



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 :

Fac de lettres Université de La Réunion – St Denis

Résultats de mesure

Livrable 1.3a

septembre 2020

rédigé par GreenTech
avec la participation de  ***et***  ***PHYSIQUE ET INGÉNIERIE MATHÉMATIQUE
POUR L'ÉNERGIE, L'ENVIRONNEMENT
ET LE BÂTIMENT***



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.....	11
3. DEMANDE DE FROID	12
A. SIGNATURE ENERGETIQUE.....	12
B. PROFIL DE CONSOMMATION.....	12
C. MONOTONE DE PUISSANCE	13
D. CONFORT.....	14
4. CARACTERISATION DES SOUS-SYSTEMES	15
A. PRODUCTION.....	15
B. DISTRIBUTION.....	17
C. TERMINAUX DE CLIMATISATION	19
<u>IV. ADAPTATIONS EFFECTUEES</u>	<u>25</u>
1. VARIATION DE LA TEMPERATURE DE DISTRIBUTION EG.....	25
A. MODIFICATIONS EFFECTUEES.....	25
B. INFLUENCE SUR LES PERFORMANCES DU GEG	25
C. INFLUENCE SUR LE CONFORT DANS LES AMPHITHEATRES.....	26
D. CONCLUSIONS	29
2. AJOUT D'UN VARIATEUR DE VITESSE SUR LA POMPE DE DISTRIBUTION EG	30
A. TRAVAUX EFFECTUES.....	30
B. INFLUENCE SUR LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DE LA POMPE ET SUR LE ΔT	31
C. LIMITATIONS.....	34
D. CONCLUSIONS	35
<u>V. CONCLUSIONS.....</u>	<u>36</u>
<u>ANNEXE 1</u>	<u>38</u>
<u>ANNEXE 2</u>	<u>41</u>

Nomenclature

Abréviations

CTA	centrale de traitement d'air
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
------	----------------------------------

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

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

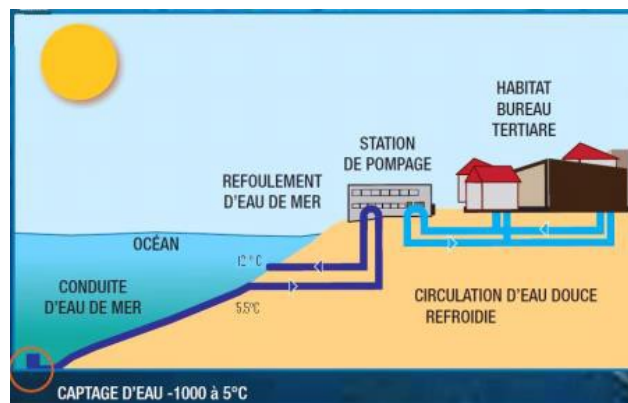
I. Introduction

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 de la Fac de lettres de l'Université de La Réunion à St Denis (Livrable 1.3a).

II. Site étudié

1. Description du bâtiment

Le site étudié fait partie du campus de l'Université de La Réunion à St Denis (Moufia).

Figure 2 : Localisation du site étudié



Il s'agit de la tranche Sud de Faculté de lettres, dont on voit l'emplacement dans l'enceinte du campus de l'Université de La Réunion sur la Figure 3 :

Figure 3 : Emplacement de la Fac de lettres sur le campus du Moufia (Université de La Réunion)



Le bâtiment étudié présente une configuration en C mais seule l'aile Sud du bâtiment a été instrumentée (dispose d'un GEG dédié). La surface de la zone étudiée est de 1755 m² répartis sur 6 étages comprenant des salles de cours et 2 amphithéâtres (bâtiment à usage d'enseignement). Le bâtiment date de 1997. L'utilisation de la climatisation est bien gérée sur ce bâtiment avec une coupure hivernale et en inoccupation (nuit, week-end, fermeture Université). Les couloirs, sanitaires et locaux techniques ne sont pas climatisés.

Figure 4 : Vue du bâtiment de la Fac de lettres

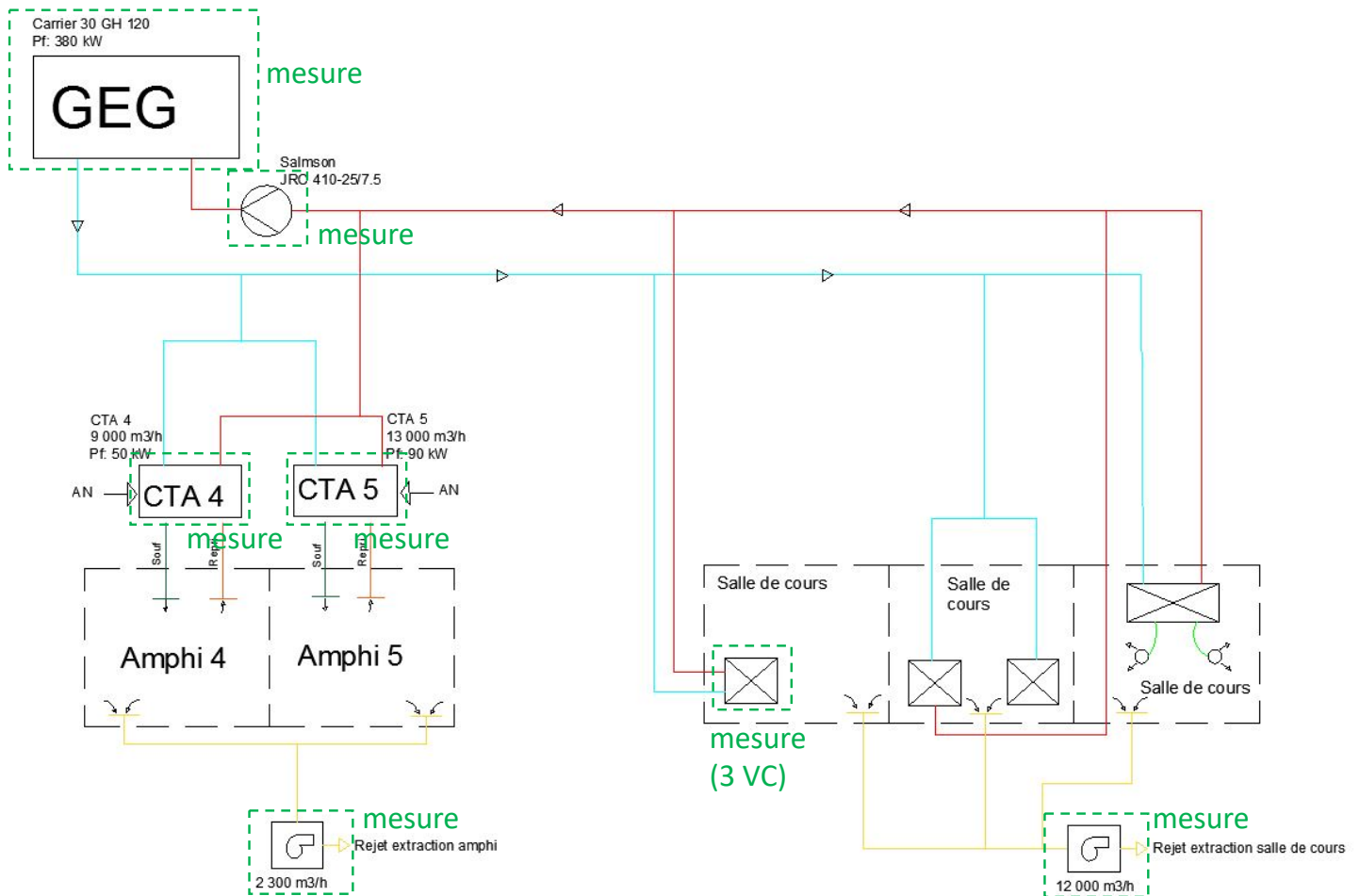


La production de froid est assurée par 1 groupe d'eau glacée Carrier 30GH120 de 396 kW à 4 étages (NB : un des 4 compresseurs est hors service). Il alimente en direct un réseau d'eau glacée desservant l'aile Sud du bâtiment de la Fac de lettres. La climatisation est assurée par 1 CTA pour chaque amphi et des ventilo-convecteurs pour les salles de cours. 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 5 : Vue du groupe de production de froid



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



Les CTA assurent à la fois le traitement de l'air neuf et la climatisation des 2 amphis. Les salles de cours sont climatisées par 52 ventilo-convecteurs, le renouvellement d'air est assuré « naturellement » par mise en dépression grâce à l'extraction d'air vicié.

Le site est équipé d'une GTC Energie Concept permettant la commande de l'ensemble des équipements. La maintenance de l'ensemble des équipements est assurée par la société Cegelec.

2. Instrumentation

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

- production EG
- distribution EG
- terminaux de climatisation

Elle a été complétée par les données météorologiques fournies par une station dédiée au projet (Lufft WS503) positionnée sur le toit de la bibliothèque Droit et Lettres située à côté du bâtiment étudié (cf. Figure 7). L'ensemble des mesures a bénéficié d'un pas de temps d'enregistrement de 10 min.

Figure 7 : Vue de la station météo installée sur le toit de la bibliothèque Droit et Lettres



Un compteur de frigories Meistream équipé d'un calculateur Polluwatt a été installé sur le réseau EG pour mesurer la demande de froid du site (cf. Figure 8).

Figure 8 : Vue du compteur de frigories installé sur le réseau EG



Les équipements instrumentés (consommation électrique) sont mentionnés sur la Figure 6. Etant donné leur nombre, les ventilo-convecteurs n'ont pas pu être instrumentés de manière systématique : seuls 3 départs reprenant chacun 4 VC ont été mesurés. Les mesures de consommation électrique des terminaux ont été

accompagnées de mesures de température/hygrométrie 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 (31 points de mesure en tout) d'avril 2018 à novembre 2019 et le schéma de positionnement des capteurs de température aux étages R+1, R+4 et R+5.

Etant donnée l'étendue de la période d'instrumentation, une période de référence a été sélectionnée pour les analyses présentées dans la suite : du 01/04/2018 au 31/03/2019.

III. Performances énergétiques

1. Bilan énergétique

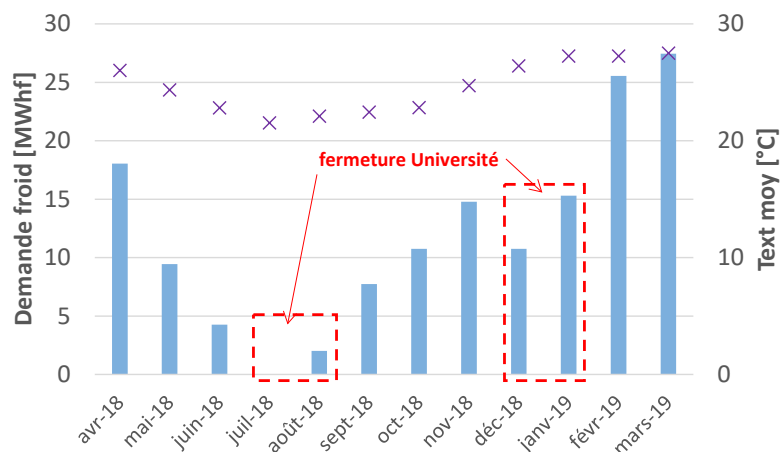
Le bilan énergétique de la climatisation du site (hors terminaux) est présenté pour la période du 01/04/2018 au 31/03/2019 dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Bilan énergétique de la climatisation sur le site de la Fac de lettres (avr 2018-mars 2019)

		avr-18	mai-18	juin-18	juil-18	août-18	sept-18	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	Total
Demande froid	MWhf	18.055	9.442	4.262	0.000	2.021	7.730	10.749	14.781	10.753	15.309	25.561	27.451	146
Conso élec clim	MWhe	11.744	8.249	5.960	0.698	4.360	8.344	9.657	11.061	7.678	9.559	14.582	15.663	108
Groupe eau glacée	MWhe	9.533	6.157	4.629	0.676	3.150	5.713	7.170	8.603	6.248	8.063	12.447	13.312	86
Pompe distribution EG	MWhe	2.211	2.092	1.330	0.022	1.210	2.632	2.487	2.458	1.430	1.495	2.135	2.351	22
SEER production EG seule		1.9	1.5	0.9		0.6	1.4	1.5	1.7	1.7	1.9	2.1	2.1	1.7
SEER avec distribution EG		1.5	1.1	0.7		0.5	0.9	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.8	1.4

La demande de froid mensuelle varie fortement d’un mois à l’autre à cause de deux facteurs (cf. Figure 9) : la température moyenne extérieure et l’occupation des locaux : la climatisation est coupée en hiver et durant les périodes de fermeture de l’Université. La demande de froid totale est de l’ordre de 150 MWhf/an (soit ~85 kWhf/m²/an), à plus de 75% sur l’été (novembre-avril). Cette valeur est faible grâce à la bonne gestion de la climatisation (coupure hivernale et en inoccupation (nuit, week-end, fermeture Université)). La consommation électrique associée à la climatisation (hors terminaux) est de 108 MWhe/an (dont 22 MWhe/an pour la distribution EG), soit 62 kWhf/m²/an (~6 €/m²/an).

Figure 9 : Variation de la demande de froid mensuelle



La distribution EG représente 20% de la consommation de la climatisation (hors terminaux), ce qui est démesuré. En effet, comme développé au §III.4.b, le débit de distribution est beaucoup trop élevé par rapport aux besoins, ce qui résulte en une différence de température entre départ et retour réseau EG de moins de 1 degré toute l’année (alors qu’une valeur de 5 est généralement visée). Ce problème ne peut pas être corrigé car la pompe de distribution est à débit fixe.

Au final, le SEER mensuel (production seule) varie entre 0.6 en hiver et 2.1 en été, pour une valeur annuelle de 1.7. Le SEER tombe à 1.4 si on inclut la consommation de la distribution à cause du surdimensionnement de la pompe. Ces valeurs sont très faibles comparées aux standards considérés habituellement (valeur de 3 souvent prise en référence), notamment à cause du surdimensionnement important du GEG (cf. paragraphe suivant).

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 (avr 2018-mars 2019)

		avr-18	mai-18	juin-18	juil-18	août-18	sept-18	oct-18	nov-18	déc-18	janv-19	févr-19	mars-19	Total
Demande froid														
Pmoy (qd fonctionne)	kWf	62	37	28		18	28	33	45	56	76	87	90	54
Pmax	kWf	131	286	279		89	94	153	100	117	161	219	163	286
Pmin	kWf	0	0	0		0	0	0	0	2	1	1	0	0
Taux de charge moy		16%	9%	7%		5%	7%	8%	11%	14%	19%	22%	23%	14%
Taux de charge max		33%	72%	70%		23%	24%	39%	25%	30%	41%	55%	41%	72%
Débit eau glacée														
Dmoy (qd fonctionne)	m ³ /h	89	88	89		89	88	88	88	88	88	89	90	88

L’installation est munie d’un GEG d’une puissance de 396 kWf. La puissance moyenne horaire (quand le GEG fonctionne) enregistrée sur la période de référence varie entre 18 kWf (Tc=5%) en hiver et 90 kWf (Tc=23%) en été, avec des valeurs max ponctuelles de 90 kWf (Tc<25%) en hiver et 290 kWf (Tc=72%) en été. Cela dénote d’un surdimensionnement important avec seulement 370 heures de fonctionnement « équivalent pleine puissance » sur l’année (ce qui est très faible mais s’explique également par la bonne gestion de la climatisation sur le site).

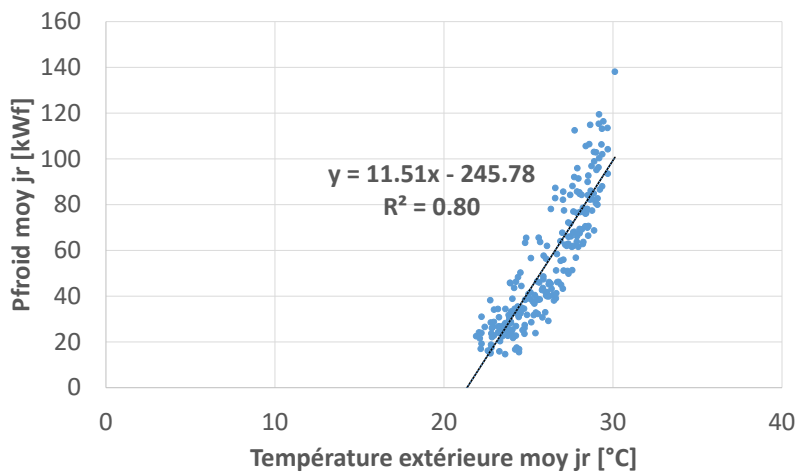
La distribution EG est assurée par une pompe double à débit fixe avec un débit moyen mesuré de l’ordre de 90 m³/h (peu de variation de débit). Ce débit s’avère très fortement surdimensionné comme en témoignent les faibles ΔT (<1K toute l’année) observés sur le réseau de distribution (cf. III.4.b).

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 (NB : Les données de température extérieure ont été filtrées sur les périodes où la climatisation fonctionne effectivement). Elle se trace en moyenne journalière afin de limiter la dispersion (cf. Figure 10).

Figure 10 : Signature énergétique du bâtiment en fonction de la température extérieure (données filtrées sur les périodes de fonctionnement de la climatisation) (avr 2018-mars 2019)

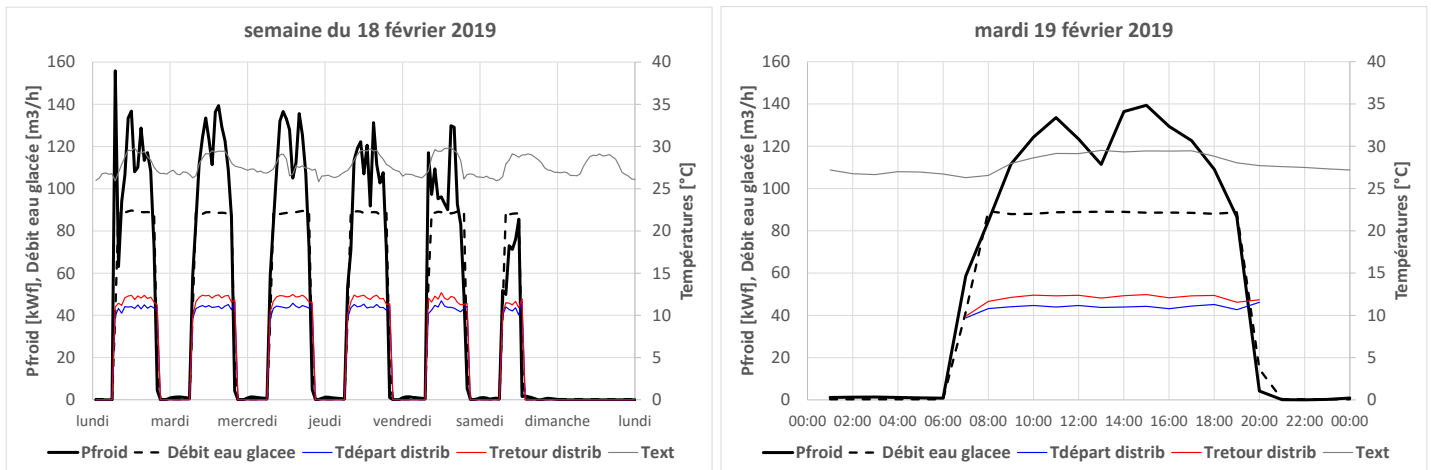


La réponse du bâtiment est linéaire par rapport à la température extérieure (la tendance est très nette même si la corrélation n’est pas très bonne). La pente est de 11.5 kWf/K (soit un appel de charge supplémentaire de 11.5 kWf lorsque la température extérieure augmente de 1 degré).

b. Profil de consommation

La Figure 11 présente le profil de demande de froid sur une semaine de février 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)

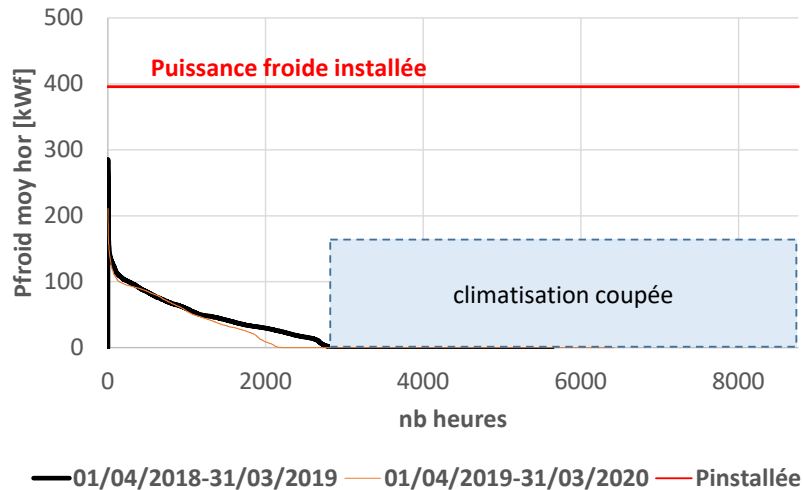


Le GEG est coupé le week-end (samedi midi à lundi matin), en lien avec l'inoccupation du site. Le GEG est également coupé la nuit (19h à 6h30).

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 2 années.

Figure 12 : Monotone de puissances froides sur l'année de référence (avr 2018-mars 2019) ainsi que sur l'année suivante



On fait les observations suivantes :

- On identifie visuellement le surdimensionnement de la puissance installée de 400 kWf, soit ~225 Wf/m² par rapport à la puissance maximale appelée avec une valeur représentative de 160 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 ~90 Wf/m² appelé au maximum. **Le GEG est ainsi surdimensionné d'un facteur 2.5.**
- On note la répétabilité de la structure de la demande de froid d'une année à l'autre, même si on observe moins d'heures de fonctionnement sur la 2^{ème} année que pour l'année de référence (2200h contre 2700h), ce qui est probablement lié à des périodes d'arrêt de la climatisation plus prolongées (les coupures lors de fermeture de l'Université se faisant de manière manuelle) ; à

noter également que la 2^{ème} année inclut une période de fermeture exceptionnelle due à la crise sanitaire du Covid-19 (dès le 16/03/2020).

- Au final, la demande de froid est de 146 MWhf sur l'année de référence contre 120 MWhf sur l'année suivante (soit 18% de moins).

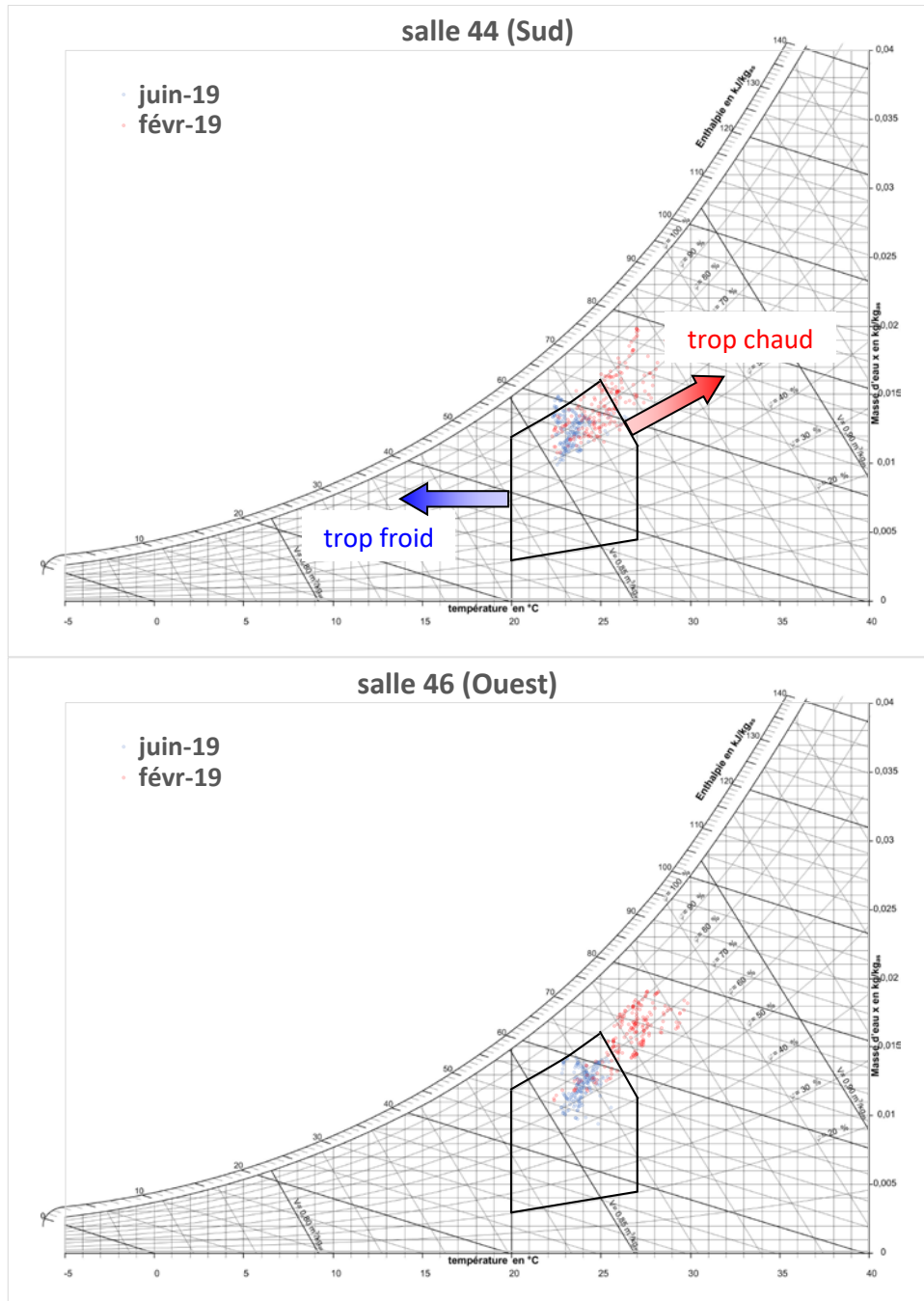
d. Confort

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 13 (page suivante) présente les résultats obtenus sur un mois d'hiver (juin 2019) et un mois d'été (février 2019) pour 2 salles de cours de l'étage R+4. Les données présentées ont été filtrées sur les périodes de cours (jours de semaine de 8h à 18h). *NB : La climatisation n'avait pas été coupée en juin 2019.*

Malheureusement les sondes d'ambiance installées dans les salles de cours sur lesquelles les VC ont également été instrumentés ont disparu ou n'ont pas fonctionné. Pour les sondes d'ambiance restantes, nous n'avons pas de moyen de savoir à quels moments la pièce était climatisée ou non...

- Pour la salle 44 (exposition Sud) : en février 2019 (été), 58% des valeurs étaient dans le polygone de confort, mais on ne sait pas si les ventilo-convecteurs étaient en fonctionnement ou pas ; en juin 2019 (hiver), 92% des valeurs étaient dans le polygone de confort, que la pièce soit climatisée ou non.
- Pour la salle 46 (exposition Ouest) : en février 2019, on note plus de points en dehors du polygone de confort que pour la salle 44, ce qui peut en partie s'expliquer par le fait que la salle est exposée à l'Ouest et reçoit probablement plus de soleil que la salle 44 (mais on ne sait toujours pas quand les ventilo-convecteurs étaient en fonctionnement ou pas). En juin 2019 par contre, 100% des valeurs étaient dans le polygone de confort.

Figure 13 : Confort intérieur dans 2 salles de cours au R+4 de l'aile Sud de la Fac de lettres en hiver (juin 2019, bleu) et en été (février 2019, 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 :

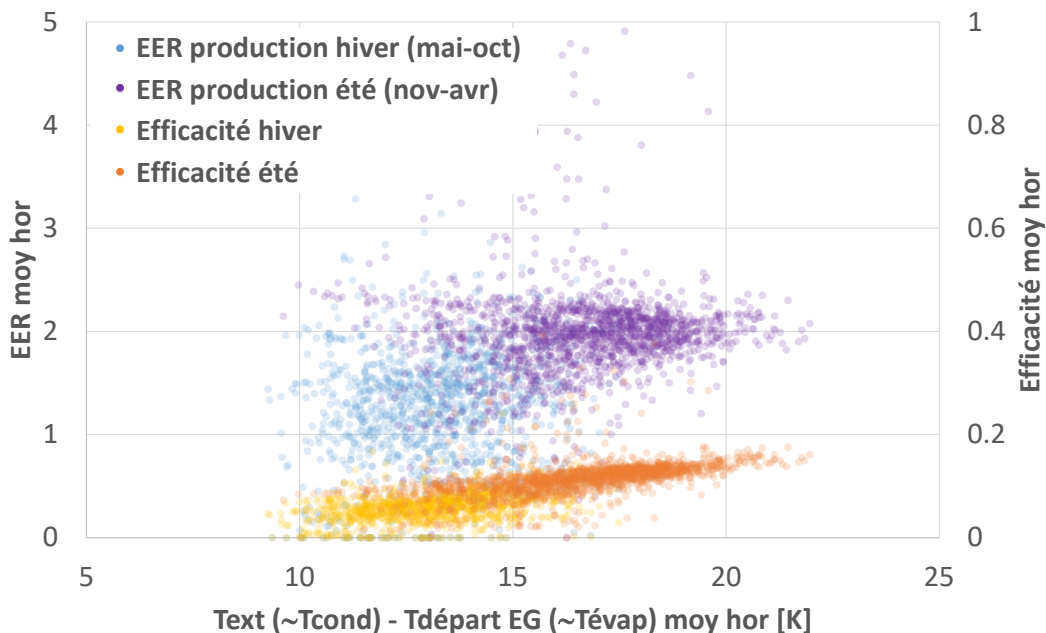
- Diminution de l'EER lorsque la différence entre la température d'évaporation et la température de condensation augmente pour une même puissance froide fournie (effet thermodynamique)

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.

- 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 du GEG (auxiliaires de production compris, 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.

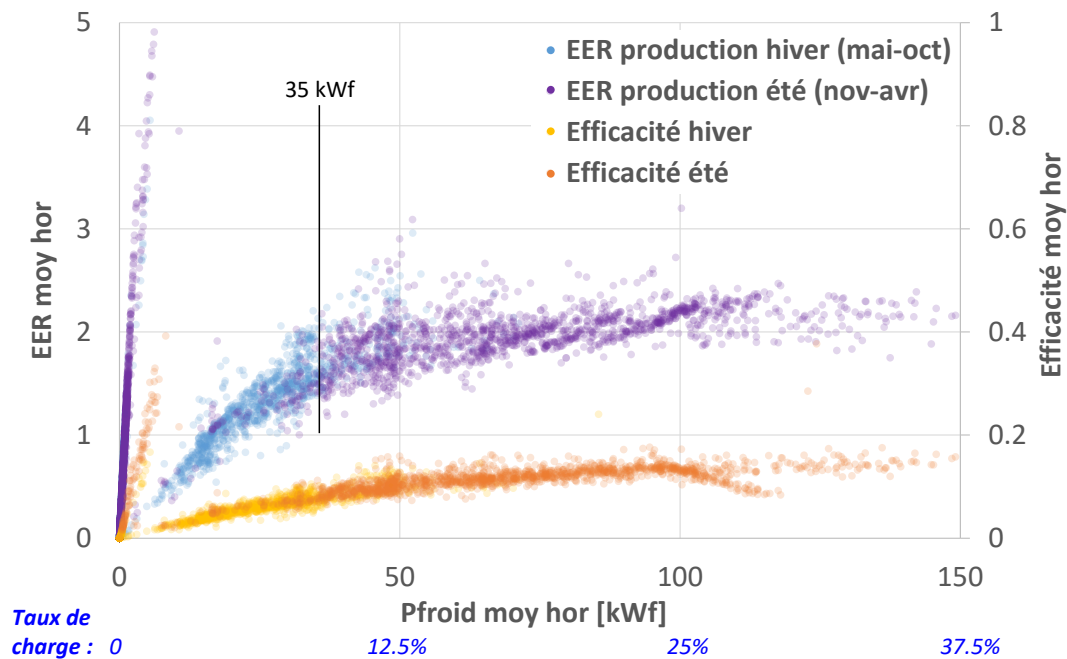
Figure 14 : Performances de la production d'eau glacée par le GEG en fonction de la différence entre température extérieure et température de départ EG (avr 2018-mars 2019)



On lit une légère tendance de l'EER à diminuer avec la différence de température en été (taux de charge plus élevés), comme le dicte la thermodynamique. Sur l'hiver il y a beaucoup de dispersion ; en théorie les EER devraient être meilleurs car la température de condensation ($\sim T_{ext}$) est plus basse mais en réalité l'effet thermodynamique est contré par le fait qu'on fonctionne à très faible taux de charge (<10%), ce qui implique que la consommation des auxiliaires est prépondérante dans la consommation du GEG par rapport à la consommation des compresseurs.

La Figure 15 présente la variation de l'EER du GEG (auxiliaires de production compris, hors pompe de distribution) en valeurs horaires en fonction de la puissance appelée sur la période de référence.

Figure 15 : Performances de la production d'eau glacée par le GEG en fonction de la puissance froide appelée (avr 2018-mars 2019)



On discerne deux types de comportement :

- en été, au-dessus de 35 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 35 kWf, l'EER tombe jusqu'à <0.5 lorsque la puissance appelée descend en dessous de 10 kWf (~2% 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 ;
- les taux de charges observés sont faibles (<30%), 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 0.02 et 0.16, qui augmentent avec la puissance appelée à cause du poids de la consommation des auxiliaires.

b. Distribution

Températures de travail

La Figure 16 présente les températures de travail sur le réseau EG (moyennes horaires) en fonction de la température extérieure sur la période de référence. La Figure 17 présente les mêmes données sous la forme de monotones de température (=valeurs classées de la plus grande à la plus petite).

Figure 16 : Températures de travail sur le réseau de distribution EG (avr 2018-mars 2019)

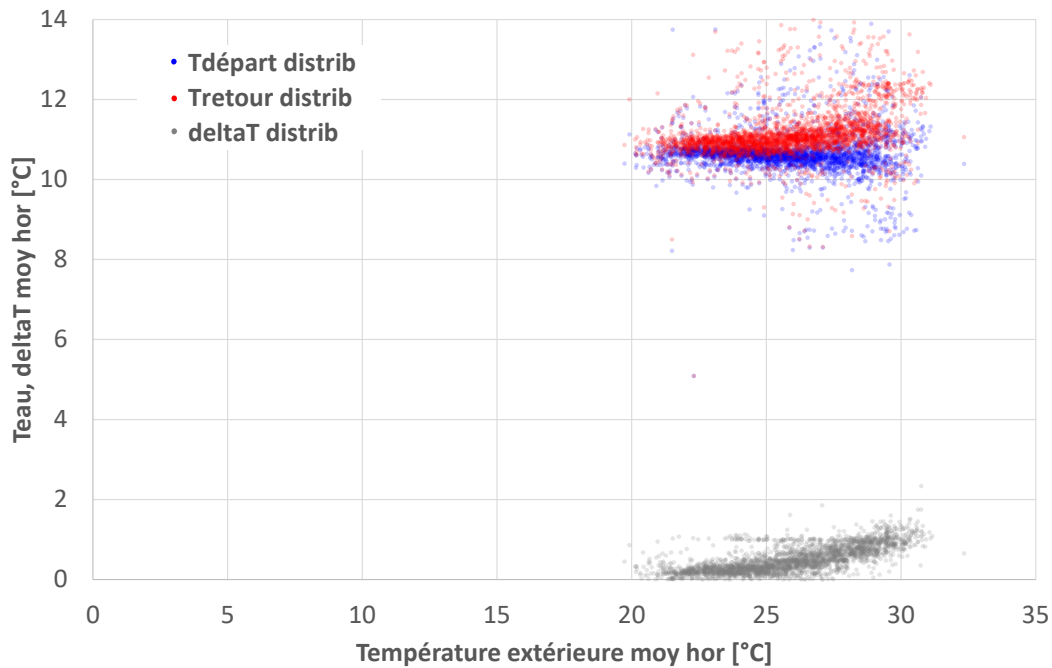
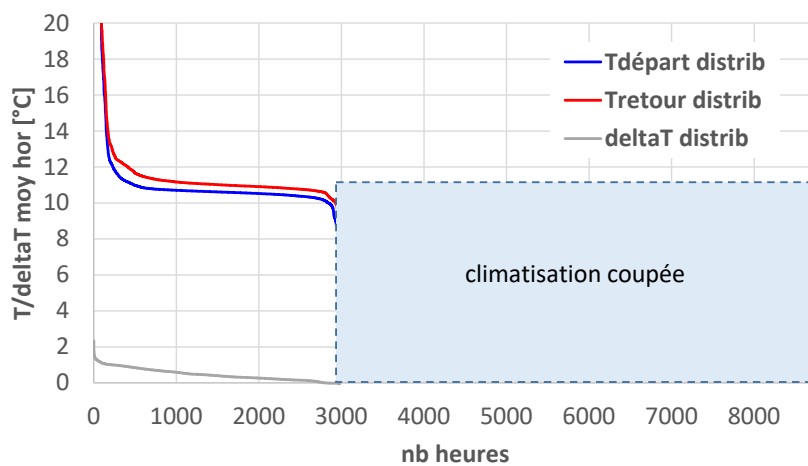


Figure 17 : Monotones de températures de départ/retour/ ΔT sur le réseau de distribution (avr 2018-mars 2019)



On n’observe pas de variation de la température de départ EG avec la température extérieure. La température de départ de la distribution est comprise entre 10 et 11°C, la température de retour de la distribution entre 10.5 et 11.5°C. Ces niveaux de température sont corrects par rapport à ce qui est souvent observé (température de départ généralement inférieure à 7°C).

Les températures de départ et de retour du réseau EG sont quasiment confondues : la différence de température entre départ et retour distribution est inférieure à 1K même en été, ce qui témoigne du surdimensionnement important de la pompe de distribution EG.

Consommation électrique

Comme évoqué plus haut, la consommation électrique de la pompe de distribution atteint 20% de la consommation de la production de froid, ce qui est disproportionné. La puissance de la pompe de distribution est de 8 kWe soit un ratio d’environ 60 We/m³/h. La consommation spécifique est de 0.2 kWhe/kWhf distribué ($\Delta T < 1K$), ce qui est 10 fois plus élevé qu’au PFME (ΔT entre 2 et 6K).

A noter que l’installation d’un variateur de fréquence sur la pompe de distribution a permis d’atténuer son fort surdimensionnement et de réduire sa consommation électrique (cf. IV.2).

c. Terminaux de climatisation

Le bâtiment est équipé de deux types de terminaux de climatisation :

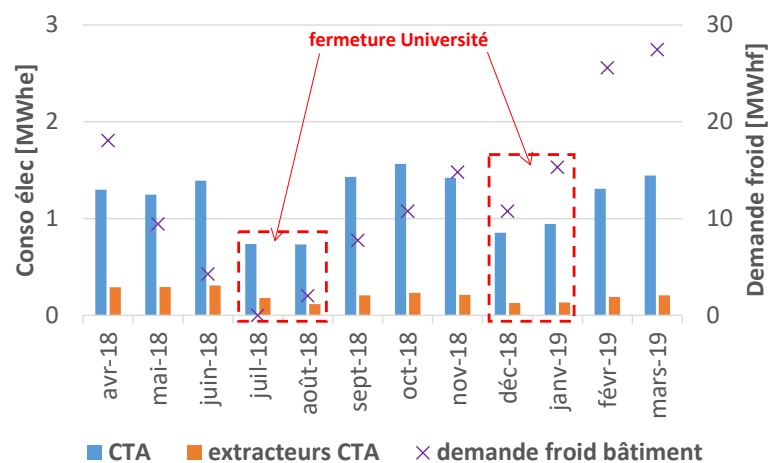
- 2 CTA qui assurent à la fois le traitement de l'air neuf et la climatisation des amphis 4 et 5 (R+1), avec leurs extracteurs associés
- 52 ventilo-convecteurs pour la climatisation des salles de cours, avec un extracteur permettant un renouvellement d'air naturel

Nous avons instrumenté les 2 CTA et un échantillon de 3 départs de salles équipées chacune de 4 VC (cf. Annexe 1).

CTA

Nous avons mesuré la consommation électrique des 2 CTA et de leurs extracteurs d'air associés. La Figure 18 présente la consommation mensuelle des CTA et des extracteurs associés sur l'année de référence. La demande de froid est également mentionnée pour information.

Figure 18 : Consommation mensuelle des CTA et de leurs extracteurs (avr 2018-mars 2019)

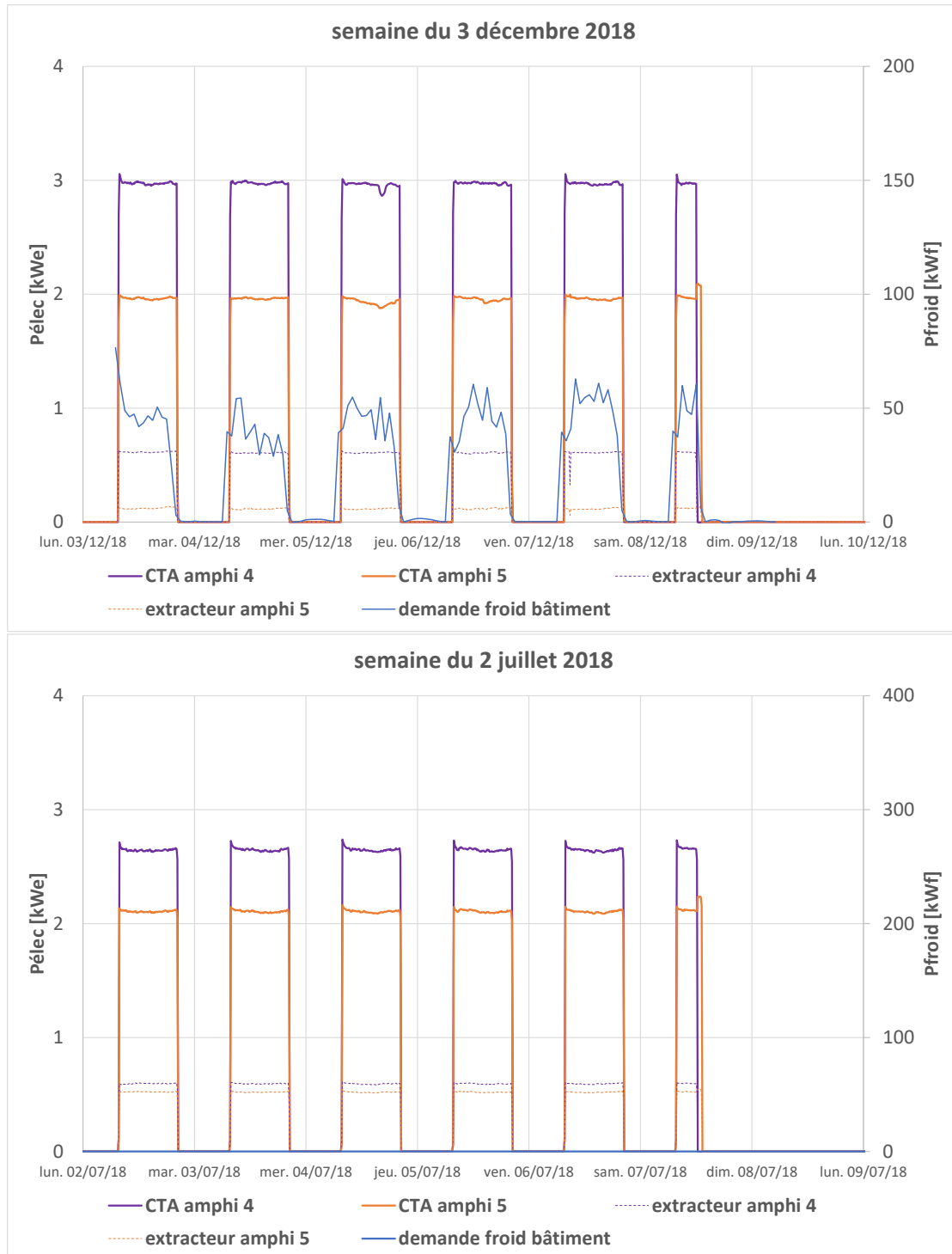


On note que les CTA comme les extracteurs fonctionnent toute l'année mais avec une intensité variable. Le fonctionnement des CTA est nécessaire en hiver même en l'absence de climatisation car elles assurent le renouvellement d'air dans les amphis. Elles ne sont cependant pas systématiquement coupées en période de fermeture de l'Université (cf. juillet 2018) alors que les locaux ne sont pas utilisés.

La consommation des CTA est de 0.7 à 1.5 MWhe/mois (14.4 MWhe sur l'année), celle des extracteurs est de 0.1 à 0.3 MWhe/mois (2.5 MWhe sur l'année). **Au final, les CTA+extracteurs représentent 17 MWhe par an, soit 15% de la consommation électrique dédiée à la production EG.**

La Figure 19 présente la consommation électrique des 2 CTA et de leurs extracteurs sur une semaine d'été (haut) et sur une semaine d'hiver (bas). La demande de froid du bâtiment est également mentionnée.

Figure 19 : Consommation électrique des 2 CTA et de leurs extracteurs sur une semaine d’été (haut) et sur une semaine d’hiver (bas)



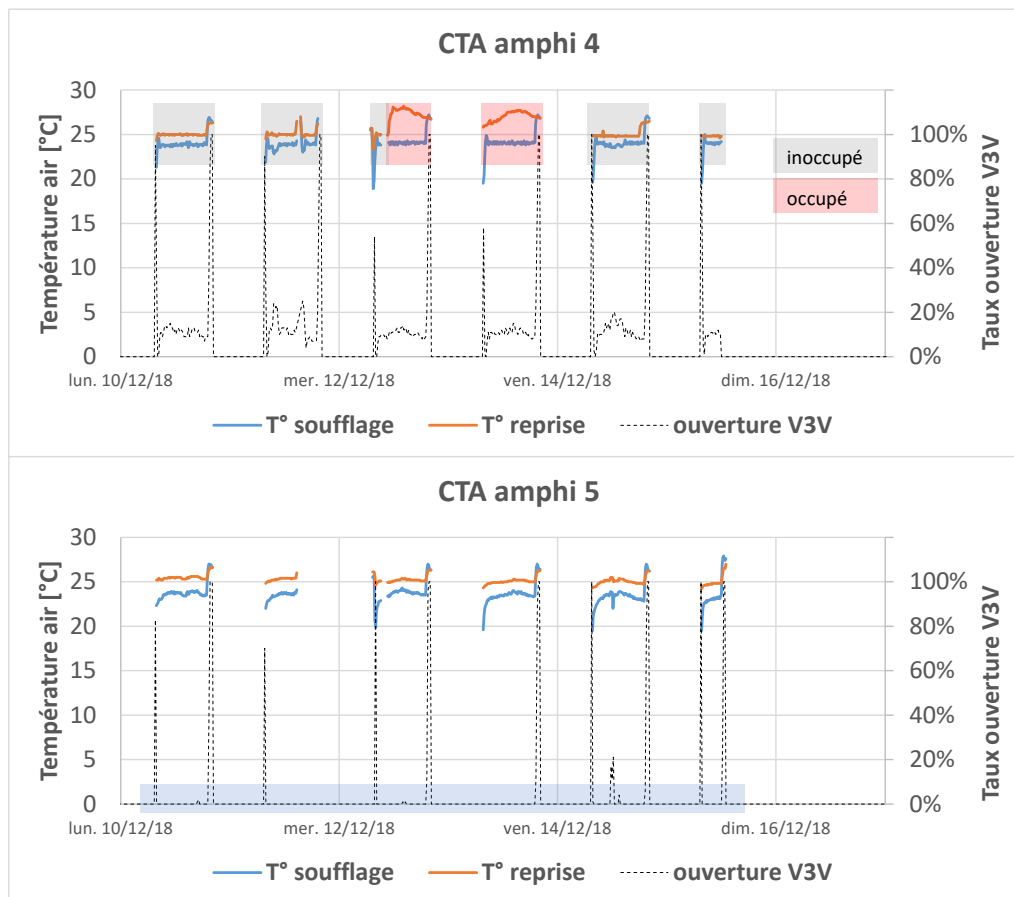
On note que le planning de fonctionnement des CTA, géré par la GTC, est le même dans les deux cas (coupure nuit et week-end), il n’y a pas de commande en local : les amphis sont climatisés même s’ils ne sont pas occupés. Chaque CTA consomme entre 2 et 3 kW_e (sans variation de débit au cours de la journée). Elles fonctionnent sur la semaine d’hiver comme sur la semaine d’été alors qu’il n’y a pas de demande de froid (car elles sont chargées d’apporter l’air neuf), mais avec un régime de fonctionnement plus bas pour la CTA de l’amphi 4.

Les mesures montrent qu’elles ont été coupées manuellement le 20/07/2018 (CTA amphi 4) et le 11/07/2018 (CTA amphi 5). Elles auraient cependant pu être coupées (ainsi que leurs extracteurs) dès la fin des cours afin d’économiser la consommation liée (près d’1 MWh rien qu’en juillet 2018). A noter qu’en décembre 2018, les CTA ont bien été coupées dès la fermeture de l’Université.

Les CTA sont régulées de la façon suivante : la température de consigne à la reprise est de 25°C. Si la température de reprise dépasse 25°C, la vanne 3 voies s'ouvre plus ou moins (régulateur PID) afin d'alimenter la batterie froide en eau glacée (avec une température de soufflage de 14°C au minimum) et se referme lorsque la température de consigne est atteinte.

La Figure 20 montre un exemple des températures de soufflage/reprise sur les deux CTA sur une semaine d'été (filtrées air sur les périodes de fonctionnement de la CTA), ainsi que l'état de la vanne 3 voies d'alimentation des CTA en EG (données récupérées sur la GTC).

Figure 20 : Exemple de températures de soufflage et reprise sur les deux CTA (10-16/12/2018)



On peut faire les observations suivantes :

Pour la CTA de l'amphi 4 :

- Lundi, mardi, vendredi, samedi, les températures de soufflage et de reprise sont très proches l'une de l'autre, avec une différence de température de moins de 1 degré, ce qui témoigne de la très faible charge thermique dans l'amphi 4 (probablement inutilisé). *NB : Nous n'avons pas l'historique du planning d'utilisation réelle de l'amphi.* Le taux d'ouverture de la vanne 3 voies est très faible en journée (<10%), ce qui est cohérent. Il y a un pic d'ouverture le matin à la relance et le soir à la coupure. La vanne est fermée la nuit lorsque le GEG est coupé.
- Mercredi et jeudi, la température de reprise augmente en dessus de 25°C (les amphis étaient probablement occupés), mais la vanne 3 voies ne s'ouvre pas plus que les autres jours alors que la température de reprise dépasse la température de consigne : la régulation de cette vanne 3 voies ne semble pas fonctionnelle...?

Pour la CTA de l'amphi 5 :

- La vanne 3 voies est tout le temps fermée.
- La température de soufflage est à 23°C en plein été alors que la vanne 3 voies est totalement fermée (donc la batterie froide n'est pas censée être alimentée). La vanne 3 voies est peut être passante (i.e. il y a un débit alors qu'elle est censée être fermée)...

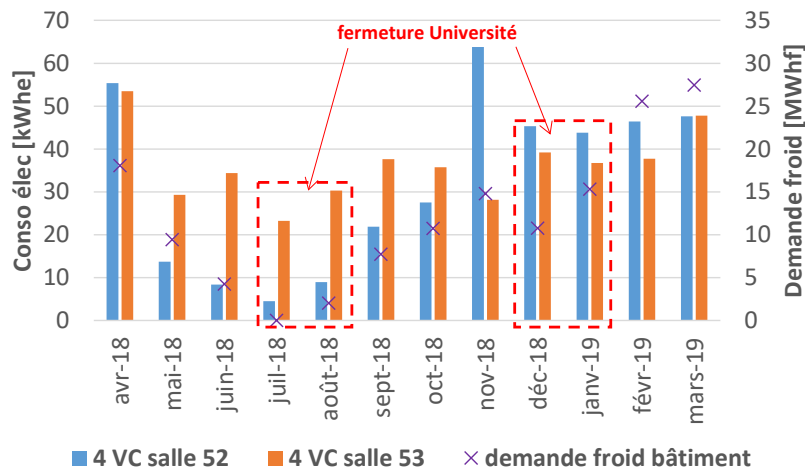
En conclusion, le fonctionnement théorique de chacune des deux CTA n'est pas cohérent avec les mesures réalisées, mais nous n'avons pas assez d'éléments pour mieux comprendre...

Ventilo-convecteurs

Nous avons instrumenté les départs électriques des VC d'un échantillon de 3 salles de cours sur les 21 que comporte le bâtiment. Chaque salle de cours est équipée de 2 à 4 cassettes de climatisation de marque Carrier (cf. liste des VC par salle en Annexe 2). Il y a seulement 2 modèles différents (cassette simple et cassette double) sur l'ensemble du bâtiment. La puissance cumulée des VC des 3 salles instrumentées représente 1.9 kWe sur les 7.8 kWe de l'ensemble des VC du bâtiment.

La Figure 21 présente la consommation mensuelle des VC de deux salles de cours sur l'année de référence. La demande de froid est également mentionnée pour information.

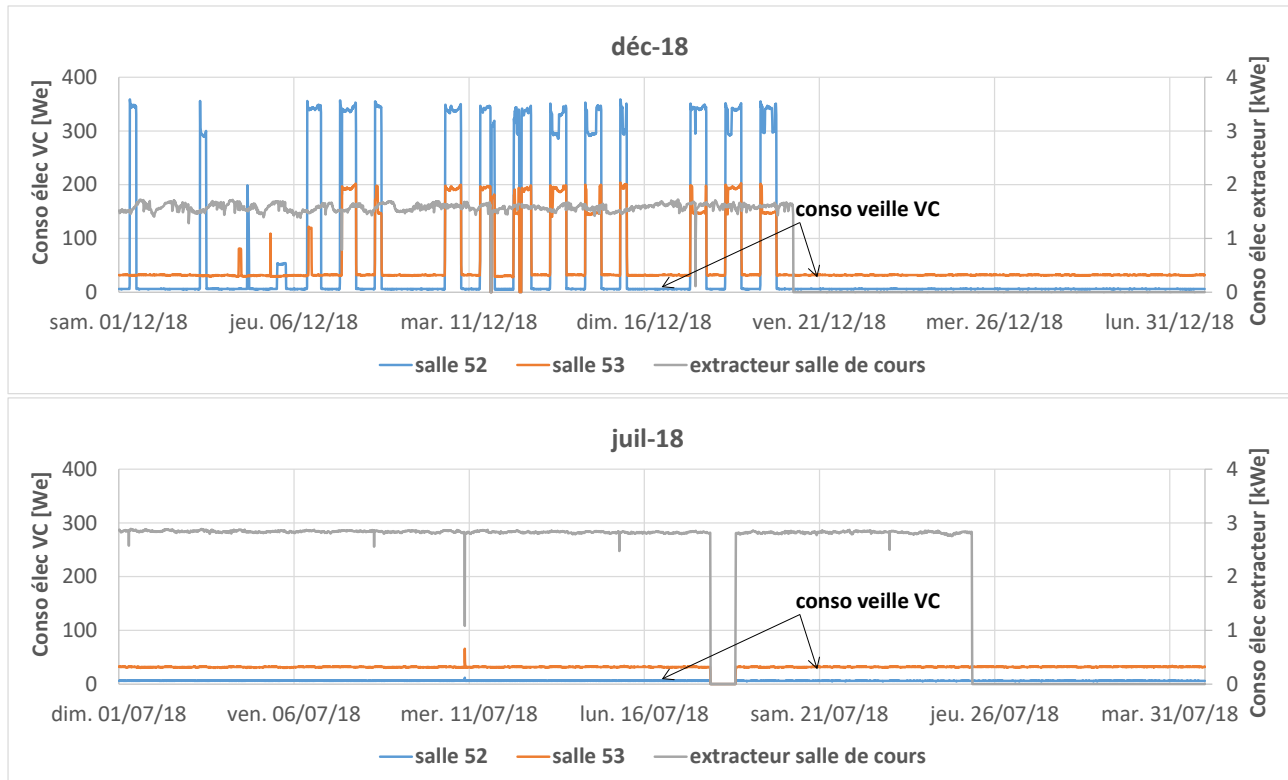
Figure 21 : Consommation mensuelle des VC de deux salles de cours (avr 2018-mars 2019)



La consommation électrique des VC est plus élevée en été qu'en hiver, ce qui paraît conforme avec le fait que les VC n'ont pas de raison d'être en fonctionnement lorsqu'il n'y a pas de demande de froid. La consommation des VC de la salle 53 n'est cependant pas négligeable en juillet 2018 alors qu'il n'y a eu aucune demande de froid.

La Figure 22 présente la consommation électrique des deux mêmes salles de cours sur les mois de décembre 2018 (été) et juillet 2018 (hiver).

Figure 22 : Consommation électrique des VC de deux salles de cours et de l'extracteur salles de cours pour le mois de décembre 2018 (haut) et juillet 2018 (bas)



On peut faire les observations suivantes :

- Les VC semblent bien coupés en dehors des périodes d'utilisation des salles de cours comme en témoigne le profil de consommation. Il faudrait pour en être sûrs recouper avec l'utilisation effective des salles de cours (les VC sont activés par l'utilisateur mais ont une autorisation de marche sur planning horaire commandée par la GTC).
- La consommation des VC de la salle 53 est moins élevée (~200 We) que celle des VC de la salle 52 (~350 We) alors que les équipements sont quasiment les mêmes, mais il n'est pas sûr que l'ensemble des VC soient en mis en marche à chaque utilisation (surtout que la salle 53 est coupée en deux).
- Les VC sont à l'arrêt durant les périodes de fermeture de l'Université. La consommation est cependant très différente d'une salle à l'autre (~30 We pour les VC de la salle 53 contre 6 We pour la salle 52) alors que les équipements installés sont les quasiment les mêmes... Cette veille de 30 We mène à une consommation de 23 kWh pour le mois de juillet 2018, soit près de la moitié de ce que consomment ces mêmes VC pour un mois d'été... Tous les VC n'ont pas été instrumentés donc il est impossible de connaître leur consommation de veille mais il y aurait probablement un intérêt à couper complètement l'alimentation des VC en périodes de coupure de la climatisation (hiver et fermetures de l'Université) si les départs électriques correspondants peuvent être remontés sur la GTC.
- L'extracteur des salles de cours fonctionne 24h/24. Sa puissance était de l'ordre de 3 kWe en juillet 2018 et est descendue à 1.5 kWe en décembre 2018 suite à un remplacement du matériel. Notons qu'il a un seul régime de fonctionnement, ce qui ne permet pas de baisser la vitesse en inoccupation dans une perspective d'économies d'énergie. Il a bien été coupé lors de la fermeture de l'Université en décembre mais seulement le 25/07 alors que tout le reste était déjà coupé...

Sur la base de si peu de mesures, il est difficile d'évaluer la consommation des VC de l'ensemble du bâtiment sans connaître l'utilisation des salles de cours. Cependant, **en extrapolant par rapport à la consommation des équipements mesurés, nous pouvons estimer que la consommation de l'ensemble des VC est**

probablement comprise entre 4 et 6 MWhe/an en plus des 11 MWhe liés au fonctionnement de l'extracteur des salles de cours.

En conclusion, **la consommation des terminaux** de climatisation (CTA + VC) ainsi que des extracteurs associés est souvent négligée dans les analyses alors qu'elle se révèle significative : dans ce cas **probablement de l'ordre 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).**

Gestion des coupures

Il y a sur le bâtiment une gestion aussi bien de la production de froid que des terminaux de climatisation (VC, CTA, extracteurs) qui sont tous remontés sur la GTC. La climatisation est coupée :

- lors des périodes de fermeture de l'Université (vacances) : le planning de coupure est transmis par le responsable Maitrise de l'énergie et Développement durable de l'université Eric Monceyron au prestataire de climatisation afin qu'il le programme dans la GTC ;
- en hiver : sur décision du président de l'université, la date est variable d'une année à l'autre en fonction du ressenti dans les locaux.

Le suivi a cependant montré que les coupures se sont faites de manière échelonnée : production de froid le 19/06, CTA amphi 5 le 11/07, CTA amphi 4 le 20/07, extracteur salles de cours le 25/07. Il est possible que cela découle de contraintes différentes sur l'utilisation des salles mais il est aussi possible que cela résulte de coupures franches réalisées par le prestataire au coup par coup (a déjà été observé par le passé) au lieu d'un planning uniformisé programmé dans la GTC comme demandé par le maitre d'ouvrage. Pour clarifier les choses, une synchronisation de l'ensemble des mises à l'arrêt au moment de la fermeture des locaux serait préférable.

IV. Adaptations effectuées

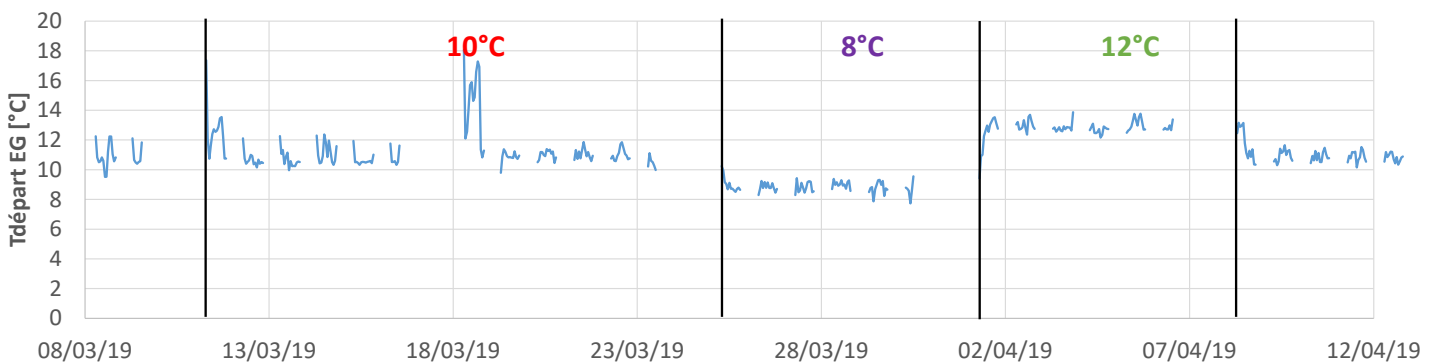
1. Variation de la température de distribution EG

a. Modifications effectuées

Des essais de variation de la température de départ EG, par palier de 2 degrés autour de sa valeur actuelle (10°C) ont été réalisés en collaboration avec le responsable Maitrise de l'énergie et Développement durable de l'université Eric Monceyron (cf. Figure 23) :

- 10°C avant le 25/03/2019
- 8°C du 25/03 au 01/04/2019
- 12°C du 01/04 au 08/04/2019

Figure 23 : Evolution de la température de départ EG sur la période de la période d'expérimentation (mars-avril 2019)

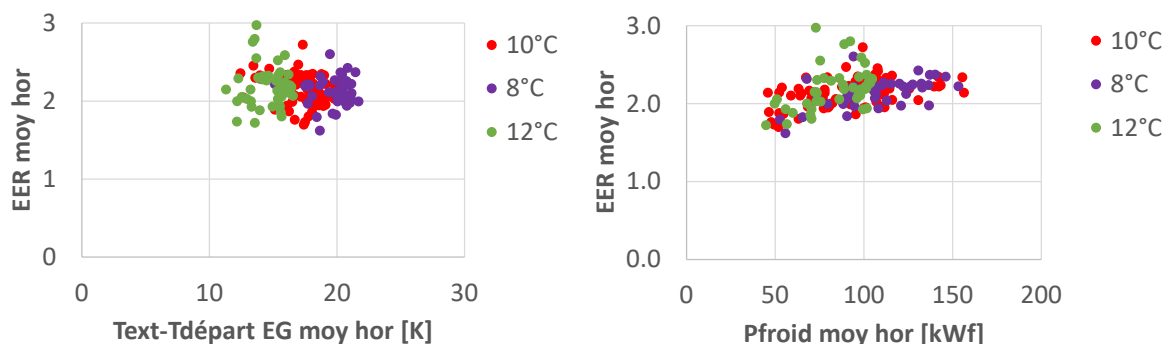


L'instrumentation en place a permis de mesurer l'impact des modifications sur les performances du GEG et sur le confort dans les amphithéâtres.

b. Influence sur les performances du GEG

La Figure 24 présente les performances mesurées (moyenne horaire) pour la production EG en fonction de la différence entre température extérieure (~Tcond) et la température de départ EG (~Tévap) d'une part et en fonction de la puissance froide fournie d'autre part pour les différentes consignes de température de départ EG

Figure 24 : Performances de la production EG en fonction de la différence entre température extérieure et la température de départ EG (gauche) et en fonction de la puissance froide fournie (droite) pour les différentes consignes de température de départ EG



Sur le graphe de gauche on n'observe pas de différence de performances lorsque la consigne de température départ EG varie alors que selon la thermodynamique, les performances devraient augmenter lorsque la différence de température entre condenseur et évaporateur (~Text-Tdépart EG) diminue. Sur le graphe de droite on retrouve bien l'effet du taux de charge (augmentation des performances avec la puissance froide fournie en lien avec le poids des auxiliaires) quelle que soit la température de consigne départ EG. Cela est probablement lié au fonctionnement à faible taux de charge (<30%) qui « efface » l'effet thermodynamique.

c. Influence sur le confort dans les amphithéâtres

Pour rappel, les amphithéâtres 4 et 5 sont traités par des centrales de traitement d'air, elles-mêmes alimentées en froid par le groupe d'eau glacée. Nous avons observé les effets de la modification de température de départ d'eau glacée au niveau du groupe, sur le confort à l'intérieur de l'amphithéâtre n°5.

2 capteurs de température d'air et humidité (Testo 174) ont été placés dans cette pièce : un capteur en partie haute (capteur 4) et un autre en partie basse de l'amphithéâtre (capteur 21). Ces capteurs ont été placés à une hauteur d'1 mètre environ, soit à la hauteur de l'espace de travail des usagers. Un troisième capteur extérieur a été positionné sous abri ombragé et ventilé, sur le parvis ouvert situé à côté de l'amphithéâtre (capteur 5).

Les capteurs utilisés ont été préalablement étalonnés.

Figure 25 : Positionnement des capteurs de température/humidité dans l'amphithéâtre n°5

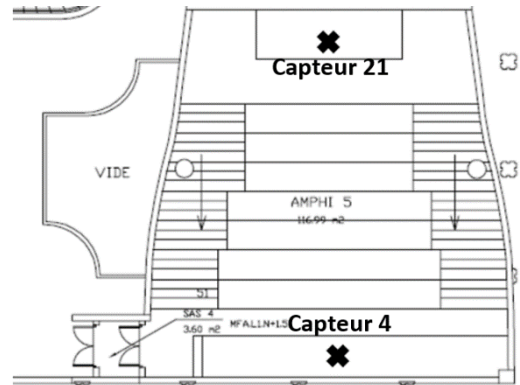
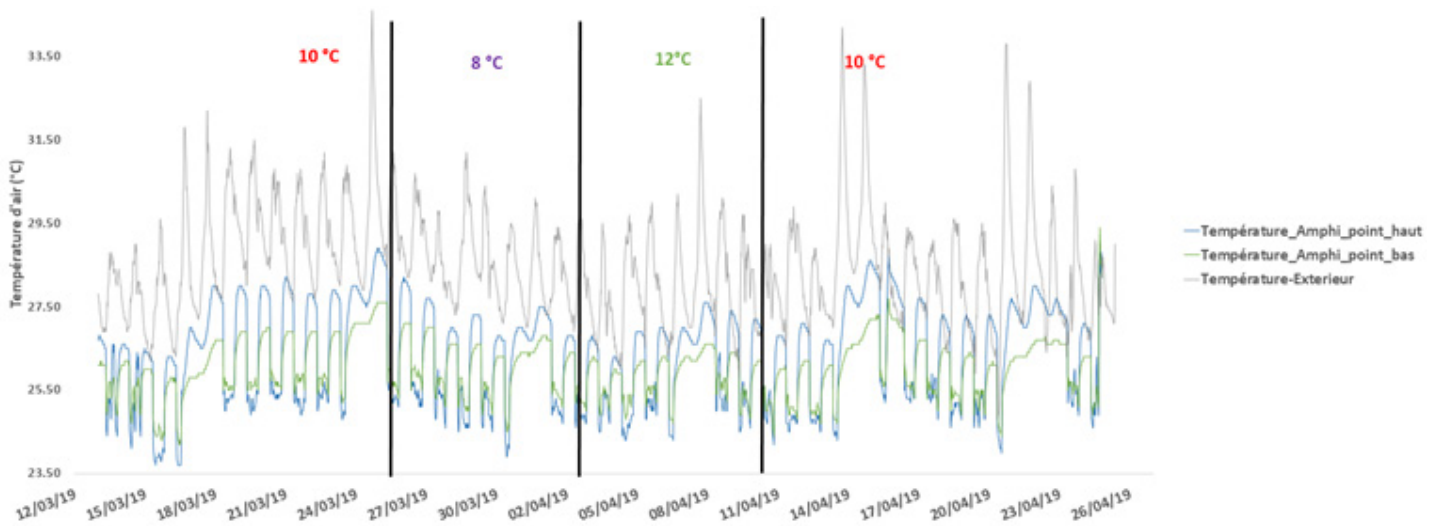


Figure 26 : Evolution des températures sur la période de test



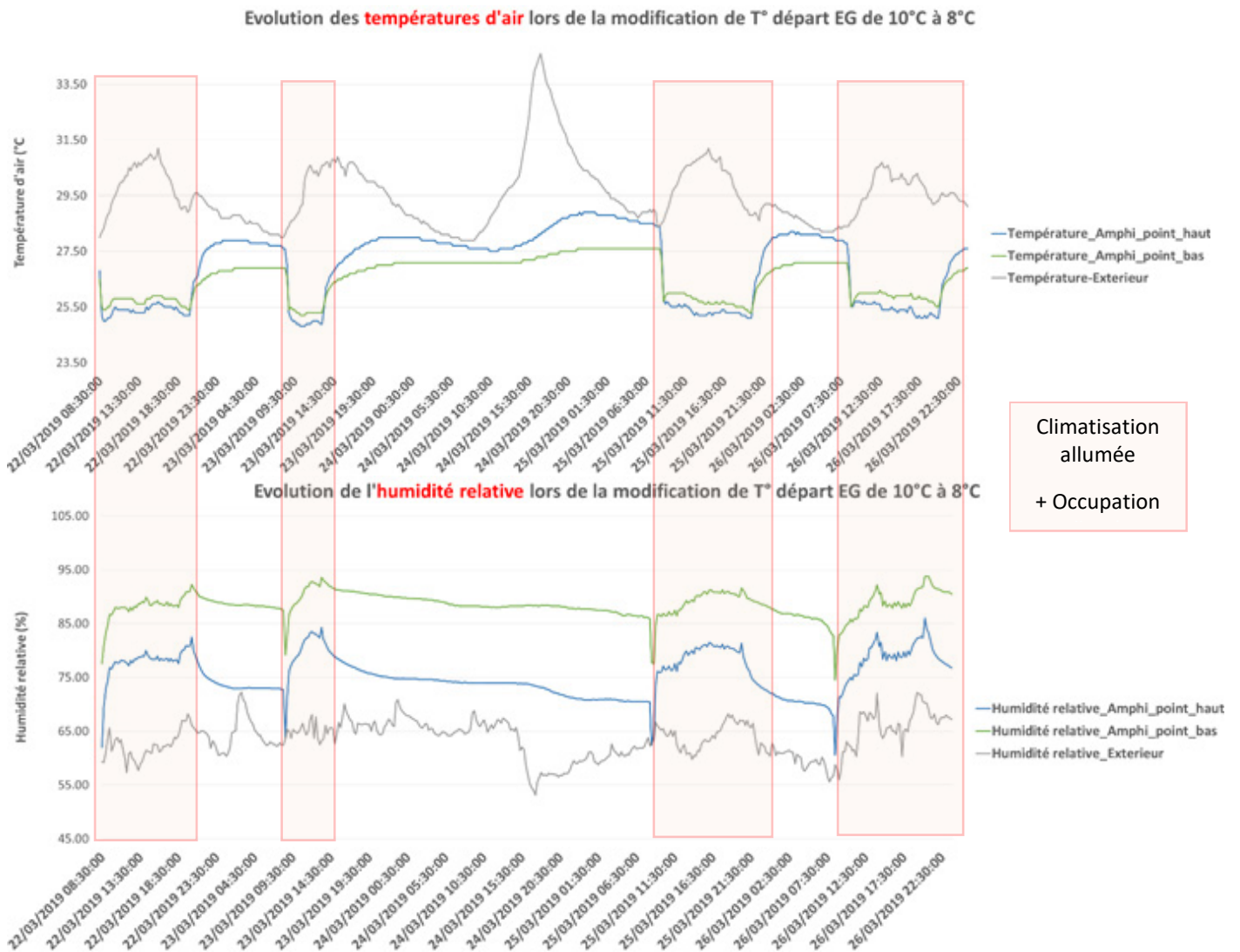
L'analyse de l'évolution des températures sur la période de test montre que la température extérieure est toujours supérieure à la température à l'intérieur de l'amphithéâtre, ce qui traduit l'efficacité des protections solaires pendant la journée.

Lorsque l'amphithéâtre est climatisé, c'est-à-dire en journée d'occupation, l'écart entre extérieur et intérieur est plus important, avec des différences moyennes entre intérieur et extérieur de l'ordre de 8.5K, et pouvant atteindre jusqu'à 15K en point haut de l'amphithéâtre. La nuit, lorsque la climatisation est coupée, l'écart entre intérieur et extérieur est réduit et l'ambiance à l'intérieur de l'amphithéâtre se rapproche de l'ambiance extérieure.

De plus, nous pouvons observer que la température au point bas de l'amphithéâtre est toujours inférieure au point haut, en période de non occupation. Durant l'occupation, le phénomène s'inverse, ce qui peut s'expliquer par le fait que les bouches de soufflage se situent plutôt en partie haute des gradins, et la distance entre la bouche de soufflage et l'espace de vie des usagers est plus petite. Il y a donc moins de dispersion de l'air soufflé en partie haute.

Afin de mieux observer le fonctionnement du local, nous avons tracé l'évolution des températures sur quelques jours autour de la date de modification de départ eau glacée de 10°C à 8°C.

Figure 27 : Evolution des données lors de la modification de départ EG de 10°C à 8°C

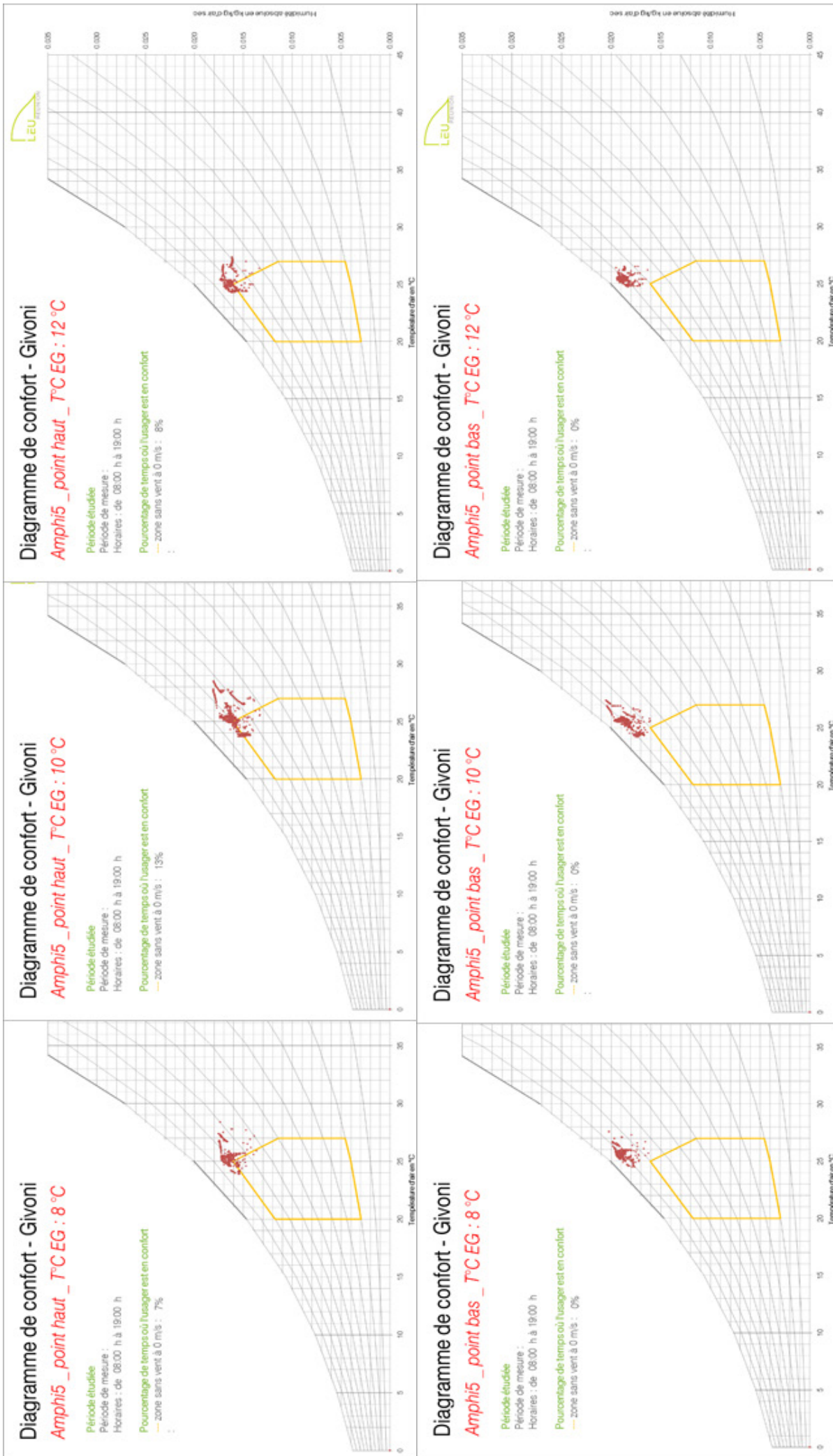


Les zones en orange correspondent aux périodes où la climatisation était allumée. La température de consigne est située autour de 25 °C. Elle reste stable sur la journée et ne semble pas être affectée par la température extérieure, ni par la modification du départ eau glacée.

Cependant, les taux d’humidité relevés sont toujours supérieurs à l’humidité extérieure. L’humidité relative augmente lors des périodes de climatisation, ce qui est cohérent avec le fonctionnement des systèmes, cependant les niveaux observés sont particulièrement importants même lors des périodes de non occupation sans climatisation.

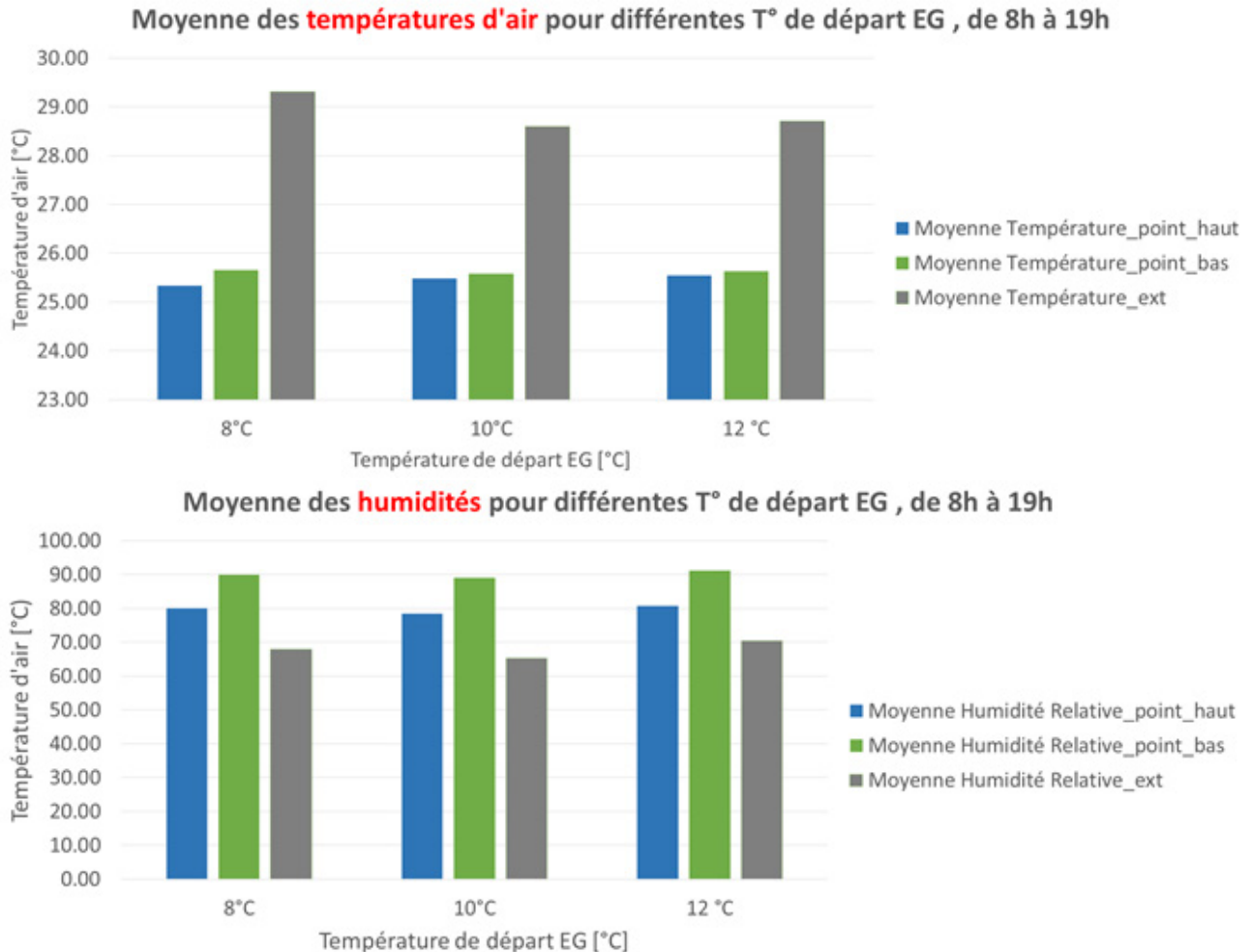
Nous avons tracé les diagrammes de confort (selon Givoni) correspondant aux différentes périodes du test.

Figure 28 (page suivante) : Diagrammes de confort selon Givoni en fonction de la température de départ EG



D'après Givoni, lors des horaires d'occupation, pour une zone avec vitesse d'air presque nulle comme c'est le cas dans un local climatisé, l'amphithéâtre n'est pas en situation de confort sur la période de test. Aucun point n'est situé dans le polygone de confort pour le capteur bas et seulement 7% à 13% sont dans la zone de confort pour le capteur haut. Les points étant situés au-dessus du polygone, nous en déduisons que l'inconfort est causé par un taux d'humidité relative trop élevé.

Figure 29 : Moyennes sur horaires d'occupation en fonction de la température de départ EG



La Figure 29 montre les températures et humidités moyennes sur les horaires d'occupation, en fonction de la modification de température de départ eau glacée.

Les variations observées sur les températures intérieures, dans chaque cas, étant très faibles et probablement inférieures à la plage de précision des capteurs, nous pouvons déduire que les conditions de confort ne sont pas affectées par la modification de température en départ d'eau glacée.

En conclusion, nous avons relevé sur la période des **situations d'inconfort dans l'amphithéâtre**, principalement en point bas, liées aux **forts taux d'humidité** relevés à l'intérieur de l'amphithéâtre, mais cela **ne semble pas être lié à la modification de température de départ eau glacée**. Il y a probablement un problème de renouvellement d'air, accentué par les charges hydriques supplémentaires apportées par les usagers durant l'occupation.

d. Conclusions

On pourrait faire dériver la consigne de température de départ EG puisque le confort dans les locaux ne semble pas être affecté (en tous cas dans les amphithéâtres, attention de continuer à assurer la demande de froid des VC les moins favorisés). Mais cela n'a *a priori* pas d'intérêt énergétique puisque les performances ne sont pas améliorées par une augmentation de la température de départ EG mais sont surtout influencées par les faibles taux de charge.

2. Ajout d'un variateur de vitesse sur la pompe de distribution EG

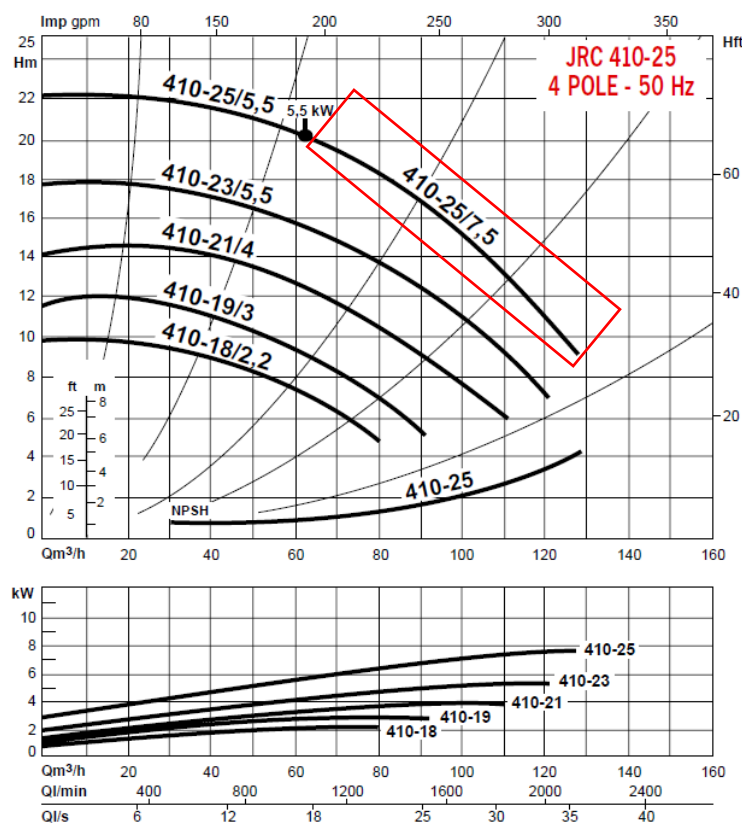
a. Travaux effectués

Le suivi énergétique a mis en évidence un fort surdimensionnement de la pompe de distribution du bâtiment (cf. III.4.b), qui aboutit à un $\Delta T < 1K$ toute l'année et à une consommation électrique exorbitante de la pompe de distribution qui atteint 20% de la consommation totale de la production de froid là où elle ne devrait représenter que quelques %.

Dans le cadre du projet et avec l'appui financier d'EDF Réunion, un variateur de fréquence a été installé sur la pompe de distribution concernée (initialement à débit fixe) afin d'adapter le débit aux besoins de froid réels pour atteindre un ΔT de 5 degrés. L'impact de la diminution du débit sur la consommation électrique de la pompe a été analysé grâce au matériel de mesure en place sur le site dans le cadre du projet.

La pompe de distribution existante est de marque Salmson, modèle JRC 410-25/7.5, dont les caractéristiques sont présentées en Figure 30. Il s'agit d'une pompe centrifuge double triphasée à un seul étage.

Figure 30 : Caractéristiques de la pompe de distribution installée sur le site (Salmson JRC 410-25/7.5) selon la documentation du fournisseur



La société Energie Concept a proposé l'installation d'un variateur de fréquence de la marque Schneider Electric (Altivar ATV212) sur chacune des 2 pompes (cf. Figure 31).

Figure 31 : Vue des coffrets des variateurs de fréquence installés



La régulation du débit sera commandée par 3 conditions :

- atteindre une valeur cible de 5 degrés pour le ΔT distribution au moyen d'un PID
- rester au-dessus du minimum technique des pompes (20 Hz d'après le constructeur)
- rester au-dessus du débit minimum imposé par le GEG (8.5 L/s soit 30.6 m³/h, mais ramené à ¾ de cette valeur = 23 m³/h car un des 4 compresseurs est hors service).

La prestation incluait également la modification de la programmation et de l'interface GTC existante ainsi que des tests hydrauliques pour vérifier la bonne irrigation des équipements les plus défavorisés après réduction du débit.

Les travaux ont été réalisés au mois de novembre 2019 pour un montant de 4504 € HT.

b. Influence sur la consommation électrique de la pompe et sur le ΔT

Débit et puissance appelée avant/après travaux

Avant travaux, le débit mesuré par le compteur de frigories sur le circuit EG était de 90 m³/h lorsque l'installation était en marche, pour une puissance électrique absorbée de 8 kWe (moyenne mesurée sur 2019 jusqu'aux travaux).

Après finalisation des travaux, le débit mesuré moyen est de 35 m³/h pour une consommation moyenne de 800 We, soit une division par plus de 10 de la consommation électrique pour une division par 2.6 du débit moyen. En effet, la consommation d'une pompe centrifuge n'est pas proportionnelle au débit mais varie théoriquement comme le cube de sa vitesse de rotation (qui elle-même est proportionnelle au débit).

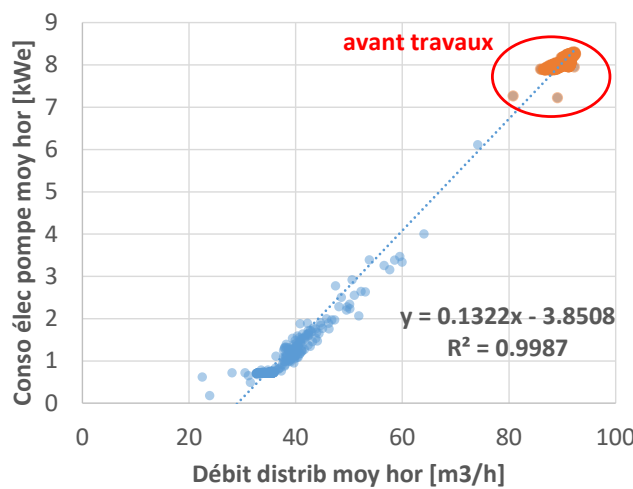
Le Tableau 3 récapitule les principaux éléments.

Tableau 3 : Fonctionnement de la pompe de distribution avant et après travaux

	avant travaux	après travaux
Période	01-10/2019	01-03/2020
Débit distribution moyen	89.7 m ³ /h	35.2 m ³ /h
Conso élec pompe moyen	8.02 kWe	794 We
ΔT moyen	0.6 K	2.0 K
Débit distribution min	-	32.6 m ³ /h
Conso élec pompe min	-	700 We
ΔT moyen max	1.5 K	2.8 K

La Figure 32 présente la variation de la consommation électrique de la pompe de distribution en fonction du débit de distribution.

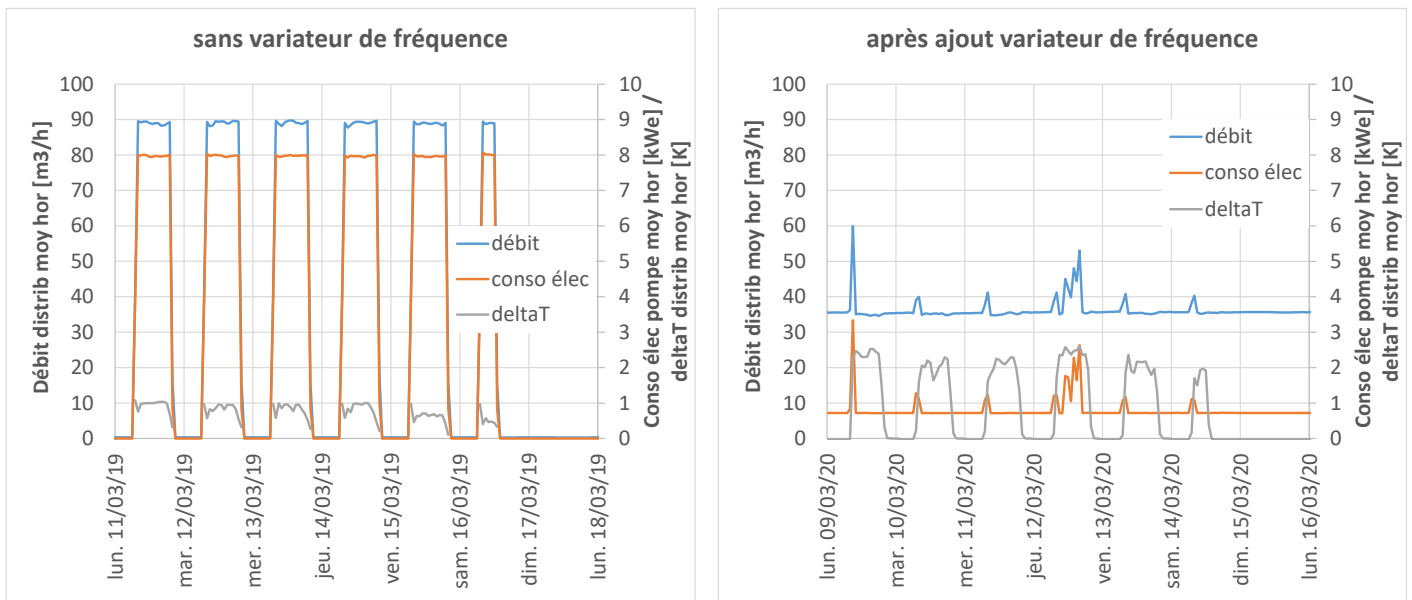
Figure 32 : Consommation électrique de la pompe de distribution en fonction du débit de distribution (moyenne horaire)



La consommation de la pompe est linéaire avec le débit de distribution. La pente est de 130 We/m³/h supplémentaire. On voit nettement la baisse de consommation de la pompe (majorité des points dans le bas du graphe) engendré par l’ajout du variateur de fréquence.

La Figure 33 montre un exemple de semaine avant travaux (débit fixe) et un exemple de semaine après travaux (après ajout du variateur de fréquence).

Figure 33 : Débit et consommation électrique de la pompe de distribution avant travaux (gauche) et après travaux (droite)



Sur le graphe de gauche, on peut voir le fonctionnement à débit fixe à 90 m³/h qui conduit à un ΔT sur la distribution <1 degré ainsi que la coupure nocturne et durant le week-end.

Sur le graphe de droite, on voit clairement la baisse de débit jusqu'à 33 m³/h et la baisse de consommation électrique de la pompe jusqu'à 710 W. Le débit varie un peu au cours de la journée en fonction de la régulation (monte ponctuellement jusqu'à 60 m³/h au démarrage du GEG soit une consommation de 3 kWe) mais la pompe fonctionne la plupart du temps à son minimum technique (20 Hz).

Le ΔT correspondant est compris entre 2 et 3 degrés. Cette valeur est plus faible que la valeur cible de 5 degrés, ce qui s'explique par le fait que la pompe installée est tellement surdimensionnée qu'elle atteint toujours son minimum technique bien avant le ΔT de 5 degrés.

On note également que lors des travaux, la coupure nocturne et en week-end de la pompe de distribution a malencontreusement disparu... ce qui ne permet pas d'atteindre la totalité du potentiel d'économies d'électricité lié à l'installation du variateur de fréquence.

Consommation de la pompe avant/après travaux

L'opération permet tout de même de réaliser une économie significative sur la consommation de la pompe de distribution. Seuls les mois de janvier et février 2020 permettent la comparaison par rapport à la consommation avant travaux (à partir de mars 2020, l'Université a été fermée pour cause de confinement).

En février 2020, la consommation de la pompe de distribution a été de 450 kWh contre 2.1 MWh en février 2019, soit une division par 4.7. La consommation sur le mois de janvier 2020 a également été divisée par 4.3 par rapport à celle janvier 2019. On peut vraisemblablement envisager une division de la consommation annuelle de la pompe de distribution par 4.5, soit une valeur de 4.5-5 MWh/an (~450-500 €/an) contre 22 MWh/an (~2200 €/an) avant travaux, et une économie de plus de 1700 €/an sans diminution de la prestation.

En rétablissant la coupure nocturne et en week-ends (d'autant que le GEG est complètement coupé pendant ces périodes), on peut estimer gagner encore environ 280 kWh en février 2020 (soit plus de la moitié), et atteindre ainsi une division de la consommation par 12.

Le Tableau 4 fait le bilan des économies à attendre suite à l'ajout d'un variateur de fréquence sur la pompe de distribution sur l'aile Sud de la Fac de lettres.

Tableau 4 : Bilan des économies d'électricité annuelles à attendre suite à l'installation d'un variateur de fréquence sur la pompe de distribution

	avant travaux	fonctionnement actuel	si coupure en inoccupation
Conso annuelle pompe	22 MWh/an	4.5-5 MWh/an	~2 MWh/an
Part de la conso totale prod	>20%	<5%	~2%
Coût électricité	2200 €/an	450-500 €/an	~200 €/an
Division à attendre		4.5	>10
Gain à attendre		>1700 €/an	~2000 €/an
Gain sur la conso totale prod		>15%	>18%

Dans ce cas, compte tenu du coût des travaux (4500 € HT), le temps de retour est inférieur à 3 ans (avec un surdimensionnement initial important).

Le gain sur la consommation d'électricité de la pompe de distribution est de près de 80% dans la situation actuelle ; il pourrait atteindre de 90% en rétablissant les coupures en inoccupation, cela permettrait de ramener la part de la consommation de la pompe de distribution à ~2% de la consommation totale de la production de froid, ce qui est plus acceptable. Etant donné le poids important de la consommation de la pompe de distribution sur ce bâtiment, cela représente un gain respectivement >15% et >18% sur la consommation totale de la production de froid.

c. Limitations

Dans le cadre de l'expérimentation sur le bâtiment de la Fac de lettres, nous avons noté plusieurs types de limitations lors de l'installation d'un variateur de fréquence sur la pompe de distribution :

Minimums techniques

La plupart des pompes centrifuges utilisées pour la distribution d'eau glacée peuvent accepter l'ajout d'un variateur de fréquence (il faut cependant vérifier avec le fournisseur).

La fréquence de la pompe ne peut cependant pas descendre en dessous d'un minimum technique indiqué par le fournisseur permettant d'assurer un refroidissement correct du moteur de la pompe et d'éviter la cavitation. Ce minimum est de 20 Hz dans le cas étudié. Ainsi, il ne sera possible de faire varier le débit que dans une plage à partir de cette fréquence minimum (et non de 0 au débit nominal). A noter que la plage de variation est plus importante pour une pompe à variation électronique de vitesse (VEV) intégrée dès sa conception.

Dans le cas présent, nous atteignons le minimum technique toujours plus rapidement que le ΔT de 5 degrés qui est visé par la régulation. Mais la variation de fréquence permet tout de même de diviser le débit par presque 3 avant d'atteindre le minimum technique, ce qui permet tout de même de substantielles économies d'électricité.

Une autre limitation possible est le débit minimum imposé par le fournisseur du GEG pour éviter le gel de l'évaporateur. Ce débit pourrait théoriquement être abaissé proportionnellement au nombre de compresseurs réellement en service sans risque de gel mais les fournisseurs de GEG sont généralement frileux à cette idée... Dans le cas étudié, le débit minimum préconisé par le constructeur n'est de toute façon pas atteint avant la fréquence minimum de la pompe.

Risques liés à l'intervention sur un système opérationnel

La perte de la coupure nuit et week-end est un exemple illustrant bien la problématique : avant travaux, le planning était optimisé avec un fonctionnement uniquement pendant les périodes d'occupation et ce planning s'est perdu lors de l'intervention pour une raison quelconque, ce qui aboutit à un fonctionnement 24h/24 / 7j/7. Si nous n'avions pas fait un suivi énergétique sur le bâtiment, personne ne se serait aperçu de cette anomalie et une partie du potentiel d'économies aurait été effacé par ce fonctionnement en continu.

Une autre problématique récurrente dès lors qu'on agit sur le débit est l'équilibrage hydraulique du réseau : la plupart des réseaux hydrauliques sont mal équilibrés, si bien que les tronçons présentant des pertes de charge importantes (bouts de réseau par exemple) sont moins bien irrigués. Cela ne pose pas de problème lorsque le débit global est très élevé mais si on le réduit, les tronçons les plus défavorisés risquent de ne plus être suffisamment irrigués. Un bon équilibrage hydraulique est clairement le préalable à toute optimisation des débits de distribution au risque de voir apparaître des problèmes de confort.

Risques liés à un mauvais équilibrage hydraulique

Les bâtiments tertiaires climatisés à l'eau glacée sont rarement bien équilibrés hydrauliquement bien qu'ils soient souvent équipés de vannes d'équilibrage (TA), comme c'est le cas du bâtiment étudié.

Suite aux baisses de débit, des plaintes sur le confort ont été formulées par les occupants de deux bureaux du dernier étage, dont les ventilo-convecteurs n'étaient plus correctement alimentés car situés en bout de ligne. Le débit de distribution a dû être temporairement remonté (NB : hors période de mesure) en attendant qu'un rééquilibrage hydraulique ait été effectué par le prestataire de climatisation.

Cependant, l'occupation « aléatoire » des différentes salles de cours rend impossible d'atteindre le débit nécessaire dans tous les terminaux à tout instant si on régule le débit sur le ΔT global sur le réseau d'eau glacée. En effet, si un étage complet est inoccupé, il ne va pas consommer de froid ce qui va faire baisser le ΔT global et donc le débit global va diminuer pour faire augmenter le ΔT . Cependant, cet étage sera tout de même (inutilement) alimenté en eau glacée (si les terminaux sont équipés de vannes 3 voies) par la part de débit correspondant au réglage de la vanne TA de la branche concernée. Le débit restant pour les deux autres étages (occupés donc avec une demande de froid) deviendra inférieur au débit nécessaire et le confort sera dégradé.

Ainsi, les vannes TA classiques permettent d'atteindre un équilibre hydraulique en tout instant dans un bâtiment où tous les locaux sont toujours climatisés, et la variation de débit commandée par le ΔT peut alors fonctionner de manière optimale sans perte de confort. Dans un bâtiment où l'occupation (et la climatisation) est aléatoire par contre, la seule façon de fournir le débit nécessaire dans tous les terminaux à tout instant est d'installer des vannes 2 voies sur les terminaux de climatisation (se ferment s'il n'y a pas de demande) et des vannes d'équilibrage motorisées régulant sur la pression différentielle en s'adaptant au débit demandé.

A noter que ce n'est probablement pas la source du problème dans le cas présent car le débit est la plupart du temps au minimum technique de la pompe (et donc supérieur au débit idéal) et ne varie pas en fonction de la demande de froid, donc tous les terminaux sont toujours alimentés avec le même débit. Ainsi si le réseau était équilibré correctement, l'ensemble des occupants du bâtiment seraient en situation d'inconfort à cause d'un débit insuffisant et pas seulement les deux bureaux en bout de ligne du dernier étage... ces deux bureaux sont donc plus probablement défavorisés par un mauvais équilibre hydraulique.

d. Conclusions

Un variateur de fréquence a été installé afin d'évaluer le gain de consommation réel de ce type d'opération. Depuis les travaux, la régulation du débit est guidée par l'obtention d'un ΔT de 5 degrés entre départ et retour distribution, mais le suivi a montré que la pompe était tellement surdimensionnée que cette valeur cible n'était jamais atteinte avant que la pompe arrive à son minimum technique de 20 Hz. Le débit a tout de même pu être réduit quasiment par 3 (de 90 à 33 m³/h au minimum), le ΔT résultant est de 2-3 degrés et la consommation de la pompe a été réduite d'un facteur 4.5. Cette dernière pourrait même être réduite d'un facteur 10 en rétablissant le planning de fonctionnement de la pompe de distribution (coupures en périodes d'inoccupation) qui s'est perdu lors de l'intervention ; il est cependant à noter que même sans cette optimisation, près de 90% du potentiel d'économies a été atteint (l'essentiel du gain étant lié à la diminution du débit).

Ainsi même si on est loin d'atteindre la valeur cible habituelle de 5 degrés, le gain de consommation de la pompe de distribution est significatif dans ce cas car la pompe est très surdimensionnée, avec un temps de retour inférieur à 3 ans (gain entre 1700 et 2000 €/an). L'installation de variateurs de fréquence sur les pompes de distribution des réseaux d'eau glacée existants est une solution réellement pertinente en particulier si la pompe en place est très surdimensionnée car le gain sera d'autant plus important.

Le gain de consommation lié à la variation de débit en fonction de la demande n'a pas pu être évalué dans le cadre de cette expérimentation car la pompe fonctionne la plupart du temps à son minimum technique. **On comprend cependant l'intérêt de prévoir systématiquement une pompe à débit variable dès la conception, pas tant en raison du gain lié à la variation de débit en fonction de la demande que pour atténuer l'impact de la pratique habituelle de surdimensionner la pompe de distribution** (les ΔT observés sur différentes installations mesurées sont <2 degrés). Les pompes à débit variable ont également l'avantage de présenter une plus large gamme de variation de débit que les variateurs de fréquence ajoutés après coup.

Néanmoins, un point limitant le recours à la variation de débit est l'équilibre hydraulique du bâtiment, qui s'il n'est pas bien réalisé conduit à défavoriser certains terminaux qui se trouvent mal irrigués lorsqu'on diminue le débit global. Ce point est particulièrement problématique dans les bâtiments où l'occupation des différentes pièces est aléatoire comme dans le cas présent où un équilibre dynamique est nécessaire pour être sûrs d'atteindre un bon niveau de confort partout à tout instant.

Précisons que depuis notre étude, la pompe existante sur le bâtiment étudié (vieillissante) a été remplacée en juillet 2020 par une autre pompe à débit fixe mais de plus petit débit (50 m³/h) fonctionnant toujours sur le variateur. Nous n'avons cependant pas pu en observer l'impact car l'opération s'est déroulée après la fin de nos mesures.

V. Conclusions

Le bâtiment de la Fac de lettres 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, de la distribution d'eau glacée qu'un échantillon des terminaux de climatisation.

La puissance installée est de 400 kWf fournie par un seul GEG à 4 étages, qui alimente 2 CTA pour la climatisation des 2 amphithéâtres et une cinquantaine de ventilo-convecteurs pour la climatisation des salles de cours. La surface de l'aile étudiée est de 1755 m². La demande annuelle de froid est de 150 MWhf, soit ~85 kWhf/m²/an : cette valeur est modérée grâce à la bonne gestion de l'occupation (coupure systématique de la climatisation durant la nuit, les week-ends et les périodes de fermeture de l'Université). La consommation électrique associée à la climatisation (hors terminaux) est de 108 MWhe/an (dont 22 MWhe rien que pour la distribution d'eau glacée), soit un SEER annuel de 1.7 pour la production seule, qui tombe à 1.4 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. Le fait que le GEG fonctionne à de faibles taux de charge toute l'année (<40%) péjore ses performances à cause du poids des auxiliaires.

Lors de suivi, nous avons identifié une température de départ comprise entre 10 et 11°C toute l'année (ce qui est plutôt bon). Des modifications de la température de départ de l'eau glacée (+/-2°C) ont été menées pour observer son impact sur les performances du GEG et le confort. Nous n'avons pas mesuré d'impact de ces modifications sur les performances : cela est probablement lié au fait que le GEG fonctionne à très faible taux de charge, dans des régimes où le poids des auxiliaires et des cyclages prédomine sur la thermodynamique. A noter que le confort ne semble pas non plus impacté par une augmentation de la température de départ de l'eau glacée.

Seuls les ventilo-convecteurs de 3 salles de cours sur les 21 que comporte le bâtiment ont été instrumentés. La diversité d'utilisation des salles ne permet pas de généraliser mais on peut estimer entre 4 et 6 MWhe/an la consommation totale des ventilo-convecteurs, à ajouter aux 11 MWhe/an de l'extracteur des salles de cours. Les 2 CTA (+extracteurs) pour la climatisation des amphithéâtres consomment encore 17 MWhe/an. Les analyses ont montré que la gestion des terminaux de climatisation pourrait encore être améliorée (notamment le planning de coupure lors des périodes de fermeture de l'Université). Au final, les terminaux représenteraient de l'ordre 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 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 2.5 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. C'est notamment le cas de la pompe de distribution d'eau glacée qui est très largement surdimensionnée puisque les ΔT observés sur la distribution sont inférieurs à 1 degré toute l'année. Comme elle est à débit fixe, il n'y avait pas de moyen de corriger ce surdimensionnement. Dans le cadre du projet, nous avons pu mener une expérimentation avec l'appui d'EDF Réunion en ajoutant un variateur de fréquence sur la pompe de distribution.

L'installation du variateur de fréquence a permis de diminuer le débit de 90 à 33 m³/h au minimum, ce qui réduit la puissance absorbée par la pompe de 8 kWe à 700 We, soit une division par plus de 10 pour une réduction de débit par 2.6 : l'intérêt de maîtriser le débit de distribution est donc d'autant plus important que la consommation de la pompe n'est pas proportionnelle au débit. Sur cette installation cependant, on arrive au minimum technique de la pompe (20 Hz) bien avant d'atteindre un ΔT de 5 degrés (valeur visée habituellement). La consommation électrique annuelle de la pompe de distribution a tout de même été réduite par 4.5 et pourrait être réduite par 10 après optimisation (soit un gain compris entre 1700 et 2000 €/an et un temps de retour inférieur à 3 ans). Cette action est donc réellement pertinente notamment sur les sites où la pompe de distribution est fortement surdimensionnée. L'ajout d'un variateur de fréquence

après coup est cependant moins performant qu'une pompe à débit variable, d'où l'importance d'en prévoir une systématiquement dès la conception, en particulier car elle permet d'atténuer l'impact du surdimensionnement.

Annexe 1

Plan d'instrumentation des mesures électriques, frigorifiques et températures

Etage	Pièce	Type	Unité	Désignation	N° sonde	Rmq	Date début
R-3	TGBT général	P	W	TGS Zone Sud P1	1000809	triphasé	06/12/2016
		P	W	TGS Zone Sud P2		triphasé	06/12/2016
		P	W	TGS Zone Sud P3		triphasé	06/12/2016
		P	W	onduleur 2 Sud P1		triphasé	06/12/2016
		P	W	onduleur 2 Sud P2		triphasé	06/12/2016
		P	W	onduleur 2 Sud P3		triphasé	06/12/2016
		P	W	groupe froid Sud P1		triphasé	06/12/2016
		P	W	groupe froid Sud P2		triphasé	06/12/2016
R-1	local pompes	P	W	pompe 1 GEG P1	1000813	triphasé	06/12/2016
		P	W	pompe 1 GEG P2		triphasé	06/12/2016
		P	W	pompe 1 GEG P3		triphasé	06/12/2016
		P	W	pompe 2 GEG P1		triphasé	06/12/2016
		P	W	pompe 2 GEG P2		triphasé	06/12/2016
		P	W	pompe 2 GEG P3		triphasé	06/12/2016
		CF	kWh/L	compteur frigorifiques clim		enregistreur	29/03/2018
R+1	local CTA	P	W	CTA 1 amphi 4 P1	1001102	triphasé	06/12/2016
		P	W	CTA 1 amphi 4 P2		triphasé	06/12/2016
		P	W	CTA 1 amphi 4 P3		triphasé	06/12/2016
		P	W	CTA 2 amphi 5 P1		triphasé	06/12/2016
		P	W	CTA 2 amphi 5 P2		triphasé	06/12/2016
		P	W	CTA 2 amphi 5 P3		triphasé	06/12/2016
		THR	°C/%	air soufflé CTA 1	863		06/12/2016
		THR	°C/%	air repris CTA 1	131		06/12/2016
		T°	°C	départ EG batterie froide CTA 2	2249		06/12/2016
		T°	°C	retour EG batterie froide CTA 2	2720		06/12/2016
	THR	°C/%	air soufflé CTA 2	752		06/12/2016	
	THR	°C/%	air repris CTA 2	203		06/12/2016	
		amphi 4	THR	°C/%	ambiance	840	
	amphi 5	THR	°C/%	ambiance	768		06/12/2016
R+4	salle 44	THR	°C/%	ambiance	852		06/12/2016
		T°	°C	soufflage	2482		06/12/2016
		T°	°C	départ EG	2307		06/12/2016
	salle 46	THR	°C/%	ambiance	129		06/12/2016
		T°	°C	soufflage	2906		06/12/2016
		T°	°C	départ EG	2707		06/12/2016
		T°	°C	retour EG	2186		06/12/2016
R+5	extracteurs - VC	P	W	extracteur CTA 4 P1	1001016	faire x3	06/12/2016
		P	W	extracteur CTA 5 P1		faire x3	06/12/2016
		P	W	extracteur cours P1		faire x3	06/12/2016
		P	W	VC 17 salle audio 2 (salle 52)			06/12/2016
		P	W	VC 18 salle cours (salle 53)			06/12/2016
		P	W	VC 19 salle audio 1 (salle 54)			06/12/2016
	salle 52 audio 2	THR	°C/%	ambiance	895		06/12/2016
		T°	°C	soufflage	3501		06/12/2016
		T°	°C	départ EG après V3V	3560		06/12/2016

13 mesures de puissance électrique

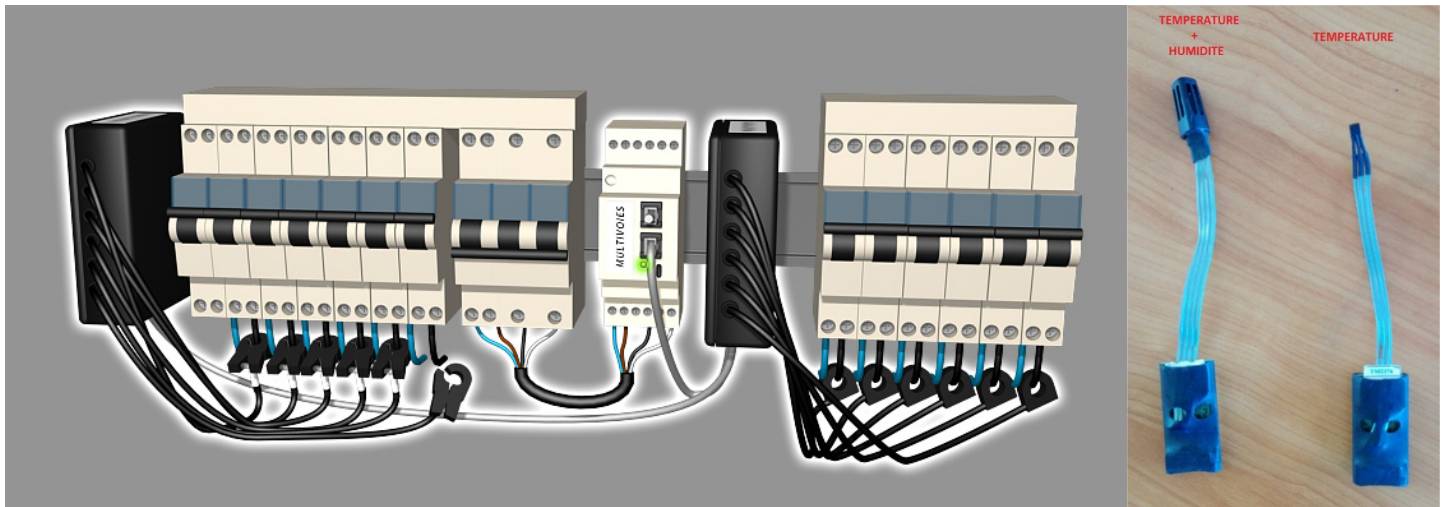
9 mesures de température

9 mesures de température/humidité

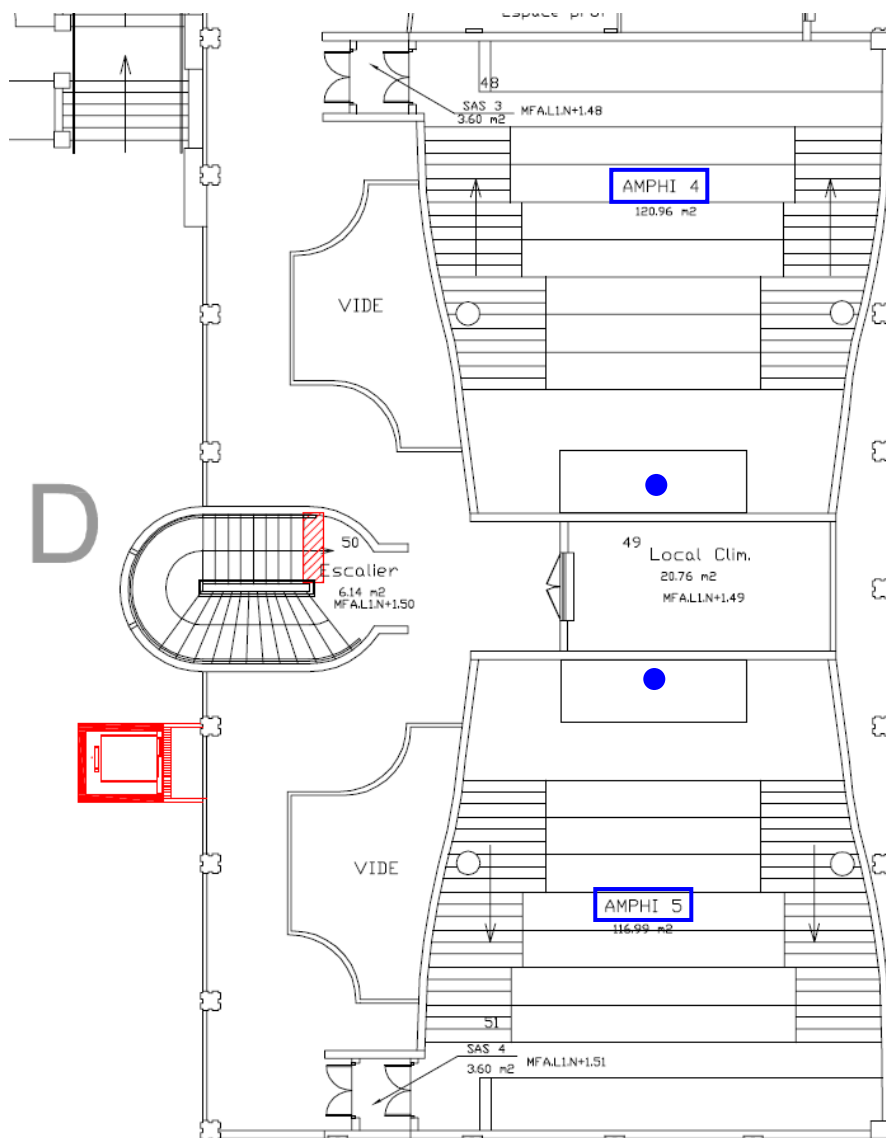
1 compteur de frigorifiques

31 points de mesure

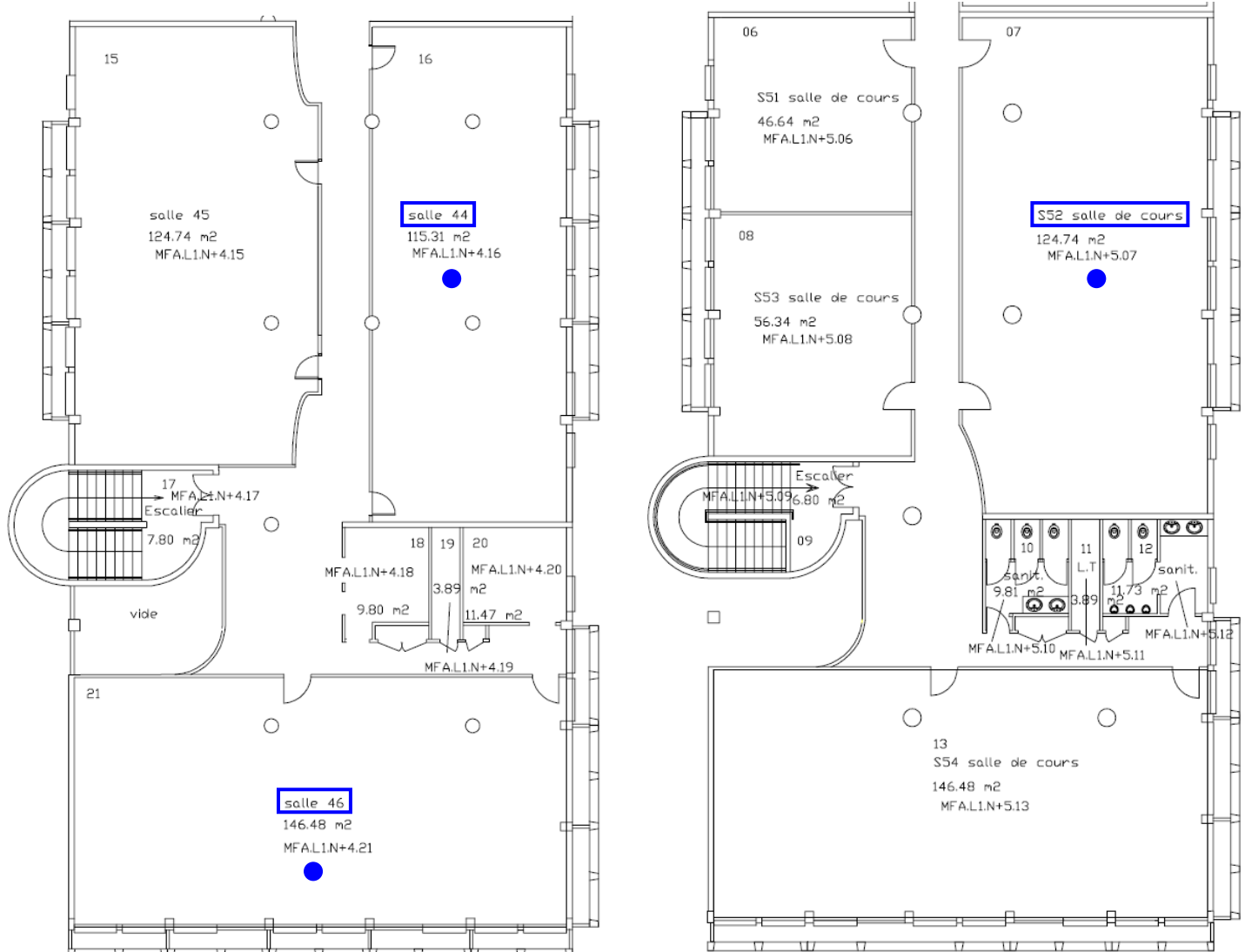
La figure suivante montre une vue des enregistreurs de puissance électrique de type Omegawatt (gauche) ainsi que des sondes de température/humidité (droite).



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



Emplacement des sondes de température au R+4 (gauche) et R+5 (droite) du bâtiment



Annexe 2

Liste et références des ventilo-convecteurs du bâtiment étudié

Niveau	Local	Référence	Type	Pfroide (kWf)	Pélec (kWe)
R+2	43	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	45	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	52	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	53	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	47	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	46	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
44	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09	
	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165	
R+3	46	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	45	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	44	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	37	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	39	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	38	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	36	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
35	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09	
	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165	
R+4	21	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	16	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	15	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
R+5	6	42WKC008	Cassette EG simple	4.2	0.09
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	8	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	7	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
	13	42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
		42WKC016	Cassette EG double	8.6	0.165
Total				403	7.8

MESURES

salle 53

salle 52

salle 54