



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 :

Bureaux de la CAF – St Paul

Résultats de mesure

Livrable 1.2a

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>10</u>
1. BILAN ENERGETIQUE.....	10
2. DIMENSIONNEMENT.....	12
3. DEMANDE DE FROID	12
A. SIGNATURE ENERGETIQUE.....	12
B. PROFIL DE CONSOMMATION.....	14
C. MONOTONE DE PUISSANCE	15
D. CONFORT.....	16
4. CARACTERISATION DES SOUS-SYSTEMES	18
A. PRODUCTION EG	18
B. DISTRIBUTION EG.....	20
C. TERMINAUX DE CLIMATISATION EG	21
<u>IV. EVOLUTION DES INSTALLATIONS</u>	<u>24</u>
1. RESUME DE LA SITUATION ACTUELLE	24
2. PROJET DE RENOVATION	24
3. NOTRE ANALYSE	25
A. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE	25
B. DIMENSIONNEMENT	25
C. SUIVI.....	26
<u>V. CONCLUSIONS.....</u>	<u>27</u>
<u>ANNEXE 1</u>	<u>28</u>

Nomenclature

Abréviations

AN	air neuf
CTA	centrale de traitement d'air
DD	détente directe
EG	eau glacée
GEG	groupe d'eau glacée
GTC	gestion technique centralisée
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	$EER = \frac{P_f \text{ (kWf)}}{P_{\text{élec consommée (kWe)}}$
-----	-------------------------	--

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...)

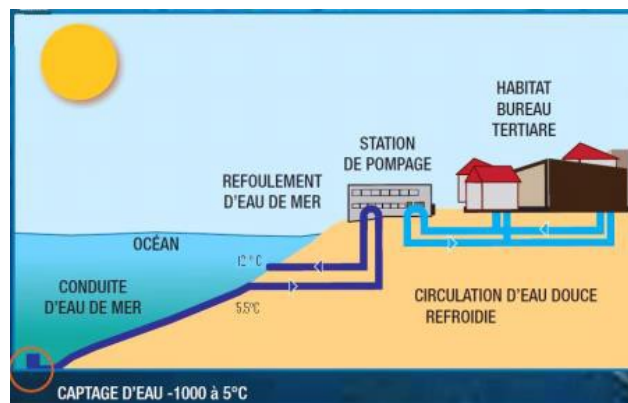
I. Introduction

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 des bureaux de la CAF à St Paul (Livrable 1.2a).

II. Site étudié

1. Description du bâtiment

Le site étudié est un bâtiment de bureaux de la CAF à St Paul (Savannah).

Figure 2 : Localisation du site étudié



Le bâtiment étudié comporte deux étages, avec une surface ouverte au public et des bureaux essentiellement en open space au rez-de-chaussée et des bureaux et salles de réunions au R+1 (qui ne couvre pas toute la surface du rez-de-chaussée). La surface du bâtiment est de 1260 m², il date de 2001. Il est climatisé toute l'année avec une coupure en inoccupation (nuit, week-end, jours fériés).

Figure 3 : Vues du bâtiment de la CAF



La production de froid est assurée par 1 groupe d'eau glacée York UK 500L 2HP de 100.5 kWf à 2 étages. Il alimente en direct un réseau d'eau glacée desservant deux réseaux de VC au RDC et au R+1. Une CTA indépendante du réseau EG (détente directe) de 2450 m³/h et 20 kWf a été ajoutée en 2015 pour assurer le traitement de l'air neuf du rez-de-chaussée (NB : Au R+1, l'air neuf apporté n'est pas prétraité). L'extraction d'air se fait par les sanitaires. Deux cassettes supplémentaires (cf. Figure 4) initialement alimentées en direct par des panneaux photovoltaïques (mais à l'heure actuelle par l'électricité du réseau) ont été ajoutées dans un 2^{ème} temps pour pallier à un problème de confort dans la salle d'attente au rez-de-chaussée. Enfin, un split indépendant assure la climatisation du local technique. La Figure 5 montre une vue du groupe de production de froid (extérieur) et la Figure 6 le schéma de principe de l'installation.

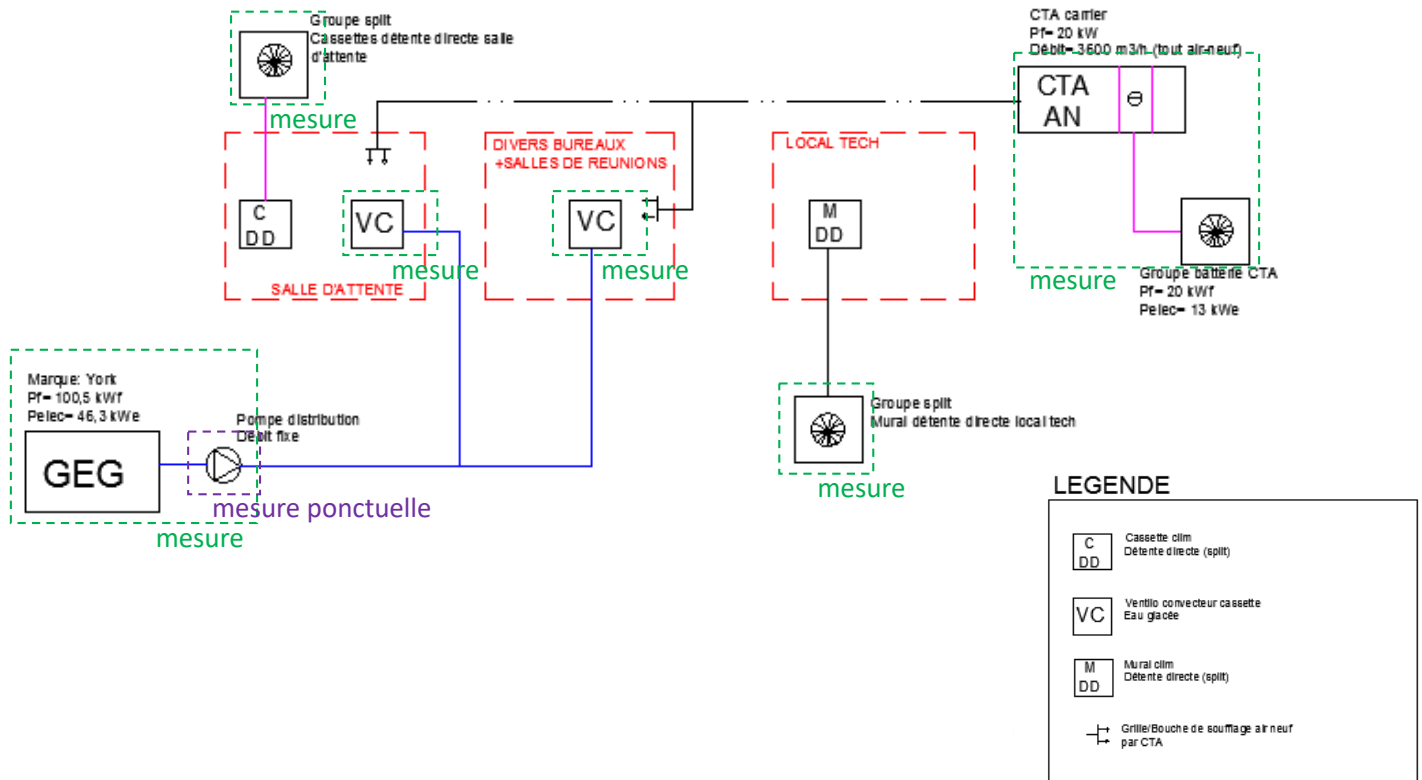
Figure 4 : Vue d'une des cassettes rajoutées



Figure 5 : Vue du groupe de production de froid



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



Le site n'a pas de GTC mais le GEG est équipé d'une horloge hebdomadaire, qui est également réglée manuellement par le responsable sécurité du site pour les situations exceptionnelles (jour férié par exemple). La maintenance de l'ensemble des équipements était assurée par la société Engie.

2. Instrumentation

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

- production EG
- distribution EG
- terminaux de climatisation EG
- CTA à détente directe

Elle a été complétée par les données météorologiques fournies par la station Météo France du Port. L'ensemble des mesures a bénéficié d'un pas de temps d'enregistrement de 10 min.

Un compteur de frigories Siemens SITRANS FUE380 a été installé sur le réseau EG pour mesurer la demande de froid du site (cf. Figure 7).

Figure 7 : Vue du compteur de frigories installé sur le réseau EG



Les équipements instrumentés (consommation électrique) sont mentionnés sur la Figure 6. Les VC du RDC et du R+1 sont ramenés sur un seul départ électrique par étage si bien que nous avons pu facilement mesurer leur consommation. Les mesures de consommation électrique ont été accompagnées de mesures de température/hygométrie 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 1 présente l'ensemble des points de mesure installés en continu sur le site (22 points de mesure en tout) de mai 2018 à novembre 2019 et le schéma de positionnement des capteurs de température disséminés dans le bâtiment.

Etant donnée l'étendue de la période d'instrumentation, une période de référence a été sélectionnée pour les analyses présentées dans la suite : du 01/06/2018 au 31/05/2019.

III. Performances énergétiques

1. Bilan énergétique

Le bilan énergétique de la climatisation du site (hors terminaux) est présenté pour la période du 01/06/2018 au 31/05/2019 dans le Tableau 1.

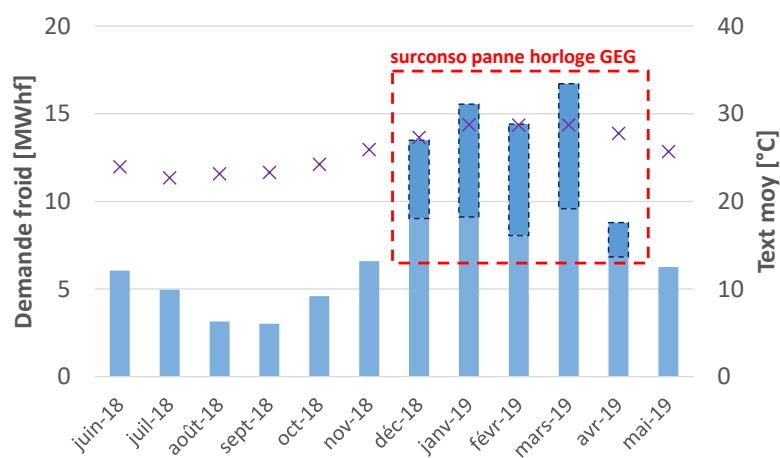
Tableau 1 : Bilan énergétique de la climatisation sur le site de la CAF (juin 2018-mai 2019)

		juin-18	juil-18	août-18	sept-18	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	avr-19	mai-19	Total
Demande froid (hors DD)	MWhf	6.060	4.958	3.153	3.017	4.596	6.593	13.489	15.553	14.416	16.714	8.791	6.258	104
Conso élec clim (hors DD)	MWhe	4.661	4.047	3.312	2.998	3.854	5.005	9.019	11.279	10.650	11.647	7.500	5.306	79
GEG (pompe distrib intégrée)	MWhe	3.737	3.214	2.386	2.131	2.929	3.969	7.754	9.783	9.261	10.046	5.385	3.272	64
dont production EG	MWhe	3.023	2.494	1.721	1.510	2.195	3.136	6.202	7.898	7.489	8.158	4.405	2.747	51
dont distribution	MWhe	0.714	0.720	0.665	0.621	0.735	0.833	1.552	1.885	1.772	1.889	0.980	0.525	13
Cassettes (VC)	MWhe	0.924	0.833	0.926	0.867	0.925	1.036	1.264	1.495	1.389	1.601	2.115	2.034	15
RDC	MWhe	0.280	0.264	0.276	0.234	0.230	0.287	0.392	0.411	0.407	0.496	1.076	1.240	6
R+1	MWhe	0.644	0.569	0.650	0.633	0.695	0.748	0.872	1.084	0.982	1.105	1.039	0.794	10
SEER production EG seule		2.0	2.0	1.8	2.0	2.1	2.1	2.2	2.0	1.9	2.0	2.0	2.3	2.0
SEER avec distribution EG		1.6	1.5	1.3	1.4	1.6	1.7	1.7	1.6	1.6	1.7	1.6	1.9	1.6
SEER global EG		1.3	1.2	1.0	1.0	1.2	1.3	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.3
Autres consommations														
CTA DD	MWhe	0.051	0.098	1.281	2.184	2.541	3.437	0.953	4.191	3.635	0.223	3.143	2.338	24
Clim local technique	MWhe	0.235	0.170	0.252	0.272	0.334	0.388	0.373	0.574	0.529	0.581	0.524	0.347	5
Clim K7 salle d'attente	MWhe													ND

La demande de froid EG mensuelle varie fortement d'un mois à l'autre entre 3 et 17 MWhf (cf. Figure 8), d'une part pour des raisons climatiques mais également à cause d'une panne de l'horloge du GEG survenue le 12/12/2018 et qui a entraîné un fonctionnement continu jusqu'au 23/04/2019. La demande de froid EG est de 104 MWhf/an mais nous avons estimé qu'elle aurait été seulement de 77 MWhf/an sans la panne d'horloge avec une amplitude de variation inter-mensuelle plus petite (entre 3 et 10 MWhf). En négligeant les effets inertiels, la surconsommation de froid à cause de la panne a été estimée supérieure à 70% sur la période de la panne (1/3 sur l'année complète) de manière purement mécanique à cause de l'augmentation du temps de fonctionnement.

En corrigeant les effets de la panne d'horloge, on aboutit à une demande de froid EG de l'ordre de 60 kWhf/m²/an, à 64% sur l'été (novembre-avril). Cette valeur est faible, mais il faut rappeler que l'EG ne fournit pas la totalité de la demande de froid du site qui est équipé d'une CTA à détente directe indépendante pour le traitement de l'air neuf du rez-de-chaussée, qui est connu pour représenter une charge importante dans la demande de froid totale (mais difficilement mesurable).

Figure 8 : Variation de la demande de froid mensuelle



La consommation électrique des GEG a été de 64 MWhe sur l'année, mais nous avons estimé qu'elle aurait été de seulement 45 MWhe sans la panne de l'horloge, qui a entraîné une surconsommation électrique de 95% durant la période de panne (plus de 40% sur l'année complète, soit près de 2000 € d'électricité en plus). La distribution EG se fait grâce à la pompe intégrée au GEG. Une mesure ponctuelle de sa puissance absorbée

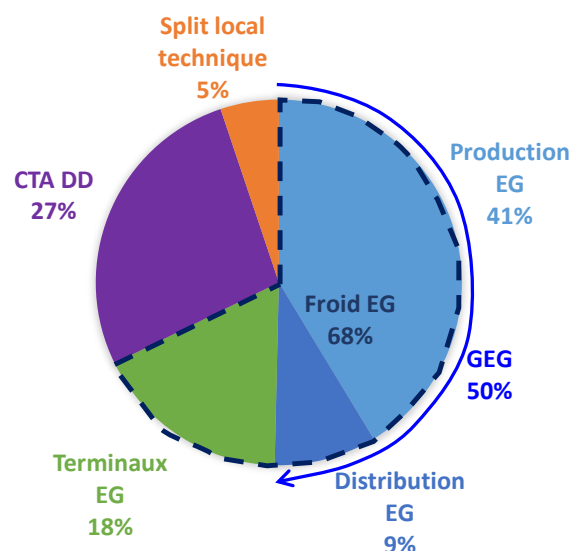
(~2.8 kWe) nous a permis d'estimer la consommation de la pompe de distribution EG à 18% de la consommation totale du GEG sur l'année, ce qui est très élevé (devrait être de l'ordre de quelques %). En effet, comme développé au §III.4.b, le débit de distribution est élevé par rapport aux besoins, ce qui résulte en une différence de température entre départ et retour réseau EG de moins de 2 degrés toute l'année (alors qu'une valeur de 5 est généralement visée). La consommation des terminaux, qui a pu être mesurée sur ce site, représente 15 MWhe/an supplémentaires soit 25% de la consommation électrique totale de la climatisation EG. Il est intéressant de noter que la consommation des terminaux de climatisation (VC) est souvent négligée dans les analyses alors qu'elle se révèle significative... Au final, la consommation totale est de 79 MWhe sur l'année (63 kWhe/m²/an), elle aurait été inférieure à 50 kWhe/m²/an sans la panne (~5 €/m²/an).

Le SEER mensuel (production EG seule) varie entre 1.8 et 2.3, pour une valeur annuelle de 2.0. Le SEER tombe à 1.6 si on inclut la consommation de la distribution EG à cause du surdimensionnement de la pompe. Ces valeurs sont faibles comparées aux standards considérés habituellement (valeur de 3 souvent prise en référence), notamment à cause du surdimensionnement du GEG (cf. §III.2). En prenant encore en compte la consommation des terminaux, le SEER global de la climatisation EG est de 1.3 sur l'année.

A cela il faut ajouter la consommation de la CTA à détente directe qui a été de 24 MWhe sur l'année, soit 40% de consommation en plus. Les performances de ce type de système ne sont pas quantifiables mais elles sont d'expérience plus faibles que celles de systèmes EG. La consommation du split du local technique représente encore 5 MWhe sur l'année, celle des 2 cassettes supplémentaires en salle d'attente n'a pas pu être mesurée (le départ étiqueté dans l'armoire électrique n'a donné aucune puissance).

La Figure 9 présente la répartition de la consommation entre les différents équipements de climatisation (hors cassettes salles d'attente) pour la période de référence. *NB : Les données sont corrigées pour s'affranchir des effets de la panne d'horloge.*

Figure 9 : Répartition de la consommation entre les différents équipements en lien avec la climatisation du site (avr 2018-mai 2019)



Le froid EG représente 68% de la consommation. La pompe de distribution représente 9% de la consommation totale (18% de la consommation des GEG), la consommation des terminaux EG 18% (25% de la consommation du froid EG). La CTA à détente directe pour le traitement de l'air neuf du rez-de-chaussée représente 27% de la consommation totale, le split qui climatise le local technique 5%. La consommation des cassettes supplémentaires de la salle d'attente n'est pas mentionnée (inconnue).

2. Dimensionnement

Le Tableau 2 récapitule les puissances froides/taux de charge min/max/moy sur la période de référence.

Tableau 2 : Puissances froides et taux de charge min/max/moy (juin 2018-mai 2019)

		juin-18	juil-18	août-18	sept-18	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	avr-19	mai-19	Total
Demande froid														
Pmoy (qd fonctionne)	kWf	23	19	18	18	16	21	25	21	22	24	26	23	25
Pmax	kWf	44	39	44	39	35	43	46	53	44	46	45	43	53
Pmin	kWf	1	3	0	0	0	2	5	5	0	5	0	7	0
Taux de charge moy		23%	18%	18%	18%	16%	21%	24%	21%	21%	24%	26%	22%	25%
Taux de charge max		44%	38%	44%	39%	35%	43%	46%	53%	44%	46%	44%	43%	53%
Débit eau glacée														
Dmoy (qd fonctionne)	m ³ /h	17	17	16	16	16	16	17	15	16	16	14	12	16

L’installation est munie d’un GEG d’une puissance de 100.5 kWf. La puissance moyenne horaire (quand le GEG fonctionne) enregistrée sur la période de référence varie entre 16 kWf (Tc=16%) en hiver et 26 kWf (Tc=26%) en été, avec des taux de charges max ponctuels de 44% en hiver et 53% en été. Cela dénote d’un surdimensionnement important avec moins de 800 heures de fonctionnement « équivalent pleine puissance » sur l’année (après correction due à la panne), ce qui très faible.

La distribution EG est assurée par une pompe intégrée au GEG à débit fixe avec un débit moyen mesuré de l’ordre de 17 m³/h (peu de variation de débit). Ce débit s’avère très fortement surdimensionné comme en témoignent les faibles ΔT (<2K toute l’année) observés sur le réseau de distribution (cf. III.4.b).

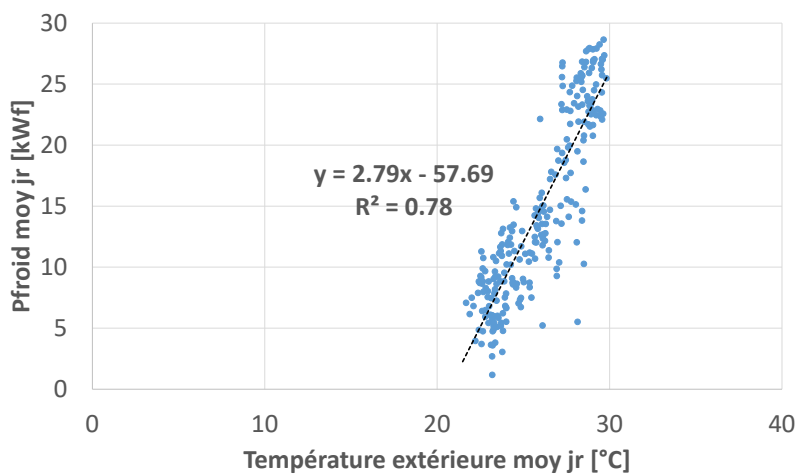
3. Demande de froid

a. Signature énergétique

Système à eau glacée

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 10). Les points correspondant aux jours où la climatisation est arrêtée (week-ends et jours fériés) ont été filtrés. NB : Dans le cas de ce bâtiment, la climatisation est apportée à la fois par l’eau glacée et par la CTA à détente directe qui assure le traitement de l’air neuf du rez-de-chaussée. Nous ne connaissons pas la quantité de froid produite par détente directe (seulement la consommation électrique correspondante), qui s’ajoute à la demande de froid EG pour obtenir la demande de froid totale.

Figure 10 : Signature énergétique du système EG du bâtiment en fonction de la température extérieure (juin 2018-mai 2019)

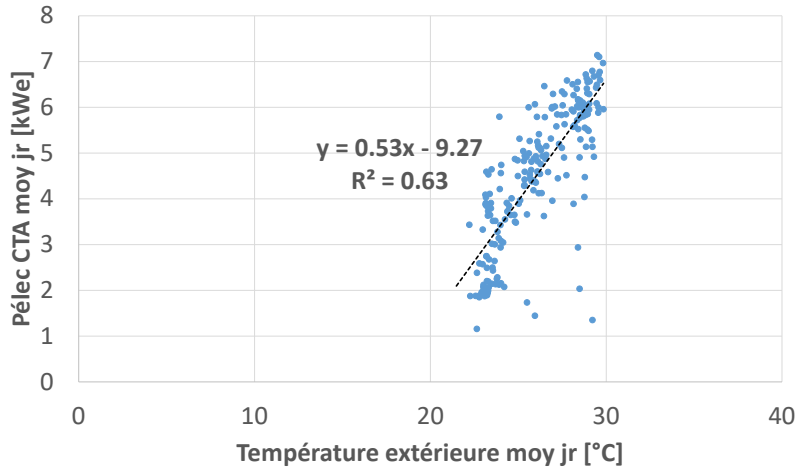


La réponse du bâtiment est linéaire par rapport à la température extérieure (la tendance est très nette même si la corrélation n’est pas très bonne). La pente est d’~3 kWf/K (soit un appel de charge supplémentaire de 3 kWf lorsque la température extérieure augmente de 1 degré).

CTA à détente directe

Nous avons mesuré en continu la consommation électrique de la CTA mais nous ne connaissons pas la puissance froide qu'elle fournit car elle fonctionne à détente directe. Nous avons tout de même tracé sa signature électrique (consommation électrique en fonction de la température extérieure en moyenne journalière) en Figure 11.

Figure 11 : Signature électrique de la CTA à détente directe en fonction de la température extérieure (juin 2018-mai 2019)



On voit une nette tendance d'augmentation de la puissance électrique absorbée par la CTA quand la température extérieure augmente, même si la corrélation n'est pas bonne.

A La Réunion, l'hygrométrie est élevée si bien que la demande de froid de la CTA est en grande partie liée à la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'air extérieur lors de son refroidissement. L'enthalpie de l'air 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 :

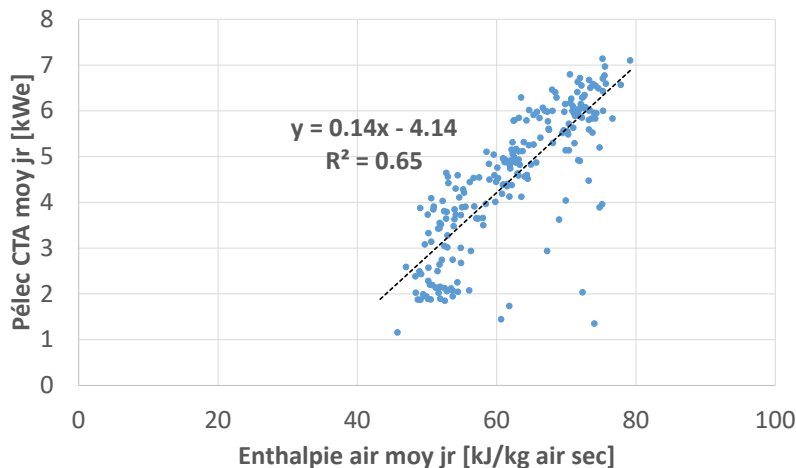
$$h = 1.006 \cdot T_{ext} + 0.622 \cdot \frac{p_v}{P_{atm} - p_v} \cdot (2501 + 1.83 \cdot T_{ext}) \text{ en } \frac{kJ}{kg \text{ air sec}}$$

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

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 %

Nous avons tracé la signature électrique de la CTA en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur en Figure 12.

Figure 12 : Signature électrique de la CTA à détente directe en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur (juin 2018-mai 2019)



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

La corrélation est légèrement améliorée si on trace la signature électrique de la CTA en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur, mais pas de manière significative.

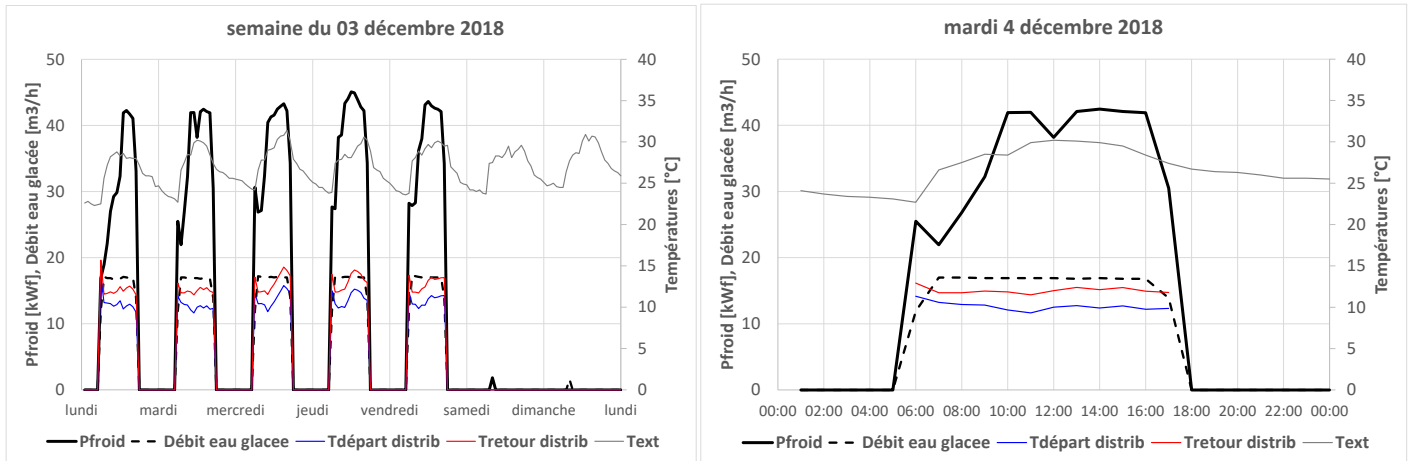
Cela dit, c'est la demande de froid qui augmente linéairement avec la température extérieure ou l'enthalpie de l'air. La consommation électrique n'est pas forcément proportionnelle à la demande de froid si les performances ne sont pas constantes donc il n'est pas étonnant de ne pas observer de linéarité.

b. Profil de consommation

Système à eau glacée

La Figure 13 présente le profil de demande de froid sur une semaine de décembre 2018 avant la panne sur l'horloge du GEG (fonctionnement habituel) ainsi qu'un zoom sur un jour de cette semaine.

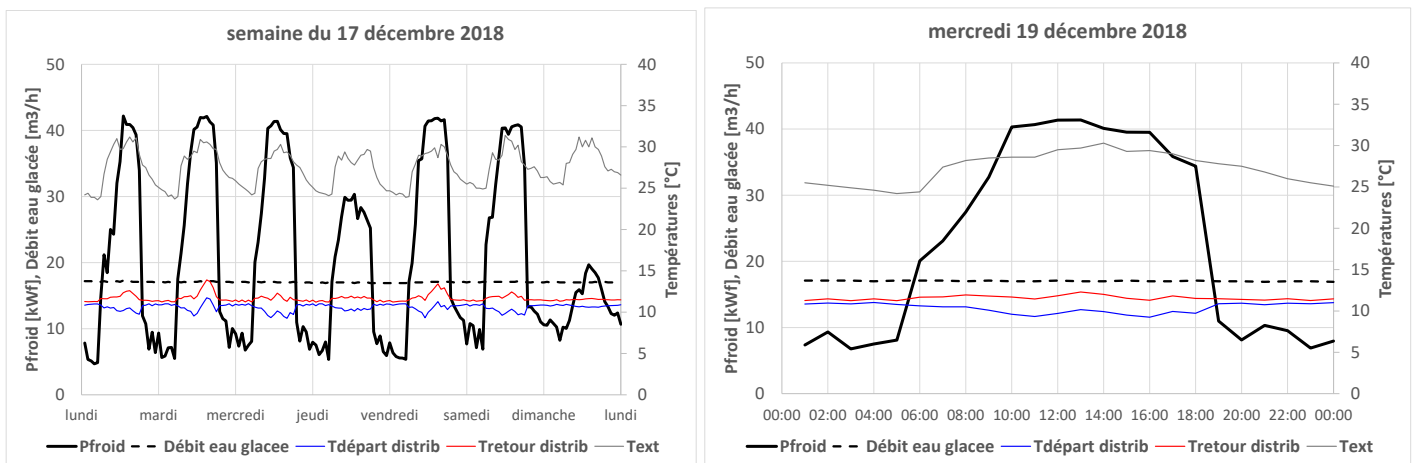
Figure 13 : Profil de demande de froid sur une semaine d'été (gauche) et sur une journée type (droite)



Le GEG est coupé le week-end (vendredi soir à lundi matin), en lien avec la fermeture du site. Le GEG est également coupé la nuit (17h à 5h30).

La Figure 14 illustre le fonctionnement du GEG avec la panne sur l'horloge :

Figure 14 : Profil de demande de froid avec la panne sur l'horloge du GEG

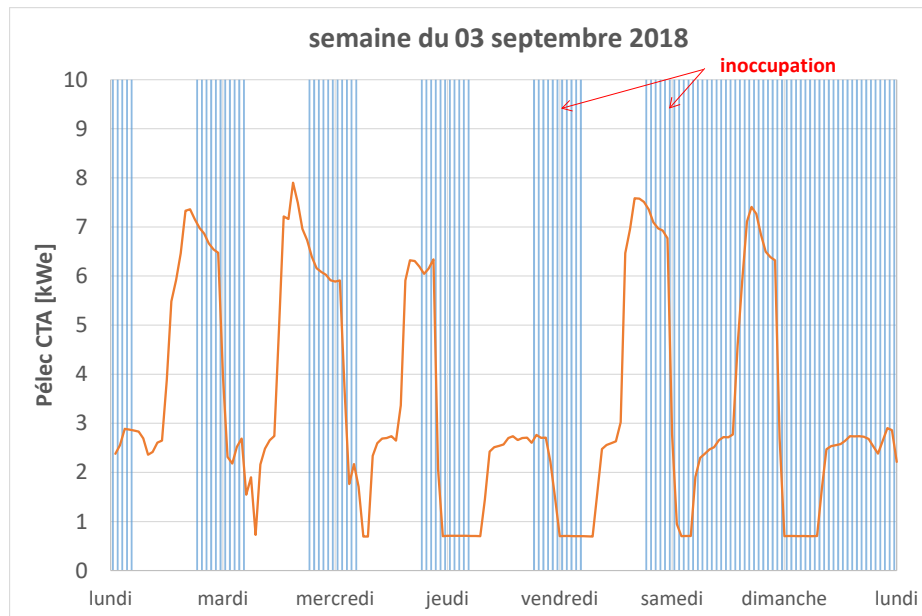


On voit nettement que la demande de froid baisse la nuit et le dimanche quand il n'y a plus d'occupation mais ne tombe pas à zéro car le GEG n'est pas arrêté. Le talon de consommation est de l'ordre de 10 kWf.

CTA à détente directe

La Figure 15 présente le profil de consommation électrique de la CTA en charge du traitement de l'air neuf du rez-de-chaussée sur une semaine de septembre 2018. Les périodes d'inoccupation de locaux sont hachurées en bleu.

Figure 15 : Profil de fonctionnement de la CTA sur une semaine



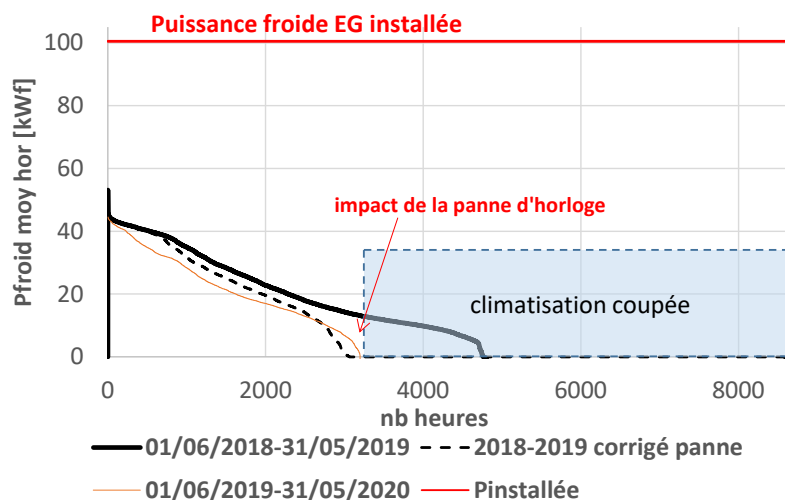
La CTA fonctionne en permanence (elle n’est pas arrêtée en inoccupation comme le GEG) et de manière erratique : on note de nettes baisses de puissance appelée à certaines périodes, mais qui ne correspondent pas systématiquement aux périodes d’inoccupation (hachurées en bleu). Il y aurait un intérêt à mieux gérer le planning des CTA (coupure en dehors des périodes d’occupation) avec des économies d’énergie à la clé... Ce problème a été remonté au maître d’ouvrage lors d’une réunion de restitution des résultats de mesure mais il n’a pas été corrigé à notre connaissance.

c. Monotone de puissance

Système à eau glacée

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 16 présente la courbe monotone du froid EG du site sur 2 années. Pour comparaison, nous avons également tracé la courbe monotone après avoir neutralisé les effets de la panne d’horloge sur l’année de référence.

Figure 16 : Monotone de puissances froides EG sur l’année de référence (juin 2018-mai 2019) ainsi que sur l’année suivante



On fait les observations suivantes :

- On identifie visuellement le surdimensionnement de la puissance installée de 100.5 kWf, soit $\sim 80 \text{ Wf/m}^2$ par rapport à la puissance maximale appelée avec une valeur représentative de 45 kWf

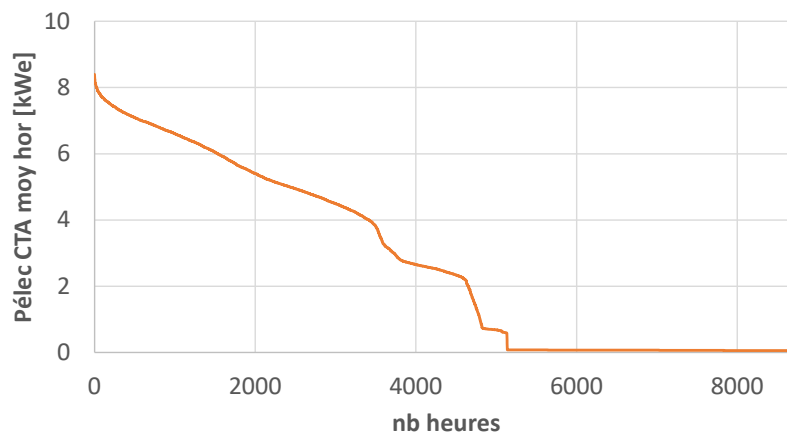
en moyenne horaire (si on enlève les 10 plus grandes valeurs qu'on peut lier à des phénomènes de régulation plus qu'à un réel appel de puissance froide), soit $\sim 35 \text{ Wf/m}^2$ appelé au maximum. **Le GEG est ainsi surdimensionné d'un facteur 2.2.**

- Une fois neutralisés les effets de la panne d'horloge sur le GEG, les courbes sont proches sur les 2 années, ce qui montre une bonne répétabilité de la structure de la demande de froid d'une année à l'autre, avec entre 3000 et 3200h de fonctionnement annuel.
- L'impact de la panne d'horloge est clairement visible (différence entre les deux courbes noires), et entraîne 1700h de fonctionnement supplémentaire inutile.

CTA à détente directe

La Figure 17 présente la courbe monotone de la puissance électrique de la CTA du site sur l'année de référence.

Figure 17 : Monotone de la puissance électrique absorbée par la CTA sur l'année de référence (juin 2018-mai 2019)

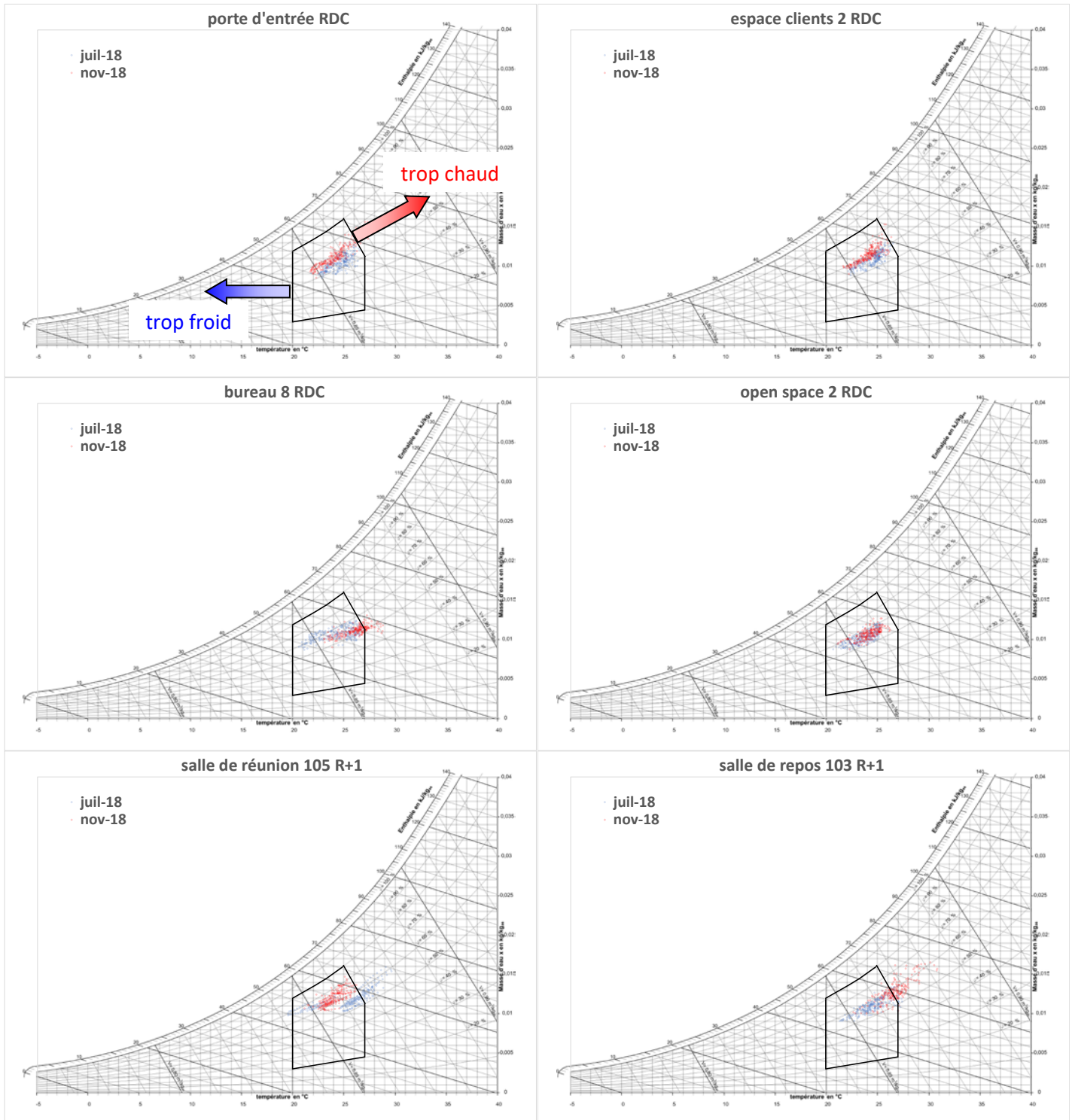


En cumulé, la CTA fonctionne environ 5000h par an alors que le GEG (coupé lors des périodes d'inoccupation) environ 3000h : ce sont probablement des périodes où l'air neuf est renouvelé dans les locaux alors qu'il n'y a personne, ce qui représente une économie potentielle d'énergie. En période de coupure de la CTA, on remarque une consommation de veille de 70W qui représente une consommation d'environ 250 kWh par an.

d. Confort

Des sondes d'ambiance (température et humidité) ont été posées dans différents locaux (cf. localisation en Annexe 1). 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 18 présente les résultats obtenus sur un mois d'hiver (juillet 2018) et un mois d'été (novembre 2018) en 4 points du RDC et en 2 points du R+1. Les données sont filtrées sur les périodes d'occupation (jours de semaine de 7h à 17h).

Figure 18 : Confort intérieur à la CAF en 4 points du RDC et en 2 points du R+1 en hiver (juillet 2018, bleu) et en été (novembre 2018, rouge), valeurs horaires



Au RDC, la majorité des points sont dans le polygone de confort, sauf pour le bureau 8 où on note des périodes d'inconfort en novembre 2018 (été).

Au R+1 par contre, il y a plus de points en dehors du polygone de confort, plutôt en juillet 2018 (hiver) pour la salle de réunion et plutôt en novembre 2018 (été) pour la salle de repos. Il s'agit cependant de salles à usage collectif, et on ne sait rien de leur utilisation effective, ni de l'état de marche de la climatisation (la climatisation est peut-être éteinte par les occupants lorsqu'ils quittent la pièce ce qui pourrait expliquer que les conditions ambiantes se dégradent).

Le Tableau 3 récapitule le pourcentage du temps dans la zone de confort aux différents points de mesure dans le bâtiment sur juillet et novembre 2018.

Tableau 3 : Pourcentage des points dans la zone de confort aux différents points de mesure au RDC et au R+1 en juillet 2018 (hiver) et novembre 2018 (été)

		juil-18	nov-18
RDC	porte d'entrée	100%	96%
	espace clients 1	96%	91%
	espace clients 2	99%	98%
	espace clients 3	99%	94%
	bureau 8	100%	70%
	open space 1	100%	100%
	open space 2	100%	100%
	open space 3	100%	100%
R+1	salle de réunion 105	62%	99%
	salle de repos 103	90%	40%

Les mesures montrent que le bâtiment est confortable plus de 90% du temps, hormis pour le bureau 8 du RDC en novembre 2018 et les salles collectives du R+1. Comme déjà évoqué, on ne connaît cependant pas l'occupation réelle de ces pièces.

Il est intéressant de noter que l'open space ainsi que l'espace clients du RDC sont confortables et homogènes toute l'année comme en témoignent les sondes disposées en différents endroits de chacun des espaces.

4. Caractérisation des sous-systèmes

a. Production EG

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)

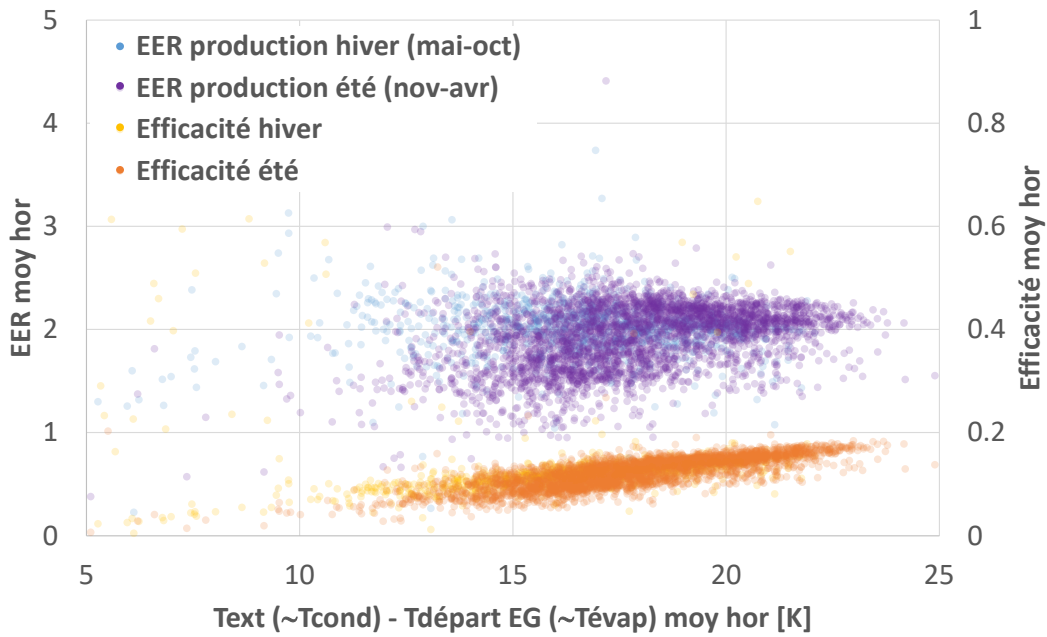
la température d'évaporation étant proche de la température de sortie du GEG et la température de condensation généralement liée à la température extérieure, les performances d'un GEG ont tendance à diminuer lorsque la température extérieure augmente.

- 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 19 présente la variation de l'EER du GEG (hors pompe de distribution) en valeurs horaires en fonction de la différence entre température extérieure (qui influe sur la température de condensation) et température de départ EG (proche de la température d'évaporation) sur la période de référence. *NB : La consommation de la pompe de distribution, intégrée au GEG, a été soustraite de la consommation totale du GEG grâce à la mesure ponctuelle réalisée.*

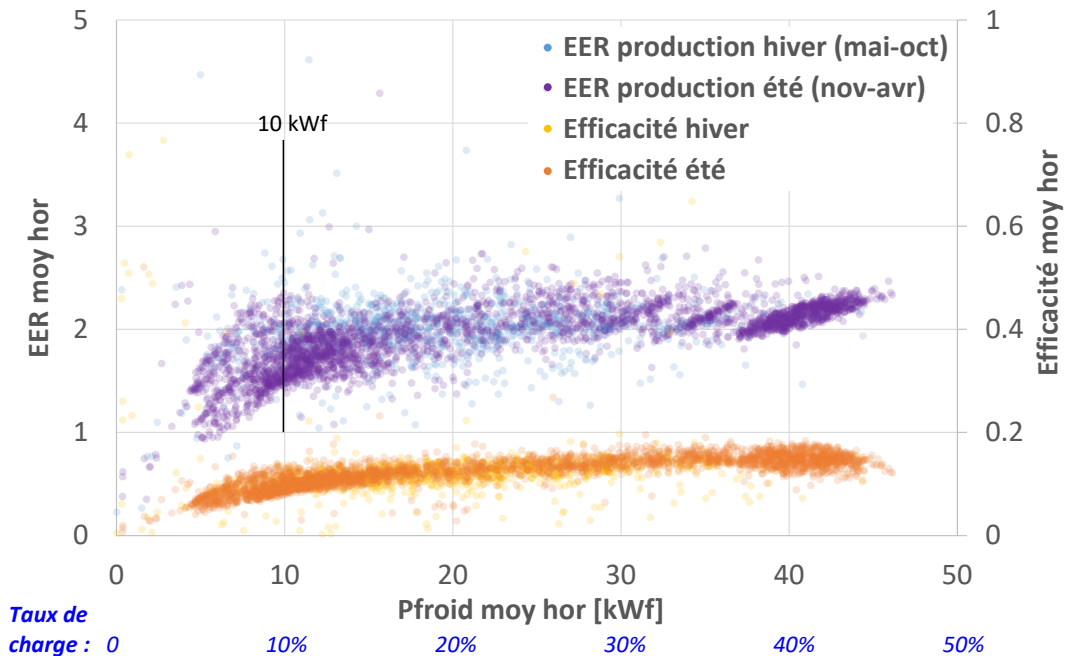
Figure 19 : Performances de la production d’eau glacée par le GEG en fonction de la différence entre température extérieure et température de départ EG (juin 2018-mai 2019)



On lit une légère tendance de l’EER à diminuer avec la différence de température comme le dicte la thermodynamique, surtout en été (taux de charge plus élevés). Il y a cependant beaucoup de dispersion.

La Figure 20 présente la variation de l’EER du GEG (hors pompe de distribution) en valeurs horaires en fonction de la puissance appelée sur la période de référence.

Figure 20 : Performances de la production d’eau glacée par le GEG en fonction de la puissance froide appelée (juin 2018-mai 2019)



On discerne deux types de comportement :

- en été, au-dessus de 10 kWf (10% de taux de charge), l’EER est compris entre 1.5 et 2.5, il a tendance à augmenter avec la puissance froide appelée ;
- en hiver, en dessous de 10 kWf, l’EER tombe à 1 lorsque la puissance appelée descend à 5 kWf (5% de taux de charge).

Cela traduit l'impact de la consommation des auxiliaires sur les performances de la production, qui descendent 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 ;
- les taux de charges observés sont faibles (<40%), des performances plus élevées seraient probablement obtenues avec des taux de charge plus élevés.

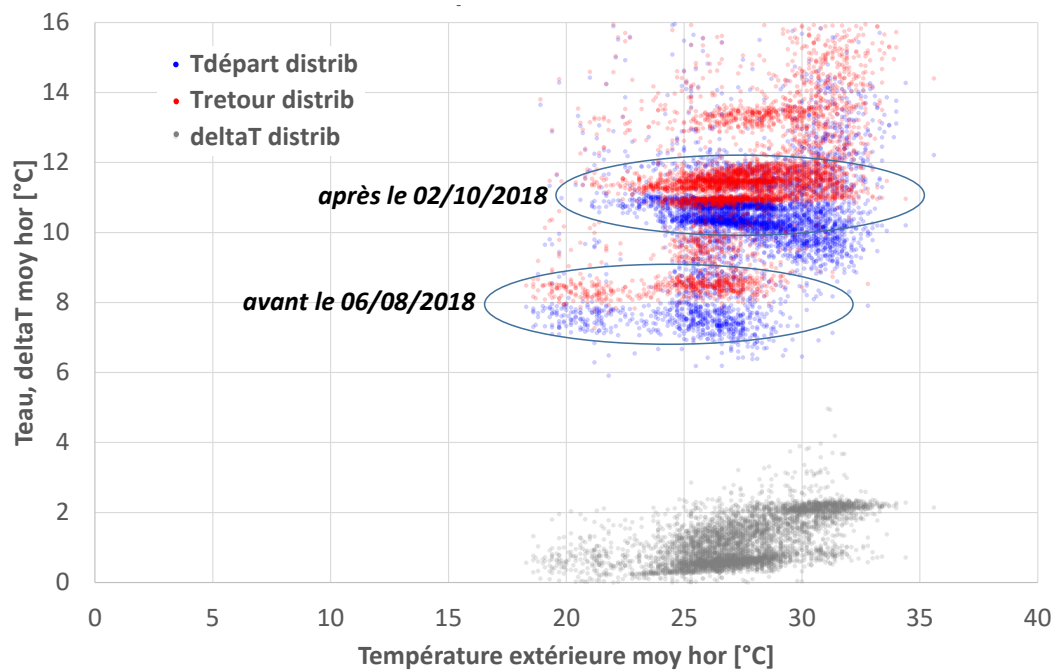
L'efficacité, qui traduit l'éloignement du GEG mesuré par rapport à une machine thermodynamiquement « parfaite » montre des valeurs entre 0.1 et 0.2, qui augmentent avec la puissance appelée à cause du poids de la consommation des auxiliaires.

b. Distribution EG

Températures de travail

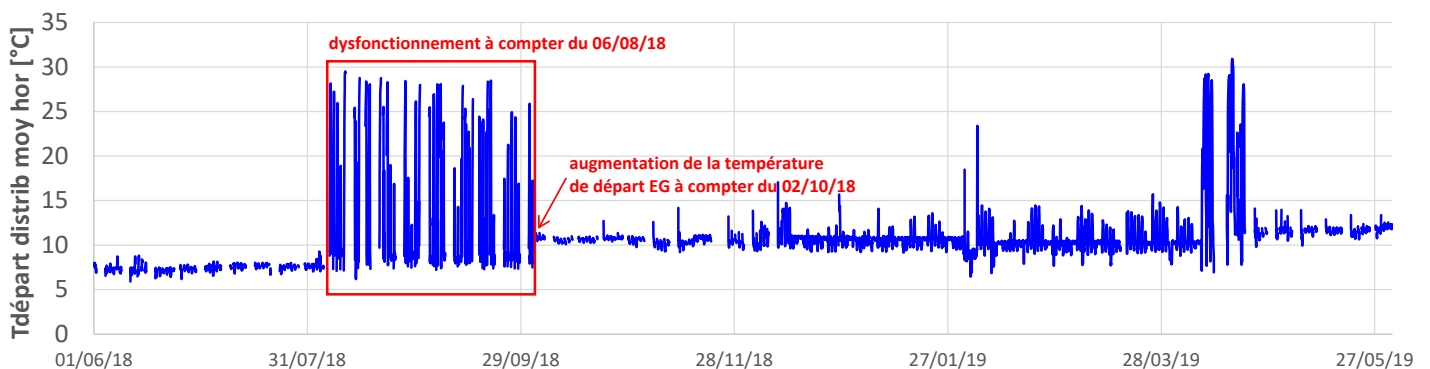
La Figure 21 présente les températures de travail sur le réseau EG (moyennes horaires) en fonction de la température extérieure sur la période de référence.

Figure 21 : Températures de travail sur le réseau de distribution EG (juin 2018-mai 2019)



On note une grande dispersion des valeurs de température EG... Afin d'essayer d'en comprendre la raison nous avons tracé l'évolution de la température de départ EG sur l'année complète (cf. Figure 22).

Figure 22 : Température de départ EG sur l'année de référence (moyenne horaire)



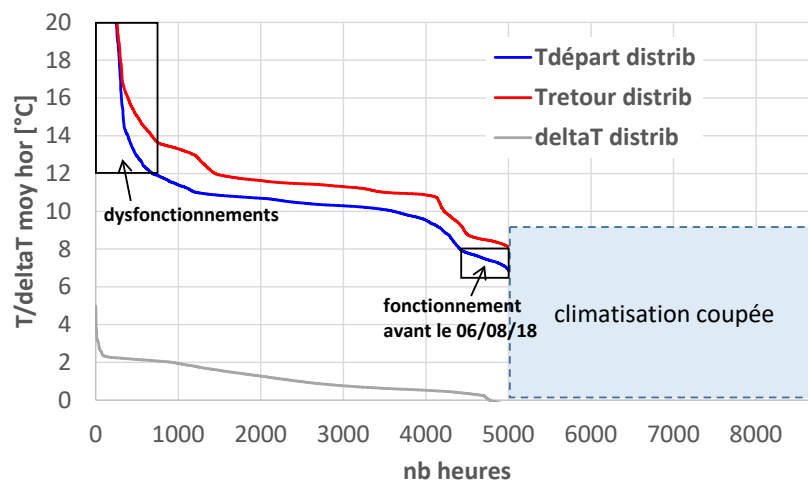
On voit clairement un dysfonctionnement survenir à partir du 06/08/2018, puis un retour à la normale à compter du 02/10/2018 mais avec une nette augmentation de la température de départ EG. *NB : Nous n'avons malheureusement pas pu avoir de contact avec le prestataire de climatisation afin de comprendre ce qui s'est passé.*

Sur la Figure 21 on discerne donc deux niveaux de température représentatifs :

- une température de départ EG de 7-8°C (retour à 8-9°C) avant le 06/08/2018
- une température de départ EG de 10-11°C (retour à 11-12°C) après le 02/10/2018

Ces niveaux de température sont corrects par rapport à ce qui est souvent observé (température de départ généralement inférieure à 7°C). La Figure 23 présente les mêmes données sous la forme de monotones de température (=valeurs classées de la plus grande à la plus petite).

Figure 23 : Monotones de températures de départ/retour/ ΔT sur le réseau de distribution (juin 2018-mai 2019)



Les courbes monotones n'ont pas une allure régulière, à cause des problèmes de fonctionnement apparemment subis par l'installation. On note tout de même que le ΔT est inférieur à 2K la majorité du temps, signe que **la pompe de distribution est surdimensionnée** par rapport à la demande de froid réelle. Cependant **ce problème ne peut pas être corrigé car la pompe de distribution est intégrée au GEG et ne peut donc pas être remplacée.**

Consommation électrique

Comme évoqué plus haut, la consommation électrique de la pompe de distribution atteint 18% de la consommation de la production de froid, ce qui est très élevé. La puissance de la pompe de distribution est de 2.8 kW soit un ratio d'environ 160 We/m³/h. La consommation spécifique est de 0.12 kWh/kWh distribué ($\Delta T < 2K$), ce qui est 5 fois plus élevé qu'au PFME (ΔT entre 2 et 6K).

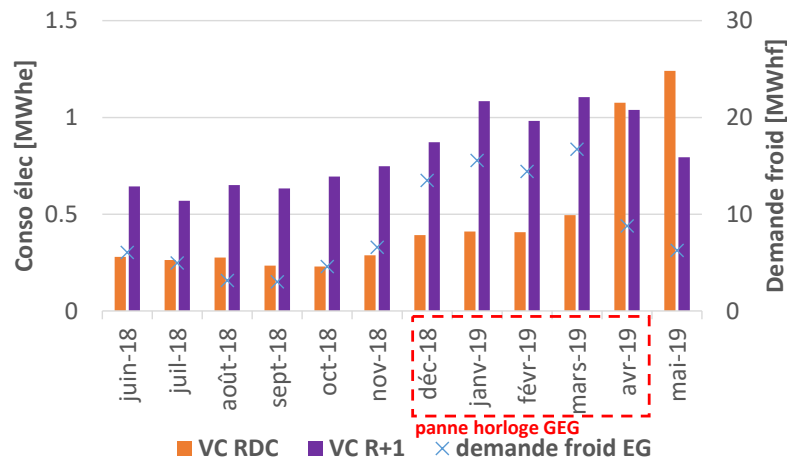
Ce ratio est important car le GEG est surdimensionné, ce qui explique que la pompe de distribution soit surdimensionnée elle aussi.

c. Terminaux de climatisation EG

Le bâtiment est équipé de cassettes de climatisation (VC) alimentées par le réseau EG. L'air neuf est soufflé à travers les cassettes, ce qui permet d'une part de s'affranchir d'avoir des diffuseurs spécifiques pour l'air neuf, d'autre part de refroidir l'air avant soufflage dans la pièce (pour le R+1 car l'air neuf n'est pas prétraité).

Nous avons instrumenté les 2 départs électriques regroupant les VC du RDC et du R+1. La Figure 24 présente leur consommation mensuelle sur l'année de référence. La demande de froid est également mentionnée pour information.

Figure 24 : Consommation mensuelle des VC (juin 2018-mai 2019)



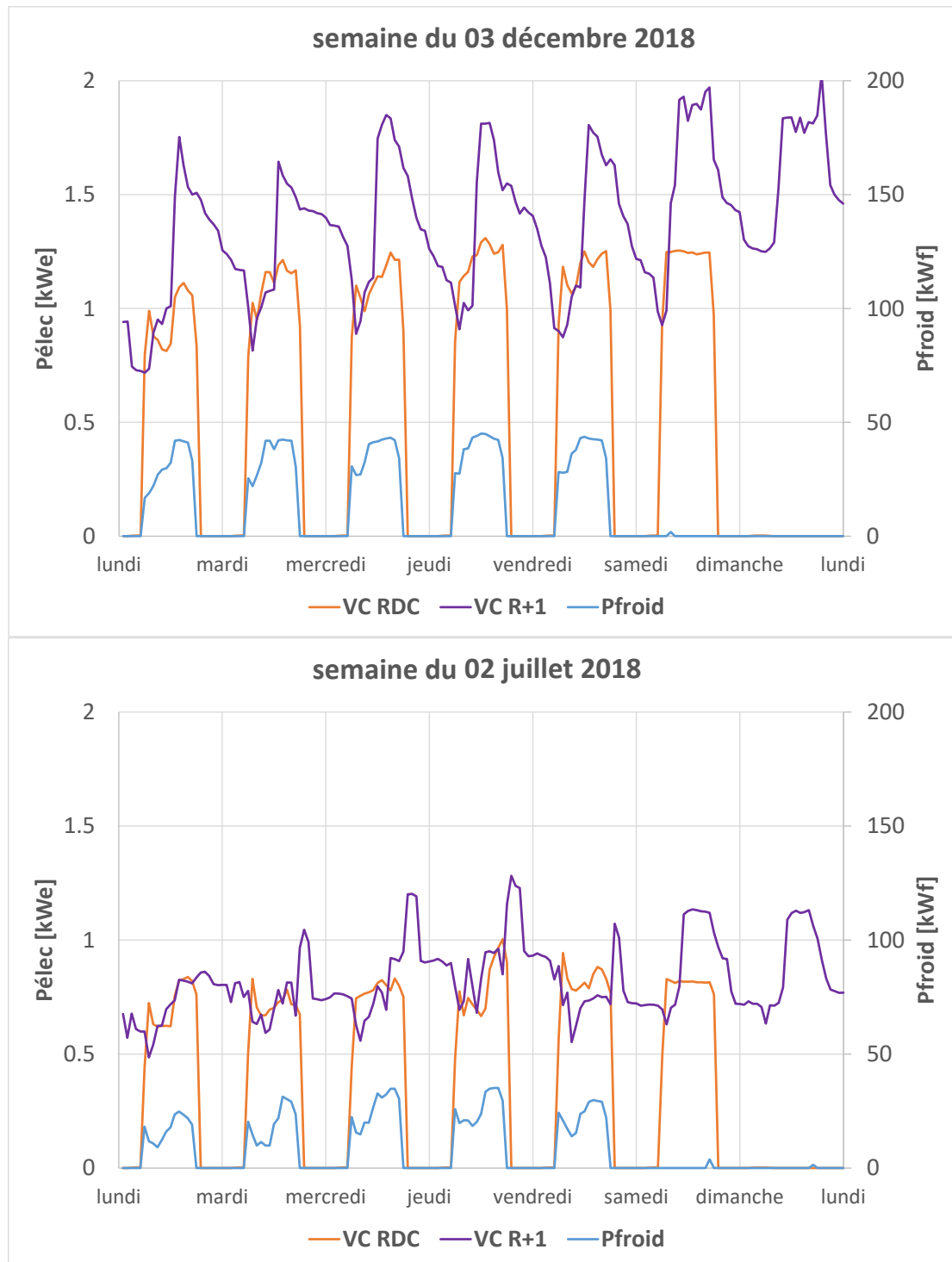
Les cassettes du R+1 consomment près de deux fois plus que celles du RDC sur l'année, alors que la surface du R+1 représente seulement la moitié de celle du RDC. NB : Nous ne connaissons pas la puissance électrique totale des VC sur chacun des deux départs.

La Figure 25 (page suivante) présente la consommation électrique enregistrée sur les 2 départs électriques des cassettes sur une semaine d'été (haut) et sur une semaine d'hiver (bas). La demande de froid du bâtiment est également mentionnée.

On constate que :

- La puissance électrique absorbée par les VC du R+1 est plus élevée que celle des VC du RDC, surtout en été.
- Les VC sont commandés par une horloge dont les horaires sont calqués sur ceux du GEG, ce qui permet d'éviter qu'ils fonctionnent inutilement alors que le GEG est arrêté. On note malgré tout qu'ils fonctionnent le samedi alors que le GEG est arrêté ; une autorisation de marche est probablement réglée pour le samedi au cas où certains employés auraient besoin de venir et de mettre en route la climatisation (comme on l'observe ponctuellement).
- Les VC du R+1 fonctionnent en permanence même lorsque le GEG est coupé, ce qui explique que la consommation des VC du R+1 soit beaucoup plus élevée que celle du RDC. Il y existe un potentiel d'économies d'énergie sans perte de confort, qui est facile à atteindre car tous les VC du R+1 sont remontés sur un même départ électrique qui est *a priori* déjà équipé d'une horloge (mais qui n'a pas dû être réglée ??).
- La majorité des usagers n'éteignent apparemment pas les VC en partant le soir puisque la consommation électrique remonte au même niveau le samedi (alors qu'il n'y a personne) sur le RDC et ne descend quasiment pas la nuit sur le R+1.

Figure 25 : Consommation électrique des cassettes des deux étages sur une semaine d'été (haut) et sur une semaine d'hiver (bas)



En conclusion, le fonctionnement des cassettes est partiellement géré en fonction de l'occupation sur le RDC mais pas sur le R+1. La consommation des VC (+extracteur) est de 15.4 MWhe sur l'année. **Avec une meilleure gestion en inoccupation**, elle pourrait descendre à :

- 4.1 MWhe/an (au lieu de 5.6) sur le RDC (coupure le samedi)
- 3.4 MWhe/an (au lieu de 9.8) sur le R+1 (coupure la nuit et le week-end)

soit **une économie totale de près de 8 MWhe/an** (~800 €/an) sans aucune perte de confort soit une diminution de plus de 50% sur ce poste *a priori* sans investissement (il faudrait vérifier que l'horloge en place sur le départ électrique des VC au R+1 est bien fonctionnelle).

IV. Evolution des installations

1. Résumé de la situation actuelle

Ci-dessous quelques points résumant la situation actuelle sur la climatisation de la CAF St Paul :

- Le GEG de 100 kWf est vieillissant (date de 2001), et surdimensionné d'un facteur 2.2 (mesuré).
- Les terminaux de climatisation sont également à remplacer.
- Pour des raisons de confort, il a été complété en 2015 par une CTA à détente directe de 20 kWf permettant le traitement de l'air neuf du RDC ; elle a été prévue à DD parce qu'on pensait qu'il n'y avait pas de marge de puissance sur le GEG (mais le suivi a montré qu'il aurait pu l'alimenter).
- Au R+1 l'air neuf reste soufflé directement (air extérieur) sans prétraitement.
- Il y a un besoin de réagencement d'une partie des bureaux nécessitant un repositionnement de certaines cassettes de climatisation.
- Une partie des salariés est en conflit avec la direction à propos du confort dans ce bâtiment, jugé insuffisant (*NB : Notre suivi n'a pas mis en évidence de problème de confort systématique (mis à part dans deux pièces) mais il est vrai que nous n'avons pas installé de sondes de température dans toutes les pièces*).
- Il n'y a ni isolation en toiture, ni protections solaires sur les ouvrants, ce qui contribue à dégrader le confort.

2. Projet de rénovation

La CAF a lancé en 2019 un projet de rénovation de la climatisation centralisée sur le site de St Paul. Il inclut notamment :

- le remplacement du GEG et des cassettes de tout le bâtiment, en adaptant réseaux aérauliques et hydrauliques pour tenir compte des modifications d'agencement des bureaux ;
- le curage des réseaux ;
- l'ajout d'une Unité de Traitement d'Air (UTA) pour assurer le prétraitement d'air de l'étage R+1.

NB : La CTA qui assure le traitement d'air du rez-de-chaussée sera conservée car récente.

Dans le cadre d'une mission d'opportunité d'autoconsommation photovoltaïque sur ce site, un bureau d'études a étudié les différentes solutions de climatisation possibles. Sur demande du maître d'ouvrage, nous leur avons transmis les principaux résultats de mesure sur une année complète et notamment la demande de froid réelle. Deux solutions ont été étudiées pour remplacer le GEG actuel :

- l'installation de deux GEG redondants de 45 kWf chacun, dimensionnés pour couvrir chacun 2/3 de la demande maximale de 55 kWf assortie d'un coefficient 1.2, soit une marge totale de $90/55=1.6$ par rapport à la puissance maximale mesurée ponctuellement sur le site (la puissance maximale appelée représentative est plutôt de 45 kWf soit une marge de $90/45=2$) ;
- une refonte de l'installation avec une climatisation à détente directe de type DRV (Débit de Réfrigérant Variable) composés de deux unités (50 kWf pour le rez-de-chaussée et 20 kWf pour le R+1), permettant une régulation local par local.

C'est la 2^{ème} solution qui a été préconisée au maître d'ouvrage pour des raisons de flexibilité et de coût, les performances affichées de la détente directe étant meilleures que celles des GEG.

Cependant, il s'agissait avant tout d'une mission de conseil, le Dossier de Consultation des Entreprises a été rédigé par un autre bureau d'études fluides missionné spécialement. Les préconisations leur ont été transmises mais ils ne les ont pas retenues puisqu'au final, le DCE mentionne :

- l'installation d'unités de production EG à deux compresseurs scroll pour une puissance totale de 170 kWf ;
- l'installation d'une UTA à DD de 14 kWf pour le traitement d'air du R+1

3. Notre analyse

Notre suivi n'a pas mis en évidence de problème de confort flagrant sur ce bâtiment mais nous n'avons pas installé de sondes de température partout. Voici cependant nos remarques :

- D'après nos échanges, il semblerait que ce soient essentiellement les cassettes en fin de parcours qui ne sont pas suffisamment alimentées, ce qui pencherait en faveur d'un problème d'équilibrage hydraulique.
- D'autre part on relève que la toiture n'est pas isolée et qu'il n'y pas de protections solaires sur les ouvrants, ce qui contribue à dégrader le confort.
- Il y a eu des épisodes de pannes en 2019 liées au vieillissement du GEG, qui pourraient être mises en lien avec les plaintes d'inconfort des usagers.

a. Choix de la technologie

Une installation à détente directe DRV serait adaptée à la taille du bâtiment mais elle a l'inconvénient de mettre en jeu une quantité importante de fluide à une période où le devenir des fluides frigorigènes est incertain, notamment en ce qui concerne son coût à long terme. Il s'agit d'une alternative plausible sur un bâtiment neuf mais plus discutable sur un bâtiment existant qui est déjà équipé d'un réseau EG (=le plus difficile à mettre en œuvre).

Selon nous, il est préférable de rester sur une technologie EG pour bénéficier des équipements déjà en place. D'autre part la technologie scroll imposée par le DCE est bien adaptée car elle permet une variation de puissance.

b. Dimensionnement

Selon notre analyse, le problème de confort ne sera pas résolu par une augmentation de la puissance installée puisque le suivi a montré que le GEG actuel est déjà surdimensionné d'un facteur 2.2. L'isolation du plafond ainsi que l'installation de protections solaires permettraient d'améliorer significativement le confort (même si ça ne suffirait probablement pas à résoudre le problème). Mais c'est surtout la réalisation d'un équilibrage hydraulique correct du réseau EG qui a de grandes chances de résoudre les problèmes d'inconfort relevés dans ce bâtiment.

Les mesures réalisées dans le cadre de ce projet n'ont pas été prises en compte dans le dimensionnement des nouveaux équipements puisqu'une puissance totale de 170 kWf est mentionnée dans le DCE soit un **surdimensionnement attendu de $170/45=3.8$** (à comparer au surdimensionnement actuel de 2.2). Ce niveau de surdimensionnement sera encore supérieur à celui observé sur le bâtiment de la Fac de lettres étudié dans le cadre du projet SWACool², pour lequel on mesure des taux de charge inférieurs à 30% toute l'année (qui impactent fortement les performances) et un $\Delta T < 1K$ sur le réseau EG à cause d'un surdimensionnement important de la pompe de distribution EG (en cohérence avec le surdimensionnement du GEG).

La modularité de la production en plusieurs unités ainsi que la technologie scroll permettront de limiter la dégradation du fonctionnement des GEG à très faible taux de charge mais la pompe de distribution EG sera tout de même dimensionnée pour la puissance froide totale, ce qui risque d'aboutir à un ΔT très faible comme on observe sur la Fac de lettres et une consommation de la pompe de distribution exorbitante (20% de la consommation totale à la Fac de lettres). Nous recommandons *a minima* de **prévoir une pompe de distribution à débit variable** (non mentionné dans le DCE) pour atténuer les effets du surdimensionnement attendu de la pompe de distribution EG. A l'occasion des travaux, nous suggérons par ailleurs d'**équiper le**

² Projet SWACool Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion : Fac de lettres Université de La Réunion – St Denis, Résultats de mesure, Livrable 1.3a, Green Tech, septembre 2020

réseau EG de vannes d'équilibrage (si ce n'est pas déjà le cas) afin de pouvoir mieux gérer l'alimentation des terminaux les plus éloignés.

Plusieurs prestataires consultés ont suggéré de réaliser le traitement de l'air neuf du R+1 par le GEG au lieu de prévoir une UTA à détente directe (14 kWf) comme demandé dans le DCE. Au vu des puissances en jeu, on pourrait même aisément inclure la CTA existante pour le rez-de-chaussée (20 kWf en DD) en plus de la nouvelle UTA pour le R+1.

Notons enfin que la redondance sur la production n'est pas pertinente ici puisqu'il n'y a pas de nécessité absolue de continuité de service et elle conduit à des surcoûts importants.

c. Suivi

Le compteur de frigories installé dans le cadre du projet SWACool doit être déposé lors de la refonte et il n'est pas fait mention d'en installer un nouveau, ni d'ailleurs un compteur électrique sur le GEG. Selon nous il est regrettable de ne pas profiter des travaux pour instrumenter un minimum l'installation de climatisation étant données les consommations en jeu car il est bien moins onéreux de le faire à l'occasion des travaux que dans un second temps lorsque l'installation est déjà en fonction... Or seul un suivi énergétique régulier (et donc des compteurs d'énergie) peut permettre une maîtrise efficace des installations dans le temps. A titre d'exemple, c'est le suivi énergétique qui a permis de détecter la panne d'horloge survenue sur le GEG durant la période de mesure, qui a quasiment fait doubler la consommation électrique sur la période de panne.

V. Conclusions

Le bâtiment de la CAF St Paul 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 (2018-2019), aussi bien au niveau de la production d'eau glacée (incluant la pompe de distribution) que des terminaux de climatisation.

La puissance installée est de 100 kWf fournie par un seul GEG à 2 étages, qui alimente un réseau d'eau glacée de 2 branches desservant le rez-de-chaussée et le R+1 du bâtiment. Une CTA à détente directe permettant le traitement de l'air neuf du rez-de-chaussée complète la production de froid. La surface climatisée est de 1260 m². La demande annuelle de froid a été de 104 MWhf sur l'année de mesure, mais il faut noter qu'une panne d'horloge est survenue durant le suivi : nous avons estimé qu'elle aurait plutôt été de l'ordre de 75 MWhf, soit ~60 kWhf/m²/an (hors détente directe) : cette valeur est faible grâce à la bonne gestion de l'inoccupation (coupure systématique de la climatisation durant la nuit et les week-ends). Mais il faut également rappeler que l'eau glacée ne fournit pas la totalité de la demande de froid du site, qui est équipé d'une CTA à détente directe indépendante pour le traitement de l'air neuf du rez-de-chaussée. Le suivi énergétique a mis en évidence un surdimensionnement d'un facteur 2.2 par rapport à la demande de froid réelle. Ce surdimensionnement est préjudiciable aux performances de l'installation notamment car l'ensemble des auxiliaires est dimensionné pour la puissance nominale alors que l'installation fonctionne à puissance réduite.

La consommation électrique associée à la production de froid EG (hors terminaux) a été de 64 MWhe sur l'année de mesure, ramenée à 45 MWhe une fois neutralisés les effets de la panne d'horloge (dont 8 MWhe pour la distribution d'eau glacée), soit un SEER annuel de 2.0 pour la production seule, qui tombe à 1.6 si on inclut la distribution dans le périmètre. 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.

Lors de suivi, nous avons identifié une température de départ EG de 7-8°C (plutôt faible) en début de période de mesure et de 10-11°C (pas si mal) en fin de période de mesure après un dysfonctionnement (nous n'avons cependant pas pu avoir de contact avec le prestataire pour expliquer ce qui s'est passé). Le ΔT sur le réseau d'eau glacée est inférieur à 2 degrés toute l'année, ce qui traduit un surdimensionnement de la pompe de distribution par rapport aux besoins réels. Ce problème ne peut pas être corrigé car la pompe de distribution est incluse au GEG, et est cohérent avec le surdimensionnement du GEG lui-même.

Les ventilo-convecteurs ont pu être facilement instrumentés sur toute la période de mesure car ils sont remontés sur un départ commun par étage. Leur consommation représente 15 MWhe/an. Une horloge gère partiellement leur fonctionnement au rez-de-chaussée (coupure nuit et dimanche) mais pas au R+1 (alors qu'une horloge est visible dans l'armoire ?). Nous avons estimé le potentiel d'économies d'énergie grâce à une meilleure gestion des terminaux à 8 MWhe/an sans aucune perte de confort ni investissement.

Un projet de rénovation de la climatisation du bâtiment a été entrepris par la CAF en 2019, d'une part pour résoudre les problèmes d'inconfort subis dans le bâtiment (qui n'ont cependant pas été mis en évidence de manière flagrante lors de nos mesures), d'autre part car la production actuelle est vieillissante. La solution retenue est le remplacement du GEG actuel par un GEG plus puissant de 170 kWf. Selon notre analyse, une augmentation de la puissance installée n'était pas nécessaire puisque le suivi a montré que le GEG actuel est déjà surdimensionné d'un facteur 2.2... Nous regrettons que les résultats du suivi énergétique n'aient pas été pris en compte lors du dimensionnement du nouveau GEG même si nous comprenons le souci de répondre aux plaintes d'inconfort sur le site. Cependant, on aurait pu solutionner le problème d'inconfort par un meilleur équilibrage hydraulique sans augmentation de la puissance installée puisque le GEG existant était déjà surdimensionné.

Annexe 1

Plan d'instrumentation des mesures électriques, frigorifiques et températures

Etage	Pièce	Type	Unité	Désignation	N° sonde	Rmq	Date début	
RDC	TD RDC	P	W	général P1	01001069	triphasé	07/02/2017	
		P	W	général P2		triphasé	07/02/2017	
		P	W	général P3		triphasé	07/02/2017	
		P	W	alim groupe clim P1		triphasé	07/02/2017	
		P	W	alim groupe clim P2		triphasé	07/02/2017	
		P	W	alim groupe clim P3		triphasé	07/02/2017	
		P	W	CTA P1		triphasé	07/02/2017	
		P	W	CTA P2		triphasé	07/02/2017	
		P	W	CTA P3		triphasé	07/02/2017	
		P	W	général clim P1		1000785	triphasé	07/02/2017
	P	W	général clim P2	triphasé	07/02/2017			
	P	W	général clim P3	triphasé	07/02/2017			
	P	W	TD étage P1	triphasé	07/02/2017			
	P	W	TD étage P2	triphasé	07/02/2017			
	P	W	TD étage P3	triphasé	07/02/2017			
			THR	°C/%	porte d'entrée	746/2610		07/02/2017
			THR	°C/%	poteau côté PC libre service	3850		07/02/2017
		THR	°C/%	poteau vers accès poste	145		07/02/2017	
		THR	°C/%	poteau derrière poste G	762		07/02/2017	
		THR	°C/%	open space armoire bois	199		07/02/2017	
		THR	°C/%	open space régulateur Jumbo	802		07/02/2017	
	bureau 8	THR	°C/%	montagne	345		07/02/2017	
		THR	°C/%	open space apres 8 - montagne	3		07/02/2017	
R+1	TD R+1	P	W	général clim P1	819	triphasé	07/02/2017	
		P	W	général clim P2		triphasé	07/02/2017	
		P	W	général clim P3		triphasé	07/02/2017	
		P	W	clim local technique			07/02/2017	
		P	W	clim cassette et salle d'attente			07/02/2017	
	TD R+1	THR	°C/%		220		07/02/2017	
	salle de réunion 105	THR	°C/%		898		07/02/2017	
	salle de repos 103	THR	°C/%		351		07/02/2017	
	bureau 115	THR	°C/%		703		07/02/2017	
bureau 112	THR	°C/%		829		07/02/2017		
ext.	groupe eau glacée	CF	kWh/L	compteur frigorifiques clim			15/05/2018	

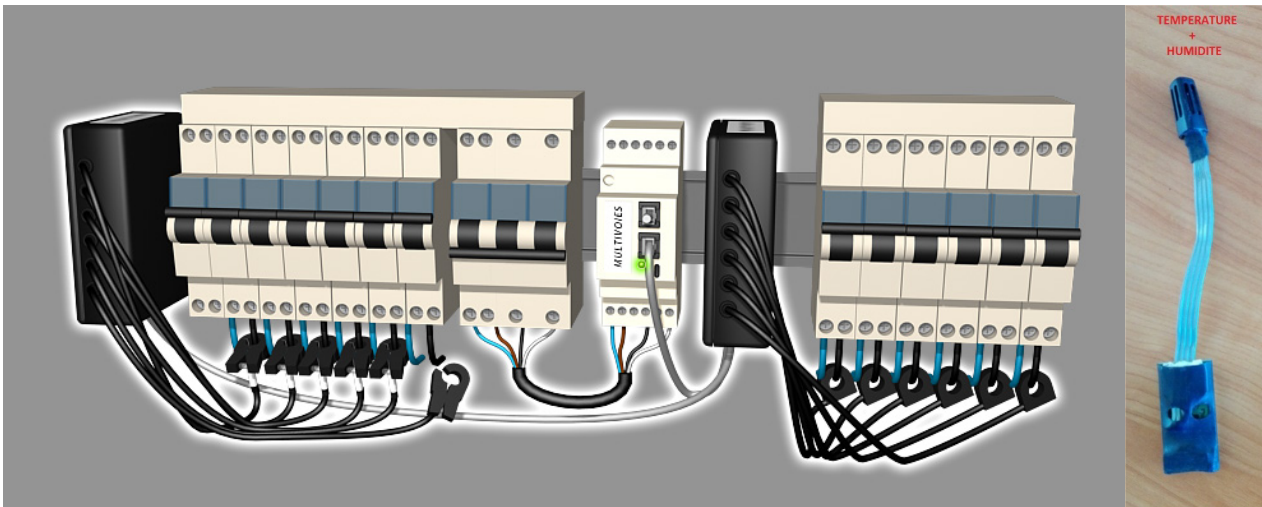
8 mesures de puissance électrique

13 mesures de température/humidité

1 compteur de frigorifiques

22 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 rez-de-chaussée et au R+1 du bâtiment

