



Projet SWACool « Potentiel de réduction de la demande de climatisation en climat tropical et optimisation du raccordement des bâtiments à un réseau de froid vertueux »

Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion :

Bâtiment PFME CHU Sud – St Pierre

Résultats de mesure

Livrable 1.1

septembre 2020

rédigé par 



Le projet SWACool est lauréat de l'Appel à Projets de Recherche ADEME « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 » - 3^{ème} édition.

Green Tech

81 rue des Navigateurs 97434 Saint-Gilles les Bains

Tél. 0262 01 03 16

SIREN 790 016 182 APE 3530Z



Table des matières

<u>NOMENCLATURE.....</u>	<u>3</u>
<u>I. INTRODUCTION.....</u>	<u>4</u>
<u>II. SITE ETUDIE.....</u>	<u>6</u>
1. DESCRIPTION DU BATIMENT	6
2. INSTRUMENTATION	8
<u>III. PERFORMANCES ENERGETIQUES</u>	<u>11</u>
1. BILAN ENERGETIQUE.....	11
2. DIMENSIONNEMENT.....	12
3. DEMANDE DE FROID	12
A. SIGNATURE ENERGETIQUE.....	12
B. PROFIL DE CONSOMMATION.....	14
C. MONOTONE DE PUISSANCE	14
D. CONFORT.....	15
4. CARACTERISATION DES SOUS-SYSTEMES	16
A. PRODUCTION.....	16
B. DISTRIBUTION.....	18
C. TERMINAUX DE CLIMATISATION	21
<u>IV. PROJET DE SWAC SUR LE SITE DU CHU SUD.....</u>	<u>25</u>
1. CONTEXTE.....	25
2. REFLEXION SUR LES ENJEUX A PRECISER DANS LA CONCEPTION DU PROJET SWAC	26
A. STRUCTURE DE LA DEMANDE DE FROID.....	26
B. PERFORMANCES DE LA PRODUCTION ACTUELLE.....	29
C. OPTIMISATION DE LA DISTRIBUTION.....	29
<u>V. CONCLUSIONS.....</u>	<u>31</u>
<u>ANNEXE 1</u>	<u>33</u>
<u>ANNEXE 2</u>	<u>36</u>
<u>ANNEXE 3</u>	<u>38</u>
<u>ANNEXE 4</u>	<u>42</u>

Nomenclature

Abréviations

CTA	centrale de traitement d'air
EG	eau glacée
GEG	groupe d'eau glacée
GTC	gestion technique centralisée
PFME	Pôle-Femme-Mère-Enfant
SWAC	Sea Water Air Conditioning
VC	ventilo-convecteur

Symboles et unités

P	puissance
T°	température
T _c	taux de charge
T _{cond}	température au condenseur
T _{évap}	température à l'évaporateur
T _{ext}	température extérieure
ΔT	différence de température entre départ et retour eau glacée (distribution)
W, kW, MW	watt, kilowatt, mégawatt (unité de puissance)
kWh, MWh, GWh	kilowattheure, mégawattheure, gigawattheure (unité d'énergie)

Indices

e	électricité
f	froid

Indicateurs

EER	Energy Efficiency Ratio	$EER = \frac{P_f \text{ (kWf)}}{P_{\text{élec consommée}} \text{ (kWe)}}$
-----	-------------------------	---

Performances instantanées de la production de froid (inclus auxiliaires de production), équivalent du Coefficient de Performance pour la production de chaleur.

Eff	Efficacité
-----	------------

$$Eff = \frac{EER}{EER_{Carnot}} \text{ où } EER_{Carnot} = \frac{T_{\text{évap}} \text{ (K)}}{T_{\text{cond}} - T_{\text{évap}} \text{ (K)}}$$

Quantifie l'écart par rapport à une machine thermodynamiquement « parfaite ».
Ordre de grandeur : 10-30%

SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
------	----------------------------------

$$SEER = \frac{\text{Energie froide produite sur la période (kWhf)}}{\text{Electricité consommée sur la période (kWe)}}$$

EER sur une période déterminée (mois, année). Différents indicateurs peuvent être définis selon le périmètre considéré (production, distribution, terminaux...)

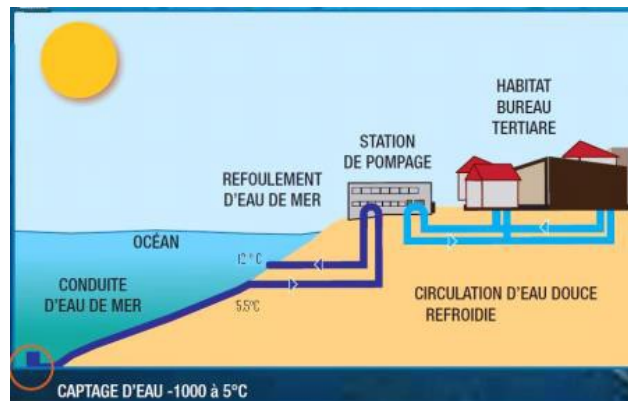
I. Introduction

A La Réunion, la maîtrise de la consommation électrique est un enjeu majeur, compte tenu du fait qu'il s'agit d'un territoire insulaire et de ce fait non interconnecté. Le poids de la climatisation dans la consommation électrique de l'île est en constante augmentation pour répondre à des problématiques de confort. La consommation électrique pour la climatisation dans le secteur tertiaire représente de l'ordre de 500 GWh par an.

Afin de limiter la demande en climatisation de l'île, de nombreux travaux sont menés sur la conception des bâtiments. Si la mise en œuvre d'une architecture bioclimatique dans un bâtiment neuf permet de se passer de système de climatisation tout en maintenant un bon niveau de confort pour les occupants, il n'en va pas de même dans un bâtiment en réhabilitation, pour lequel il est souvent impossible d'atteindre de tels niveaux de performance à moins de coûts démesurés. Dans ce cas, le maintien d'un moyen de climatisation est incontournable pour assurer un niveau de confort minimal. Ainsi l'enjeu se situe à deux niveaux :

- une réduction de la demande de climatisation des bâtiments tertiaires ;
- le recours à des moyens de climatisation « propres » à un coût abordable : un réseau de froid vertueux tel qu'un SWAC (cf. Figure 1) en est un.

Figure 1 : Schéma de principe d'un réseau SWAC (Sea Water Air Conditioning) (source : Engie)



Le projet SWACool s'appuyait initialement sur le projet de SWAC-Nord porté par Engie, qui devait être opérationnel en 2017 et alimenter en eau glacée (issue de l'eau de mer à 5°C puisée à 1100 m) une cinquantaine de preneurs sur le périmètre Saint Denis et Saint Marie par le biais d'un réseau de froid de 23 km. Il se proposait de donner des pistes concrètes pour optimiser la connexion des bâtiments existants au nouveau réseau SWAC, sur la base de résultats de mesures effectuées sur 4 bâtiments potentiellement connectables au SWAC. Les actions identifiées se concentraient sur des adaptations à réaliser sur la distribution d'eau glacée dans les bâtiments. Une analyse similaire devait être menée en métropole sur 3 bâtiments connectés au réseau Thassalia à Marseille, basé sur un concept « hybride » de machines frigorifiques refroidies grâce à l'eau de la mer Méditerranée.

Malheureusement, le projet de SWAC-Nord à La Réunion n'a pas abouti. Ainsi le volet métropole sur le réseau Thassalia s'est déroulé comme prévu mais le volet Réunion a été réorienté sur les aspects suivants :

- une meilleure connaissance de la demande de froid des bâtiments tertiaires à La Réunion
- une caractérisation des performances réelles des équipements de production de froid et de la consommation des auxiliaires de climatisation (production, distribution, émission)

toujours sur la base de l'instrumentation mise en place sur plusieurs années sur 4 sites tertiaires à La Réunion, sélectionnés pour couvrir une large gamme de typologies :

- hôpital : Pôle-Femme-Mère-Enfant (PFME) du CHU Sud à St Pierre
- bureaux : Caisse d'Allocations Familiales (CAF) de Saint Paul
- enseignement : Fac de Lettres de l'Université de La Réunion à St Denis
- datacenter SFR au Port

Les partenaires engagés dans le projet SWACool sont :

- Green Tech (coordinateur) : société d'accompagnement en efficacité énergétique à La Réunion (compétences mobilisées : instrumentation)
- Enertech : bureau d'études spécialisé dans les bâtiments performants en métropole (compétences mobilisées : instrumentation)
- LEU Réunion : cabinet spécialisé en architecture durable (compétences mobilisées : simulation thermique)
- Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion

Le projet SWACool a donné lieu à différents rapports disponibles librement sur <http://greentech.re/index.php/swacool-reference-4/>

Tâche 1 : Volet Réunion

- Livrable 1.1 : Etude de cas du Pôle-Femme-Mère-Enfant (PFME) St Pierre
- Livrable 1.2 : Etude de cas de la CAF St Paul
 - 1.2a : Résultats de mesure
 - 1.2b : Résultats de simulation thermique
- Livrable 1.3 : Etude de cas de la Fac de lettres St Denis
 - 1.3a : Résultats de mesure
 - 1.3b : Résultats de simulation thermique
- Livrable 1.4 : Etude de cas du datacenter SFR Le Port

Tâche 2 : Volet métropole (réseau Thassalia à Marseille)

- Livrable 2.1 : Etude de cas du bâtiment Calypso
- Livrable 2.2 : Etude de cas du bâtiment Golden Tulip
- Livrable 2.3 : Etude de cas du bâtiment Mirabeau 2

Tâche 3 : Enseignements du projet

- Livrable 3.1 : Retour d'expérience sur la climatisation des 4 bâtiments tertiaires étudiés à La Réunion
- Livrable 3.2 : Retour d'expérience sur la climatisation des 3 bâtiments tertiaires étudiés à Marseille

Le présent rapport concerne les résultats de mesure de l'étude de cas du Pôle-Femme-Mère-Enfant (PFME) au CHU Sud à St Pierre (Livrable 1.1).

II. Site étudié

1. Description du bâtiment

Le site étudié fait partie du CHU-Sud situé à St Pierre (Terre Sainte).

Figure 2 : Localisation du site étudié



Il s'agit du Pole Femme-Mère-Enfant (PFME), dédié à la maternité et à la pédiatrie, dont on voit l'emplacement dans l'enceinte du CHU-Sud sur la Figure 3 :

Figure 3 : Emplacement du PFME dans le complexe CHU-Sud



Le bâtiment étudié présente une surface de 22000 m² répartis sur 5 étages pour une capacité est de 116 lits. Il a été livré en 2012. Etant donné son usage hospitalier, il est climatisé toute l'année 24h/24 et 7 jours/7.

Figure 4 : Vue du bâtiment du PFME (source : CHU)

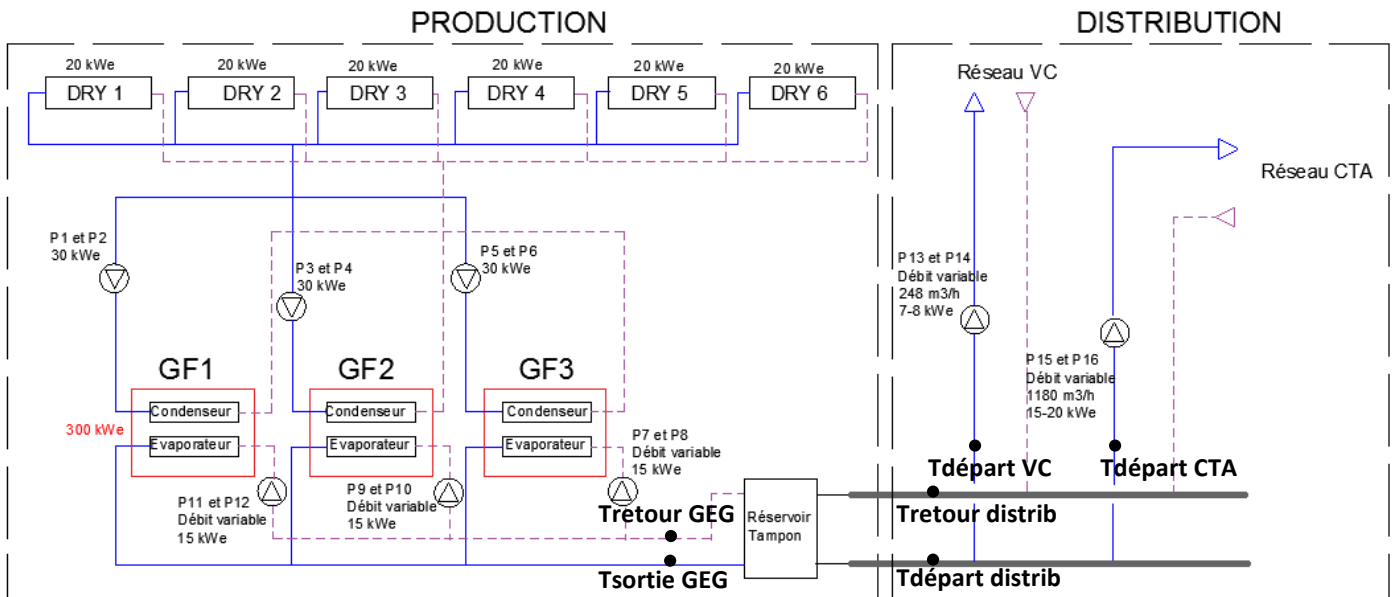
La production de froid est assurée par 3 groupes d'eau glacée York à condensation à eau de 1090 kWf chacun (cf. caractéristiques techniques en Annexe 1) soit un total de 3270 kWf. Ils sont refroidis par un circuit d'eau lui-même refroidi par 6 drycooler installés en toiture. Côté évaporateur, on trouve une bouteille de « découpage hydraulique » (horizontale...?) qui alimente deux réseaux distincts : CTA (>80% du débit nominal) et ventilo-convecteurs, équipés chacun d'une pompe double à débit variable.

Figure 5 : Vue de la salle des machines

Cette architecture hydraulique lourde (cf. Figure 6) est imposée par la taille conséquente des installations. Elle implique la présence d'une multitude d'auxiliaires :

- côté condenseur, 3 pompes doubles circuit drycooler (3x30 kWe)
- 6 drycooler (6x20 kWe)
- côté évaporateur, 3 pompes doubles EG (3x15 kWe)
- 2 pompes de distribution à débit variable (jusqu'à 248 m³/h, 7-8 kWe et jusqu'à 1180 m³/h, 15-20 kWe)

Figure 6 : Schéma de principe de l'installation de climatisation



L'installation est munie de 3 GEG à deux étages chacun mais seuls le GF1 et le GF3 fonctionnent (NB : Etant donné l'usage hospitalier, un GEG supplémentaire a été prévu en secours au cas de panne sur l'un des deux autres GEG). Elle alimente deux circuits de terminaux :

- le réseau CTA
- le réseau ventilo-convecteurs

Les 26 CTA fonctionnent en tout air neuf (pas de recyclage en raison de l'usage hospitalier) et fournissent :

- soit l'air neuf seulement, la demande de climatisation étant apportée par les ventilo-convecteurs (ex : bureaux)
- soit toute la demande de climatisation pour les locaux en tout air neuf (ex : chambres, par le biais de systèmes Varil'air)

Le site est équipé d'un système de GTC permettant la commande de l'ensemble des équipements et l'enregistrement de certaines données. La maintenance de l'ensemble des équipements est assurée par la société Vinci Facilities (ex-Tunzini) qui est présente en permanence sur le site.

2. Instrumentation

L'instrumentation a porté sur les différents éléments composant le système de climatisation :

- production EG (7 points de mesure)
- distribution EG (6 points de mesure)
- terminaux de climatisation (58 points de mesure)

Elle a été complétée par les données météorologiques fournies par l'Université de La Réunion sur la station de l'IUT St Pierre située à proximité immédiate du site. L'ensemble des mesures a bénéficié d'un pas de temps d'enregistrement de 10 min.

Le Tableau 1 synthétise l'instrumentation mise en œuvre en salle des machines sur la production et la distribution d'eau glacée. La position des sondes de température GTC est indiquée en Figure 6.

Tableau 1 : Instrumentation de la production et la distribution d'eau glacée

	Equipement	Grandeur mesurée	Matériel de mesure	Mode d'instrumentation	Période de mesure	Trous de mesure
Production EG	3 groupes d'eau glacée	conso électrique	Analyseur de réseau PEL 103 Chauvin Arnoux	campagnes	été : 20/02/2018-08/03/2018 hiver : 24/07/2018-14/08/2018	
		énergie froid, débit	Compteur de frigories Supercal 531	en continu	08/09/2017-01/09/2020	
		température sortie GEG	Sonde en place	GTC	01/09/2017-01/09/2019	03-08/01/2018, 01/04-11/15/2018, 02-06/09/2018, 24-29/12/2018, 05-25/06/2019
		température retour GEG	Sonde en place	GTC	01/09/2017-01/09/2019	03-08/01/2018, 01/04-11/15/2018, 02-06/09/2018, 24-29/12/2018, 05-25/06/2019
	6 pompes circuit eau drycooler (refroidissement GEG)	conso électrique	Omegawatt	en continu	26/12/2017-07/11/2019	14/06-28/08/2018
	6 drycooler	conso électrique	Analyseur de réseau PEL 103 Chauvin Arnoux	campagnes	été : 31/01-11/02/2019 hiver : 30/07-03/09/2019	
Distribution EG	3 pompes circuit primaire GEG	conso électrique	Omegawatt	en continu	26/12/2017-07/11/2019	14/06-28/08/2018
	pompe réseau CTA	conso électrique	Omegawatt	en continu	26/12/2017-07/11/2019	14/06-28/08/2018
	pompe réseau VC	conso électrique	Omegawatt	en continu	26/12/2017-07/11/2019	14/06-28/08/2018
		température départ distribution	Sonde en place	GTC	01/09/2017-01/09/2019	03-08/01/2018, 01/04-11/15/2018, 02-06/09/2018, 24-29/12/2018, 05-25/06/2019
		température retour distribution	Sonde en place	GTC	01/09/2017-01/09/2019	03-08/01/2018, 01/04-11/15/2018, 02-06/09/2018, 24-29/12/2018, 05-25/06/2019
		température départ réseau CTA	Sonde en place	GTC	01/09/2017-01/09/2019	15-20/03/2018, 02/05-01/06/2018, 03-07/11/2018
	température départ réseau VC	Sonde en place	GTC	01/09/2017-01/09/2019	15-20/03/2018, 02/05-01/06/2018, 03-07/11/2018	

Un compteur de frigories (Supercal 531) était déjà en place sur le départ général EG, mais la liaison avec la GTC ne fonctionne pas, nous avons donc installé un enregistreur d'impulsions Hobo afin de mesurer la demande de froid du site (cf. Figure 7).

Figure 7 : Vue du calculateur du compteur de frigories en place sur le réseau EG



Deux éléments importants n'ont pas pu être mesurés en continu :

- la consommation électrique des GEG car la puissance absorbée (300 kWe chacun) était trop élevée pour le matériel disponible pour les mesures en continu,
- la consommation électrique des drycooler car la configuration électrique ne permettait pas l'installation du matériel de mesure en continu.

Pour caractériser leur consommation électrique nous avons donc opté pour deux campagnes de mesure de 15 jours minimum, l'une en hiver l'autre en été. L'analyse montre une dépendance à la puissance froide fournie dans les deux cas : les caractérisations obtenues ($P_{elec}=f(P_f)$) sont présentées en Annexe 2.

Etant donné leur nombre, les terminaux n'ont pas pu être instrumentés de manière systématique : seul un échantillon de CTA et de VC a été étudié. Les mesures de consommation électrique des terminaux ont été accompagnées de mesures de température/hygro-métrie dans différents locaux en continu. *NB : Nous avons*

été confrontés à des problèmes de fonctionnement/disparition des capteurs de température ayant mené à de nombreux trous de mesure...

L'Annexe 3 présente l'ensemble des points de mesure installés en continu sur le site (de septembre 2017 à novembre 2019) et le schéma de positionnement des capteurs de température à l'étage R+1.

Etant donnée l'étendue de la période d'instrumentation, une période de référence a été sélectionnée pour les analyses présentées dans la suite : du 01/09/2018 au 31/08/2019.

III. Performances énergétiques

1. Bilan énergétique

Le bilan énergétique de la climatisation du site (hors terminaux) est présenté pour la période du 01/09/2018 au 31/08/2019 dans le Tableau 2.

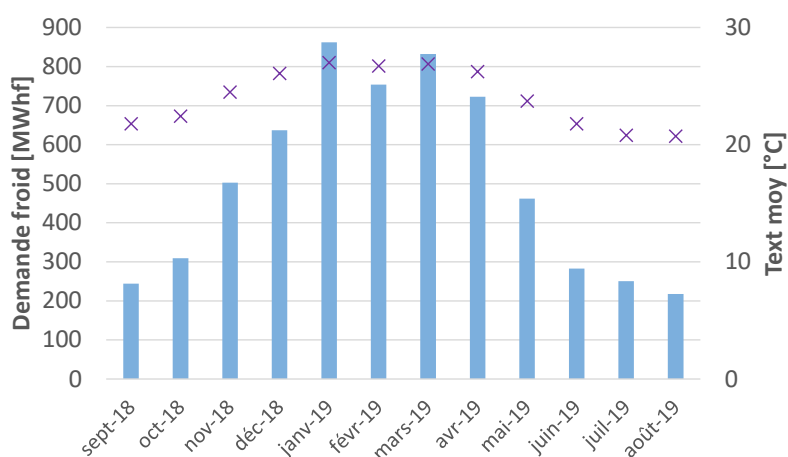
Tableau 2 : Bilan énergétique de la climatisation sur le site du PFME (sept 2018-août 2019)

		sept-18	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	avr-19	mai-19	juin-19	juil-19	août-19	Total
Demande froid	MWhf	243.939	308.992	502.534	636.816	862.077	753.812	831.926	722.924	461.778	282.527	250.555	217.500	6075
Conso élec clim	MWhe	160.731	217.994	299.911	360.917	446.538	395.353	436.305	387.761	266.406	181.898	191.394	163.001	3508
Conso élec production EG	MWhe	151.378	207.976	288.833	347.556	432.025	382.547	422.341	374.998	254.806	169.672	175.627	147.098	3355
Groupes eau glacée *	MWhe	55.511	72.754	137.083	183.815	262.933	228.616	252.271	215.404	122.703	63.982	58.878	49.440	1703
Auxiliaires GEG	MWhe	95.866	135.221	151.751	163.741	169.092	153.930	170.069	159.594	132.103	105.690	116.749	97.657	1651
Pompes primaires EG	MWhe	10.452	21.270	24.401	26.346	26.896	25.001	27.667	25.643	18.430	12.885	16.271	11.256	247
Pompes eau drycooler	MWhe	25.913	50.565	59.834	65.236	66.097	60.708	66.840	62.180	45.588	31.908	39.100	26.185	600
Drycooler*	MWhe	59.501	63.387	67.517	72.160	76.098	68.221	75.562	71.771	68.085	60.896	61.378	60.215	805
Conso élec distribution EG	MWhe	9.353	10.019	11.078	13.361	14.513	12.806	13.965	12.763	11.599	12.225	15.767	15.903	153
Distribution EG CTA	MWhe	6.741	7.185	7.853	9.479	10.330	9.121	9.876	8.897	8.271	9.556	13.195	13.369	114
Distribution EG VC	MWhe	2.612	2.834	3.225	3.882	4.183	3.685	4.089	3.866	3.329	2.669	2.572	2.535	39
*données reconstruites grâce aux caractérisations														
SEER production EG seule		1.6	1.5	1.7	1.8	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.4	1.5	1.8
SEER avec distribution EG		1.5	1.4	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.7	1.6	1.3	1.3	1.7

La demande de froid totale est de 6 GWhf/an, soit ~ 275 kWhf/m²/an. Cette valeur peut paraître élevée mais il faut tenir compte de l'usage hospitalier du site, avec une climatisation toute l'année 24h/24 et 7j/7. La consommation électrique associée à la climatisation (hors terminaux) est de l'ordre de 3.5 GWhe/an (dont 150 MWhe pour la distribution EG), soit ~ 160 kWhf/m²/an (16 €/m²/an).

La demande de froid mensuelle varie d'un facteur 4 entre 218 MWhef en août et 862 MWhef en janvier, en lien avec les variations de température extérieure moyenne comme le montre la Figure 8. Ainsi la demande estivale (novembre-avril) représente plus de 70% de la demande de froid annuelle, la demande de froid hivernale (mai-octobre) moins de 30%.

Figure 8 : Variation de la demande de froid mensuelle



La consommation électrique de la production d'eau glacée représente 96% de la consommation de la climatisation (sans compter les terminaux), les 4% restants étant dédiés à la distribution de l'eau glacée. NB : A cause des problèmes évoqués au paragraphe II.2, la consommation horaire des GEG et des drycooler a été reconstruite grâce aux caractérisations présentées en Annexe 2. Cette façon de procéder induit nécessairement une erreur par rapport à une mesure directe de la consommation (pas réalisable en continu), erreur que nous ne sommes pas en mesure de quantifier.

Il est intéressant de noter que les nombreux auxiliaires de production (en particulier les drycooler) consomment autant que les GEG, ce qui diminue drastiquement les performances de l'installation. Il s'agit cependant d'un choix technique imposé par la taille conséquente des installations.

Au final, le SEER mensuel (production seule) varie entre 1.4 en hiver et 2.0 en été, pour une valeur annuelle de 1.8. Le SEER perd environ 0.1 si on inclut la consommation de la distribution. Ces valeurs sont faibles comparées aux standards considérés habituellement (valeur de 3 souvent prise en référence).

2. Dimensionnement

Le Tableau 3 récapitule les puissances froides/taux de charge min/max/moy sur la période de référence.

Tableau 3 : Puissances froides et débits horaires min/max/moy (sept 2018-août 2019)

		sept-18	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	avr-19	mai-19	juin-19	juil-19	août-19	Total
Demande froid														
Pmoy	kWf	339	415	698	856	1159	1122	1118	1004	621	392	337	292	694
Pmax	kWf	739	990	1088	1105	1609	1739	1588	1486	1235	831	886	846	1739
Pmin	kWf	80	99	242	222	578	302	340	356	147	98	74	0	0
Taux de charge moy		10%	13%	21%	26%	35%	34%	34%	31%	19%	12%	10%	9%	21%
Taux de charge max		23%	30%	33%	34%	49%	53%	49%	45%	38%	25%	27%	26%	53%
Débit eau glacée														
Dmoy	m ³ /h	107	120	163	215	239	227	221	196	167	125	140	134	171
Dmax	m ³ /h	161	209	282	333	336	344	323	336	334	252	205	370	370
Dmin	m ³ /h	80	80	97	97	154	152	155	138	112	80	92	89	80
% Débit moy		7%	8%	11%	15%	17%	16%	15%	14%	12%	9%	10%	9%	12%
% Débit max		11%	15%	20%	23%	24%	24%	23%	24%	23%	18%	14%	26%	26%

L'installation est munie de 3 GEG d'une puissance unitaire de 1090 kWf soit un total de 3270 kWf. La puissance moyenne horaire enregistrée sur la période de référence varie entre 300 kWf (Tc<10%) en hiver et 1200 kWf (Tc=35%) en été, avec des valeurs max ponctuelles de 800 kWf (Tc=23%) en hiver et 1700 kWf (Tc=53%) en été. Cela dénote d'un surdimensionnement d'un facteur 2, qui aboutit à 1850 heures de fonctionnement « équivalent pleine puissance » sur l'année (ce qui est faible).

NB : Un surdimensionnement s'imposait pour assurer la redondance en cas de panne sur un 3 des groupes froids mais un facteur de surdimensionnement de 1.5 aurait été suffisant, le risque que deux groupes tombent en panne en même temps et en période de demande maximale étant négligeable.

La distribution EG est équipée de pompes à débit variable en fonction de la demande de froid avec un débit maximal de 1180 m³/h sur le réseau CTA et 248 m³/h sur le réseau VC soit un total de 1428 m³/h maximum. Le débit moyen enregistré sur la période de référence varie entre 100 m³/h (7% du débit max) en hiver et 240 m³/h en été (17% du débit max) en été, avec des valeurs max ponctuelles de 160 m³/h (11% du débit max) en hiver et 340 m³/h (24% du débit max) en été. **Les pompes de distribution sont donc très surdimensionnées (facteur 4) mais fort heureusement à débit variable**, ce qui permet de maîtriser leur consommation (4%) ; dans la cas contraire leur consommation serait exorbitante et la différence de température entre départ et retour eau glacée extrêmement faible.

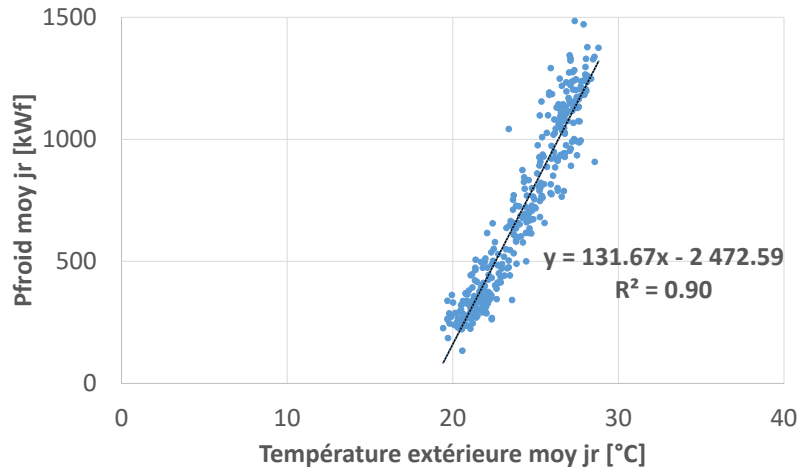
NB : Il est possible que les pompes de distribution aient été dimensionnées sur la base de la puissance des 3 GEG alors qu'il était prévu dès le départ que l'un deux servirait uniquement de secours (donc aucun recours aux 3 GEG en même temps). D'autre part il faut souligner que la redondance sur le débit est inutile car il s'agit de pompes doubles. Si aucun foisonnement n'a été considéré sur les appels de charge des terminaux, cela a également pu conduire à un tel surdimensionnement des pompes de distribution.

3. Demande de froid

a. Signature énergétique

L'appel de puissance froide d'un bâtiment est directement dépendant des conditions climatiques. La signature énergétique du bâtiment est typiquement définie comme la représentation de la puissance froide appelée en fonction de la température extérieure. Elle se trace en moyenne journalière afin de limiter la dispersion (cf. Figure 9).

Figure 9 : Signature énergétique du bâtiment en fonction de la température extérieure (sept 2018-août 2019)



La réponse du bâtiment est linéaire par rapport à la température extérieure, ce qui est un résultat habituel. En prolongeant la droite, la température de « non-climatisation » serait de l'ordre de 19°C (en moyenne journalière). La pente est de l'ordre de 130 kWf/K (soit un appel de charge supplémentaire de 130 kWf lorsque la température extérieure augmente de 1 degré).

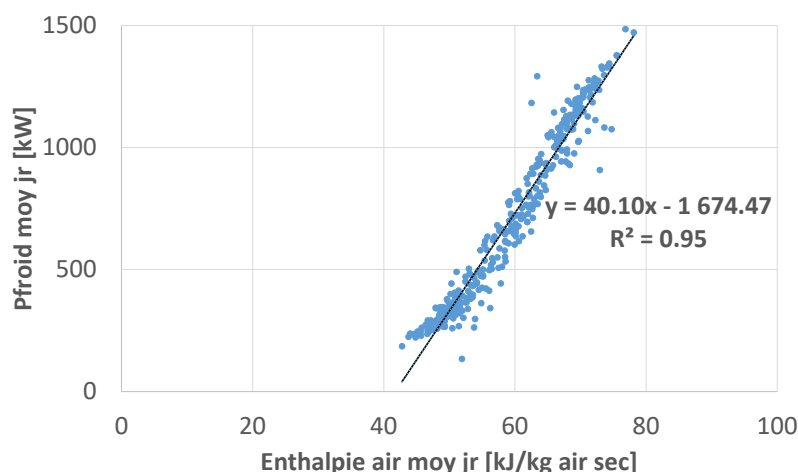
A La Réunion, l'hygrométrie est élevée si bien que la demande de climatisation est en grande partie liée à la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air extérieur lors de son refroidissement. Ainsi, la corrélation est améliorée si on trace la signature énergétique du bâtiment en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur (cf. Figure 10). Pour rappel l'enthalpie h est une grandeur physique qui représente la quantité de chaleur contenue dans l'air humide en intégrant à la fois la température et l'hygrométrie de l'air¹ :

$$h = 1.006 \cdot T_{ext} + 0.622 \cdot \frac{p_v}{P_{atm} - p_v} \cdot (2501 + 1.83 \cdot T_{ext}) \text{ en } \frac{kJ}{kg \text{ air sec}}$$

$$\text{avec } p_v = HR \cdot 10^{2.7877 + \frac{7.625 \cdot T_{ext}}{241.6 + T_{ext}}} \text{ en Pa}$$

où T_{ext} est la température extérieure en °C, P_{atm} est la pression atmosphérique en Pa, p_v la pression de vapeur en Pa, HR l'humidité relative en %

Figure 10 : Signature énergétique du bâtiment en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur (sept 2018-août 2019)



Le coefficient de corrélation est légèrement meilleur ($R^2=0.95$ plutôt que 0.90), cependant l'enthalpie de l'air extérieur est une grandeur moins parlante que la température extérieure pour un public non averti.

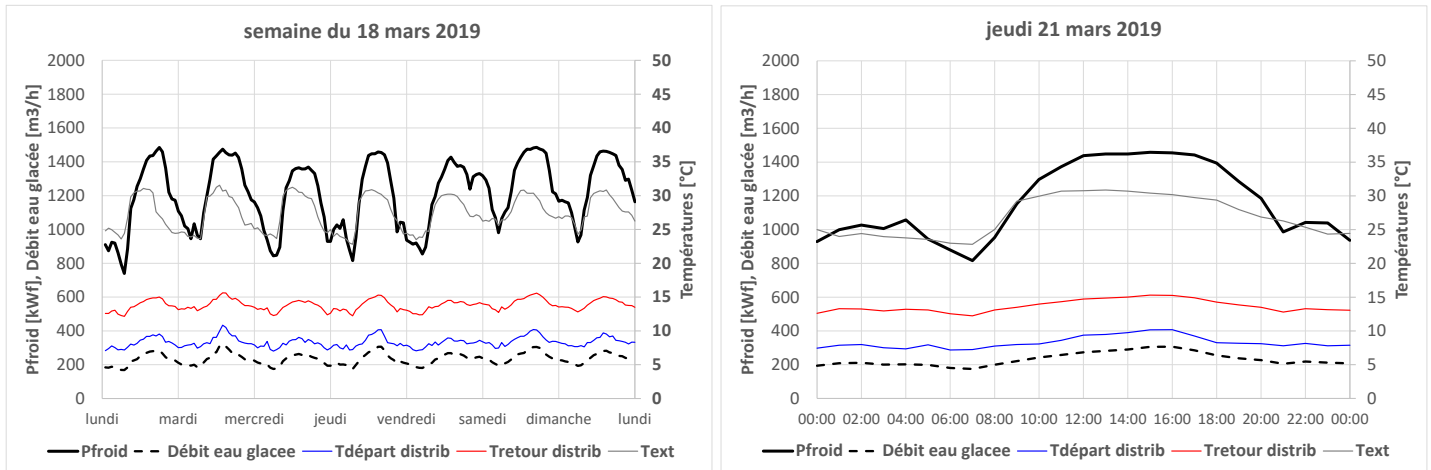
¹ <https://energieplus-lesite.be/theories/enveloppe9/proprietes-materiaux/grandeurs-hygrometriques/>

A noter que la même signature tracée en fonction de l’ensoleillement extérieur moyen journalier ne donne pas de corrélation, ce qui n’est pas étonnant si on considère que l’humidité relative dans l’air (élevée même lorsque l’ensoleillement est faible) compte pour une bonne partie de la demande de climatisation.

b. Profil de consommation

La Figure 11 présente le profil de demande de froid sur une semaine de mars 2019 ainsi qu’un zoom sur un jour de cette semaine.

Figure 11 : Profil de demande de froid sur une semaine d’été (gauche) et sur une journée type (droite)

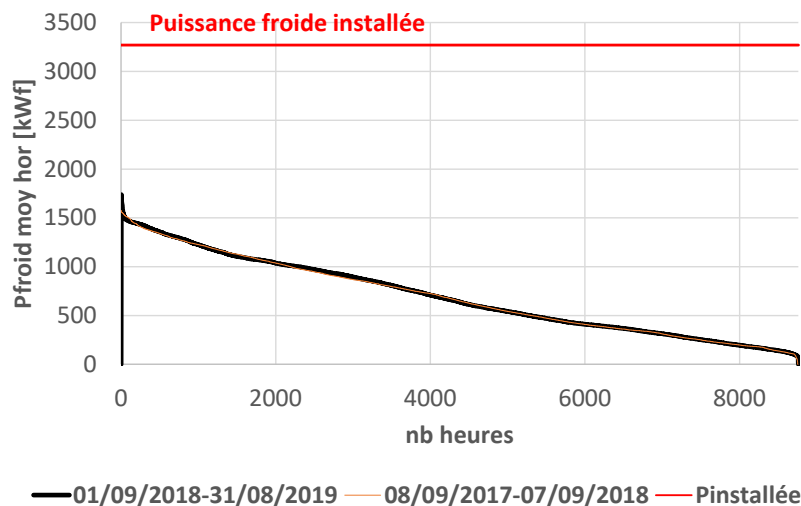


Le profil de demande de froid ne semble pas dépendre du jour de la semaine (la demande de froid n’est pas différente en week-end). La demande de froid augmente en milieu de journée, en partie en lien avec la température extérieure, probablement également en lien avec l’augmentation d’activité du site.

c. Monotone de puissance

Pour caractériser la structure de la demande de froid au cours de l’année, on la représente souvent en demande horaire classée sous la forme d’une courbe monotone (=puissances froides moyennes horaires sur une année classées de la plus grande à la plus petite). La Figure 12 présente la courbe monotone du site sur 3 années.

Figure 12 : Monotone de puissances froides sur l’année de référence (sept 2018-août 2019) ainsi que sur l’année précédente



On note la parfaite répétabilité de la structure de la demande de froid d’une année à l’autre. Il en découle une demande de froid annuelle très proche : 6075 MWhf sur l’année de référence contre 6053 MWhf l’année précédente soit une variabilité de moins de 0.4%.

On identifie visuellement le surdimensionnement de la puissance installée de 3300 kWf, soit ~150 Wf/m², par rapport à la puissance maximale appelée avec une valeur représentative de 1600 kWf en moyenne

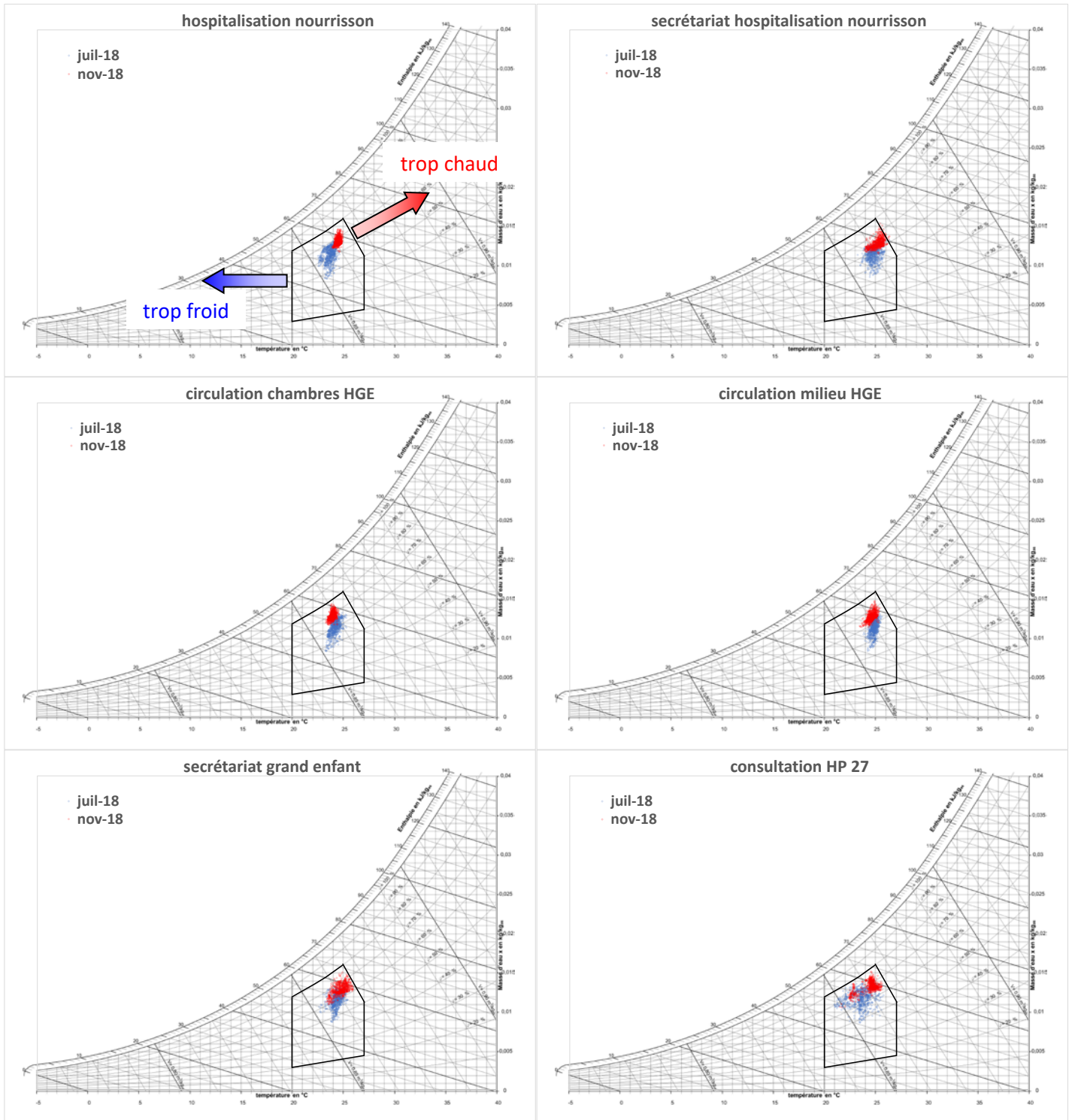
horaire (si on enlève les 10 plus grandes valeurs qu'on peut lier à des phénomènes de régulation plus qu'à un réel appel de puissance froide), soit $\sim 75 \text{ Wf/m}^2$ appelé au maximum.

d. Confort

Des sondes d'ambiance (température et humidité) ont été posées dans différents locaux (cf. localisation en Annexe 3). Les données mesurées ont été reportées sur des un diagramme bioclimatique utilisant la zone de confort de Givoni afin de visualiser le niveau de confort intérieur. Ce diagramme est construit sur un diagramme psychrométrique (appelé aussi diagramme de l'air humide). Pour schématiser, chaque point correspond à une mesure de température/humidité moyennée sur une heure. Les points se trouvant dans la zone délimitée par le polygone dessiné en noir représentent des situations de confort pour des vitesses d'air quasi-nulles, ce qui correspond aux vitesses que l'on peut mesurer dans un local climatisé et fermé. Les points à l'extérieur du polygone peuvent correspondre à des zones d'inconfort. Les points se trouvant sur la gauche du diagramme représentent des conditions trop froides pour être confortables, les points à droite des conditions trop chaudes. La Figure 13 (page suivante) présente les résultats obtenus sur un mois d'hiver et un mois d'été pour quelques pièces de l'étage R+1 (pédiatrie).

L'ensemble des locaux mesurés sont correctement climatisés, en hiver comme en été. Le confort est similaire en été et en hiver, ce qui témoigne d'une bonne régulation. Dans une perspective d'économies d'énergie, on pourrait cependant asservir le fonctionnement de la climatisation à l'occupation des locaux : nous n'avons pas de vision de l'utilisation effective des locaux mais il est probable que les salles dédiées au secrétariat ou aux consultations ne soient pas utilisées la nuit alors qu'elles sont climatisées en permanence (puisqu'on n'observe pas de dérive du confort).

Figure 13 : Confort intérieur dans quelques pièces de l'étage R+1 du PFME en hiver (juillet 2018, bleu) et en été (novembre 2018, rouge), valeurs horaires



4. Caractérisation des sous-systèmes

a. Production

Les performances instantanées de la production peuvent être caractérisées par l'EER (Energy Efficiency Ratio) qui est défini comme le rapport entre la puissance froide produite et la puissance électrique consommée (équivalent du Coefficient de Performance en production de chaleur). L'EER d'un GEG varie en fonction des paramètres de fonctionnement :

- Diminution de l'EER lorsque la différence entre la température d'évaporation et la température de condensation augmente pour une même puissance froide fournie (effet thermodynamique)

la température d'évaporation étant proche de la température de sortie du GEG et la température de condensation généralement liée à la température extérieure, les performances d'un GEG ont tendance à diminuer lorsque la température extérieure augmente ; cela n'est pas vrai dans le cas du PFME car il s'agit d'un système de condensation à eau si bien que la température de condensation est constante (malheureusement nous n'avons pas pu la mesurer) ; la température extérieure impacte tout de même les performances dans le sens où plus elle sera élevée, plus les drycooler vont devoir tourner pour maintenir une même température dans le circuit d'eau.

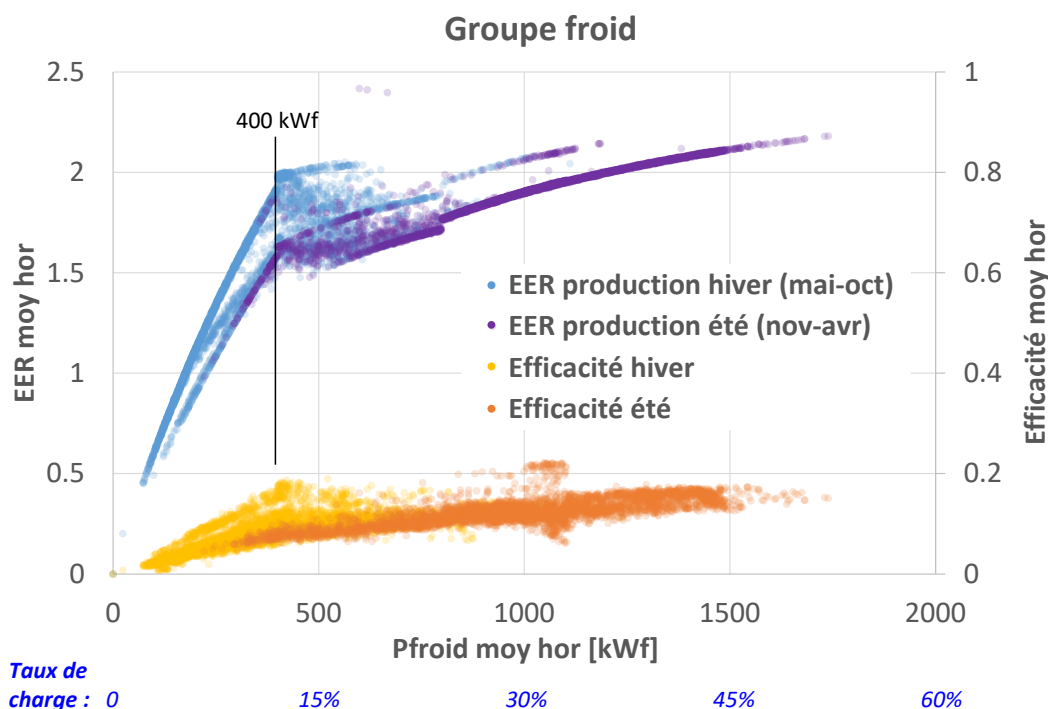
- Diminution de l'EER avec le taux de charge du GEG

d'une part car le fonctionnement n'est pas optimisé à faible charge (cyclages) mais surtout à cause des auxiliaires qui sont dimensionnés pour un fonctionnement à pleine charge et n'adaptent généralement pas leur fonctionnement aux faibles charges ; leur consommation est donc la même qu'à pleine charge mais leur impact sur l'EER est plus important car la puissance froide est plus faible qu'à pleine charge.

La Figure 14 présente la variation de l'EER des GEG (auxiliaires de production compris, hors pompes de distribution) en valeurs horaires en fonction de la puissance appelée sur la période de référence.

NB : Les EER ont été calculés en valeurs horaires sur la base des données de consommation reconstruites selon Pfroid pour les GEG et les drycooler (majoritaires) et les données réelles mesurées pour les autres auxiliaires. Le fait que le comportement de ces derniers soit très répétable aux Pfroides élevées (moins aux Pfroides faibles) explique qu'il n'y ait pas de dispersion des EER aux fortes Pfroides (ce qui ne serait pas vrai si on avait pu mesurer la consommation réelle des GEG et drycooler au lieu de la reconstruire). La reconstruction des consommations introduit nécessairement une erreur mais donne tout de même un aperçu réaliste des performances de la production de froid.

Figure 14 : Performances de la production d'eau glacée par les GEG en fonction de la puissance froide appelée (sept 2018-août 2019)



On discerne très nettement deux types de comportement :

- au dessus de 400 kWf (~12% de taux de charge), l'EER est compris entre 1.5 et 2.1, il a tendance à augmenter avec la puissance froide appelée ;

- en dessous de 400 kWf, l'EER s'écroule jusqu'à 0.5 lorsque la puissance appelée atteint 100 kWf (~3% de taux de charge).

Cela traduit très clairement l'impact de la consommation des auxiliaires sur les performances de la production, qui s'écroulent aux faibles charges (mais compensé par le fait que les appels de puissance sont faibles). A noter que ces valeurs sont faibles par rapport aux valeurs usuelles, mais :

- les valeurs usuelles ne sont généralement pas mesurées in-situ mais plutôt issues de données constructeur obtenues en laboratoire dans des conditions normées ;
- l'architecture hydraulique complexe de la production de froid implique la multiplication des auxiliaires et donc des performances plus basses malgré la taille plus importante de l'installation ;
- les taux de charges observés sont faibles (<50%), des performances plus élevées seraient probablement obtenues avec des taux de charge plus élevés.

L'efficacité, qui traduit l'éloignement du GEG mesuré par rapport à une machine thermodynamiquement « parfaite » montre des valeurs entre 0.01 et 0.17, qui augmentent avec la puissance appelée à cause du poids de la consommation des auxiliaires.

b. Distribution

Températures de travail

La Figure 15 présente les températures de travail sur le réseau EG (moyennes horaires) en fonction de la température extérieure sur la période de référence. La Figure 16 présente les mêmes données sous la forme de monotonnes de température (=valeurs classées de la plus grande à la plus petite).

Figure 15 : Températures de travail sur le réseau de distribution EG (sept 2018-août 2019)

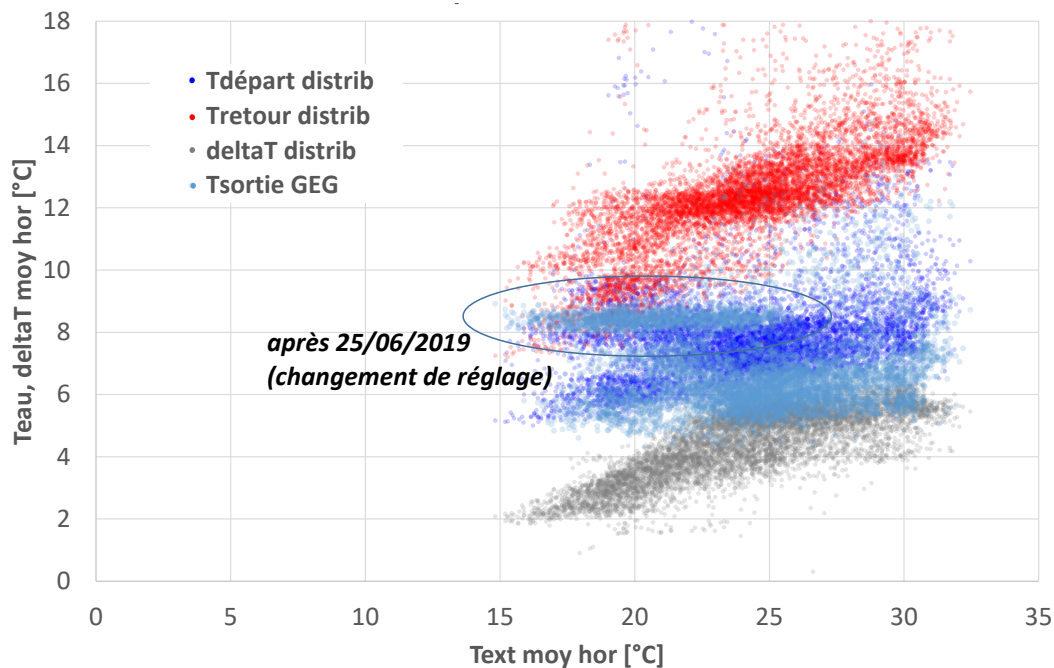
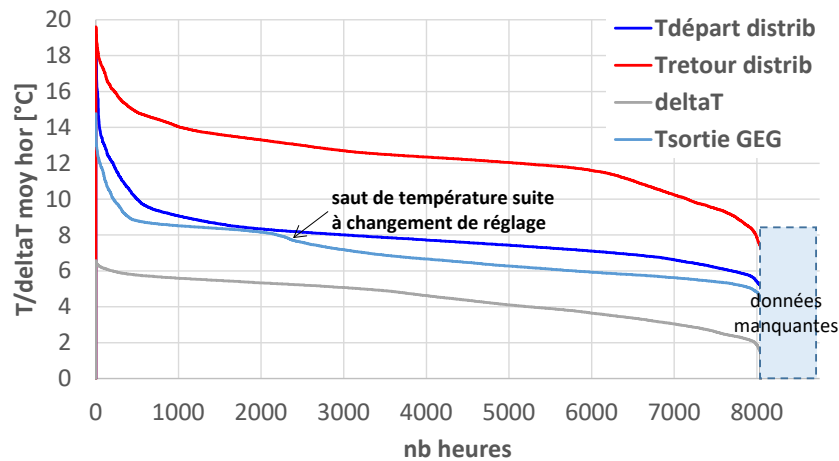


Figure 16 : Monotones de températures de départ/retour/ ΔT sur le réseau de distribution (sept 2018-août 2019)

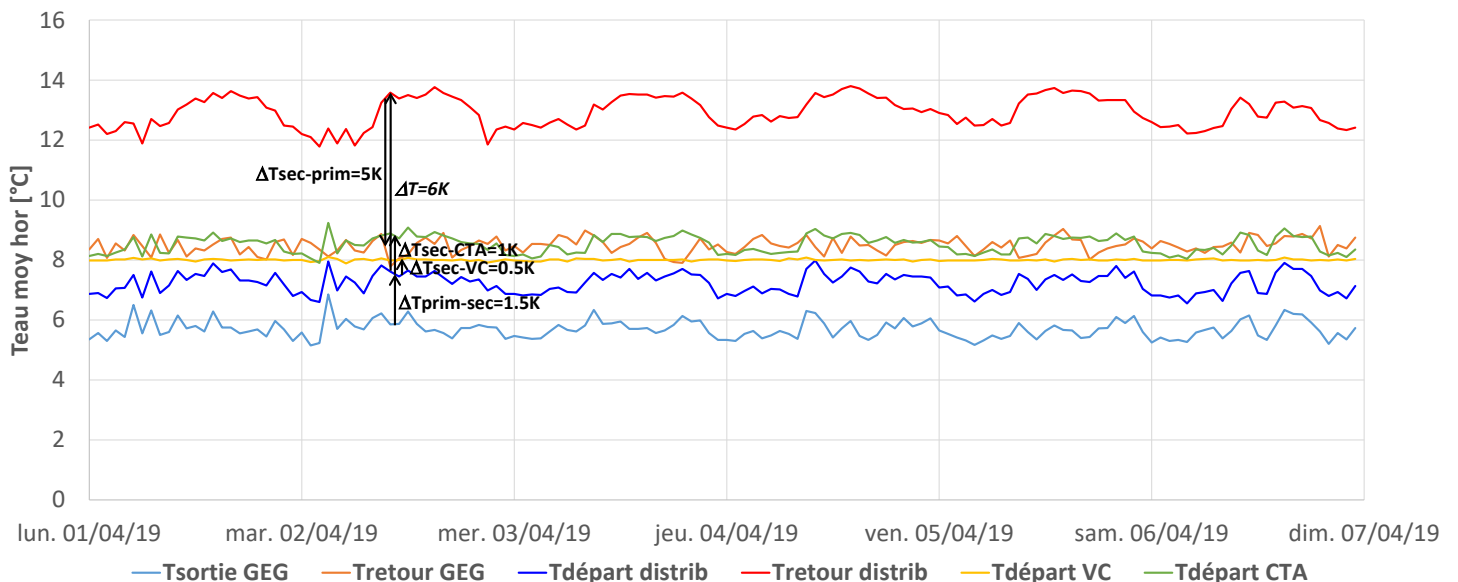


On n’observe pas de régulation claire de la température de production EG (Tsortie GEG) avec la température extérieure, seulement un saut de 6 à 8°C lié à un changement de réglage observable à partir du 25/06/2019.

La température de départ de la distribution (après bouteille de découplage) est majoritairement comprise entre 6 et 9°C, la température de retour de la distribution entre 10 et 15°C selon la saison. La différence de température entre départ et retour distribution augmente avec la température extérieure de 2 à 6 degrés, ce qui est plutôt correct par rapport à ce qui est observé sur les autres sites mesurés dans le cadre du projet (<2 degrés en permanence). Cela est possible grâce à la régulation de débit installée sur les pompes de distribution, qui permet de compenser leur important surdimensionnement par rapport à la demande réelle (cf. §III.2). Le ΔT est malgré tout inférieur à 5 degrés (valeur cible habituelle) 4700 heures par an soit plus de la moitié du temps.

La Figure 17 illustre les températures d’eau glacée en différents points du système sur une semaine :

Figure 17 : Températures de travail dans le système sur la semaine du 01/04/2019



Sur cet exemple, le cheminement est le suivant :

- La température de sortie du GEG est inférieure à 6°C.
- On note un ΔT de 1.5K entre Tsortie GEG et Tdépart distrib, qui s’explique très probablement par un mélange dans la bouteille de découplage qui n’a pas été réalisée dans les règles de l’art puisqu’elle est horizontale (on ne sait donc pas exactement ce qui se passe à l’intérieur).

- S'ajoute encore un ΔT de 0.5K entre Tdépart distrib et Tdépart VC ou un ΔT de 1K entre Tdépart distrib et Tdépart CTA. NB : La température de consigne du réseau VC est fixe (8°C mesuré) tandis que celle observée sur le réseau CTA varie entre 8 et 9°C.
- Le ΔT dû à la demande de froid est de 6K.
- Enfin, l'EG revient à l'entrée du GEG avec un ΔT de -5K par rapport à Tretour distrib, ce qui traduit un mélange important dans la bouteille (une bonne partie de l'eau glacée en sortie du GEG doit retourner directement vers l'entrée du GEG sans passer par la distribution à cause d'un déséquilibre probable des débits entre le circuit primaire et le circuit secondaire). Ce fonctionnement nuit aux performances du GEG à cause des retours trop froids.

Ainsi, l'empilement des ΔT péjore les performances de l'installation puisque l'EG doit être produite 2 à 3 degrés en dessous de ce qui est demandé par les réseaux de distribution.

Débit

La Figure 18 présente le débit de distribution ainsi que le ΔT correspondant (moyennes horaires) en fonction de la puissance froide appelée sur la période de référence. La Figure 19 présente les mêmes données sous la forme d'une monotone de débits (=valeurs classées de la plus grande à la plus petite).

Figure 18 : Différence de température distribution et débit d'eau glacée en fonction de la puissance appelée (sept 2018-août 2019)

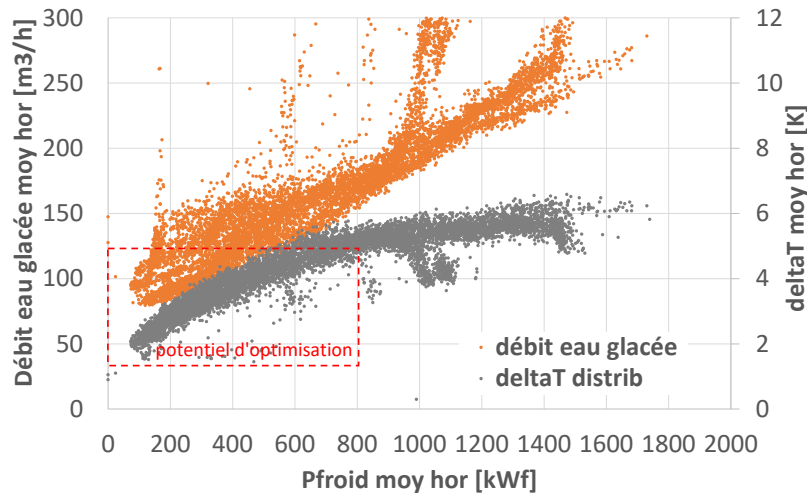
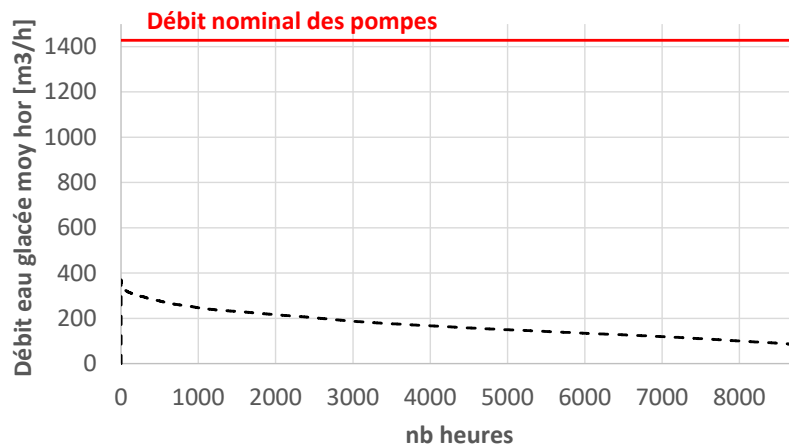


Figure 19 : Monotone de débits de distribution (sept 2018-août 2019)



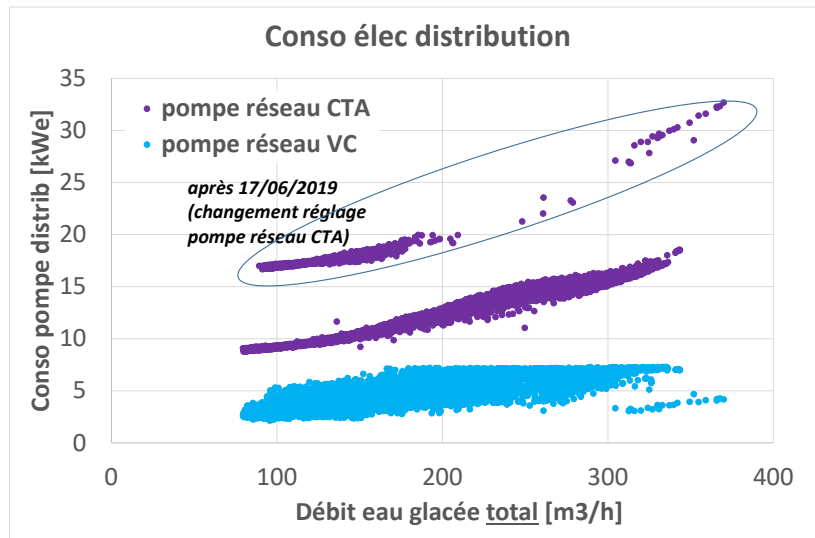
On note visuellement le très grand surdimensionnement des pompes de distribution par rapport à la demande de froid réelle, heureusement contrebalancée par la variation de vitesse en place sur les pompes. La régulation de débit n'est cependant pas valorisée parfaitement puisqu'elle ne permet pas d'atteindre en permanence un ΔT de 5K sur la distribution, essentiellement en hiver. Ce potentiel théorique est cependant

difficile à mobiliser dans le cas présent car les débits durant cette période sont faibles (les pompes fonctionnent déjà à leur minimum technique (20 Hz)).

Consommation électrique

La Figure 20 présente l'évolution de la consommation électrique des pompes de distribution des réseaux CTA et VC en fonction du débit d'eau glacée total sur la période de référence. *NB : Nous ne disposons malheureusement pas de mesure différenciée du débit sur chacune des branches.*

Figure 20 : Consommation électrique des pompes de distribution des réseaux CTA et VC selon le débit EG total (sept 2018-août 2019)



La consommation de la pompe de distribution du réseau CTA est bien plus importante que celle de la pompe de distribution du réseau VC, ce qui n'est pas étonnant étant donnée leur taille respective (débit max de 1180 m³/h contre 248 m³/h, même si cela ne préjuge pas de leur débit réel étant donné que les pompes sont à variation de vitesse). On note probablement un changement de réglage de la pompe du réseau CTA le 17/06/2019 (*NB : L'exploitant n'en a pas de trace*), qui mène à des consommations bien plus importantes à même débit (quasiment le double). Au final, la consommation des pompes de distribution augmente avec le débit d'eau glacée total, surtout pour le réseau CTA (mais on ne sait pas si le débit varie effectivement sur le réseau VC), d'un facteur 2 entre 12 et 25 kWe (puis entre 20 et 35 kWe) lorsque le débit total augmente d'un facteur 4 entre 80 et 330 m³/h. La consommation n'est donc pas proportionnelle au débit.

Au global, le ratio de consommation est compris entre 65 et 225 We/m³/h, et la consommation spécifique de 0.025 kWh/kWhf distribué, ce qui est faible.

c. Terminaux de climatisation

Le bâtiment est équipé de multiples terminaux de climatisation :

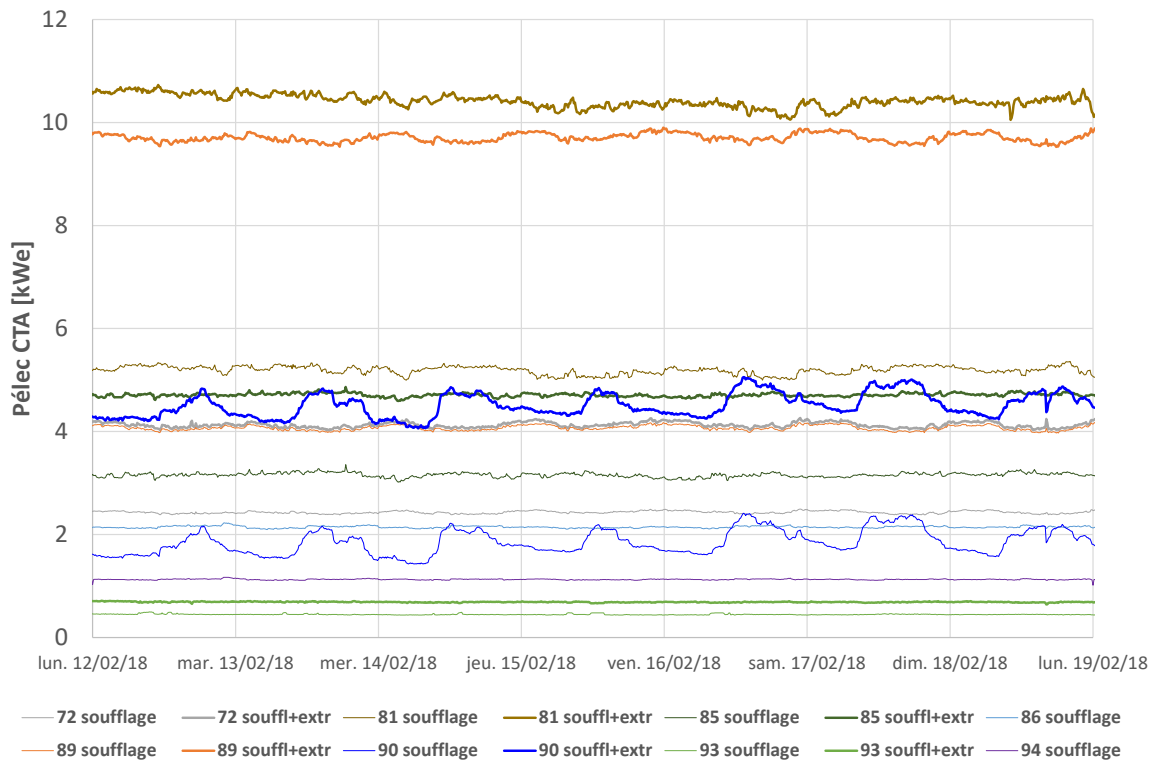
- 26 CTA qui assurent le traitement de l'air neuf
- 169 terminaux de type Varil'air dans les chambres (associés aux CTA), qui permettent de faire varier le débit en fonction de la température de consigne
- 282 ventilo-convecteurs de marque Bora dans les autres locaux

Nous n'avons pas pu instrumenter l'ensemble des terminaux mais seulement un échantillon (cf. Annexe 3).

CTA

Nous avons mesuré la consommation électrique de 8 CTA et de leurs extracteurs d'air associés. La Figure 21 présente les résultats obtenus sur une semaine d'été.

Figure 21 : Consommation électrique de quelques CTA et de leurs extracteurs (12-19/02/2018)



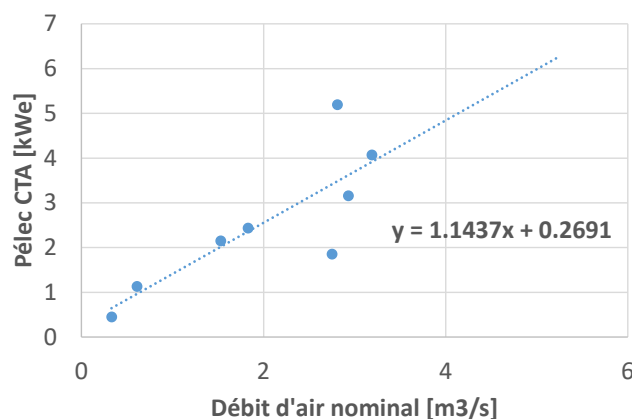
La consommation électrique des différents équipements est à peu près constante, ce qui montre un fonctionnement continu (24h/24, 7j/7) et sans variation de débit. A noter que le même schéma de fonctionnement est observé tout au long de l’année.

NB : Les CTA uniquement dédiées au traitement de l’air neuf des locaux (autres que les chambres) pourraient être coupées la nuit (ou a minima leur débit diminué) lorsque les locaux ne sont pas utilisés, ce qui représenterait une source conséquente d’économies d’énergie (à la fois sur les ventilateurs des CTA et sur la demande de froid).

Les CTA fonctionnent selon un principe extraction-soufflage. On note que la consommation des extracteurs est du même ordre de grandeur que celle de la CTA associée, ce qui n’est pas étonnant si on considère que les débits de soufflage et d’extraction sont généralement équivalents.

La Figure 22 montre une dépendance nette entre la puissance électrique de chaque CTA (soufflage uniquement) et son débit d’air nominal.

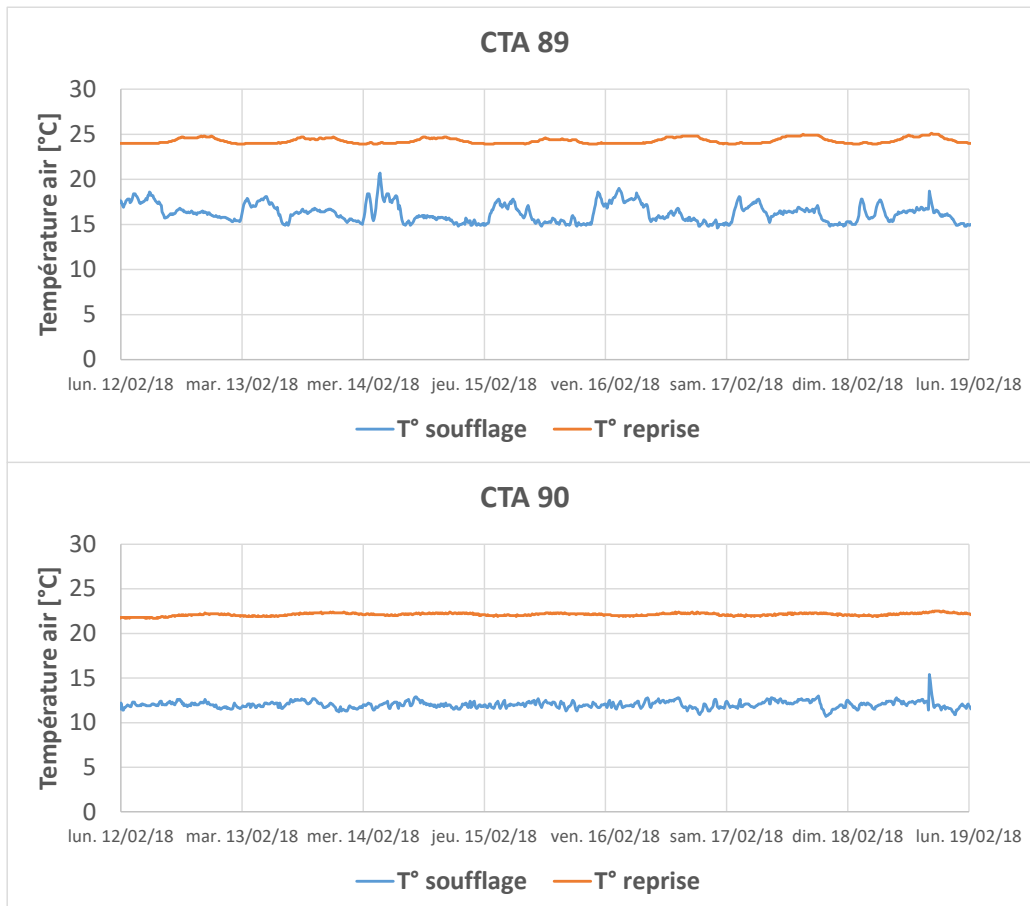
Figure 22 : Lien entre la puissance électrique mesurée de la CTA (soufflage) et le débit d’air nominal fourni par le constructeur



Cette relation nous a permis d'estimer la consommation électrique de l'ensemble des CTA à partir de leur débit nominal (cf. Annexe 4). En utilisant le ratio obtenu entre la puissance mesurée sur l'échantillon et la puissance théorique de l'ensemble des CTA, nous avons reconstruit la consommation totale des CTA sur l'année. **Ainsi la consommation des CTA et des extracteurs associés serait de l'ordre de 700 à 800 MWhe/an, soit 20-25% de la consommation d'électricité pour la production de froid.**

La Figure 23 montre un exemple de températures de soufflage/reprise sur les CTA 89 et 90 sur la même semaine.

Figure 23 : Exemple de températures de soufflage et reprise sur 2 CTA (12-19/02/2018)



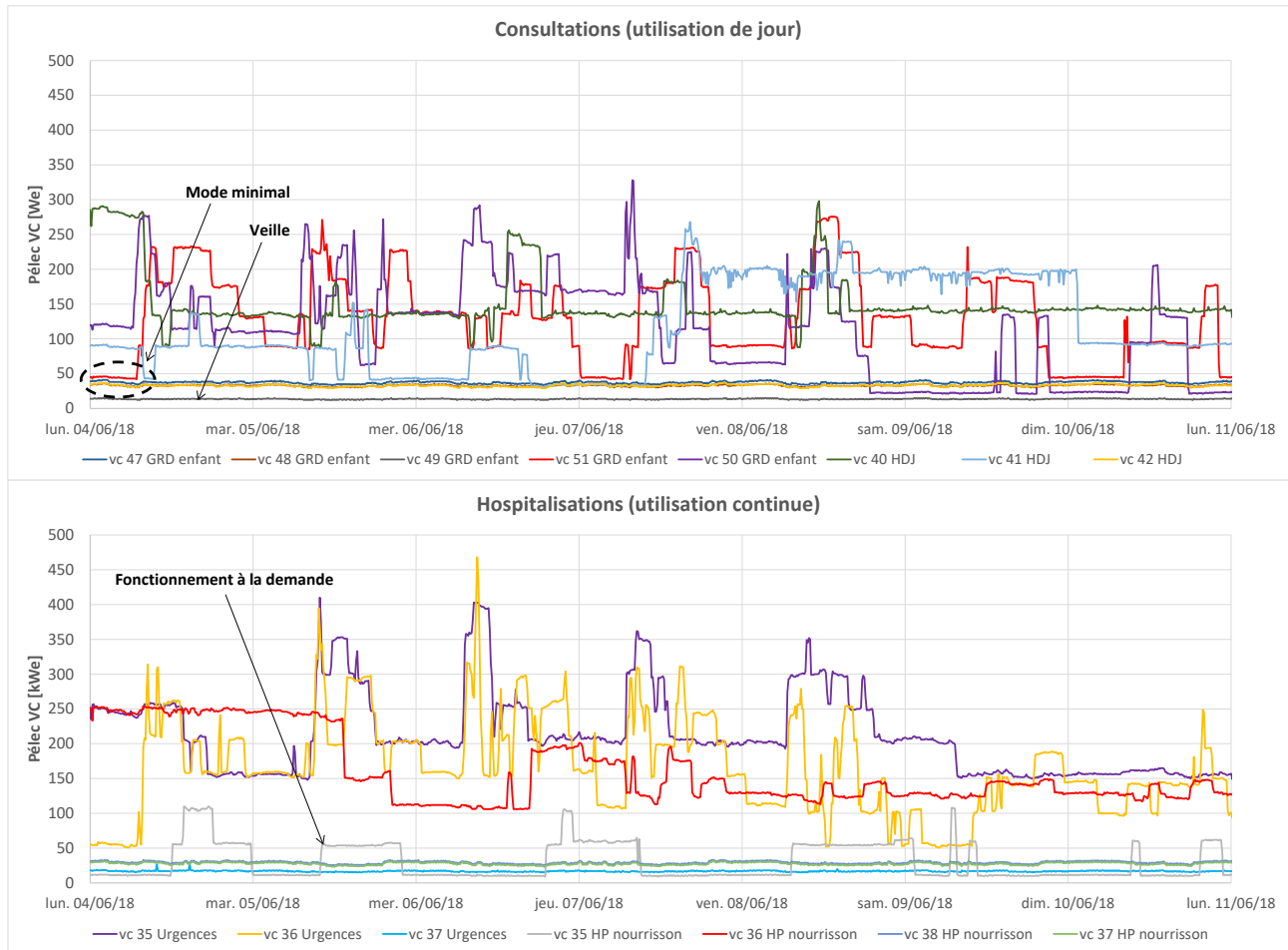
On peut faire les observations suivantes :

- Pour la CTA 89, la température de soufflage est comprise entre 15 et 18°C avec une reprise à 24°C, tandis que pour la CTA 90, la température de soufflage est de l'ordre de 12°C avec une reprise à 22°C.
- Dans les deux cas la température de soufflage est plus faible que la température ambiante, car les CTA ne font pas que traiter l'air neuf mais participent aussi à l'apport de climatisation selon les locaux.
- Pour la CTA 89 on observe une augmentation de la température de soufflage au cours de la nuit mais qui ne semble pas liée à de la régulation (pas à horaire fixe). On n'observe pas ce phénomène pour la CTA 90.

Ventilo-convecteurs

La Figure 24 présente la consommation électrique de quelques ventilo-convecteurs situés dans des locaux de consultation (utilisation en journée) et d'hospitalisation (utilisation continue) de l'étage R+1 (pédiatrie).

Figure 24 : Consommation électrique de quelques ventilo-convecteurs dans les zones de consultation et d'hospitalisation (04-11/06/2018)



On peut faire les observations suivantes :

- La puissance appelée par chaque ventilo-convecteur varie entre une $\sim 10\text{W}$ et $>400\text{W}$.
- On ne décèle pas de schéma de fonctionnement typique selon le mode d'utilisation des locaux (en journée ou en continu).
- Certains équipements ont l'air de rester constamment en veille ou en mode minimal tandis que d'autres fonctionnent en continu ou à la demande.

Il n'y a pas de comportement représentatif des ventilo-convecteurs qui nous permettrait d'extrapoler la consommation totale des ventilo-convecteurs à partir de la consommation de l'échantillon mesuré, d'autant que nous n'avons pas de vision sur l'occupation réelle des différents locaux.

Nous avons cependant estimé que la consommation maximale de l'ensemble des ventilo-convecteurs était de l'ordre de 900 MWh/an (si l'ensemble des équipements fonctionnait avec la même puissance que l'équipement le plus consommateur de l'échantillon mesuré). Dans la pratique on est probablement autour de la moitié de cette valeur, soit un ordre de grandeur comparable à celui de la consommation des CTA.

En conclusion, la consommation des terminaux de climatisation est souvent négligée dans les analyses alors qu'elle se révèle significative : dans ce cas **probablement plus de 30% de la consommation électrique dédiée à la production de froid à rajouter dans la comptabilisation des consommations électriques liées à la climatisation (dont à peu près 1/3 juste pour les extracteurs).**

IV. Projet de SWAC sur le site du CHU Sud

1. Contexte

Un projet de SWAC (Sea Water Air Conditioning) est en cours sur le site du CHU Sud. Les installations de production d'eau glacée existantes seraient substituées par un échangeur avec de l'eau de mer pompée à 1000m de profondeur (cf. Figure 26) afin d'atteindre une température suffisamment froide sans recours à une machine de froid. Le bâtiment étudié entre dans le périmètre du SWAC (cf. Figure 25), qui englobe également le bâtiment central (à peu près équivalent au PFME en termes de consommation de froid).

Figure 25 : Périmètre du projet de SWAC et bâtiment étudié

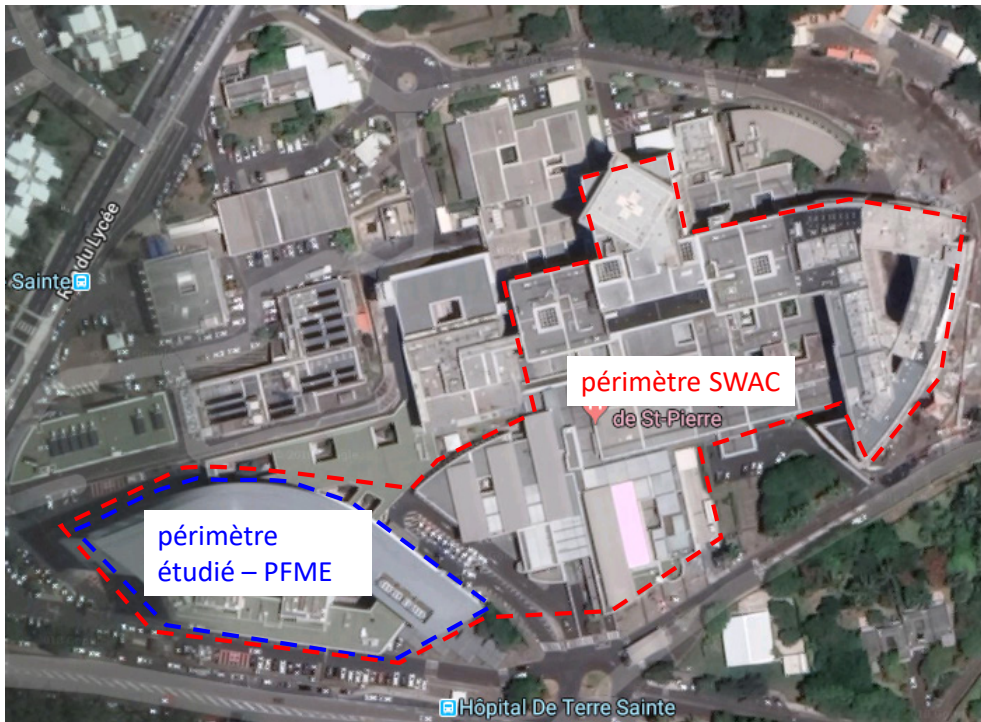
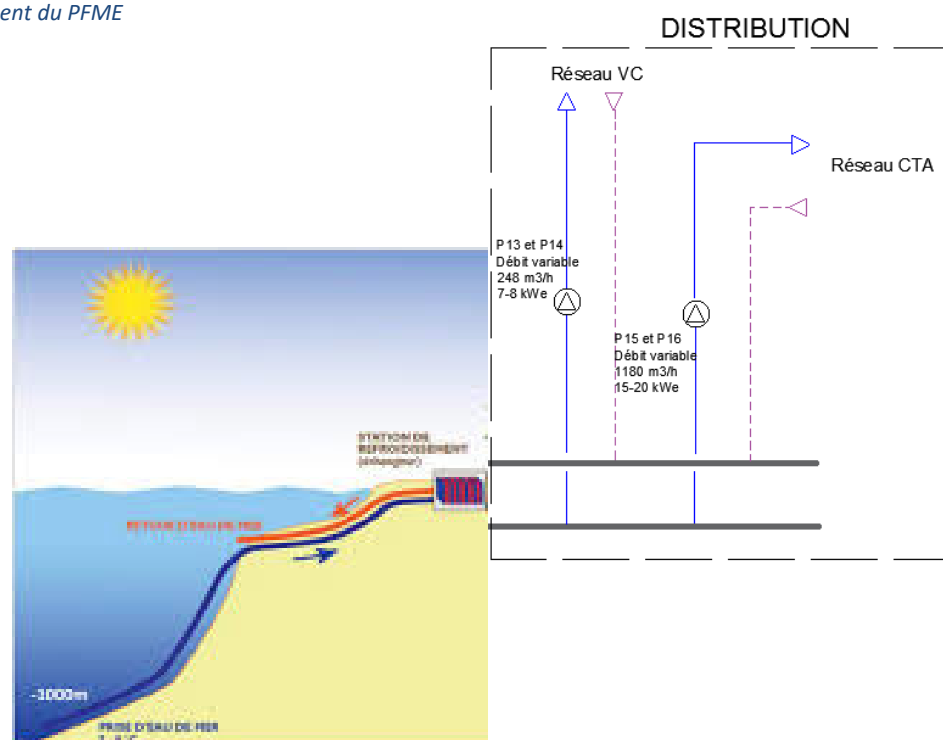


Figure 26 : Illustration de la substitution de l'installation de production d'eau glacée existante par le SWAC en conservant la distribution existante sur le bâtiment du PFME



Les distributions à eau glacée existantes seraient conservées. Les consommations électriques potentiellement effaçables par le SWAC sont donc uniquement celles en lien avec la production de froid (3.3 GWhe/an sur le PFME mais pas les 150 MWhe consommés par la distribution EG).

Le projet a été monté sur la base d'une demande de froid de 22 GWhf/an et une puissance de 6.6 MWf couverte par le SWAC. Les performances de référence (SEER) prises pour les installations de production d'eau glacée substituées sont de 3.2 en valeur moyenne annuelle. La consommation retenue pour le PFME dans le cadre du projet SWAC est de 11 GWhf/an pour une puissance maximale appelée de 3.9 MWf. Ces valeurs sont très différentes de celles effectivement mesurées dans le cadre du projet SWACool comme le montre le Tableau 4.

Tableau 4 : Comparaison des hypothèses prises en référence dans le montage du projet de SWAC avec les données mesurées pour le bâtiment du PFME

	<i>hypothèses projet SWAC</i>		<i>mesuré (SWACool)</i>
	Périmètre SWAC	dont PFME	PFME
Demande de froid	22 GWhf/an	11 GWhf/an	6 GWhf/an
Puissance max appelée	6.6 MWf	3.9 MWf	1.6 MWf
SEER	3.2	3.2	1.8

On note un écart important entre les hypothèses retenues pour le dimensionnement du projet SWAC et les données mesurées sur le bâtiment du PFME :

- Demande de froid annuelle surestimée d'un facteur 1.8
- Puissance max appelée surestimée d'un facteur 2.4
- SEER surestimé d'un facteur 1.8

Il est probable que de tels écarts soient également valables sur le reste du périmètre (bâtiment central) sur lequel on ne dispose pas de mesures. Ces surestimations ont un impact potentiellement important sur l'économie du projet SWAC :

- surcoût à l'investissement à cause du surdimensionnement inutile du système par rapport aux appels de puissance réels
- estimation erronée du coût du kWh substitué avec une facture électrique en lien avec la production de froid plus élevée dans la réalité que les valeurs prises en référence

Nous avons rapidement transmis ces éléments concernant le PFME au maître d'ouvrage, ce qui leur a déjà permis de faire évoluer le projet mais il apparaît important d'approfondir la connaissance de la demande de froid du périmètre complet (pas seulement du PFME) afin de cibler les enjeux énergétiques réels et dimensionner l'installation au plus juste (important au vu du montant des investissements consentis).

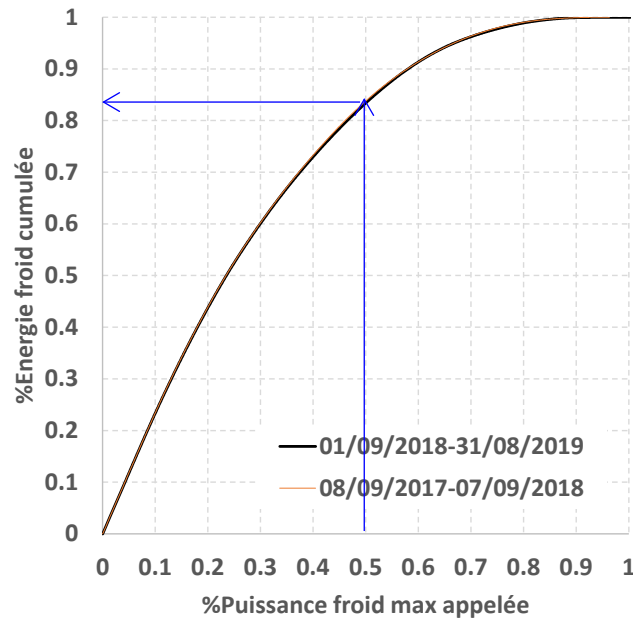
2. Réflexion sur les enjeux à préciser dans la conception du projet SWAC

a. Structure de la demande de froid

Comme on le voit sur la Figure 12, la puissance maximale appelée est de l'ordre de 1600 kWf et seulement quelques heures dans l'année : elle est 99% du temps inférieure à 1500 kWf. La puissance maximale appelée est par ailleurs bien inférieure à la puissance installée de 3300 kWf : cette dernière ne doit pas être prise en référence pour le dimensionnement du système de SWAC sous peine de fort dimensionnement préjudiciable pour l'économie du projet.

La Figure 27 propose une autre représentation des données de la courbe monotone qui permet une lecture du lien entre énergie et puissance : elle présente la part de l'énergie cumulée produite en dessous d'un certain niveau de puissance relative :

Figure 27 : Part de l'énergie cumulée produite en dessous d'un niveau de puissance relative sur le PFME sur les deux années de suivi

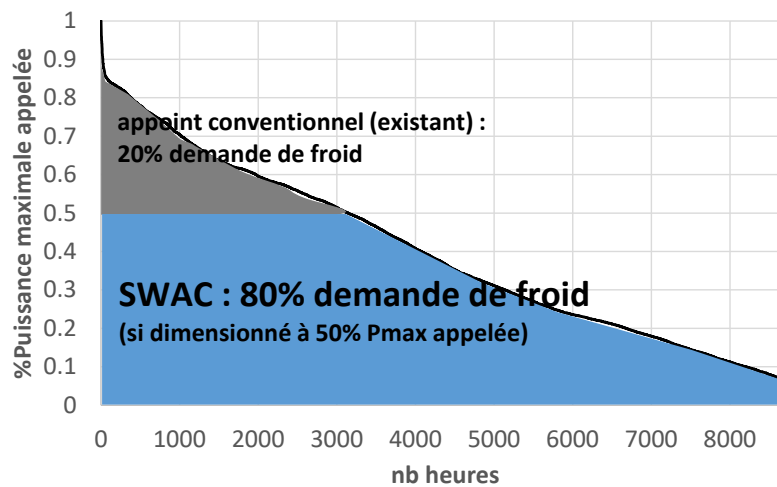


Ainsi, cette représentation permet de lire que plus de 80% de l'énergie froide est fournie à moins de 50% de la puissance maximale appelée sur l'année (NB : Il s'agit de la puissance maximale **appelée** sur l'année et non de la puissance installée). En d'autres termes, si on n'avait installé que la moitié de la puissance maximale appelée, on fournirait déjà plus de 80% de la demande de froid, la 2^{ème} moitié de la puissance n'étant sollicitée que pour moins de 20% restants. Notons également la parfaite répétabilité de la structure de la demande de froid d'une année sur l'autre (comme déjà vu au §III.3.c).

Dans le cas d'un système de production de froid vertueux comme le SWAC, le poids des investissements est généralement lourd (en comparaison avec un système conventionnel) et fortement dépendant de la puissance installée. Le juste dimensionnement de la puissance de l'installation est donc un enjeu important pour assurer la viabilité du projet. Il est alors pertinent de dimensionner la puissance du SWAC bien en dessous de la puissance maximale appelée, puisqu'on a vu qu'un dimensionnement à 50% de la puissance maximale appelée dans l'année permettait déjà de couvrir 80% de la demande en énergie. Les 20% restants peuvent être couverts par les installations conventionnelles existantes qui peuvent être conservées pour constituer un appoint/secours. Un dimensionnement au-delà de 50% de la puissance maximale appelée va apporter très peu d'énergie supplémentaire (ex : 60% Pmax amène 8% d'énergie froid couverte en plus, 70% Pmax encore 4%, 80% Pmax 1.5%, 90% Pmax seulement 0.5% en plus avec 99.98% de l'énergie froide couverte).

La Figure 28 représente sur la courbe monotone normalisée (=ramenée à la Pmax appelée) la part de la demande de froid annuelle couverte respectivement par une installation SWAC dimensionnée à 50% de la Pmax appelée et par l'appoint conventionnel. NB : Les quantités d'énergie sont représentées par les aires.

Figure 28 : Représentation de la part de la demande de froid annuelle couverte respectivement par une installation SWAC dimensionnée à 50% de la puissance maximale appelée et par l'appoint conventionnel

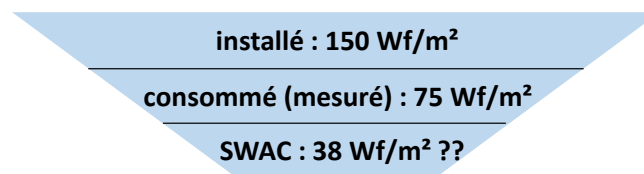


On voit que l'appoint conventionnel ne serait utile que 3000 heures dans l'année (et seulement 20% de l'énergie), le SWAC suffisant à couvrir la demande à lui-seul le reste du temps s'il est dimensionné à 50% de la Pmax appelée.

Pour exploiter au mieux la complémentarité des énergies, il est donc pertinent de **viser 80% d'énergie couverte par le SWAC** soit 50% de la puissance maximale appelée (et non 80% de la puissance) avec un appoint en puissance par du conventionnel, les systèmes vertueux étant plus intensifs en investissement que les systèmes conventionnels. C'est encore plus vrai dans le cas comme ici où le système SWAC vient en remplacement d'installations conventionnelles déjà existantes (donc sans besoin d'investissements supplémentaires). La marge de puissance ainsi que la redondance éventuelle doivent être intégrées dans le conventionnel et non dans les SWAC (car moins cher et peu d'enjeu énergétique). Il ne faut surtout pas se baser sur la puissance installée en place pour dimensionner le SWAC (au PFME surdimensionnement facteur 2) mais sur la puissance réellement appelée pour éviter tout surinvestissement inutile.

La Figure 29 illustre visuellement la « pyramide » des puissances sur l'exemple du PFME :

Figure 29 : Pyramide des puissances sur le site du PFME



Ainsi sur le site du PFME, la puissance installée est de 150 Wf/m², la puissance réellement consommée uniquement de 75 Wf/m² (la moitié) et la puissance qu'il faudrait prévoir pour le SWAC est encore la moitié de la Pmax appelée soit 38 Wf/m². On arriverait au final à une puissance SWAC de 800 kWf pour le bâtiment du PFME, à comparer aux 3.9 MWf retenus dans le projet...

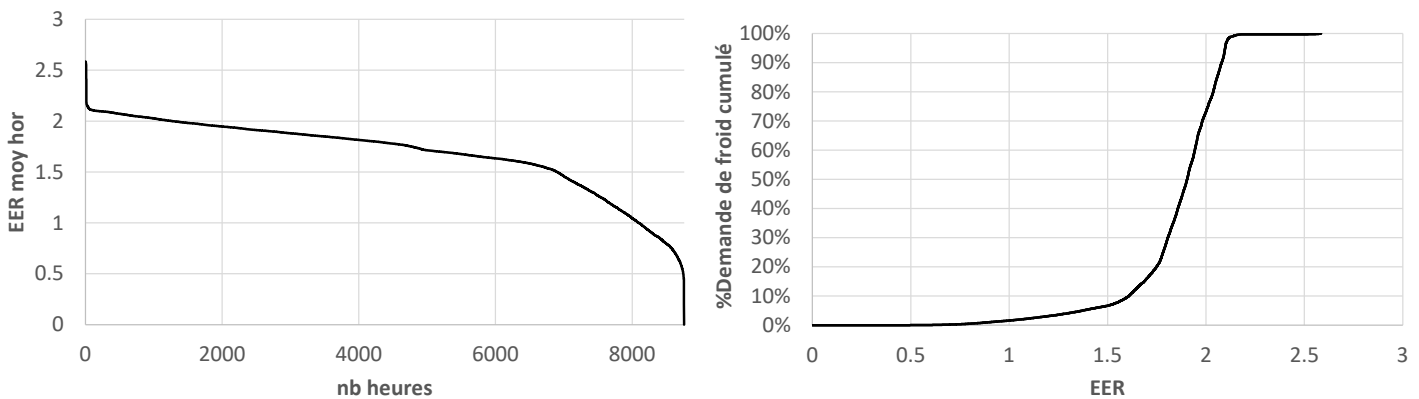
Il faudrait faire la même analyse pour l'ensemble du périmètre SWAC et en particulier le bâtiment central, pour lequel une demande de froid à peu près équivalente à celle du PFME a été retenue dans le projet, qui aboutirait donc à une puissance à couvrir par le SWAC équivalente à celle du PFME. Au final, cette démarche conduirait probablement à un **dimensionnement optimal de la puissance SWAC de l'ordre de 2 MWf** (à comparer aux 6.6 MWf retenus dans le projet initial), le complément de puissance (probablement encore 2 MWf) restant couvert par les installations conventionnelles existantes. Ces éléments montrant le risque élevé de surdimensionnement si on connaît mal le profil de demande réel du site : **au vu des enjeux financiers, il est pertinent de mettre en œuvre des compteurs de frigories sur l'ensemble du périmètre en amont du projet pour permettre d'optimiser le dimensionnement.**

b. Performances de la production actuelle

La connaissance des performances de la production de froid actuelle permet de déterminer le coût réel (électricité seulement) de l'énergie froide qui sera substituée par le SWAC, et donc les économies d'exploitation générées grâce au SWAC (important pour estimer la viabilité du projet).

La Figure 30 présente la courbe monotone des EER en moyenne horaire (=valeurs classées de la plus grande à la plus petite) (gauche) et la part cumulée de l'énergie produite à chaque niveau de performance (droite) pour la période de référence.

Figure 30 : Monotone des EER (gauche) et part cumulée de l'énergie produite à chaque niveau de performance (droite) (sept 2018-août 2019)



La valeur maximale représentative pour l'EER est de 2.1 (la valeur de 2.5 est atteinte seulement quelques heures dans l'année donc non représentative). L'installation fonctionne 1300h au-dessus d'un EER de 2 et 6900h au-dessus d'un EER de 1.5. Elle fonctionne tout de même 700h en dessous d'un EER de 1 (i.e. 1 kWhf produit moins d'1 kWhf).

Il est cependant intéressant de noter que :

- moins de 7% de la demande de froid est produite avec un EER<1.5 (correspondant à moins de 11% de la consommation d'électricité)
- l'énergie produite avec un EER<1 représente moins de 2% de la demande de froid totale (correspondant à moins de 4% de la consommation d'électricité)

En effet, les EER sont les plus faibles en hiver à cause de taux de charges très faibles (cf. III.4.a). Le fonctionnement à faible EER est donc compensé par le fait que la demande de froid est également très faible, ce qui fait que les quantités d'énergie en jeu ne sont pas significatives par rapport aux périodes de fonctionnement à plus forte de demande de froid. **L'impact énergétique de l'écroulement des performances à faible taux de charge (en hiver) n'est donc pas très important.**

L'écart entre les performances réelles (1.8) et les performances retenues dans le projet (3.2) est par contre impactant. Avec un SEER de 3.2, on aboutit à une consommation spécifique de 0.31 kWhf/kWhf (~30 €/MWhf) tandis qu'avec un SEER de 1.8, on aboutit à une consommation spécifique de 0.56 kWhf/kWhf (~55 €/MWhf), soit environ le double du coût pris en référence dans le projet. **On comprend l'importance de bien connaître les performances de la production de froid en place (au lieu de se baser sur des valeurs usuelles notoirement surestimées) afin d'estimer correctement le coût de l'énergie substituée car celui-ci impacte significativement la viabilité du projet.**

c. Optimisation de la distribution

Dans un système comme le SWAC, il faut veiller à utiliser l'eau pompée le mieux possible en maximisant le ΔT donc en diminuant les débits de distribution (en effet c'est le débit d'eau pompé en mer qui coûte cher). Les pompes de distribution en place sur le site du PFME étant très surdimensionnées, il ne faut surtout pas se baser sur leur dimensionnement nominal pour estimer le débit nécessaire au refroidissement du site car on installerait un débit surdimensionné d'un facteur 4 par rapport à ce qui est nécessaire (cf. §III.2), ce qui pénaliserait fortement les investissements !

Il faut également veiller à maximiser la température de distribution de l'eau glacée afin de réduire la profondeur à laquelle pomper l'eau de mer. Cependant, le découplage hydraulique actuel (avec une bouteille horizontale) implique de produire l'eau glacée 2 degrés plus froid que la température effectivement distribuée à cause du mélange dans la bouteille (cf. §III.4.b), ce qui obligerait à pomper l'eau de mer plus profond que nécessaire : ce défaut doit impérativement être corrigé afin d'optimiser les coûts d'infrastructure.

V. Conclusions

Le bâtiment du PFME du CHU Sud à St Pierre a été sélectionné comme site d'étude pour le projet SWACool. Dans ce cadre les installations de climatisation ont été instrumentées sur une longue durée (2017-2019), aussi bien au niveau de la production d'eau glacée, de la distribution d'eau glacée qu'un échantillon des terminaux de climatisation.

La puissance installée est de 3.3 MWf répartie en 3 groupes d'eau glacée, alimentant un réseau CTA et un circuit ventilo-convecteurs grâce à des pompes à débit variable. La surface climatisée est de 22000 m². La demande annuelle de froid est de 6 GWhf, soit ~275 kWhf/m²/an : cette valeur peut paraître élevée mais il faut tenir compte de l'usage hospitalier du site, avec une climatisation toute l'année 24h/24 et 7j/7. La consommation électrique associée à la climatisation (hors terminaux) est de l'ordre de 3.5 GWhe/an (dont 150 MWhe pour la distribution d'eau glacée), soit un SEER annuel (production seule) de 1.8.

Cette valeur est faible par rapport à la valeur de référence de 3 considérée habituellement, mais elle est cohérente avec celle mesurée sur les autres sites d'étude. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, la taille conséquente des installations ne favorise pas les performances car elle complexifie l'architecture hydraulique et multiplie le nombre d'auxiliaires (nombreuses pompes d'eau glacée, drycooler... pour une puissance totale de 250 kW_e) : les mesurées ont montré que la consommation électrique des auxiliaires était du même ordre de grandeur que celle du groupe de production de froid seul.

La consommation totale des terminaux n'a pas pu être mesurée étant donné le nombre élevé d'équipements (26 CTA et 280 ventilo-convecteurs) mais nous l'avons évaluée à partir de l'échantillon mesuré. Ainsi les CTA (+extracteurs) consommeraient entre 700 et 800 MWhe/an, la consommation des ventilo-convecteurs est probablement du même ordre de grandeur. Au final, les terminaux représenteraient plus de 30% de la consommation électrique dédiée à la production de froid : on néglige souvent la consommation des terminaux car leur puissance unitaire est petite par rapport à celle de la production de froid, mais ils sont nombreux et fonctionnent souvent en permanence (ou en tous cas sur des temps longs) ce qui fait que leur consommation est au final significative.

Le suivi énergétique a mis en évidence un surdimensionnement d'un facteur 2 par rapport à la demande de froid réelle, qui s'explique en partie par la redondance des équipements imposée par la nécessité de continuité de service en cas de panne d'un groupe de production de froid mais pas seulement (une redondance d'un facteur 1.5 correspondant à la puissance d'un groupe froid supplémentaire aurait suffi). Ce surdimensionnement est préjudiciable aux performances de l'installation notamment car l'ensemble des auxiliaires est généralement dimensionné pour la puissance nominale alors que l'installation fonctionne à puissance réduite. C'est par exemple le cas des pompes de distribution d'eau glacée qui sont surdimensionnées d'un facteur 4 mais fort heureusement à débit variable ce qui permet de maîtriser leur consommation en fonctionnant avec des ΔT corrects (2 à 6 degrés). La difficulté à connaître la demande de froid d'un bâtiment *a priori* est cependant un frein au bon dimensionnement des installations, qui est de ce fait guidé par une démarche conservatrice menant à surdimensionner généreusement les équipements pour être sûrs d'assurer la prestation.

Le bâtiment étudié fait partie du périmètre d'un projet de SWAC dédié au CHU-Sud : le travail réalisé dans le cadre de ce projet a permis de questionner les hypothèses prises pour le PFME pour le dimensionnement du projet : un volume de 11 GWhf/an avait été retenu pour une demande mesurée de 6 GWhf/an. De même, la puissance max appelée retenue était de 3.9 MWf (*NB : proche de la puissance installée actuelle*) tandis que la valeur mesurée est 1.6 MWf... Un surdimensionnement qui se révèle dramatique dans le cadre d'un tel projet où le poids des investissements est prépondérant et fortement dépendant de la taille des installations. Pour optimiser les investissements, il y a même un intérêt à dimensionner le SWAC à une puissance inférieure à la puissance max appelée et à conserver les installations conventionnelles existantes en appoint, la structure de la demande de froid montrant que plus de 80% de l'énergie est fournie à moins de 50% de la puissance max appelée dans l'année : l'impact énergétique de doubler la puissance du SWAC n'est donc pas élevé (au contraire de l'impact économique). La marge de puissance et la redondance peuvent donc avantageusement être assurées par le conventionnel qui est de plus déjà présent sur le site.

Il faut également veiller à utiliser l'eau pompée du mieux possible en maximisant le ΔT afin de diminuer les débits de distribution (en effet c'est le débit d'eau pompé qui coûte cher). Le débit de distribution pris en référence est également un point-clé et ne doit en aucun cas être pris égal au débit nominal actuel car ce dernier est surdimensionné d'un facteur 4. De la même manière, maximiser la température de distribution de l'eau glacée (compris entre 6 et 9°C à l'heure actuelle) permet de pomper l'eau de mer moins en profondeur et donc de diminuer les coûts d'infrastructure. Ainsi, le défaut observé sur le découplage hydraulique doit impérativement être corrigé sans quoi l'eau devrait être pompée 2 degrés plus froid que nécessaire.

Enfin, les performances retenues pour la production de froid actuelle sont bien plus élevées que les performances mesurées ce qui aboutit à sous-estimer drastiquement les coûts évités par la substitution du froid par le SWAC (~30 €/MWhf pris en référence contre ~55 €/MWhf dans la réalité) et à désavantager injustement le modèle économique du SWAC.

A noter qu'il serait intéressant dans la prolongation du projet SWACool de mener un retour d'expérience complet sur l'opération SWAC-Sud si celle-ci vient à se concrétiser...

Annexe 1

Caractéristiques techniques des groupes de production de froid York YLCS 1110 HA

le : 22 Décembre 2008

BP 309 - 44473 CARQUEFOU CEDEX

Fax : 02.40.30.62.13

Tél : 02.40.30.62.00

à : Mr Philippe PASQUET

Sté : ALISEA

V/Réf : GHSR PFME

Total pages : 3

NOTRE OFFRE N°0709668E rev F

Monsieur,

Pour faire suite à votre demande référencée ci-dessus dont nous vous remercions, nous vous prions de bien vouloir trouver ci-après notre meilleure offre pour la fourniture du matériel **INDUSTRIEL** (unité de fabrication **ISO 9001**) suivant :

**1)- 3 GROUPES DE PRODUCTION D'EAU GLACEE A CONDENSATION A EAU
EQUIPE DE 2 COMPRESSEURS SEMI-HERMETIQUES INDUSTRIELS A VIS.**

Fiche technique

**YLCS 1110HA ECO - Refroidisseur de liquide, cond. à eau, comp. Bi-vis
(pour installation intérieure)**

Type et taille de l'unité

Nombre et type de compresseurs	(Nb / Type)	2 / Bi-Vis - semi hermétique
Nombre de circuits frigorifiques	(Nb)	2
Etages de réduction de puissance		15 / 27 / 39 / 51 / 63 / 75 / 87 / 100

Caractéristiques techniques

Type de réfrigérant		R134a
Puissance frigorifique	(kW)	1090
Puissance absorbée aux compresseurs	(kW)	302.2
Classe Eurovent		C
ESEER		5.76
Pression sonore à 10m *	(dBA)	70

* Méthode des 5 côtés, en champs libre, sans réflexion

Evaporateur

Nombre et type	(Nb / Type)	1 / Multitubulaire
Volume total en eau	(L)	500
Température entrée / sortie d'eau	(°C)	12 / 7
Débit d'eau	(L/s)	50.6
Perte de charge	(kPa)	54
Facteur d'encrassement	(m ² K/kW)	0
Diamètre des raccords	(in)	10

Condenseur à eau

Puissance calorifique	(kW)	1277
Nombre et type	(Nb / Type)	2 / Multitubulaire
Volume total en eau	(L)	63 / 63
Température entrée / sortie d'eau	(°C)	42 / 47
Débit d'eau	(L/s)	61.1
Perte de charge	(kPa)	118
Facteur d'encrassement	(m ² K/kW)	0.018
Diamètre des raccords	(in)	4 / 4

Caractéristiques électriques

Alimentation puissance	(V/Ph/Hz)	400 / 3 / 50
Nombre d'alimentations puissance		1
Intensité nominale du groupe	(A)	556
Intensité maximale du groupe (pour la taille des câbles)	(A)	656
Intensité de démarrage compresseurs 1 / 2	(A)	507 / 507 *
Intensité maximale instantanée du groupe	(A)	835 *

Alimentation en 1 point sur sectionneur et fusibles individuels (CE)

* Démarrage étoile / triangle (à transition ouverte)

Poids et dimensions

Poids d'expédition	(kg)	6000
Poids en fonctionnement	(kg)	6630
Charge de réfrigérant (R134a)	(kg)	172
Longueur hors tout	(mm)	4036
Largeur hors tout	(mm)	1300 *
Hauteur hors tout	(mm)	2145 *

* sans anti-vibratiles.

Notes :

La section des câbles doit être définie avec l'intensité maxi.

L'intensité nominale est basée sur les conditions: sortie d'eau glacée à 7 °C et sortie d'eau condensateur à 45 °C

L'intensité maximale est basée sur les conditions: sortie d'eau glacée à 15 °C et sortie d'eau condensateur à 58 °C

L'intensité maximale instantanée est basée sur les conditions: sortie d'eau glacée à 15 °C et sortie d'eau condensateur à 60 °C

Cable d'alimentation triphasé avec terre sans neutre

Equipements inclus :

- . 2 Compresseurs à vis **industriels semi-hermétiques YORK**
- . Démarrage étoile-triangle à transition ouverte.
- . Vannes d'isolement compresseur au refoulement.
- . 1ère charge d'huile.
- . Isolation des parties froides.
- . Disjoncteur circuit de contrôle.
- . Permutation de séquence des compresseurs pour l'équilibrage des temps de fonctionnement.
- . Affichage des paramètres de fonctionnement (point de consigne, pressions, températures, intensités, défauts).
- . Câble d'alimentation unique de l'armoire de démarrage et de contrôle (version standard)

Accessoires en option:

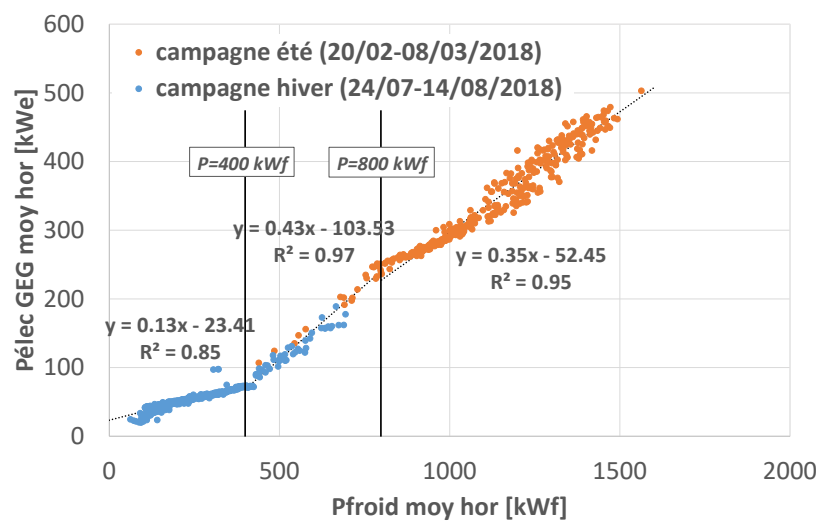
	Inclus	Non Inclus
* Contrôleur de débit (à monter par vos soins)	[X]	[]
* Patins résilients anti-vibratiles	[X]	[]
* Couche de peinture finale	[X]	[]
* Economiseur	[X]	[]

Annexe 2

Caractérisation de la consommation électrique des groupes de production de froid en fonction de la puissance froide fournie (campagnes de mesure du 20/02-08/03/2018 et du 24/07-14/08/2018)

La puissance absorbée par les GEG est trop importante par rapport au matériel de mesure dédié aux mesures en continu. Nous avons donc caractérisé la consommation des GEG au moyen de deux analyseurs de réseau PEL 103 (Chauvin Arnoux) lors de 2 campagnes de mesure de plus de 2 semaines (une en été, une en hiver) afin de couvrir l'intégralité de la plage de puissance.

On note une nette dépendance de la consommation électrique des GEG avec la puissance froide fournie :



En 1^{ère} approximation, on peut considérer que la relation entre les deux est « linéaire par morceaux », à savoir qu'on a identifié 3 domaines de puissance correspondant à des comportements quasiment linéaires :

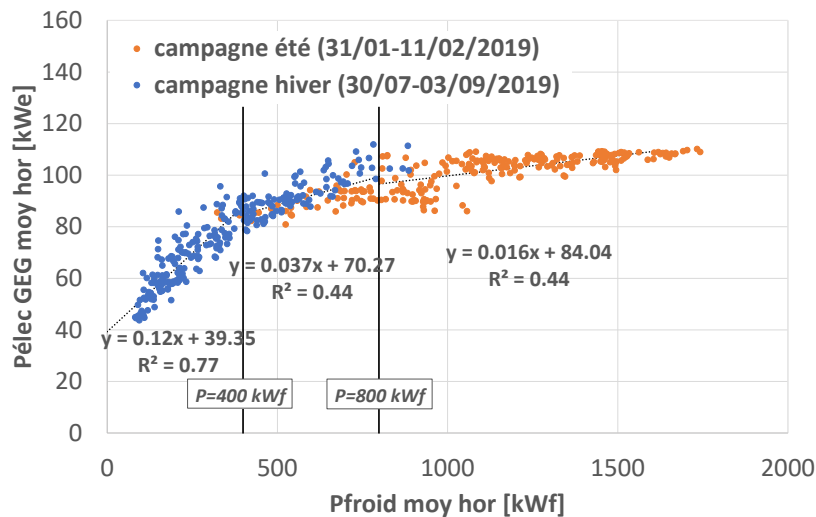
- $P_f < 400 \text{ kWf} : P_{GEG} = 0.13 \cdot P_f - 23.41$ avec $R^2 = 0.85$
- P_f entre 400 et 800 kWf : $P_{GEG} = 0.43 \cdot P_f - 103.53$ avec $R^2 = 0.97$
- $P_f > 800 \text{ kWf} : P_{GEG} = 0.35 \cdot P_f - 52.45$ avec $R^2 = 0.95$

Ces corrélations permettent de reconstruire la consommation électrique horaire des GEG à partir de la puissance froide horaire fournie (mesurée), ce qui permet de remonter à la consommation annuelle des GEG avec une bonne précision. *NB : La corrélation à faible puissance est un peu moins bonne mais les énergies en jeu sont moins élevées si bien que l'erreur est plus faible.*

Caractérisation de la consommation électrique des drycooler en fonction de la puissance froide fournie (campagnes de mesure du 31/01-11/02/2019 et du 30/07-03/09/2019)

La configuration électrique ne nous a pas permis d'installer le matériel de mesure en continu sur les drycooler alors que leur puissance absorbée est significative (6x20 kWe soit 120 kWe). Nous avons donc procédé de la même manière que pour les GEG sous la forme de 2 campagnes de mesure de plus de 2 semaines chacune grâce à un analyseur de réseau PEL 103 (Chauvin Arnoux).

On observe une dépendance de la consommation électrique des drycooler avec la puissance froide fournie :



Les corrélations sont moins bonnes que pour le GEG, mais pour simplifier nous pouvons de la même manière considérer 3 domaines de puissance :

- $P_f < 400$ kWf : $P_{drycooler} = 0.12 \cdot P_f + 39.35$ avec $R^2 = 0.77$
- P_f entre 400 et 800 kWf : $P_{drycooler} = 0.037 \cdot P_f + 70.27$ avec $R^2 = 0.44$
- $P_f > 800$ kWf : $P_{drycooler} = 0.016 \cdot P_f + 84.04$ avec $R^2 = 0.44$

Ces corrélations permettent de reconstruire la consommation électrique horaire des drycooler à partir de la puissance froide horaire fournie avec une précision acceptable (meilleure que si on considérait une valeur fixe). *NB : Les corrélations au-delà de 400 kWf ne sont pas bonnes, cependant on lit clairement la tendance graphiquement et la pente est faible si bien que l'erreur est modérée. La pente à faible puissance est plus importante mais la corrélation est meilleure.*

Annexe 3

Plan d'instrumentation des mesures électriques, frigorifiques et températures
(hors mesures ponctuelles et GTC)

Etage	Pièce	Type	Unité	Désignation	N° sonde	Rmq	Date début
SS	salle des machines	P	W	dép. mot. pompe n°1 DRY P1	603	faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°2 DRY P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°3 DRY P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°4 DRY P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°5 DRY P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°6 DRY P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°1 EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°2 EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°3 EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°4 EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°5 EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°6 EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°1 VC EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe n°2 VC EG P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. soufflage CTA 86 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. soufflage CTA 94 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe CTA EG n°1 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. mot. pompe CTA EG n°2 P1		faire x3	07/12/2016
		CF	kWh/L	compteur frigorifiques clim		enregistreur	07/09/2017
étage technique	local CTA 90-93	P	W	dép. soufflage CTA 72 P1	685	faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. extracteur CTA 72 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. soufflage CTA 90 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. extracteur CTA 90 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. soufflage CTA 93 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. extracteur CTA 93 P1		faire x3	07/12/2016
	T°	°C	soufflage CTA 90	2117		07/12/2016	
	T°	°C	reprise CTA 90	4072		07/12/2016	
	local CTA 89	P	W	dép. soufflage CTA 81 P1	597	faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. extracteur CTA 81 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. soufflage CTA 85 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. extracteur CTA 85 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. soufflage CTA 89 P1		faire x3	07/12/2016
		P	W	dép. extracteur CTA 89 P1		faire x3	07/12/2016
T°		°C	soufflage CTA 89	3320		07/12/2016	
T°		°C	reprise CTA 89	3206		07/12/2016	

R+1	TD NR urgence pédiatrique	P	W	alim ventilo n°35	787		07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°36			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°37			07/12/2016
	TD NR GRD enfants/ados	P	W	alim general ventilo n°47 à n°50	690		07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°47			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°48			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°49			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°51			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°50			07/12/2016
	TD HDJ pédiatrie (consultation)	P	W	alim ventilo n°40	677		07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°41			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°42			07/12/2016
	TD NR HP nourrissons (hospitalisation)	P	W	alim ventilo n°35	735		07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°36			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°37			07/12/2016
		P	W	alim ventilo n°38			07/12/2016
	chambre 152	THR	°C/%	ambiance	1891		07/12/2016
		T°	°C	soufflage/reprise ?	3070		07/12/2016
	circulation consultation	THR	°C/%	ambiance	3433		07/12/2016
		T°	°C	soufflage	2610		07/12/2016
	secrétariat grand enfant	THR	°C/%	ambiance	853		07/12/2016
		T°	°C	soufflage	2637		07/12/2016
	secrétariat consultation	THR	°C/%	ambiance	28		07/12/2016
		T°	°C	soufflage	2893		07/12/2016
	box consultation	THR	°C/%	ambiance	773		07/12/2016
		T°	°C	soufflage	2372		07/12/2016
	circulation chambres HGE	THR	°C/%	ambiance	160		07/12/2016
		T°	°C	soufflage	2309		07/12/2016
	circulation milieu HGE	THR	°C/%	ambiance	113		07/12/2016
		T°	°C	soufflage	2213		07/12/2016
HJ 14 CN	THR	°C/%	ambiance	707		07/12/2016	
	T°	°C	soufflage VC	2903		07/12/2016	
	THR	°C/%	ambiance couloir	1756		07/12/2016	
	T°	°C	soufflage couloir	3210		07/12/2016	
hospitalisation nourrisson	THR	°C/%	ambiance	168		07/12/2016	
	T°	°C	soufflage	2325		07/12/2016	
consultation HP 27	THR	°C/%	ambiance	234		07/12/2016	
	T°	°C	soufflage	2608		07/12/2016	
secrétariat nourrisson hospit.	THR	°C/%	ambiance	343		07/12/2016	
	T°	°C	soufflage	2749		07/12/2016	

46 mesures de puissance électrique

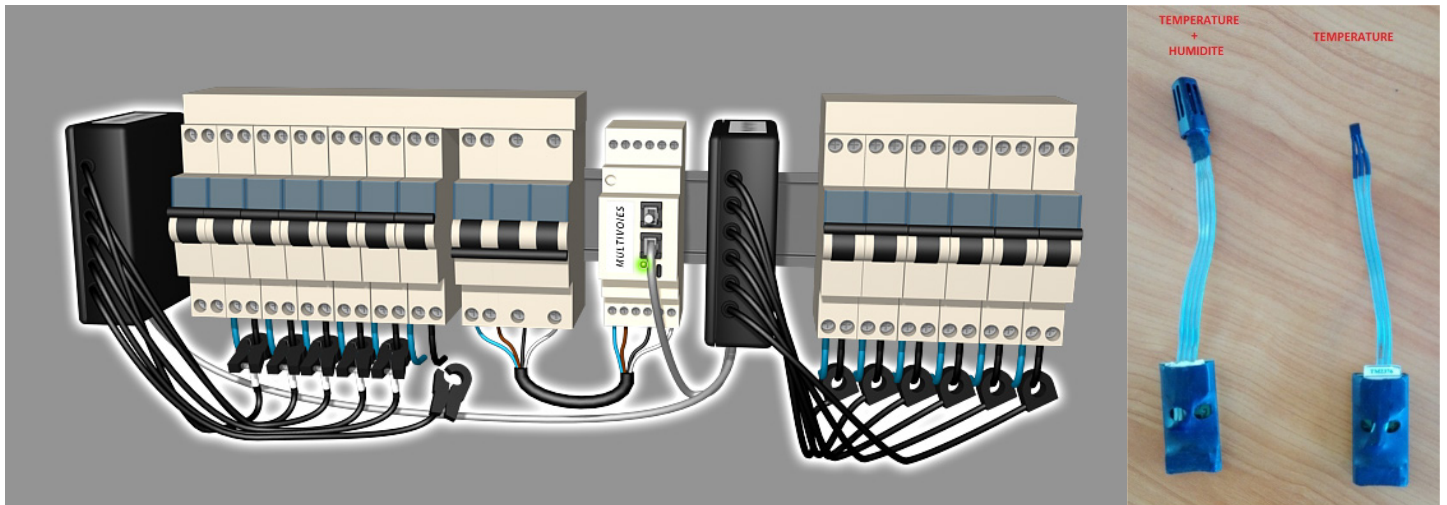
16 mesures de température

12 mesures de température/humidité

1 compteur de frigories

75 points de mesure

La figure suivante montre une vue des enregistreurs de puissance électrique de type Omegawatt (gauche) ainsi que des sondes de température/humidité (droite).



Emplacement des sondes de température au R+1 du bâtiment (page suivante)

⊗ T° et HR

⊗ Intensité des TD.

POLE FEMME MERE ENFANT

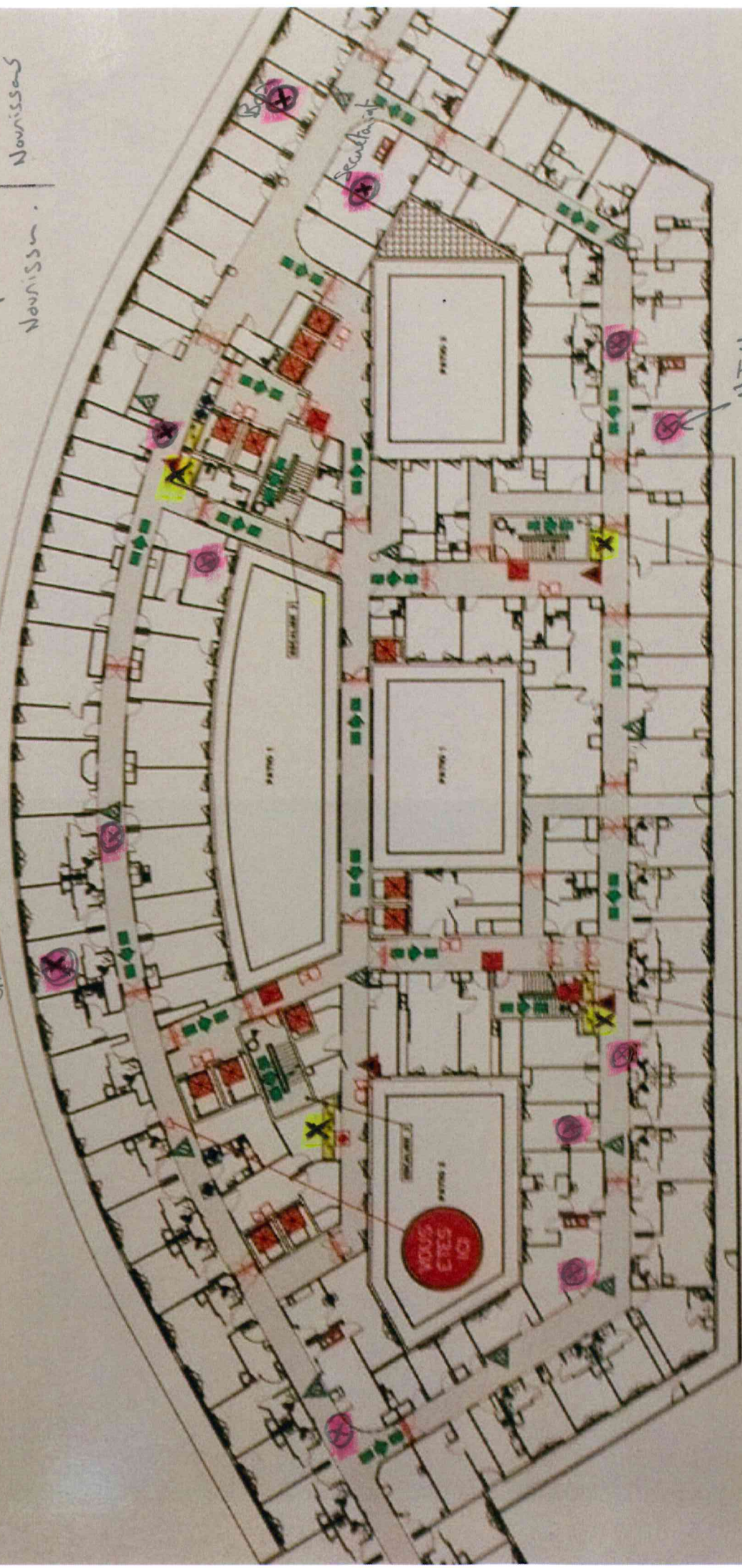
Chambre 152

Hospitalisation
grand enfants

Hospitalisation
Nourissons.

Consultation
grands enfants

Consultation
Nourissons



ASU
consultation

NIVEAU 1

Annexe 4

Débit nominal des différentes CTA (selon DOE)

CTA n°	débit nominal
	m ³ /s
70	2.64
71	1.57
72	1.83
73	2.30
74	2.47
75	1.25
76	0.69
77	0.56
78	1.25
79	0.44
80	2.81
81	2.81
82	0.83
83	5.02
84	3.25
85	2.93
86	1.53
87	1.44
88	3.00
89	3.19
90	2.75
91	5.22
92	0.42
93	0.33
94	0.61
95	0.30