ni de tests expérimentaux présentant des données précises pour ce traitement MWT, ce qui laisse la plupart de la population scientifique sceptique, accordant ainsi peu de crédit à cette solution. Il existe toutefois un certain nombre de témoignages, ainsi que quelques revues de littératures ou explications scientifiques, comme le texte *Magnetic Water and Fuel Treatment : Myth, Magic, or Mainstream Science ?* de Mike R. Powell publiée en 1998, qui tendent à valider le bon fonctionnement de ce système, sans pour autant présenter de résultats concrets. Pour ne pas prendre de risque concernant les toiles du CDS, cette solution devrait d'abord être testée en laboratoire avant d'être appliquée en situation réelle.

La seconde solution, l'osmose inverse, consiste cette fois en une purification totale de l'eau grâce à un système de pression entraînant la filtration des particules pouvant être présentes dans l'eau du réseau (Le traitement des eaux, 2012). Cet appareil utilise un filtre très fin, de l'ordre de quelques microns, qui empêche les particules ayant une taille supérieure de traverser ce filtre lorsqu'une certaine pression est appliquée au liquide. Les ions ne sont plus présents dans l'eau filtrée, qui sera utilisée par la suite (figure 1.6).

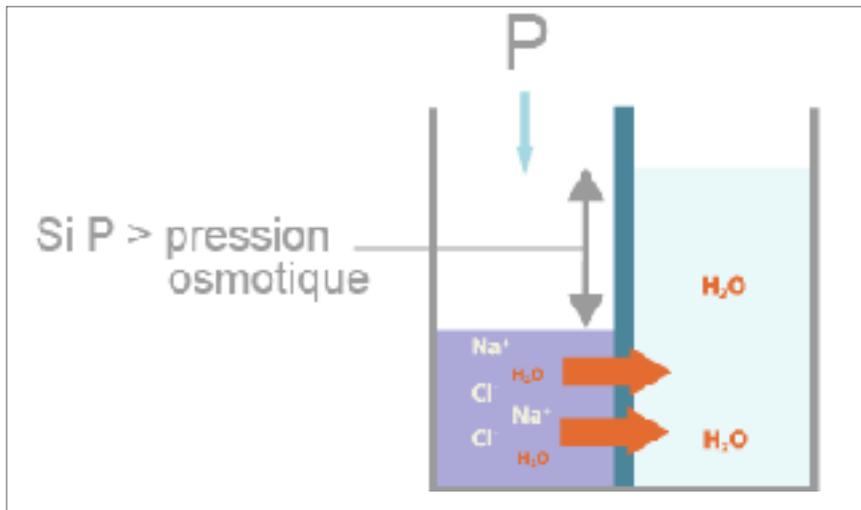


Figure 1.6 Système d'osmose inverse

Tiré et adapté du site www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/schema-osmose_zoom.png

Le système d'osmose inverse est actuellement utilisé par de nombreuses entreprises, comme Véolia Water, pour le dessalement des eaux, afin d'obtenir de l'eau pure (Gaid & Treal, 2007). L'osmose inverse est un système qui est actuellement déjà utilisé durant le spectacle Luzia du CDS. Son utilisation provient de besoins du spectacle même. L'idéal pour l'installation du système de brumisation serait de pouvoir utiliser ce même système d'osmose inverse lors de la pulvérisation de l'eau sur la toile.

Finalement, comparé au magnétisme d'adoucissement, qui repose sur des affirmations trop vagues, l'osmose inverse demeure un système plus sécuritaire car plus largement répandu, pour l'adoucissement de l'eau, même si le prix est relativement élevée, plus de 5 000 \$ pour le système de brumisation actuel du CDS. Il est envisageable d'utiliser le même système pour les fonctions de brumisation et artistiques, puisque les périodes d'utilisation des deux systèmes sont compatibles. En effet, le système d'osmose inverse actuel ne fonctionne que durant les spectacles, soit entre 18h et minuit. Concernant les autres tournées, il sera nécessaire d'acquérir un tel système, si l'utilisation de la solution de brumisation est acceptée par le CDS.

Le second problème d'implantation rencontré lors des premières utilisations de cette solution réside dans le fait qu'une trop grande quantité d'eau projetée sur la toile peut provoquer le ruissellement le long de la tente d'une partie de l'eau qui n'aurait pas eu le temps de s'évaporer. Ce problème provient du fait que l'évaporation de l'eau peut parfois être partielle. En effet, si les apports solaires et la température de la toile sont trop faibles et que l'eau est présente en trop grande quantité, elle ne s'évaporerait pas entièrement et ruissellerait le long de la tente. Ce ruissellement doit être évité car il peut provoquer un rideau d'eau devant les portes d'entrée extérieures, mais aussi des flaques, voire de la boue le long des toiles, ce qui rendrait désagréable l'expérience des spectateurs.

La dernière restriction relative à cette solution concerne la quantité limite d'eau qu'il est possible d'utiliser en une journée, spécifiquement pour cette solution. Comme cela a été brièvement abordé auparavant, le CDS utilise de grandes quantités d'eau pour les mises en scènes des spectacles, en plus des besoins quotidiens concernant l'utilisation des sanitaires, de la cuisine ainsi que le lavage de la tente. Ainsi, d'après le technicien en chef de l'approvisionnement en eau, la limite d'eau qu'il est possible d'allouer à la solution de brumisation s'élève à 2 000 litres d'eau par jour, en plus de tout ce qui est déjà consommé sur place. Par ailleurs, il peut être logique de penser qu'utiliser de l'eau pour évaporer est une solution ayant un impact négatif sur les ressources hydriques. Cela dépend en fait de la source d'énergie employée pour produire l'électricité consommée par les systèmes de climatisation. S'ils sont approvisionnés par des génératrices ou une utilité qui produit de l'électricité à partir de combustibles fossiles, le bilan hydrique est positif. En effet, un calcul de la quantité d'eau unitaire requise pour produire la quantité de diesel évitée par abaissement de la température de la toile par brumisation est d'environ 20. C'est à dire que chaque litre d'eau pulvérisé sur la toile permet de sauvegarder près de 20 litres d'eau requis pour produire le diesel qui aurait été employé pour climatiser (Rousse, 2016d). « Pour économiser un litre de diesel avec la génératrice ou une centrale thermique au diesel, il faut 20 L d'eau, mais cela entraîne une économie de 90L d'eau dans la fabrication du diesel ».

Malgré les restrictions et difficultés évoquées, cette solution présente l'avantage que le CDS possède un système de pompage d'eau sur place lors de ses spectacles. De plus, le CDS lave habituellement la tente avec un tuyau d'arrosage depuis le sommet de la tente. Cela signifie que le système de pompage est d'ores et déjà assez puissant pour propulser l'eau en haut de la tente. Il n'y aurait donc pas de modifications nécessaires au système de pompage et de distribution.

CHAPITRE 2

CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES UTILISABLE

2.1 Objectifs

L'un des plus importants défis auquel il faut faire face dans ce projet avec le Cirque du Soleil concerne le manque important de données et de relevés exploitables. Cette absence de relevés nuit fortement aux analyses puisqu'il est souvent impossible de se baser sur des valeurs réelles en situation de fonctionnement pour effectuer les calculs. C'est pour corriger cela que le CDS s'est notamment engagé à fournir des relevés d'utilisation d'électricité précis, les plus faciles à exploiter et les plus exhaustifs possibles. Puisque ces relevés se sont avérés partiels, incomplets voire inexistant, l'un des objectifs du mémoire est de créer une base de données complète sur laquelle repose l'analyse de la pertinence des solutions. De plus cette banque de données servira par la suite de base au CDS pour créer des historiques de relevés, ainsi que des tendances pour les futures tournées en se basant sur les tournées précédentes.

2.2 Données des consommations électriques jour/nuit

Les premières demandes de données se sont tournées vers les consommations électriques du Cirque pendant les tournées de spectacles, sur différents sites, à différents moments de l'année. Cependant, pour la plupart des cas, seules les factures électriques présentant la consommation électrique totale pendant la durée du spectacle sont disponibles, sans les détails de la consommation des installations elles-mêmes. Il a donc fallu mettre en place un système d'acquisition des données de consommations pour chaque disjoncteur présent sur le site. Ce système était par chance déjà installé dans la « SwitchGear » du CDS mais n'était pas fonctionnel, l'enregistrement des données ne fonctionnait pas correctement. Après plusieurs discussions avec le CDS sur l'importance de connaître ces données, le système a finalement été revu et reconditionné et les premières données précises et exploitables ont été obtenues. Finalement, les données de consommation des disjoncteurs sont obtenues toutes les 30 secondes, pendant toute la durée des tournées, de jour comme de nuit. Connaissant donc le

courant I traversant les disjoncteurs, ainsi que la tension V et le facteur de puissance $\cos(\varphi)$, il est ainsi possible d'obtenir la puissance nette passant dans chacun des disjoncteurs à tout moment de la journée (équation 2.1) :

$$P_{nette} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos(\varphi) \quad (2.1)$$

Les variables sont définies dans la nomenclature, ici $\cos(\varphi)$ représente le facteur de puissance du système, qui oscille aux alentours de 0,9. Le fait de connaître la puissance nette instantanée utilisée par les différentes installations du Cirque permet de calculer l'énergie réellement consommée heure par heure en intégrant le profil de puissance. De plus, cela permet de déterminer l'envergure de la pointe électrique et quels équipements en sont la cause. Qui plus est, il est facile de connaître quels systèmes ont fonctionné, pendant combien de temps, et surtout quelle quantité d'énergie a été utilisée pour telle installation à tel moment de la journée. La finalité de cette campagne de mesure consiste à déterminer s'il est possible ou non de diminuer l'utilisation de certains appareils à des moments précis de la journée sans affecter les opérations.

Désormais, à la fin de chaque tournée d'un spectacle, une banque de données est en partie réalisée et regroupe les consommations électriques des installations sur la durée du spectacle. Ainsi, il est dorénavant possible d'analyser les phases de chauffage pendant l'hiver pour vérifier que des équipements ne sont pas laissés en fonctionnement inutilement. Et inversement pour les saisons de climatisation.

2.3 Relevés de températures – humidité relative

Une des contraintes imposée par le CDS pour assurer le bon déroulement des spectacles pour les spectateurs et les artistes, concerne la régulation de la température et de l'humidité à l'intérieur de la tente principale, (dite Big Top) durant les heures de spectacle. Le taux d'humidité dans la tente doit être maintenu en deçà de 80 % pour assurer le confort des artistes. Pour des raisons similaires, la température doit être maintenue entre 22 °C et 25 °C, mais

idéalement à 24°C. Cependant, hormis un système de régulation de température externe géré par les techniciens et situé à l'extérieur de la tente principale, il n'y a pas de système d'acquisition de données permettant de connaître les variations de température dans l'enceinte de la tente. De plus, il s'avère que bon nombre de techniciens de maintenance se plaignent d'une chaleur excessivement élevée dans les parties hautes de la tente lors des spectacles, notamment dans la galerie technique et au niveau des « follow spots » sur les mâts.

Avant de procéder à des analyses et la mise en place de solutions, il est donc nécessaire de connaître les variations de température dans les tentes. Ainsi, afin d'obtenir une cartographie de la répartition de la température et donc de la stratification de l'air chaud, des capteurs de température et d'humidité, des DataLoggers (Omega, OM-EL-USB-2), ont été acquis, étalonnés et mis en place. La fiche technique de ces capteurs est présentée en ANNEXE I. Puisque les spectacles du CDS s'étalent sur plusieurs mois, les acquisitions sont réglées à des intervalles de cinq minutes pour que les données puissent couvrir toute la durée de la tournée et permettre trois mesures aux quinze minutes pour pouvoir estimer avec précision la pointe en température et conséquemment permettre d'estimer la pointe en consommation énergétique. Les DataLoggers permettent de tracer les courbes de variations de températures et d'humidité directement sur le logiciel fourni par l'entreprise Omega, ou sur le logiciel Excel. À titre d'exemple, la figure suivante (figure 2.1) présente un relevé de température et d'humidité sur six jours de climatisation, obtenu pour un capteur placé dans la galerie technique de la tente principale (au sommet du BigTop) pour la tournée de Luzia qui a débuté à Montréal en avril 2016. La courbe bleue correspond à l'humidité relative en %RH et la courbe rouge à la température en °C. Les plages d'activités du CDS, qui sont entre 12h et 22h, sont délimitées par les traits pointillés verticaux et contiennent une pastille rouge à l'intérieur. Les plages de températures autorisées sont en rouge et la limite d'humidité relative est en bleu. Ainsi, une analyse rapide montre que durant les heures d'activités intenses au CDS, la température est la plupart du temps comprise entre 22 et 25°C, même si elle fluctue au cours de la nuit et de la matinée. De la même manière, la nuit et le matin, l'humidité relative peut dépasser les 80%, mais ce taux demeure généralement nettement inférieur à la limite fixée pendant les périodes d'activités.

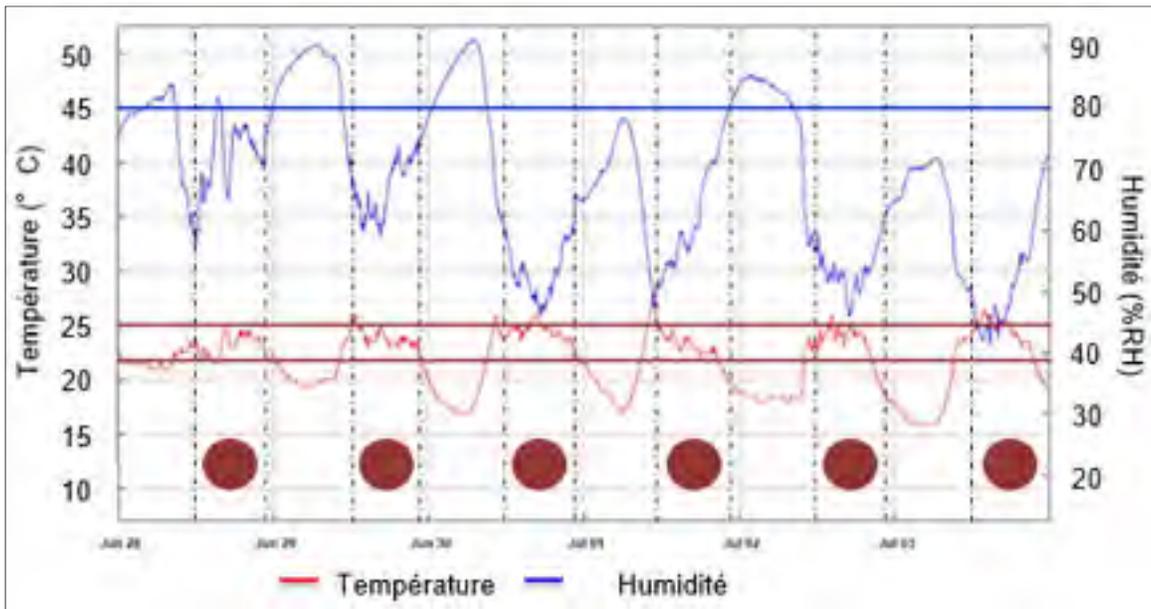


Figure 2.1 Variations de température et d'humidité dans la tente principale sur Luzia à Montréal entre le 28 juin et le 4 juillet

Dans une première phase de mesures, ce sont toutes les tentes au complet qui font l'objet d'une étude. Il est nécessaire de vérifier s'il n'y a pas de stratification de la température de l'air dans chacune des tentes présentes sur le site. C'est pourquoi une première disposition mettant en place deux capteurs dans la tente artistique, deux capteurs dans la tente d'entrée, deux capteurs dans la tente principale (BigTop) et un dans la tente VIP a été étudiée avec l'équipe du CDS. Cette phase d'analyse permet d'obtenir une première estimation des variations de température dans les différentes tentes, en phase de fonctionnement mais aussi durant les journées sans spectacles. Un dernier capteur est également en tout temps placé à l'extérieur des tentes, à l'abri du flux solaire, et permet de comparer les températures intérieures avec la température extérieure.

Dans une seconde phase de mesures, une étude plus exhaustive concernant les variations de température à l'intérieur de la tente principale, le BigTop, est menée, puisque c'est dans cette tente qu'ont lieu les spectacles et que les consignes sur la température doivent être respectées le plus rigoureusement possible. La disposition des capteurs dans le Big Top est présentée à la figure 2.2 où cinq des huit capteurs seront mis en place. Deux capteurs sont également toujours

utilisés pour la tente artistique afin de continuer l'étude de la cartographie des températures de cette tente. Le dernier capteur est toujours placé à l'extérieur.

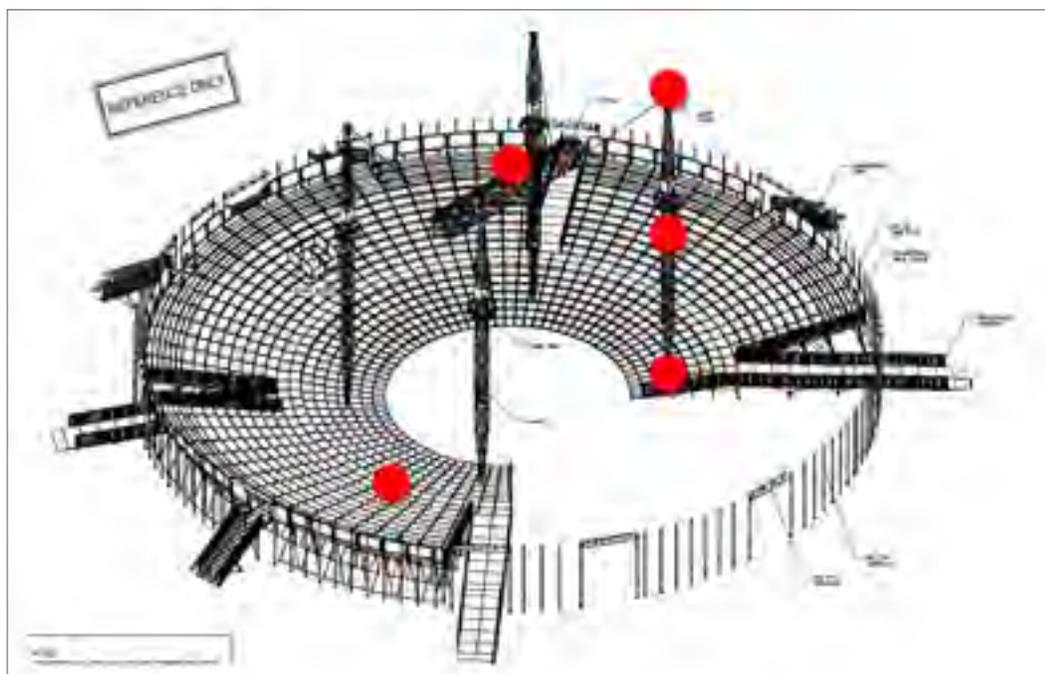


Figure 2.2 Répartition finale des DataLoggers dans la tente principale (BigTop)

Ce plan fourni par le CDS représente l'agencement des installations et des équipements à l'intérieur du chapiteau du BigTop. Chacun des points rouges sur le plan correspond à l'emplacement d'un capteur de température qui a été installé par les techniciens. Comme la chaleur semble être importante en hauteur pendant les périodes de fonctionnement, les capteurs ont été installés à différentes hauteurs et endroits, pour établir la différence de température effective. Il y a ainsi trois capteurs répartis sur le mât n°3, un en bas au niveau de la scène, un au milieu au niveau du technicien en charge du « follow spot », et un dernier en haut au plus près de la toile. Un capteur est placé dans la galerie technique où certains techniciens opèrent, au-dessus de la scène, et le dernier capteur est placé sous les estrades. Les résultats de cette analyse permettront d'établir la différence des températures d'équilibre au sein du chapiteau entre les nouvelles tentes blanches (à réflectivité effective élevée) et les anciennes bleues et

jaunes (davantage absorbante dans la plage d'émission solaire), ou encore pour établir l'impact de la climatisation sur la température intérieure.

2.4 Températures de surface des toiles

Pour mesurer la distribution de température sur les 3200 m² de surface de la tente principale, une méthodologie faisant appel à une caméra infrarouge (FLIR E40) est mise en place. Son émissivité est calibrée à l'aide d'un ruban (3M), dont l'émissivité est connue dans le spectre voisin des températures ambiantes (300-400 K). Ensuite, des mesures sont effectuées à distance, couvrant de larges surfaces sur la surface totale de la toile. Les températures de surface de la toile sont requises par la suite pour résoudre les bilans thermiques. Une intégration numérique est finalement réalisée pour estimer les taux de transfert moyens à travers toute la surface. La figure 2.3 présentée ci-dessous est un exemple des acquisitions infra-rouges pouvant être réalisées par le biais de la caméra thermique.

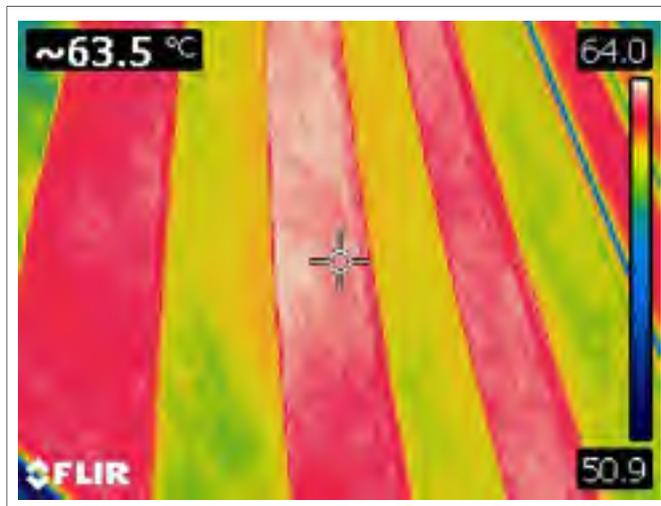


Figure 2.3 Relevé des écarts de températures entre les bandes bleues et jaunes de la tente

La caméra propose différentes possibilités lors de l'acquisition, il est ainsi possible d'obtenir la température en un point central, ou bien de viser le point le plus chaud ou le plus froid sur l'écran. L'échelle couleur sur la droite (figure 2.3) permet d'obtenir les minimum et maximum

des températures sur l'image et les variations de couleurs permettent une estimation de la température en tout point. Ici, le cliché infra-rouge obtenu permet de mettre en évidence la différence entre les températures d'équilibre de bandes de différentes couleurs, à savoir bleues et jaunes, sur une toile de chapiteau du CDS. Ainsi, la bande bleue, qui absorbe plus de chaleur du fait de sa longueur d'onde, est à la température la plus élevée, environ 63°C, et se colore en blanc/rouge avec le système infra-rouge de la caméra. En revanche, la bande jaune, qui absorbe moins de chaleur, est à une température plus faible, aux alentours de 60°C et se colore en jaune/vert. Ce sont grâce à des photographies thermiques comme celles-ci qu'il est possible d'obtenir des valeurs adéquates pour le niveau de précision désiré pour les températures de surface des différentes toiles. Connaître ces températures permet ensuite de mettre en place des interpolations surfaciques sur la quantité d'énergie qu'il est possible de sauver en changeant l'émissivité et l'absorptivité au rayonnement solaire (on réfère ici à la « couleur » de la toile), grâce à des équations bilans appliquées à la surface toile. Ces résultats seront présentés dans le chapitre concernant les avantages de la tente « blanche » par rapport aux « couleurs » plus foncées.

2.5 Propriétés optico-radiatives de la toile

Finalement, les données manquantes qui font le plus défaut dans le projet, en raison de leur impact sur la charge de climatisation, sont celles concernant les propriétés optiques et radiatives des matériaux composant les toiles des tentes utilisées par le Cirque. Les spécifications fournies par le manufacturier en charge de créer les tentes pour le CDS sont incomplètes et ne précisent pas les valeurs des émissivités internes et externes de la toile, ni surtout leur dépendance à la longueur d'onde du rayonnement émis ou reçu. Qui plus est, les spécifications fournies ne correspondent pas entièrement aux tentes qui sont actuellement utilisées par le CDS. La toile normalement utilisée par le Cirque est une tente blanche précontrainte du type T2-1002 LowE fabriquée par l'entreprise Ferrari (fiche technique disponible sur la figure 2-4), dotée d'une surface interne recouverte d'aluminium, et présentée comme étant « low emissivity » (voir figure 2.4). Or, il n'y a pas de revêtement LowE sur la

surface intérieure du Big Top employée pour le spectacle Luzia. De plus, l'émissivité du côté extérieur blanc de la toile n'est pas fournie dans les spécifications.

1002T2 LOW E offers the best performance in thermal insulation as a single membrane thanks to its opaque under layer and to the low emissivity treatment on the back side. The LOW E treatment requires abrasion before HF welding.

The technical data here above are average values with a +/- 5% tolerance.

Additional information		
Coating thickness at the top of the yarns	350 µ	
Total thickness	0.75 mm	
Solar and light properties:		
Solar transmission	Ts 0%	
Solar reflection	Rs white side 78% ; Rs glu side 78%	
Solar absorption	As white side 22% ; As glu side 24%	
Solar factor	Fs (g) 4%	
Low emissivity treatment	0.3	ASTM 1585
Aluminium colour on the backside		

Figure 2.4 Spécifications des paramètres optico-radiatifs pour la toile précontrainte opaque 1002-T2 Low-Emissivity

Enfin, l'absorptivité et la réflectivité de la toile ne sont fournies que pour cette toile précontrainte T2-1002 Low-E et que pour la longueur d'onde correspondant à l'émission solaire, et ne sont donc pas connues pour les autres tentes utilisées par le CDS. L'absorptivité α , la réflectivité ρ et la transmissivité τ , sont liées entre elles grâce au bilan exprimé par l'équation 2.2 (Kalogirou, 2013) :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.2)$$

En réalité, deux équations de ce type sont requises, l'une pour le rayonnement solaire et l'autre pour le rayonnement ou les échanges radiatifs avec l'environnement. Bien que les surfaces environnantes soient à des températures strictement différentes entre elles, mais aussi différentes de la température de la toile, une seule équation est employée, en utilisant une seconde valeur pour chacune des propriétés, dans le but de caractériser le rayonnement à basse température.

Qui plus est, on suppose que les toiles se comportent à basse température comme des corps gris (Duffie & Beckman, 2013), c'est-à-dire que leur absorptivité correspond à leur émissivité.

Sans connaître la valeur des paramètres optico-radiatifs, il est difficile de pouvoir comparer les bilans sur les différentes couleurs de tentes. Face à ce manque de données cruciales, plusieurs approches ont été considérées afin d'estimer des valeurs adéquates pour ces paramètres. Comme les valeurs d'absorptivité et de réflectivité au rayonnement solaire sont connues pour la toile de couleur blanche, il est possible d'émettre des hypothèses sur les valeurs de ces paramètres pour les autres couleurs de tente en fonction des différences de consommation en climatisation. La transmissivité au rayonnement solaire est aussi obtenue à partir de l'équation 2.2.

Cependant, les données qui manquent le plus cruellement pour réaliser le bilan global sont l'émissivité des toiles du côté interne et du côté externe. Pour obtenir un premier bilan thermique global sur la toile, il est nécessaire de mesurer l'émissivité à l'intérieur et à l'extérieur de la tente. Pour cela, plusieurs tests expérimentaux ont été mis en place. Le principe du premier protocole réside dans l'utilisation d'une bande noire, dont l'émissivité est déjà connue et fixée à 0,95, et qui est collée sur la surface de la toile testée, dont l'émissivité est quant à elle inconnue. Après un court moment, la bande adhésive noire acquiert la même température d'équilibre que la toile. Cette manipulation doit cependant être réalisée à l'intérieur ou à l'extérieur, mais d'un côté non ensoleillé pour que la bande puisse acquérir la même température que la toile sans être affectée par les transferts radiatifs du soleil et de l'environnement. À l'aide de la caméra thermique réglée sur la valeur de l'émissivité connue de la bande, une mesure de la température de surface de la bande noire est alors réalisée. Il suffit ensuite de pointer la caméra sur la toile testée, pour mesurer sa température, et d'ajuster l'émissivité directement sur la caméra thermique afin de faire coïncider les deux températures. Une fois ces flux nets équilibrés, la valeur approchée de l'émissivité de la toile est alors celle utilisée dans les réglages de la dernière mesure faite par la caméra. Les résultats indiquent tous une valeur de l'émissivité approchant 0,96, même à l'intérieur et quelle que soit la couleur de la tente testée, ce qui est supérieur aux bases de données contenues dans les livres classiques de rayonnement solaire (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2013). Cependant, ce test est en partie biaisé par plusieurs éléments extérieurs tels que les plis de la toile, le soleil qui peut se refléter, les rayons UV, la poussière ou même l'humidité, qui peuvent faire varier l'émissivité

du canevas. En considérant que la toile se comporte comme un corps gris, l'absorptivité au rayonnement basse température est directement déduite de l'émissivité. De plus, en considérant une toile opaque au rayonnement basse température, ce qui est en réalité effectif, la réflectivité au rayonnement basse température est obtenue par l'équation 2.2.

La meilleure solution pour déterminer avec exactitude ces propriétés en fonction de la longueur d'onde serait d'envoyer des échantillons dans un laboratoire spécialisé dans les mesures de ces paramètres afin de connaître leur valeur de manière précise. Le CDS a préféré se baser sur des approximations pour les calculs.

Le second protocole employé est assez similaire à la procédure décrite dans la norme ASTM E1918-16 et permet d'obtenir des valeurs approchées de l'émissivité des différentes toiles analysées (American Society for Testing and Materials ASTM, 2016). Les morceaux de canevas furent ultimement testés dans le noir, dans un laboratoire de l'ÉTS pour empêcher toute nuisance lumineuse extérieure. Ce protocole consiste encore une fois à faire coïncider la valeur de température fournie par un thermistor avec la valeur fournie par la caméra thermique, en faisant varier l'émissivité supposée. Plusieurs types de canevas sont mis à disposition, avec les deux principales toiles utilisées par le CDS : la toile jaune d'un côté et bleue de l'autre qui est utilisée dans presque toutes les tournées, et la toile blanche avec motifs jaune à l'extérieur avec le côté intérieur bleu, utilisée pour le spectacle Luzia. Les derniers échantillons possédés sont : bleu des deux côtés, blanc des deux côtés, ainsi que gris des deux côtés (puisque la toile du spectacle Volta de 2017 comporte du gris). L'installation requise pour réaliser cette expérimentation est relativement simple. Tout d'abord, il est nécessaire d'être en possession d'une source de chaleur. Cette source de chaleur est placée dans une boîte sans couvercle. Une feuille d'aluminium vient se placer sur le sommet supérieur et ferme alors la boîte. L'aluminium est un bon conducteur de chaleur et permet de bien uniformiser la chaleur sur toute sa surface. C'est par-dessus que vient se placer l'échantillon de toile qui est testé. Le capteur de température (thermistor) est alors placé au centre de l'échantillon, afin de relever la température de surface de la toile. Les acquisitions se font à chaque seconde et la sonde est reliée à une carte électronique. Avant de commencer les mesures à l'aide de la caméra

thermique, toutes les sources lumineuses de la salle doivent être éteintes, afin de n'avoir aucune pollution lumineuse qui pourrait affecter les relevés. Ensuite, il faut faire varier la valeur de l'émissivité de la caméra thermique pour que les températures affichées à la fois par la caméra thermique et par le thermistor coïncident (voir figure 2.6). Une fois ces deux températures égalisées, la valeur de l'émissivité de la toile testée correspond à celle qui est utilisée sur la caméra thermique. Finalement, toutes les toiles affichent une valeur d'émissivité comprise entre 0,87 et 0,9 ce qui est plus conforme à des valeurs répertoriées dans les références sur le sujet (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2013).

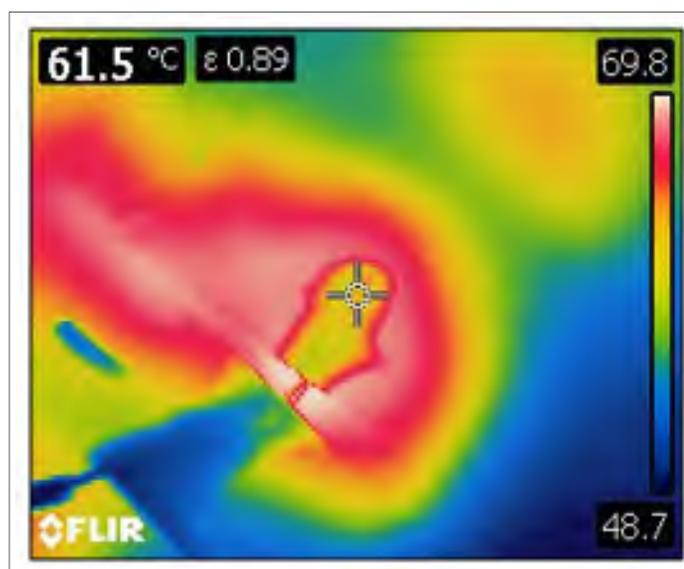


Figure 2.5 Analyse de la valeur de l'émissivité du canvas bleu à partir de sa température

Compte tenu des erreurs pouvant survenir du fait de la précision de la caméra thermique, il est juste de penser que la valeur de l'émissivité est la même pour toutes les toiles testées, puisque ce paramètre ne dépend pas de la couleur de la toile, qui est, elle, plutôt déterminée par son aptitude à réfléchir le rayonnement solaire. Dans la suite des calculs, la valeur utilisée pour l'émissivité interne et externe de toutes les toiles sera de 0,9.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a donc présenté deux opérations de cueillette de données ne faisant pas partie du mandat initial. Concernant l'obtention des données de consommations énergétiques du CDS, il fut nécessaire de remanier les données qui étaient enregistrées de manière complètement aléatoire et de proposer un nouveau protocole d'acquisition pour les mesures futures. Les recommandations faites au CDS impliquent donc le mesurage et l'archivage systématique des données de consommations pour faciliter leur travail et les futures études qui pourront être menées. Par ailleurs, il a été requis de déterminer les paramètres d'absorptivité, de réflectivité et de transmissivité au rayonnement solaire des différents canevas ainsi que l'émissivité, la réflectivité (la transmissivité étant nulle) au rayonnement à basse température pour être en mesure d'effectuer des bilans d'énergie.

CHAPITRE 3

SÉLECTION DE LA TOILE DE TENTE

3.1 Différentes couleurs proposées et utilisées

Il est à priori nécessaire de préciser que le mot « couleur » est ici associé aux propriétés optico-radiatives de la toile qui lui sont propres. Par exemple, une toile « blanche » possèdera des propriétés intrinsèques qui feront qu'elle a tendance à réfléchir davantage le rayonnement solaire et donc à moins absorber la chaleur que les autres toiles. À l'opposé, une toile de couleur bleue foncé, qui possède une réflectivité plus faible, aura tendance à absorber une plus grande quantité de chaleur. Cette terminologie est devenue nécessaire dans le projet pour permettre de faciliter la compréhension de la relation entre les propriétés radiatives et les « couleurs » de la toile utilisée aux différentes équipes du CDS, et notamment à l'équipe de direction. Cette étude vise à démontrer l'importance d'implanter une mesure simple et passive, qui permet de réduire de manière significative la consommation en profil de climatisation, sans conséquences sur les processus internes ou les systèmes CVCA (Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'Air) mis en place.

Actuellement, le CDS utilise principalement deux types de couleurs pour ses tentes. La couleur de tente la plus ancienne, et qui est notamment devenue la marque de fabrique du Cirque, est la toile de couleur bleue, agrémentée de rayures et motifs jaune, pour un ratio de 60% de bleu pour 40% de jaune (figure 3.1a). Plus récemment, le CDS a décidé, pour la tournée du spectacle Luzia qui a débuté à Montréal en avril 2016, d'utiliser une toile à dominante blanche associée à des rayures et motifs encore une fois jaunes, cette fois pour un ratio de 90% blanc et 10% jaune environ (figure 3.1b). Le type de toile employé pour le spectacle Volta, qui a vu le jour en 2017) implique une toile avec du blanc et du gris, dans une proportion de 60% de blanc pour 40% de gris (figure 3.1c)

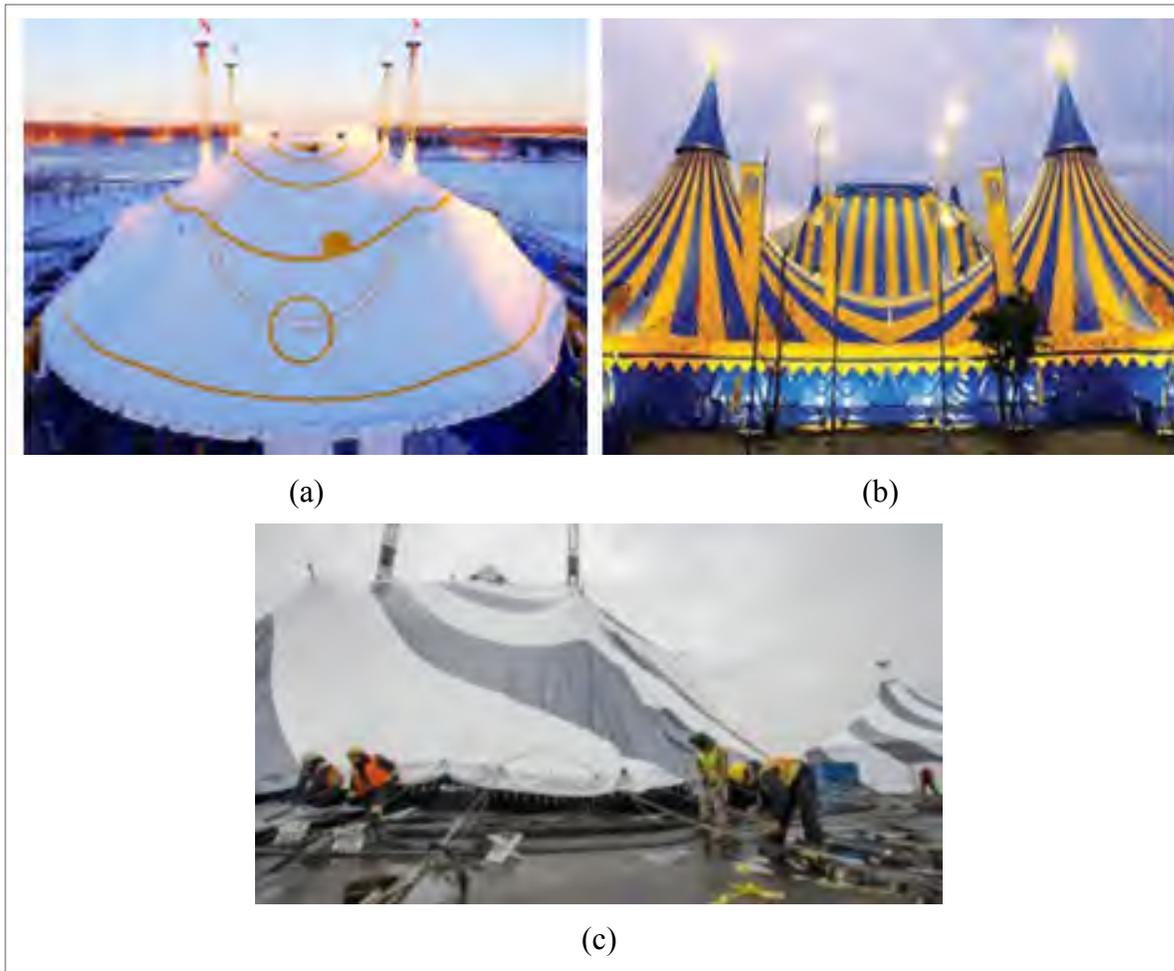


Figure 3.1 Principaux canevas utilisés par le Cirque du Soleil : (a) Toile 2016, Luzia, blanche et jaune; (b) Toile originale bleue et jaune; (c) Toile 2017, Volta, blanche et grise

Le but de cette partie est de présenter une comparaison entre les différents canevas de toiles qui peuvent être utilisés, et leur impact sur la charge de climatisation du Cirque. Deux premières approches visent à quantifier l'impact de la « couleur » de la tente sur les flux nets de chaleur qui passent à travers la toile, dans un premier temps à partir des valeurs de réflectivité des toiles, puis à partir de la température de surface de toiles réellement mesurées en situation de spectacle. Vient ensuite une étude qui démontre cette fois l'impact de la « couleur » sur l'utilisation des systèmes CVCA, et donc de ce fait sur la charge de climatisation et enfin sur la consommation réelle du CDS.

3.2 Analyse des flux nets de chaleur par la réflectivité de la toile

Dans ce calcul, la transmissivité et l'absorptivité de la toile sont considérés comme étant responsables du taux de transfert net qui traverse la toile et qui est émis vers l'enceinte du chapiteau. Les longueurs d'onde considérées ici pour ces paramètres correspondent à celles du rayonnement solaire, car 37% du rayonnement solaire est compris entre 0,4 et 0,7 μm . Le tableau 3.1 présente les différences d'économies concernant la charge de climatisation qui sont réalisables en fonction de la « couleur » de toile utilisée, par rapport à une toile blanche, selon le flux solaire reçu. Cette étude doit conforter le CDS dans l'idée que moins la surface est claire et réfléchissante, donc que ρ diminue, plus l'énergie absorbée par jour à l'intérieur de la tente s'avère être grande, ce qui augmente les besoins en climatisation. Les hypothèses impliquent que tous les autres paramètres sont égaux, incluant la température de surface pour cette étude. Dans la terminologie qui a été utilisée pour présenter les résultats au CDS, plus la surface de la tente approche d'une « couleur claire », comme pour la toile blanche, plus sa réflectivité est élevée, et donc moins elle emmagasine de chaleur. La réflectivité de la toile blanche et jaune spécifiée par le manufacturier est de 0,78, ici, la réflectivité idéale utilisée est de 0,90, en précisant au CDS que c'est cette valeur qui devrait être spécifiée dans le devis des futures toiles. À l'opposé, la toile bleue (celle de la tente bleu foncé et jaune) possède ainsi la réflectivité la plus faible, à savoir 0,5. Dans cette analyse, quatre types de toiles sont proposés, et représentées dans le tableau par un code couleur correspondant à l'une des couleurs des toiles étudiées. La quatrième toile, grise et blanche, s'ajoute pour les raisons indiquées antérieurement. Les différents flux solaires considérés, notés G , sont exprimés en W/m^2 . Le but de ce tableau consiste à observer les effets des variations du flux de chaleur q''_{abs} (en W/m^2) provenant du soleil, absorbé et ensuite transmis par la toile à l'enceinte sur le système de climatisation du CDS, et comparer trois canevas au canevas de référence (Rousse, D., 2016b).

Ici, les canevas employés par le CDS sont tous opaques, ce qui implique que la transmissivité est nulle ($\tau = 0$). Ainsi, le flux absorbé par la toile Q_{abs} en W/m^2 à partir du flux solaire G s'exprime comme suit (Kalogirou, 2013):

$$Q_{abs} = \alpha_{tente} \times G = (1 - \rho_{tente}) \times G \quad (3.1)$$

De là, en considérant que la moitié de ce flux est transmis vers l'intérieur de la tente, et le reste vers l'extérieur, il est possible de connaître la puissance absorbée en kW pour la surface A étudiée, de 3200 m² (surface de toile du BigTop), puis l'énergie totale, en kWh_{th}, passant à travers la toile pendant une journée ensoleillée (équation 3.3). Le nombre d'heures d'ensoleillement total sur toute la surface de la tente qui est utilisé est basé sur les données météorologiques TMY proposée dans la base de données disponibles sur le site EnergyPlus.

$$E_{day} = \frac{Q_{abs} \times A \times Nb_{heures}}{2 \times 1000} \quad (3.2)$$

Finalement, les économies journalières sont obtenues en considérant un prix au kWh_e moyen \$_{elec} de 0,16 \$/kWh_e et le COP (Coefficient de Performance) du système de climatisation du CDS, qui est de 2,8 (équation 3.4).

$$\$_{day} = \frac{E_{day} \times \$_{elec}}{COP} \quad (3.3)$$

Le tableau 3.1 présente les résultats de l'analyse, en précisant à quoi correspond le code couleur pour les tentes utilisées.

Les résultats indiquent que la différence entre les besoins journaliers en climatisation est importante entre les différents canevas. Logiquement, la toile blanche idéale est celle qui absorbe le moins de chaleur pendant une journée, 1 152 kWh_{th}/jr pour un flux solaire de 900 W/m² ; contrairement à la toile bleue qui absorbe le plus d'énergie, 5 760 kWh_{th}/jr pour le même flux solaire, soit 5 fois plus. La toile jaune (il s'agit de la toile blanche et jaune actuellement employée pour Luzia) permet d'obtenir un bon compromis puisque sa réflectivité est proche de celle de la toile blanche idéale, ce qui limite le flux de chaleur absorbé à l'intérieur de la tente.

Tableau 3.1 Analyse de l'écart des coûts en climatisation engendrés par les différentes valeurs de réflectivité (et donc de couleur) de la toile selon le flux solaire G reçu : blanc – toile idéale; jaune – toile Luzia 2016, toile de référence blanche et jaune; gris – toile Volta 2017 grise et blanche; bleu – toile originale bleue et jaune

Flux solaire G	Réflectivité ρ	Flux absorbé q''_{abs}	Puissance absorbée q_{abs}	Energie/jour E_{day}	Coût/jour $\\$_{day}$	Différence
(W/m ²)	(-)	(W/m ²)	(kW)	(kWh _{th} /jr)	(\$/jr)	(\$/jr)
600	0,9	60	192	768	44	-44
600	0,8	120	384	1536	88	0
600	0,65	210	672	2688	154	66
600	0,5	300	960	3840	219	131
900	0,9	90	288	1152	66	-66
900	0,8	180	576	2304	132	0
900	0,65	315	1008	4032	230	98
900	0,5	450	1440	5760	329	197
1200	0,9	120	384	1536	88	-88
1200	0,8	240	768	3072	176	0
1200	0,65	420	1344	5376	307	131
1200	0,5	600	1920	7680	439	263

L'étude est ensuite étendue sur une période d'analyse de trois mois de spectacles, en été. En utilisant une pondération de 85% de journées ensoleillées avec un flux solaire moyen de 1 000 W/m² pour cette période estivale à Montréal (basées sur des données EnergyPlus, <https://energyplus.net/weather>), cela représente 78 jours d'étude avec ce flux. Ainsi, en comparant pour cette période, l'utilisation de la tente avec une toile entièrement bleue et jaune nécessite une consommation de 399 360 kWh_{th} supplémentaire en charge de climatisation, ce qui représente 142 629 kWh_e soit 22 821 \$ de frais supplémentaires en seulement trois mois, par rapport à l'utilisation d'une tente blanche (idéale). En comparant la toile blanche et jaune de Luzia à cette toile bleue et jaune classique, cela représente une différence de 106 971 kWh_e, soit 17 115 \$ sur ces trois mois. Il faut cependant nuancer le propos en précisant que les données météo moyennées sur plusieurs années ne sont pas forcément caractéristiques d'une année récente, notamment en raison de changements climatiques qui établissent de nouveaux records depuis quelques années. Ainsi, sur trois mois, même en été, il n'est pas certain que 85% des journées seront ensoleillées, avec un flux solaire aussi important. En effet, des

jours pourraient être plus chaudes avec un flux solaire plus important, tout comme il pourrait y avoir un mois entier nuageux, c'est-à-dire avec un flux solaire plus faible.

Finalement, cette première étude indique des économies potentielles de l'ordre de 107 MWh_e et approchant les 17 k\$, grâce à la diminution des flux nets de chaleurs passant à travers cette nouvelle toile blanche et jaune. Ainsi, pour réduire cette charge de climatisation nécessaire lors des spectacles, il est préconisé d'utiliser une toile de la couleur la plus claire possible, ou du moins possédant une réflectivité la plus élevée possible. Travailler avec une tente blanche et jaune paraît donc être bien plus intéressant que travailler avec une tente bleue et jaune pour limiter les besoins en climatisation. Les économies énergétiques et monétaires réalisées seront conséquentes, d'autant plus que c'est une mesure 100% passive, qui ne nécessite aucun investissement supplémentaire de la part du CDS lors de l'achat des toiles de tentes.

3.3 Analyse des flux nets de chaleur par les températures d'équilibre des toiles

Cette partie introduit une nouvelle analyse, à partir de l'utilisation des températures d'équilibre de la tente. En pratique, cette analyse est sensiblement similaire à la méthode précédente utilisant la réflectivité. En effet, le rayonnement solaire extérieur est toujours absorbé en plus grande quantité par la toile avec une faible réflectivité, ce qui a pour effet d'augmenter de manière effective sa température d'équilibre. Cette fois-ci, plutôt que de calculer le flux absorbé par la toile et transmis à l'intérieur de la tente, c'est le flux émis par la toile à sa température d'équilibre fixée qui est calculé. La méthode « terrain » proposée ici utilise des relevés de températures d'équilibre de la toile de la tente, à l'aide de la caméra thermique et d'un thermocouple placé de manière à être protégé du rayonnement solaire. L'objectif ici consiste à obtenir la quantité de chaleur transmise à l'enceinte tente en fonction de la « couleur » du canevas utilisé. Plusieurs toiles de différentes couleurs et donc à différentes températures vont être étudiées. Trois canevas différents, d'une surface $A = 3200 \text{ m}^2$, sont ici considérés : 1-blanc, 2-jaune et 3-bleu, possédant respectivement des températures de surface d'équilibre mesurées de $T_{s1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (313 K), $T_{s2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (323 K) et enfin $T_{s3} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ (338 K). Ces températures sont les températures moyennes pondérées sur la surface, qui ont été

relevées pendant des journées ensoleillées et proviennent d'acquisition réalisées avec la caméra thermique calibrée. La toile de couleur bleue qui absorbe plus le rayonnement a donc une température de surface beaucoup plus élevée que les autres. Pour quantifier la quantité de chaleur transmise de la toile à l'enceinte de la tente, deux transferts thermiques seront pris en compte : le rayonnement de la surface de la tente vers l'intérieur $E_{int,i}$ (équation 3.4) et le phénomène de convection $Q_{conv,int,i}$ qui a lieu à la surface interne de la toile (équation 3.5). Ces deux transferts s'écrivent, avec i prenant les valeurs 1, 2 et 3 (Duffie & Beckman, 2013):

$$E_{int,i} = \varepsilon \times \sigma \times A \times T_s^4 \quad (3.4)$$

$$Q_{conv,int,i} = h_{conv} \times A \times (T_s - T_{int}) \quad (3.5)$$

Avec l'émissivité interne de la toile ε , qui a été évaluée à 0,9 dans la partie 2.2.5, la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ et enfin le coefficient de convection interne de la tente qui été évalué pour une enceinte fermée de grand volume, $h_{conv} = 10,0 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Concernant la température intérieure de la tente, elle a été considérée comme étant égale à la température de consigne fixée par le Cirque du Soleil, à savoir $T_{int} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$. Les autres taux de transferts étant similaires pour les trois cas, seules les deux équations précédentes (3.4 et 3.5) influencent la différence de consommation d'énergie requise pour climatiser à 24°C . Pour le calcul de $E_{int,i}$, il n'y a pas besoin de prendre en compte la différence avec la température à l'intérieur de la tente puisque le rayonnement fourni par le sol à la température T_{int} participe au réchauffement global de la salle. En effet, ce rayonnement se heurte aux parois de la tente et est entièrement réfléchi vers l'intérieur de la tente. On obtient alors finalement le transfert thermique passant de la toile à l'intérieur de la toile, $Q_{int,i}$, (équation 3.6).

$$Q_{int,i} = E_{int,i} + Q_{conv,int,i} \quad (3.6)$$

Pour résumer l'analyse qui est réalisée ici, le schéma proposé en figure 3.2 présente les différents cas analysés ainsi que les hypothèses et les résultats obtenus :

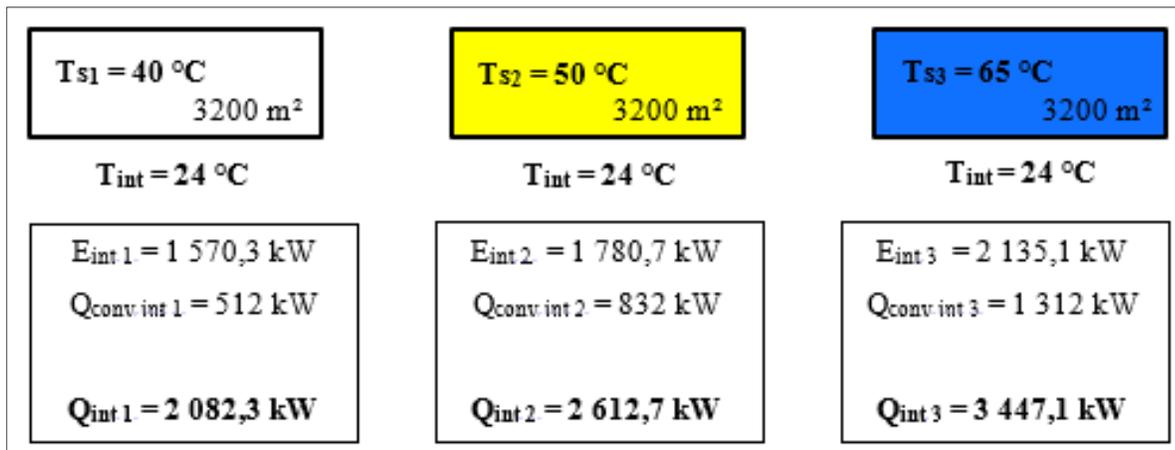


Figure 3.2 Analyse de la quantité de chaleur passant par la toile à partir des températures de surfaces moyennes mesurées de la toile

Plus la couleur de la toile est foncée et donc plus sa température de surface est élevée, plus la quantité de chaleur transmise à l'enceinte de la tente est grande. Jusqu'à 3MW de puissance sous forme de chaleur est transmise lorsque la toile bleue est chauffée jusqu'à une température de 65°C. Les résultats montrent alors que pour chaque 1°C d'accroissement de température de surface, il y a une énergie sous forme de chaleur d'environ 51 kWh_{th} supplémentaire qui traverse la toile pendant une heure complète d'ensoleillement. En termes d'économies, étant donné que toute cette énergie devrait normalement être évacuée par la climatisation, avec un COP de 2,8 et un coût moyen de l'électricité à 0,16 \$/kWh en Amérique du Nord, cela représente un coût économisé d'environ 2,91 \$/h/°C. Par exemple, entre une tente parfaite blanche et une tente bleue, où l'écart de température est de 25°C, il y a jusqu'à 204 kWh_e de différence de climatisation pendant une heure, soit 1 630 kWh en une journée de huit heures. Cependant, comme les toiles utilisées ne sont pas de couleurs unies, il est nécessaire d'utiliser une pondération de la température en fonction de la couleur des toiles. Ainsi, la température considérée pour la toile de référence blanche et jaune Luzia est de 41°C et celle pour la toile classique bleue et jaune est de 59°C. En considérant un écart de température de 18°C entre la toile blanche et jaune (Luzia) et la toile bleue et jaune (classique), et le fait que seulement la moitié de la tente est touchée par le rayonnement solaire au même moment, ce sont 3 667 kWh_{th}, soit 210 \$ d'économies en charge de climatisation qui sont réalisées pendant une journée ensoleillée de 8 heures, grâce à l'utilisation de cette tente blanche. Finalement, en

étendant l'analyse sur un spectacle de trois mois qui se déroule l'été, où les journées très ensoleillées sont nombreuses de la mi-juin à la mi-septembre, avec les mêmes hypothèses que pour l'étude précédemment présentée (données TMY proposées par EnergyPlus), à savoir avec 85% de journées chaudes et ensoleillées pour cette période clémente, 78 jours d'étude sont considérés. Les économies calculées, en utilisant la tente Luzia plutôt que la tente classique, s'élèvent alors à 286 026 kWh_{th} ou 102 152 kWh_e soit 16 344 \$. Cependant, encore une fois, les données de températures utilisées sont celles relevées pour une journée ensoleillée, et peuvent donc être sujettes à des variations. Enfin, le CDS aurait tout intérêt à exiger un revêtement Low-e à l'intérieur de la tente, de manière à réduire la portion de rayonnement vers l'intérieur, comparativement à l'extérieur (actuellement 50% dans les calculs).

Cette analyse de la quantité de chaleur fournie par la toile à l'enceinte de la tente à partir des températures d'équilibre des toiles présente des résultats proches de l'étude réalisée dans la partie 3.2 qui elle, analysait la quantité de chaleur à partir de la réflectivité de la toile. En effet, les économies potentielles réalisables en utilisant la tente blanche plutôt que la tente bleue sont conséquentes et semblables dans les deux études. La tente blanche permet ainsi de diminuer la charge de climatisation d'environ 102 MWh_e, ce qui représente une économie d'environ 16 k\$, pour une période de 91 jours en été (78 jours ensoleillés). Finalement, les économies potentielles sont intéressantes dès lors que la tente blanche est utilisée, comparativement aux autres couleurs de tentes. En effet, elle emmagasine moins de chaleur et a donc une température de surface plus faible que les autres, ce qui diminue la quantité de chaleur passant à travers la toile et donc les besoins en climatisation. La dernière analyse portant sur l'utilisation des CVCA va avoir tendance à confirmer les ordres de grandeurs des économies potentielles.

3.4 Influence de la couleur de la tente sur l'utilisation des systèmes CVCA

Depuis le début de l'utilisation de la « tente blanche » (celle dont la réflectivité est de 0,78 et associée à la couleur jaune dans l'étude 3.2) sur le spectacle de Luzia à Montréal entre juin et juillet 2016, plusieurs techniciens ont remarqué qu'il n'était plus nécessaire d'utiliser autant la ventilation pendant les spectacles que lors des tournées avec les chapiteaux bleu et jaune. Cela

permet d'anticiper une diminution importante de la charge de climatisation, qui est très grande pendant les spectacles du Cirque, surtout dans les pays chauds (Australie, Espagne, Mexique, États-Unis en été) et pendant les périodes estivales. Après une analyse plus poussée réalisée par les techniciens et ingénieurs du CDS, il s'avère que les systèmes CVCA sont capables de fonctionner à 60% de leur utilisation maximale pendant les spectacles, grâce à la tente blanche, contre 80% habituellement avec une tente bleue et jaune. Cette constatation a permis de proposer une troisième voie d'analyse des réductions du coût pour l'énergie consommée par les climatiseurs à l'équipe de design du Cirque, à partir de leurs propres données. Cependant, pour calculer plus précisément le débit d'air envoyé dans les tentes pendant les représentations, il serait nécessaire d'utiliser un appareil mesurant le débit des ventilateurs, comme un anémomètre à fil chaud. Après plusieurs discussions avec le CDS, une analyse directe concernant la consommation du CDS dédiée à la charge de climatisation a été mise en place. Une fois la consommation énergétique des systèmes CVCA connue, il est possible de connaître la quantité d'énergie qui a été sauvée grâce à l'utilisation de la tente blanche et donc les économies qui ont été réalisées et qui pourront être réalisées dans le futur si toutes les tournées étaient équipées de tentes blanches.

3.4.1 Première analyse de la consommation – journées ensoleillées

Comme cela a été précisé dans la première partie traitant du manque d'historique énergétique de la part du CDS, il existe un gros manque de données de consommation énergétique du Cirque. Il a donc été nécessaire de chercher dans un premier temps un spectacle avec quelques journées où la consommation était connue de manière complète. Les données utilisées dans cette première analyse concernent le spectacle ayant eu lieu à Toronto, pour la tournée Luzia, qui utilisait une toile blanche et jaune. Ici, seules dix journées étaient entièrement exploitables pour réaliser une analyse de la charge de climatisation. Dans un second temps, il était nécessaire d'identifier les disjoncteurs reliés aux différents CVCA, car ce ne sont jamais les mêmes sur les différentes tournées. Au total, sept systèmes CVCA sont utilisés en permanence pour assurer la climatisation des tentes pendant les spectacles. La plupart de ces systèmes sont utilisés pour réaliser la climatisation à l'intérieur du BigTop. Connaissant leur disposition et le

courant I passant dans chacun des disjoncteurs pendant la journée entière, à chaque 30 secondes, il est possible de connaître la puissance nette utilisée par le disjoncteur (équation 2.1). La consommation totale du site pour la journée pour tous les CVCA en est déduite. Pour cette première analyse, seule des journées ensoleillées et chaudes, avec une température aux alentours de 25/30 °C sont sélectionnées. Ces journées ont été choisies à différents moments de la semaine pour pouvoir prendre en compte les différences de consommation correspondant aux différents programmes des journées. Ainsi, seules six journées sur les dix correspondent à ce critère de sélection. Deux des journées choisies sont en semaine, et quatre en fin de semaine. Le tableau 3.2 présente les résultats obtenus : la consommation des CVCA qui fonctionnent à 60%, la consommation totale des installations du CDS, la consommation des CVCA s'ils fonctionnaient à 80% dans le cas d'une tente bleu et jaune, et enfin les différences d'un point de vue énergétique et monétaire entre l'utilisation des systèmes CVCA à 80% et 60%.

Cette première analyse montre une charge de climatisation plus importante pendant les week-ends, ce qui s'explique par un plus grand nombre de représentations qu'en semaine, ce qui engendre des durées de climatisation plus grandes. La consommation moyenne en climatisation est de 5 392 kWh_e pour des CVCA à 60% avec la tente blanche, contre une consommation moyenne de 7 189 kWh_e pour des CVCA à 80% donc avec une tente classique, bleue et jaune. Au final, cela représente ainsi une différence moyenne d'environ 1 797 kWh_e pour une journée. Cependant, dans certains cas le CDS peut être branché soit à l'utilité (réseau électrique de la ville), où l'électricité coûte en moyenne 0,16 \$/kWh_e, soit aux génératrices, auquel cas le prix de l'électricité devient 0,22 \$/kWh_e en passant par l'utilisation du diesel.

Tableau 3.2 Analyse de la consommation journalière des CVCA selon leur pourcentage d'utilisation

Journée	Consommation CVCA 60%	Consommation Totale	Consommation CVCA 80%	Différence	Différence
	(kWh _e)	(kWh _e)	(kWh _e)	(kWh _e)	(\$)
S 23/07	5 452	10 767	7 269	1 817	291
S 06/08	5 754	11 194	7 672	1 918	307
D 07/08	6 539	9 414	8 719	1 640	262
M 10/08	4 601	8 934	6 134	1 533	245
V 12/08	4 374	8 398	5 833	1 459	233
D 28/08	5 633	10 050	7 511	1 878	300

Finalement, cela représente une économie moyenne journalière de 288 \$ si le CDS est branché sur l'utilité ou de 395 \$ si les génératrices sont utilisées. Concernant la pointe, il n'est pas possible de faire de différence comme avec les CVCA à 60% et 80%, puisqu'il n'y a pas de données concernant la pointe à chaque instant. Cependant, les données de pointes pour une journée ensoleillée sont connues. Il y a une pointe d'environ 1200 kVA pour toute la durée du spectacle Luzia à Toronto (92 jours) avec la tente blanche, donc avec les CVCA à 60%. La formule reliant la puissance nette (en kW) à la puissance apparente (en kVA) utilise le facteur de puissance $\cos(\varphi)$, fixé à 0,9 pour le cas du CDS, est la suivante (formule 3.7) :

$$P_{nette} = P_{app} \times \cos(\varphi) \quad (3.7)$$

La puissance instantanée de pointe correspondante est donc de 1080 kW. En considérant maintenant le cas d'une tournée avec une tente bleue et jaune, donc avec les CVCA fonctionnant à 80%, la pointe devient 1800 kVA, soit une puissance nette de 1620 kW (avec la formule 3-8). Le prix moyen au kW en pointe fourni par le CDS est de 16 \$/kW. On obtient ainsi une différence de 8 640 \$ sur 92 jours entre le fonctionnement à 80% et à 60%. Si l'on répartit sur la durée du spectacle, cela donne environ 94 \$ par jours pour compenser la pointe. Cette pointe n'est payée que lorsque le CDS est branché au réseau de la ville, donc cette

consommation supplémentaire ne s'additionne pas dans le cas de l'étude avec les génératrices, qui fonctionnent avec le diesel.

Finalement, voici un bilan de la première analyse présentant les économies dues à la diminution de l'utilisation des CVCA grâce à la nouvelle tente blanche et jaune (Luzia). Si le CDS est branché à l'utilité, l'économie s'élève à 288 \$ de consommation et 94 \$ de pointe, soit 382 \$ d'économie par jours. Si ce sont les génératrices qui sont utilisées, comme il n'y a pas de pointe, l'économie s'élève à 395 \$ d'économies par jours. En recoupant avec l'analyse faite en partie 3.2, il est intéressant de remarquer que les économies journalières réalisées grâce à la tente blanche et la diminution de l'utilisation des CVCA seraient celles annoncées pour une journée ensoleillée, avec un flux solaire d'environ 1000 W/m². De la même manière, les économies journalières présentées ici concordent avec les économies journalières présentées dans la partie 3.3 à partir des températures d'équilibre de la toile. Les résultats des différentes analyses concordent quant aux économies réalisables. Ces premiers résultats démontrent qu'il est intéressant d'avoir une tente blanche pour diminuer l'utilisation de la climatisation, et donc des systèmes CVCA.

3.4.2 Deuxième analyse – Tournées entières

Les données contenues dans les fichiers fournies par le CDS sont rangées de manière erratique, avec des intervalles d'acquisitions pouvant varier de 5 secondes à plusieurs heures, voire jours. Ainsi, le tri des données a été effectué avec la fonction « MOYENNE.SI.ENS » intégrée à Excel, de manière à obtenir des fichiers exploitables. Une fois le tri réalisé, les calculs pour obtenir la consommation sont toujours réalisés en utilisant la formule qui relie la puissance nette au courant I (formule 2.1), qui est relevé dans les différents disjoncteurs correspondant aux systèmes CVCA considérés pour la ville analysée. Il est finalement possible de réaliser la somme sur la journée de spectacle. Le fichier final présente alors la consommation énergétique journalière du CDS dédiée à la climatisation, en kWh_e, puis la charge de climatisation qui a réellement été utilisée sur toute la durée du spectacle. Cette analyse n'a cependant pu être menée que partiellement sur deux spectacles, puisque les données n'ont été enregistrées que

sur une courte période et puisque les données de certaines journées sont incomplètes ou inexistantes. Les spectacles concernés se sont déroulés sur Luzia à Toronto en 2016, avec une tente blanche et jaune, donc avec des CVCA fonctionnant à 60%, et sur Kurios à New York, qui utilise une tente bleue et jaune, donc avec des CVCA utilisés à 80%. Le tableau suivant (tableau 3.3) présente un premier exemple des résultats de l'étude de la consommation pour le spectacle Luzia à Toronto sur un seul mois, en août, avant de présenter les résultats pour la tournée entière. La colonne utilité correspond ici aux économies obtenues avec un branchement électrique au réseau de la ville concernée.

Tableau 3.3 Économies énergétiques et monétaires réalisées grâce à l'utilisation de la tente blanche au moins d'août sur le spectacle de Luzia à Toronto

ANALYSE DU MOIS D'AOÛT (31 jours)		
	UTILITÉ	GÉNÉRATRICES
kWh pour la tente blanche et jaune (60%)	189 338	
kWh si tente jaune et bleue utilisée (80%)	252 451	
Énergie sauvée (kWh _e)	63 113	
Prix de référence (\$/kWh _e)	0,16	0,22
Prix économisé sur le mois (\$)	10 098	13 885
Prix économisé par jour (\$)	326	448
Equivalent diesel (L)	/	19 419
Rejets de CO ₂ en moins (Tonnes)	/	54

Cette analyse est menée sur le mois d'août à Toronto, où la température moyenne à la mi-journée sur le mois est d'environ 28°C. Le spectacle Luzia a utilisé une tente blanche, ce qui a permis aux systèmes CVCA de fonctionner encore une fois à 60% de leur utilisation maximale, au lieu de 80%, consommant 189 338 kWh_e. L'utilisation d'une tente bleue et jaune aurait maintenu l'utilisation des CVCA à 80%, et de ce fait aurait entraîné la consommation de 252 451 kWh_e. En comparant ces deux cas de figures, il s'avère que ce sont 63 113 kWh_e qui sont sauvés grâce à la toile blanche. Comme le CDS était branché sur l'utilité à Toronto, cela représente environ 10 098 \$ d'économies réalisées pour le mois ou 326 \$ par jour. Si le Cirque avait utilisé les génératrices pour climatiser durant ce spectacle, cela aurait représenté une économie plus grande de 13 885 \$, soit 448 \$ environ chaque jour. Le fait d'utiliser les

génératrices engendre également une consommation d'une certaine quantité de diesel, qui est précisée dans le tableau. Le prix diesel utilisé dans les génératrices est déjà pris en compte dans le calcul du coût au kWh_e qui s'élève à 0,22 \$/kWh_e. De plus, l'utilisation du diesel dans les génératrices provoque un rejet d'une certaine quantité de CO₂, un gaz à effet de serre polluant l'atmosphère. Ainsi, utiliser la tente blanche lorsque les génératrices sont utilisées permet de réduire la consommation, mais aussi la quantité de CO₂ rejetée par le CDS. Une analyse plus poussée au sujet des rejets de CO₂ lors de l'utilisation des génératrices sera réalisée dans la partie 3.5.

L'analyse de la consommation énergétique dédiée à la climatisation pour le mois d'août à Toronto permet de mettre en évidence le fait que les dépenses énergétiques de climatisation sont plus importantes lorsque la température extérieure est élevée. Un autre facteur augmentant la consommation est l'irradiation solaire, qui chauffe la tente et transmet de la chaleur à l'intérieur, mais ce facteur a déjà été étudié précédemment et ne sera pas pris en compte ici. Ainsi, en traçant les courbes de la consommation journalière en MWh_e du CDS consacrée aux systèmes CVCA, et donc à la climatisation, il est intéressant de remarquer une corrélation directe entre la charge de climatisation pour le chapiteau et la température extérieure maximale journalière.

Cette corrélation est intéressante, puisqu'elle permet de démontrer l'impact de la température extérieure pendant la journée sur les besoins directs en climatisation. Cependant, tous les pics ne surviennent pas au même moment. Cela provient du fait qu'une journée peut être chaude, mais peu ensoleillée, avec une irradiation solaire faible, ce qui entraîne des effets radiatifs sur la toile minimales. Comme les besoins en climatisation sont plus importants lorsque les flux radiatifs sont élevés, pour une journée très ensoleillée, il peut y avoir moins de charge de climatisation demandée, malgré une température extérieure élevée. De la même manière, une journée peut être un peu plus fraîche, mais ensoleillée, ce qui nécessite quand même une climatisation importante à l'intérieur du chapiteau. Il faut également prendre en considération les spectateurs et artistes à l'intérieur de la tente qui dégagent de la chaleur (plus de 250kW de charge pour 2 500 personnes).

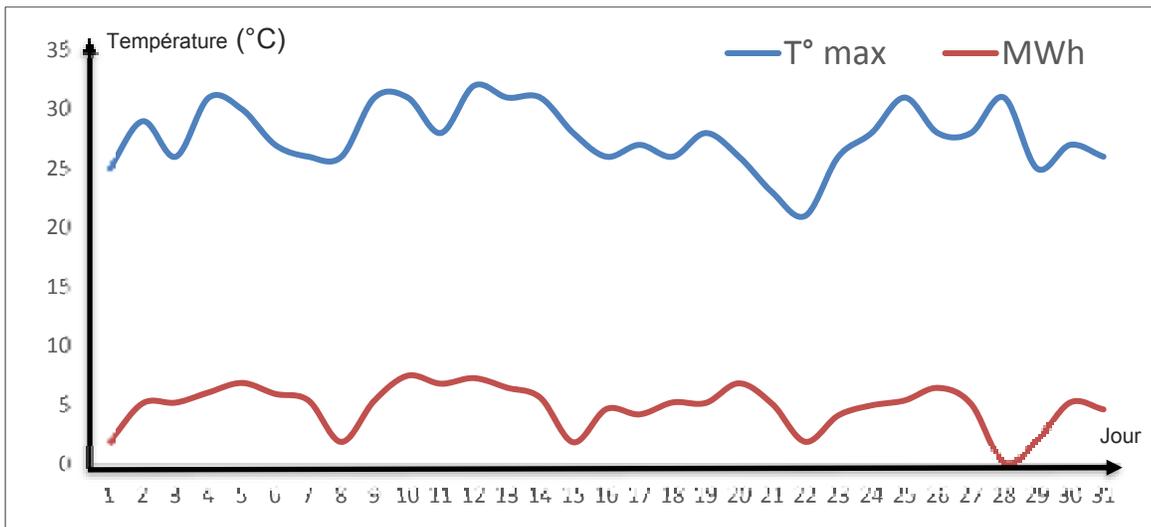


Figure 3.3 Corrélation entre la consommation du CDS en MWh (en rouge) dédiée aux CVCA et la température maximale journalière sur le spectacle Luzia à Toronto au moins d'août (en bleu)

Cependant, les importantes variations de consommation sont corrélées avec les variations de température (figure 3.3). Par exemple, les jours 8 (2 MWh_e pour 26°C) et 22 (1,8 MWh_e pour 21°C) montrent bien l'impact d'une journée plus fraîche sur la diminution des besoins en climatisation. Inversement, les journées 5 (7 MWh_e pour 30°C) et 10 (7,5 MWh_e pour 31°C) montrent qu'une température élevée avec plus d'ensoleillement nécessite une plus grande charge de refroidissement.

Les tableaux proposés dans la suite récapitulent de manière globale les consommations des systèmes CVCA pendant la tournée Luzia à Toronto et Kurios à New York, ainsi que les économies qui ont pu être réalisées en faisant fonctionner les systèmes CVCA à 60% au lieu de 80% avec l'utilisation de la tente blanche. Les corrélations finales réalisées sur la durée entière du spectacle ne seront pas présentées, puisqu'elles ressemblent fortement au graphique précédemment présenté à la figure 3.3, et ne permettent pas une analyse plus poussée. La première analyse correspond au spectacle Luzia, qui a eu lieu à Toronto. Il concerne 85 jours de données seulement sur quatre mois de spectacle (tableau 3.4).

Tableau 3.4 Économies énergétiques et monétaires réalisées grâce à l'utilisation de la tente blanche durant tout le spectacle de Luzia à Toronto

ANALYSE SUR TOUT LE SPECTACLE DE TORONTO (85 jours sur 4 mois)		
	UTILITÉ	GÉNÉRATRICES
kWh pour la tente blanche et jaune (60%)	402 124	
kWh si tente jaune et bleue utilisée (80%)	536 165	
Énergie sauvée (kWh _e)	134 041	
Prix de référence (\$/kWh _e)	0,16	0,22
Prix économisé sur le spectacle (\$)	21 447	29 489
Prix économisé par jour (\$)	252	347

Pour le spectacle de Toronto, c'est une toile blanche qui est utilisée et le Cirque a eu l'autorisation de se brancher à l'utilité, soit au réseau électrique de la ville. Ainsi, la consommation des systèmes CVCA avec la tente blanche est de 402 124 kWh_e, contre 536 165 kWh_e si la tente bleue et jaune avait été utilisée. Ce sont jusqu'à 134 041 kWh_e qui ont pu être économisés par rapport à l'utilisation de la tente « classique ». Cette diminution de la consommation permet une économie légèrement supérieure à 21 400 \$, soit près de 250 \$/jour. La figure suivante (figure 3.4) démontre la différence mensuelle de charge de climatisation entre la tente bleue (tente classique bleue et jaune) et la tente blanche et jaune (Luzia).

Il est également important de préciser que les économies auraient été plus importantes si les génératrices avaient été utilisées, puisque le prix fixé de leur utilisation est plus élevé et que le CDS doit utiliser les génératrices puisqu'ils n'ont pas toujours la possibilité de se brancher à l'utilité de la ville visitée. En raisonnant en termes de génératrices, économiser 134 MWh_e permet de se passer de l'utilisation de deux génératrices pendant 134 heures environ, soit près de 5 heures par jour pendant 27 jours de spectacle. De plus, plusieurs tournées de spectacles à travers le monde ont lieu pendant des périodes estivales, ce qui peut aisément multiplier ces économies. Il est d'autant plus important de noter que ces calculs ont été réalisés pour un spectacle ayant, certes, lieu en été, mais à Toronto, qui ne peut pas être considéré comme le lieu le plus chaud et le plus ensoleillé où le CDS réalise des tournées.

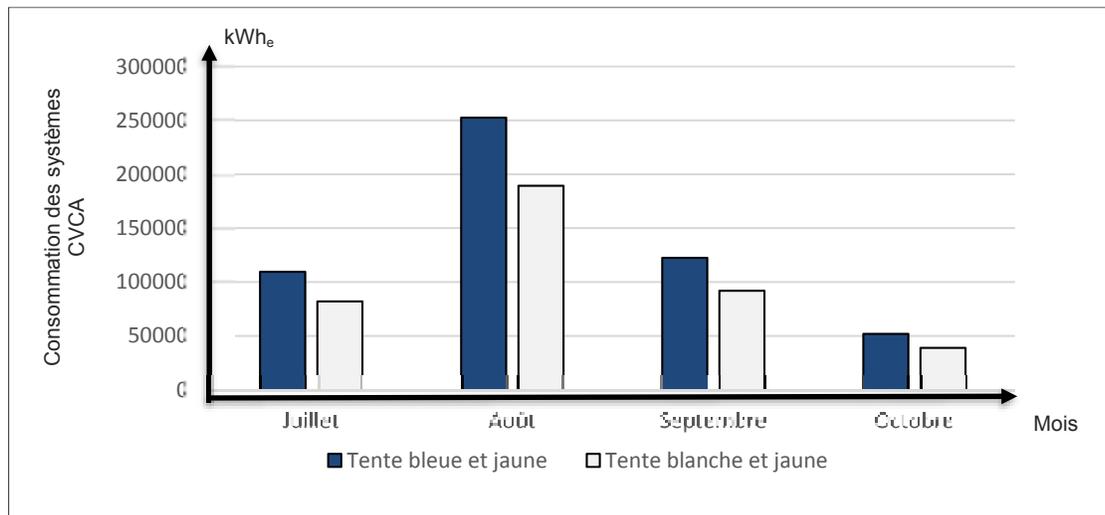


Figure 3.4 Consommation des systèmes CVCA pour la tente classique comparé à la tente blanche et jaune

Actuellement, de nombreuses tournées utilisant des chapiteaux avec des toiles bleues et jaunes sont réalisées en Australie, alors que la température peut parfois dépasser les 45°C en journée, augmentant de manière considérable la charge de climatisation. Ainsi, les économies pouvant être réalisées en utilisant une tente blanche et jaune comme Luzia sur ces tournées pourraient être encore plus importantes que celles pour Toronto.

Cette économie pour la durée du spectacle peut sembler supérieure à celles mentionnées aux deux premières sections de cette analyse. Cela s'explique par le fait que l'on compare ici deux toiles réelles et que pour les deux autres analyses, il s'agissait d'une comparaison avec la toile blanche et jaune dont la réflectivité était fixée à 0,8 d'après les données du fournisseur.

La seconde analyse complète s'intéresse au spectacle Kurios, qui a eu lieu à New York, pendant deux mois, septembre et octobre, soit pendant une période automnale, avec moins de journées chaudes. Comme pour le cas de Toronto, il existe un manque de données de consommation assez important. Ainsi, sur ces deux mois de spectacles, seules 31 journées ont pu être analysées entièrement. Le tableau 3.5 présente le résumé de l'étude de la charge de climatisation réalisée pendant une partie du spectacle de Kurios à New York.

Tableau 3.5 Économies énergétiques et monétaires pouvant être réalisées si une tente blanche était utilisée durant une partie du spectacle de Kurios à New York

ANALYSE SUR UNE PARTIE DU SPECTACLE DE NYC (31 jours sur 2 mois)		
	UTILITÉ	GÉNÉRATRICES
kWh pour la tente jaune et bleue (80%)	60 766	
kWh si tente blanche et jaune utilisée (60%)	45 575	
Énergie sauvée (kWh _e)	15 191	
Prix de référence (\$/kWh _e)	0,16	0,22
Prix économisé sur la durée (\$)	2 431	3 342
Prix économisé par jour (\$)	78	108

Contrairement à l'étude réalisée pour Toronto, le spectacle de NYC utilise cette fois une tente « classique » avec une toile bleue et jaune. C'est donc dans un premier temps la consommation énergétique pour une toile bleue et jaune, et donc avec les systèmes CVCA qui fonctionnent à 80%, qui a été calculée. La charge de climatisation y correspondant pour ces 31 jours s'élève ainsi à 60 766 kWh_e. Maintenant, si le CDS avait choisi d'utiliser une tente blanche pour ce spectacle, l'utilisation effective des CVCA serait descendue à 60%, portant la consommation énergétique à un total de 45 575 kWh_e. Dans ce cas précis, la tente « blanche » aurait ainsi permis d'économiser 15 191 kWh_e, soit 2 431 \$ sur 31 jours ou encore 78 \$/jours, par rapport à la tente « bleue ». Les calculs de cette économie de charge de climatisation montrent une valeur journalière nettement plus faible que pour les résultats qui ont été obtenus à Toronto dans la partie précédente, 78 \$/jour contre 252 \$/jour à Toronto. Cet écart dans les résultats provient principalement du fait que les mois de septembre et octobre sont des mois faisant partie d'une période moins ensoleillée, avec une irradiation solaire plus faible, et moins chaude comparée à la période estivale pendant laquelle s'est déroulé le spectacle de Toronto. Cela a un effet direct sur la quantité de chaleur passant à travers la toile, et donc sur la charge de climatisation, qui devient moins importante. Cependant, ces chiffres mettent en évidence que la tente blanche permet tout de même de réaliser des économies en dehors des mois d'été, pour des zones tempérées.

3.5 Impact de la réflectivité sur les rejets de CO₂

Le CDS ne peut malheureusement presque jamais se brancher sur le réseau électrique de la ville (utilité) lors de ses tournées. Se brancher au réseau n'est possible que dans des endroits comme le Canada, à Montréal ou Toronto, ou bien dans des villes où le CDS est établi à l'année, par exemple à Las Vegas. Dans les nombreux cas où ce n'est pas possible, le CDS utilise cinq génératrices en période de spectacle, ce qui engendre l'utilisation d'une grande quantité de carburant diesel. L'utilisation du diesel dans ces génératrices provoque le rejet de gaz de combustion, comme le dioxyde de carbone CO₂, ou encore le monoxyde de carbone CO. Dans cette étude, seuls les rejets de CO₂ seront analysés. Utiliser la tente « blanche et jaune, Luzia » au lieu de la tente « bleue et jaune, classique » lorsque ce sont les génératrices qui fonctionnent permet de réduire certes la charge de climatisation et donc la consommation, mais par relation de cause à effet, cela permet également de diminuer la quantité de CO₂ rejetée. Globalement, utiliser une tente à haute réflectivité au rayonnement solaire diminue les rejets de GES du CDS, parce que l'irradiation solaire est le flux prépondérant. Les fiches signalétiques des génératrices indiquent que pour 1 litre de diesel fourni, ce sont 3,25 kWh_e qui sont récupérés via l'utilisation des génératrices. Ces chiffres furent confirmés sur demande par les techniciens du CDS. De plus, lorsqu'un litre de diesel est consommé, c'est-à-dire lorsqu'il est brûlé par la génératrice pour fournir de l'électricité, cela provoque le rejet de 2,79 kg de CO₂ équivalent ou CO₂_{éq} (Rousse, D. 2016a). Finalement, il est possible de connaître les rejets (en tonnes) qui sont évités, à partir de l'énergie qui a été sauvée grâce à la tente blanche et jaune, (équation 3.9) :

$$mCO_{2\text{éq}} = \frac{E_{\text{éco}} \times 2,79}{3,25 \times 1000} \quad (3.8)$$

Les résultats des rejets de CO₂_{éq} concernant les différents spectacles sont présentés dans le tableau 3.6 :

Tableau 3.6 Analyse de la réduction des rejets de CO₂ réalisés grâce à l'utilisation de la tente blanche et jaune

REJETS DE CO₂ PAR LES GÉNÉRATRICES	
	SPECTACLE KURIOS à NYC (31 jours)
Énergie sauvée grâce à la tente blanche et jaune (kWh _e)	15 191
Équivalent diesel (litres)	4 674
Rejets de CO₂ en moins (tonnes)	13
	SPECTACLE LUZIA à TORONTO (85 jours)
Énergie sauvée grâce à la tente blanche et jaune (kWh _e)	134 041
Équivalent diesel (litres)	41 243
Rejets de CO₂ en moins (tonnes)	115

Les résultats sont plus faibles pour la tournée à NYC pour la simple raison qu'il y a moins de journées prises en compte dans l'étude (31 jours contre 85 pour Toronto), et car c'était à une période moins chaude, comme précédemment expliqué. Pour le spectacle de Luzia à Toronto, l'utilisation de la toile blanche et jaune a permis de diminuer de 115 tonnes la quantité de rejets en CO₂éq. Cela représente près d'une tonne et demie de CO₂éq rejetés en moins par jour.

3.6 Conclusion

Une toile à haute réflectivité au rayonnement solaire absorbe moins de chaleur, ce qui diminue de manière conséquente sa température d'équilibre par rapport aux autres types de canevass moins réfléchissant. De ce fait, l'énergie nette ou la chaleur nette passant à travers la toile s'en trouve également diminuée et ainsi la charge de climatisation qui est nécessaire pour refroidir l'air contenu dans la tente pendant les périodes de spectacles. La difficulté du projet consistait à le démontrer quantitativement à partir de données incomplètes voire manquantes. Trois analyses distinctes ont donc été réalisées, la première théorique à partir d'estimations de la réflectivité moyenne pondérée de quatre différents canevass de toiles : une toile souhaitée, la toile blanche et jaune du spectacle Luzia, la toile blanche et grise du spectacle Volta et la toile bleue et jaune des spectacles classiques; la seconde à partir de mesures expérimentales des

températures de surface des canevras réalisées par caméra infra-rouge calibrée sur des échantillons et extrapolés à la surface totale du Big-Top; et le troisième à partir de données de consommation électriques et de différences moyennes observées en charges de climatisation en fonction du type de toile utilisé.

Ces trois analyses produisent des résultats concordants comme en témoigne le tableau récapitulatif (tableau 3.7) présenté ci-après. Les lignes grises correspondent à des analyses réalisées de manière théorique à partir de relevés sur le terrain et des données météorologiques moyennées par EnergyPlus concernant l'irradiation solaire et les temps d'exposition. Les lignes bleues correspondent à des analyses tirées de la consommation directe du CDS. Les deux premières lignes comparent l'utilisation d'une tente bleue et jaune classique à l'utilisation de la tente blanche et jaune utilisée pour Luzia, tout comme pour l'analyse de la consommation directe présentée ligne trois.

Tableau 3.7 Tableau récapitulatif des économies potentielles réalisées en employant une toile plus réfléchissante au rayonnement solaire : comparaison des trois méthodes d'analyse

Analyse	Économies énergétiques	Économies monétaires	Quantité de CO₂éq rejetée en moins
Unités	(kWh_e)	(\$)	(tonnes)
Flux nets par la réflectivité	106 971	17 115	92
Flux nets par la température de surface	102 152	16 344	88
Réduction de l'utilisation des CVCA (pour Toronto)	134 041	21 447	115

Les écarts en pourcentage des économies énergétiques réalisées sont corrects, lorsque comparées à la valeur de référence obtenue de 134 041 kWh_e pour la consommation directe du CDS. En effet, le plus gros écart est de 23%, avec l'économie annoncée par les flux nets par la

température de surface. Globalement, les économies sont de l'ordre de 16 à 21 k\$ pour la durée d'un spectacle. Il est toutefois nécessaire de préciser que la consommation réelle des CVCA prend en compte les charges reliées aux apports de chaleurs par les spectateurs (250 kW environ), ainsi que la chaleur dégagée par la galerie technique et les éclairages, qui ne sont pas pris en considération lors des deux premières études. La charge de climatisation reliée aux apports extérieurs, et notamment aux apports solaires, est par conséquent plus faible.

Cette étude démontre quantitativement que le choix de la « couleur » de la tente s'avère être une décision importante financièrement pour le CDS. En considérant 30 spectacles simultanément dans le monde, économiser 20k\$ pour un spectacle entier qui se produit 2 fois par an en période de climatisation, représente environ 1,2M\$ en économies potentielles en changeant du canevas classique au canevas blanc et jaune adopté pour Luzia en 2016. Malheureusement, l'équipe de décision artistique n'approuve pas le choix de cette tente. Le CDS a choisi une tente grise et blanche pour le spectacle Volta de 2017, dont les performances seront moins intéressantes que celle de 2016.

Enfin, il faut rappeler que cette mesure est 100% passive, c'est à dire qu'elle ne nécessite ni changements de paradigmes, de frais de fonctionnement, d'entretien mécanique, d'appareils et équipements supplémentaires, de personnel qualifié.

CHAPITRE 4

RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION

4.1 **Besoin d'énergie pour la climatisation**

C'est la charge de climatisation qui est la plus importante et surtout la plus fréquente sur les différents sites de spectacles du CDS. En effet, il est parfois nécessaire de climatiser dans l'enceinte des tentes alors que la température extérieure est aussi basse que 14°C. Cela s'explique par le fait que la toile de la tente absorbe en grande quantité du rayonnement solaire mais aussi par les apports thermiques provenant de la foule et des équipements utilisés dans la tente. La solution développée ici concerne l'évaporation de l'eau, qui absorbe la chaleur de l'irradiation solaire au cours d'un procédé endothermique.

4.2 **Méthode d'analyse**

Les calculs ont été réalisés avec une approche qui vise à calculer la quantité d'eau qu'il est nécessaire de faire évaporer pour contrer les effets de réchauffement provoqués par les apports extérieurs et intérieurs. La première partie de l'analyse consiste à recueillir les données météorologiques concernant les différentes tournées et les villes de spectacles. Cette étape est nécessaire pour réaliser une sélection des différentes villes qui pourraient tirer un bénéfice de l'installation du système de brumisation. La seconde étape consiste à créer un code de calcul sur le logiciel Python, dans le but d'obtenir les économies potentielles de cette solution, ainsi que la quantité d'eau qu'il est nécessaire de fournir pour climatiser la tente principale. L'analyse a tout d'abord été menée en considérant uniquement les apports de chaleur provenant de l'extérieur, dans le but de mettre en place une première ébauche du code de calcul. Par la suite, de nouveaux transferts thermiques sont pris en considération du côté intérieur de la tente, tels que la quantité de chaleur dégagée par les appareils électroniques dans le BigTop, qu'il a été nécessaire de calculer, mais aussi la quantité de chaleur dégagée par les spectateurs lors des heures de spectacles. Finalement, les résultats du code présentent à la fois les économies énergétiques et monétaires réalisables, ainsi que la quantité d'eau utilisée pour cela.

4.3 Obtention des données techniques et météorologiques

Dans le code de calcul, les températures au sol, au niveau de la coupole (point le plus haut dans la tente principale) ainsi que la température extérieure, proviennent des données acquises via les DataLoggers. Concernant les propriétés optico-radiatives de la toile, les données sont présentées dans la partie 2.5. Finalement, les seules données manquantes concernent les équipements présents dans la tente principale, ainsi que les données météorologiques concernant le site étudié.

4.3.1 Données relatives aux équipements

Lors des spectacles, mais aussi lors des répétitions, un grand nombre d'équipements sont utilisés, comme des éclairages, « follow spots », machines à fumées, qui sont nécessaires pour créer l'ambiance artistique recherchée. La majeure partie de ces appareils fonctionne à des puissances très élevées, ce qui a ainsi pour effet de libérer une quantité de chaleur importante, du au phénomène d'effet joule. Pour la plupart des appareils d'éclairage LED, il peut être considéré qu'une grande partie de l'énergie électrique qui leur est fournie, environ 70%, est transformée en énergie thermique (Guide de l'éclairage, 2017; SPX Lighting, 2017). Le tableau 4.1 présente la liste des différents appareils utilisés lors des spectacles, incluant les éclairages, spots et machines à fumées. Le tableau présente également la puissance associée à ces appareils $P_{\text{equip},i}$, leurs quantités, $Nb_{\text{equip},i}$, mais aussi la température de fonctionnement qui leur est associée, preuve de l'échauffement important que subissent les installations.

L'équation 4.1 permet ensuite de calculer la puissance thermique totale délivrée par effet joule par l'ensemble de ces appareils, ce qui contribue alors au réchauffement de la tente.

$$q_{\text{thermique,EJ}} = 0,7 \times \sum_i P_{\text{equip},i} \times Nb_{\text{equip},i} \quad (4.1)$$

Tableau 4.1 Liste des appareils de la galerie technique et leur puissance

Appareil	P_{equip} (W)	Température de fonctionnement (°C)	Quantité
Gspot - Mast	1 100	55-65	4
Gspot P2	275	45-65	20
Gspot Q1	18	40	64
VL- 4000 Spot	1 400	65	12
Source Four	750	217	62
ColorForce 72	660	35	11
Atmosphere Hazer	715	200	2
Viper Smoke Machine	1 300	200	2
Smoke machines	1 500	200	8

Globalement, les installations génèrent une puissance thermique de 78 113,6 W soit environ 80 kW. Pendant quatre heures de spectacles, cela représente environ 320 kWh d'énergie thermique à évacuer par les systèmes de climatisation. Ce dégagement de chaleur se fait d'ailleurs ressentir, puisque les techniciens travaillant dans la galerie technique, au sommet de la tente, se plaignent d'une chaleur excessivement élevée durant les spectacles. C'est également dû aux autres générations de chaleur, qui ont tendance à s'élever par convection naturelle vers le haut de la tente.

4.3.2 Obtention des données météorologiques des sites de spectacle

Pour que le code de calcul puisse fonctionner, il est nécessaire de connaître les différentes données météorologiques des différents sites de spectacle à travers le monde, durant les dates où ces spectacles ont eu lieu. La banque de données EnergyPlus propose des fichiers accessibles en libre-service d'un grand nombre de villes dans le monde, qui répertorient un grand nombre de données, de manière horaire, pendant une année entière. Les données nécessaires pour l'étude sont : la température estimée du ciel T_{ciel} en K, la vitesse du vent V_{vent} en m/s, ainsi que les données d'irradiation solaire totale directe, I_{directe} , en W/m^2 . Plusieurs

types de fichiers sont proposés dans la banque de données EnergyPlus. Les fichiers intitulés TMY, TMY2, TMY3 correspondent à l'Europe et l'Amérique du Nord, tandis que les fichiers IWEC concernent l'Asie et l'Australie. Pour cette étude, il est plus indiqué d'utiliser les données TMY3 et IWEC qui sont équivalentes à des données fournies par l'ASHRAE et correspondent à des données enregistrées sur une période de 1991 à 2005 pour TMY3 et de 1982 à 1999 pour IWEC. TMY est un acronyme pour Typical Meteorological Year, car ces données sont moyennées sur les années considérées, afin d'obtenir des valeurs de données typiques d'une année entière, heure par heure, pour la zone concernée. IWEC est également un acronyme pour International Weather for Energy Calculations, qui est équivalent au système TMY.

Une fois le fichier de la station météo correspondante récupéré sous format « .epw » (EnergyPlus Weather), il est nécessaire de le remanier de telle sorte à ne garder que les paramètres qui sont nécessaires au calcul parmi la panoplie de choix possibles, et uniquement pour les journées correspondant à celles du spectacle. Ces paramètres correspondent à ceux listés plus haut, en plus du numéro de l'année, ainsi que l'heure, pour pouvoir sélectionner les journées adéquates. Cette sélection se fait comme suit, dans l'interface du logiciel TRNSYS, en choisissant quels paramètres doivent être fournis dans un nouveau fichier texte (voir figure 4.1).

L'acquisition est réalisée sur une année, soit 8 760 heures, dans le fichier « .txt ». Un premier algorithme est ensuite utilisé sur Python pour calculer le numéro du jour de l'année de début et de fin du spectacle. Une fois ces deux numéros connus, il est possible de sélectionner les plages de journées correspondant à la durée du spectacle dans le fichier « .txt » qui a été produit par TRNSYS. Ce fichier propre au spectacle est finalement utilisé dans le logiciel Python pour extraire les paramètres et réaliser les calculs des transferts thermiques de manière horaire, à partir des données recueillies.

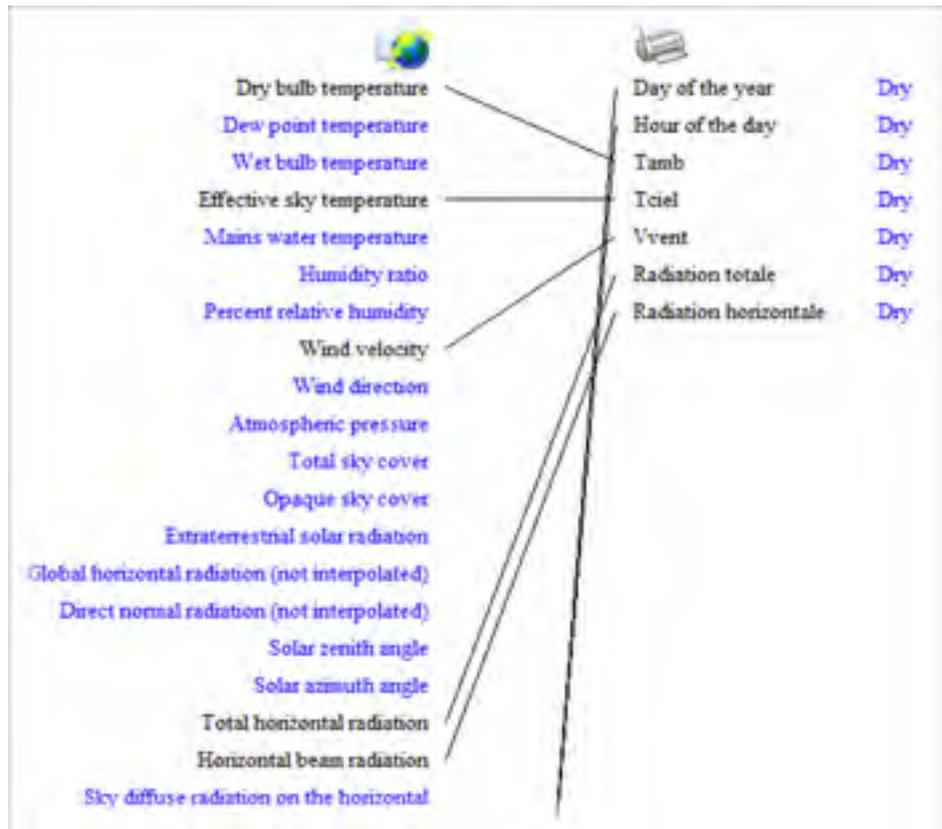


Figure 4.1 Sélection des données utilisées sur le logiciel TRNSYS

4.4 Sélection des sites de spectacle

Un fichier Excel a été créé, regroupant chacune des villes accueillant le spectacle du Cirque, pour chacune des tournées, avec les dates et les durées de la tournée, le lieu ainsi que la température moyenne du mois où le spectacle a lieu. Le but premier de ce fichier est de réaliser une analyse rapide pour voir s'il est intéressant ou non de réaliser une étude de la solution de refroidissement par évaporation pour ce spectacle, à cette date et à cet endroit, et par extension pour la tournée. Le critère déterminant qui est proposé pour cette sélection est la température moyenne du mois dans la ville qui accueille le spectacle. En effet, s'il ne fait pas assez chaud, il est probable que les effets d'irradiation solaire soient trop faibles pour nécessiter l'installation de cette solution. De plus, la température est le paramètre qui est utilisé par le CDS pour déterminer le réglage de la climatisation durant la journée. D'après les techniciens, la température seuil à partir de laquelle la climatisation est nécessaire est de 19°C environ.

L'analyse pour le spectacle Kurios, qui s'étale de janvier 2015 à avril 2017 est présentée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Exemple de sélection pour l'analyse des spectacles sur la tournée Kurios

Kurios	Ville	Dates	Mois 1	Tmoy	Mois 2	Tmoy	Sélection
2015	Seattle, WA	29/01-22/03	Février	13	Mars	16	NON
2015	Calgary, AB	9/04-24/05	avril	9	mai	15	NON
2015	Denver, CO	11/06 – 26/07	juin	31	juillet	31	OUI
2015	Chicago, IL	6/08 – 20/09	aout	28	septembre	25	OUI
2015	Costa Mesa, CA	15/08 – 29/11	octobre	22	novembre	21	OUI
2015	Los Angeles, CA	9/12 – 7/02	décembre	20	janvier	22	OUI
2016	Atlanta, GA	3/03 – 8/05	mars	17	avril	23	OUI
2016	Boston, MA	26/05 – 10/07	juin	24	juillet	29	OUI
2016	New York, NY	29/09 – 27/11	octobre	18	novembre	14	NON
2016	Washington, DC	21/07 – 10/09	juillet	33	aout	33	OUI
2016	Miami, FL	9/12- 29/01	décembre	27	janvier	26	OUI
2017	Houston, TX	16/02 – 2/04	février	16	mars	21	OUI

Il arrive parfois que la climatisation soit déclenchée pour des températures extérieures de 14°C, mais ces cas sont très rares. Dans les cas les plus fréquents, la climatisation n'est utilisée que durant des périodes estivales, où la température extérieure est d'au moins 19°C, avec des apports radiatifs relativement élevés. Suite à la phase de sélection, les différents fichiers de données sont récoltés pour les villes où il peut être envisageable d'implanter la solution de brumisation. L'analyse menée par la suite sur Python déterminera si les économies énergétiques et monétaires sont assez conséquentes pour rentabiliser cet investissement.

4.5 Bilan thermique sur l'enceinte de la tente

Cette partie a pour but de présenter les différents transferts thermiques qui sont pris en compte dans le code de calcul pour pouvoir finalement établir un bilan thermique sur la totalité de la tente. Avant de présenter les équations, le tableau 4.3 présente les différents paramètres utilisés ainsi que leur signification et leur valeur. Si leur valeur varie ou est obtenue d'une manière spécifique, la colonne valeur précise de quelle manière la donnée est obtenue.

Pour obtenir la température de surface de la toile, un protocole de calcul par itération est mis en place, en proposant une première température T_s de surface de la tente. Ensuite, en prenant en compte les différents transferts thermiques qui ont lieu à la surface de la tente à l'équilibre, l'équation du bilan thermique sur la toile permet d'obtenir une nouvelle température de surface T_{sn} . Le caractère itératif du code recalcule finalement T_{sn} jusqu'à ce que les deux températures obtenues la convergent. Cette itération est réalisée pour chaque heure des journées étudiées. Ici, seulement les transferts thermiques de convection et de radiation sont pris en compte, par analogie avec l'étude des capteurs solaires plans thermiques (Lamarche, 2015). Le coefficient de convection interne est fixé à $h_{conv,int} = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Les autres coefficients sont calculés comme suit. Le coefficient de radiation interne $h_{rad,int}$ s'exprime comme suit :

$$h_{rad,int} = \frac{\sigma \times (T_{top}^2 + T_s^2) \times (T_{top} + T_s)}{\frac{1}{\varepsilon_{gr}} + \frac{1}{\varepsilon_{tente,int}} - 1} \quad (4.2)$$

Tableau 4.3 Tableau récapitulatif des paramètres utilisés dans l'étude, avec leur signification, leur valeur et leur unité

Paramètres	Signification	Valeur	Unité
A	Aire de la tente principale	3236	m ²
P _{tente}	Périmètre de la tente	201,5	m
α_{tente}	Absorptivité de la toile de tente	0,16	-
ϵ_{sol}	Émissivité du sol (béton)	0,94	-
$\epsilon_{tente,int}$	Émissivité de la toile intérieure	0,9	-
$\epsilon_{tente,ext}$	Émissivité de la toile extérieure	0,9	-
T _s	Température de surface de toile	Calculée	K
T _{top}	Température en haut de la tente	DataLoggers	K
T _{sol}	Température dans la tente, au sol	DataLoggers	K
T _{amb}	Température ambiante à l'extérieur	DataLoggers	K
T _{ciel}	Température estimée du ciel	EnergyPlus	K
V _{vent}	Vitesse du vent	EnergyPlus	m/s
I _{directe}	Irradiation solaire directe	EnergyPlus	W/m ²
Nu _L	Nombre de Nusselt	Calculé	-
Re _{Lc}	Nombre de Reynolds critique	Calculé	-
L _c	Longueur caractéristique	64,2	m
Pr	Nombre de Prandtl	Table thermo	-
k _{air}	Conductivité thermique de l'air	Table thermo	W/m.K
ν_{air}	Viscosité cinématique de l'air	Table thermo	m ² /s
σ	Constante de Stefan Boltzmann	5,67.10 ⁻⁸	W/m ² .K ⁴
Nb _{max}	Nombre de spectateurs maximum	2500	Personnes
TauxOccup _{moy}	Taux d'occupation moyen	0,75	-
ChL _{personne}	Chaleur latente dégagée par personne	108	W
L _{evap}	Chaleur latente d'évaporation	2264,76.10 ³	J/kg
C _{peau}	Capacité thermique massique de l'eau	4 185	J/kg.K

La résistance interne équivalente $R_{eq,int}$, en $m^2.K/W$, s'exprime alors tel que :

$$R_{eq,int} = \frac{1}{h_{conv,int} + h_{rad,int}} \quad (4.3)$$

Le calcul du coefficient de radiation extérieur, $h_{rad,out}$, en $W/m^2.K$ est proposé dans l'équation 4.4.

$$h_{rad,ext} = \varepsilon_{tente,ext} \times \sigma \times (T_S^2 + T_{sky}^2) \times (T_S + T_{sky}) \quad (4.4)$$

Le dernier coefficient est celui de convection extérieur, $h_{conv,ext}$, en $W/m^2.K$ (voir équation 4.5).

$$h_{conv,ext} = \frac{Nu_L * k_{air}}{l_c} \quad (4.5)$$

Le nombre de Nusselt, nécessaire pour calculer le coefficient de convection extérieur, est calculé en plusieurs étapes, puisque sa valeur dépend du régime étudié. Ainsi, le nombre de Nusselt, Nu_L se calcule (équations 4.6 et 4.7) en fonction de la valeur du nombre de Reynolds (équations 4.8 et 4.9), et de la longueur caractéristique de la tente, $L_c = 64,2$ m. Le coefficient k_{air} est obtenu à l'aide de la table thermodynamique présentée ci-après (tableau 4.3).

$$Nu_L = 0,86 \times Re_{Lc}^{\frac{1}{2}} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.6)$$

régime laminaire si $Re_{Lc} < 500000$

$$Nu_L = (0,037 \times Re_{Lc}^{\frac{4}{5}} - 871) \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.7)$$

régime mixte si $Re_{Lc} > 500000$

$$\text{où } Re_{Lc} = \frac{V_{vent} \times Lc}{\nu_{air}} \quad (4.8)$$

$$\text{avec } Lc = \frac{4 \times A_{tente}}{p_{tente}} \quad (4.9)$$

Les nombres Pr , k_{air} et ν_{air} sont obtenus à partir de la table thermophysique de l'air présentée au tableau 4.4. La température de référence utilisée est une valeur de température moyenne T_{moy} entre la température de surface de la tente T_s et la température ambiante T_{amb} . Par exemple, pour une température moyenne de 30°C , soit 303 K environ, les valeurs approchées de ces nombres sont $Pr = 0,708$, $k_{air} = 0,02624\text{ W/m.K}$ et $\nu_{air} = 16,84 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$.

Une fois les coefficients de convection et de radiations obtenus, il est finalement possible d'établir un bilan thermique sur la surface de la toile (Duffie & Beckman, 2013), dans le but d'obtenir une nouvelle itération de la température de surface itérée, T_{Sn} (voir équation 4.10).

$$T_{Sn} = \frac{T_{top} + R_{eq,int} \times (T_{amb} * h_{conv,ext} + T_{sky} \times h_{rad,ext})}{1 + R_{eq,int} \times (h_{conv,ext} \times h_{rad,ext})} \quad (4.10)$$

La nouvelle valeur de T_{Sn} remplace alors la valeur T_s , et tant que l'écart entre les deux n'est pas dans un intervalle prédéterminé, l'itération poursuit son cours. La courbe suivante (figure 4.2) présente les résultats du calcul concernant la température de surface T_s , calculée en $^\circ\text{C}$, sous forme d'une courbe tracée heure par heure pendant la durée du spectacle Luzia à Montréal, du 4 mai au 7 juin.

Le tracé de la courbe corrobore les acquisitions de températures qui ont pu être réalisées lors des tests. La température de surface la nuit est aux alentours de $16/17\text{ }^\circ\text{C}$, car les nuits sont moins fraîches en mai. La journée la tente est aux alentours de $33/35^\circ\text{C}$, ce qui est plus faible que ce qui avait été enregistré avec la caméra thermique pour la toile blanche de Montréal, avec des pics à 50°C lors de journées très chaudes et ensoleillées. Cela s'explique principalement par la période qui n'est pas la même, l'analyse ici est réalisée pour le mois de mai alors que les relevés avec la caméra ont été réalisés en août, pendant des journées très ensoleillées et chaudes.

Tableau 4.4 Table des propriétés thermophysiques de l'air à différentes températures
Tiré de Kalogirou, S. A. (2013)

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg.K)	μ (kg/m.s) x 10 ⁻⁵	ν (m ² /s) x 10 ⁻⁶	k (W/m.K)	α (m ² /s) x 10 ⁻⁴	Pr
100	3,6010	1,0266	0,692	1,923	0,00925	0,0250	0,770
150	2,3675	1,0099	1,028	4,343	0,01374	0,0575	0,753
200	1,7684	1,0061	1,329	7,490	0,01809	0,1017	0,739
250	1,4128	1,0053	1,488	9,490	0,02227	0,1316	0,722
300	1,1774	1,0057	1,983	16,84	0,02624	0,2216	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	31,71	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,9672	0,684
750	0,4700	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,30	0,06279	1,4271	0,696
950	0,3716	1,1321	4,023	108,2	0,06225	1,5510	0,699
1000	0,3524	1,1417	4,152	117,8	0,06752	1,6779	0,702

La liste des différents flux thermiques, tous exprimés en W/m², ainsi que le moyen de les calculer est présenté ci-dessous (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2013). Il est nécessaire de préciser que les calculs des transferts thermiques sont également réalisés de manière horaire. C'est-à-dire que pour chaque heure, pendant la durée du spectacle, les différents flux sont calculés pour pouvoir établir un bilan énergétique horaire.

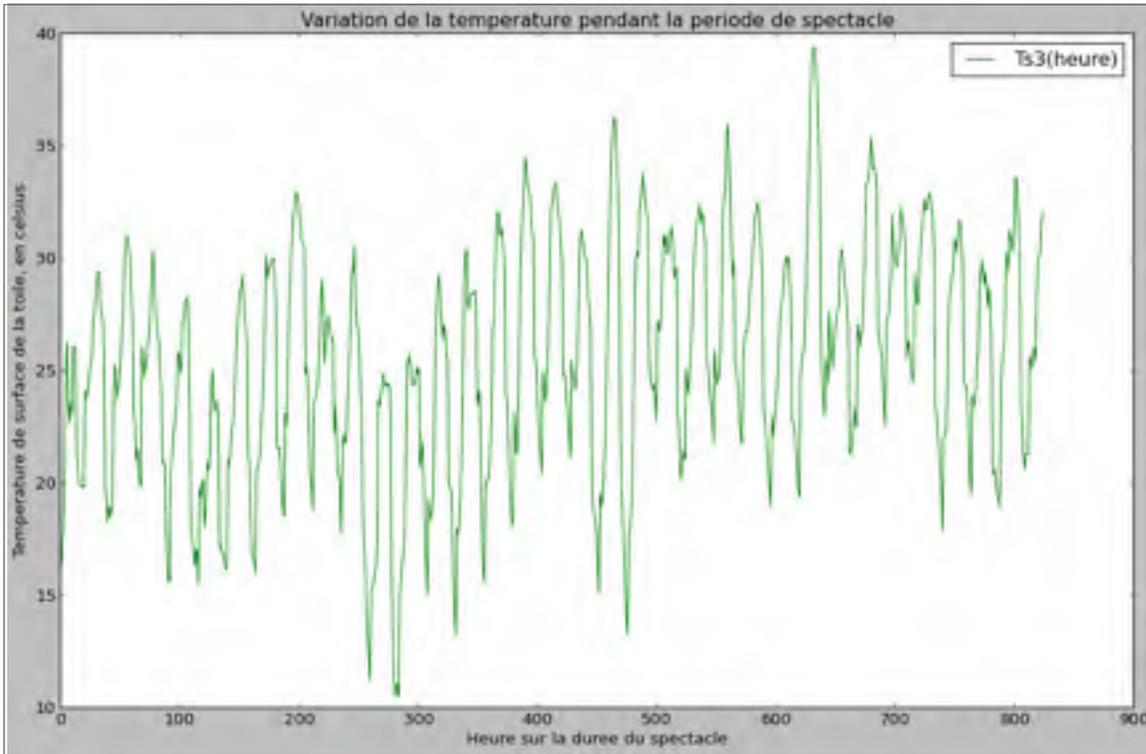


Figure 4.2 Courbe de variation horaire de la température de surface T_{Sn} (en °C) du 4 mai au 7 juin pour le spectacle Luzia à Montréal

Les deux premiers transferts thermiques considérés concernent la quantité de chaleur émise par rayonnement par la toile de tente (en W/m^2), à la température T_s , vers l'extérieur et l'intérieur de la tente (voir équations 4.11 et 4.12). Les côtés internes et externes de la toile possèdent chacun des valeurs d'émissivité qui leur sont propres (tableau 4.3).

$$q''_{\text{emit,int}} = \varepsilon_{\text{tente,int}} \times \sigma \times T_s^4 \quad (4.11)$$

$$q''_{\text{emit,ext}} = \varepsilon_{\text{tente,ext}} \times \sigma \times T_s^4 \quad (4.12)$$

Les transferts thermiques reçus par radiation sont ici au nombre de trois. Le premier représente la radiation provenant du ciel et de l'environnement reçue par la tente (équation 4.13). Cette formule s'écrit en supposant que le ciel agit comme un corps noir, c'est-à-dire que son émissivité est égale à 1.

$$q''_{\text{sky}} = \sigma \times T_{\text{sky}}^4 \quad (4.13)$$

Le second transfert thermique radiatif considéré est celui prenant en compte l'irradiation provenant du soleil et qui vient frapper la tente (équation 4.14). Le soleil émet une irradiation solaire $I_{directe}$ en W/m^2 qui est absorbée en partie par la toile.

$$q''_{rad,env} = \alpha_{tente,env} \times I_{directe} \quad (4.14)$$

Le dernier transfert thermique radiatif pris en compte est celui provenant cette fois du sol, à l'intérieur de la tente (voir équation 4.15). Le sol est considéré ici comme un revêtement béton, à une température T_{gr} et possédant une émissivité ε_{gr} qui lui est propre. La radiation créée par le sol est ensuite absorbée en partie par la toile.

$$q''_{rad,gr} = \alpha_{tente,gr} \times \varepsilon_{gr} \times \sigma \times T_{gr}^4 \quad (4.15)$$

Il est important de noter que le phénomène de conduction a été négligé ici, car l'épaisseur de la toile de tente est très faible, $0,78 \mu m$.

Les transferts thermiques suivants représentent le phénomène de convection qui a lieu à la surface de la toile, à la fois à l'intérieur de la tente et à l'extérieur.

$$q''_{conv,int} = h_{conv,int} \times (T_S - T_{top}) \quad (4.16)$$

$$q''_{conv,ext} = h_{conv,ext} \times (T_S - T_{amb}) \quad (4.17)$$

Les derniers transferts thermiques pris en considération pour cette étude concernent les apports de chaleurs internes à la tente de spectacle, c'est-à-dire les apports de chaleur provenant des spectateurs et des appareils de la galerie technique. Le premier étudie le flux de chaleur dégagée par les spectateurs, en prenant en compte le nombre moyen de spectateurs présents à chaque spectacle, ainsi que la chaleur latente qu'ils dégagent (équation 4.18). La chaleur latente par personne, exprimée L_{people} , en $W/personne$, est obtenue en considérant une surface de peau de $1,8 m^2$ et un taux de chaleur métabolique générée par une personne de $70 W/m^2$. Une personne silencieuse assise génère une chaleur de $60 W/m^2$, mais le contexte de spectacle,

où les gens applaudissent et participent activement, augmente la chaleur générée. Une valeur de 70 W/m² (126 W/personne) paraît ainsi judicieuse car elle correspond à une personne assise travaillant à un bureau (ASHRAE Fundamentals, 2009). Cette génération d'énergie n'est prise en compte que pendant les heures où les spectateurs sont effectivement dans la salle, soit entre 17h et 23h.

$$q''_{people} = \frac{Nb_{max} \times TauxOccupation_{moyen} \times L_{people}}{A_{tente}} \quad (4.18)$$

Concernant la chaleur dégagée par les appareils, le calcul prend simplement la puissance des appareils calculée précédemment, en la calculant de manière surfacique pour la surface de la toile (voir équation 4.19). De la même manière que pour le flux de chaleur émis par les spectateurs, ce flux d'appareils n'existe réellement que du matin au soir, entre 9h et minuit, puisque la plupart des appareils ne fonctionnent que la journée, soit pour des répétitions, soit pour des réglages.

$$q''_{equip} = \frac{P_{equip}}{A_{tente}} \quad (4.19)$$

L'équation 4.20 résume le bilan thermique en prenant en compte les transferts thermiques précédemment établis. Les transferts thermiques de convection sont assortis d'un signe négatif puisque dans l'expression des flux, la température de l'air ambiant est soustraite de celle de la toile.

$$q''_{evap} = q''_{rad,env} + q''_{rad,gr} + q''_{people} + q''_{sky} + q''_{equip} - q''_{emit,int} - q''_{emit,ext} - q''_{conv,int} - q''_{conv,ext} \quad (4.20)$$

Ce flux thermique q''_{evap} (en W/m²) peut être négatif, si les apports de l'environnement et la chaleur provenant de l'intérieur de la tente ne sont pas assez élevés, c'est notamment le cas pour la nuit. Cependant, pour ne pas obtenir des quantités d'eau négative à fournir, ce bilan thermique est utilisé dans une boucle for dans le code de calcul, pour éliminer en transformant

les valeurs négatives, qui peuvent survenir durant la nuit, en valeurs nulles. Une fois que le flux thermique à évaporer est obtenu, il est possible de calculer le débit massique d'eau \dot{m}_{eau} (en kg/s) qu'il est nécessaire d'utiliser pour contrer ces effets. Pour calculer ce débit volumique, il faut prendre en compte l'élévation de température de l'eau, qui arrive à 30°C sur la totalité de la surface de la toile A_{tente} , jusqu'à 100°C pour s'évaporer ainsi que la chaleur latente d'évaporation de l'eau. L'équation 4.21 traduit ce phénomène (Bergman, Incropera, DeWitt & Lavine, 2011).

$$\dot{m}_{eau} = \frac{q''_{evap}}{L_{evap} + c_{p,eau} \times \Delta T} \times A_{tente} \quad (4.21)$$

Le fait de multiplier par la surface de la tente permet d'obtenir le débit massique d'eau \dot{m}_{eau} qu'il est nécessaire d'utiliser sur la totalité de la toile, à chaque seconde. Ce débit est obtenu de manière horaire, c'est-à-dire qu'il faut maintenir cette valeur de débit pendant une heure pour encaisser la somme des flux de chaleur correspondant à une période d'une heure. Comme ce débit est massique, il est nécessaire de le diviser par la masse volumique de l'eau ρ_{eau} , qui est supposée constante ici et proche de 1 000 kg/m³, pour pouvoir obtenir le débit volumique \dot{V}_{eau} , en m³/s. Le coefficient de conversion 1000 utilisé ici, permet de passer des m³ aux L, pour obtenir un débit volumique exprimé en L/s (équation 4.22).

$$\dot{V}_{eau} = \frac{\dot{m}_{eau}}{\rho_{eau}} \times 1000 \quad (4.22)$$

En multipliant cette fois par 3600 secondes (voir équation 4.23), il est possible d'obtenir la quantité d'eau $V_{heure,eau}$ qu'il est nécessaire de faire évaporer pour chaque tranche horaire.

$$V_{heure,eau} = \dot{V}_{eau} \times 3600 \quad (4.23)$$

Finalement, comme seulement les valeurs positives de flux ont été prises en compte, calculer la somme des quantités d'eau nécessaires toutes les heures, pendant une journée complète

permet d'obtenir la quantité totale d'eau nécessaire à l'évaporation $V_{day,eau}$, pendant la journée correspondante aux heures considérées (équation 4.24). La quantité d'eau évaporée pendant tout le spectacle $V_{tot,eau}$ peut également être obtenue par déduction de l'étape précédente (équation 4.25).

$$V_{day,eau} = \sum_i^{Nbheures} V_{heure,eau} \quad (4.24)$$

$$V_{tot,eau} = \sum_i^{Nbjours} V_{day,eau} \quad (4.25)$$

4.6 Résultats

Le fait de connaître la quantité totale d'eau qu'impose l'utilisation de cette solution permet d'estimer les besoins qui seront nécessaires. Cependant, il y a une restriction concernant l'utilisation de l'eau, seule une limite de 2 000 litres d'eau par jour peut être utilisée par le CDS, pour cette solution. Il est donc nécessaire de créer une limitation sur les valeurs journalières que peut atteindre $Q_{journée,eau}$, pour ne pas dépasser cette limite. Une boucle for et if permet de remédier à ce problème, en modifiant toutes les valeurs de $Q_{journée,eau}$ supérieure à 2000 litres de sorte à être égales à 2000 litres. Finalement, il est possible de tracer deux courbes. La première courbe est la consommation journalière de l'eau pour cette solution durant tout le spectacle, en prenant compte de cette limite de consommation. La figure 4.3 propose donc cette première courbe, représentant la quantité d'eau utilisée jours pas jours, en prenant en compte la limite de 2000 litres d'eau.

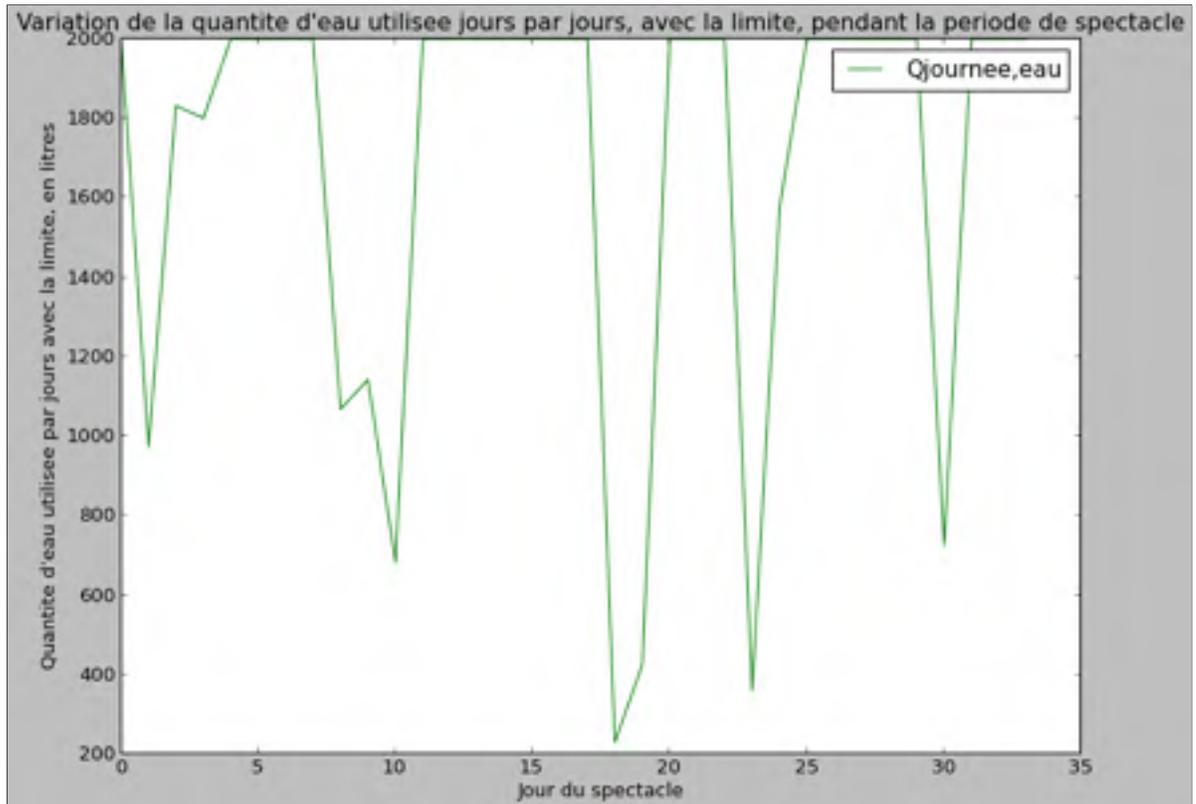


Figure 4.3 Tracé de $V_{\text{day,eau}}$ pour chaque jour de spectacles avec la limite de 2000 litres d'eau par jour

Cette courbe montre donc que pour une bonne partie des journées du spectacle, la limite d'eau imposée est atteinte. Cela est dû au fait que les flux thermiques considérés sont plus importants que ce que peuvent évacuer par évaporation les 2000 litres d'eau. Il faut combler l'écart par une climatisation standard et cela affecte la rentabilité de la solution.

La deuxième courbe ne prend cette fois pas en compte cette limite, pour être en mesure de connaître les vraies quantités d'eau qu'il serait nécessaire d'utiliser en une journée pour compenser tous les flux thermiques pris en compte (figure 4.4).

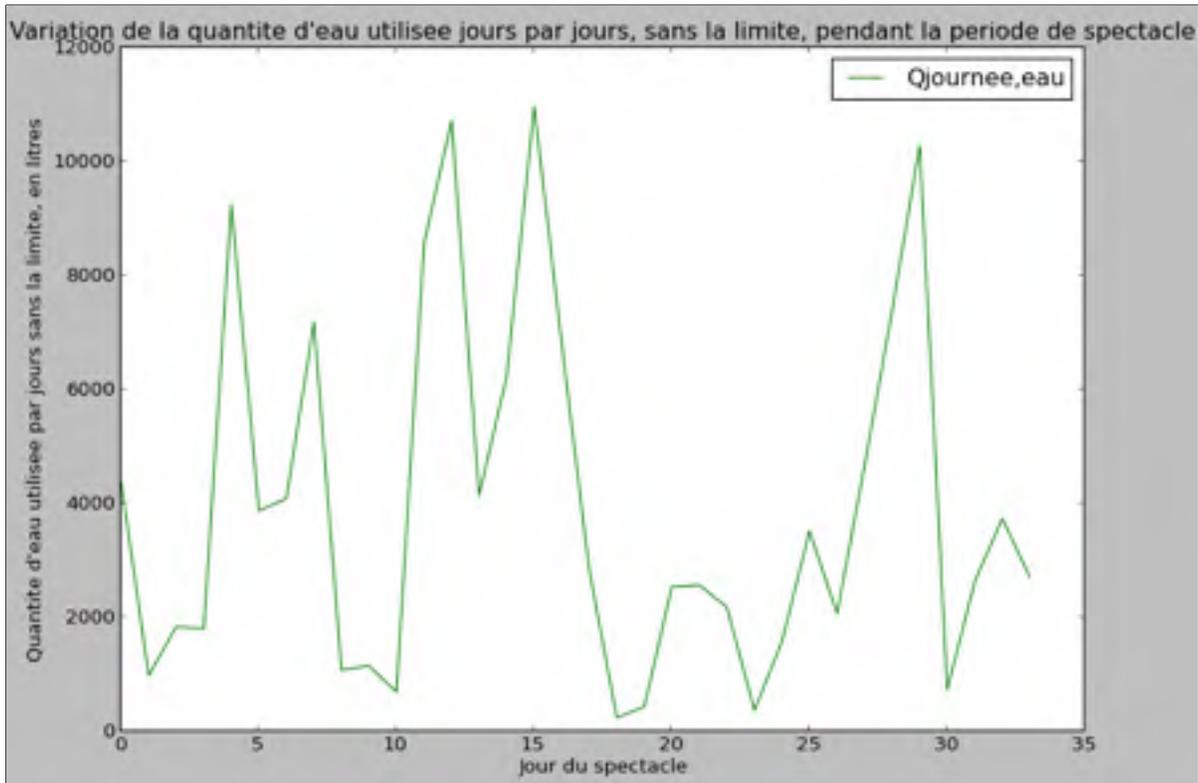


Figure 4.4 Tracé de $V_{\text{day,eau}}$ pour chacun des jours de spectacles sans limite d'eau

La courbe démontre alors que la quantité d'eau qu'il est nécessaire pour encaisser de manière totale les flux pris en compte dans l'étude, peut avoisiner les 11 000 litres lors de certaines journées. Il y a donc un écart considérable avec la valeur limite qui est imposée par le Cirque du Soleil.

La quantité d'énergie sauvée à chaque spectacle peut être obtenue de manière simple. En effet, avec la valeur de $V_{\text{tot,eau}}$ obtenue précédemment, et quel que soit le cas considéré, il est possible d'obtenir la quantité d'énergie équivalente. Il aurait également été possible d'obtenir la quantité d'énergie qu'il est possible d'économiser à partir du calcul du débit d'eau \dot{m}_{eau} . La relation qui relie la quantité d'eau à évaporer, à l'énergie économisée est présentée dans la suite (voir relation 4.25). Le coefficient $2,8 \cdot 10^{-7}$ permet de réaliser la conversion des J (joules) en kWh_{th} et la quantité d'énergie thermique sauvée, $E_{\text{éco}}$ est exprimée de manière horaire (voir équation 4.26).

$$E_{\text{éco}} = m_{\text{tot,eau}} \times (L_{\text{evap}} + c_{p,\text{eau}} \times \Delta T) \times 2,78 * 10^{-7} \quad (4.26)$$

En connaissant le prix de l'électricité moyen du pays considéré, et avec un COP de 2,8, il est possible d'en déduire l'économie monétaire, $\$_{\text{tot}}$ qui est ainsi réalisée (voir équation 4.27).

$$\$_{\text{tot}} = \frac{E_{\text{éco}} \times \$_{\text{élec}}}{COP} \quad (4.27)$$

La quantité d'énergie thermique totale qui peut être potentiellement économisée, ainsi que les économies sur les coûts associées sont calculés à l'aide de la console de calcul Python. Les résultats présentés ici sont ceux obtenus pour le spectacle Luzia, qui s'est déroulé à Montréal du 4 mai au 7 juin 2016. Le code de calcul analyse les deux cas de figures, avec et sans la limite de 2000 litres d'eau.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 4.5. Ces résultats précisent également la quantité de CO₂ qu'il est possible de rejeter en moins grâce à l'utilisation de cette solution, à l'aide de l'équation 3.8 utilisée précédemment.

Tableau 4.5 Résultats de l'analyse Python pour Luzia du 4 mai au 7 juin 2016

	Avec limite	Sans limite
Quantité totale d'eau utilisée	56 818 litres	134 100 litres
Énergie économisée	43 396 kWh _{th}	102 421 kWh _{th}
Coûts sauvés	2 480 \$	5 853 \$
CO ₂ rejeté en moins	13 tonnes	31 tonnes

Les économies potentielles pour ces 33 jours d'étude sont assez conséquentes. En effet environ 43 400 kWh_{th}, soit environ 15 500 kWh_e sont possiblement sauvés avec cette solution de brumisation, en prenant en compte la limite d'eau imposée par le CDS. Cela éviterait également de rejeter 13 tonnes de CO₂ sur cette même période. Ces économies pourraient

toutefois être encore plus conséquentes, car la période d'analyse n'est pas très chaude. En effet, le climat montréalais entre le 4 mai et le 7 juin est ensoleillé, mais les températures ne sont pas à leur maxima. Une telle analyse menée en juin, juillet ou août présenterait des économies plus grandes. De plus, les températures intérieures mesurées et les paramètres utilisés dans cette étude sont également influencés par le fait que la couleur de la tente utilisée à Montréal est blanche et jaune, ce qui favorise déjà la diminution de la température intérieure et de l'absorption de chaleur par la toile. Ces économies potentielles pourraient toutefois permettre de supprimer l'utilisation d'une génératrice de 500 kW pendant 31 heures ou de deux génératrices pendant presque 16 heures de spectacles. En comptant 5 heures de spectacles, ce sont 6 jours où une génératrice pourrait être totalement coupée. De plus, couper l'utilisation de génératrices éviterait leur location et donc des frais supplémentaires (données de location non fournis par le CDS). Finalement, si la quantité limite d'eau qu'il est possible d'utiliser dans une journée pouvait être repoussée, les économies potentielles de cette solution pourraient être doublées, atteignant 102 500 kWh_{th}, soit près de 36 500 kWh_e ou 5 853 \$ de coûts sauvés environ. Cela représente 31 tonnes d'émissions de CO₂ en moins. Le fait de présenter l'analyse sans prendre en compte la quantité maximale d'eau peut amener le CDS à changer d'avis quant à cette limite, augmentant de manière conséquente leurs économies. Les résultats de cette analyse ont également été présentés dans l'article publié dans les comptes rendus du colloque CIFQ 2017 (annexe II).

Les calculs réalisés ici sont ensuite étendus à chacune des villes des tournées qui ont été sélectionnées lors de la première phase de l'étude. Cependant, comme il n'y a pas de systèmes de mesures de températures par DataLoggers dans les tentes des autres tournées, il est nécessaire de formuler certaines hypothèses. Ainsi la température au sol est estimée à $T_{gr} = 24^{\circ}\text{C}$ la journée, c'est-à-dire à la température de consigne fixée par le CDS, et la température à l'intérieur de la tente, au plus près du sommet est légèrement supérieure à la température ambiante extérieure, soit $T_{top} = T_{amb} + 4^{\circ}\text{C}$, ce qui est proche des observations réalisées dans l'étude à Montréal. Les résultats de l'analyse pour la tournée Kurios sont présentés en annexe II, sans prendre en compte la limite d'utilisation de l'eau pour voir le plein

potentiel de la solution. Ainsi sur la seule année 2016, pour le seul spectacle Kurios, la solution de brumisation pourrait permettre d'économiser près de 244 MWh_e, soit environ 39 000\$.

Comme les résultats théoriques de la solution de refroidissement par évaporation présentent des économies conséquentes, le CDS a demandé la mise en place de tests expérimentaux visant à valider les premiers résultats de l'étude.

4.7 Tests expérimentaux

Pour une journée très ensoleillée à Montréal, avec un peu de vent et une température extérieure d'environ 30°C, les mesures effectuées montrent que la tente présente une température de surface de 63°C pour les bandes bleues et de 59°C pour les bandes jaunes. Le système expérimental installé sur la tente testée est de petite taille. Il comporte 8 buses en série, espacée de 40 cm et projetant l'eau vers la toile. Ce système ne permet de pulvériser (ou brumiser) que 20 litres d'eau par heure. Puisque toute l'eau pulvérisée sur la toile est évaporée par les apports radiatifs extérieurs, ce sont 12,6 kWh_{th} qui ont été extraits de la toile. L'inertie de la toile fait en sorte qu'il faut 3 minutes pour atteindre un état permanent, avec une température de surface de la toile d'environ 35°C, lorsque la brumisation débute et 6 minutes pour revenir à l'état initial lorsque la brumisation arrête (figure 4.5).

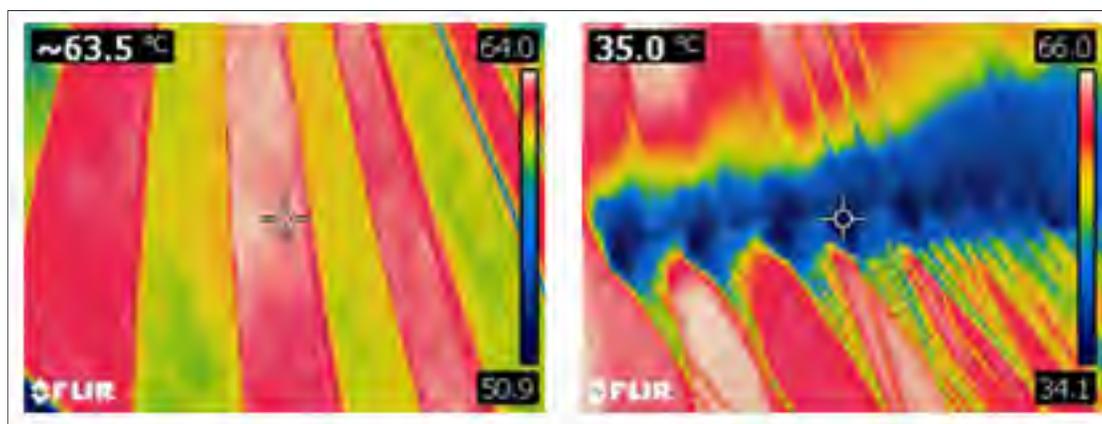


Figure 4.5 Analyse des températures avant brumisation (à gauche) et après brumisation (à droite) pour les tests de brumisation réalisés, avec la caméra thermique

Les économies relatives à ces tests sont présentées dans le tableau 4.6, en supposant que toute la quantité d'eau brumisée sur la toile est évaporée.

Tableau 4.6 Analyse des résultats des tests expérimentaux de brumisation

Paramètre	Valeur	Unité
Énergie unitaire économisée (E_{eco})	0,63	kWh _{th} /L
Flux solaire (ensoleillé)	900	W/m ²
Absorptivité de la toile	0,8	-
Flux solaire à évaporer ($q''_{sol,évap}$)	0,720	kW/m ²
Débit surfacique requis (\dot{V}'')	1,145	L/h.m ²
Aire totale de la tente (A_{tente})	3 000	m ²
Débit d'eau requis (\dot{V}_{tot})	3 435	L/h
Puissance totale évitée (q_{tot})	2,16.10 ³	kW
Durée d'exposition à pleine charge	5	heures
Énergie totale sauvée ($E_{eco,tot}$)	10 800,0	kWh _{th}
Prix de l'électricité	0,16	\$/kWh _{th}
COP de climatisation	2,8	-
Économies par jour	617,14	\$/jour
Nombre de jours	30	jours
Argent économisé par mois	18 514,29	\$

L'équation suivante (formule 4.28) permet de calculer le débit surfacique requis \dot{V}'' présenté dans le tableau.

$$\dot{V}'' = \frac{q''_{sol,évap}}{E_{eco}} \quad (4.28)$$

La formule 4.29 permet quant à elle de calculer la puissance totale q_{tot} qu'il est possible de sauver.

$$q_{tot} = E_{eco} \times \dot{V}_{tot} \quad (4.29)$$

L'énergie totale économisée est simplement le produit de la puissance totale avec la durée d'exposition à pleine charge. La quantité d'argent économisée totale est obtenue avec la formule 4.30.

$$\$_{tot} = \frac{E_{eco,tot} \times \$_{elec}}{COP} \times Nb_{day} \quad (4.30)$$

La condition pour laquelle le système est efficace consiste à assurer une répartition uniforme de l'eau à partir des points les plus élevés sur le chapiteau de manière à ce que le ruissellement n'atteigne jamais le bas de la toile. Les tests réalisés indiquent que le meilleur espacement entre les buses utilisées est de 40cm pour couvrir l'espace entre les buses. Cependant, pour obtenir une répartition plus grande sur la surface, il sera nécessaire d'utiliser des buses avec un plus grand débit, ce qui pourra faire varier cet espacement. Il faudrait également pouvoir contrôler le débit de l'eau dans les différentes branches du système en fonction de l'orientation de la toile par rapport au soleil et ajouter des capteurs de températures au bas des parties inclinées des toiles, tout près de la jonction avec les murs verticaux, pour stopper la brumisation lorsque cette température se met à baisser sous le niveau de la toile sèche. Si l'eau est gratuite et abondante sur le site de spectacle, donc sans prendre de limite de consommation en compte, les économies pour le chapiteau principal sont de l'ordre de 18 500\$/mois pour la tente classique bleue et jaune. Ces économies permettraient alors de concevoir et fabriquer un système d'une valeur de 300 000\$ et d'obtenir une PRI de 3 ans. En plus, cela permettrait de se passer d'une génératrice sur les sites non reliés au réseau d'électricité de la ville, et d'un système CVCA ce qui représente des économies supplémentaires presque tout aussi substantielles. Cette étude partielle, sur un site parmi les plus tempérés et avant la saison la plus chaude, conforte ainsi le CDS dans l'idée que la brumisation est une solution qui permettrait de réduire grandement la charge de climatisation lors des journées ensoleillées et chaudes en été.

4.8 Conclusion

La solution de brumisation ne sera finalement pas retenue pour implantation par le CDS, malgré les économies potentielles validées par les tests in-situ. Cette solution engendre en effet trop de contraintes qui pourraient nuire au CDS et à leur image. Cela provient principalement de l'utilisation de l'eau qui pourrait à la fois abîmer les toiles et créer un inconfort pour les spectateurs et les techniciens à l'extérieur du chapiteau.

CHAPITRE 5

AUTRES AXES DE SOLUTION

Cette partie concerne les solutions qui ont été développées puis abandonnées dès la génération des idées ou lors de l'étude de pré faisabilité.

5.1 Génération de solutions

Tout d'abord, un remue-méninge a été réalisé avec l'équipe élargie de projet, dans l'optique de pouvoir ensuite dégager les solutions réellement intéressantes et exploitables (Rousse, 2016a).

5.2 Solutions retenues

Les solutions retenues à l'issue de la génération ont été confrontées au cahier des charges, notamment pour les restrictions imposées par l'équipe du Cirque du soleil. Voici la liste des solutions qui ont été retenues pour l'étude :

- Efficacité énergétique
 - Rafraîchissement évaporatif qui utilise l'eau pour refroidir les toiles,
 - Système de doubles portes à l'entrée,
 - Panneaux photovoltaïques portatifs,
 - Système « d'écran solaire » pour diminuer la radiation solaire reçue par la toile,
 - Déstratification thermique de l'air chaud et froid à l'intérieur des tentes.
- Sobriété énergétique
 - Réduction de l'utilisation de l'éclairage,
 - Réduction du chauffage et de la climatisation,
 - Réduction de la charge de nuit,
 - Séchage des costumes.

Les sections suivantes discutent de celles qui ont fait l'objet d'une étude par l'équipe et qui ne font pas l'objet d'un chapitre de ce mémoire.

5.3 Efficacité énergétique

5.3.1 Production par panneaux photovoltaïques (panneaux PV)

Le CDS n'est pas en mesure d'implanter des solutions de production d'énergie ou de stockage, souvent du fait de leur encombrement, des coûts de transport, et des problèmes liés au montage et au démontage lors des déplacements. L'utilisation de panneaux solaires peut sembler intéressante, surtout dans certaines régions où le Cirque est amené à réaliser des tournées, plus ou moins longues, et qui montrent des températures élevées ainsi qu'un ensoleillement important, comme par exemple en Europe l'été, en Californie ou en Australie. Néanmoins, ce type de système présente également quelques désavantages. Tout d'abord, c'est un système relativement coûteux, qui a un rendement relativement faible, de l'ordre de 15%, et qui vieillit mal. La majorité des panneaux PV, du fait de leur rendement et de leurs propriétés, ne peuvent que fournir qu'en moyenne une puissance instantanée de 250 Wc. Pour couvrir les besoins de 2 500 kW de puissance maximale, il faudrait ainsi un parc de 10 000 panneaux. Même avec 10% de cette charge maximale, la solution est physiquement impossible à implanter et transporter chaque 3 mois lors du déplacement des spectacles. En 2017, le coût du panneau PV oscille autour de 2 \$CDN/W, ainsi, un système couvrant 10% de la demande maximale demanderait une dépense de 500 000\$. De plus, ranger ces panneaux dans des remorques requerrait 3 remorques, à 35 000\$/an, sans compter les onduleurs et autres équipements, ce qui augmente de manière conséquente les coûts d'implantation de cette solution.

Une première étude sur ce sujet a été incluse dans un rapport plus important par une équipe réalisant un projet de fin d'étude (PFE) sur cette même problématique (Lévesque, Roy, Sauvageot & Trudel, 2016). L'analyse, assez exhaustive, ne prend pas en considération l'achat de batteries pour stocker l'énergie produite par les panneaux, ni l'achat d'une unité de contrôle pour gérer la production, ni les frais d'installations du système, qui représentent des frais très importants. Les auteurs arrivent à un coût de revient de 1,81 \$/kWh. Ce qui confirme que même

si la solution était faisable, elle ne serait pas rentable économiquement face au diesel. Même en reprenant ces calculs avec des données correspondant aux conditions les plus optimales pour obtenir la plus grosse quantité d'énergie possible, le coût minimal de l'énergie obtenue par les panneaux solaires reste excessivement élevé. De nombreux frais ont été négligés dans cette étude (Lévesque, Roy, Sauvageot & Trudel, 2016), sans compter que l'irradiation solaire ne sera jamais aussi élevée pendant 271 jours de l'année que celle considérée dans leur étude. Ainsi, le coût minimal possible de l'énergie créée par les panneaux solaires descend difficilement autour de 1,34 \$/kWh.

Malgré ces analyses démontrant la non rentabilité de l'utilisation des panneaux solaires dans le cadre des spectacles itinérants, une nouvelle demande provenant du CDS a été formulée, concernant une marque de panneaux solaires précise, dotés de batteries incorporées. Les panneaux solaires proposés sont ici des panneaux solaires portatifs de la marque Mobile Solar de type PK séries (figure 5.1 à gauche) ou encore MS séries (figure 5.1 à droite). Ces panneaux solaires sont principalement utilisés dans des zones où l'électricité n'est pas accessible, par exemple lors de missions militaires en territoire hostile, ou pour des missions d'exploration naturelles. De plus, ces systèmes portatifs sont plus résistants que les autres panneaux, avec en plus la possibilité de les ranger et de les déployer aisément, ce qui est un avantage important pour un spectacle itinérant.



Figure 5.1 Modèle PK-1 (gauche) et modèle MS-375 (droite) de Mobile Solar
Tiré du site www.mobilesolarpower.net/products

Ici, l'idée serait d'utiliser ces panneaux pour de petites applications telles que l'alimentation des camions des techniciens ou comme alimentation d'appoint lors du montage et du démontage des chapiteaux. Le point fort de ces panneaux concerne leurs batteries, déjà intégrées au système, qui peuvent ainsi restituer facilement l'énergie emmagasinée pendant la journée par la suite, durant la nuit par exemple. Cependant, le rendement de ces panneaux solaires demeure toujours faible, de l'ordre de 15%, avec une durée de vie limitée. Dans le cas précis des produits Mobile Solar, leur prix d'achat est relativement élevé. Le tableau 5.1 présente le prix du kWh obtenu concernant plusieurs modèles proposés par MobileSolar. Les données sont fournies sur le site de l'entreprise (mobilesolarpower.net/products). Ici, la taille correspond au système complet, c'est-à-dire à la boîte pour les modèles PK et à la remorque pour le modèle MS.

Tableau 5.1 Comparaison du prix au kWh des modèles PK-1, PK-3 et MS-375 proposés par l'entreprise Solar Mobile

Modèle	PK-1	PK-3	MS-375
Taille	50cm x 81cm	61cm x 122cm	1,8m x 6,1m
Énergie moyenne collectée par jour	1,5 kWh	2,5 kWh	24 kWh
Capacité de la batterie	2,7 kWh	11 kWh	40 kWh
Durée de vie maximale	5 ans	5 ans	15 ans
Énergie produite en moyenne pendant la durée de vie	2 737,5 kWh	4 562,5 kWh	131 400 kWh
Prix minimum du modèle	5 320 \$	9 756 \$	38 180 \$
Prix au kWh	1,94 \$/kWh	2,14 \$/kWh	0,29 \$/kWh

Par exemple, pour un modèle PK-1, qui est un système d'entrée de gamme, le prix de l'énergie revient à 1,94 \$/kWh, ce qui est encore une fois très élevé. Le modèle PK-3, un peu plus évolué que le premier modèle, car plus gros, ne permet toutefois pas de réduire le coût, qui dépasse cette fois les 2 \$/kWh. Malgré la faible rentabilité des deux produits dans le cas particulier du CDS, le dernier produit présenté, le MS-375 permet de diminuer les prix de revient et offre ainsi un compromis, qui reste cependant trop élevé comparé au prix de l'énergie obtenu par le CDS.

Ce modèle MS-375 pourrait être installé bien en vue des spectateurs par l'équipe du CDS pour afficher de manière forte leur intérêt pour le développement durable et la diminution de leur empreinte écologique sans toutefois avoir un grand impact sur la rentabilité des spectacles.

5.3.2 Déstratification thermique de l'air chaud ou froid

La stratification de l'air est un phénomène courant dans les enceintes fermées, puisque l'air se dilate lorsqu'il chauffe, ce qui provoque donc son ascension de manière naturelle par convection. Ce phénomène est présent dans le cas du CDS et apparaît notamment dans le BigTop lorsqu'il n'y a pas de climatisation ou de chauffage, mais également dans la tente artistique. La figure 5.2 présente un relevé de températures pour quatre jours, en profil de climatisation à Montréal, acquis grâce aux sondes de températures placées à différentes hauteurs dans la tente principale (BigTop). La sonde Corteo est placée en bas du mât principal du BigTop, la sonde Totem au milieu de ce mât, et la sonde Kooza tout en haut du mât. La sonde Luzia est placée à l'extérieur de la tente, pour donner une température de référence, et les trois autres sondes utilisées sont placées à différents niveaux de hauteurs dans la tente, comme précisé dans la légende.

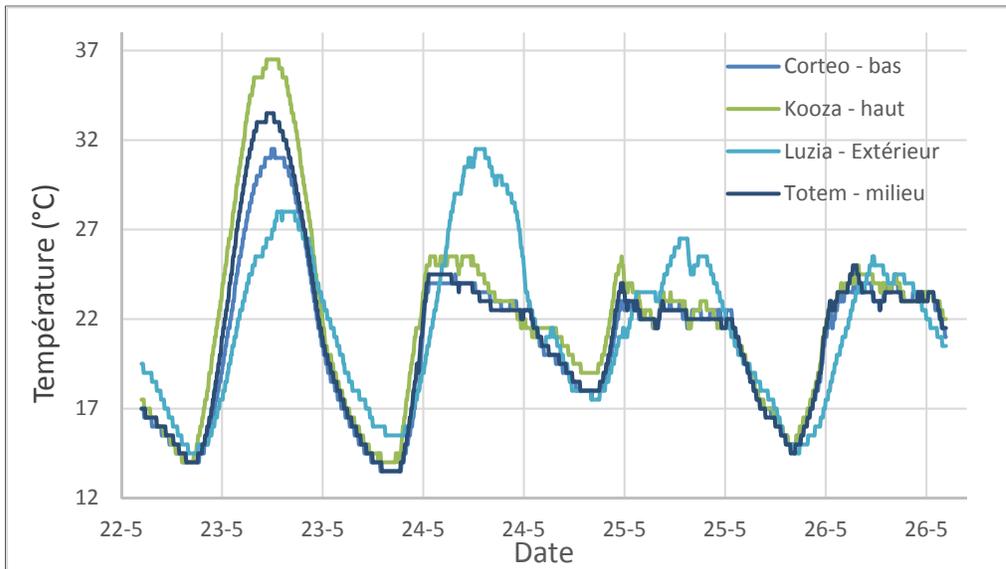


Figure 5.2 Variations de températures selon la hauteur dans le BigTop pour le mois de mai, en profil de climatisation

Les quatre journées choisies pour cette analyse représentent différents jours de la semaine, du lundi 23/5 au jeudi 26/5. Il est important de pouvoir comparer des journées avec des représentations, où la climatisation et le chauffage sont utilisés, et des journées sans représentation, où ces systèmes ne sont pas en marche. Ainsi, pour le CDS, la journée du lundi correspond à une journée « off », c'est-à-dire une journée sans représentation, alors qu'il y en a une lors de chacune des journées suivantes. La courbe présentée dans la figure 5.2 permet dans un premier temps de remarquer que, pour une journée sans spectacle, et donc sans climatisation dans ce cas précis, les températures augmentent à l'intérieur de la tente, selon un axe vertical. La courbe montre que pour une température extérieure de 28°C (sonde Luzia-extérieur), la température dans la tente s'échelonne de 30°C (sonde Corteo-en bas) à 36,5°C (sonde Kooza-haut). En regardant cette fois les journées avec des représentations, où la climatisation est en marche, il est possible de voir que même pour une température extérieure proche de 32°C, les températures à l'intérieur de la tente sont comprises entre 22°C et 25°C, donc dans les plages imposées par le CDS, quelle que soit la hauteur considérée dans la tente. Par conséquent, la climatisation utilisée durant la journée et le système d'extraction d'air de la tente sont assez puissants pour permettre de maintenir une homogénéité verticale de la température de l'air dans l'enceinte de la tente. Ainsi, il est important de retenir que la

stratification, en phase de climatisation, ne survient que lorsque le CDS n'est pas en période de représentation.

Cependant, la tente artistique présente des résultats différents. Deux sondes ont été placées, une au sol et une au sommet d'un mât pour réaliser des acquisitions des variations de température. En effet, il y a une importante stratification de l'air chaud à l'intérieur de cette tente, qui est climatisée et chauffée que la tente principale et qui ne présente pas de système d'extraction d'air. Cette tente est ainsi plus sujette à de fortes variations de températures. Et les artistes doivent pouvoir y évoluer tant au sol qu'en hauteur à la même température.

Concernant l'analyse en profil de chauffage, la même situation apparaît, avec cette fois une température extérieure plus faible, qui est à l'origine du refroidissement de la toile de la tente. En effet, une déstratification naturelle a lieu lors de la phase de chauffage, grâce à une circulation naturelle de l'air chaud au contact de la tente froide. L'air chauffé dans l'enceinte de la tente s'élève, puis, une fois arrivé au sommet, cet air chaud se refroidit au contact de la toile froide et descend le long de la paroi, toujours par convection, ce qui est à l'origine d'un mouvement d'air naturel à l'intérieur même de la tente. Ce phénomène de déstratification naturelle permet de diminuer la charge de chauffage directement. Tout comme le profil de climatisation, le profil de chauffage ne nécessite pas l'installation d'un système de déstratification de l'air dans le BigTop. Le système de chauffage et d'extraction d'air est suffisant pour assurer à lui seul la bonne répartition de l'air dans la tente. En revanche, comme précédemment, même en phase de chauffage, une stratification de l'air chaud apparaît dans la tente artistique, ce qui augmente de manière inutile la charge dédiée au chauffage. La tente artistique va donc être analysée par la suite, dans le but de déterminer si installer un système de déstratification permettrait de diminuer la consommation énergétique.

Le but principal du système de déstratification est de mettre en place des ventilateurs thermiques qui vont permettre de créer une circulation de l'air dans le but de rendre la température uniforme à l'intérieur de la tente. Le fait d'obtenir une température homogène permet de réduire la charge de chauffage ou de climatisation dans certains cas. Dans le cas du

Cirque du Soleil, un mouvement d'air dû à l'air chaud engendre une déstratification naturelle lors de la phase de chauffage du BigTop. La climatisation du CDS est quant à elle assez puissante pour pouvoir assurer l'uniformité de la température à l'intérieur du BigTop. La tente principale ne présente donc pas de stratification assez importante pour engendrer une étude plus approfondie. En revanche, il est intéressant de réaliser une étude plus poussée concernant la stratification dans la tente Artistique. Pour déterminer si l'utilisation d'un système de déstratification est potentiellement efficace dans cette tente, il est tout d'abord nécessaire de dresser deux portraits de fonctionnement du site, pour les profils de climatisation et de chauffage. Les relevés obtenus grâce aux sondes de températures sur le spectacle Luzia à Montréal permettent de réaliser une discrétisation en deux points à différentes hauteurs dans la tente Artistique. Seule cette tente sera étudiée ici, de manière plus approfondie, car c'est la qui présente de réels problèmes de stratification pour les techniciens et les artistes, même si les consommations dédiées à la climatisation ou au chauffage sont moins importantes que pour la tente principale. De plus, c'est également la tente où les restrictions quant à la température sont les plus nombreuses. Cette étude a été réalisée avec l'aide de Astrid Izquierdo, qui a réalisé un stage pour le CDS, sur la même problématique de réduction de la consommation, appliquée spécifiquement au système de déstratification. Ce rapport a été publié en 2016, et seulement une analyse rapide des résultats en chauffage est présentée ici. Le profil de climatisation ne présente en effet pas de possibilité pour mettre en place un tel système.

Dans cette étude, les besoins en chauffage et climatisation sont supposés dépendre uniquement du phénomène de convection entre l'intérieur et l'extérieur à travers la paroi de la tente, et du phénomène de pertes thermiques dues au renouvellement d'air, donc les exfiltrations. Comme les relevés de températures sont obtenus en deux points à différentes hauteurs, l'analyse pour cette tente est séparée en deux parties.

Dans le cas du chauffage, seulement un cas de figure est à analyser, puisqu'en phase de chauffage, la température extérieure est forcément inférieure à la température à l'intérieur de la tente. Les températures utilisées sont des températures moyennes obtenues pour des journées relativement froides à Montréal. La température intérieure en hauteur est toujours

assez élevée, 26°C environ, tandis que la température en bas reste toujours proche de sa consigne, à 23°C. La température extérieure utilisée ici est de 15°C, qui correspond à une journée qui nécessite un chauffage modéré pour les mois de avril et mai à Montréal. La figure suivante (figure 5.3) propose donc cette fois l'analyse du profil de chauffage, de la même manière que pour les deux cas précédents.

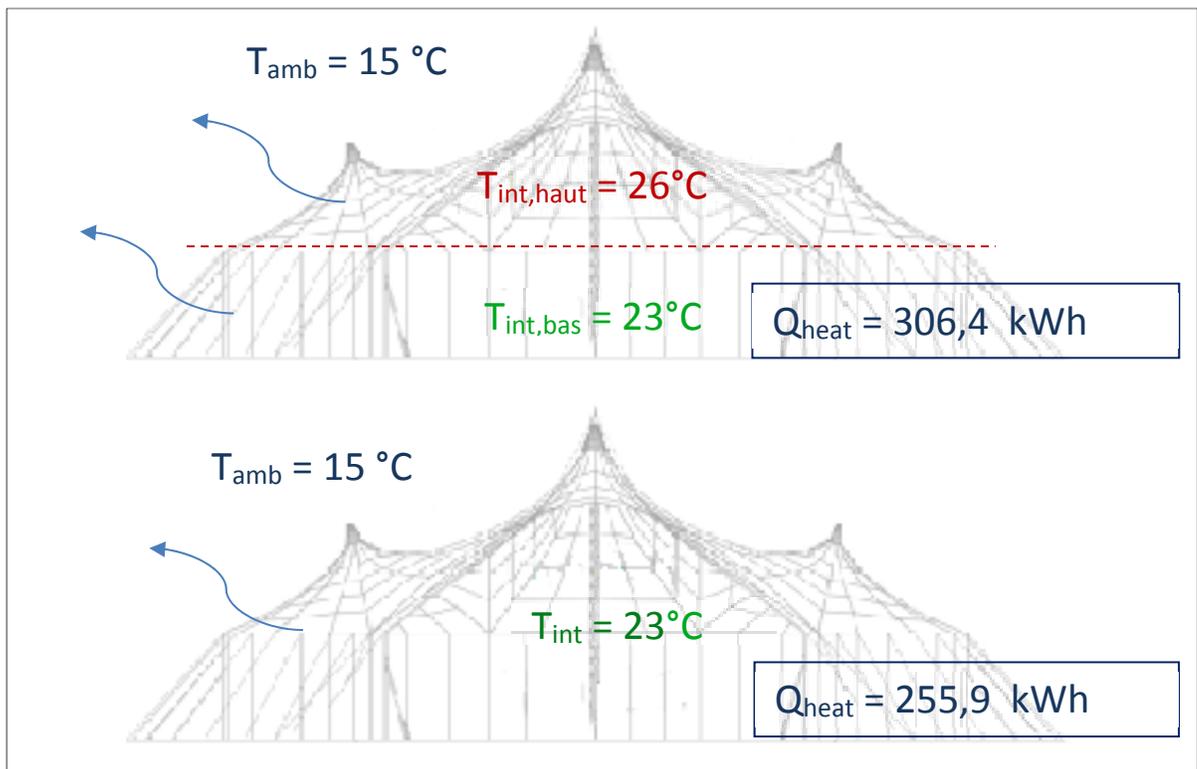


Figure 5.3 Analyse de la stratification en profil de chauffage
Tiré et adapté de Izquierdo, A. (2016)

Dans le cas de l'analyse du profil de chauffage, tous les échanges thermiques considérés ici sont équivalents à des pertes vers l'extérieur. Cela s'explique par le fait que la température est plus élevée à l'intérieur de la tente, ce qui a tendance à expulser la chaleur en dehors de la tente, par exfiltration et par convection. Dans le cas où la température est stratifiée, les pertes thermiques s'élèvent à 306,4 kWh, tandis que dans le cas où la température est homogène dans l'enceinte de la tente, ces pertes s'élèvent à 255,9 kWh. Toutes ces pertes thermiques doivent cependant être compensées par le système de chauffage du CDS. Ainsi, grâce au système de

déstratification, ce sont 50,5 kWh qui peuvent être sauvés pendant une heure, et qui n'auront donc pas à être fourni par le chauffage. Dans le cas du profil de chauffage, comme la température extérieure est plus faible durant toute la journée, il est nécessaire de chauffer durant toute la journée, pour le confort des artistes qui répètent à longueur de journées dans la tente artistique. Dans ce cas précis, le chauffage est utilisé pendant 10 heures environ, de 11h le matin à 21h le soir. Ainsi, sur une journée complète en phase de chauffage, le système de déstratification permettrait d'économiser jusqu'à 505 kWh, soit 80,8 \$/jour. Il est important de préciser que le système de chauffage utilise un COP de 1, contrairement au système de climatisation. De plus, en extrapolant pour une tournée qui visite des villes avec un climat froid pendant l'hiver, à Montréal, sur un mois, les économies peuvent s'élever jusqu'à 15 655 kWh soit 2 505 \$. Les économies énergétiques réalisées en profil de chauffage, grâce à la déstratification peuvent donc se révéler non négligeables.

Finalement, les analyses proposées lors de cette étude démontrent qu'un système de déstratification serait, en premier lieu, utilisable uniquement pour la tente Artistique, dans le cas du CDS, et uniquement en profil de chauffage. Un tel système fonctionne à l'aide de ventilateurs, placés au sommet de la tente, qui permettent d'obtenir une meilleure circulation de l'air dans l'enceinte du chapiteau. L'air chaud qui s'élève naturellement dans les hauteurs de la tente est aspiré par ces ventilateurs et est ensuite soufflé dans la partie inférieure de la tente, ce qui permet ainsi de diminuer les besoins de chauffage au sol.

5.3.3 Écrans solaires

Le principe des écrans solaires, aussi appelés toiles d'ombrage, est similaire à celui d'un parasol (figure 5.4), c'est-à-dire que l'on cherche à diminuer la portion d'irradiation solaire qui va frapper la surface de la tente, en choisissant un écran opaque. Cette solution, comme la précédente, ne fonctionne que pour réduire la charge de climatisation nécessaire au refroidissement de l'intérieur de la tente. Il est nécessaire de choisir l'orientation des écrans en fonction de l'incidence du soleil pendant les heures de représentations, dans les différents lieux

où ont lieu les tournées ou alors il faudrait ombrager l'ensemble de la surface ce qui serait complexe, onéreux et requerrait une autre remorque complète pour transporter les toiles.



Figure 5.4 Exemple de toiles d'ombrages superposées (www.belategui.fr)

L'écran solaire doit être choisi de manière à transmettre le moins possible l'énergie solaire incidente. Peu importe la réflectivité et l'absorbivité de la toile de l'écran, il faut que sa transmissivité au rayonnement solaire soit idéalement nulle. Ainsi, il est nécessaire d'utiliser une toile opaque afin de réduire totalement la portion du rayonnement solaire qui autrement aurait été absorbée et transmise par la toile de la tente.

Pour déterminer la viabilité de la solution, il faut établir la différence de quantité d'énergie thermique qui va frapper la toile du chapiteau avec et sans écran. En considérant que même si l'ensemble du chapiteau de plus de 3200 m² était protégé par des écrans opaques, le flux solaire absorbé par la toile du chapiteau ne pourrait diminuer que de 22% au maximum, puisque la toile du spectacle Luzia possède déjà une réflectivité solaire de 0,78.

Ensuite, le principal problème de cette solution réside dans le fait qu'il est absolument impraticable d'ajouter le poids des écrans sur les structures déjà en place (quatre poutres principales), en tenant compte de l'impact de la force du vent sur de telles « voiles ». Il faudrait tout d'abord renforcer ces structures et installer des attaches leur permettant de disposer l'écran en plusieurs endroits.

Finalement, en ne considérant qu'une surface totalement opaque théorique de 500 m² pour ces écrans solaires, l'impact sur la réduction de charge solaire ne serait que de 16% sur les 22% possibles de la charge équivalente sans écran. Il est possible, par exemple, d'employer la réduction totale de la charge calculée avec la brumisation au chapitre précédent pour réaliser que la PRI serait donc à la base multipliée par 28 (1/0,22/0,166). Il s'agit donc d'une solution à rejeter.

5.4 Sobriété énergétique

La sobriété énergétique se différencie des solutions d'efficacité énergétique en instaurant une politique visant à consommer moins d'énergie, pour une même utilisation, c'est-à-dire sans modifier le confort, par exemple en changeant certaines habitudes. Cette idée cherche principalement à réaliser des économies énergétiques sur toutes les consommations qui peuvent être considérées superflues, mais aussi à sensibiliser les personnes présentes sur l'importance de ces économies, tant à l'échelle du Cirque qu'à l'échelle mondiale. C'est notamment le cas de l'utilisation de chauffages d'appoint lorsque toutes les portes sont ouvertes ou bien encore de le fait de laisser les éclairages allumés sur tout le site, même lorsqu'elles ne sont pas utiles.

5.4.1 Réduction des consommations nocturnes

Une consommation conséquente d'énergie a lieu la nuit, alors qu'il n'y a pas de spectacle et que personne ne travaille sur place à ce moment-là. En observant les premières données fournies par le CDS, il était étonnant de remarquer que cette consommation d'énergie est relativement importante, et oscille entre 100 et 200 kW, entre minuit et 8 heures du matin. Cette consommation correspond à l'utilisation d'une seule génératrice pour tout le site de spectacle. Cependant, le fait d'utiliser une génératrice d'une puissance de 500 kW, sans la faire fonctionner à plein régime, a tendance à diminuer son coefficient de performance, ce qui réduit de ce fait l'efficacité globale du système, augmentant ainsi les rejets de polluants, en plus de l'abimer. Le but ultime de la présente étude consiste à tenter de supprimer l'utilisation de la génératrice, par exemple en se servant d'un système de stockage d'électricité, qui la restituerait

durant la nuit. Mais, comme cela a été discuté dans la revue de littérature et dans le système de panneaux solaires, il n'existe pas de moyen assez rentable pour mettre en place un tel procédé ici. L'utilisation d'une génératrice étant au final obligatoire, il y aurait ici tout intérêt à diminuer le plus possible sa taille et la quantité d'énergie consommée la nuit. La majeure partie de la consommation d'électricité la nuit est due aux lampadaires, éclairages et projecteurs, qui ne sont pas éteints, pour des raisons de sécurité, de publicité ou par oubli (aucun signal clair ne nous a permis de savoir pourquoi l'ensemble du site était éclairé). Qui plus est, certaines installations différentes consomment également de l'énergie la nuit. Cette partie s'attarde alors à déterminer quels sont ces appareils qui fonctionnent durant la nuit, pour déterminer si ce sont des systèmes vitaux au fonctionnement nocturne du site, s'ils ont été laissés en marche par oubli, ou bien s'il est possible de réduire leur consommation.

5.4.2 Identification des systèmes en fonctionnement la nuit

Dans un premier temps, il est nécessaire d'obtenir les données des consommations des appareils via la Switchgear, qui est une interface regroupant et gardant en mémoire les consommations instantanées des différents appareils, dans le but de vérifier si les appareils qui fonctionnent la nuit devraient effectivement fonctionner. La switchgear, qui est censée garder en mémoire ces données, ne fonctionne pas correctement. Les données acquises sont erratiques et il n'est pas non plus possible de réaliser ces relevés pour chacun des disjoncteurs, à la main, avant de pouvoir tracer une courbe de données. Les techniciens se sont efforcés de réparer le logiciel d'acquisition pour permettre par la suite l'exploitation des données. Une fois les relevés nocturnes obtenus pour chacun des disjoncteurs, du mois de mai à début juin, il est possible d'identifier lesquels fonctionnent pendant la nuit. Avec ces données, il a été possible de réaliser une analyse de données et ensuite de les traiter sur le logiciel Excel dans le but de ne garder que celles nous qui sont directement intéressantes pour l'étude, c'est-à-dire les données de nuit, dans une plage horaire de 0h00 AM à 10h00 AM. L'étape suivante consiste à identifier un par un les disjoncteurs qui fonctionnent pendant cette plage, c'est-à-dire relever les disjoncteurs qui présentent un courant supérieur à 1A. L'acquisition ne fonctionnant pas en totalité, un courant de 1A ne signifie pas que le disjoncteur fonctionne réellement. Finalement,

les disjoncteurs répondant à ces critères s'élèvent au nombre de 7. La liste des disjoncteurs, ainsi que les installations qui leur sont associées est présentée ici :

- CB 20 – Installations de la tente d'entrée,
- CB 21 – Chauffage de la tente d'entrée,
- CB 22 – Installations de la tente VIP,
- CB 26 – Transformateur dédiée aux installations du BigTop et ses éclairages,
- CB 27 – Transformateur BigTop & Sound, installations du BigTop et du son,
- CB 33 – HVAC Art & Sanitary, dédié au système HVAC des tentes artistique et sanitaire,
- CB 34 – HVAC BS + Heaters, dédié au système HVAC du back stage du BigTop et à son chauffage.

Ce dernier disjoncteur, le CB 34, n'est pas supposé fonctionner la nuit selon les techniciens. Il correspond au système HVAC de 30 tonnes, qui réalise la ventilation pour l'arrière scène du BigTop, ainsi qu'à une unité de chauffage de 30 kW. Ce disjoncteur, qui fonctionne de manière anormale la nuit, témoigne des problèmes de surconsommation qui peuvent avoir lieu au CDS.

Les courbes de courant sont tracées sur le logiciel Excel, avec des données acquises toutes les 30 secondes (figure 5.5).

Après cette étude journalière, les courbes pour les différentes journées de chacun des disjoncteurs sont superposées, pour chaque semaine, afin de connaître la tendance d'évolution de la consommation du courant durant la semaine. Il est ensuite nécessaire de reconnaître parmi ces courbes, les évolutions qui ne sont pas linéaires et qui ne correspondent donc pas à des systèmes qui sont utilisés toute la nuit de manière régulière, comme pour les éclairages, réfrigérateurs et ventilateurs.

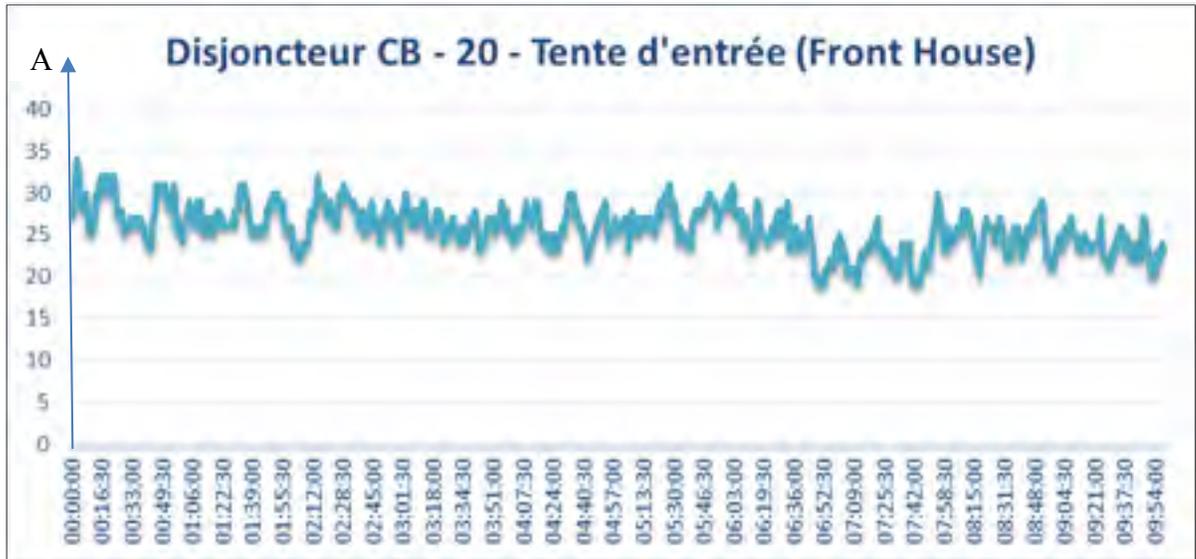


Figure 5.5 Tracé de la courbe de consommation de courant de nuit pour le disjoncteur CB-20

Les courbes qui présentent des oscillations entre 0 et 1A ne sont pas retenues car ces variations sont uniquement dues à des problèmes d'acquisition. L'exemple utilisé dans la figure 5.8 montre une utilisation assez importante du disjoncteur, d'environ 27A, ce qui équivaut à environ 20 kW de puissance en continu (équation 2.1)

C'est notamment le cas pour les chauffages d'appoint à thermostat, qui sont prévus pour se mettre en marche seulement lorsque la température à l'intérieur de la tente est inférieure à la température de consigne, fixée par les techniciens. Ainsi, si une courbe d'analyse présente des pics de consommation très courts et espacés, il est très probable que cela corresponde à un chauffage d'appoint qui aura été oublié durant la nuit. Ici, une seule courbe de superposition, représentant la consommation du disjoncteur CB-34 pendant la semaine du 29 mai au 4 juin, est présentée pour abréger la discussion (figure 5.6).

L'analyse de la courbe de courant du disjoncteur CB-34 montre une consommation anormale de courant durant toute la nuit, repérable aux oscillations de courant entre 0A et 35A, toutes les 30 minutes environ. Comme cela a été précisé précédemment, ce type d'oscillation est souvent synonyme du fonctionnement d'un chauffage. De plus, en utilisant la formule de la

puissance nette, ce courant de 35A équivaut à un système d'une puissance de 30 kW environ, ce qui correspond exactement aux systèmes de chauffage d'appoint 30 kW utilisés par le CDS.

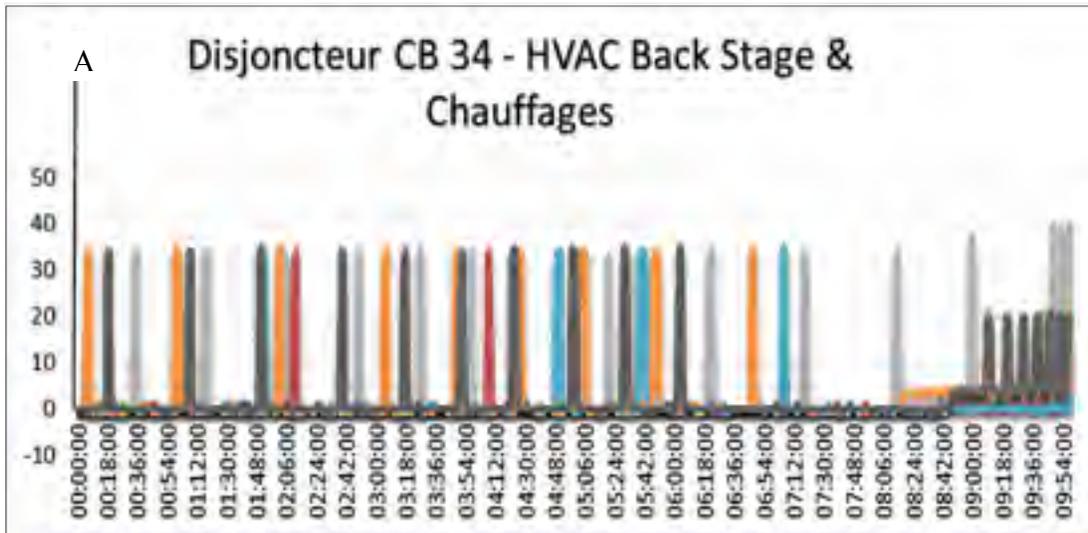


Figure 5.6 Variation du courant du disjoncteur CB-34 pour les nuits du 29 mai au 4 juin

Chacun des disjoncteurs listés a été étudié de cette manière, pour déterminer s'il est possible de réduire leur consommation d'énergie voire même de supprimer leur utilisation. Parmi tous ces disjoncteurs, seuls le CB-34 (figure 5.9) et le CB-33 présentent des consommations anormales. L'étape suivante de l'analyse consiste alors à vérifier à quels chauffages sont raccordés ces disjoncteurs, dans le but d'établir si l'utilisation de cette unité de chauffage est réellement nécessaire ou s'il s'agit d'un oubli.

En se rendant aux transformateurs des disjoncteurs en question, il est possible de déterminer quels appareils électriques y sont reliés. Les installations qui sont reliés aux deux disjoncteurs CB-33 et CB-34 sont des éclairages pour la tente artistique et le BigTop, le système de chauffage du réservoir d'eau du CDS, ainsi que deux systèmes HVAC, qui ne fonctionnent normalement que la journée. Ces installations sont indispensables au bon fonctionnement du site, et ne peuvent donc pas être modifiées dans leur utilisation. Cependant, parmi les appareils reliés aux disjoncteurs, deux chauffages d'appoints sont présents, un dans la tente artistique et raccordé au disjoncteur CB-34 et un dans la tente sanitaire, relié au disjoncteur CB-33. Ces

deux chauffages sont des chauffages d'appoint à thermostat variable de 30kW, ce qui confirme la supposition faite précédemment.

Ces deux chauffages sont réglés de manière excessive sur des valeurs de 30°C, même la nuit, ce qui est totalement superflu. Supprimer l'utilisation de ces deux appareils de 30kW qui fonctionnent par intermittence pendant la nuit permettrait d'économiser 60 kWh en supposant que leur durée de fonctionnement totale avoisine une heure entière. Sur un spectacle de trois mois, cela équivaut à une diminution de la consommation énergétique de 5 520 kWh environ, soit 900\$ environ. Ces économies sont certes faibles, mais non négligeables, au regard de l'investissement réalisé, puisqu'il s'agit tout simplement de couper ces chauffages d'appoint durant la nuit. Il est cependant nécessaire de les remettre en fonctionnement le matin, puisque leur réglage est manuel. Toutefois, l'utilisation d'une minuterie pour rythmer leur utilisation et ainsi couper leur consommation pendant la nuit pourrait s'avérer être un choix judicieux et facile à mettre en place.

Il n'est donc finalement guère possible de réduire substantiellement la consommation énergétique du Cirque la nuit, à moins d'imposer un contrôle bien précis sur l'utilisation des chauffages d'appoints. La consommation nocturne, qui est généralement située aux alentours de 200 kWh diminuerait à environ 140 kWh, soit d'environ un quart. Même si ce sont des quantités énergétiques faibles au vu de la consommation globale du CDS, cela n'en reste pas moins une consommation qui est superflue et qui ne coûte rien à supprimer.

5.4.3 Systèmes d'éclairage

Les systèmes d'éclairage sont très nombreux au Cirque du Soleil, et la consommation qui y est dédiée est par conséquent très importante. Pour une entreprise comme le Cirque du Soleil, il est important que les jeux de lumières soient très présents, pour attirer l'œil du spectateur et lui donner envie de venir assister au spectacle. Il est donc normal de voir qu'autour des heures de spectacle, en fin d'après-midi principalement, tous les éclairages soient allumés sur le site de spectacle. De plus, pour des raisons de sécurité, il semble également nécessaire que certains

éclairages restent allumés la nuit pour éclairer les allées bien que des détecteurs de mouvements puissent faire l'affaire.

Cependant, il est surprenant de constater que certains de ces éclairages restent en fonction en permanence sur les sites, soit 24 heures sur 24, même s'il n'existe pas de réel besoin quant à l'utilisation de ces éclairages. La figure 5.7 montre un cliché de la tente sanitaire en plein après-midi ensoleillé, avec des néons de 64 W allumés alors que ce n'est absolument pas nécessaire. La même constatation a été faite dans les toilettes des visiteurs, où les néons restent allumés toute la journée, et même la nuit, alors que ces toilettes ne sont pas utilisées avant l'arrivée des spectateurs. La figure 5.8 présente quant à elle un cliché de la tente d'entrée en matinée. Les jeux de lumières des présentoirs, ainsi que les guirlandes lumineuses et les écrans sont allumés dès le matin, alors que les spectateurs n'arrivent pas avant 17h. Ces exemples démontrent certes la surutilisation des éclairages qui est faite ici, mais témoignent surtout du manque de considération de la part des employés et techniciens pour les enjeux énergétiques auxquels doit faire face le CDS.

Pour documenter ce gaspillage, il s'agit dans un premier temps de répertorier sur le site les différents espaces où des éclairages sont installés, leurs puissances de fonctionnement, ainsi que leur durée d'utilisation actuelle. Dans un second temps, grâce à l'immersion d'un mois réalisée sur le spectacle de Luzia à Montréal, il a été possible de dresser un second portrait, cette fois concernant l'estimation des durées de fonctionnement réduites de chacune de ces éclairages. Le tableau 5.2 propose un exemple pour un seul appareil du fichier de calcul qui a été réalisé sur Excel et proposant le portrait des consommations. L'exemple est ici réalisé avec l'utilisation des néons dans les espaces sanitaires réservés aux spectateurs, qui demeurent allumés 24h sur 24 actuellement, mais qui pourraient fonctionner seulement pendant les périodes de spectacles, lorsque les spectateurs sont présents, soit environ 8h, de 16h à minuit, en étant très conservateur.

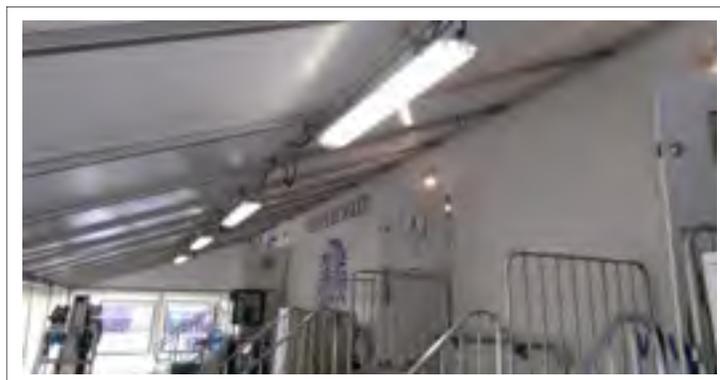


Figure 5.7 Utilisation des néons dans la tente sanitaire en après-midi



Figure 5.8 Jeux de lumières en fonctionnement en matinée dans la tente d'entrée

Tableau 5.2 Exemple d'analyse de la consommation des éclairages pour les néons sanitaires

Appareil : Néons sanitaire	Durée	Nombre	Puissance	Énergie totale journée
Fonctionnement actuel	24h	22	64 W	33,8 kWh
Nouveau fonctionnement	8h	22	64 W	11,3 kWh

Le fichier complet présentant tous les éclairages considérés, ainsi que leurs nouvelles plages d'utilisation, est présenté en annexe V.

Le tableau 5.3 présente les résultats complets de cette étude pour l'analyse du spectacle Luzia à Montréal. Dans ce tableau, le nombre de jours pris en considération pour l'étude est de 45 jours pour un spectacle d'une durée moyenne, et 285 jours pour l'année, ce qui correspond au maximum de journées de spectacles réalisées par le CDS pendant une année. Le coût de l'énergie utilisé est celui du réseau de la ville, soit 0,16 \$/kWh.

Tableau 5.3 Résultats de l'analyse de la réduction de l'utilisation des éclairages

	Économies énergétiques (kWh)			Économies monétaires (\$)		
	1 jour	Spectacle	Année	1 jour	Spectacle	Année
Total	443,7	19 968,6	126 467,6	71,0	3 194,9	20 234,8

Au total, la réduction des plages d'horaire d'utilisation des différents éclairages présents sur le site permettrait d'obtenir une diminution de la charge de 443,7 kWh par jour, soit une économie de 71 \$. Sur une année entière, cela représente environ 126,5 MWh soit 20 235 \$ d'économies. Ces résultats sont obtenus en tenant compte du prix de l'électricité moyen en Amérique du Nord fourni par le CDS. Mais dans le cas où les génératrices sont utilisées, les économies sur une année s'élèveraient à 27 823 \$, avec un prix moyen de 0,22 \$/kWh. Ces économies sont conséquentes, et la beauté de cette solution de sobriété énergétique réside dans le fait qu'elle ne nécessite pas d'investissement financier pour être réalisée, ce qui la rend rentable à 100% instantanément. Globalement, les seules mesures à mettre en place sont des mesures préventives visant à sensibiliser le personnel sur l'importance d'éteindre les éclairages après leurs passages, mais aussi simplement lorsqu'ils ne sont pas nécessaires, de jour comme de nuit.

De plus, il s'avère que l'utilisation d'une petite partie des éclairages utilisés sur le site est actuellement régulée à l'aide d'un système de temporisateur qui permet de régler de manière automatique l'heure à laquelle s'allument et s'éteignent ces éclairages. Il serait ainsi possible d'utiliser ce système déjà existant pour le restant des éclairages du site, en adaptant le réglage

des heures du temporisateur aux besoins d'utilisation des différents éclairages, ainsi qu'aux heures où le soleil permettrait d'éviter l'utilisation d'éclairage.

Un second système pourrait également s'avérer judicieux, celui des détecteurs de mouvements. En effet, les détecteurs de mouvement pourraient limiter l'utilisation des éclairages, tout en ne modifiant pas les habitudes sur place. Un tel système est très efficace, notamment au niveau des sections relatives aux sanitaires et aux toilettes extérieures. Une telle installation permettrait également de diminuer l'utilisation des éclairages de sécurité la nuit, qui ne s'allumeraient ainsi que lorsque quelqu'un passe dans une certaine zone délimitée, plutôt que de laisser ces projecteurs allumés constamment.

L'utilisation de ces deux systèmes réduirait drastiquement la consommation énergétique consacrée à l'éclairage, puisqu'elles ne seraient utilisées qu'en cas de réelle nécessité. Ces deux mesures sont toutes les deux passives à 100% et ne représentent qu'un faible investissement financier au vu des économies présentées auparavant.

Finalement, la charge dédiée aux éclairages peut être diminuée de manière conséquente si les employés prennent conscience de l'importance des enjeux relatifs aux utilisations qui sont faites des différents équipements sur le site.

5.4.4 Systèmes de climatisation et de chauffage

De la même manière que pour la plupart des éclairages présents sur le site, l'utilisation des systèmes de climatisation et de chauffage est souvent excessive. Certaines de ces unités sont indispensables pour le bon fonctionnement du CDS, comme les installations relatives aux tente BigTop, artistique et d'entrée, qui doivent nécessairement maintenir une température de consigne lors des spectacles, à la fois pour le confort des artistes et des spectateurs. En revanche, certains systèmes de chauffage et de climatisation sont utilisés de manière inappropriée. En effet, certaines de ces installations présentent des charges importantes, qui correspondent à des moments de la journée où seulement le personnel est présent sur le site, le

matin et en début d'après-midi, et donc où il n'est pas censé y avoir de climatisation ou de chauffage dans toutes les tentes. Seulement les tentes BigTop et artistique doivent être climatisées/chauffées en journée puisque les derniers réglages sont réalisés et que les artistes répètent avant le spectacle de soirée. Ces consommations superflues sont toutefois plus compliquées à quantifier que précédemment puisque différents systèmes sont branchés aux disjoncteurs et fonctionnent en journée, rendant impossible leur identification. Cependant, même s'il n'est pas possible d'identifier les systèmes en fonctionnement, il paraît évident que chauffer l'enceinte d'une pièce lorsque toutes les portes sont ouvertes vers l'extérieur représente une perte conséquente d'énergie qui pourrait largement être évitée. Il arrive ainsi relativement souvent que des portes soient laissées grandes ouvertes par les techniciens qui travaillent, malgré l'utilisation du chauffage ou de la climatisation. C'est par exemple le cas pour la tente d'entrée (figure 5.9) où les portes d'entrée et de sortie sont laissées ouvertes en pleine journée, sans que personne n'y travaille encore, alors que les systèmes CVCA sont utilisés au maximum pour refroidir la tente.



Figure 5.9 Porte grande ouverte en pleine journée en phase de climatisation

Cette habitude se retrouve également dans les remorques qui font offices de bureaux temporaires pour le personnel pendant les spectacles. Les portes et les fenêtres sont bien trop souvent laissées ouvertes alors que des systèmes d'appoint de chauffage et de climatisation sont mis en marche manuellement par les employés. Il est encore plus aberrant de constater

qu'il arrive parfois que des appareils de chauffages d'appoint soient utilisés dans les bureaux, alors que l'air climatisé est également en marche. Toutes ces pertes pourraient aisément être évitées en sensibilisant le personnel.

5.4.5 Séchage des costumes

Il est nécessaire de pouvoir laver et sécher tous les costumes quotidiennement, puisque les costumes ne sont créés qu'en deux exemplaires à chaque tournée de spectacle, pour permettre de faire deux représentations par jour en fin de semaine. Cependant, ces costumes onéreux (5 000\$ chacun en moyenne) sont fabriqués à la main et sont donc fragiles, il est impossible de les passer dans une sècheuse automatique, ce qui pourrait les abimer.

Ainsi, pour le moment, les costumes sont séchés sur un côté dans la tente artistique, à l'aide de plusieurs ventilateurs et chauffages, placés de part et d'autre des étendages, en plus du chauffage interne, propre à la tente. La tente artistique présente un volume conséquent à réchauffer, et comme l'enceinte de séchage n'est pas close, ce fonctionnement est loin d'être optimal puisque la chaleur se disperse vite dans le chapiteau. De plus, cette tente est très passante puisque c'est le seul endroit de répétition pour les artistes, et les couloirs communiquent avec l'extérieur, la tente sanitaire et le BigTop, ce qui a pour effet de créer de grands mouvements d'air. Cela entraîne une surutilisation des chauffages et des ventilateurs qui sont utilisés pendant toute la nuit, jusqu'à tard en fin de matinée.

Il a donc été suggéré aux techniciens du CDS de créer un endroit confiné dédié au séchage des costumes. Ce nouvel espace permettrait ainsi d'éviter les pertes thermiques par déplacement d'air, et de réduire celles imputables au chauffage d'une vaste enceinte. Toutefois, pour que cette solution demeure rentable, il ne faut pas que la solution impose de louer un nouveau camion, ce qui augmenterait les prix de manière trop conséquente.

Cette solution n'a finalement pas été développée par manque de ressources, et surtout par faute de trouver un nouvel endroit pouvant accueillir un tel système.

5.5 Conclusion

Plus que des recommandations visant à réduire la consommation énergétique, il est avant tout nécessaire de faire prendre conscience aux équipes de direction, mais aussi aux techniciens et aux artistes, les enjeux présents ici, par exemple en réalisant une campagne de sensibilisation pour tous les employés.

CONCLUSION

6.1 Rappel des objectifs de la méthodologie

Le projet global confié au Groupe t3e par le Cirque du Soleil (CDS) concernait l'analyse de la consommation énergétique et la suggestion de mesures quantifiées afin de diminuer celle-ci pour ses spectacles itinérants. Dans ce contexte, le projet de maîtrise dont fait l'objet ce mémoire concernait principalement deux solutions potentielles pour atteindre cet objectif global.

Il s'agissait de documenter la solution de stockage d'énergie comme mesure d'atténuation de la pointe de chauffage et de climatisation, et celle de brumisation pour atténuer la consommation et la pointe électrique en période de climatisation. Il fallait, pour ce faire, concevoir un système de mesures des transferts d'énergie thermique par mesures d'un nombre minimal de paramètres et modifier les séquences de mesures et de sauvegardes des données de consommations électriques des spectacles. Cela a résulté en une méthodologie adaptée d'une norme ASTM, pour évaluer les propriétés radiatives de la toile à partir de mesures de température. Les principales analyses effectuées concernaient tout d'abord les mesures de sobriété énergétique, puis d'efficacité énergétique, d'une implantation du spectacle Luzia à Montréal. L'analyse s'est alors concentrée sur l'impact de la variation des propriétés de la toile utilisée et sur celui de la brumisation d'un film d'eau sur la surface de la toile pour réduire la charge de climatisation. À cet égard, il a été requis de concevoir un système de brumisation et d'en valider expérimentalement la procédure et les impacts. Enfin, il a fallu intégrer ce travail et les différents autres qui ont été réalisés au cours du projet. Il a notamment fallu assister l'équipe du projet de fin d'études, qui a effectué un premier projet d'efficacité énergétique, et intégrer leurs conclusions au projet, mais aussi assister une stagiaire qui a effectué une analyse de déstratification de la tente des artistes et également intégrer ses conclusions. Le dernier objectif était d'assister Daniel Rousse lors de la préparation des trois rapports remis au CDS pendant la durée du projet.

6.2 Principaux résultats

Le tableau 6.1 présente un récapitulatif des solutions qui ont été proposées, ainsi que les économies potentielles engendrées, l'investissement nécessaire et la période de retour sur l'investissement (PRI) de la mesure envisagée.

Tableau 6.1 Conclusion sur la rentabilité des solutions proposées pour la diminution de la consommation d'énergie des spectacles itinérants du Cirque du soleil

Solution	Économie potentielle	Investissement	PRI
Sobriété énergétique	Toutes solutions confondues: environ 22 500 \$ à l'année	Investissement zéro	Instantané
Éclairage	20 200\$ par année	Investissement zéro	Instantané
Toile des tentes à haute réflectivité au rayonnement solaire	21 000 \$ en trois mois (à Toronto en été) si branché sur l'utilité publique 29 000 \$ lorsqu'alimenté par génératrices	On suppose que le CDS commande une nouvelle tente par nouveau spectacle annuel donc investissement nul	Instantané
Brumisation	5 850 \$ en 33 jours (à Montréal en été) si branché sur l'utilité publique	Estimé à 10 000\$ car système déjà en grande partie présent	<< 3 ans
Écrans solaires	2 100 \$ en 45 jours (en été) si branché sur l'utilité	90 000\$ et + Coûts récurrents en transport de 33 000\$/an	>> 20 ans
Déstratification	2 505 \$ pour un mois (à Montréal en été) branché à l'utilité seulement en chauffage	Ventilateurs de déstratification Estimés à 10 000\$	< 1 an
Panneaux PV	Plus de 2 \$ le kWh	Achat de panneaux, 40 000 \$	>> 15 ans

6.3 Recommandations

Finalement, les recommandations qui ont été proposées au Cirque du Soleil sont les suivantes :

- La première recommandation concerne l'implantation de mesures de sensibilisation à la sobriété énergétique. Quelles que soient les mesures d'efficacité énergétique proposées, s'il s'avère impossible de convaincre l'équipe du CDS d'aller de l'avant dans un programme de sensibilisation à la sobriété / responsabilité énergétique, toutes celles-ci ceci seront vaines. Plusieurs entreprises font réaliser étude après étude pour se faire indiquer, au terme d'une analyse telle que celle-ci, que les consommations énergétiques sont énormes et que les puissances en jeu sont titanesques pour une installation si grande soit-elle. Ensuite, rien, aucune mesure n'est finalement implantée. Pour arriver à changer sensiblement la facture énergétique d'une entreprise, d'une organisation, il faut obtenir l'engagement de toutes les parties, par exemple à l'aide d'une série de petits gestes concrets qui changent les paradigmes relatifs à l'énergie des employés. La sobriété énergétique est donc la clé du succès de l'implantation de ces mesures d'efficacité énergétique proposées. Il est important de noter qu'au terme du projet, un comité a été créé en ce sens au CDS, avec un nom appelant à la sobriété énergétique : PEACE, acronyme de Programme d'Efficacité et d'Amélioration Continue en Énergie. La nouvelle tente blanche et grise créée pour le spectacle Volta est une des premières actions prise par ce comité, et un premier vers la sobriété énergétique.
- La seconde recommandation a trait au choix d'un canevas de toile de tente qui se doit d'être le plus réfléchissant possible au rayonnement solaire, afin de réduire la charge de climatisation. Si l'on suppose un coût égal pour une toile possédant de telles propriétés, ce qui n'a malheureusement pas été possible de vérifier, le coût de cette initiative devient nul et la PRI est par conséquent instantanée, puisque le CDS créé une nouvelle toile chaque année, pour son nouveau spectacle.

- La troisième et dernière recommandation concerne les coûts d'éclairage qui peuvent être réduits en changeant de manière simple les habitudes des tournées, avec un investissement nul et donc une PRI instantanée.

D'autres mesures ont été proposées et analysées mais ne font pas partie directement de ce travail.

6.4 Remarques de clôture

La mission première du Cirque du Soleil ne concerne pas l'efficacité énergétique, mais bien de créer des spectacles attirant le plus possible de spectateurs. Ainsi, bien que l'équipe technique puisse élaborer une politique de développement durable qui incorpore des projets de réduction de la consommation d'énergie, l'équipe artistique domine lorsqu'il s'agit de faire les choix finaux. Sans être cynique, il suffit de vendre cinq billets de plus par représentation pour engendrer des recettes qui dépassent de loin la somme de toutes les économies réalisées par l'ensemble de mesures proposées.

Cependant, avec l'équipe technique du CDS, il a été possible d'initier un mouvement, qui à terme, permettra de réduire leur empreinte écologique.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR OMEGA EL-USB-2

OM-EL-USB-2 and OM-EL-USB-2-PLUS
CENTRALE DE MESURE DE TEMPERATURE et D'HUMIDITE RELATIVE
(INDICATEUR DE POINT DE ROSEE par le LOGICIEL WINDOWS)
Plage: -35 à 80°C (-31 à 176°F)
Résolution: 0.5°C (1°F)
Précision: OM-EL-USB-2: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1.0^{\circ}\text{F}$); OM-EL-USB-2-PLUS: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.6^{\circ}\text{F}$)

HUMIDITE
Plage: 0 à 100% RH
Résolution: 0.5% RH
Précision à 20% jusqu'à 80% RH: OM-EL-USB-2: $\pm 3.5\%$ RH; OM-EL-USB-2-PLUS: $\pm 2.0\%$ RH
POINT DE ROSEE
Précision: (Global d'erreur du point de rosée calculé pour les mesures RH de 40 à 100% RH @ 25°C): $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 4^{\circ}\text{F}$)

GENERAL
Mémoire: 16,000 valeurs de mesure de température et 16,000 valeurs de mesure d'humidité relative
Intervalle de Mesure: 10 secondes à 12 heures
Température d'opération: -35 à 80°C (-31 à 176°F)
Seuils d'Alarme: haut/bas pour % RH et température, sélectionnable par le logiciel
Démarrage: Date/l'heure sélectionnable par le logiciel
Témoins Indicateurs (LEDs): Rouge et vert
Logiciel: Windows 98/2000/XP/VISTA
Alimentation: 12 AA 3.6 V pile (lithium (inclus)
Durée de vie de la pile: 1 an typique (dépend du taux d'échantillon, de la température ambiante et de l'utilisation de l'alarme LED)
Poids: 57 g (2 oz)
Dimensions: Voir le plan dimensionnel



OM-EL-USB-2

28.4 (1.04)

103 (4.05)

Dimensions: mm (In)

Figure A-I-1 Fiche technique du capteur Omega EL-USB-2

ANNEXE II

RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE BRUMISATION POUR LE SPECTACLE KURIOS

Tableau A-II-1 Résultats des économies potentielles de brumisation pour le spectacle Kurios sans limite d'eau pour la brumisation

Spectacle	Ville	Sélection	Quantité d'eau (L)	Énergie sauvée (kWh _{th})	Économies (\$)
Kurios 2015	Seattle, WA	NON	/	/	/
Kurios 2015	Calgary, AB	NON	/	/	/
Kurios 2015	Denver, CO	OUI	135 637	103 595	5 920
Kurios 2015	Chicago, IL	OUI	186 635	142 545	8 145
Kurios 2015	Costa Mesa, CA	OUI	158 837	121 314	6 932
Kurios 2015	Los Angeles, CA	OUI	212 386	162 213	9 269
Kurios 2016	Atlanta, GA	OUI	323 725	247 250	14 129
Kurios 2016	Boston, MA	OUI	167 748	129 647	7 408
Kurios 2016	Washington, DC	OUI	197 264	150 663	8 609
Kurios 2016	New York, NY	NON	/	/	/
Kurios 2016	Miami, FL	OUI	204 241	155 992	8 914
Kurios 2017	Houston, TX	OUI	218 245	166 688	9 525

Total 2015		693 495	529 667	30 266
Total 2016		892 978	683 552	39 060
Total 2017		218 245	166 688	9 525
Total		1 804 718	1 379 907	78 578

ANNEXE III

NOUVELLE PROPOSITION DE PLAGES HORAIRES POUR LES LUMIERES

Tableau A-III-1 Nouvelles plages horaires d'utilisation des éclairages du CDS

Appareils	Puissance W	Nombre -	Puissance totale W	Durée h	Énergie journée kWh
Toilettes extérieures + sanitaires					
Néons sanitaire	64	12	768	24	18,432
Néons sanitaire nouvel horaire	64	12	768	8	6,144
Néons toilettes extérieures + handicapés	64	22	1408	24	33,792
Néons toilettes extérieures nouvel horaire	64	22	1408	8	11,264
Tunnels BigTop + Extérieur sol tentes					
Éclairages intérieures tunnel	20	18	360	24	8,64
Éclairages intérieures tunnel nouvel horaire	20	18	360	8	2,88
Éclairages entrée tunnels + cuisine	60	9	540	24	12,96
Éclairages entrée tunnels + cuisine nouvel horaire	60	9	540	8	4,32
Spots au sol autour des tentes	60	37	2220	14	31,08
Spots au sol autour des tentes nouvel horaire	60	37	2220	6	13,32
VIP					
Lampions couleurs VIP	60	13	780	16	12,48
Lampions couleurs VIP nouvel horaire	60	13	780	8	6,24
Spot éclairage couleur VIP + ext	60	9	540	24	12,96
Spot éclairage couleur VIP + ext nouvel horaire	60	9	540	8	4,32
Éclairage sol VIP + 1 couloir	20	13	260	24	6,24
Éclairage sol VIP nouvel horaire	20	13	260	10	2,6
Éclairages cuisine VIP	64	5	320	24	7,68
Éclairages cuisine VIP nouvel horaire	64	5	320	6	1,92
Éclairages toit VIP	360	4	1440	14	20,16
Éclairages toit VIP nouvel horaire	360	4	1440	8	11,52

Éclairages mâts VIP	360	4	1440	14	20,16
Éclairages mâts VIP nouvel horaire	360	4	1440	8	11,52
BigTop					
Spots mâts + coupole BigTop	360	18	6480	24	155,52
Spots mâts + coupole BigTop nouvel horaire	360	18	6480	14	90,72
Spots sous gradins	24	21	504	18	9,072
Spots sous gradins nouvel horaire	24	21	504	8	4,032
Éclairages toit BigTop	360	16	5760	14	80,64
Éclairages toit BigTop nouvel horaire	360	16	5760	10	57,6
FOH - Tente entrée					
Guirlande lumineuse FOH	5	535	2675	20	53,5
Guirlande lumineuse FOH nouvel horaire	5	535	2675	10	26,75
Petit spot couleur au sol FOH	20	3	60	24	1,44
Petit spot couleur au sol FOH nouvel horaire	20	3	60	10	0,6
Lampions couleurs FOH	60	6	360	24	8,64
Lampions couleurs FOH nouvel horaire	60	6	360	10	3,6
Écrans FOH	160	8	1280	20	25,6
Écrans FOH nouvel horaire	160	8	1280	10	12,8
Grand écran FOH	200	9	1800	24	43,2
Grand écran FOH nouvel horaire	200	9	1800	10	18
Ampoules stand vente FOH	5	56	280	24	6,72
Ampoules stand vente FOH nouvel horaire	5	56	280	10	2,8
Spots couleurs FOH	50	31	1550	24	37,2
Spots couleurs FOH nouvel horaire	50	31	1550	10	15,5
Éclairages mat FOH	360	8	2880	16	46,08
Éclairages mats FOH nouvel horaire	360	8	2880	8	23,04
Éclairages toit FOH	360	8	2880	24	69,12
Éclairages toit FOH nouvel horaire	360	8	2880	8	23,04
Tentes SHOP					
Éclairages SHOP spot	60	4	240	24	5,76
Éclairages SHOP spot nouvel horaire	60	4	240	14	3,36
Éclairage SHOP néons	64	16	1024	24	24,576
Éclairage SHOp néons nouvel horaire	64	16	1024	14	14,336
Artistique					

Gros spots mâts	360	8	2880	24	69,12
Gros spots mâts nouvel horaire	360	8	2880	12	34,56
Néons	64	8	512	24	12,288
Néons nouvel horaire	64	8	512	12	6,144
Petits spots éclairages	60	2	120	24	2,88
Petits spots éclairages nouvel horaire	60	2	120	12	1,44
Éclairages toit Art	360	6	2160	14	30,24
Éclairages toit Art nouvel horaire	360	6	2160	8	17,28
Bureaux					
Néons	64	18	1152	18	20,736
Néons nouvel horaire	64	18	1152	10	11,52

ANNEXE IV

ÉCONOMIES POTENTIELLES RELATIVES A LA NOUVELLE PLAGE D'UTILISATION DE L'ÉCLAIRAGE

Tableau A-IV-1 Économies potentielles dues à la réduction de l'utilisation de l'éclairage au
CDS

Appareil	Économies énergétiques (kWh)		Économies monétaires (\$)	
	1 jour	Spectacle	1 jour	Spectacle
Toilettes extérieures + sanitaires				
Néons sanitaire	12,288	552,96	1,47456	66,3552
Néons toilettes extérieures + handicapés	22,528	1013,76	2,70336	121,6512
Tunnels BigTop + Extérieur sol tentes				
Éclairages intérieures tunnel	5,76	259,2	0,6912	31,104
Éclairages entrée tunnels + cuisine	8,64	388,8	1,0368	46,656
Spot au sol autour des tentes	17,76	799,2	2,1312	95,904
VIP				
Lampions couleurs VIP	6,24	280,8	0,7488	33,696
Spot éclairage couleur VIP + ext	8,64	388,8	1,0368	46,656
Éclairage sol VIP + 1 couloir	3,64	163,8	0,4368	19,656
Éclairages cuisine VIP	5,76	259,2	0,6912	31,104
Éclairages toit VIP	8,64	388,8	1,0368	46,656
Éclairages mâts VIP	8,64	388,8	1,0368	46,656
BigTop				
Spots mâts + coupole BigTop	64,8	2916	7,776	349,92
Spots sous gradins	5,04	226,8	0,6048	27,216
Éclairages toit BigTop	23,04	1036,8	2,7648	124,416
FOH - Tente entrée				
Guirlande lumineuse FOH	26,75	1203,75	3,21	144,45
Petit spot couleur au sol FOH	0,84	37,8	0,1008	4,536
Lampions couleurs FOH	5,04	226,8	0,6048	27,216
Écrans FOH	12,8	576	1,536	69,12

Grands écrans FOH	25,2	1134	3,024	136,08
Ampoules stands vente FOH	3,92	176,4	0,4704	21,168
Spots couleurs FOH	21,7	976,5	2,604	117,18
Éclairages mat FOH	23,04	1036,8	2,7648	124,416
Éclairages toit FOH	46,08	2073,6	5,5296	248,832
Tentes SHOP				
Éclairages SHOP spot	2,4	108	0,288	12,96
Éclairage SHOP néons	10,24	460,8	1,2288	55,296
Artistique				
Gros spots mâts	34,56	1555,2	4,1472	186,624
Néons	6,144	276,48	0,73728	33,1776
Petits spots éclairages	1,44	64,8	0,1728	7,776
Éclairages toit Art	12,96	583,2	1,5552	69,984
Bureaux				
Néons	9,216	414,72	1,10592	49,7664
	1 jour	spectacle	1 jour	spectacle
TOTAL	443,746	19968,57	53,25	2 396,23

ANNEXE V

ARTICLE PUBLIÉ DANS LE COLLOQUE CIFQ 2017

CIFQ 2017 / ART-05-07

RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DES SPECTACLES ITINÉRANTS DU CIRQUE DU SOLEIL

Hugo **BERNARD**, Daniel **R. ROUSSE**

Groupe de recherche t3e, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada

RÉSUMÉ

L'augmentation incessante des besoins mondiaux et des coûts en énergie, l'augmentation importante des émissions de gaz à effet de serre rejetés lors de la combustion des hydrocarbures ou encore le réchauffement climatique ainsi provoqué ont amené le Cirque du Soleil à se poser de réelles questions d'éthique concernant son développement futur. Cet article technique présente les solutions qui ont été élaborées conjointement avec le Cirque du Soleil afin de diminuer la consommation énergétique de ses spectacles itinérants. L'éventail des solutions retenues passe par la sobriété énergétique et des technologies utilisant principalement les énergies renouvelables. L'article présente principalement deux des solutions retenues : l'utilisation d'une tente qui réfléchit davantage le rayonnement dans le spectre solaire, ce qui permet de réduire les flux nets de chaleurs passant à travers la toile, ainsi qu'un système de brumisation, destiné à compenser les apports énergétiques solaires grâce à l'évaporation de l'eau, lors de journées chaudes et ensoleillées. Les résultats montrent que ces mesures pourraient permettre au Cirque du Soleil d'économiser jusqu'à 40 000\$/spectacle itinérant (3 mois) en frais de climatisation seulement.

***Mots Clés :** Consommation énergétique, développement durable, émissions de GES, brumisation, rayonnement solaire.*

NOMENCLATURE

Symboles :

A surface de la toile, m^2

E énergie traversant la toile, kWh

G flux solaire, $W.m^{-2}$

h_{conv} coefficient de convection sur la toile, $W.m^{-2}.K^{-1}$

I intensité du courant des installations, A

P_{nette} puissance nette des installations, W

Q_i transfert thermique de la toile vers l'enceinte de la tente, W

Q_{abs} transfert thermique absorbé par la toile, W

T température, K

T_s température de surface, K

V voltage dans les installations, V

Lettres grecques :

α absorptivité de la toile, -

ε émissivité de la toile, -

φ facteur de puissance des installations, -

ρ réflectivité de la toile, -

σ constante de Stefan-Boltzmann, $5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

Indices / Exposants :

int intérieur

abs absorbé

e électrique

th thermique

1. INTRODUCTION

En analysant la consommation énergétique actuelle des spectacles itinérants du Cirque du Soleil (CDS) sur les différents sites à travers le monde, il est remarquable de constater que lors des représentations, il y a jusqu'à cinq génératrices (500 kW) qui peuvent être utilisées pour fournir de l'électricité aux différentes installations qui totalisent 6 000 m² de surface. L'appel

de puissance maximal peut dépasser 2,0 MW en conditions réelles de spectacles, pendant parfois plus de quatre heures, que ce soit lors de périodes de chauffage ou de climatisation. D'après les données de consommation électrique fournies par le CDS, la consommation d'énergie quotidienne résultante cela peut atteindre jusqu'à 20 000 kWh pour une journée ensoleillée à Tysons. La moitié de la charge totale est utilisée pour climatiser ou chauffer le « BigTop » (3 200m²), la tente où ont lieu les spectacles. Les charges les plus importantes se trouvent pendant les phases de climatisation puisque peu de villes, telles Montréal et Moscou, requièrent un intense chauffage des installations. Ainsi, il est nécessaire d'implanter des solutions permettant de diminuer la charge de climatisation.

Plusieurs suggestions ont été effectuées et plusieurs de celles-ci ont été retenues par la direction du CDS pour diminuer tant la facture de chauffage que de climatisation ou d'opération des appareils électriques et de l'éclairage : elles ne font pas l'objet de cet article.

La première solution présentée ici concerne l'utilisation d'une toile de tente aux propriétés radiatives spécifiques, diminuant la quantité de chaleur transmise à l'intérieur des installations, sans égards aux équipements de CVCA (Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'Air). Cette courte analyse s'effectue par plusieurs méthodes, à partir des relevés réalisés sur les sites de spectacles et de mesures de propriétés. La deuxième solution développée utilise de l'eau comme moyen pour contrer le rayonnement solaire, et ainsi diminuer la charge de climatisation, mais aussi réduire la consommation d'eau indirecte du CDS lorsque ses spectacles sont alimentés par des génératrices.

2. PROPRIÉTÉS RADIATIVES DE LA TOILE DE LA TENTE

Dans le texte qui suit, il est nécessaire de préciser que le mot « couleur » fait ici référence aux propriétés radiatives de la toile qui lui sont propres. Par exemple, une toile « blanche » possèdera des propriétés intrinsèques qui feront qu'elle réfléchit le rayonnement solaire davantage qu'une autre toile. Cette terminologie a été rendue nécessaire pour faire comprendre à l'équipe de direction du CDS, la relation entre les propriétés radiatives et la « couleur » de la toile. La couleur de tente la plus ancienne, et qui est notamment devenue la marque de fabrique du CDS, est le bleu (62%), agrémentée de rayures et de motifs jaunes (38%). Plus récemment,

la tournée du spectacle Luzia, qui a débuté à Montréal en avril 2016, utilise une toile à dominante blanche (89%) associée encore une fois à des motifs jaunes (11%). Le but de cette partie est de présenter une comparaison radiative entre les différents canevas de toile qui peuvent être utilisés, et leur impact sur la charge de climatisation du CDS. La première approche analyse l'impact de la « couleur » sur les flux de chaleurs passant à travers la toile, et la seconde sur l'utilisation des appareils de CVCA.

2.1. Climatisation et température d'équilibre de surface de la toile

Cette partie présente l'analyse simplifiée des flux nets de chaleurs transmis de la toile vers l'intérieur de la tente présentée à l'équipe du CDS de manière à leur démontrer l'importance d'implanter une mesure simple et passive, qui permet de réduire significativement la consommation en climatisation sans impact sur les processus internes ou les équipements ce CVCA en place.

Les données fournies par le manufacturier sont incomplètes et des mesures en laboratoire n'ont pas été possibles afin de déterminer les propriétés des toiles. Qui plus est, il existe des différences notables entre le fini de surface d'une toile neuve et d'une toile en cours d'utilisation. En raison de la très grande surface en jeu, près de 6 000 m² au total, il est puéril d'employer une donnée théorique pour les propriétés : absorptivité, émissivité et réflectivité

La méthode « terrain » proposée part de la mesure de températures d'équilibre de la toile de la tente, à l'aide d'une caméra thermique, d'un thermocouple protégé du rayonnement solaire et de bandes dont les propriétés optiques sont connues.

L'objectif ici consiste à obtenir la quantité de chaleur transmise à l'intérieur en fonction de la « couleur » du canevas utilisé. Trois canevas, d'une surface $A = 3200 \text{ m}^2$, sont ici considérées : 1-blanc, 2-jaune, 3-bleu, possédant des températures de surface T_{si} , respectivement : $T_{s1} = 40^\circ\text{C}$ (313 K), $T_{s2} = 50^\circ\text{C}$ (323 K) et $T_{s3} = 65^\circ\text{C}$ (338 K). Ces températures sont les températures maximales pondérées sur la surface qui ont été relevées pendant des journées ensoleillées et proviennent d'acquisition réalisées avec la caméra thermique calibrée, pendant le spectacle Luzia à Montréal. Pour quantifier la quantité de chaleur transmise de la toile à l'enceinte de la tente Q_i , deux transferts thermiques seront pris en compte dans le bilan radiatif net suivant [1] :

$$Q_i = A \times (\varepsilon \times \sigma \times T_{s_i}^4 + h_{conv} \times (T_{s_i} - T_{int})) \quad (1)$$

où $\varepsilon = 0,9$, $h_{conv} = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, et $T_{int} = 24^\circ\text{C}$.

Les autres taux de transfert étant similaires pour les trois cas, seuls le phénomène de convection et le phénomène d'émission de chaleur, influencent la différence de consommation d'énergie requise pour climatiser à 24°C .

L'équation 1 montre que pour chaque 1°C d'accroissement de température de surface, il y a une énergie sous forme de chaleur d'environ 51 kWhth supplémentaire qui traverse la toile pendant une heure complète d'ensoleillement. En termes d'économies financière, comme cette énergie doit être évacuée par climatisation, avec un COP de 2,8 et un coût de 0,16 \$/kWh (coût marginal fournit par le client), cette énergie représente environ 2,91 \$/h/°C d'économies. En considérant l'écart de température entre la toile blanche et la toile bleue, qui est de 25°C , ce sont 10 200 kWhth, soit 582 \$, d'économies en charge de climatisation qui sont réalisés par jour, grâce à l'utilisation de la tente blanche. Finalement, puisque la durée d'un spectacle atteint trois mois, les données d'ensoleillement de la mi-juin à la mi-septembre pour Montréal et Toronto (Météonorm), les économies calculées en utilisant la tente blanche plutôt que la bleue s'élèvent à environ 703 800 kWhth ou 251 357 kWh soit 40 217\$. Globalement, la tente blanche permet de diminuer la charge de climatisation d'environ 700 MWhth soit 40 000 \$ sur une période de 91 jours en été. Extrapolé aux quelques 23 à 37 spectacles en simultanée dans le monde, les économies pour cette mesure passive d'économie d'énergie s'avèrent considérables.

2.2. Climatisation et réflectivité de la toile

Puisque le client ne désirait pas payer pour obtenir des valeurs précises des propriétés radiatives des toiles, un appariement a été effectué à l'aide des mesures de champ décrites précédemment et les couleurs des canevas de toile de tentes employés par le CDS. Il s'agissait ici de démontrer à l'équipe du CDS l'impact de la couleur du canevas sur le flux net de chaleur pouvant passer à travers la toile. Dans ce calcul, la transmissivité et l'absorptivité sont considérés comme étant responsables du taux de transfert net qui traverse la toile de l'enceinte

avec, pour la longueur d'onde d'émission type λ correspondant à celle du rayonnement solaire (37% de rayonnement solaire est compris entre 0,4 à 0,7 μm), l'équation 3 qui lie les trois valeurs [2].

$$\tau_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (2)$$

Le tableau 1 présente les différences d'économies concernant la charge de climatisation qui sont réalisables en fonction de la couleur de toile utilisée par rapport à une toile blanche, selon le flux solaire reçu. Les hypothèses impliquent que tous les autres paramètres sont égaux, incluant la température de surface (l'indice λ est éliminé des représentations mathématiques ultérieures). Dans la terminologie employée pour présenter les résultats au CDS, plus la surface de la tente approche d'une couleur claire, comme pour la toile blanche, plus sa réflectivité est élevée. La réflectivité annoncée de la toile blanche par le fabricant est de 0,78, ici on utilise 0,90 en spécifiant au CDS que c'est cette valeur qu'il devrait spécifier dans le devis pour les nouvelles toiles. A l'inverse, plus une toile est foncée, plus sa réflectivité est faible, la toile bleue possède donc ici la réflectivité la plus faible, à savoir 0,5. Dans cette analyse, quatre toiles sont proposées : une 4^e s'est ajoutée aux trois précédentes en cours d'analyse puisque le fabricant de toile fabrique un nouvel assortiment de tentes pour les tournées 2017 avec une proportion de 50% de blanc et 50% de gris. Sans donnée aucune sur la réflectivité « effective » de la nouvelle toile grise il faut supposer celle-ci (0,65).

Plusieurs flux solaires ou irradiances G sont également utilisés. Le but consiste alors à observer les variations du taux de transfert Q_{abs} absorbé et traversant la toile en provenance du soleil, avant d'être refroidi par le système de climatisation, qui s'exprime, lorsque le canevas employé est opaque ($\epsilon=0$), tel que [2] :

$$Q_{abs} = \alpha \times A \times G = (1 - \rho) \times A \times G \quad (3)$$

De là, il est possible de connaître la puissance absorbée en kW pour la surface A étudiée de 3200 m^2 , puis l'énergie totale passant à travers la toile pendant une journée ensoleillée de huit heures.

$$E_{\text{journée}} = \frac{A \times Q_{\text{abs}} \times Nb_{\text{heures}}}{1000} \quad (4)$$

Finalement, le coût journalier est obtenu en considérant un prix au kWh moyen de 0,16 \$/kWh et le COP (Coefficient de Performance) du système de climatisation du CDS, qui est de 2,8.

$$Eco_{\text{journée}} = \frac{E_{\text{journée}} \times Coût_{kWh}}{COP} \quad (5)$$

Tableau 1 : Économies énergétiques et monétaires en fonction de la réflectivité de la toile

Flux solaire G (W/m ²)	Réflectivité ρ (-)	Energie par jour		Coût par jour	
		Ejournalée (kWhth/jr)	Ecojournalée (\$/jr)	Différence (\$/jr)	
600	0,9	1440	82,28	0	
600	0,8	2880	164,57	82,29	
600	0,65	5040	288,00	205,72	
600	0,5	7200	411,43	329,15	
900	0,9	2160	123,43	0	
900	0,8	4320	246,86	123,43	
900	0,65	7560	432,00	308,57	
900	0,5	10800	617,14	493,71	
1200	0,9	2880	164,57	0	
1200	0,8	5760	329,15	164,58	
1200	0,65	10080	576,00	411,43	
1200	0,5	14400	822,86	658,29	

Ces résultats indiquent que la différence entre les besoins journaliers en climatisation est importante entre les différents canevas de toile. Logiquement, la toile « blanche » est celle qui absorbe le moins de chaleur, 2 160 kWhth/jour pour un flux solaire de 900 W/m² ;

contrairement à la toile bleue qui absorbe le plus d'énergie, 10 800 kWhth/jour pour le même flux solaire.

Comparer avec le modèle précédent, sur une période de 91 jours, en supposant les données d'ensoleillement de la mi-juin à la mi-septembre pour Montréal et Toronto (Météonorm), permet d'avoir un point de vue plus global. Ainsi, en comparant pour cette période, l'utilisation de la tente avec toile entièrement bleue nécessite une consommation de 662 400 kWhth en charge de climatisation, ce qui représente 236 571 kWh soit 37 581 \$ de frais supplémentaires en seulement trois mois, par rapport à l'utilisation d'une tente blanche. Ce résultat conforte le précédent et confirme que les hypothèses de calcul employées sont assez réalistes.

Il faut cependant nuancer le propos en précisant que les données météo moyennées sur plusieurs années ne sont pas nécessairement caractéristiques d'une année particulière récente, notamment en raison des changements climatiques qui induisent de nouveaux records depuis cinq ans.

2.3. Climatisation et données de fonctionnement

Lors de l'utilisation de la tente « blanche » sur le spectacle de Luzia à Montréal en juin 2016, il a été remarqué qu'il n'était plus nécessaire d'utiliser autant la ventilation et la climatisation pendant les spectacles que lors des tournées avec les chapiteaux bleu et jaune. Cette constatation a permis à l'équipe de design de proposer une troisième voie d'analyse des réductions du coût pour l'énergie consommée par les climatiseurs. Un travail de collecte de données de consommation, d'extrapolation et d'interpolation de celles-ci et d'ajustement en fonction des relevés climatiques pour 2015 et 2016 pour des périodes correspondantes, a permis de dresser un portrait de consommation énergétique pour la tente blanche et pour la tente bleue et jaune (la tente classique).

Après une analyse exhaustive des données recueillies et utilisables sur des intervalles variant de 5 minutes à plusieurs jours, il s'avère que les CVCA sont capables de fonctionner à 48% de leur utilisation maximale pendant les spectacles, grâce à la tente blanche, contre 83% habituellement avec une tente bleue et jaune dans les mêmes conditions climatiques. Cette analyse de la consommation des systèmes CVCA du CDS a donc été menée dans le but de connaître les économies qui sont réalisées pendant toute la durée d'un spectacle. Dans un

premier temps, il a été nécessaire d'identifier les disjoncteurs qui sont reliés aux CVCA, car ce ne sont jamais les mêmes, dépendamment des tournées. Sept CVCA sont utilisés en permanence pour assurer la climatisation des tentes. Finalement, en connaissant le courant I passant dans les disjoncteurs, il est possible de connaître la puissance nette utilisée par le disjoncteur équation (7) :

$$P_{nette} = \sqrt{3} \times I \times V \times \cos(\varphi) \quad (6)$$

Finalement, en calculant la moyenne des puissances nettes sur l'heure, c'est l'énergie consommée en kWh pour les CVCA qui est obtenue. L'analyse est ici réalisée pour le spectacle Luzia à Toronto. Cependant, en raison d'un problème d'acquisition de données chez le client, seulement 85 journées sur quatre mois (de juin à septembre) ont produit suffisamment de données enregistrées et utilisables pour être étudiées. L'analyse présente les économies qui ont été réalisées par rapport à la tente bleue et jaune, qui aurait fait fonctionner les CVCA à 80%. Le tableau suivant résume les économies obtenues, soit en se branchant à l'utilité de la ville, soit en utilisant les génératrices.

Tableau 2 : Économies réalisées grâce à l'utilisation de la tente blanche sur le spectacle Luzia à Toronto

	UTILITÉ	GÉNÉRATRICES
kWhe tente blanche (48%)	335 103	
kWhe tente bleue et jaune (83%)	536 165	
Différence (kWhe)	201 062	
Prix de référence (\$/kWh)	0,16	0,22
Économies sur le spectacle (\$)	32 170	44 234
Économies par jour (\$)	378	520

Puisqu'à Toronto, le CDS était branché à l'utilité, la consommation des CVCA avec la tente blanche est de 335 103 kWhe, contre 536 165 kWhe si la tente jaune et bleue avait été utilisée. Ce sont donc 201 062 kWhe qui ont pu être économisés grâce au canevas blanc en 85 jours. Lorsque l'on extrapole avec une réflectivité moyenne pondérée de 0,62 (0,5x60% + 0,8x40%)

pour la tente bicolore par rapport à celle d'une tente entièrement bleue ($\varepsilon=0,5$), les économies s'élèveraient à 287 231 kWh. Ces résultats sont du même ordre de grandeur que pour les deux premières analyses puisque le COP de conversion est de 2,8 (804 247 kWhth).

En revanche, il est important de préciser qu'il est rare de pouvoir se brancher au réseau électrique de la ville. C'est pour cela que les économies qui auraient été réalisées, si le CDS avait utilisé des génératrices, sont également présentées. Les économies sont plus importantes, car le prix au kWh en utilisant le diesel est plus élevé. Ainsi, comme utiliser la tente blanche permet de diminuer la consommation, et donc l'utilisation des génératrices, cela permet également de diminuer les émissions de CO₂. En réalisant une analyse à partir des génératrices sur le spectacle de Toronto, même si ce spectacle était branché à l'utilité, il est possible de connaître la quantité de CO₂ qui aurait été rejetée en moins. En effet, pour 1 litre de diesel fourni, ce sont 3,25 kWh qui sont récupérés par les génératrices, et la consommation de 1 litre de diesel provoque le rejet de 2,79 kgCO₂eq [3]. L'équation (8) permet de relier la diminution des rejets de CO₂ (en tonnes) aux économies énergétiques :

$$\text{RejetsCO}_2 = \frac{\text{ÉnergieÉco} \times 2,79}{3,25 \times 1000} \quad (7)$$

Dans le cas du spectacle à Toronto, la tente blanche a permis d'économiser 201 062 kWh sur 85 jours. Avec des génératrices, cette économie de charge de climatisation aurait permis d'éviter le rejet de 172,6 tonnes de CO₂eq.

3. CLIMATISATION PAR BRUMISATION

3.1. Principe et implantation

Parmi la panoplie de solutions envisagées pour réduire la consommation énergétique du CDS, une option basée sur la brumisation a été développée et analysée. Appliqué aux installations du CDS, ce procédé permet de refroidir la surface externe de la toile du BigTop en période de spectacle grâce à l'enthalpie d'évaporation de l'eau. La chaleur absorbée lors du processus d'évaporation de l'eau réduit ainsi la charge dédiée à la climatisation des tentes.

Cependant, il existe quelques restrictions face à cette solution. Premièrement, un système de purification d'eau est nécessaire pour ne pas abîmer la toile et laisser des traces de calcaire

lors de l'évaporation de l'eau. Pour cela deux options sont possibles : installer un système d'osmose inverse qui permet de filtrer des particules ou favoriser la précipitation des ions Ca^{2+} par magnétisme [4]. La deuxième restriction imposée par le CDS est de ne pas provoquer de ruissellement d'eau liquide le long de la toile, pour ne pas créer de rigoles d'eau qui pourraient atteindre le sol. C'est-à-dire qu'il faut que l'eau utilisée soit entièrement évaporée avant d'atteindre les bords du chapiteau. L'implantation d'un système de brumisation demeure toutefois possible, puisque le système de raccordement d'eau et les pompes sont déjà présents pour le nettoyage des tentes.

Conceptuellement, il faut aussi que l'impact sur la consommation d'eau soit positif. Il faut 20L d'eau pour économiser 1L de diesel. Toutefois, il faut 90L d'eau pour extraire, transporter et raffiner ce même litre de diesel [3]. Cette solution permet ainsi des économies d'eau lorsque l'énergie provient du diesel.

3.2. Analyse et résultats économiques

Pour mettre en place les équations thermiques pour déterminer un bilan, il a d'abord été nécessaire d'obtenir certaines données et certains paramètres. Les émissivités interne et externe des toiles ont ainsi été déterminées par des tests expérimentaux permettant d'obtenir des valeurs approchées [5]. Les valeurs pour l'émissivité, quel que soit le côté, ont été mesurées à l'aide de la procédure décrite dans la norme ASTM E1918-16 [6] : $\epsilon=0,9$. Dans un second temps, il fut nécessaire de spécifier les données météorologiques du site où a lieu le spectacle étudié. Les données concernant l'irradiation solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et celle du ciel ont ainsi été obtenues grâce à la banque de données météorologiques EnergyPlus [7]. Des années typiques suivant le lieu sont proposées, et les données ont ensuite été exploitées via le logiciel TRNSYS pour ne sélectionner que celles correspondant aux spectacles.

La première étape de l'analyse consiste à sélectionner les différents sites de spectacles et les profils de la température moyenne aux dates concernées. Une fois cette sélection réalisée, les données sont utilisées dans un code de calcul Python afin de réaliser le bilan thermique. En premier lieu, un bilan thermique est établi sur la surface de la toile de tente, dans le but de déterminer sa température d'équilibre. Seuls les phénomènes de radiation et de convection, internes et externes, agissant sur la toile sont pris en compte dans ce bilan. Comme les données

météorologiques proposées sont horaires, les boucles sur Python permettent d'obtenir la variation horaire de la température de surface (Figure 1).

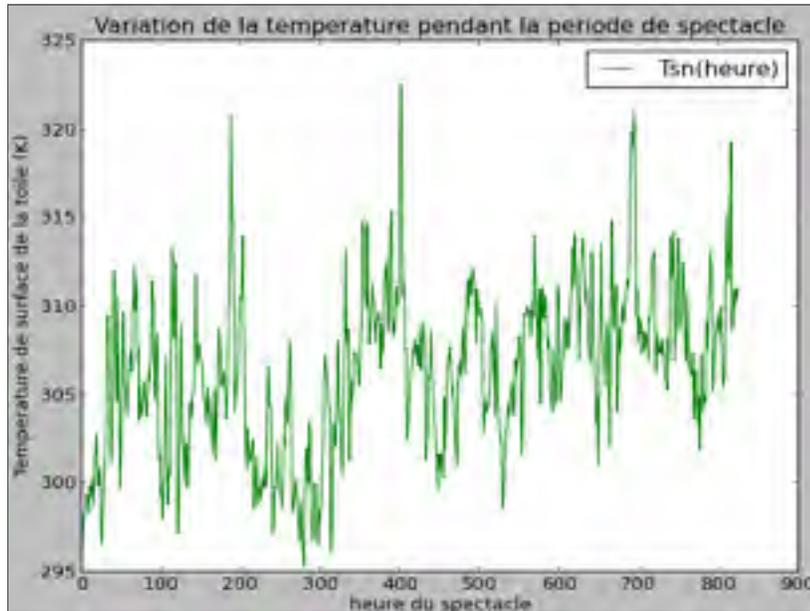


Figure 1 : Variation de la température de surface de la toile pendant 33 jours de tournée de Montréal

A partir de cela, les différents transferts thermiques peuvent être établis. Les phénomènes radiatifs, provenant du soleil, de l'environnement (ciel) et du sol, ainsi que les phénomènes de convection (interne et externe) et d'émissivité, vers l'intérieur et l'extérieur, sont pris en compte. Les flux de chaleur émis par les spectateurs et les appareils électriques sont également pris en considération. Le bilan thermique permet finalement d'obtenir le taux de transfert thermique final Q_{abs} qui traverse la toile et qui va réchauffer l'enceinte de la tente. C'est cette chaleur qui doit être absorbée par l'évaporation de l'eau sur la toile. Partant de ce taux de transfert, il est finalement possible de connaître la masse d'eau horaire qu'il est nécessaire d'utiliser pour absorber toute la chaleur, heure par heure [8] :

$$m_{eau} = \frac{Q_{abs}}{L_{vap} + C_{p,eau} \times \Delta T} \times 3600 \quad (8)$$

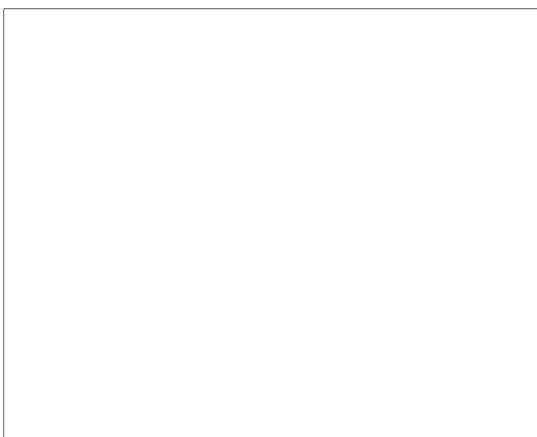
Pour le spectacle de Montréal, le CDS a fixé à 2000 litres la quantité d'eau limite utilisable pour la brumisation. Les résultats sont présentés au tableau 3.

Tableau 3 : Résultats de l'analyse de brumisation

	Avec limite d'eau	Sans limite d'eau
Quantité d'eau utilisée (en litres ou kg)	56 818	134 101
Énergie économisée (en kWh _{th})	43 396	102 421
Économies (en \$)	2 480	5 853
CO2 rejeté en moins (en tonnes)	13	31

Les économies présentées ici sont obtenues sur 33 jours, du 4 mai au 7 juin. La charge de climatisation est réduite de plus d'1 MWh_{th}/j.

Ces résultats mettent en évidence les impacts de cette solution sur la consommation, ce qui a mené le CDS à financer une série de tests sur une des toiles d'un chapiteau. Ces tests visaient uniquement à démontrer la diminution de la température de surface de la toile suite à la brumisation : il s'agissait d'effectuer une démonstration qualitative. Ces tests démontrent (Figure 2) que la température d'équilibre d'une toile bleue peut atteindre 65°C. La brumisation permet d'abaisser la température d'équilibre à environ 35°C, en 3 minutes (Figure 2).



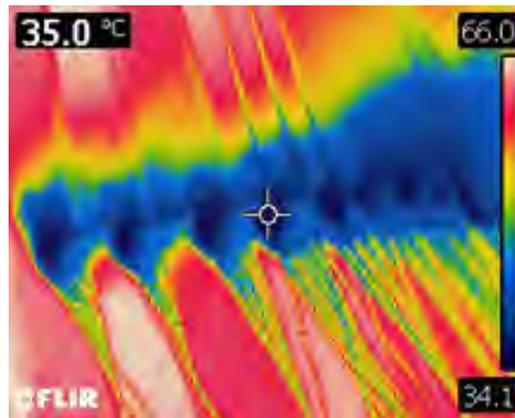


Figure 2 : Tests de brumisation sur une tente bleue

Finalement, l'étude concernant la brumisation démontre que cette solution est implantable, et qu'elle permettrait d'obtenir des économies intéressantes pour le CDS, en diminuant la charge de climatisation nécessaire, mais également en diminuant les rejets de CO₂.

4. CONCLUSION

Le projet global a permis de développer différentes solutions qui pourraient permettre de réduire la charge de climatisation et de chauffage du Cirque du Soleil et leurs émissions de gaz à effet de serre : cet article en présente deux. L'utilisation d'une toile à haute réflectivité au rayonnement solaire comme solution d'efficacité énergétique a été retenue par le CDS puisqu'elle permettrait de réaliser des économies de climatisation de l'ordre de 30 000 à 40 000 \$ pour un spectacle de 3 mois se déroulant sur une période estivale, ce qui permettrait également de réduire d'un peu plus de 100 tonnes les rejets en CO₂.

La brumisation constitue une solution que le CDS n'a pas désiré retenir et mettre en place, car les économies énergétiques et monétaires étaient trop faibles comparées aux moyens nécessaires pour mettre en place ce système. Finalement, les actions retenues par le CDS et qui seront mises en place résident principalement dans la sobriété énergétique qui vise à consommer moins pour un même résultat, par exemple en utilisant moins les éclairages, et dans l'efficacité énergétique, ici avec l'utilisation des tentes blanches.

REMERCIEMENTS

Le premier auteur souhaite remercier l'encadrant du projet M. Daniel R. Rousse, ainsi que Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, qui a également participé à l'encadrement. L'équipe du Cirque du Soleil, MM. Giguère et Michaud, ont également été d'une grande aide pour réaliser ce projet. Le groupe t3e souhaite remercier M. Michel Trottier pour son soutien exceptionnel.

RÉFÉRENCES

- [1] DUFFIE, J.A., & BECKMAN, W.A., Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, 936p., (2013).
- [2] KALOGIROU, S.A., Solar energy engineering: processes and systems, Academic Press., 840p., (2013).
- [3] ROUSSE, D. R., Conception d'un système de production et de stockage d'énergie – rapport final., 318p. (2016).
- [4] POWELL, M.R., Magnetic water and fuel treatment: myth, magic or mainstream science ?, Skeptical inquirer volume 22.1., (1998).
- [5] BANERJEE, D. et al., Infrared thermography in material research – A review of textile application, IJF&TR, (38) 427-437, (2013)
- [6] ASTM E1918-16, Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, (2016)
- [7] <https://energyplus.net/weather>, consulté 2016-02-28
- [8] BERGMAN, T.L., INCROPERA, F.P, DEWITT, D.P., & LAVINE, A.S., Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons., 1048p., (2011).

ANNEXE VI

ARTICLE PRÉPARÉ POUR LA REVUE APPLIED THERMAL ENGINEERING

Greenhouse gases and energy consumption
reductions
in large high-tenacity flexible
composite materials-based enclosures

Hugo Bernard^a and Daniel R. Rousse^{*b}

*corresponding author

^a Industrial Research Group in Energy Technologies and Energy Efficiency (t3e),
École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada
1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal (Québec), Canada, H3C 1K3
514 396-8800 # 7503

ENSAM-ParisTech
75013 Paris, France
hugo@t3e.info

^b Industrial Research Group in Energy Technologies and Energy Efficiency (t3e),
École de technologie supérieure, Université du Québec, Montréal, Canada
1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal (Québec), Canada, H3C 1K3
daniel@t3e.info

ABSTRACT

The relentless increase in its global energy needs, energy costs, greenhouse gas emissions from the combustion of hydrocarbons, and the resulting global warming encouraged *Cirque du Soleil* to address ethical issues concerning its future development. This technical article presents solutions that were developed jointly with *Cirque du Soleil* in order to reduce the energy consumption of its touring shows. The range of solutions chosen involves energy efficiency and technologies using mainly renewable energies. This article presents two solutions: the use of a high-reflectivity canvas for the tents that mostly reflects radiation in the solar spectrum so as to reduce the net heat fluxes passing through it; and a misting system that contributes to absorb the solar energy incoming flux due to the evaporation of water during hot and sunny days. The complete installations involve four tents covering a surface of more than 6,000 m². The results show that these measures can enable *Cirque du Soleil* to save up to 20,000 dollars per touring show (three months) in air conditioning costs alone. Several suggestions concerning energy sobriety are also presented, such as reducing lightings which can save up to 20,200 dollars each year.

Keywords: Energy consumption, sustainable development, greenhouse gas emissions, misting, solar radiation, energy sobriety

NOMENCLATURE

Symbols	
A	Canvas area, [m ²]
E	Energy passing through the canvas, [kWh]
E _{eco}	Energy saved, [kWh]
G	Solar flux or irradiance, [W/m ²]
h	Convection coefficient, [W/m ² K]
I	Facilities current, [A]
L _{vap}	Latent heat of vaporization, [J/kg]
m	Amount of material used, [kg]
mCO ₂	Amount of CO ₂ emissions, [tons]
Nb _{hours}	Number of hours considered, [hours]
Q	Heat energy exchanged [kWh]
T	Temperature, [K]
V	Tension, [V]
\$	Costs / Economical savings, [\$]
c _p	Specific heat at constant pressure, [J/kg K]
Greek symbols	
α	Canvas absorptivity, [-]
ΔT	Temperature variation, [K]
ε	Emissivity, [-]
φ	Facilities power factor, [-]
λ	Referring to the emissivity wavelength
ρ	Canvas reflectivity, [-]
σ	Stefan-Boltzmann constant [W/m ² .K ⁴]
Subscripts and superscript	
abs	Absorbed
cond	Conduction heat transfer
day	For a day, daily
elec	Electrical / For the electricity
in/out	Inlet / Outlet or Inside / Outside
i	Iteration
s	Referring to the surface
tent	Referring to the tent
water	Referring to the water
Abbreviations	
COP	Coefficient of performance

1. INTRODUCTION

1.1 Context

The relentless increase in its global energy needs, energy costs, greenhouse gas emissions from the combustion of hydrocarbons, and the resulting global warming encouraged Cirque du Soleil to address ethical issues concerning its future development. In analysing the current energy consumption of Cirque du Soleil's touring shows at several venues around the world, it is important to note that during performances there are up to five diesel-based generators (500 kW each) that can be used to supply electricity to the various installations. The maximum power demand can exceed 2 MW during daily performances that may last for more than four hours, whether for periods of heating or cooling. For instance, according to the power consumption data provided by the Cirque du Soleil, the resulting daily energy consumption can reach up to 20,000 kWh on a sunny day in Tysons, Virginia, USA [1]. Half of the total load is used to cool or heat the largest facility thereafter called "Big-Top" (3,200 m²), which is the tent where the shows are taking place. For most of the shows, the load can be attributed to the air conditioning, as few cities, such as Montreal and Moscow, require intense heating of the installations. Thus, it is necessary to implement solutions that contribute to reduce the air conditioning load.

The investigated typical show site involves four enclosures made of flexible membranes dedicated to: (1) shows (2) artist's practices and recreational area (3) public entrance and (4) services. The overall surface of the fabric for the four enclosures is 6,150 m² - with the "Big-Top" involving 3,200 m² by itself. The flexible fabric involves high-tenacity polyester micro-yarn base cloth that is coated, while the under warp and weft are under tension throughout the manufacturing cycle, with a high-performance polymer hybrid PVC/silicone coating surface layer. This fabric requires exceptional dimensional stability, long-term strength, greater coating thickness at the top of the yarns to allow high tensions and relatively low weight as the enclosures (that may be called tents) have to be packed into containers after each show (every one to three months).

1.2 Scope

In 2016, several recommendations have been made in order to reduce both the heating and air conditioning bills as well as the cost of operating electrical appliances and lighting [1]. Some of these recommendations have already been implemented by the management of Cirque du Soleil. This article however is not concerned with all these ideas. Here, the genuinely interesting solutions with the highest impact (except for energy sobriety) and most scientific background are discussed: the impact of high reflectivity fabrics and that of a misting system (evaporative cooling) to lower the heating load on hot sunny days.

1.3 Content

This paper is organized in five more sections. The second section is a short explanation regarding the measurements of temperatures and other relevant thermophysical parameters and consumption. Thereafter, the article goes on to discuss the different solutions that have been accepted for development. Section three presents the first solution that relates to the use of a tent fabric with specific radiative properties that reduce the amount of heat transmitted inside the installations, without taking the heating, ventilation and conditioning of air (HVAC) equipment into consideration. The fourth section presents the evaporative cooling or misting solution, which uses water as a means to counter the warming effect of solar radiation thus, reducing the air conditioning load as well as decreasing the indirect water consumption of *Cirque du Soleil* when its shows are powered by generators. The fifth section presents the conclusion and a short list of suggestions concerning energy sobriety.

2. MEASUREMENTS TECHNIQUES

2.1 Electric consumption

Energy related concerns are relatively new at Cirque du Soleil. Hence, one of the first challenges was the significant lack of data and records that could be exploited. This lack of readings first greatly compromised the analysis since it was often impossible to base actual calculations on actual operating values. As a result, the first task had to do with standard measurements of current, power, and energy [2], [3], [4]. This enabled the authors to create a complete database on which to base the analysis of the relevance of the solutions. In addition, this data bank and methodology now serves as a basis to create historical records, as well as trends on energy consumption for future tours based on previous tours.

2.2 Estimation of the canvas emissivity

To realize a first global heat balance on the enclosure, it is necessary to determine the emissivity of the canvas, both for the internal and external sides. To achieve this, several experimental tests are set up. The principle of the first protocol rests in the use of a black tape for which emissivity is already known at 0.95. The tape is stuck to the surface of the tent, whose emissivity is unknown. After a short while, the adhesive strip locally acquires by conduction the same equilibrium temperature as the canvas tested. This manipulation can be carried out inside or outside the tent. However, in order for the tape to acquire the same temperature as the tent without being affected by the radiative transfer, it is important to ensure that experiment is performed on the side that is not exposed to the sun. Using the thermal camera set to the known value of the tent emissivity, a measurement of the canvas surface temperature is carried out. Thereafter, it is sufficient to aim the camera on the tested canvas, to measure its temperature and to adjust the emissivity value of the thermal camera in order to make the two temperatures coincide. Once these two net fluxes are balanced, the approximated value of the canvas emissivity is the one that has been set in the settings of the last measurement acquired with the camera. Irrespective of the colour of the tent, all results show an emissivity value approaching 0.96, even for the inside of the tent. This value is above the ones proposed in the databases of classic books concerning solar radiation [5], [6]. However, this test is partly biased due to several external factors such as canvas folds, the sun's reflection, ultra violet radiations, dust, dirt and even humidity that can cause the variation of the canvas emissivity. Under the assumption that the canvas behaves like a grey body, the absorptivity coefficient to the low temperature radiation is directly deduced from the emissivity. Besides, considering an opaque canvas to the low temperature radiation, which is actually effective, the reflectivity to the low temperature radiation is obtained using equation 2 proposed in section three of this article.

In order to validate and refine the results acquired through the first protocol for the emissivity, a second protocol has been set up. This latter is inspired from the procedure described in the ASTM E1918-16 standard, and gives the possibility to obtain approached values for the emissivity of the different canvases analysed (American Society for Testing and Materials, ASTM, 2016) [7]. The canvas samples were ultimately tested in a dark room, in a laboratory of the *École de Technologie Supérieure de Montréal*, in order to avoid any external lighting. This protocol still consists in making the temperature value given by a thermistor coincide with the temperature value given by the thermal camera, by varying the assumed emissivity value. Various kinds of tent samples have been made available by *Cirque du Soleil*, in particular the two main canvases currently used: the "classic" blue and yellow canvas with an internal blue side that is used in almost every tour; and the white with yellow stripes which is also blue on the inside, used for the show *Luzia* in 2016. The last samples possessed are: blue for both sides, white for both sides, and grey with internal blue side which is currently used for the new tent of the show *Volta* produced in 2017. The set up required realizing that experimentation

is relatively simple. First of all, it is necessary to possess a heating source. This heat source is placed in a box without lids. An aluminium foil is placed onto the top and closes the box. Next, the tested canvas sample comes right onto the aluminium foil and gets nearly the same surface temperature. Later, the temperature sensor, a classic thermistor, is placed on the centre of the sample in order to acquire the surface temperature of the sample (see figure 1). The acquisitions are obtained every seconds and the sensor is connected to an electronic card which facilitates the reading. Before beginning the measurements with the thermal camera, all the light sources of the room have to be switched off, in order to avoid any light pollution since this could affect the data recording.

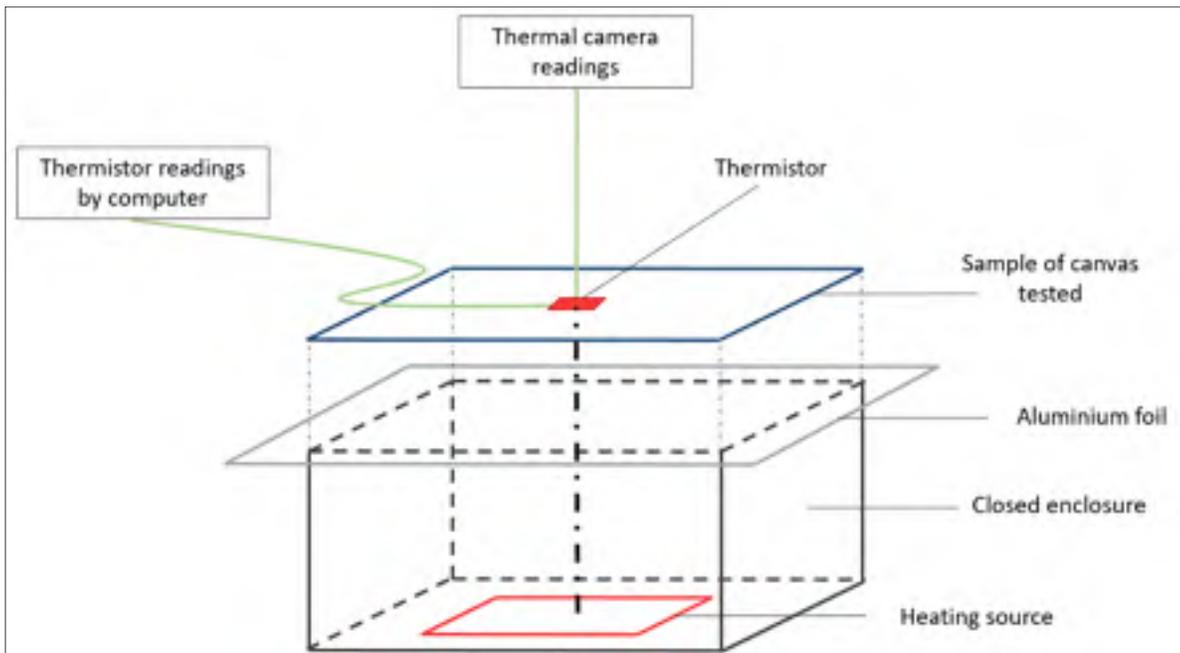


Figure 10 Experimental set-up diagram of emissivity measurements

Then, it is necessary to vary the emissivity value of the camera in order to make the temperature printed by both the thermal camera and the thermistor coincide (see figure 2). Once these two temperatures level, the value of emissivity for the tested canvas corresponds to the last one used on the settings of the thermal camera. Finally, all the canvases that have been tested show an emissivity value between 0.87 and 0.9, which is consistent with the values listed in the literature related to this subject [5], [6].

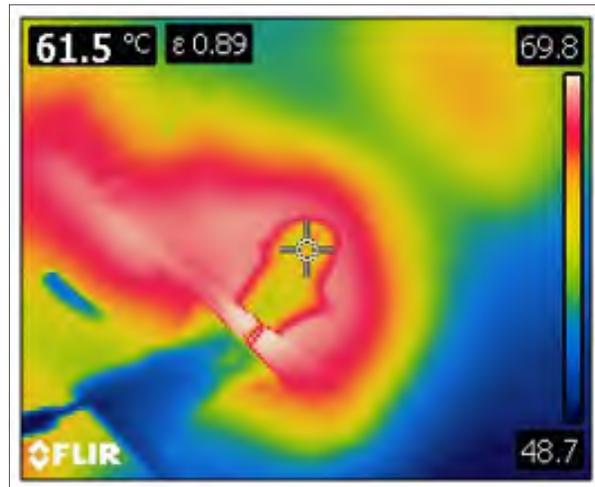


Figure 11 Analysis of the canvas emissivity value based on the canvas temperature

In view of the errors that can occur as a result of the thermal camera precision, it is right to think that the emissivity value is the same for all the different canvases tested, since this parameter does not depend on the color of the tent, which is rather determined by the ability to reflect solar radiation. In the next studies, the value that will be used for the internal and external emissivity of all the different canvases is 0.9.

2.3 Canvas temperature measurement and predictions

One of the key issues in measurements is to estimate the transient surface temperature of the canvas. The surface temperature distributions are required thereafter in order to solve the heat balances. In order to obtain the temperature distribution over the 3,200 m² main tent area, a methodology using an infrared camera (FLIR E40) is set up. Various measurement techniques for different applications have been developed by using thermocouples and infrared radiation techniques as evidenced by recent works. Rizzo et al. [8] used such techniques for the surface temperature measurements on living animals, Zhang et al. [9] applied the basics of this technique to surface temperature measurement of the plasma facing components and Liu et al., [10] developed an in-situ method for machine tool temperature measurements.

Here, the contactless technique is implemented on successive parts of the canvas akin to adjacent contiguous non-overlapping finite elements over which temperature was assumed to be constant. For each 25 m² element, the emissivity value of the camera is calibrated by means of a standard tape (3M) for which emissivity is known in the nearby spectrum of ambient temperatures (300–400 K). Several nodes were also equipped with calibrated thermocouples (with radiant shields) to double-check the methodology. Then, measurements are taken at distance using a crane mounted on a truck and neighbouring scaffolding, covering large surfaces (25 m²) of the global tent area. The measurements were carried out on a much smaller tent (with the same blue and yellow fabric) than the actual Big Top. The shape was similar but the total surface area was only 350 m². Care was taken to subdivide the surfaces where a change in the colour of the canvas occurred. In the end, a numerical integration method is finally used in order to evaluate the average transfer rates through the entire surface. The figure 2 proposes a sample result for the “classic” blue and yellow striped canvas.

To obtain estimates of the temperature distribution on the actual big-top, 20 measurements points were used along with interpolation techniques that accounted for the surface exposition to the

direct irradiation. PV Sol was used to simulate the sun's path over the big top to corroborate the predicted surface temperature. This was particularly useful at the junction of a shaded/non-shaded area where the steepest gradients occurred.

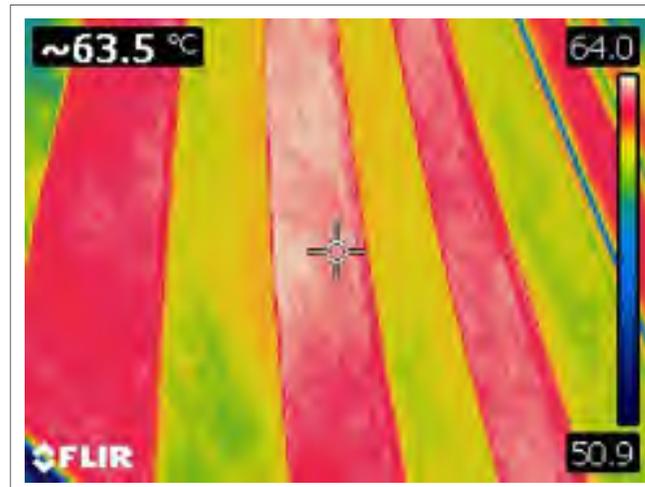


Figure 12 Temperature difference between the blue and yellow stripes on a hot and sunny day

The infrared camera offers various options during the acquisitions, thus it is possible to get the temperature of a central point, or to target the hotter or the coldest point on the screen. The colour scale allows obtaining the maximum and minimum temperatures on the caption and the colour variations give estimations of the temperature on every point. The infrared photos give the possibility to bring to light the difference between the equilibrium temperatures of the various colour stripes for the different tent canvas. In this way, for a warm and sunny day, the blue stripe which absorbs more heat as a result of its wavelength is at a higher temperature, near 63°C and turns white/red with the infrared system of the camera. However, the yellow stripe which absorbs less heat, is at a lowest temperature, near 50°C and turns yellow/green. Due to thermal captions like these it is possible to get suitable values of canvases surface temperature for the level of accuracy required. Knowing these temperatures, the balanced equations applied to the tent surface allows to set up surface interpolations concerning the amount of energy that it is possible to save by the changing of emissivity and absorptivity to the solar radiation (referring here to the “colour” of the canvas). These results are introduced in the next section relating to the radiative properties of the tent showing the benefits of a “white” tent as opposed to darker “colours”.

2.4 Estimation of the canvas reflectivity

Since the only reflectivity value known is the one for the white and yellow canvas, it is important to determine the same values for the other canvases. The standards American Society for Testing and Materials, ASTM E1918-16 [7] proposes a process to determinate an approached value of the reflectivity, by using two pyranometers and a sample (3m x 3m) of the tested surface set on the floor. The pyranometers are set one meter high above the sample, using a fixation arm in order not to create shadows on the sample. The first pyranometer is set above the other, directed towards the sky to receive the net solar flux provided by the sun. The second pyranometer is set under the first one, aiming at the ground and the sample, in order to capture the flux quantity reflected by the canvas. By calculating the difference between the two fluxes measured, it is possible to determine an approximation for the reflectivity of the canvas which is tested.

However, this measurement has never been set up, mainly because of the considerable resources needed in order to set up such a process and the costs of the experimentation since the pyranometers are very expensive. The other reason is that neither *Cirque du Soleil* nor the manufacturer (Ferrari canvas firm) are able to provide samples of the size required (9m²), thereby limiting such experimental procedures. Finally, this measurement was not retained and the values of reflectivity have been hypothetically applied for the other canvases.

Finally, the best solution to determine these parameters with precision according to the wavelength would be to send several samples of different canvases to a specialized laboratory in optico-radiative properties measurements, in order to figure out their values accurately. However, *Cirque du Soleil* chose to base the studies on approximations for future calculations.

3. RADIATIVE PROPERTIES OF THE CANVAS

Nowadays, the *Cirque du Soleil* uses mainly three canvases for their tents. The first one is the “classic” blue and yellow canvas that has been used since the foundation in 1984. Recently, two new designs have been introduced for the canvases. The tour “Luzia”, developed in 2016, uses a yellow and white canvas and “Volta”, produced in 2017, uses a grey and white canvas. These new designs have been implemented to reduce the net radiant heat absorbed by the fabrics and therefore to reduce the power demand on sunny days. They are the indirect result of the first part of the study presented herein.

This type of study has never been performed on tent canvases for circus shows like those of *Cirque du Soleil*, which explains the lack of references. However, a few papers analyse the impact of various colour shades for the roofs [11] and the impact of the radiative properties of façades [12] on the thermal comfort, energy consumption and energy performance of the building concerned. This short analysis is carried out by several methods, based on on-site experiments and measurements of properties, in order to show the benefits of a “white” tent against darker “colours”.

In the following text, it is important to specify that the word “color” refers to the radiative properties of the tent. For example, a “white” tent has intrinsic properties that make it reflect solar radiation more than any other color. This terminology was necessary to make the *Cirque du Soleil* management understand the relationship between the radiative properties and the “color” of the tent. The original tent color, which has become the brand of *Cirque du Soleil*, is blue (60%), with stripes and yellow patterns (40%) referenced as “blue” in the next studies. The tour of the Luzia show, which began in Montreal in April 2016, uses a predominantly white canvas (90%) combined with yellow patterns (10%) referenced as “yellow”. More recently, “Volta” uses a new pattern with a mix of white (60%) and dark gray (40%), referenced as gray. The purpose of this section is to present a radiative comparison between the different types of tent that can be used and their impact on the *Cirque du Soleil* air conditioning load. The first approach analyses the impact of “color” on the heat flows passing through the tent, and the second on the use of HVAC devices.

3.1 Cooling and balance temperature of the tent surface

This part displays the simplified analysis of the net heat flows pass through the tent from the outside to the inside. This analysis has been presented to the *Cirque du Soleil* team in order to demonstrate and justify the importance of implementing a simple and passive measure. This solution could significantly reduce the consumption in air conditioning without impact on the internal processes or the HVAC equipment already in place.

Some data provided by the manufacturer are missing and laboratory measurements were not possible to determine the properties of the material of the tent. Moreover, there are interesting differences between the surface of a new tent and a tent in use. Due to the very large surface area, nearly

6,000 m² in total, it is puerile to use a theoretical data for properties: absorptivity, emissivity and reflectivity.

The proposed "field" method starts from the measurement of balance temperatures of the tent, using a thermal camera, a thermocouple protected from solar radiation and bands which optical properties are known.

The aim here is to obtain the amount of heat transmitted internally according to the "color" of the tent used. Three canvases with an area $A = 3,200 \text{ m}^2$ are considered: 1-white, 2-yellow, 3-blue, having surface temperatures T_{si} , respectively: $T_{s1} = 40^\circ\text{C}$ (313 K), $T_{s2} = 50^\circ\text{C}$ (323 K) and $T_{s3} = 65^\circ\text{C}$ (338 K). These temperatures are the maximum surface-weighted temperatures that were observed during sunny days and come from acquisition with the calibrated thermal camera during the Luzia show in Montreal. To quantify the heat transmitted from the canvas to the enclosure of the tent Q_i , two thermal transfers will be taken into account in the net thermal balance [5]:

$$Q_{in,i} = A \times (\varepsilon \times \sigma \times T_{si}^4 + h_{conv} \times (T_{si} - T_{in})) \quad (1)$$

où $\varepsilon = 0,9$, $h_{conv} = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, et $T_{in} = 24^\circ\text{C}$.

Although the other transfer rates are similar for all three cases, only the convection phenomenon and the heat emission phenomenon influence the energy consumption difference required to cool to 24°C .

Equation 1 shows that for every 1°C increase in surface temperature there is an additional heat energy of approximately 51 kWhth which passes through the fabric for an hour of sunshine. In terms of financial savings, as this energy needs to be evacuated by air conditioning, with a COP of 2.8 and a cost of 0.16 dollars/kWhe (marginal cost provided by the customer), this energy represents about 2.9 dollars/h/ $^\circ\text{C}$ of savings. Considering the temperature difference between the white and blue fabric, which is 25°C , and that the entire tent is not affected by the solar radiation at the same time during the day, savings represent 5,100 kWhth so 291 dollars in air conditioning load that are made per day, as a result of using the white tent. Finally, since the duration of a show is three months, sunshine data from mid-June to mid-September for Montreal and Toronto (Meteonorm), the savings calculated using the white tent rather than the blue one are approximately 350,000 kWhth or 125,000 kWhe, i.e. 20,000 dollars. Overall, the white tent reduces the air conditioning load by approximately 350 MWhth, i.e. 20,000 dollars over a 91-day period in summer. Extrapolated to the 23 to 37 shows simultaneously in the world, the savings for this passive measure of energy saving are enormous.

3.2 Cooling and reflectivity of the tent

As it is not possible to obtain accurate values of the radiative properties of the tents, a match was made using the field measurements described above and the colors of the canvases used by *Cirque du Soleil*. The aim here was to demonstrate to the *Cirque du Soleil* team the impact of the color of the canvas on the net flow of heat that can pass through the canvas. Consequently, in this calculation, the transmissivity and the absorptivity are considered as being responsible for the net transfer rate which passes through the canvas of the enclosure, for the emission wavelength λ corresponding to that of the solar radiation (37% Of solar radiation is between 0.4 to 0.7 μm), equation 3 which binds the three values [6].

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2)$$

Table 1 shows the differences in air conditioning load savings that can be reached depending on the canvas color used compared to a white canvas, depending on the solar flux received. The assumptions imply that all other parameters are equal, including the surface temperature (λ is eliminated from next mathematical representations). In the terminology used to explain the results to *Cirque du Soleil*, the closer the tent surface is close to a light color, the higher the reflectivity. The advertised reflectivity of the white fabric by the manufacturer is 0.78. Here 0.90 is used, specifying to *Cirque du Soleil* that this value should be specified in the estimate for the new fabrics. In contrast, darker the fabric, the lower the reflectivity, so the blue fabric has the lowest reflectivity, namely 0.5. In this analysis, four canvases are proposed: a fourth has been added to the three previous ones being analysed since the manufacturer is building a new assortment of tents for the 2017 tours with 50% white and 50% Grey. Without giving any data on the "effective" reflectivity of the new grey tent, it is necessary to assume it (0.65).

Several solar fluxes or irradianations G are used as well. The goal is then to observe the variations of the Q_{abs} transfer rate absorbed and passing through the canvas coming from the sun before being cooled by the air conditioning system, which is expressed when the canvas used is opaque ($\varepsilon = 0$), such as [6]:

$$Q_{abs} = \alpha_{tent} \times G = (1 - \rho_{tent}) \times G \quad (3)$$

Besides, considering that half of this flow is transmitted to the inside of the tent, it is possible to know the power absorbed in kW for the surface A of 3200 m², and then the total energy passing through the fabric during a sunny day.

$$E_{day} = \frac{Q_{abs} \times A \times Nb_{hours}}{2 \times 1000} \quad (4)$$

Finally, the daily cost is found by considering an average kWh price of 0.16 dollars/kWh and the Performance Coefficient (COP) of the *Cirque du Soleil* air conditioning system, which is 2.8.

$$\$_{day} = \frac{E_{day} \times \$_{elec}}{COP} \quad (5)$$

Table 4: Energy and monetary savings according to the reflectivity of the tent

Solar flux, G	Reflectivity, ρ	Energy per day E_{day}	Cost per day $E_{\text{co}}_{\text{day}}$	Difference
(W/m ²)	(-)	(kWh _{th} /jr)	(\$/jr)	(\$/jr)
600	0,9	720	41	0
600	0,8	1440	82	41
600	0,65	2520	144	103
600	0,5	3600	206	165
900	0,9	1080	62	0
900	0,8	2160	123	61
900	0,65	3780	216	154
900	0,5	5400	309	247
1200	0,9	1440	82	0
1200	0,8	2880	165	83
1200	0,65	5040	288	206
1200	0,5	7200	411	329

These results clearly show that the difference between the daily air conditioning requirements is significant between the different tent canvases. Logically, the "white" fabric is the one that absorbs the least heat, 1,080 kWh_{th}/day for a solar flux of 900 W/m²; unlike the blue cloth that absorbs the most energy, 5,400 kWh_{th}/day for the same solar flux.

Comparing with the previous model, over a period of 91 days, assuming sunshine data from mid-June to mid-September for Montreal and Toronto (Meteonorm) provides a more complete view. Thus, comparing for this period, the use of the tent with entirely blue cloth requires a consumption of approximately 331,000 kWh_{th} in air conditioning load, which represents 118,000kWh_e or approximately 19,000 dollars of additional costs in only three months, instead of using of a white tent. This result reinforces the previous one and confirms that the assumptions used are realistic.

However, it seems important to balance our findings by specifying that the weather data averaged over several years are not necessarily characteristic of a particular year, notably because of the climate change that amounts to new records in the last five years.

3.3 Cooling and operating data's

During the Luzia tour in Montreal in June 2016, the use of the "white" canvas showed that it was not necessary to use the ventilation and cooling systems as much as the blue and yellow tent tours. This statement allowed the design team to propose a third analysis for costs reduction concerning the energy consumed by air conditioning. Data collection concerning the energy consumption, extrapolation and interpolation of this data and adjustment depending on climate records for the years

2015 and 2016 for corresponding periods of time permitted to provide an overall energy consumption portrait for the “white and yellow” tent (Luzia) and the “blue and yellow” tent (classic tent). After an exhaustive analysis regarding the data, which have been collected over time intervals which can vary from five minutes up to several days, it turns out that the HVAC systems are able to run at 60% of their full capacity during the show, due to the “white and yellow” tent, whereas they usually run at 80% with a blue and yellow tent, for the same climatic conditions. This analysis of the HVAC facilities consumption has been led for the purpose of evaluating the savings that can be realized for the entire duration of the tours using a white and yellow tent.

In the first instance, it was necessary to identify the different breakers that are connected to the HVAC systems, because the breakers used are never the same for each show tour. Seven HVACs are running permanently in order to ensure the proper functioning of the cooling system inside the tents. Then, knowing the current I passing through the breakers, it is possible to know the net power used by the breaker with the equation (6):

$$P_{net} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos(\varphi) \quad (6)$$

Finally, by calculating the average of the net powers during an hour, the energy consumed by the HVAC systems is obtained in kWh. The analysis presented here is achieved for the show “Luzia” held in Toronto during four months, from July to October. However, due to a technical issue for the data acquisitions of the *Cirque du Soleil* facilities, only 85 days over the four months have recorded enough operable data to be studied. This analysis presents the savings that have been realized with the white and yellow tent against the blue and yellow one, which would have made the HVAC systems run at 80% of their maximal capacity. The following table (table 2) provides all the results concerning the savings realized, whether by plugging in the electricity network of the city, or by using the generators.

Table 5 Savings realized as a result of using the white and yellow canvas on the Luzia show in Toronto for 85 days between July and October

	ELECTRICITY NETWORK	GENERATORS
White and yellow tent, 60%	402 123 kWh _e	
Blue and yellow tent, 80%	536 165 kWh _e	
Difference	134 042 kWh _e	
Reference price	\$ 0,16/kWh _e	\$ 0,22/kWh _e
Savings for the show	\$ 21 447	\$ 29 489
Savings per day	\$ 252/day	\$ 347/day

Since *Cirque du Soleil* was connected to the city electricity grid in Toronto, the total HVAC consumption for cooling needs with the white and yellow tent is 402,123 kWh_e, against 536,165 kWh_e

if the tent used had been the yellow and blue one. Consequently, around 134 MWh_e were saved in 85 days, as a result of using the clear canvas. It represents an economy about 21,440 dollars with the facilities connected to the city grid. These results are in the same order of magnitude as the achieved savings in the two previous studies since the COP coefficient conversion is 2.8. The next figure (figure 3) shows the cooling load distribution between the different months of the analysis. Thus, the cooling load is obviously higher during the summer. It shows that having a clear tent, like the white and yellow one during the summer is important in order to gain a significant cooling load decrease, 50 MWh_e during the month of July alone.

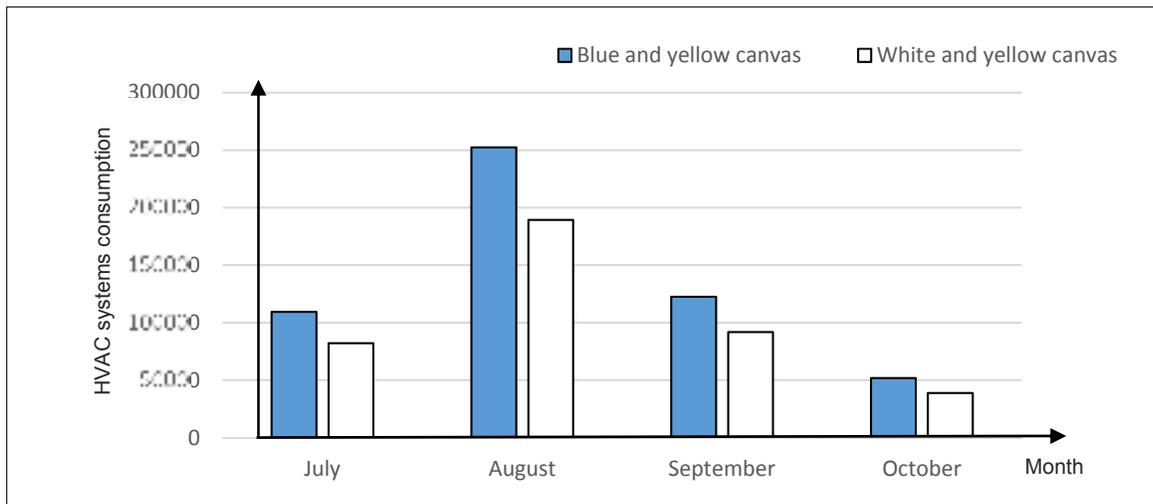


Figure 4 Needs of cooling load during the Luzia show in Toronto depending on the tent canvas

However, it is important to note that it is rare for *Cirque du Soleil* to be allowed to connect their facilities to the cities electricity network. This happens only on few occasions in North America, and especially in Canada, even if they are negotiating the possibility to be connected in every town. With an average reference price of 0.16 dollars/kWh_e for the electricity in North America towns, the savings are already significant compared to the use of generators with a reference price of 0.22 dollars/kWh_e. Hence, the savings are even more significant when the *Cirque du Soleil* is using generators, since the costs are higher due to fuel consumption.

Thus, as generators are most frequently used, the use of white and yellow tents not only enables consumption of less energy but also reduces the greenhouse gas emissions. By conducting a study based on the premises that generators were used for the show in Toronto, even if in this specific instance it was connected to the city grid, it is possible to deduce the amount of CO₂ emissions that could have been avoided. For 1 liter of fuel provided, energy of 3.25 kWh_e is produced by the generators, and the consumption of 1 liter of fuel causes the release of 2.79 kgCO_{2éq} [11]. The equation (7) links the decrease of CO₂ emissions (in tons) to the energy savings:

$$mCO_{2éq} = \frac{E_{éco} \times 2,79}{3,25 \times 1000} \quad (7)$$

In the case of the Toronto show, the white and yellow tent enabled savings of about 134,000 kWh_e in 85 days. If generators were used for this show, this economy for the cooling load would have avoided the emissions of 115 tons of CO₂eq.

4. EVAPORATIVE/MISTING COOLING

Water misting systems are already very present in modern day business and in very various fields. Indeed, the process of water evaporative cooling has been used for some time now, in particular for greenhouses cooling [13], or for atmosphere cooling in pigsties [14]. The systems are now present in grocery stores, for the refrigeration of vegetables and fruits [15], but also in urban watering in order to reduce the intensity of heat islands during heat waves as studied by Hendel et al. [16], [17]. However, despite its numerous advantages, the use of water in this process shows few constraints that are not to be neglected, and even more for the particular context at Cirque du Soleil.

4.1 Concept and implantation

Among the panoply of considered solutions, in order to reduce the energy consumption of the *Cirque du Soleil*, an option based on misting has been developed and analysed. Applied to the *Cirque du Soleil* facilities, this method allows cooling of the external area of the Big-Top canvas, during shows with the help of water vaporization enthalpy. Thus, the heat which is absorbed during the water vaporization process reduces the load dedicated to the cooling needs for the tents.

However, certain restrictions exist concerning this solution. Firstly, a water purification system is needed in order to avoid damaging the canvas or leaving traces of lime scale due to water vaporization. To counter this, two options are presented: install a reverse osmosis system that allows filtering small particulates, or foster the precipitation of the Ca²⁺ ions with magnetism [18].

The second constraint imposed by *Cirque du Soleil* is to ensure that water does not run-off the canvas, in order to avoid creating gutters that could potentially gather around the floor near the tent. In other words, it is necessary that the water used in this process evaporates completely before reaching the circus tent edges. Otherwise, it could potentially disturb the spectators and create a feeling of discomfort and harm the image of the circus. The installation of an evaporating cooling system still remains suitable, since the water supply is connected to the town and the pumping systems already exist and are used for cleaning of the tents.

Conceptually, the global impact of this solution on the water consumption has to be positive. The analysis will show that 20 litres of water is needed to save 1 litre of diesel. However, it takes 90 litres of water in order to extract, transport and refine 1 litre of diesel [1]. Finally, this solution shows global savings concerning water consumption since the energy produced comes from diesel.

4.2 Analysis and economical results

In order to set up the thermal equations needed to realize the heat balance, it was necessary to obtain certain data and establish parameters. Internal and external canvas emissivity have been determined with experimental tests that were presented in the second section, enabling to give approach values for the canvas [19]. Thus, the emissivity values, regardless of the side, have been measured with an adaptation of the process described in the ASTM E1918-16 norm [7]: $\epsilon = 0.9$. During the second phase, it was necessary to obtain the weather data of the town where the study was set up. This data was gathered from the EnergyPlus weather database [20] and concern the solar radiation, the wind velocity, the ambient temperature and the approached temperature for the environment as a celestial arch. Typical Meteorological Years (TMY) for each of the locations are proposed by EnergyPlus, based

on temperature averages for every hour of the year, for several years. Then, the data are used with the TRNSYS software in order to pick only the ones corresponding to the show dates.

The first step of the analysis consists in selecting the different show sites chosen for this study depending on the average temperature profiles for the relevant dates. Once the whole selection is done for all the tours, the collected data are used in a Python computing code in order to realize the thermal balance. In the first instance, a heat balance is established on the canvas surface of the tent, with the purpose of determining its equilibrium temperature. Only the phenomenon of radiation and convection acting on the canvas, for the inner and outer sides of the tent, are considered in this balance. Since the weather data acquired are hourly, the Python calculation loops allow to obtain the hourly variations for the surface temperature (figure 4).

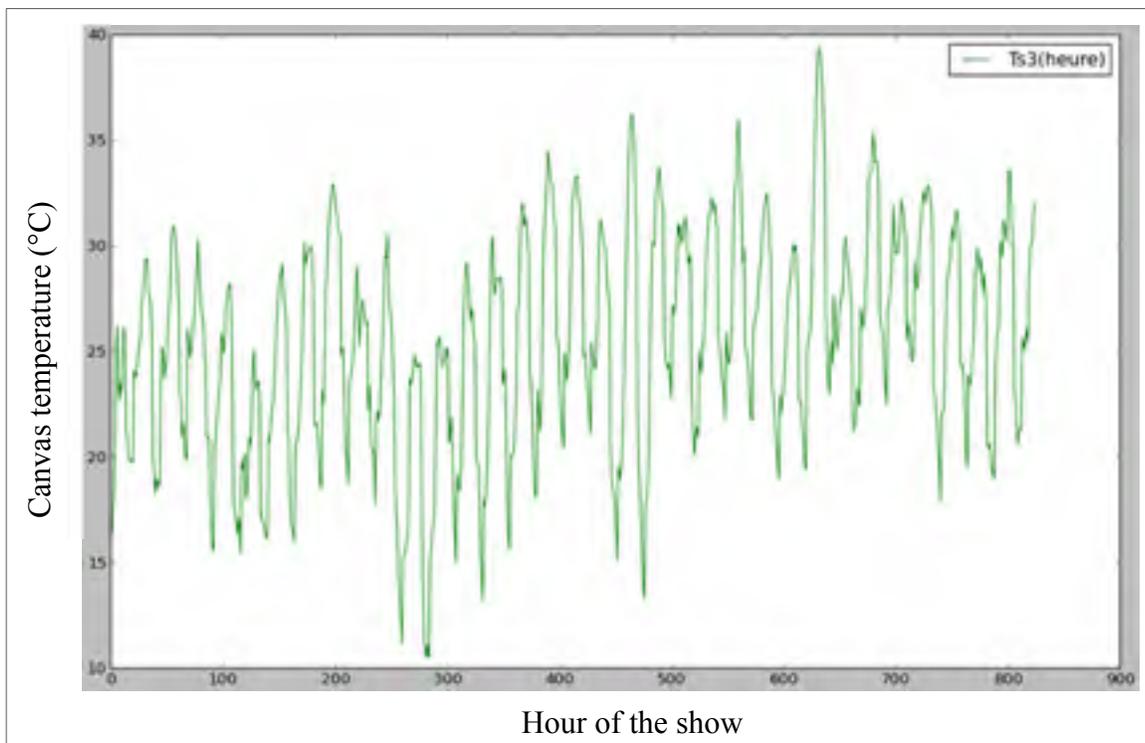


Figure 5 Variation of the surface temperature for the canvas (°C) during 3.3 four days in Montréal

Starting from this temperature, the different heat transfers can be determined. The radiative transfer rates, coming from the sun, from the environment (sky) and the ground, as well as the convection phenomenon (internal and external) and the emissive transfer rates, toward the inside and the outside, are taken into account. The heat flux emitted both by spectators and electrical devices such as lightings are also included. The thermal balance permits to obtain the final heat transfer rate Q_{abs} , which passes through the canvas and which will warm the enclosure of the tent. It is this very heat that has to be absorbed through the process of water vaporization on the surface of the canvas. Based on this heat transfer rate, it is finally possible to know the hourly water mass m_{water} that it is necessary to use in order to absorb all of the heat, hour by hour [21]:

$$m_{water} = \frac{Q_{abs}}{L_{vap} + C_{p,water} \times \Delta T} \times 3600 \quad (8)$$

For the show Luzia which began in Montreal in April 2016, *Cirque du Soleil* set a maximum limit of 2,000 litres for the additional amount of water usable each day for the purpose of the evaporative cooling solution. However, this amount does not concern the other facilities that are already employing water. The results of the analysis concerning the show in Montreal, between 4 May and 7 June 2016 are presented in the table 3.

Table 6 Results of the evaporative cooling analysis

	With water limitation	Without water limitation
Quantity of water used (litres or kg)	56,818	134,100
Energy economised (kWh _e)	15,499	36,579
Savings (dollars)	2,480	5,853
GES emissions avoided (tons)	13	31

The decrease of the cooling load amounts to 15,500 kWh_e for these 33 days, or about 500 kWh_e for each day. These results bring to light the impacts of this solution on the cooling load and the energetic consumption, which led *the Cirque du Soleil* to finance a series of tests on a real circus tent canvas. These tests aimed solely to demonstrate the decrease of the surface temperature of the canvas after the process of misting: it was a matter of performing a qualitative assessment. Thus, these experimental measures prove that the equilibrium temperature of a blue canvas can reach up to 65°C. The evaporative cooling allows to reduce the equilibrium temperature of the canvas to a lower temperature of 35°C, within three minutes (Figure 5).

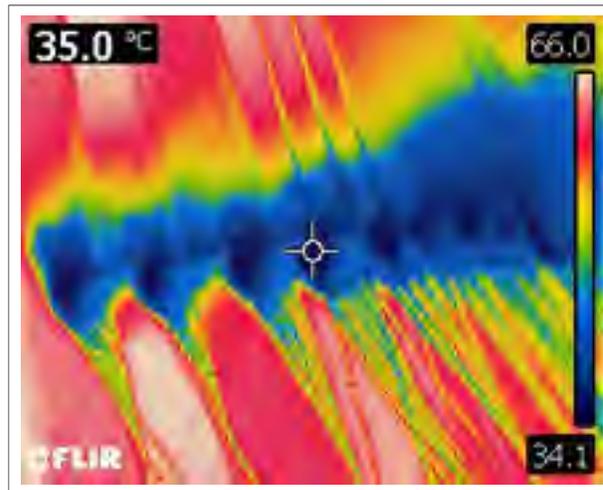


Figure 5 Experimental measurements for evaporative misting on a blue tent canvas

In conclusion, the study concerning the misting process shows that it is possible to implement this solution on the circus tours. It would provide interesting savings for *Cirque du Soleil* by not only decreasing the necessary cooling load but also by reducing greenhouse gas emissions.

5. CONCLUSION

The main difficulty met in this industrial size project was the lack of full and reliable data in order to quantify the analyses. However, the global project led to developing several solutions that can allow the *Cirque du Soleil* to reduce its cooling and heating load, as well as greenhouse gas emissions. This article documents mainly two of these solutions: 1) the utilization of canvas with high reflectivity to the solar radiation as a solution of energy efficiency that has been accepted by the *Cirque du Soleil* management since it could allow cooling savings up to 20,000 dollars for a show running for a period of three months during summer, which could as well decrease the CO₂ emissions – approximately 115 tons; 2) the process of evaporative cooling which is a solution that *Cirque du Soleil* did not wish to adopt and set up, mostly because of the energy and monetary savings which were low compared with the necessary means in order to set up this system.

In conclusion, the measures selected by *Cirque du Soleil* that will be set up mainly rests in energy sobriety which aims to consume less energy for a same result, for instance by using less lighting; and in energy efficiency, with the use of white and high reflectivity canvas.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank the project supervisor, M. Daniel R. Rousse, as well as Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, who also participated in the supervision. Our contacts from the *Cirque du Soleil* team, MM. Giguère Patrick and Michaud, provided valuable help during the entire project. Finally, the t3e group would like to thank M. Michel Trottier for his exceptional support.

REFERENCES

[1] ROUSSE, D. R., Conception d'un système de production et de stockage d'énergie – rapport final. 318p. (2016).

- [2] **KORRES**, G. N., & **MANOUSAKIS**, N. M. (2011). State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements. *Electric Power Systems Research*, 81(7), 1514-1524.
- [3] **STEIN**, B. (1997). *Building technology: mechanical and electrical systems*. John Wiley & Sons.
- [4] **BLUME**, S. W. (2016). *Electric power system basics for the nonelectrical professional*. John Wiley & Sons.
- [5] **DUFFIE**, J.A., **BECKMAN**, W.A., Solar engineering of thermal processes, *John Wiley & Sons*, 936p., (2013).
- [6] **KALOGIROU**, S.A., Solar energy engineering: processes and systems, *Academic Press*, 840p., (2013).
- [7] **ASTM E1918-16**, Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field, (2016)
- [8] **RIZZO**, M., **ARFUSO**, F., **ALBERGHINA**, D., **GIUDICE**, E., **GIANESELLA**, M., & **PICCIONE**, G. (2017). Monitoring changes in body surface temperature associated with treadmill exercise in dogs by use of infrared methodology. *Journal of Thermal Biology*.
- [9] **ZHANG**, C., **GAUTHIER**, E., **POCHEAU**, C., **BALORIN**, C., **PASCAL**, J. Y., **JOUVE**, M., ... & **HOURY**, M. (2017). Surface temperature measurement of the plasma facing components with the multi-spectral infrared thermography diagnostics in tokamaks. *Infrared Physics & Technology*, 81, 215-222.
- [10] **LIU**, D., **WANG**, G., **NIE**, Z., & **RONG**, Y. K. (2016). An in-situ infrared temperature-measurement method with back focusing on surface for creep-feed grinding. *Measurement*, 94, 645-652.
- [11] **DOYA**, M. Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense. Doctoral dissertation, Université de La Rochelle (2010).
- [12] **GARDE**, F., **BOYER**, H., & **CELAIRE**, R. Elaboration d'un label de conception thermique des bâtiments dans les Départements d'Outremer français. *Annales du Bâtiment et des travaux publics*, Vol. 2, pp. 27-40. (2000, April).
- [13] **LAGIER**, J. Problèmes posés par la maîtrise du climat des serres en région méditerranéenne, efficacité de l'ombrage et de la brumisation. *International Symposium on Simple Ventilation and Heating Methods for Greenhouses in Mild Winter Climates* 263 (pp. 325-334). (1988, February).
- [14] **DUTERTRE**, C., **MASSABIE**, P., **GINESTET**, S., & **GRANIER**, R. Effet du refroidissement évaporatif par cooling et brumisation sur l'ambiance et les performances zootechniques en porcherie d'engraissement. *Journées de la recherche porcine en France*, 30, 337-342. (1998).
- [15] **BROWN**, T., **CORRY**, J. E., & **JAMES**, S. J. Brumisation des fruits et légumes réfrigérés dans les meubles frigorifiques de vente à l'aide d'un système ultrasonique à ozonation. *International Journal of Refrigeration*, 8(27), 862-868. (2004).
- [16] **HENDEL**, M. Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation: A Study of Its Cooling Effects and Water Consumption in Paris. Doctoral dissertation, Paris 7. (2015).

[17] **HENDEL, M., COLOMBERT, M., DIAB, Y., & ROYON, L.** Expérimentation de rafraîchissement de l'espace public en période caniculaire à Paris. *Techniques Sciences Méthodes*, (7-8), 41-51. (2015).

[18] **POWELL, M.R.**, Magnetic water and fuel treatment: myth, magic or mainstream science? *Skeptical inquirer volume 22.1.*, (1998).

[19] **BANERJEE, D., CHATTOPADHYAY, S. K., & TULI, S.** Infrared thermography in material research – A review of textile application, *IJF&TR*, (38) 427-437, (2013)

[20] <https://energyplus.net/weather>, consulté 2016-02-28

[21] **BERGMAN, T.L., INCROPERA, F.P, DEWITT, D.P., & LAVINE, A.S.**, Fundamentals of heat and mass transfer, *John Wiley & Sons.*, 1048p., (2011).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- American Society for Testing and Materials, ASTM International (2016). *Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field*. Norme ASTM E1918 – 16. Repéré à <https://www.astm.org/SUBSCRIPTION/DOWNLOAD/E1918.20924.html>
- A. S. H. R. A. E. (2009). Chapter 9 : Thermal comfort. Dans Atlanta : American Society of Heating, Air-Conditioning and Refrigeration Engineers, Inc, *2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals*.
- Ataer, O. E. (2009). Storage of thermal energy. *Energy Storage Systems-Volume I*, 97.
- Banerjee, D., Chattopadhyay, S. K., & Tuli, S. (2013). Infrared thermography in material research—A review of textile applications. Repéré à <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24989/1/IJFTR%2038%284%29%20427-437.pdf>
- Ben Ahmed, H., Multon, B., Bernard, N., & Kerzreho, C. (2007). Le stockage inertiel électromécanique. *Revue 3EI*, pp-18.
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Bernard, H. (2016). *Conception d'un système de production et de stockage d'énergie (rapport d'activités d'immersion sur le spectacle Luzia)*. Document inédit, département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Bernard, H., & Rousse, D. R. (2017). Réduction de la consommation d'énergie des spectacles itinérants du Cirque du Soleil. *XII^{ème} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois (CIFQ) sur la Thermique des Systèmes*.
- Bernard, N., Ben Ahmed, H., Multon, B., Kerzreho, C., Delamare, J., & Faure, F. (2003, Mai). Flywheel energy storage systems in hybrid and distributed electricity generation. Dans *PCIM 2003* (p. 9p). Nurnberg, Allemagne.
- Brown, T., Corry, J. E., & James, S. J. (2004). Brumisation des fruits et légumes réfrigérés dans les meubles frigorifiques de vente à l'aide d'un système ultrasonique à ozonation. *International Journal of Refrigeration*, 8(27), 862-868.
- Connaissance des énergies. (2012, 20 juin). Fiche pédagogique - Énergie osmotique. Repéré à <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-osmotique>

- Connaissance des énergies. (2013, 2 décembre). Fiche pédagogique - CAES, stockage par air comprimé. Repéré à <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime>
- Dincer, I., & Rosen, M. (2002). *Thermal energy storage: systems and applications*. John Wiley & Sons.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Dutertre, C., Massabie, P., Ginestet, S., & Granier, R. (1998). Effet du refroidissement évaporatif par cooling et brumisation sur l'ambiance et les performances zootechniques en porcherie d'engraissement. *JOURNEES DE LA RECHERCHE PORCINE EN FRANCE*, 30, 337-342.
- Dutil, Y., Rouse, D. R., Ben Salah, N., Lassue, S., Zalewski, L. (2011) A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1 112-130
- East Central Illinois Regional Water Supply Planning Committee (RWSPC). Water use by ethanol compared to other industries. Repéré à http://www.rwspc.org/documents/wateruse_otherindustries_0608.pdf
- Energine. (2014, 19 mai). Le stockage d'énergie par air comprimé au secours du renouvelable [billet de blogue]. Repéré à <http://www.energine.com/14/17277+le-stockage-denergie-par-air-comprime-au-secours-du-renouvelable+.html>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2016). Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre. Repéré à <http://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=fr&n=FBF8455E-1>
- Environment and energy division. (2015). *Toronto's 2013 Greenhouse Gas Inventory*. Environment and energy division. Repéré à <http://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2016/pe/bgrd/backgroundfile-87697.pdf>
- Faure, F. (2003). *Suspension magnetique pour volant d'inertie*. (Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- Funk, D. (2010). *L'énergie solaire : circonstances et conditions d'exploitation au Québec*. (Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Montréal, Qc). Repéré à <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7200>
- Gaid, K., & Treal, Y. (2007). Le dessalement des eaux par osmose inverse: l'expérience de Véolia Water. *Desalination*, 203(1-3), 1-14.

- Gaworecki, M. (2015, 26 avril). How much water does the California oil industry actually use? [Billet de blogue]. Repéré à <https://www.desmogblog.com/2015/04/26/how-much-water-does-california-oil-industry-actually-use>
- Grimault, L., Pellicer, L., Rautureau, M., Salmon, V., & Crochet, M. (2014). Techniques et moyens de stockage de l'énergie. *Projet scientifique d'initiation à la recherche (PSIR)*.
- Guide de l'éclairage (2017). LED. Repéré à <http://leclairage.fr/led/>
- Hale, R. G. (2000). U.S. Patent No. 6,151,907. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Hendel, M. (2015). Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation: A Study of Its Cooling Effects and Water Consumption in Paris (Doctoral dissertation, Paris 7).
- Hendel, M., Colombert, M., Diab, Y., & Royon, L. (2015). Expérimentation de rafraîchissement de l'espace public en période caniculaire à Paris. *Techniques Sciences Méthodes*, (7-8), 41-51.
- Iglesias, A. (2013). Système de stockage d'énergie par air comprimé [Présentation PowerPoint]. Repéré à <http://sti.epfl.ch/files/content/sites/sti/files/shared/sgm/IngSim2013/Pre%CC%81sentationProjetsLENI.pdf>
- International Energy Agency. (2016). *Key world energy statistics*. International Energy Agency.
- Izquierdo, A. (2016). *Measures of energy efficiency in itinerant show*. Document inédit, département de Génie Mécanique, Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Jacquelin, L. M., Lacroix O., & Bordeleau, N. (2012). *Facts and figures : Le stockage d'énergie. Enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation*. Enea Consulting. Repéré à <https://www.enea-consulting.com/publication-sur-le-stockage-denergie/>
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and systems*, Academic Press., 840p.
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in energy and combustion science*, vol. 30(3), 231-295.
- Lagier, J. (1988, February). Problèmes posés par la maîtrise du climat des serres en région méditerranéenne, efficacité de l'ombrage et de la brumisation. *Dans International Symposium on Simple Ventilation and Heating Methods for Greenhouses in Mild Winter Climates* 263 (pp. 325-334).

- Lamarche, L. (2016). ENR835 Technologie des systèmes solaires – Note de cours n°1 : Introduction. *ÉTS, École de Technologie Supérieure de Montréal*.
- Lamarche, L. (2016). ENR835 Technologie des systèmes solaires – Note de cours n°5 : Capteurs plans thermiques. *ÉTS, École de Technologie Supérieure de Montréal*.
- Le traitement des eaux. (2012). Osmose inverse. Repéré à <http://traitementdeseaux.fr/techniques-traitement/osmose-inverse/>
- Lévesque, F., Roy, N., Sauvageot, R., & Trudel J. (2016). *Conception d'un système de production et de stockage d'énergie (rapport final de PFE)*. Document inédit, département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Multon, B., & Peter, J. M. (1996). Le stockage de l'énergie électrique. Moyens et applications. *Revue 3EI*, pp-59.
- Multon, B., Robin, G., Erambert, E., & Ben Ahmed, H. (2004, Juin). Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires. Dans *Colloque Energie électrique: besoins, enjeux, technologies et applications 2004*. (pp. pp-64).
- Multon, B., & Ruer, J. (2003). Stocker l'électricité: Oui, c'est indispensable, et c'est possible! Pourquoi, où, comment. *ECRIN*. Repéré à <https://e-nautia.com/clubargon/disk?p=5664983>
- Nations Unies (2015). *Conférence des Parties, vingt et unième session (COP21). Accord de Paris, Convention-cadre sur les changements climatiques*. Paris, France. Repéré à <http://www.terraeco.net/COP21-voici-le-texte-en-francais,63096.html>
- Nkwetta, D. N., & Haghghat, F. (2014). Thermal energy storage with phase change material— a state-of-the art review. *Sustainable Cities and Society*, 10, 87-100.
- N'tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2385-2396.
- Ott, L. E. (1963). Water requirement of the petroleum refining industry. *United States Geological Survey (USGS), water-supply paper 1330-G*.
- Perrot, O. (2011). Cours de rayonnement, troisième semestre. *IUT de Saint-Omer Dunkerque département de Génie Thermique et Énergie*. Repéré à <http://gte.univ-littoral.fr/workspaces/documents-m-perrot/cours-rayonnement/downloadFile/file/ray-IUT-poly.pdf?nocache=1275385568.86>

- Powell, M. R. (1998). Magnetic Water and Fuel Treatment: Myth, Magic, or Mainstream Science? *Skeptical Inquirer*, 22, 27-31. Repéré à http://www.csicop.org/si/show/magnetic_water_and_fuel_treatment_myth_magic_or_mainstream_science
- Rapin, P., Jacquard, P., & Desmons, J. (2015). *Technologie des installations frigorifiques-10e édition*. Dunod.
- Robin, G., Ruellan, M., Multon, B., Ben Ahmed, H., & Glorennec, P. Y. (2004, Octobre). Solutions de stockage de l'énergie pour les systèmes de production intermittente d'électricité renouvelable. Dans *Colloque SeaTechWeek 2004 (Semaine Internat. des Technologies de la Mer)* (p. 9p). Brest, France.
- Rousse, D. R. (2016a). *Conception d'un système de production et de stockage d'énergie (rapport d'activité numéro 1 : Définition du problème, recherche de solution, préféabilité)*. Document inédit, département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Rousse, D. R. (2016b). *Conception d'un système de production et de stockage d'énergie (Rapport d'activité 2 : Solutions pour la réduction de la consommation d'énergie des installations nomades du Cirque du Soleil)*. Document inédit, département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Rousse, D. R. (2016c). *Calcul de la quantité nette d'eau requise pour un système de rafraîchissement évaporatif lorsque l'énergie remplacée est de source diesel. (Rapport spécial)*. Document inédit, département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Rousse, D. R. (2016d). *Conception d'un système de production et de stockage d'énergie (rapport d'activité final : Recommandations)*. Document inédit, département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure, Montréal, Qc.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Socaciu, L. G. (2012). Thermal Energy Storage: An Overview. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, 55(4). Repéré à <http://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/355/0>
- Socaciu, L. G. (2012). Thermal energy storage with phase change material. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 20, 75-98. Repéré à http://lejpt.utcluj.ro/A20/075_098.pdf

- SPX Lighting (2017). LED et gestion thermique, pourquoi est-il nécessaire d'avoir une gestion thermique adaptée dans un luminaire à LEDs ? Repéré à <https://www.spx-lighting.com/wp-content/uploads/tools/led-et-gestion-thermique.pdf>
- Tomlinson, J. J., & Kannberg, L. D. (1990). Thermal energy storage. *Mechanical Engineering*, 112(9).
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2017). Frequently Asked Questions : How many gallons of gasoline and diesel fuel are made from one barrel of oil ? [FAQ]. Repéré à <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=327&t=9>
- Vinh, D. (2010). *Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées*. (Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne).
- Wu, M., M. Mintz, M. Wang, S. Arora, and Y. Chiu. (2011). *Consumptive Water use in the production of Ethanol and Petroleum Gasoline - 2011 Update*, (ANL/ESD/09-1 update). Lemont, IL U.S.A. : Argonne National Laboratory, 100 pp. Repéré à <https://greet.es.anl.gov/publication-consumptive-water>
- Xie, X. (2012). Vanadium redox-flow battery. *Tennessee Valley Authority*. Repéré à <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/xie2/>
- Xu, X. (2013). *Modélisation et analyse du fonctionnement d'un système de stockage intégré au réseau électrique*. (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Qc). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/1244/>