






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 3 : Enseignements du projet :

Retour d'expérience sur la climatisation des 4 bâtiments tertiaires étudiés à La Réunion

Livrable 3.1

septembre 2020

rédigé par  **Green Tech**
avec la participation de  **LEU REUNION** *et*  **ENERTECH**



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>
1. CADRE DU PROJET SWACOOOL.....	4
2. CARACTERISTIQUES DES SITES ETUDIES	6
<u>II. CARACTERISATION DE LA CLIMATISATION.....</u>	<u>8</u>
1. DEMANDE DE FROID	8
A. DEPENDANCE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES	8
B. STRUCTURE	12
C. TEMPERATURES DE DISTRIBUTION	18
D. APPORTS ET LIMITES DE LA STD DANS LA PREDICTION DE LA DEMANDE DE FROID	20
2. EQUIPEMENTS DE PRODUCTION DE FROID A EAU GLACEE.....	29
A. DIMENSIONNEMENT	29
B. PERFORMANCES DE PRODUCTION.....	31
3. BILAN ENERGETIQUE SUR LES SITES ETUDIES.....	35
A. CONSOMMATIONS SPECIFIQUES.....	35
B. REPARTITION DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE LIEE A LA CLIMATISATION.....	36
<u>III. PRATIQUES DE TRAVAIL.....</u>	<u>40</u>
1. ANALYSE DES PRATIQUES ACTUELLES.....	40
A. LA MALADIE DU SURDIMENSIONNEMENT	40
B. UN DESEQUILIBRE CHRONIQUE	41
C. RECHERCHE DE CONFORT RIME SOUVENT AVEC PUISSANCE	41
D. LE POIDS DE L’HUMAIN.....	41
E. LA RESISTANCE AU CHANGEMENT	41
2. QUELQUES ENJEUX DE LA CLIMATISATION A EAU GLACEE.....	43
A. PREVENIR LE SURDIMENSIONNEMENT	43
B. TROUVER LE JUSTE EQUILIBRE DES DEBITS	44
C. DE LA BONNE MAITRISE DES INSTALLATIONS	44
3. CONNEXION A UN RESEAU DE FROID VERTUEUX DE TYPE SWAC	46
A. OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT	46
B. OPTIMISATION DU DEBIT POMPE EN MER.....	47
C. OPTIMISATION DES REGIMES DE TEMPERATURE	47
<u>IV. CONCLUSIONS.....</u>	<u>48</u>

Nomenclature

Abréviations

AICVF	Association des Ingénieurs et Techniciens en Climatique, Ventilation et Froid
CTA	centrale de traitement d'air
DJU	Degrés-jour unifiés
EG	eau glacée
GEG	groupe d'eau glacée
STD	simulation thermique dynamique
SWAC	Sea Water Air Conditioning
VC	ventilo-convecteur

Symboles et unités

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

Indices

c	chaud
e	électricité
f	froid

Indicateurs

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

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

Eff	Efficacité
-----	------------

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

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

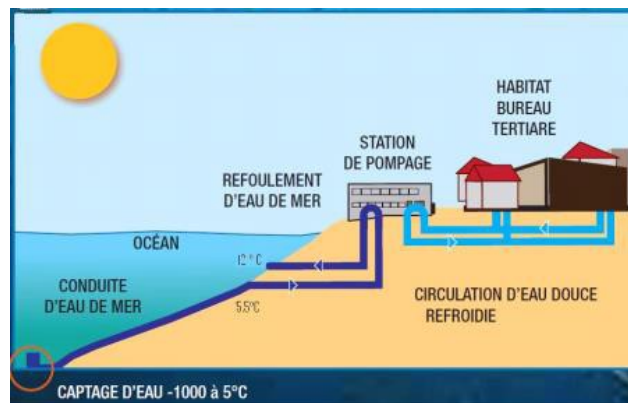
1. Cadre du projet SWACool

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 (issu 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 présente la synthèse des enseignements du projet sur les 4 systèmes de climatisation étudiés à La Réunion (Livrable 3.1).

2. Caractéristiques des sites étudiés

Les sites étudiés sont tous équipés d'une climatisation à eau glacée. Ils sont répartis sur l'ensemble du territoire réunionnais (cf. Figure 2). L'instrumentation a concerné :

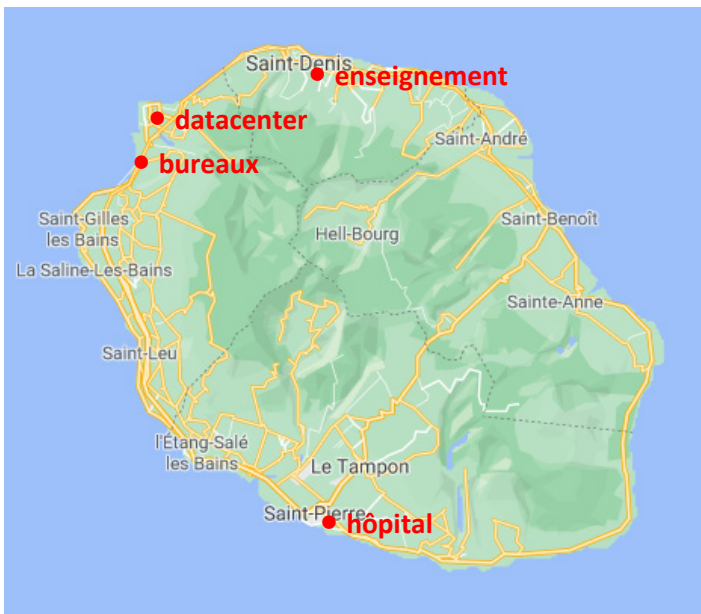
- la production EG (consommation électrique)
- la distribution EG (débit EG et températures départ/retour EG, consommation électrique)
- un échantillon de terminaux (consommation électrique)
- le confort dans quelques locaux choisis (température/hygrométrie)

Elle s'est étalée sur un à deux ans selon les cas avec un pas de temps d'enregistrement de 10 min. Pour simplifier, nous avons considéré les résultats sur une année de référence pour chaque cas d'étude. Nous nous sommes procurés des données météo issues de stations proches de chaque site couvrant la période retenue :

- St Pierre : station météo de l'IUT St Pierre
- St Paul : station Météo France du Port
- St Denis : station météo installée dans le cadre du projet
- Le Port : station Météo France du Port

En complément des mesures, des simulations thermiques dynamiques ont été réalisées sur deux des bâtiments étudiés.

Figure 2 : Emplacement des 4 sites étudiés



Le Tableau 1 regroupe quelques caractéristiques des 4 sites étudiés.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des sites étudiés

	hôpital	bureaux	enseignement	datacenter
localisation	St Pierre	St Paul	St Denis	Le Port
surface climatisée	22000 m ²	1260 m ²	1755 m ²	(820 m ²)
construction bâtiment	2012	2001	1997	2000
profil climatisation	24h/24, 365 jrs/an	coupure en inoccupation (nuit et we)	coupure hivernale et en inoccupation (nuit, we et vacances scolaires)	24h/24, 365 jrs/an
puissance froid installée	3270 kWf	100 kWf	396 kWf	490 kWf
production	-3 GEG (condensation sur eau refroidie via drycooler)	-1 GEG -CTA à détente directe pour l'air neuf (+20 kWf) -2 ventilo-convecteurs à détente directe	-2 GEG	-2 GEG -certaines armoires de secours à détente directe fonctionnent en permanence (~50 kWf)
distribution eau glacée	débit variable	débit fixe	débit fixe	débit fixe
débit nominal distribution	1428 m ³ /h (max)	17 m ³ /h	130 m ³ /h	66 m ³ /h
terminaux	-CTA -ventilo-convecteurs	-ventilo-convecteurs -CTA (air neuf)	-2 CTA (amphis) -ventilo-convecteurs	-armoires de traitement d'air pour les armoires de données -autres petits émetteurs pour les pièces annexes
secours	-1 GEG supplémentaire			-1 GEG supplémentaire -armoires à détente directe

Les surfaces des bâtiments étudiés sont très diverses (de 1000 à >20000 m²), la puissance des GEG va de 100 à >3000 kWf. Certains usages exigent une climatisation continue (24h/24 et 365 jrs/an) et d'autres sont plus flexibles avec une coupure possible en hiver et en inoccupation (nuit et week-end). Un seul site dispose d'une pompe de distribution à débit variable, les 3 autres sont équipés d'une pompe à débit fixe.

L'analyse détaillée des résultats de mesure sur chaque site est disponible dans un rapport dédié (cf. §1.1). L'objectif de ce rapport est de dégager les enseignements principaux du projet au travers d'une étude comparée des résultats observés sur les 4 sites (constantes, différences, ratios).

Dans le cadre du projet, 3 sites tertiaires (dont 2 raccordés au réseau de froid Thassalia (condensation des GEG sur l'eau de mer)) ont également été instrumentés à Marseille par EnerTech. Nous avons mis en parallèle les résultats obtenus à Marseille lorsque c'était possible.

II. Caractérisation de la climatisation

1. Demande de froid

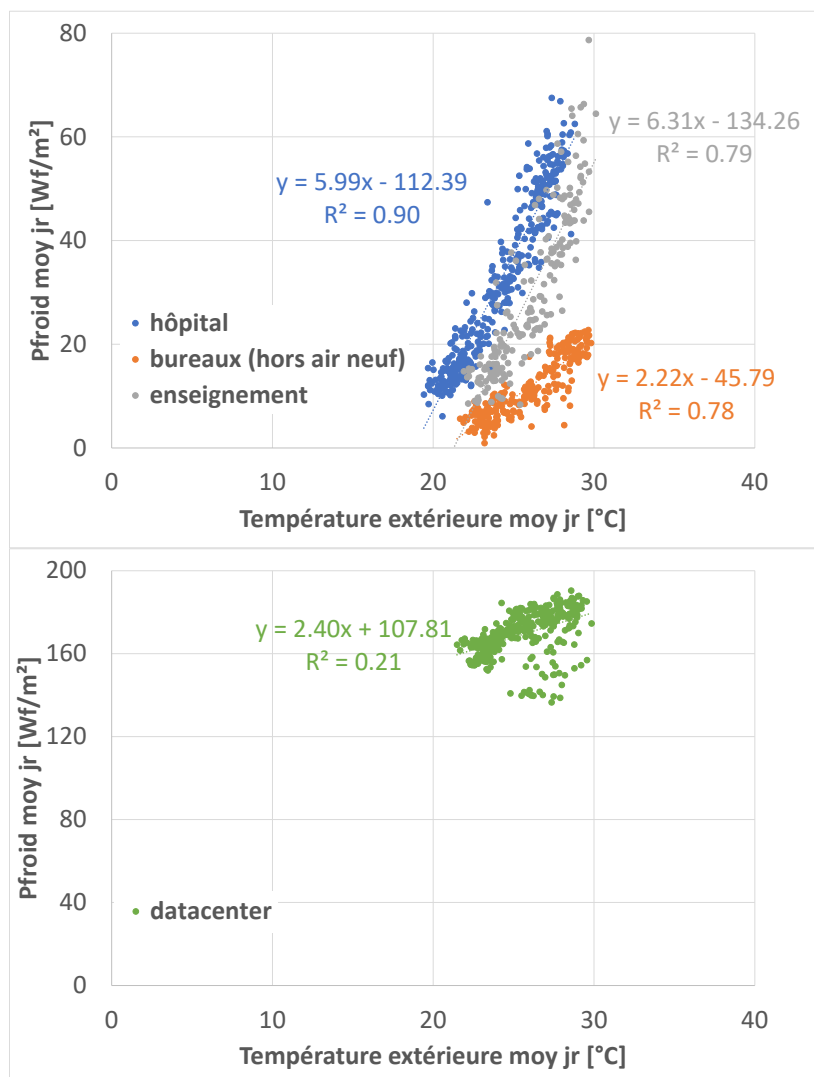
La demande de froid d'un site est typiquement caractérisée par une puissance froide appelée assortie d'une température de départ EG, le tout en moyenne horaire sur une année.

a. Dépendance aux conditions climatiques

Signature énergétique

L'appel de puissance froide d'un bâtiment est directement dépendant des conditions climatiques. La signature énergétique d'un 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. Pour faciliter la comparaison, nous avons représenté la signature énergétique EG des 4 sites étudiés en Wf/m^2 climatisé (cf. Figure 3).

Figure 3 : Signatures énergétiques EG des 4 sites en Wf/m^2



On peut noter que :

- Sur les 3 sites avec un froid de confort (haut), de manière classique le comportement des bâtiments est linéaire par rapport à la température extérieure (avec une corrélation plus ou moins bonne).
- Sur l'hôpital et le bâtiment d'enseignement, les pentes sont très similaires (de l'ordre de $6 Wf/m^2/K$). Sur le bâtiment de bureaux, elle est 3 fois plus faible mais il faut tenir compte du fait que l'air neuf n'est pas traité par la climatisation EG mais par une CTA à détente directe dédiée, ce qui rend la comparaison difficile.

- Pour le datacenter (bas), caractérisé par un niveau de charges internes largement prépondérant sur les effets climatiques, la corrélation avec la température extérieure est très faible bien qu'on décèle un léger effet climatique. Les valeurs rapportées au m² sont comme on pouvait s'y attendre bien supérieures (elles n'ont d'ailleurs pas beaucoup de sens car elles dépendent surtout du niveau d'apports internes), aussi nous les avons représentées sur un graphe distinct avec une autre échelle.

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

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

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

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 les signatures énergétiques EG des 4 sites en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur afin de voir si les corrélations étaient améliorées. Les résultats sont visibles dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Coefficients de détermination des 4 signatures énergétiques EG en fonction de la température extérieure et de l'enthalpie de l'air extérieur

	hôpital	bureaux	enseignement	datacenter
penne Text	0.90	0.78	0.79	0.21
penne h	0.95	0.68	0.76	0.21

La corrélation est améliorée uniquement pour l'hôpital, elle est équivalente pour le bâtiment d'enseignement. Elle est par contre dégradée pour le bâtiment de bureaux, ce qui peut s'expliquer par le fait que le traitement de l'air neuf est assuré par la CTA à DD dédiée et non par le système EG, qui de ce fait contre essentiellement les effets de la température extérieure.

Le même exercice a été fait avec l'ensoleillement journalier, mais aucune corrélation n'est apparue avec la demande de froid pour aucun des cas d'étude.

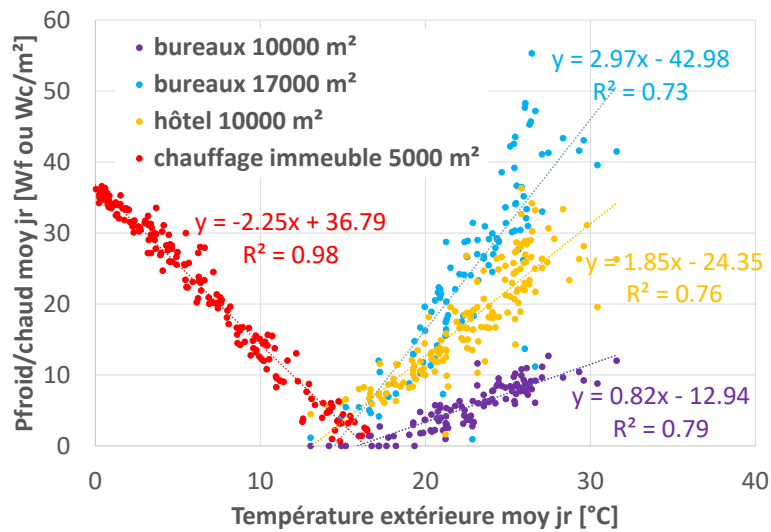
Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

Enertech a également obtenu des signatures énergétiques linéaires avec la température extérieure sur la période estivale (mai-septembre) sur les 3 bâtiments étudiés (cf. Figure 4). Nous avons également fait figurer pour information les résultats obtenus sur un immeuble résidentiel instrumenté à Genève² mais cette fois-ci pour le chauffage du bâtiment.

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

² Suivi énergétique du bâtiment 40-42 de l'avenue du Gros-Chêne à Onex (GE), rénové selon le standard Minergie, Floriane Mermoud, Jad Khoury, Bernard Lachal, 2012, p 44 <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:23005>

Figure 4 : Signatures de froid des 3 sites à Marseille en Wf/m^2 et signature de chauffage d'un bâtiment résidentiel à Genève en Wc/m^2



On note que :

- Les coefficients de détermination sont de 0.73 et 0.79 pour les deux bâtiments de bureaux (en filtrant les jours de week-end car la climatisation reste partiellement en marche alors que les bâtiments sont inoccupés) et 0.76 pour l'hôtel.
- Les pentes ne sont pas du même ordre de grandeur les uns par rapport aux autres (0.8 à 3 $Wf/m^2/K$) ni par rapport à celles observées à La Réunion (2 à 6 $Wf/m^2/K$).
- Ce comportement linéaire se retrouve également dans le cas du chauffage des bâtiments (mais avec une pente décroissante en fonction de la température extérieure et une corrélation bien meilleure). Il est intéressant de noter que les niveaux de puissance en jeu en chauffage et en froid sont du même ordre de grandeur.

Degrés-jour unifiés (DJU)

Les DJU sont une grandeur typiquement utilisée en chauffage pour quantifier la rigueur climatique. Ils quantifient l'« éloignement » de la température extérieure par rapport à la température intérieure recherchée, que doit vaincre le système de chauffage. On l'utilise souvent en valeur mensuelle :

$$DJU_{mois} = \sum_{mois} (18 - moyenne(T_{ext \min \text{ jour}} ; T_{ext \max \text{ jour}}))$$

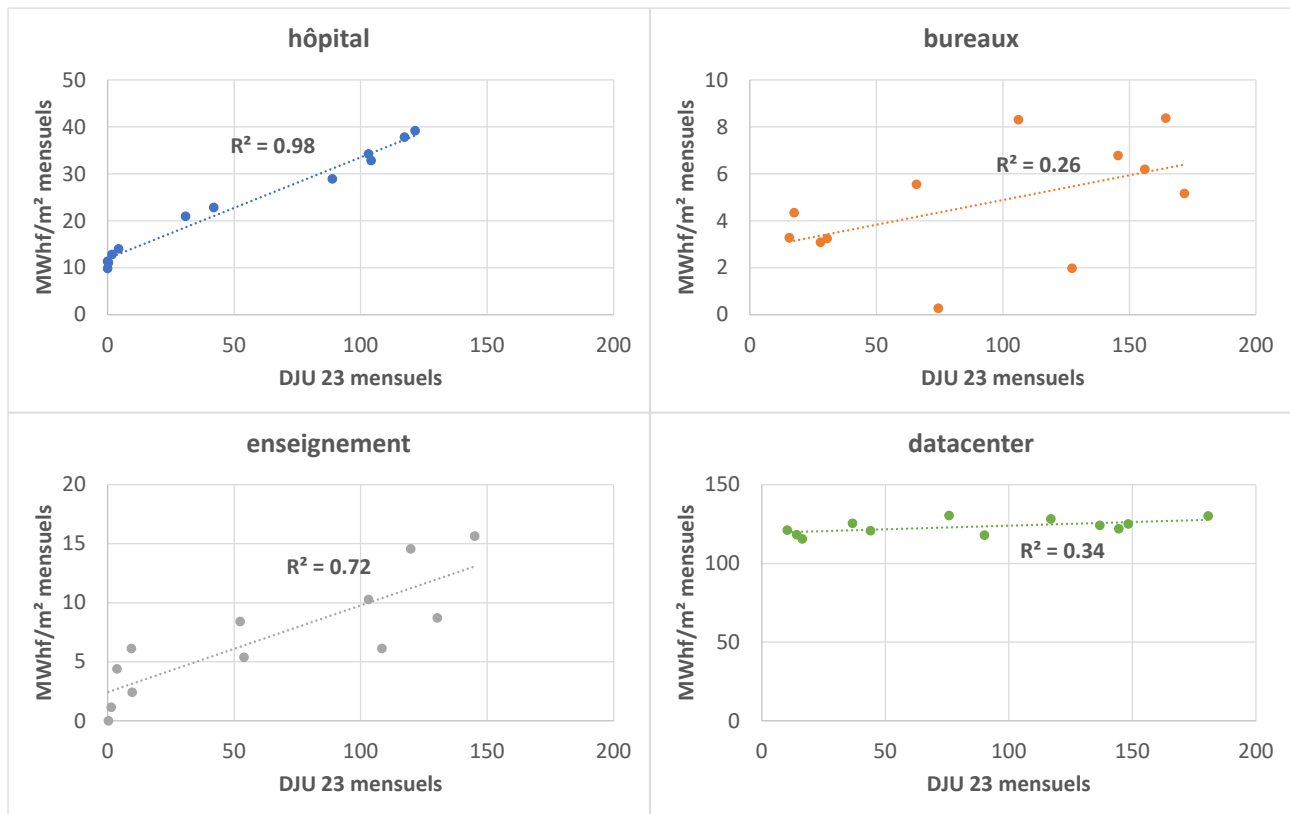
Cette grandeur est rarement utilisée en climatisation et sa pertinence n'a pas été prouvée jusqu'ici. En particulier, notons que la température de 18°C n'est pas représentative de la température de consigne en climatisation mais aucune définition unifiée n'a été proposée pour la climatisation à ce jour.

Nous avons essayé de rapporter les données de consommation mensuelle de froid mesurées sur les 4 sites aux DJU calculés avec différentes températures de référence (de 18 à 28°C) : le Tableau 3 présente les coefficients de détermination obtenus. La Figure 5 présente les corrélations pour les 4 sites avec une température de référence de 23°C (que nous avons considérée comme représentative de la température intérieure dans les locaux climatisés à La Réunion).

Tableau 3 : Coefficients de corrélation entre la demande de froid mensuelle et les DJU mensuels avec différentes températures de référence pour les 4 sites

Tréf °C	coefficient détermination R ²			
	hôpital	bureaux	enseignement	datacenter
18	0.97	0.27	0.72	0.37
19	0.97	0.27	0.73	0.36
20	0.97	0.27	0.73	0.36
21	0.98	0.27	0.74	0.35
22	0.99	0.26	0.73	0.34
23	0.98	0.26	0.72	0.34
24	0.95	0.27	0.71	0.31
25	0.90	0.28	0.68	0.25
26	0.88	0.27	0.70	0.23
27	0.77	0.26	0.73	0.22
28	0.55	0.26	0.60	0.20

Figure 5 : Demande de froid mensuelle rapportée à la surface climatisée en fonction des DJU mensuels calculés avec une température de référence de 23°C (attention les échelles sont différentes)



On note :

- une très bonne corrélation pour l'hôpital qui est climatisé 24h/24 et 365 jrs/an
- une moins bonne corrélation pour le bâtiment d'enseignement et pas de corrélation pour le bâtiment de bureaux
- pas de corrélation pour le datacenter (ce qui n'est pas étonnant car la demande de froid est très peu corrélée à la température extérieure)
- une très grande différence de demande de froid mensuelle par m² d'un bâtiment à l'autre

En conclusion :

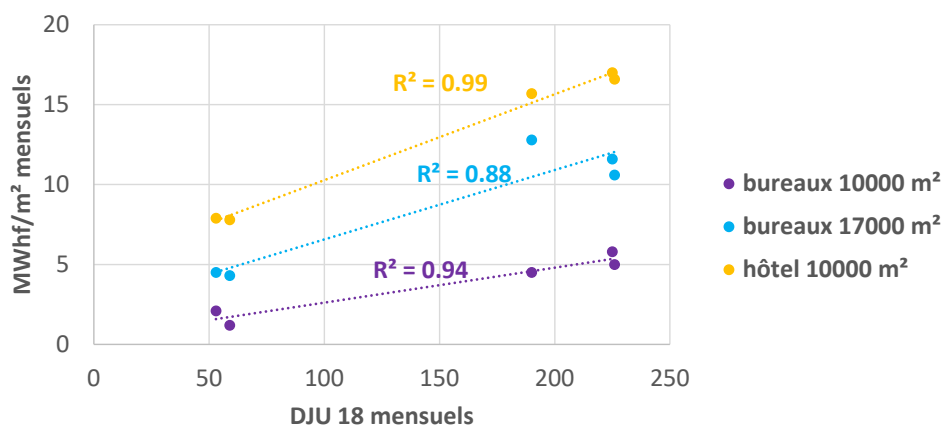
- L'indicateur semble utilisable pour les sites climatisés en permanence (hors datacenter), par contre dès que le schéma de climatisation est plus complexe (coupure nocturne, week-ends, vacances scolaires...), il faudrait probablement filtrer les DJU pour obtenir une corrélation. Or l'intérêt de ce type d'indicateur est sa simplicité, il perd en pertinence s'il faut retravailler les données...
- Le choix de la température de référence n'est pas trivial (la valeur de 18°C utilisée en chauffage n'étant pas représentative en climatisation) or on voit bien son impact sur la qualité de la corrélation (cf. Tableau 3). La température de référence qui semble offrir les meilleurs résultats serait plutôt 21 ou 22°C.
- L'indicateur ne prend en compte que la température extérieure et pas l'hygrométrie de l'air alors que la condensation de la vapeur d'eau de l'air représente une grosse charge dans la demande de climatisation. Cela dit, nous avons vu plus haut que la signature énergétique n'était pas nécessairement améliorée par la prise en compte de l'enthalpie de l'air au lieu de sa seule température.

Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

Notons tout d'abord la différence de rigueur climatique entre les deux zones d'étude. A Marseille, on a enregistré 791 DJU 18 sur l'année de mesure (avec un maximum mensuel à 226), tandis qu'à La Réunion les DJU 18 annuels ont varié entre 2205 et 2920 selon les sites (avec un maximum mensuel compris entre 277 et 336), soit une différence d'un facteur 3 à 4. Notons que ce n'est pas tant l'intensité mensuelle qui diffère que la durée de la période de climatisation.

Sur les 3 bâtiments tertiaires étudiés à Marseille, Enertech a obtenu de très bonnes corrélations sur la période estivale (mai-septembre) avec une température de référence de 18°C (0.97 et 0.90 sur les deux bâtiments de bureaux, 0.99 sur l'hôtel), mais en retravaillant la demande de froid pour isoler uniquement la partie dépendante des conditions climatiques. Sans traitement spécifique (comme nous l'avons fait pour les sites à La Réunion), les corrélations sont un peu dégradées mais restent bonnes (cf. Figure 6) : l'indicateur semble plus pertinent en métropole qu'à La Réunion.

Figure 6 : Demande de froid mensuelle rapportée à la surface climatisée en fonction des DJU mensuels calculés avec une température de référence de 18°C pour les 3 sites à Marseille



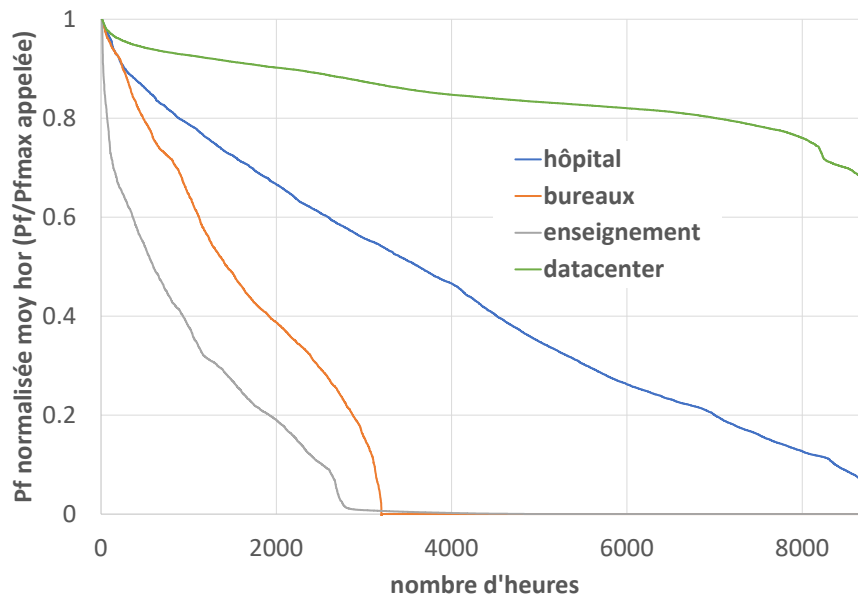
b. Structure

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). Afin de faciliter la comparaison, nous avons tracé la courbe monotone des 4 sites étudiés en rapportant la puissance appelée à la puissance maximale appelée sur l'année (cf. Figure 7). NB : Nous n'avons pas considéré les 10 1^{ères} valeurs pour la détermination de la

puissance maximale appelée afin de nous affranchir de phénomènes de régulation qui ne seraient pas représentatifs de la demande de froid réelle.

Figure 7 : Courbe monotone normalisée par rapport à la puissance maximale appelée sur l'année pour les 4 sites



La monotone de froid est très différente d'un usage à l'autre :

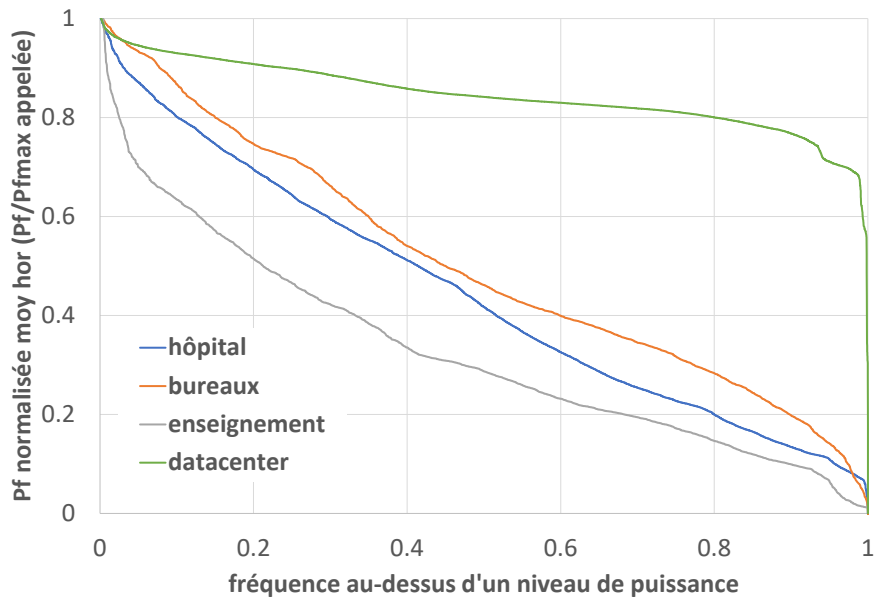
- L'hôpital est climatisé en permanence avec une grande variabilité de puissance appelée en lien avec les variations climatiques.
- Le datacenter est également climatisé en permanence mais avec très peu de variations de puissance appelée (<25%) en lien avec la prépondérance des charges internes sur les effets climatiques.
- La climatisation des bâtiments de bureaux et d'enseignement est coupée en inoccupation (nuit et week-ends), avec environ 3000h de fonctionnement annuel. La coupure hivernale sur le bâtiment d'enseignement diminue encore le temps de fonctionnement annuel. La variabilité de puissance est également très importante en lien avec les variations climatiques.

La grande différence dans le nombre d'heures de fonctionnement annuel ne permet pas de comparer la structure de la demande de froid sur les différents sites. Aussi nous avons choisi de représenter les données de puissance normalisée en fonction de la fréquence de fonctionnement (cf. Figure 8 page suivante).

Cette représentation permet de comparer la distribution des puissances appelées sur le temps effectif de fonctionnement de la climatisation sur les 4 sites :

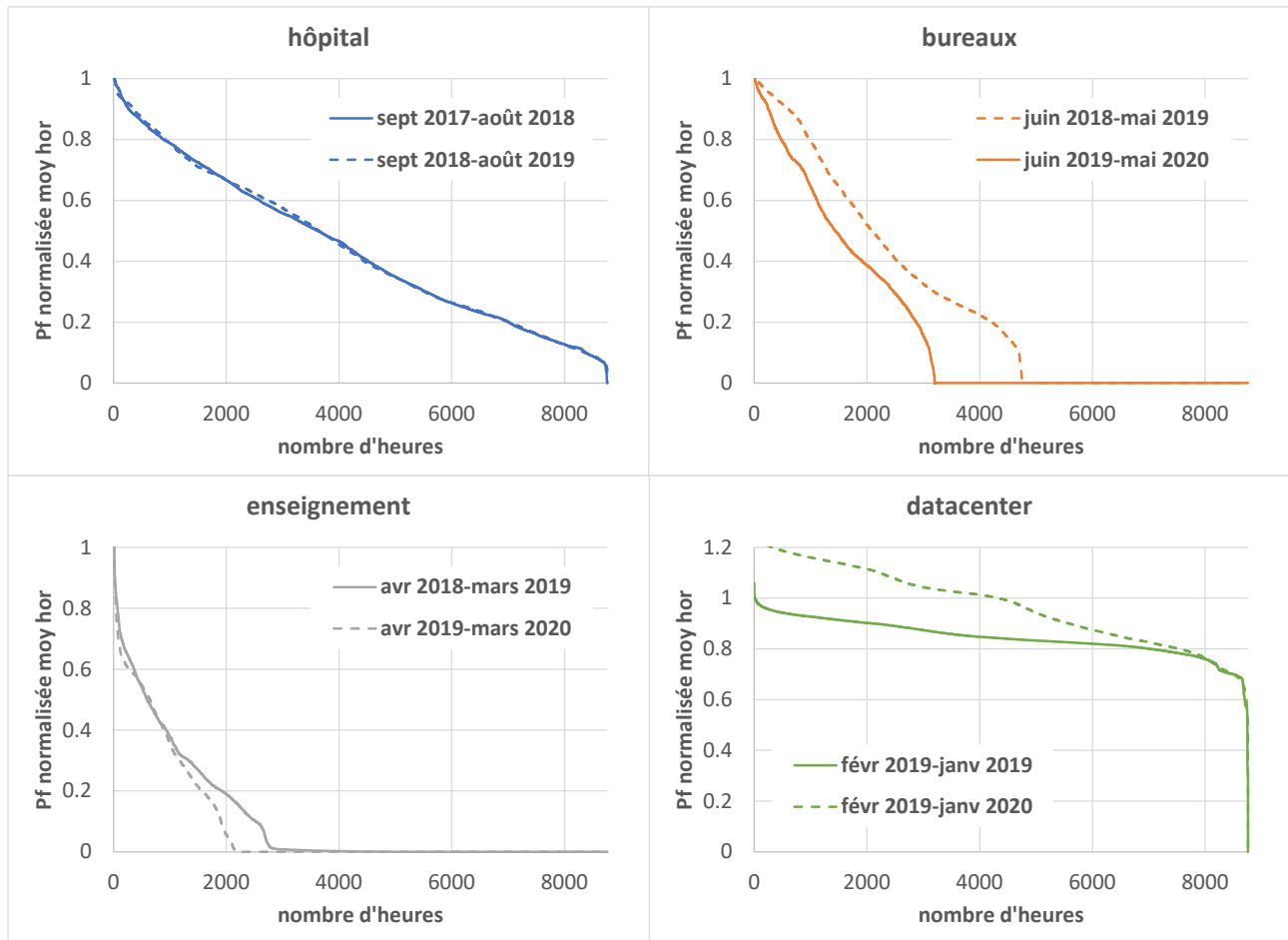
- La forme des courbes pour l'hôpital, le bâtiment d'enseignement et le bâtiment de bureaux deviennent similaires, en lien avec la similitude de comportement des bâtiments par rapport à la température extérieure.
- La forme de la courbe pour le datacenter est très différente des autres pour les raisons déjà mentionnées.

Figure 8 : Courbe de fréquences cumulées de la puissance froide appelée normalisée par rapport à la puissance maximale appelée sur l'année pour les 4 sites



La Figure 9 permet d'apprécier la reproductivité des courbes monotones normalisées d'une année sur l'autre (NB : Les puissances froides ont été normalisées sur la même valeur de puissance maximale appelée pour les deux années pour éviter une erreur d'interprétation).

Figure 9 : Courbe monotone normalisée sur les deux années de mesure pour les 4 sites



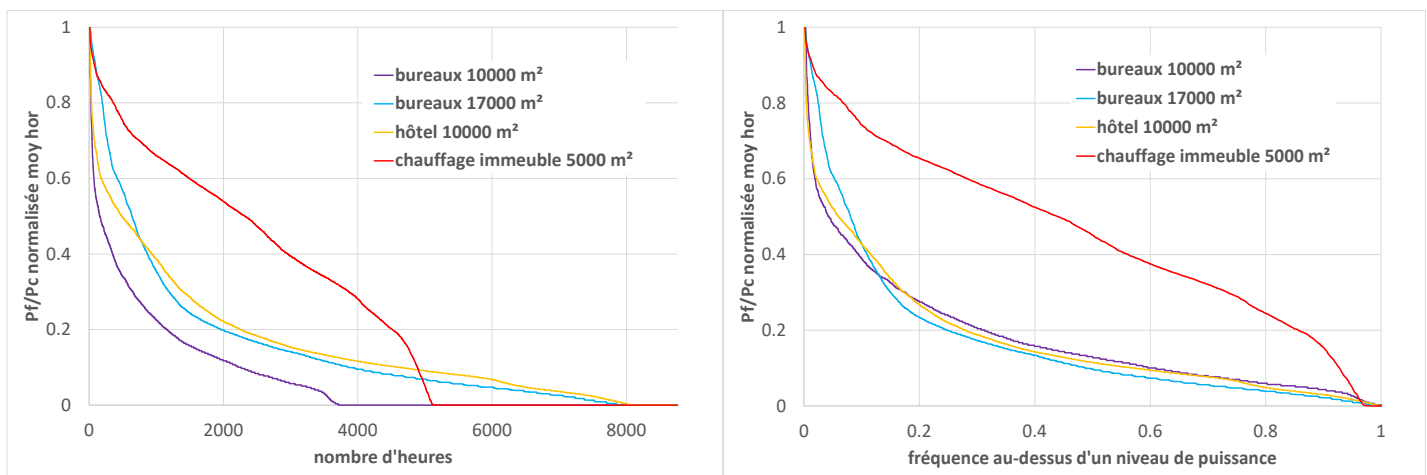
On note que :

- Les mesures sur l'hôpital ont montré une très grande reproductivité de la demande de froid d'une année à l'autre.
- Sur les 3 autres sites, la reproductivité n'est pas aussi bonne, la courbe monotone ayant été affectée par différents événements :
 - o Sur le bâtiment de bureaux, une panne est survenue sur l'horloge du GEG au cours de la 1^{ère} année de mesure, si bien qu'il a fonctionné en continu pendant plusieurs mois jusqu'à ce que l'horloge soit remplacée : la courbe monotone de la 1^{ère} année n'est donc pas représentative.
 - o Sur le bâtiment d'enseignement, la coupure de la climatisation au moment des vacances et en hiver est réalisée manuellement, aussi les dates de coupure peuvent significativement varier d'une année à l'autre.
 - o Sur le datacenter, une correction de réglage au cours de la 2^{ème} année de mesure a permis d'augmenter significativement le recours à la climatisation EG aux dépens des équipements à détente directe (qui auraient dû être uniquement sollicités en secours), ce qui a engendré une augmentation de la puissance appelée sur la 2^{ème} moitié de l'année et explique la forme « imparfaite » de la courbe (et de ce fait non représentative).

Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

Les courbes monotones des 3 sites à Marseille ont été tracées sur la Figure 10. Nous avons rajouté pour information la courbe monotone de chauffage pour le bâtiment résidentiel à Genève².

Figure 10 : Monotone de froid normalisée pour les 3 sites à Marseille et monotone de chauffage normalisée pour un immeuble résidentiel à Genève (gauche) et courbes de fréquences cumulées (droite)



On note que :

- Sur deux des 3 bâtiments climatisés à Marseille, la climatisation n'est pas coupée en hiver alors même que le bâtiment est chauffé... Le 3^{ème} site est climatisé uniquement en période estivale soient environ 4000h.
- Dans les 2 bâtiments de bureaux, la climatisation n'est pas coupée la nuit ni le week-end.
- La monotone de chauffage a une forme un peu différente des monotones de froid (avec une inflexion), avec 5000h de chauffage annuelles.
- Malgré la différence de forme des 3 courbes monotones, la courbe de fréquences cumulées est très similaire pour les 3 sites.

Le Tableau 4 présente un indicateur permettant d'apprécier la différence de forme de la courbe monotone pour les différents sites, le nombre d'heures équivalentes à puissance maximale appelée :

$$nb\ heures\ \acute{e}quiv\ P_{max}\ appel\acute{e}e = \frac{Energie\ totale\ sur\ l'ann\acute{e}e\ (kWh)}{Puissance\ maximale\ appel\acute{e}e\ (kW)}$$

Cet indicateur quantifie l'« intensité » de la demande de froid par rapport à la puissance maximale appelée, il dépend de la forme de la courbe (l'aire sous la courbe monotone représentant l'énergie consommée sur l'année).

Tableau 4 : Nombre d'heures équivalentes à puissance maximale appelée pour chaque site

		surface	nb h équiv Pmax	profil clim
Réunion	hôpital	22000 m ²	3890 h	24h/24h 365 jrs/an
	bureaux	1260 m ²	1612 h	coupure nuit et we
	enseignement	1755 m ²	768 h	coupure nuit, we, hiver
	datacenter	(820 m ²)	7402 h	24h/24h 365 jrs/an
Marseille	bureaux	10000 m ²	657 h	coupure hivernale
	bureaux	17000 m ²	1325 h	24h/24h, pas de coupure hivernale
	hôtel	10000 m ²	1390 h	24h/24h, pas de coupure hivernale
Genève	immeuble résidentiel	5000 m ²	CHAUFFAGE 2373 h	hiver uniquement

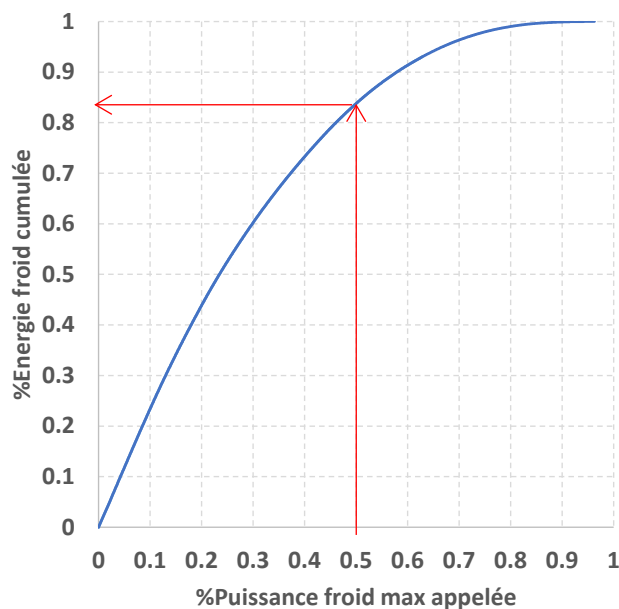
On constate que :

- Les bâtiments climatisés en permanence (hôpital, datacenter) ont des valeurs beaucoup plus élevées que les bâtiments dont la climatisation est coupée en inoccupation voire en hiver.
- De manière surprenante, les valeurs pour les bâtiments à Marseille sont aussi élevées que celles pour les bâtiments à La Réunion alors que la période estivale est beaucoup plus courte. Cela s'explique par le fait que la climatisation est coupée en inoccupation (nuits en week-ends) à La Réunion alors qu'elle ne l'est pas à Marseille.
- La valeur pour le chauffage du bâtiment résidentiel est deux fois plus élevée que celles pour la climatisation des bâtiments à Marseille, ce qui laisse à penser que la demande de chauffage reste prépondérante sur la demande de climatisation en climat tempéré.

Représentation %E/%P

La Figure 11 propose une autre représentation des données d'une courbe monotone qui permet une lecture du lien entre énergie et puissance : elle présente la part de l'énergie cumulée produite en dessous d'un certain niveau de puissance relative :

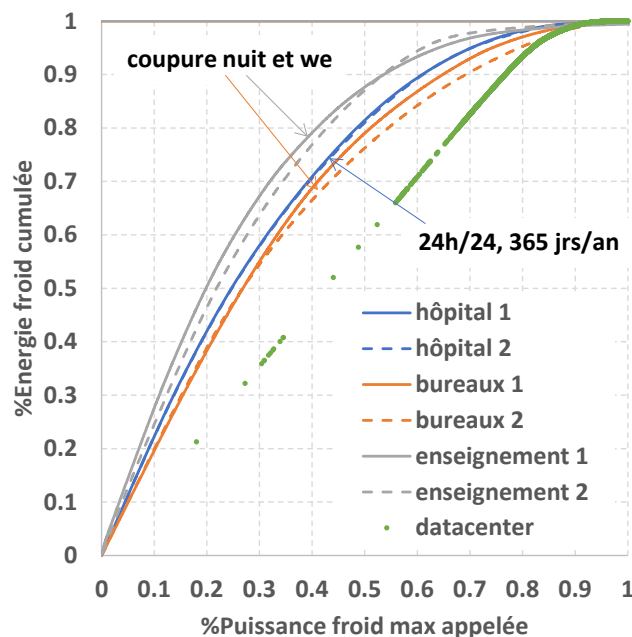
Figure 11 : Part de l'énergie cumulée produite en dessous d'un niveau de puissance relative (hôpital)



Ainsi, cette représentation permet de lire que sur ce site plus de 80% de l'énergie froide est fournie à moins de 50% de la puissance maximale appelée sur l'année (*NB : Il s'agit de la puissance maximale appelée sur l'année et non de la puissance installée*). En d'autres termes, si on n'avait installé que la moitié de la puissance maximale appelée, on fournirait déjà plus de 80% de la demande de froid, la 2^{ème} moitié de la puissance n'étant sollicitée que pour les 20% restants. Cette représentation se révèle très utile dans les choix de dimensionnement à réaliser dans le cas d'installations vertueuses souvent intensives en investissement (cf. §III.3.a).

La Figure 12 présente la même représentation pour les 4 sites pour les deux années de mesure.

Figure 12 : Part de l'énergie cumulée produite en dessous d'un niveau de puissance relative pour les 4 sites

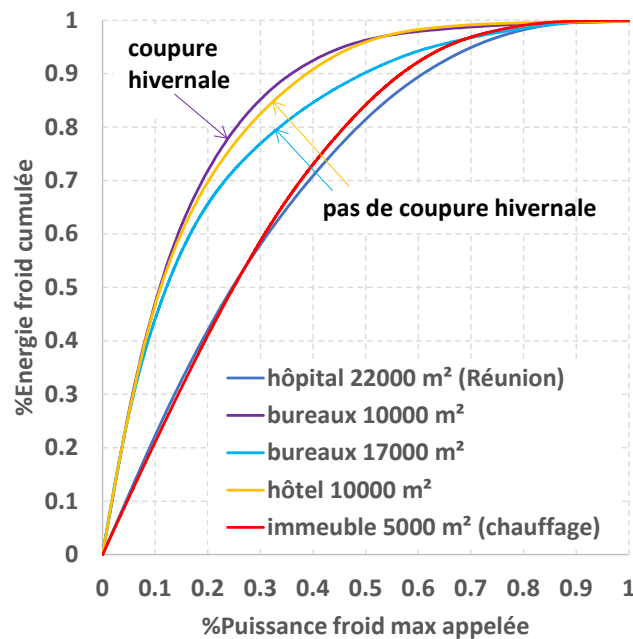


On note une grande similitude de la structure de la demande de froid d'un site à l'autre, alors même que les courbes monotones sont très différentes (cf. Figure 7). La forme de la courbe est en fait semblable pour une majorité de sites tertiaires, sauf pour les typologies spéciales comme le datacenter. La coupure nocturne n'a pas d'impact flagrant étant donnée la similitude des courbes pour l'hôpital et le bâtiment de bureaux. Au final, ce qui est important de retenir c'est que 75 à 85% de l'énergie est fournie à moins de 50% de la puissance appelée (sauf pour le datacenter pour lequel cette représentation n'a pas tellement de sens puisque la puissance appelée est très stable). La courbe est assez répétable sur les deux années malgré la différence de courbe monotone pour les bâtiments de bureaux et d'enseignement (cf. Figure 9).

Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

La Figure 13 présente la même représentation pour les 3 sites à Marseille ainsi que pour le bâtiment résidentiel (chauffage) à Genève². Dans un souci de lisibilité, nous n'avons fait figurer que la courbe pour l'hôpital côté Réunion.

Figure 13 : Part de l'énergie cumulée produite en dessous d'un niveau de puissance relative pour les 3 sites à Marseille et l'immeuble résidentiel (chauffage) à Genève



On constate que :

- Les courbes pour les 3 sites à Marseille sont légèrement différentes de celles pour les sites à La Réunion, avec une part d'énergie fournie en dessous de 50% de puissance plutôt de l'ordre de 90-95% au lieu de 75-85% sur les sites à La Réunion, ce qui signifie que les pics de puissance froide ont une amplitude plus importante à Marseille qu'à La Réunion, comme on peut le voir en comparant la Figure 9 et la Figure 10.
- La coupure hivernale semble ne pas avoir d'influence sur la forme de la courbe.
- La courbe pour le chauffage du bâtiment résidentiel à Genève est étonnamment proche de la courbe pour la climatisation de l'hôpital à La Réunion...

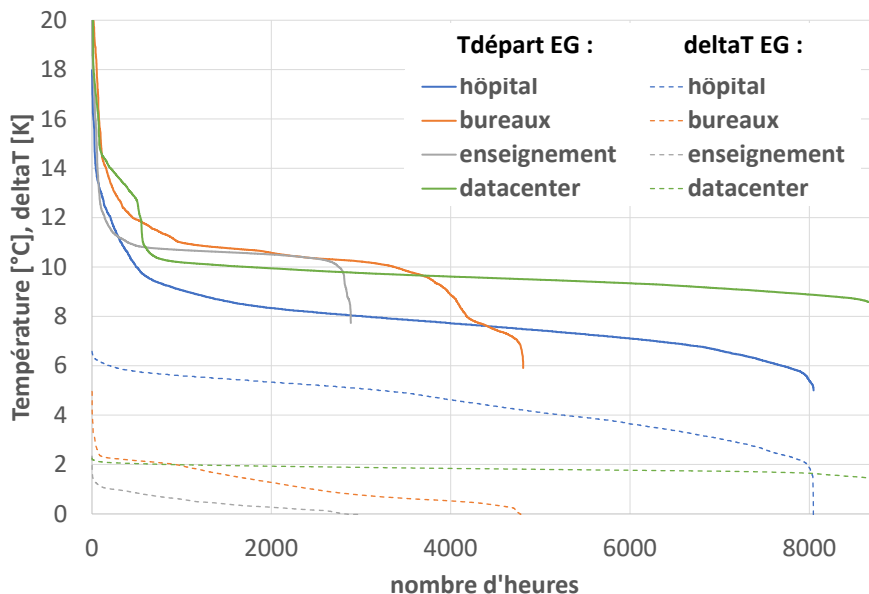
c. Températures de distribution

La Figure 14 (page suivante) présente les monotones de température de départ EG ainsi que les monotones des ΔT (Tretour EG – Tdépart EG) sur le réseau EG pour les 4 sites.

On constate que :

- La température de départ EG ne varie pas beaucoup au cours de l'année : nous n'avons pas identifié de variation de la consigne de départ distribution en fonction de la température extérieure (comme on l'observe généralement en chauffage).
- Les températures de départ EG sont comprises entre 6-8°C (hôpital) et 10-11°C (bâtiments de bureaux et d'enseignement).
- Hormis sur l'hôpital, les ΔT ne dépassent pas 2K sur le réseau EG (voire inférieur à 1K sur le bâtiment d'enseignement), ce qui est loin de la valeur de référence de 5K et traduit un surdimensionnement systématique de la pompe de distribution EG, à débit fixe sur les 3 sites. L'hôpital atteint des ΔT de 6K car le réseau EG est équipé d'une pompe à débit variable (et heureusement car celle-ci est également surdimensionnée d'un facteur 4).
- Les régimes de fonctionnement du GEG du datacenter sont très stables (ce qui s'explique par le fait que la demande de froid est constante).

Figure 14 : Monotones de température de départ EG et ΔT EG pour les 4 sites

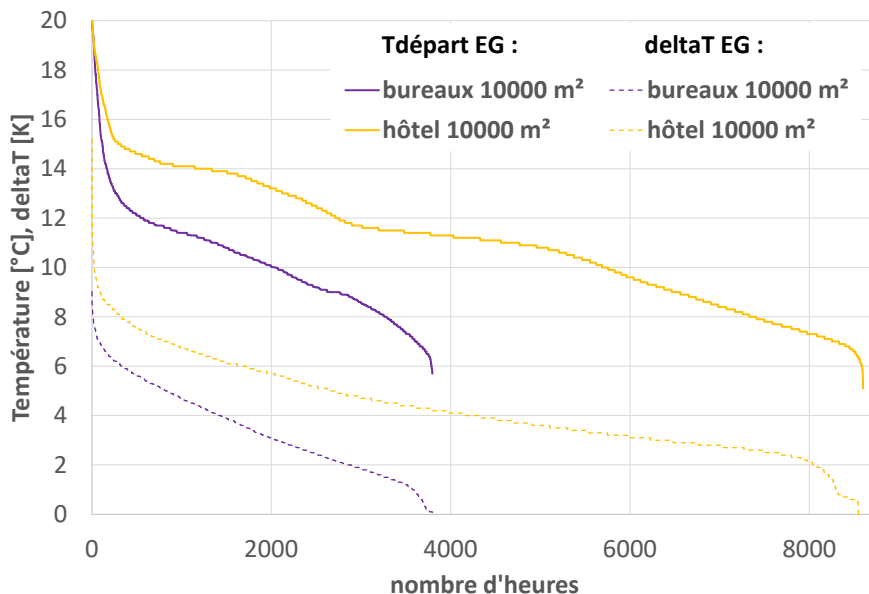


Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

La Figure 15 présente les monotones de température de départ EG ainsi que les monotones des ΔT sur le réseau EG pour 2 des sites étudiés à Marseille (sur le 3^{ème} site, la température EG sur le réseau secondaire n’a pas pu être mesurée pour des raisons d’accessibilité).

Il s’agit de deux bâtiments raccordés au réseau Thassalia (réseau de froid avec production centralisée et condensation de GEG sur eau de mer). Afin de favoriser les performances de la production EG, Thassalia impose un régime de fonctionnement avec un départ EG à 7°C et un retour EG à 15°C (avec des pénalités si les retours EG sont inférieurs à 15°C). Les deux bâtiments, qui datent de 2016, sont équipés de pompes à débit variable sur la distribution et de vannes 2 voies sur les terminaux afin de pouvoir faire varier le débit sur le réseau EG en fonction de la demande de froid et ainsi conserver un ΔT de 8K en permanence. De son côté, Thassalia s’engage à fournir sur le réseau primaire un niveau de température de 6°C afin de permettre d’atteindre les régimes voulus sur le réseau secondaire.

Figure 15 : Monotones de température de départ EG et ΔT EG pour 2 des sites à Marseille



On constate que :

- Les températures de départ EG sont bien au-dessus des 7°C prévus, ce qui s'explique à la fois par du recyclage sur le réseau secondaire (débits trop élevés) et par une fourniture imparfaite côté Thassalia avec des températures comprises entre 4.5 et 10.5°C au lieu des 6°C contractuels.
- Les ΔT montent ponctuellement jusqu'à 8K sur le bâtiment de bureaux et 10K sur l'hôtel, mais les ΔT moyens sont respectivement de 3.4K et 4.2K, soit la moitié de la valeur recherchée... Cela traduit une régulation imparfaite de la variation de débit sur les réseaux secondaires. Ces valeurs sont néanmoins bien plus élevées que celles observées sur les 3 sites à La Réunion équipés de pompes de distribution à débit fixe, ce qui confirme que seule une pompe de distribution à débit variable permet d'atteindre des régimes de températures corrects.

d. Apports et limites de la STD dans la prédiction de la demande de froid

La conduite de simulations thermiques sur deux bâtiments instrumentés – notamment en demande de froid – sur de longues périodes (bâtiment de bureaux et bâtiment d'enseignement) a permis de confronter précisément les résultats de mesure aux résultats de simulation afin de « critiquer » l'usage de la STD pour la prédiction de la demande de froid. L'influence de différents paramètres a été étudié, nous avons essayé de présenter ici une synthèse des résultats obtenus : les résultats complets sont disponibles dans deux rapports dédiés^{3,4}.

Les simulations ont été menées avec le moteur de calcul EnergyPlus (le plus couramment utilisé à La Réunion) au pas de temps horaire sur une année complète, avec des éléments connus :

- éléments d'enveloppe
- occupation (bien connue pour le bâtiment de bureaux mais mal maîtrisée pour le bâtiment d'enseignement)
- nombre d'équipements électriques
- horaires de fonctionnement de la climatisation

et des hypothèses « classiques » pour les autres paramètres :

- température de consigne de 25 ou 26°C selon les zones
- taux de renouvellement d'air habituels
- dissipations par les équipements électriques issues de l'AICVF (Association des Ingénieurs et Techniciens en Climatique, Ventilation et Froid)

Comparaison des courbes monotones

La Figure 16 (page suivante) montre qu'on retrouve plus ou moins bien la courbe monotone mesurée.

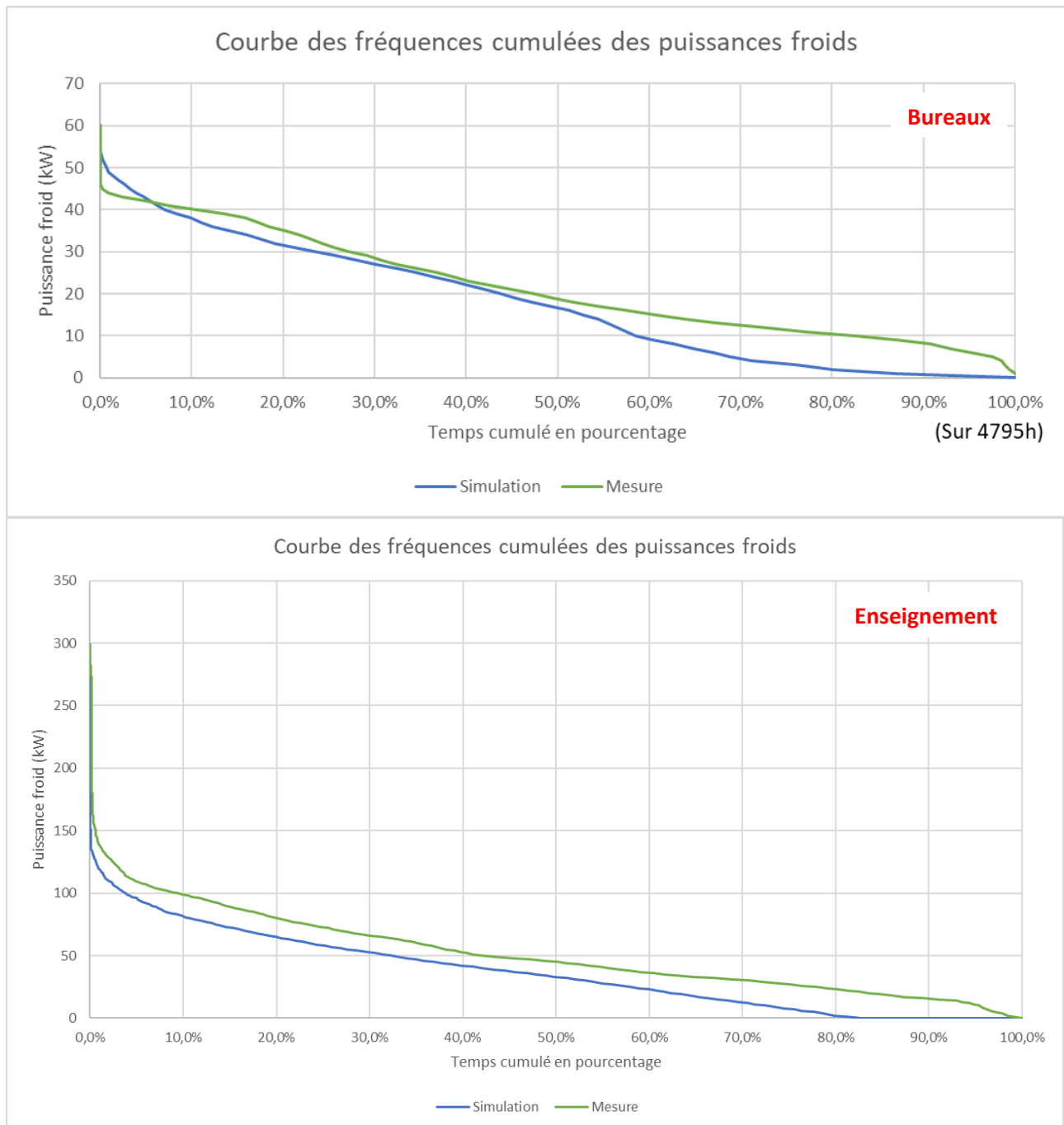
On note que :

- Dans les deux cas, la courbe monotone simulée est inférieure à la réalité : ce qui aboutit à une demande de froid annuelle simulée inférieure de 12% dans le cas du bâtiment de bureaux et de 29% dans le cas du bâtiment d'enseignement.
- La puissance maximale appelée est par contre 8% plus élevée que la réalité dans le cas du bâtiment de bureaux mais inférieure de 47% à la réalité dans le cas du bâtiment d'enseignement, ce qui peut avoir son importance lors du choix d'une valeur dimensionnante par exemple.

³ Projet SWACool Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion : Bureaux de la CAF – St Paul, Résultats de simulation, Livrable 1.2b, LEU Réunion, septembre 2020

⁴ Projet SWACool Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion : Fac de lettres Université de La Réunion – St Denis, Résultats de simulation, Livrable 1.3b, LEU Réunion, septembre 2020

Figure 16 : Courbes monotones mesurée vs. simulée (représentées en fréquences cumulées) pour le bâtiment de bureaux (haut) et le bâtiment d’enseignement (bas)



Choix de la valeur dimensionnante

Dans le cas de bâtiments neufs, la STD est souvent utilisée pour dimensionner les équipements de climatisation. Cependant comme on le voit, considérer la puissance maximale appelée comme valeur dimensionnante n’est pas forcément pertinent car elle n’est souvent appelée que quelques heures par an ce qui conduit à surdimensionner les équipements. Ainsi le pic de puissance peut être étalé, l’inertie du bâtiment limitant facilement les variations de température intérieure. D’ailleurs lors de l’analyse des courbes monotones mesurées, nous écartons systématiquement les 10 plus grandes valeurs, qui ne sont souvent pas représentatives d’une puissance froide appelée par le bâtiment mais découlent plutôt de phénomènes de régulation (ex : relance).

A ce propos, dans le cadre du projet Tropiclim Enertech a réalisé un outil de dimensionnement des systèmes de climatisation⁵ qui permet de s'affranchir de simulation thermique tout en s'approchant au plus près de la puissance réellement nécessaire à climatiser un bâtiment. La méthodologie s'appuie sur de nombreuses STD intégrées à l'outil qui permettent de retrouver assez précisément la puissance maximale appelée après un paramétrage simplifié.

L'outil a donné de bons résultats⁶ sur 3 bâtiments dont la demande de froid a été précisément mesurée (dont les deux bâtiments étudiés ici) en comparaison avec d'autres méthodes plus complexes et chronophages, en considérant non pas la puissance maximale mais la **5^{ème} plus grande valeur de puissance donnée par la STD**.

Influence des hypothèses de simulation

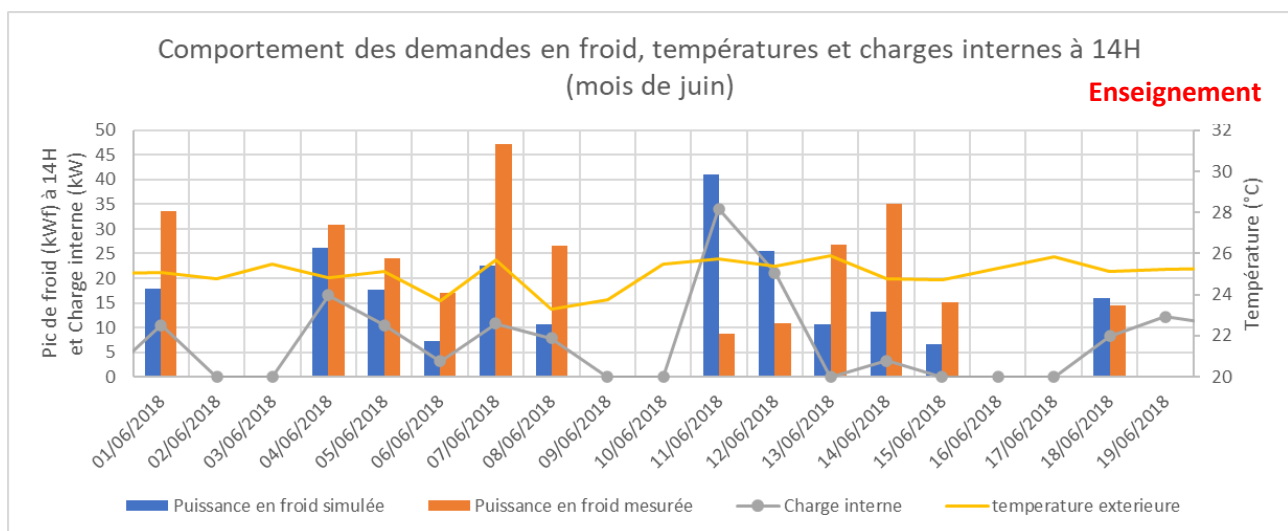
Occupation

L'occupation a un double impact sur la demande de froid d'un bâtiment, d'une part sur les charges internes liées aux personnes présentes et d'autre part sur le fonctionnement effectif de la climatisation (si une pièce n'est pas utilisée, les derniers occupants devraient en principe avoir coupé la climatisation en partant).

Pour le bâtiment de bureaux, l'occupation est régulière et bien connue, elle a pu être paramétrée assez fidèlement dans le modèle. La demande de froid résultante est relativement proche des mesures (écart de 12%).

Pour le bâtiment d'enseignement, l'occupation a été paramétrée dans le modèle à partir du planning prévisionnel d'utilisation des salles de cours, cependant nous n'avons aucun retour d'information sur l'occupation réelle des salles durant la période de mesure... La Figure 17 présente un exemple de données mesurées et simulées (prises à 14h chaque jour) sur le mois de juin 2018, ainsi que les apports internes pris en compte dans la simulation.

Figure 17 : Comparaison des données mesurées et simulées (prises à 14h chaque jour) pour le mois de juin 2018 (bâtiment d'enseignement)



Avant tout il faut noter que les variations de charges internes considérées dans la simulation sont essentiellement en lien avec l'occupation paramétrée dans le modèle. On observe d'autre part une bonne corrélation entre les variations de charges internes et celles de la demande de froid simulée.

Sur la semaine du 4 au 8/06, les demandes de froid mesurée et simulée sont relativement corrélées (en tous cas en tendance), mais ce n'est pas du tout le cas sur la semaine du 11 au 15/06. Ce qui amène à penser que le planning théorique d'occupation des salles rentré dans le modèle n'a pas du tout été respecté... mais nous n'avons aucun moyen de le savoir.

⁵ Projet Tropiclim Tâche 1 : Développement d'une méthode de dimensionnement sans simulation thermique dynamique, Livrables 1.3a et 1.3b, Enertech, janvier 2020, <http://greentech.re/index.php/tropiclim-ref7/>

⁶ Projet Tropiclim Tâche 1 : Comparaison des différentes méthodes de conception, Livrable 1.4, Enertech, janvier 2020, <http://greentech.re/index.php/tropiclim-ref7/>

Ainsi l'occupation a un impact significatif sur la demande de froid si bien que **les bâtiments dont l'occupation est aléatoire ou mal connue sont difficiles à simuler** (on observe d'ailleurs une différence de 29% entre la demande de froid mesurée et simulée dans le cas du bâtiment d'enseignement).

Dissipations des équipements électriques

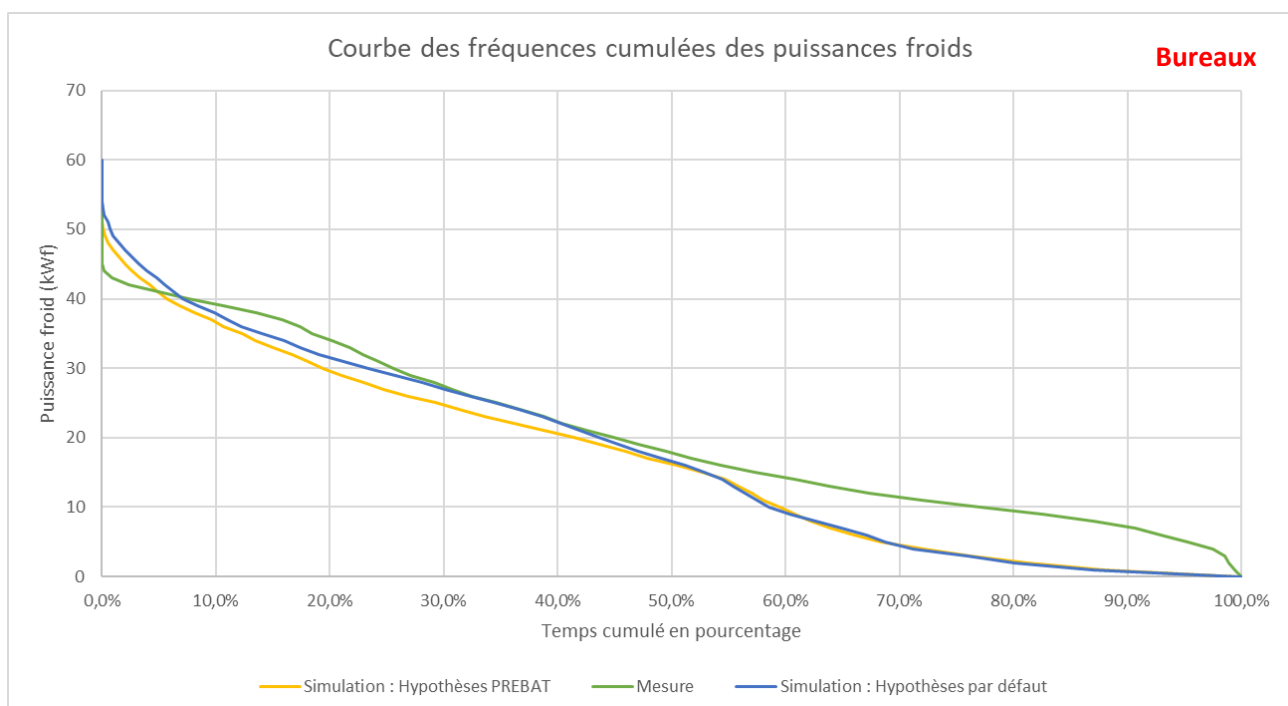
Les équipements électriques participent également aux charges internes par dissipation thermique. L'AICVF propose des valeurs uniformisées utilisées couramment en STD. Le référentiel PREBAT (Programme d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment) en propose d'autres (cf. Tableau 5).

Tableau 5 : Hypothèses de dissipation thermique des appareils électriques

	Charges internes AICVF	Charges internes du référentiel PREBAT	
Métabolisme	67	75	Wsensibles/pers.
Ordinateur	70	37	W/appareil
Imprimante	50	82	W/appareil
TV	40	80	W/appareil
Serveur	115	115	W/appareil
Eclairage	11	10	W/m ²

Des simulations ont été réalisées pour le bâtiment de bureaux en utilisant les deux référentiels. Il en est ressorti que les résultats sont meilleurs avec le référentiel AICVF utilisé par défaut dans les simulations (cf. Figure 18). Cela s'explique par le fait que le référentiel PREBAT est focalisé sur des bâtiments à conception énergétiquement performante dans lesquels on fait délibérément le choix d'équipements électriques performants, ce qui est réaliste pour les bâtiments neufs mais n'est pas nécessairement le cas dans les bâtiments existants comme le bâtiment de bureaux étudié.

Figure 18 : Courbes monotones mesurée et simulée avec les hypothèses de dissipation thermique des équipements électriques de l'AICVF et du référentiel PREBAT (bâtiment de bureaux)

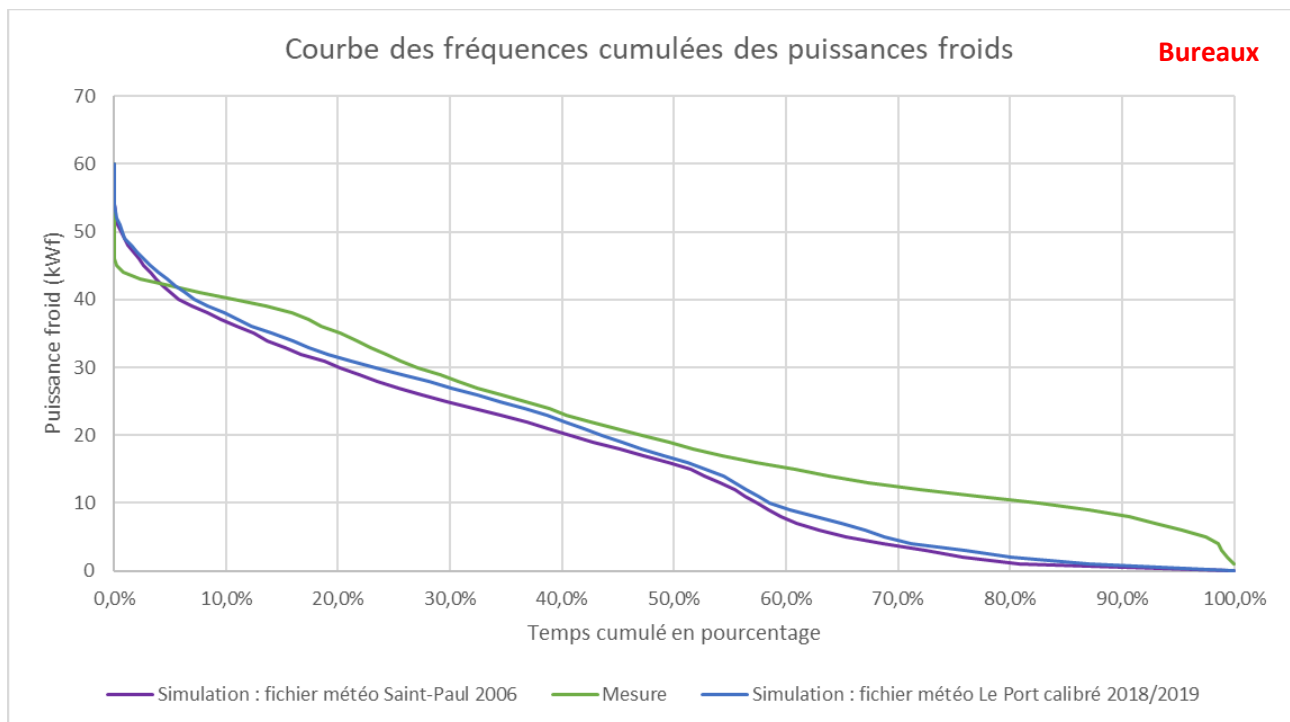


Météo

Pour le bâtiment de bureaux, nous n'avons pas pu obtenir de données météo correspondant à la période de mesure d'une station proche du site (station Météo France du Port pour un site à St Paul). Des données météo plus anciennes (2006) d'une station météo à St Paul étaient néanmoins disponibles. Des simulations

ont été réalisées avec les deux fichiers météo et **avantagent légèrement les données météo sur la période de mesure « réelle » bien que plus éloignées du site mesuré** par rapport aux données météo proches du site étudié mais pour une autre année (du surcroît plus ancienne) :

Figure 19 : Courbes monotones mesurée et simulée avec des données météo proches mais d'une autre année que la période de mesure et avec des données météo sur la période de mesure mais plus éloignées (bâtiment de bureaux)

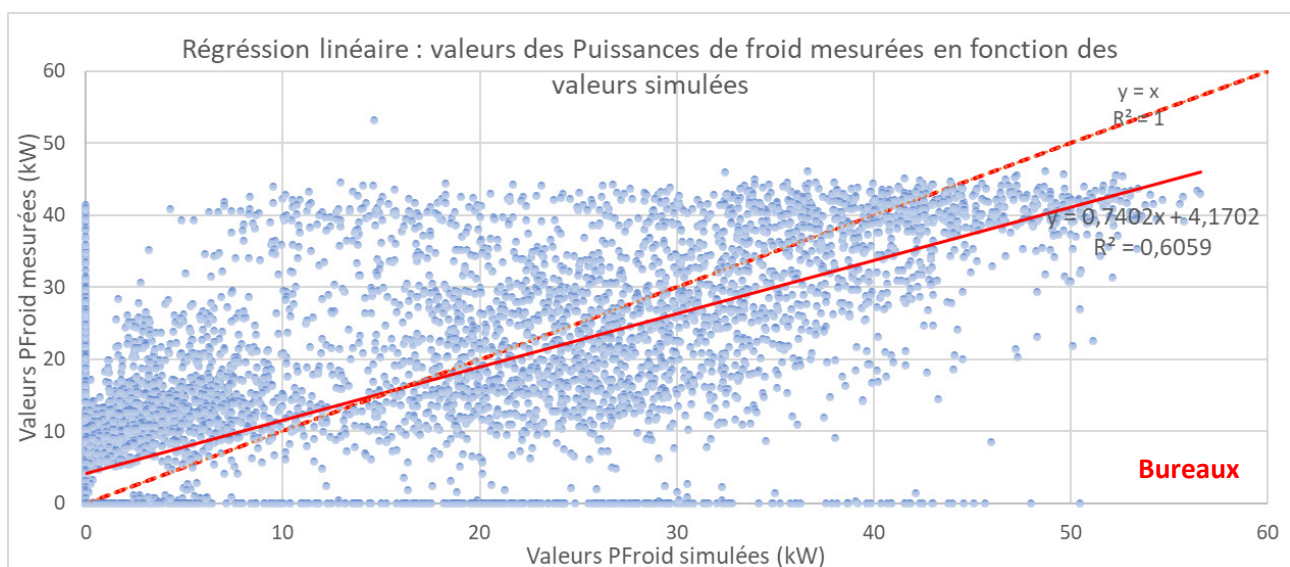


Reproduction par le modèle de la demande de froid instantanée

Sur l'année

La demande de froid totale annuelle peut être bien reproduite par la simulation sans que le profil de demande de froid le soit (par effet de compensation). C'est d'ailleurs généralement le cas comme le montre la Figure 20 pour le bâtiment de bureaux, pour lequel **l'écart dans la demande de froid annuelle n'est que de 12% alors que les puissances instantanées ne concordent pas.**

Figure 20 : Puissances froides instantanées (valeurs horaires) mesurées vs. simulées sur une année complète (bâtiment de bureaux)

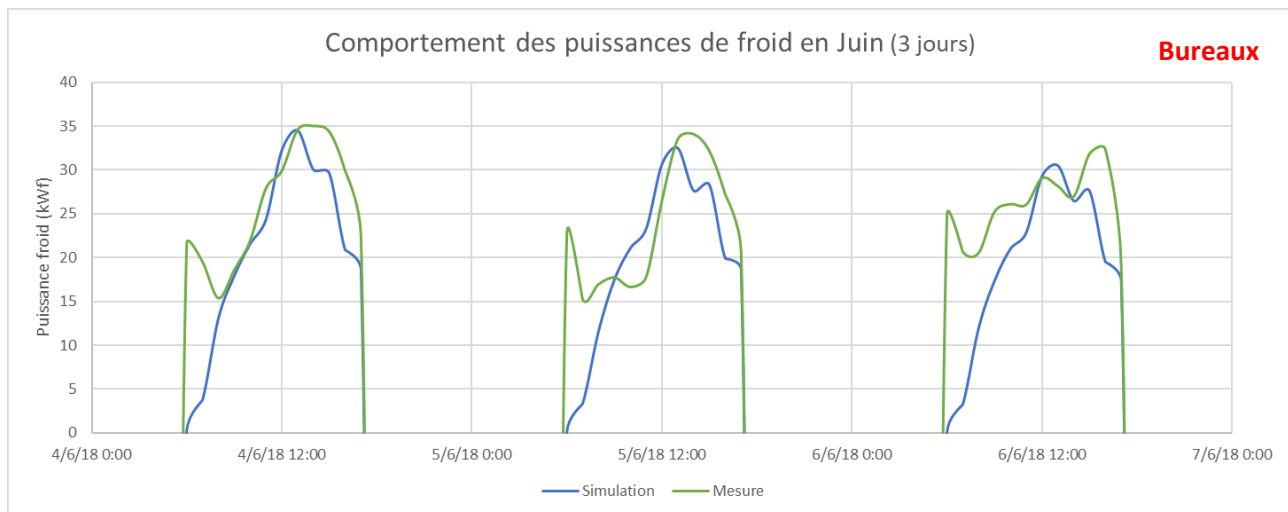


L'observation des profils de demande de froid journaliers pour les deux bâtiments (non présentés ici) montre que **la demande de froid réelle est surestimée par la simulation en hiver tandis que la demande de froid mesurée est inférieure à la demande de froid simulée en été** (de manière moins évidente sur le bâtiment d'enseignement).

Au cours de la journée

La Figure 21 illustre les profils de demande de froid simulé et mesuré sur 3 jours avec coupure nocturne pour le bâtiment de bureaux.

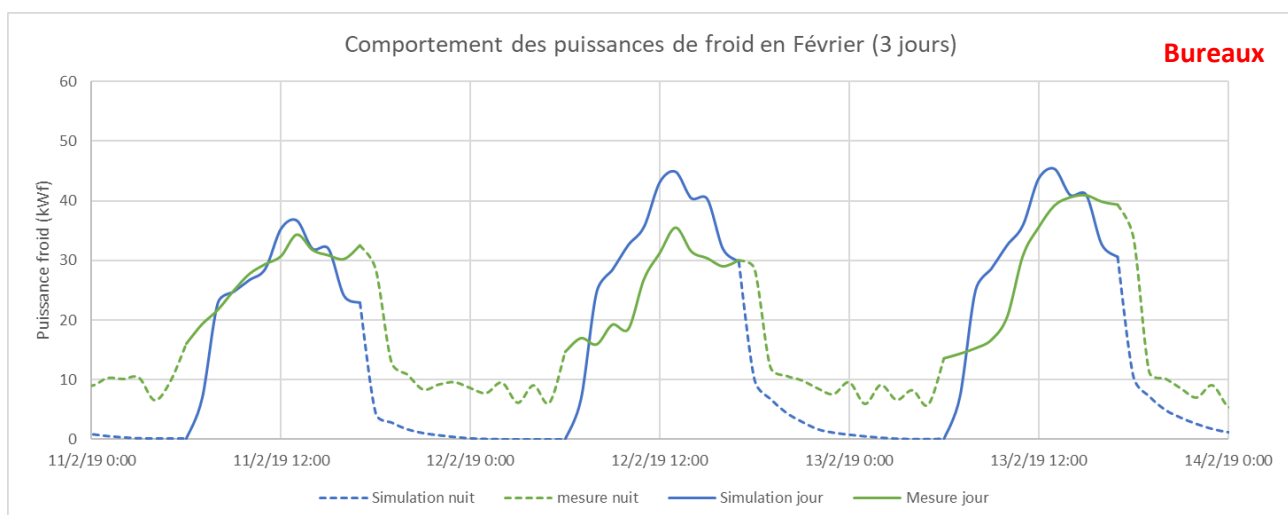
Figure 21 : Profils de de demande de froid journaliers sur 3 jours avec coupure nocturne (bâtiment de bureaux)



La forme des courbes concorde globalement au cours de la journée avec plus ou moins de fidélité. **Le pic de demande de froid observé le matin sur les données mesurées correspond à la relance des installations de climatisation après la coupure nocturne** : il ne s'agit pas d'une demande de froid du bâtiment à proprement parler. **Ce pic ne peut pas être reproduit par la STD** car le modèle ne s'intéresse pas à la dynamique des systèmes.

Durant l'année de mesure, une panne est survenue sur l'horloge du GEG du bâtiment de bureaux, qui a engendré un fonctionnement continu de la climatisation durant plusieurs mois. Les horaires de fonctionnement de la climatisation ont été ajustés dans le modèle pour en tenir compte. La Figure 22 illustre les profils de demande de froid simulé et mesuré sur 3 jours sans coupure nocturne.

Figure 22 : Profils de de demande de froid journaliers sur 3 jours sans coupure nocturne (bâtiment de bureaux)



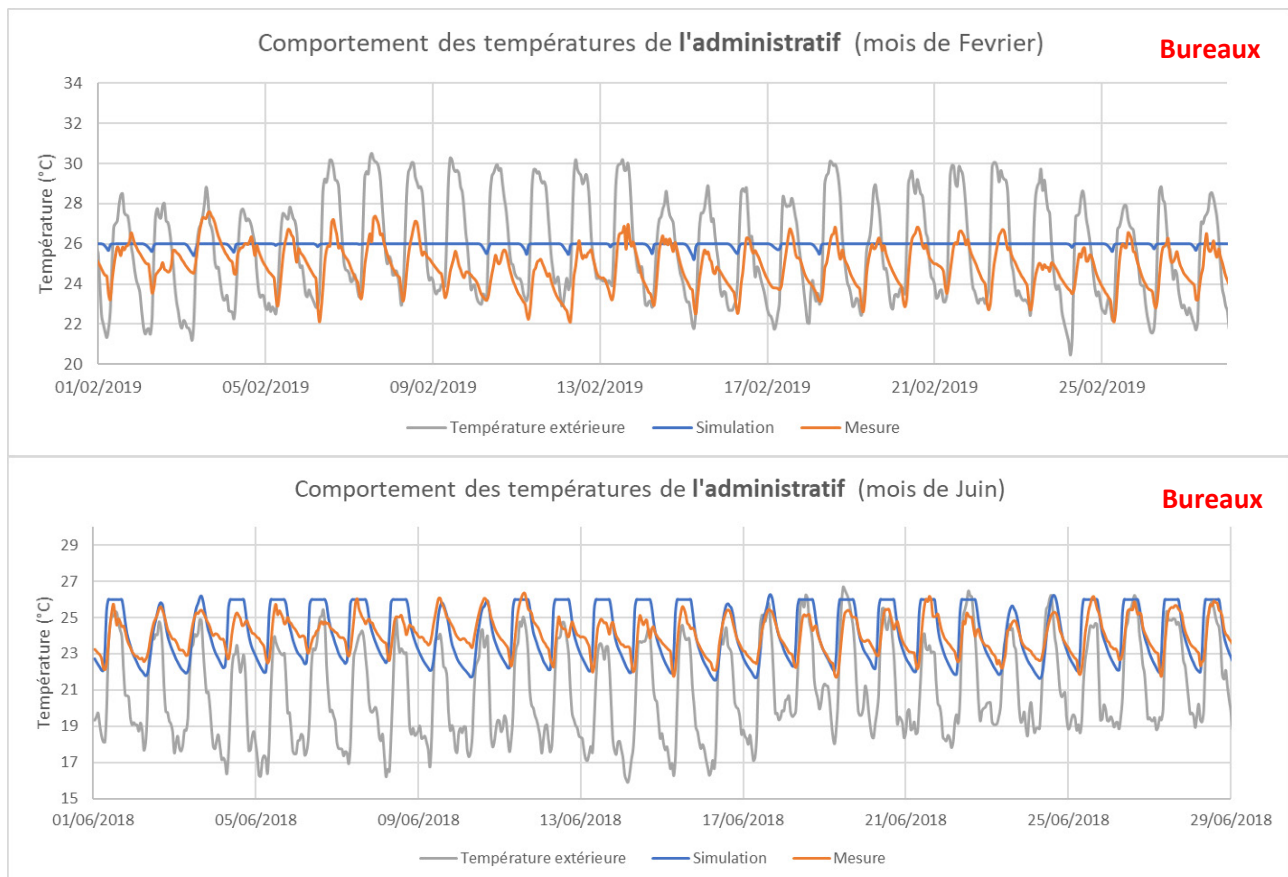
La demande de froid simulée est inférieure à la réalité la journée (occupation) et supérieure à la réalité la nuit (inoccupation). Ceci traduit le fait que **les effets inertiels sont mal reproduits par le modèle**. La nuit, en l'absence d'apports internes et solaires, les variations de température dans le bâtiment sont dépendantes de l'inertie du bâtiment. Or la demande de froid retombe vite à 0 dans le modèle alors que dans les mesures un talon subsiste (NB : il peut également être en partie lié au fonctionnement intermittent des systèmes pour conserver un niveau de température voulu sur le réseau EG).

Températures

Une analyse des températures mesurées par rapport à celles renvoyées par le modèle est présentée ci-dessous pour une pièce de chaque bâtiment.

La Figure 23 présente les températures simulées et mesurées dans l'espace administratif du bâtiment de bureaux.

Figure 23 : Températures simulées vs. mesurées en été (haut) et hiver (bas) dans l'espace administratif (bâtiment de bureaux)



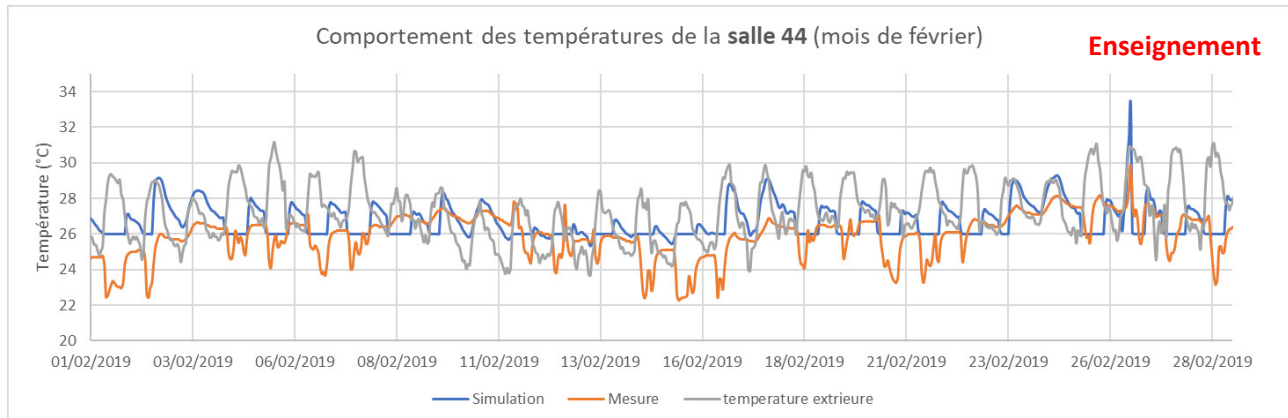
NB : En été, la température intérieure simulée ne remonte pas la nuit car la climatisation était paramétrée en marche continue pour tenir compte de la panne d'horloge sur cette période. En hiver, la température intérieure diminue la nuit avec la température extérieure (en dessous de la température de consigne).

- Les températures mesurées en été sont souvent supérieures à la consigne en journée, ce qui pourrait expliquer l'impression d'inconfort remontée par les usagers dans ce bâtiment⁷, même si le bâtiment n'est pas nécessairement inconfortable dès lors que la consigne de température est dépassée. Cela est également cohérent avec le fait que la demande de froid mesurée est inférieure à la demande de froid simulée en été (cf. plus haut) et probablement en lien avec une diffusion de froid insuffisante dans le bâtiment en période estivale (terminaux sous dimensionnés et/ou mal alimentés).
- Les températures mesurées en hiver sont inférieures à celles simulées, ce qui est cohérent avec une demande de froid mesurée supérieure à celle simulée (cf. plus haut).

⁷ Projet SWACool Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion : Bureaux de la CAF – St Paul, Résultats de mesure, Livrable 1.2a, Green Tech, septembre 2020

La Figure 24 présente les températures simulées et mesurées dans une salle de cours du bâtiment d'enseignement.

Figure 24 : Températures simulées vs. mesurées en été dans une salle de cours (bâtiment d'enseignement)



De manière cohérente avec la demande de froid, les températures mesurées ne sont pas bien reproduites par le modèle sur les périodes où on ne sait pas si la salle était occupée ou non, ni climatisée ou non. Lorsqu'il est clair que la salle était climatisée, les températures mesurées sont bien inférieures aux valeurs de consigne retenues dans le modèle.

En conclusion, **la concordance des températures mesurées et simulées est cohérente avec celle des demandes de froid**, à savoir que les températures intérieures mesurées sont inférieures à celles simulées lorsque la demande de froid mesurée est supérieure à celle simulée et inversement. D'autre part, si la demande de froid est mal reproduite (bâtiment d'enseignement), les températures mesurées et simulées diffèrent de manière anarchique. Cela est rassurant quant à la **justesse des modèles vis-à-vis du comportement thermique des bâtiments**.

Conclusions

La STD peut aider à appréhender la demande de froid d'un bâtiment, tant en volume annuel qu'en profil. Les simulations ont été réalisées sur deux des bâtiments mesurés dans le cadre de SWACool en utilisant des paramètres « standards », sans calage pour coller aux mesures. Les résultats ont montré que :

- Dans le cas du bâtiment de bureaux, présentant un schéma d'occupation régulier et bien connu, la différence entre la demande de froid annuelle mesurée et simulée est de 12%, ce qui est très correct. Dans le cas du bâtiment d'enseignement, dont l'occupation est aléatoire, l'erreur de simulation approche par contre les 30% : l'occupation du bâtiment a une influence significative sur la demande de froid, d'une part à cause des charges internes occasionnées mais aussi car la climatisation peut ne pas être en marche dans les pièces inoccupées (on l'espère), mais nous n'avons aucun moyen d'avoir un retour d'information sur ce point.
- Si la demande de froid totale annuelle est plutôt bien reproduite par la simulation, le profil de demande instantanée est moins fidèle à la réalité. Les effets inertiels sont notamment mal restitués, et la relance matinale de la climatisation n'apparaît pas (ce qui est normal car le modèle ne s'intéresse pas aux systèmes).
- La puissance maximale appelée renvoyée par la simulation ne correspond pas forcément à celle mesurée (notamment à cause des effets de relance), et ne doit pas être prise comme valeur dimensionnante pour un système de climatisation (car atteinte seulement quelques heures dans l'année). Dans le cadre du projet Tropiclim, EnerTech a plus spécifiquement étudié la question et recommandé de prendre en référence la 5^{ème} plus grande valeur issue de la simulation. Ils ont par ailleurs développé une méthodologie de dimensionnement d'un système de climatisation au plus proche de la demande réelle mais sans avoir recours à la STD⁵, qui a donné de bons résultats sur 3 bâtiments mesurés.

- La concordance entre les températures mesurées et simulées est cohérente avec celle des demandes de froid, ce qui démontre la capacité du modèle à reproduire le comportement thermique des bâtiments. Ainsi une demande de froid théorique plus basse que celle mesurée peut correspondre à une diffusion insuffisante de froid dans le bâtiment (terminaux) et non à une erreur de simulation, avec à la clé des problèmes de confort.

2. Equipements de production de froid à eau glacée

a. Dimensionnement

Le Tableau 6 regroupe les ratios spécifiques caractérisant le dimensionnement sur les 4 sites ainsi que les conséquences qui en découlent sur le fonctionnement observé des installations.

Tableau 6 : Ratios spécifiques de dimensionnement de la production EG et de la distribution et conséquences sur le fonctionnement de l'installation sur les 4 sites

		hôpital	bureaux	enseignement	datacenter		
ratios spécifiques							
Pfroide installée		Wf/m ² clim	149	80 (GEG) + 16 (CTA DD)	226	(598)	
débit distribution nominal	m ³ /h/kWfinst	0.44 (variable)	0.16	0.22 (variateur ajouté)	0.13		
	m ³ /h/m ² clim	0.065 (variable)	0.013	0.050 (variateur ajouté)	(0.079)		
conséquences							
production	Pfmax atteinte	Wf/m ² clim	72	36 (hors apport CTA)	163	(211)	
	Pfmax représentative (10h> à cette valeur)	Wf/m ² clim	71	35 (hors apport CTA)	83	(200)	
	surdimensionnement		2.1	2.3	2.7	3.0	
	nb heures équivalentes à Pinstallée		1851 h	704 h	303 h	2475 h	
	nb heures équivalentes à Pmax représentative		3890 h	1612 h	768 h	7402 h	
distribution					avant variateur	avec variateur	
	conso pompe distrib (mesuré)	We/m ³ /h	70-200	175	91	20-60	78
		We/kWfinst	4-8	28	20	2-10	10
		We/m ² clim	0.5-1.1	2.2	4.6	0.5-2	(6.2)
	Tdépart EG		6-8°C	7-8°C	10-11°C		8-10°C
	Tretour EG		8-14°C	8-9°C	10.5-11.5°C	12-15°C	10-12°C
ΔT		2-6 degrés	<2 degrés	<1 degré	1-2.5 degrés	2 degrés	

valeurs soulignées : présence d'une variation de débit

Le ratio de puissance froide installée est très variable d'un site à l'autre : ~100 à 226 Wf/m² climatisé, il monte à 600 Wf/m² pour le datacenter (*NB : Cela n'a pas tellement de sens de rapporter la puissance froide à la surface du datacenter*). La puissance froide maximale atteinte (10h en-dessous de cette valeur) est plutôt de l'ordre de 70-80 Wf/m² (elle atteint 200 Wf/m² pour le datacenter). Ainsi le surdimensionnement entre la puissance installée et la puissance réellement nécessaire est compris entre 2 et 3 pour les sites étudiés... Le nombre d'heures de fonctionnement « équivalent pleine puissance » est un indicateur qui permet d'apprécier le niveau de surdimensionnement :

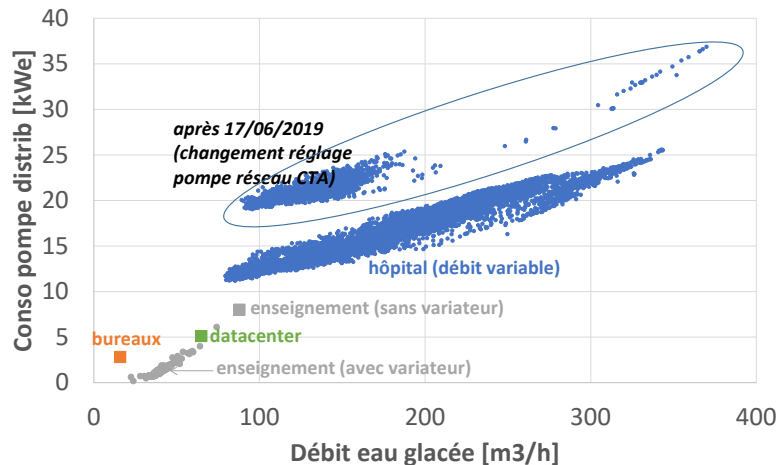
$$nb\ heures\ \acute{e}quiv\ Pleine\ Puissance = \frac{Energie\ totale\ sur\ l'ann\ee\ (kWhf)}{Puissance\ install\ee\ (kWf)}$$

Il est de 300h par an sur le bâtiment d'enseignement (climatisation coupée la nuit, le week-end, durant les vacances et en hiver), 700h par an sur le bâtiment de bureaux (climatisation coupée la nuit et le week-end), 1900h par an sur l'hôpital (climatisation 24h/24, 365 jrs/an) et monte à 2500h par an sur le datacenter (climatisation 24h/24, 365 jrs/an à puissance quasi-constante). Ces valeurs sont faibles, si les installations étaient bien dimensionnées elles seraient plutôt de l'ordre de 3000h par an pour un site climatisé en permanence et 7000h par an pour le datacenter.

Seul l'hôpital bénéficie d'une pompe de distribution à débit variable, les 3 autres sites sont équipés d'une pompe à débit fixe. Sur le bâtiment d'enseignement, le suivi a mis en évidence que la pompe de distribution était largement surdimensionnée avec une consommation démesurée. Un variateur de fréquence a été installé sur la pompe existante dans le cadre du projet, dans le but notamment d'identifier le potentiel d'économies d'électricité réel et les limites liées aux problèmes de mise en œuvre.

Le ratio de débit de distribution s'étale entre 0.13 et 0.44 m³/h/kWf installé, et entre 0.013 et 0.065 m³/h/m² climatisé soit une variation d'un facteur 3 à 4 entre les sites. La puissance absorbée par la pompe de distribution (mesurée) augmente logiquement avec le débit délivré comme le montre la Figure 25.

Figure 25 : Puissance absorbée par la pompe de distribution en fonction du débit de distribution pour les 4 sites



On obtient un seul point pour les sites équipés d’une pompe à débit fixe, et un nuage de points pour l’hôpital. Pour le bâtiment d’enseignement, nous avons indiqué la consommation avant l’installation du variateur d’une part, et celle après l’installation du variateur (sous la forme d’un nuage de points) d’autre part. Le ratio est de l’ordre de 50 à 100 We/m³/h, il monte à près de 200 We/m³/h pour le bâtiment de bureaux et l’hôpital (pour certains régimes de fonctionnement).

Enfin, sur les 3 sites équipés de pompes à débit fixe, les ΔT sur le réseau EG sont faibles (<2 degrés toute l’année voire <1 degré sur le bâtiment d’enseignement), ce qui est loin de la valeur de référence de 5K et traduit un surdimensionnement systématique de la pompe de distribution par rapport à la demande de froid réelle, qui est partiellement à mettre en lien au surdimensionnement du GEG lui-même. En redimensionnement les pompes de distribution dans le même rapport que les GEG (pour s’affranchir du surdimensionnement), on atteindrait mathématiquement un ΔT de 3 à 6 degrés sur les 3 sites. Sur le bâtiment d’enseignement, l’ajout du variateur de fréquence sur la pompe actuelle a fait augmenter les ΔT de <1K à des valeurs comprises entre 1 et 2.5K. Nous n’avons cependant pas pu diminuer plus le débit car la pompe fonctionnait à son minimum technique (20 Hz)⁸.

Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

Le Tableau 7 regroupe les informations disponibles pour les 3 sites à Marseille.

Tableau 7 : Ratios spécifiques de dimensionnement de la production EG et de la distribution et conséquences sur le fonctionnement de l’installation sur les 3 sites à Marseille

		bureaux 10000 m ²	bureaux 17000 m ²	hôtel 10000 m ²	
		Thassalia		Thassalia	
ratios spécifiques					
	Pfroide installée/souscrite	Wf/m ² clim	40	103	53
débit distribution nominal	m ³ /h/kWfinst	NC (variable)	0.17 (variable)	0.18 (variable)	
	m ³ /h/m ² clim	NC (variable)	0.017 (variable)	0.010 (variable)	
conséquences					
production	Pfmax atteinte	Wf/m ² clim	46	56	111
	Pfmax représentative (10h> à cette valeur)	Wf/m ² clim	31	46	65
	surdimensionnement		1.3	2.2	0.8
	nb heures équivalentes à Pinstallée		504 h	598 h	1687 h
	nb heures équivalentes à Pmax représentative		657 h	1325 h	1390 h
distrib	Tdépart EG		6-12°C	NC	8-14°C
	Tretour EG		11-19°C	NC	12-19°C
	ΔT		1-8 degrés	NC	2-10 degrés

⁸ 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

Deux des trois sites à Marseille sont raccordés au réseau Thassalia : la puissance froide disponible correspond donc à la puissance souscrite sur le réseau et non à la puissance installée. Sur ces deux sites, la puissance souscrite est de l'ordre de 40-50 Wf/m² climatisé tandis que sur le 3^{ème} site la puissance installée est de l'ordre de 100 Wf/m² climatisé. La puissance froide maximale atteinte (10h en-dessous de cette valeur) est comprise entre 30 et 60 Wf/m², soit une valeur plus faible qu'à La Réunion. Le ratio entre la puissance installée et la puissance réellement nécessaire est de 0.8 et 1.3 sur les bâtiments raccordés à Thassalia (la puissance souscrite a été calculée au plus juste afin d'optimiser le montant de l'abonnement) tandis que sur le 3^{ème} bâtiment, la puissance installée est surdimensionnée d'un facteur 2.2 comparable à ceux observés à La Réunion.

Comme déjà évoqué, les ΔT sur les réseaux EG sont plus élevés sur les deux sites raccordés à Thassalia (équipés de pompes à débit variable) que sur les sites à La Réunion.

b. Performances de production

Les performances de la production de froid ont été mesurées en continu sur 3 des 4 sites (sur l'hôpital les puissances électriques en jeu étaient trop élevées pour permettre une mesure en continu avec le matériel à disposition). L'EER des GEG a ainsi pu être déterminé de manière instantanée (moyenne horaire) sur une année complète. Il varie en fonction des paramètres de fonctionnement :

- Diminution de l'EER lorsque la différence entre la température d'évaporation et la température de condensation (ΔT_{prod}) 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.*

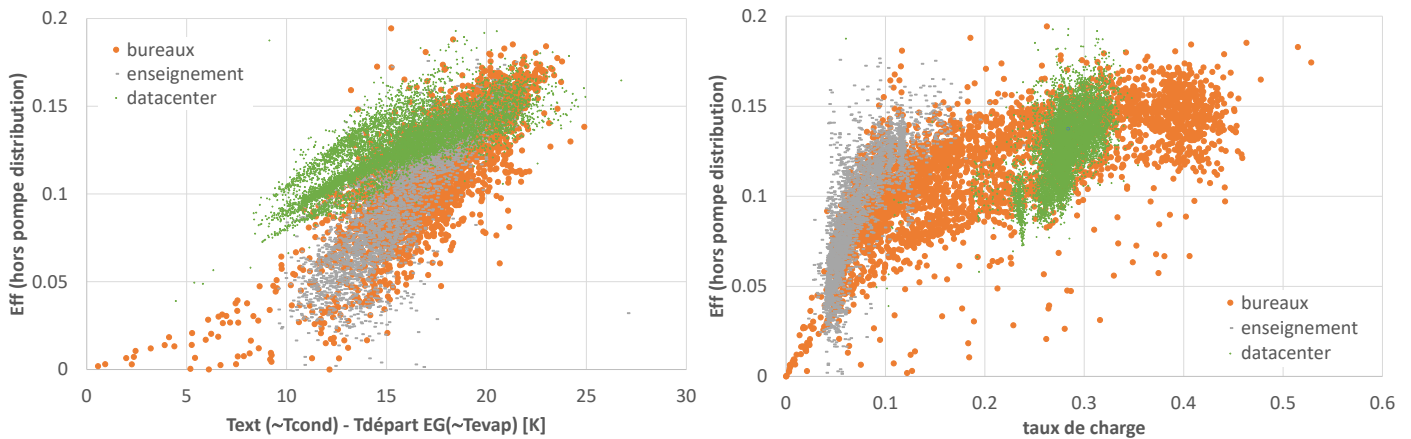
- Diminution de l'EER avec le taux de charge du GEG *d'une part car le fonctionnement n'est pas optimisé à faible charge (cyclages) mais surtout à cause des auxiliaires qui sont dimensionnés pour un fonctionnement à pleine charge et n'adaptent généralement pas leur fonctionnement aux faibles charges ; 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.*

Pour donner aux performances un caractère plus « universel », nous les avons représentées sur la Figure 26 sous la forme d'une « Efficacité » :

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

L'efficacité est définie comme le rapport entre l'EER mesuré et le maximum possible thermodynamiquement (EER Carnot), et mesure l'éloignement par rapport à une machine « parfaite ». Tout comme l'EER, elle est influencée à la fois par la différence de température au condenseur et à l'évaporateur $\Delta T_{\text{prod}} = T_{\text{cond}} - T_{\text{évap}}$ (à cause de la thermodynamique) et par le taux de charge $T_C = \frac{\text{Puissance froide fournie (kWf)}}{\text{Puissance froide max (kWf)}}$ (à cause des auxiliaires). L'influence individuelle de chacun des paramètres n'est pas évidente à distinguer car des faibles taux de charge sont également associés à une température extérieure – et donc un ΔT – plus faibles.

Figure 26 : Performances des GEG instrumentés sur les 3 sites (moyenne horaire), en fonction de la différence de température entre condenseur et évaporateur (gauche) et en fonction du taux de charge (droite)

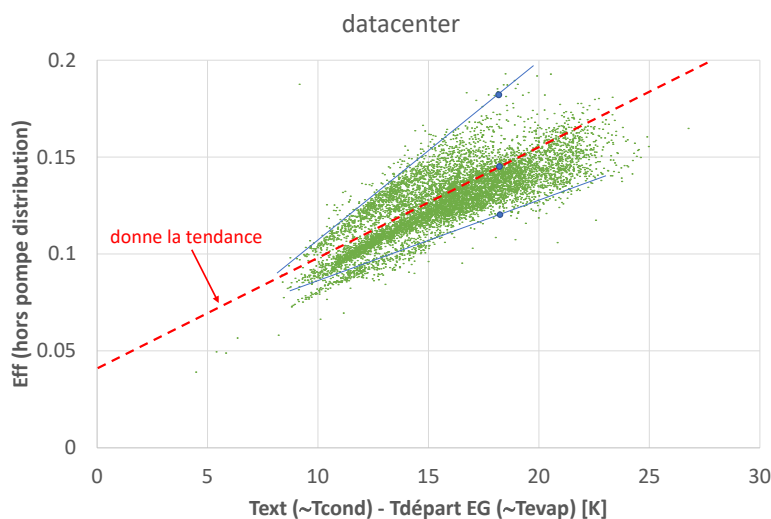


Dans les 3 cas, l’efficacité augmente avec la différence entre la température au condenseur (prise égale à la température extérieure) et la température à l’évaporateur (prise égale à la température de départ du réseau EG). L’efficacité augmente également avec le taux de charge du GEG, ce qui s’explique par le fait que les auxiliaires du GEG (pompes) sont dimensionnés pour un fonctionnement à pleine puissance, donc leur consommation (fixe quel que soit le taux de charge) péjore les performances à bas taux de charge.

La dispersion des valeurs est importante dans les deux représentations, mais celles-ci donnent tout de même une tendance sur laquelle on peut se baser pour estimer un EER instantané « universel » plus précisément que la valeur fixe qu’on lui donne habituellement. Nous proposons dans la suite une caractérisation qui tient compte à la fois du ΔT_{prod} et du taux de charge :

- La dépendance au ΔT_{prod} est définie par les valeurs mesurées sur le datacenter (points en vert sur le graphique de gauche) ; en effet sur cette installation, le taux de charge du GEG est très peu lié à la température extérieure – et donc au ΔT_{prod} , la demande de froid d’un datacenter étant majoritairement liée aux apports internes et pas aux échanges avec l’extérieur, comme on le voit sur le graphique de droite où le taux de charge est quasiment constant quel que soit le ΔT_{prod} .

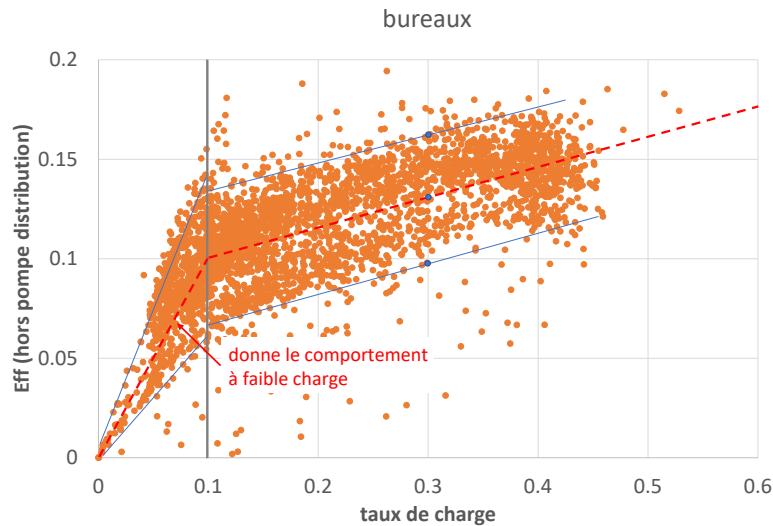
Figure 27 : Dépendance de l’efficacité au ΔT_{prod} (datacenter)



On peut déterminer la corrélation suivante : $Eff(\Delta T_{prod}) = 0.0053 \times \Delta T_{prod} + 0.04$ assortie d’une enveloppe des valeurs (en bleu).

- La dépendance au taux de charge est établie grâce aux valeurs mesurées sur le bâtiment de bureaux, le bâtiment d'enseignement n'étant pas considéré au vu de son surdimensionnement évident (le taux de charge dépasse rarement 15% sur l'année). On distingue deux « zones » au comportement différent, une pour les très faibles taux de charge (<0.1), l'autre pour les taux de charge supérieurs à 10%.

Figure 28 : Dépendance de l'efficacité au taux de charge (bâtiment du bureaux)



$$\text{si } T_C \leq 0.1, \text{Eff}(T_C) = T_C$$

$$\text{si } T_C > 0.1, \text{Eff}(T_C) = 0.15 \times T_C + 0.085$$

- La valeur retenue pour l'efficacité est ensuite le minimum des valeurs obtenues par les deux méthodes.

Cette caractérisation permet de remonter à une valeur instantanée de l'efficacité et donc de l'EER en connaissant les conditions de température et le taux de charge (au lieu de considérer une valeur forfaitaire fixée a priori). Cette approche par exemple peut se révéler utile pour réaliser des simulations de systèmes à un pas de temps horaire. NB : La consommation de la pompe de distribution n'est pas considérée dans la caractérisation : il faut la rajouter à la consommation liée à la production EG pour obtenir la consommation électrique totale.

Ainsi, en connaissant le taux de charge (demande de froid), la température de condensation (~température extérieure) et la température d'évaporation (~température de départ EG), on peut remonter à une performance instantanée du GEG à tout instant.

Cependant :

- Les 3 GEG mesurés étant anciens (datent du début des années 2000), nous proposons de considérer une majoration de 20% sur l'EER calculé lorsqu'on applique la caractérisation à un GEG récent.
- Pour tenir compte 1. de la dispersion des points 2. du fait que les températures de condensation et d'évaporation ne correspondent pas à la température extérieure respectivement température de départ EG, nous recommandons de toujours étudier plusieurs scénarios, par exemple un scénario sans majoration sur l'EER (performance basse) et un scénario avec une majoration de 40% sur l'EER (performance haute), et ce afin d'évaluer la sensibilité des résultats obtenus aux valeurs d'EER du GEG.
- Précisons que le modèle s'appuie sur des données obtenues avec des taux de charge exclusivement <50%, nous ne connaissons pas son comportement au-delà de cette valeur.

Influence de la dispersion des points

Afin d'évaluer l'impact de la dispersion des points sur l'EER résultant, nous avons fait l'exercice sur un point spécifique (cf. point bleu sur la Figure 27 et la Figure 28) de calculer l'écart des valeurs extrêmes de l'enveloppe avec la valeur moyenne. Ainsi, nous avons considéré un point de fonctionnement avec une température extérieure de 27°C, une température de départ EG de 9°C ($\Delta T=18K$) et un taux de charge de 0.3.

Le calcul des extrema renvoie un écart de $\pm 23\%$ avec la valeur moyenne, ce qui confirme la pertinence de retenir des scénarios avec une majoration nulle, de 20% et de 40%.

3. Bilan énergétique sur les sites étudiés

a. Consommations spécifiques

Pour permettre la comparaison des sites entre eux, nous avons regroupé les consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation EG sur les 4 sites dans le Tableau 8. *NB : Nous n'avons pas fait apparaître la consommation des équipements à détente directe présents sur deux sites qui participent également à la climatisation.*

Tableau 8 : Consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation EG (hors complément DD) sur les 4 sites

		hôpital	bureaux	enseignement		datacenter
			<i>hors CTA DD</i>	<i>avant variateur</i>	<i>avec variateur</i>	<i>hors DD</i>
Profil climatisation		24h/24, 365 jrs/an	coupure nuit et we	coupure nuit, we, hiver		24h/24, 365 jrs/an
Demande annuelle de froid EG	kWhf/m ² /an	276	61	83		(1479)
Conso annuelle électricité (production+distribution EG)	kWhe/m ² /an	159	35	62	~52	(688)
production EG	kWhe/m ² /an	153	29	49		(633)
distribution EG	kWhe/m ² /an	7	6	13	~3	(55)
Conso annuelle terminaux	kWhe/m ² /an	50-75	12	~12		(180)
SEER production seule		1.8	2.1	1.7		2.3
EER production horaire		0.5-2.2	1-2.5	0.7-2.5		1.7-3.3
taux de charge		<50%	<45%	<35%		~30% en permanence
SEER distribution incluse		1.7	1.7	1.4	1.6	2.2
SEER global (avec terminaux)		1.2-1.3	1.3	~1.1	~1.3	1.7
Conso spécifique distribution	kWhe/MWhf	25	104	151	36	37

en italique : valeurs estimées

NB : A titre indicatif nous avons rapporté les consommations du datacenter à sa surface mais cela n'a pas beaucoup de sens en soi. On notera simplement que les ordres de grandeur varient d'un facteur 5 avec ceux de l'hôpital.

On constate que :

- La coupure de la climatisation la nuit et le week-end a un gros impact sur la demande annuelle de froid (~80 kWhf/m²/an contre près de 300 kWhf/m²/an pour l'hôpital).
- La consommation d'électricité nécessaire à la production EG varie entre 50 et 150 kWhe/m²/an, celle de la pompe de distribution EG entre 6 et 13 kWhe/m²/an.
- La consommation des terminaux a pu être mesurée sur 2 sites et a été évaluée sur la base d'un échantillon mesuré sur les 2 autres. Elle varie entre 12 et plus de 50 kWhe/m²/an pour le froid de confort, et 180 kWhe/m²/an pour les armoires froides qui équipent le datacenter.
- Les performances instantanées de la production EG (EER) varient entre 0.5 et 3.3 selon les conditions de fonctionnement et les sites. **Le SEER annuel de la production EG seule est compris entre 1.7 et 2.3 selon les sites, ce qui est beaucoup plus faible que la valeur de 3 retenue conventionnellement...** Le site avec le plus bas SEER est le bâtiment d'enseignement, en lien avec le fort surdimensionnement du GEG (facteur 2.7) qui engendre des taux de charge majoritairement <30%. Le site avec les « meilleures » performances est le datacenter car il fonctionne à charge quasiment fixe toute l'année (~30%).
- La prise en compte de l'électricité dédiée à la distribution fait perdre 0.1 au SEER sur l'hôpital et le datacenter et 0.3-0.4 sur les 2 autres sites.
- En comptabilisant également les terminaux, le SEER tombe à des valeurs comprises entre 1.1 et 1.3 pour les sites avec un froid de confort et 1.7 pour le datacenter.
- Enfin, la consommation spécifique de la distribution est supérieure à 100 kWhe/MWhf distribué pour le bâtiment de bureaux et le bâtiment d'enseignement, alors qu'elle est de 25 kWhe/MWhf pour l'hôpital grâce à la variation de débit.

Comparaison avec les résultats obtenus à Marseille

Le Tableau 9 regroupe les informations disponibles pour les 3 sites à Marseille.

Tableau 9 : Consommations spécifiques de froid EG et d'électricité dédiée à la climatisation EG (hors Thassalia) sur les 3 sites à Marseille

		bureaux 10000 m ²	bureaux 17000 m ²	hôtel 10000 m ²
Profil climatisation		24h/24, coupure hivernale	24h/24, 365 jrs/an	24h/24, 365 jrs/an
Demande annuelle de froid EG	kWhf/m ² /an	20	72	89
Conso annuelle électricité (production+distribution EG)	kWhe/m ² /an		39	
production EG	kWhe/m ² /an	<i>Thassalia</i>	33	<i>Thassalia</i>
distribution EG	kWhe/m ² /an	0.6	5.7	2.9
Conso annuelle terminaux	kWhe/m ² /an	5.5	NC	2.7
SEER production seule			2.2	
SEER distribution incluse			1.9	
Conso spécifique distribution	kWhe/MWhf	30	80	33

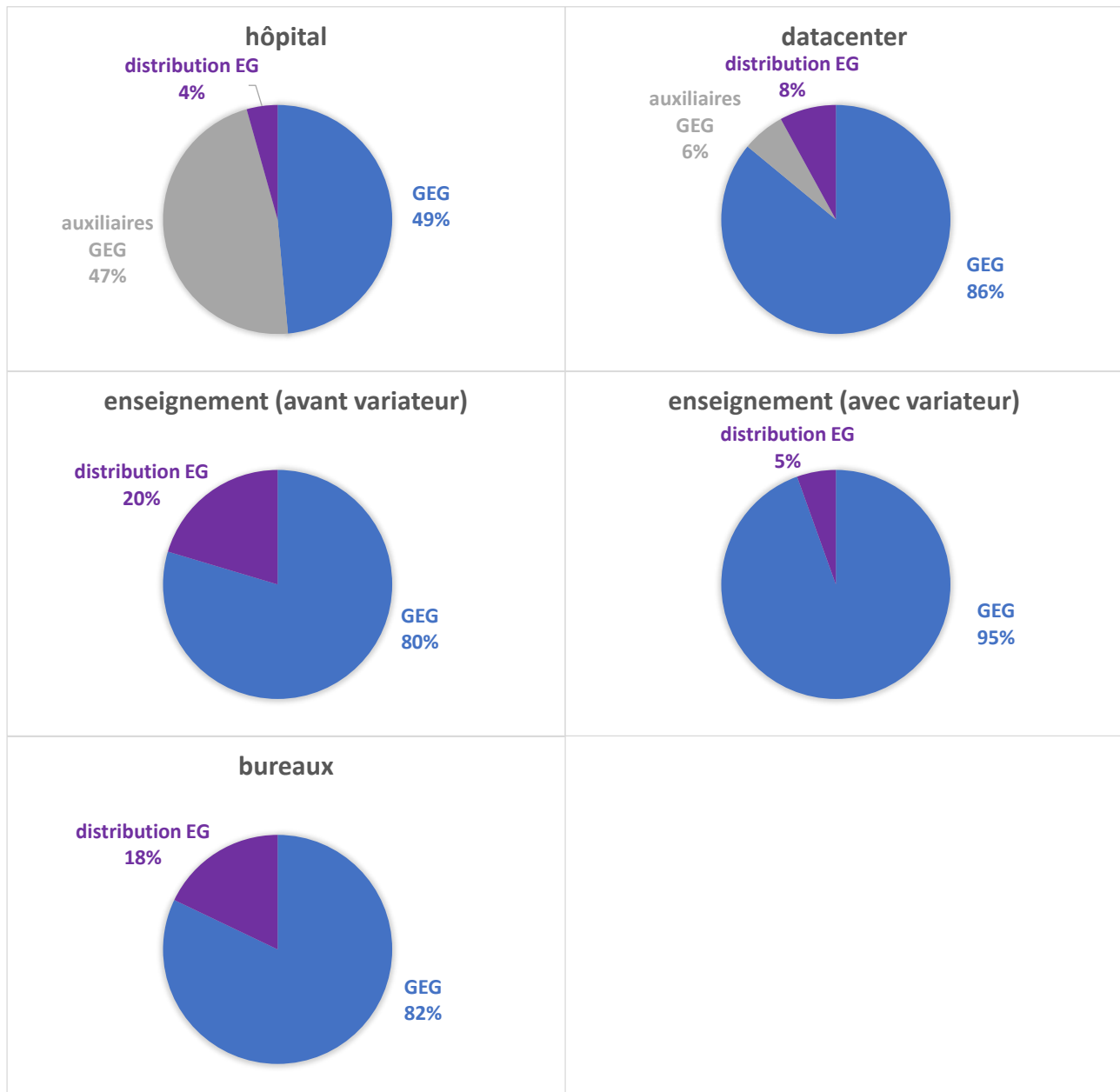
On note que :

- La demande de froid des 2 sites dont la climatisation n'est pas gérée (pas de coupure hivernale ni en inoccupation) est du même ordre de grandeur que celle des sites avec une coupure la nuit et le week-end à La Réunion, malgré la différence évidente de climat (cf. §II.1.a).
- Sur l'installation non raccordée au réseau Thassalia et équipée de GEG, le SEER est comparable à ceux obtenus à La Réunion : 2.2 pour la production seule et 1.9 si on prend en compte l'électricité de la pompe de distribution.
- Les 3 sites sont équipés de pompes de distribution à débit variable, mais on note une consommation spécifique très élevée (~80 kWhe/MWhf) sur un des bâtiments par rapport aux deux autres (~30 kWhe/MWhf), probablement en lien avec une mauvaise régulation de la variation de débit (d'autant que la valeur enregistrée est proche de celles rencontrées sur les sites sans variation de débit à La Réunion).

b. Répartition de la consommation électrique liée à la climatisation

La Figure 29 présente la répartition de la consommation d'électricité liée à la climatisation EG (hors terminaux) sur les 4 sites (avant et après installation du variateur de fréquence sur la pompe de distribution pour le bâtiment d'enseignement).

Figure 29 : Répartition de la consommation électrique dédiée à la climatisation EG (hors terminaux) sur les 4 sites



Production

Le GEG et ses auxiliaires comptent pour la majorité de la consommation (80 à 96%) sur tous les sites.

L'installation de l'hôpital est munie d'un circuit primaire EG permettant le refroidissement des 3 GEG via des drycooler installés en toiture et d'un circuit secondaire desservant les deux circuits de distribution du bâtiment. Ils sont assemblés par le biais d'une bouteille de découplage hydraulique⁹. Cette architecture hydraulique lourde est imposée par la taille conséquente des installations (>3 MWf). Elle implique la présence d'une multitude d'auxiliaires de production :

- côté condenseur, 3 pompes circuit drycooler (3x30 kWe)
- 6 drycooler (6x20 kWe)
- côté évaporateur, 3 pompes EG (3x15 kWe)

⁹ Projet SWACool Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion : Bâtiment PFME CHU Sud – St Pierre, Résultats de mesure, Livrable 1.1, Green Tech, septembre 2020

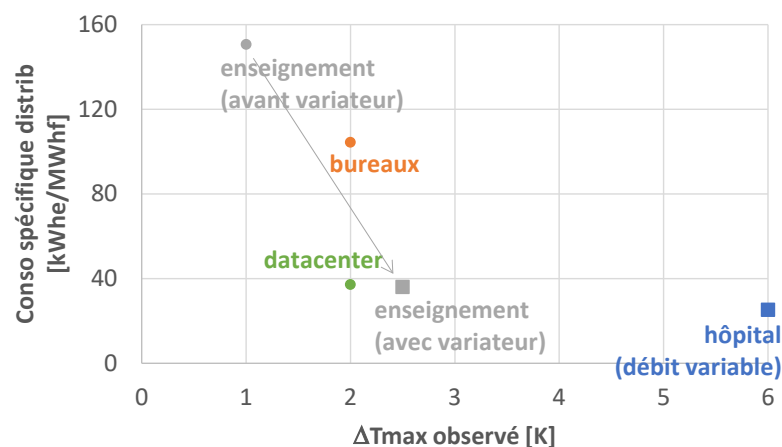
Au final, la consommation électrique des auxiliaires de production est équivalente à celle des GEG pour la production EG elle-même... Ces auxiliaires ont un impact déterminant sur les performances, avec un SEER annuel faible de 1.8 alors qu'on imaginerait que les performances soient meilleures sur une installation de grande taille que sur une installation de plus petite taille... Mais en définitive la taille impose ici **une conception alambiquée avec des auxiliaires multiples qui péjorent les performances.**

Distribution

La distribution EG représente quelques % de la consommation électrique dédiée à la production EG sur l'hôpital grâce à la pompe à débit variable. Elle représente 18% sur le bâtiment de bureaux car la pompe de distribution a été dimensionnée pour un fonctionnement à pleine puissance or on ne dépasse pas 45% de taux de charge. Elle représentait également 20% de la consommation sur le bâtiment d'enseignement car elle était largement surdimensionnée par rapport à la demande réelle ($\Delta T < 1$ degré). Le variateur de fréquence installé dans le cadre du projet a permis de diminuer sa consommation par 4.5, avec une part estimée à environ 5% de la consommation depuis. **Notons qu'on sous-estime souvent la consommation de la pompe de distribution car sa puissance est petite devant celle du GEG mais comme cette dernière fonctionne en permanence et à puissance nominale (dans le cas d'une pompe à débit fixe), sa consommation peut finir par être significative.**

La Figure 30 met en relation la consommation spécifique mesurée sur la distribution (kWh/MWhf) et le ΔT_{max} mesuré sur l'année pour les 4 sites.

Figure 30 : Consommation spécifique de la distribution (kWh/MWhf) en fonction du ΔT_{max} observé sur l'année pour les 4 sites

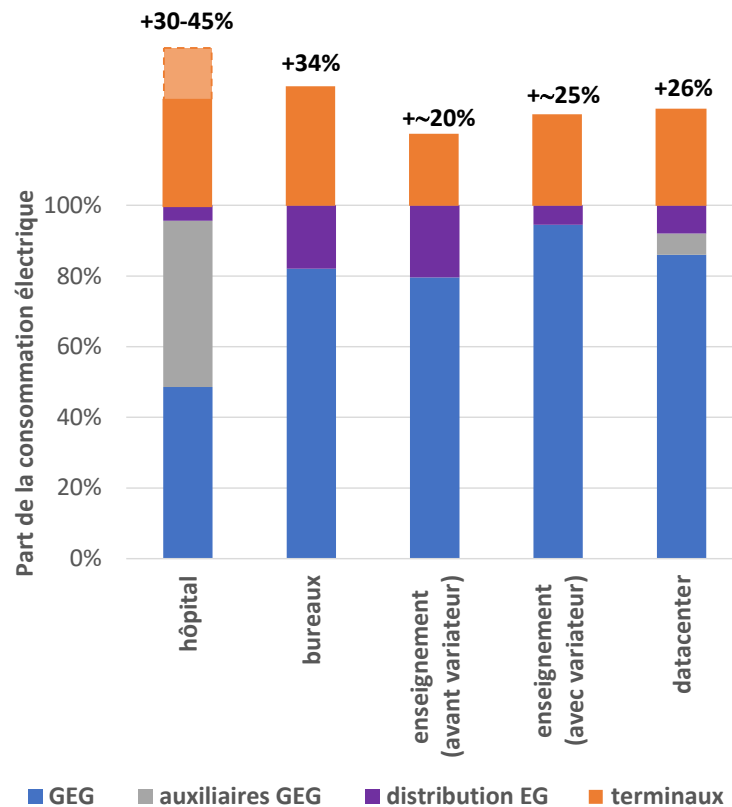


Comme on pouvait s'y attendre, la consommation spécifique décroît avec le ΔT_{max} observé (car celui-ci est en lien avec le dimensionnement de la pompe de distribution EG). Seule une variation de débit (hôpital et bâtiment d'enseignement après ajout du variateur) permet d'atteindre des ratios de consommation corrects. **NB : Le datacenter est avantage par son profil de demande de froid quasiment constant.**

Terminaux

La Figure 31 montre la consommation additionnelle (en % de la consommation de la production+distribution EG) à considérer pour le fonctionnement des terminaux (mesurée pour le bâtiment de bureaux et le datacenter, estimée pour l'hôpital et le bâtiment d'enseignement).

Figure 31 : Part de consommation électrique additionnelle (mesurée ou estimée) liée au fonctionnement des terminaux sur les 4 sites



On constate qu'il faut encore rajouter entre 20 et 45% de la consommation de la production EG pour approcher la consommation totale de la climatisation EG. Il est intéressant de noter qu'on néglige souvent la consommation des terminaux car leur puissance est petite devant celle de la production EG alors qu'en réalité elle est significative à cause de leur multiplicité et de leur fonctionnement continu (voire même parfois en périodes de coupure du GEG...).

III. Pratiques de travail

1. Analyse des pratiques actuelles

Le suivi de 4 sites sur un temps long en interaction avec les acteurs sur place a permis, en plus de dégager les enjeux énergétiques, d'appréhender les pratiques actuelles dans la conception et l'exploitation d'installations de climatisation à eau glacée. Nous essayons de les retranscrire ici.

a. La maladie du surdimensionnement

C'est en fait le dimensionnement confortable des terminaux au départ qui guide le surdimensionnement de l'installation dans son ensemble. En l'absence de simulation thermique, la taille et le nombre de terminaux est fixé selon les pratiques de travail du prestataire et les gammes d'équipements disponibles.

Puis généralement le dimensionnement du GEG correspond à la somme des puissances froides des différents terminaux, ce qui semble mener à un surdimensionnement systématique de la production EG, mesuré entre 2 et 3 sur les 4 sites étudiés. La prise en compte d'un coefficient de foisonnement n'est pas systématique, et d'ailleurs la détermination de ce coefficient n'est pas éclairée par un retour d'expérience sur l'intermittence réelle des terminaux, qui régulent probablement plus que ce qu'on imagine du fait qu'ils sont surdimensionnés.

Il en va de même pour la pompe de distribution, généralement dimensionnée sur la base de la somme des débits demandés par l'ensemble des terminaux sans foisonnement. Cela mène à un surdimensionnement systématique de la pompe de distribution comme en témoignent les faibles ΔT observés sur les sites mesurés (<2 degrés en l'absence de variation de débit).

Ceinture et bretelles par peur des plaintes

La générosité de dimensionnement est dans les faits motivée par la peur des éventuelles plaintes de la part des occupants. La méconnaissance de la demande de froid réelle amène à considérer des coefficients de sécurité élevés avec peu ou pas de prise en compte du foisonnement. Il n'est pas tenu compte non plus des retours d'expérience sur la demande réelle de froid qui commencent pourtant à être nombreux. En témoigne **la puissance installée sur les sites étudiés, qui est supérieure à 150 Wf/m² climatisé là où la puissance appelée maximale mesurée sur l'année est de l'ordre de 70-80 Wf/m² climatisé.**

Mais le surdimensionnement n'est pas la préoccupation principale des maitres d'ouvrage ni des prestataires, qui préfèrent s'assurer une confortable marge de puissance pour pallier à un éventuel manque de confort par la suite. Or étant données les pratiques de dimensionnement **c'est rarement la manque de puissance qui est à l'origine de l'inconfort dans les bâtiments, mais probablement plutôt un mauvais équilibrage hydraulique** qui ne permet pas aux terminaux d'être alimentés correctement...

Conséquences

Le surdimensionnement durant la phase de conception a pourtant des conséquences qui ne peuvent pas être corrigées durant la phase d'exploitation des installations. Au niveau de la production :

- Le fonctionnement à bas taux de charge (souvent <10% l'hiver) engendre un cyclage continu préjudiciable aux équipements. Ce problème peut toute fois être limité en morcelant la production en plusieurs GEG et/ou en multipliant les étages.
- Les performances sont impactées par la taille des auxiliaires qui sont dimensionnés pour un fonctionnement à pleine charge et n'adaptent généralement pas leur fonctionnement aux basses charges. C'est notamment le cas de la pompe de distribution lorsqu'elle est incluse au GEG.
- Le surdimensionnement entraîne évidemment un surcoût inutile.

Au niveau de la distribution, outre le fait que les ΔT atteints sont faibles ce qui impacte les performances (les performances sont favorisées par des retours chauds), la consommation électrique liée au surdébit peut vite devenir démesurée (20% de la consommation totale sur le bâtiment d'enseignement). Le recours à une pompe à débit variable est le seul moyen de limiter les effets du surdimensionnement mais il n'est

malheureusement toujours pas systématique même sur les nouvelles installations (cf. §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Au niveau des terminaux, le surdimensionnement de départ part d'une bonne intention mais comme expliqué il impacte le dimensionnement de l'ensemble du système. Il engendre un surcoût lié au surdimensionnement de la pompe de distribution et des canalisations, mais également une surconsommation électrique liée à leur taille plus importante que nécessaire, qui est petite à l'échelle d'un seul émetteur mais devient significative à l'échelle d'un site.

b. Un déséquilibre chronique

Dans les pratiques de travail actuelles, les différents éléments du système sont souvent considérés séparément. Ainsi le débit sur le circuit primaire est fixé par les exigences du constructeur et le débit sur le circuit secondaire est déterminé par la somme des débits demandés par les terminaux, sans nécessairement s'assurer que ces deux débits soient équivalents. Le débit secondaire est d'ailleurs souvent plus élevé que le débit primaire comme nous l'avons observé sur le datacenter¹⁰, pour lequel il existe un rapport 1.6 entre le débit secondaire et le débit primaire. **Un tel déséquilibre des débits primaire et secondaire induit un mélange dans la bouteille de découplage hydraulique** qui mène à une température de départ sur le réseau de distribution (mesurée entre 9 et 10°C) plus élevée que la température de sortie du GEG (probablement autour de 7°C).

On n'a pas nécessairement conscience de l'importance d'une bonne conception hydraulique alors que les choix de départ impactent le fonctionnement et ne sont pas rattrapables...

c. Recherche de confort rime souvent avec puissance

Le réflexe actuel des maitres d'ouvrage et des prestataires en cas de problème de confort sur un site consiste à augmenter la puissance installée. Or le suivi a montré que les installations étaient déjà systématiquement surdimensionnées au minimum d'un facteur 2, ce qui suggère que les raisons de l'inconfort sont à rechercher ailleurs. Notamment dans une diffusion insuffisante du froid dans certaines zones du bâtiment, liée à :

- un mauvais équilibrage hydraulique avec des zones moins bien desservies en EG
- des portions de canalisations sous dimensionnées (suite à des erreurs de conception ou à des changements d'affectation de certains locaux par exemple)
- un problème sur les terminaux

NB : N'oublions pas qu'une enveloppe imparfaite sur le bâtiment (absence d'isolation de la toiture et de protections solaires) peut également être source d'inconfort.

La marge de puissance disponible sur les productions EG prouve que les problèmes d'inconfort pourraient en grande majorité être résolus par une amélioration de la diffusion de froid dans le bâtiment et en particulier par un rééquilibrage hydraulique sans nécessité d'augmenter la puissance installée.

d. Le poids de l'humain

Un retour d'expérience tel que celui mené dans le cadre de ce projet nécessite d'avoir une interaction continue avec les maitres d'ouvrage mais également d'intégrer les prestataires dans la démarche. Nous avons rencontré plus ou moins de difficultés à interagir avec les équipes sur place selon les sites. Autant sur certains sites la communication s'est révélée fluide, autant sur d'autres nous n'avons même pas réussi à avoir de contact avec le prestataire... Le fait que le maitre d'ouvrage se soit ou non emparé du sujet a été décisif dans la qualité des relations qui ont pu être nouées (avec le maitre d'ouvrage comme avec le prestataire). Cela traduit le niveau d'appropriation des questions énergétiques par les maitres d'ouvrage sur les différents sites.

e. La résistance au changement

Le suivi que nous avons réalisé sur 4 sites sur plusieurs années a révélé des **difficultés à faire évoluer les pratiques en matière de dimensionnement des équipements, aussi bien du côté des maitres d'ouvrage que**

¹⁰ Projet SWACool Tâche 1 : Etudes de cas à La Réunion : Datacenter SFR – Le Port, Résultats de mesure, Livrable 1.4, Green Tech, septembre 2020

des professionnels de la climatisation. Du côté des maitres d'ouvrage car la peur des plaintes prend souvent le pas sur la maîtrise de l'énergie et des coûts (et on le comprend bien). Du côté des professionnels car ils répondent avant tout à une demande du maitre d'ouvrage et préfèrent résoudre le problème en augmentant le débit distribué qu'en cherchant à rééquilibrer le réseau EG existant.

Ci-dessous deux exemples vécus lors du suivi qui illustrent la problématique :

1. Sur le bâtiment de bureaux, le GEG est vétuste et un projet de rénovation a été lancé fin 2019 suite à des avaries et à un conflit social avec les salariés pour des problématiques de confort, alors que le suivi a fait état d'un facteur de surdimensionnement >2 ... La source de l'inconfort est donc à chercher ailleurs, probablement dans l'équilibrage hydraulique du réseau EG. Notons également que le bâtiment ne dispose pas d'isolation en toiture ni de protections solaires, ce qui peut contribuer à la sensation d'inconfort.

Un bureau d'études fluides a été missionné pour rédiger le Dossier de Consultation des Entreprises pour cette opération. Ils ont eu connaissance des résultats du suivi mais ils ont malgré tout préconisé d'augmenter la puissance installée de 70% par rapport à la puissance actuelle, ce qui portera mathématiquement le surdimensionnement à un facteur 4. Ils n'ont par ailleurs mentionné ni équilibrage hydraulique (avec pose de vannes d'équilibrage si nécessaire), ni recours à une pompe de distribution à débit variable, ni pose de compteurs, car le maitre d'ouvrage ne l'a pas demandé (mais ils ne l'ont pas spontanément proposé non plus).

Une augmentation de la taille du GEG va effectivement améliorer la situation mais à cause du fait que la taille de la pompe de distribution va augmenter dans les mêmes proportions : en envoyant un débit plus élevé sur l'ensemble du réseau EG, on alimentera mieux les terminaux les plus défavorisés malgré le déséquilibre persistant mais on n'augmentera pas significativement la puissance appelée ce qui va conduire à des taux de charges encore plus faibles qu'actuellement.

Il est intéressant de noter que le maitre d'ouvrage soit favorable à une augmentation de la puissance installée alors qu'on leur a présenté les résultats du suivi. Ils sont d'ailleurs réellement persuadés que la source de l'inconfort est un manque de puissance de production. Mais il faut comprendre qu'ils ne sont pas spécialistes et qu'il leur est difficile de penser qu'un rééquilibrage hydraulique pourrait arranger la situation. Il est d'autre part plus facile d'agir sur la taille du GEG que sur l'enveloppe (en isolant la toiture et ajoutant des protections solaires).

2. Sur le datacenter, il y a également un projet de rénovation de l'installation en cours. De la même manière, le prestataire a entre autres proposé d'augmenter la puissance des GEG d'un facteur 1.6 lors du renouvellement, alors que les GEG actuels sont déjà surdimensionnés d'un facteur >2 , ce qui amènera à un surdimensionnement de 4... Le prestataire a pourtant assisté aux réunions de présentation des résultats du suivi énergétique aux côtés du maitre d'ouvrage. Et de la même manière, le maitre d'ouvrage n'est pas spécialiste et suit les propositions du prestataire qui est plus averti...

Il y a d'autre part une nécessité de continuité de service sur ce site pour préserver les équipements informatiques en cas de panne sur le système EG. Cette redondance est assurée par un secours totalement indépendant fonctionnant en détente directe et chargé de reprendre l'intégralité de la demande de froid en cas de panne sur le système EG. Mais le 2^{ème} GEG a également vocation à prendre la relève en cas de panne sur le 1^{er} GEG : cette double redondance est à notre sens inutile et coûteuse, le risque que les deux systèmes EG et DD tombent en panne simultanément étant infime.

Ainsi on pourrait penser que le problème de surdimensionnement chronique va se résoudre spontanément au moment du renouvellement des installations mais au final c'est le contraire qui se produit ! Il semble que les professionnels aient tendance à augmenter la puissance installée plutôt qu'à la réduire dès lors qu'il y a une inquiétude sur la capacité de l'installation à couvrir la demande de froid, et ce même si le suivi leur a montré qu'elle était déjà surdimensionnée.

2. Quelques enjeux de la climatisation à eau glacée

Le projet a permis de dégager quelques enjeux de la climatisation à eau glacée à l'heure actuelle, au-delà des aspects purement technologiques.

a. Prévenir le surdimensionnement

Le surdimensionnement chronique est une conclusion importante de ce travail, avec les conséquences évoquées sur le fonctionnement et les performances des installations. Ci-dessous quelques pistes pour le prévenir ou du moins en limiter les effets.

Tenir compte des résultats empiriques

Un indicateur pertinent pour évaluer la qualité du dimensionnement, qui n'est pas parfait mais qui a l'avantage d'être simple, est la puissance froide installée par m² climatisé. Les différents retours d'expérience menés sur des sites réels ont montré que la puissance appelée maximale sur l'année était de l'ordre de 80 Wf/m² climatisé, pour une puissance installée >150 Wf/m² climatisé sur les sites étudiés. **Une confrontation systématique avec une valeur plafond (qui pourrait être fixée à 100 Wf/m² pour tranquilliser les esprits) lors de la phase de conception permettrait de s'assurer de la pertinence du dimensionnement retenu.**

Favoriser la modularité de la production EG

Sur les grosses installations, fractionner la puissance installée en plusieurs GEG (ainsi que les auxiliaires dédiés) permet de solliciter un seul GEG plus petit (et ses auxiliaires) plutôt qu'un GEG plus gros (et ses auxiliaires plus gros) à bas taux de charge lorsque la demande de froid est faible.

Sur les petites installations, multiplier les étages de puissance en s'assurant auprès du constructeur de la modulation des auxiliaires dans le même rapport peut permettre de limiter les effets d'un éventuel surdimensionnement.

Généraliser les pompes de distribution à débit variable

La variation de débit sur la distribution permet d'adapter le débit distribué à la demande de froid réelle et ainsi de limiter significativement la consommation électrique liée à la distribution EG. **Pourtant le recours à une pompe de distribution à débit variable n'est toujours pas systématique à l'heure actuelle même pour les nouvelles installations.**

Précisons que dans les faits, la modulation de débit est limitée par plusieurs facteurs :

- le débit minimum imposé par le constructeur du GEG (pour éviter de geler l'évaporateur)
- le minimum technique de la pompe
- l'équilibrage hydraulique imparfait du réseau EG, qui ne permet pas d'irriguer correctement l'intégralité des terminaux lorsque le débit devient trop faible

Cependant l'expérience menée sur le site d'enseignement dans le cadre du projet⁸ a montré que le gain essentiel de la variation de vitesse était plus lié au fait d'atténuer l'impact du surdimensionnement systématique de la pompe de distribution (mis en évidence sur les 4 sites) qu'à la variation de débit elle-même. En d'autres termes, le gain grâce à la variation de débit en fonction de la demande est minime devant le gain lié à la réduction de débit par rapport au débit nominal. **Ainsi seule une pompe à débit variable peut permettre de contrer les effets du surdimensionnement initial d'où la nécessité de les généraliser.**

Une réflexion à mener sur la manière de diffuser les bonnes pratiques

De nombreux travaux passés ont porté sur le dimensionnement des installations de climatisation à eau glacée, citons par exemple :

- Dans le cadre du projet Tropclim, Enertech a développé un outil simplifié permettant d'optimiser le dimensionnement sans avoir recours à de la simulation thermique⁵, qui a donné de bons résultats sur 3 sites instrumentés.
- Dans le cadre de ce projet, la demande de froid réelle a été mesurée sur 4 sites, ce qui a permis d'évaluer précisément le niveau de surdimensionnement.

Pourtant, les enseignements de ces projets ne sont pas pris en compte dans les nouveaux projets. Aujourd'hui la responsabilité de la conception et donc du dimensionnement des installations de climatisation à eau glacée incombe au bureau d'études s'il y en a un, ou directement au prestataire si non. En tant que sachants, ils ont un devoir de conseil envers le maître d'ouvrage mais dans les faits l'expérience montre que les bonnes pratiques ne sont pas toujours respectées.

On peut invoquer un problème de diffusion des connaissances disponibles mais il n'est pas le seul en cause. Dans les deux projets de rénovation cités plus haut sur le bâtiment de bureaux et le datacenter, les professionnels avaient connaissance des résultats de mesure mais n'en ont pourtant pas tenu compte dans leur dimensionnement ; peut-être à cause d'une certaine méfiance envers les résultats de mesure ? ou parce qu'ils ne savent pas comment les interpréter ?

Il est clair que tout ce qui induit un changement de comportement est difficile à mettre en œuvre... et pourtant nécessaire. Différents guides et autres outils existent pour accompagner le dimensionnement mais ils ne sont pas largement utilisés par la profession qui ne semble pas se les être naturellement appropriés. Il faut donc imaginer une autre forme de diffusion qui permettrait d'unifier les pratiques vers plus de pertinence. Faut-il envisager des formations ? des incitations financières adossées à une exigence de qualité ? des obligations ? **A notre sens une réflexion serait à mener sur la manière de généraliser les bonnes pratiques.**

b. Trouver le juste équilibre des débits

D'autres éléments fixés en phase de conception ont également une influence sur le bon fonctionnement des installations. Par exemple l'équilibre entre les débits primaire et secondaire doit être vérifié dès la conception car il ne pourra pas être corrigé par la suite. Pour l'atteindre il faut impérativement considérer l'installation dans son ensemble et non morceau par morceau.

D'autre part l'importance de la qualité de l'équilibrage hydraulique est trop souvent négligée alors qu'elle est indispensable pour permettre d'optimiser les débits de distribution. L'équilibrage hydraulique est d'ailleurs rarement réalisé au départ alors même que les organes nécessaires sont souvent présents. C'est particulièrement le cas dans les bâtiments existants, sur lesquels les problèmes de confort pourraient la plupart du temps être résolus par un meilleur équilibrage hydraulique sans aucuns travaux. Ainsi de la même manière faudrait-il mettre l'accent sur une montée en compétence des professionnels sur ce sujet ?

c. De la bonne maîtrise des installations

L'optimisation passe par une meilleure maîtrise des installations, notamment sur 3 points :

- Documenter précisément : la documentation disponible sur site doit être complète et à jour pour permettre la continuité de l'information notamment en cas de changement de prestataire, car c'est souvent lui qui a la meilleure connaissance de l'installation (analyse fonctionnelle, historique des interventions au fil du temps, schéma de principe à jour), ce qui est loin d'être le cas sur tous les sites.
- Mesurer pour suivre efficacement : seule l'installation de compteurs assortis d'un suivi régulier (mensuel dans l'idéal) permet de repérer et corriger les dérives, ce qui est rarement le cas à l'heure actuelle (par exemple un suivi des consommations sur le bâtiment de bureaux aurait permis de détecter la panne d'horloge sur le GEG). Il faut cependant garder à l'esprit que le suivi énergétique n'est pas trivial et qu'il nécessite un accompagnement/formation au moment de sa mise en place ; cette tâche peut également être confiée au prestataire mais en l'encadrant précisément.
- Etablir clairement les responsabilités : chacun doit savoir ce qu'il a à faire, à quelle périodicité et avec quelle méthodologie ; cela n'a pas toujours été le cas durant notre suivi : lorsque nous avons mis en évidence certains dysfonctionnements (programmation horaire défectueuse, panne d'horloge, mauvaise gestion des cascades, etc), nous l'avons fait remonter à notre interlocuteur côté maître d'ouvrage mais le problème n'a pas nécessairement été corrigé.

Importance du jeu d'acteurs

La bonne maîtrise d'une installation repose à 90% sur des aspects organisationnels (donc sur des facteurs humains) : la présence d'une personne convaincue et motivée au sein d'une structure peut suffire à lancer la dynamique.

Il faut garder à l'esprit que **ce n'est pas le cœur de métier du prestataire de faire de la maîtrise de l'énergie** : seule une augmentation des exigences du maître d'ouvrage envers son prestataire conduira à une meilleure efficacité. Le maître d'ouvrage doit cependant monter en compétence ou se faire accompagner pour pouvoir faire le poids techniquement. La clé réside d'autre part dans un partage équitable des responsabilités lors des prises de risque, dans le cas contraire le prestataire cherchera à se couvrir ce qui est compréhensible.

3. Connexion à un réseau de froid vertueux de type SWAC

Le recours à un réseau de froid plutôt qu'à une production décentralisée peut se justifier s'il rend possible une production de froid plus vertueuse, comme dans le cas d'un SWAC (refroidissement de bâtiments via du froid récupéré en direct sur de l'eau de mer) ou du réseau Thassalia à Marseille (condensation des GEG sur eau de mer). *NB : L'éventail des possibilités pour la production de froid vertueuse à l'échelle d'un réseau est assez réduit.*

Le raccordement de bâtiments en substitution d'une production EG existante n'est pas cependant pas trivial ; nous détaillons ci-dessous quelques enjeux :

- dimensionnement
- débit
- régimes de température

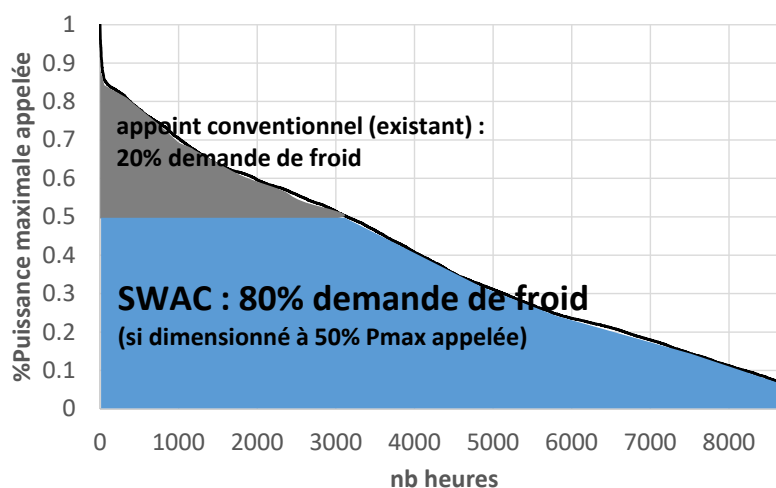
a. Optimisation du dimensionnement

Ce point est primordial dans le cas des technologies intensives en investissement comme c'est le cas d'un SWAC (surtout lorsque les investissements sont fortement dépendants de la puissance installée). Le juste dimensionnement de la puissance de l'installation est donc un enjeu important pour assurer la viabilité du projet et il faut impérativement s'intéresser de près à la demande de froid afin de bien en comprendre la structure.

Ainsi, nous avons vu au §II.1.b que plus de 80% de l'énergie froide était fournie à moins de 50% de la puissance maximale appelée sur l'année (*NB : Il s'agit de la puissance maximale **appelée** sur l'année et non de la puissance installée*). Il est alors pertinent de dimensionner la puissance du SWAC bien en dessous de la puissance maximale appelée, puisqu'on a vu qu'un dimensionnement à 50% de la puissance maximale appelée dans l'année permettait déjà de couvrir 80% de la demande en énergie. Les 20% restants peuvent être couverts par les installations conventionnelles existantes qui peuvent être conservées pour constituer un appoint/secours. Un dimensionnement au-delà de 50% de la puissance maximale appelée va apporter très peu d'énergie supplémentaire (ex : 60% Pmax amène 8% d'énergie froid couverte en plus, 70% Pmax encore 4%, 80% Pmax 1.5%, 90% Pmax seulement 0.5% en plus avec 99.98% de l'énergie froide couverte). En définitive il faut plutôt sous dimensionner que surdimensionner le SWAC, car l'enjeu énergétique est faible mais le coût associé élevé.

La Figure 32 représente sur la courbe monotone normalisée (=ramenée à la Pmax appelée) dans le cas de l'hôpital la part de la demande de froid annuelle couverte respectivement par une installation SWAC dimensionnée à 50% de la Pmax appelée et par l'appoint conventionnel. *NB : Les quantités d'énergie sont représentées par les aires.*

Figure 32 : Représentation de la part de la demande de froid annuelle couverte respectivement par une installation SWAC dimensionnée à 50% de la puissance maximale appelée et par l'appoint conventionnel (cas de l'hôpital)



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

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

b. Optimisation du débit pompé en mer

Dans un système comme le SWAC, le débit est aussi important que la puissance car c'est le débit d'eau pompé en mer qui coûte cher. Il faut donc veiller à utiliser l'eau pompée le mieux possible en maximisant le ΔT donc en diminuant les débits de distribution. Les débits sur le circuit SWAC et sur le circuit secondaire doivent être similaires pour optimiser le niveau de température atteint sur le circuit secondaire. De la même manière il ne faut pas se baser sur les pompes de distribution en place pour estimer le débit nécessaire à la climatisation du site côté secondaire car elles sont systématiquement surdimensionnées. Cela conduirait à pomper en mer un débit largement surdimensionné qui pénaliserait fortement les investissements.

Pour un fonctionnement optimisé, le débit sur le circuit secondaire doit pouvoir varier en fonction de la demande de froid (tout comme le débit pompé en mer). Or l'expérience sur les deux sites raccordés au réseau Thassalia à Marseille et équipés de pompes de distribution à débit variable ainsi que de vannes 2 voies sur les terminaux a montré que la maîtrise du débit sur le circuit secondaire n'était pas si simple à atteindre. Là encore, un bon équilibrage de l'installation est nécessaire pour minimiser le débit global EG et obtenir un ΔT significatif sur la distribution. Il ne faut pas sous-estimer cet aspect car un réseau à débit variable est complexe à équilibrer (*NB : alors même qu'on n'équilibre déjà pas correctement les réseaux à débit fixe à l'heure actuelle*). Notons que la présence de vannes de décharge mal maîtrisées ou de soupapes différentielles mal étalonnées peut provoquer un recyclage et annuler partiellement la variation de débit.

c. Optimisation des régimes de température

Il faut veiller à maximiser la température de distribution EG sur le bâtiment existant afin de pomper l'eau de mer moins en profondeur et ainsi optimiser les coûts d'infrastructure. Il faut notamment s'assurer qu'il n'y ait pas de mélange induisant une hausse de la température sur le réseau de distribution si l'installation est munie d'une bouteille de découplage hydraulique (comme c'est souvent le cas), car cela obligerait à pomper l'eau de mer plus profond que nécessaire.

Au final, les principaux freins au raccordement à un réseau vertueux de type SWAC sont la maîtrise des débits sur le circuit secondaire ainsi que le niveau de température sur le réseau EG qui conditionne la profondeur de pompage de l'eau de mer.

IV. Conclusions

L'instrumentation sur une année complète de 4 installations de climatisation à eau glacée sur des bâtiments tertiaires à La Réunion (un hôpital, un bâtiment de bureaux, un bâtiment d'enseignement, un datacenter) et 3 à Marseille (étudiés par le bureau Enertech) nous a permis de caractériser précisément la demande de froid des bâtiments. En particulier on note sur les courbes monotones seulement quelques de fonctionnement à la puissance maximale appelée, sauf pour le datacenter pour lequel la puissance appelée est relativement stable en lien avec la prépondérance des apports internes. L'analyse de la structure de la demande de froid a mis en évidence que 75% à 85% de l'énergie était fournie à moins de 50% de la puissance maximale appelée sur l'année, et ce quel que soit le profil de demande de froid avec ou sans coupure nocturne et le week-end (hors datacenter). Il est intéressant de retrouver ce même constat dans le cas du chauffage des bâtiments...

Les températures de distribution sont comprises entre 6-7°C et 10-11°C selon les sites, avec un ΔT inférieur à 2 degrés sur le réseau d'eau glacée mis à part sur le site de l'hôpital (2-6 degrés) qui est le seul à être équipé d'une pompe à débit variable. Sur deux des sites étudiés à Marseille, des ΔT moyens de l'ordre de 4 degrés ont été observés (au lieu des 8 degrés visés) malgré la présence de pompes à débit variable et de vannes 2 voies sur les terminaux. Ces ΔT sont néanmoins plus élevés que ceux observés sur les sites à La Réunion.

Nous avons également pu explorer les apports de la simulation thermique dans la prédiction de la demande de froid au travers des simulations réalisées sur deux des sites mesurés. Il en ressort que la demande de froid est bien reproduite en volume annuel lorsque l'occupation du bâtiment est bien connue, moins bien lorsque l'occupation est aléatoire. Le profil de demande est par contre moins bien restitué, avec notamment des effets inertiels mal reproduits et une relance matinale non modélisée. Par ailleurs dans le cadre du projet Tropiclim, Enertech a développé un outil simplifié de dimensionnement d'installations de climatisation à eau glacée basé sur de nombreuses simulations thermiques, qui a donné de bons résultats sur 3 bâtiments instrumentés.

Les mesures ont mis en évidence un surdimensionnement de la production de froid d'un facteur 2 à 3 sur les 4 sites étudiés, avec une puissance maximale appelée de l'ordre de 70-80 Wf/m² climatisé alors que la puissance installée est supérieure à 150 Wf/m² climatisé. Les faibles taux de charge qui en découlent (<35 à 50% toute l'année selon les sites) dégradent les performances obtenues avec des SEER annuels compris entre 1.7 et 2.3, bien inférieurs à la valeur de référence de 3.

Les débits de distribution sont également surdimensionnés comme en témoignent les faibles ΔT observés. La consommation de la pompe de distribution représente 4% de la consommation de la climatisation sur l'hôpital qui est équipé d'une pompe à débit variable, avec une consommation spécifique de 25 kWhe/MWhf. Elle grimpe à 20% de la consommation totale sur le bâtiment d'enseignement dont la pompe de distribution est largement surdimensionnée ($\Delta T < 1$ degré, en cohérence avec le surdimensionnement du groupe froid), ce qui est disproportionné et conduit à une consommation spécifique de 150 kWhe/MWhf. Sur ce site, l'installation d'un variateur de fréquence dans le cadre du projet a permis de diviser la consommation de la pompe de distribution par 5 (5% de la consommation) et d'augmenter le ΔT jusqu'à 2.5 degrés. Ainsi on retiendra que seule une variation de débit sur la distribution permet de limiter l'impact du surdimensionnement systématique de la pompe de distribution.

Enfin, la consommation des terminaux est souvent négligée car leur puissance unitaire est faible devant celle du groupe froid, mais mis bout à bout et compte tenu de leur fonctionnement en continu, leur consommation devient significative. Ainsi il faut rajouter entre 20 et 45% de la consommation liée à la production de froid pour approcher la consommation totale dédiée à la climatisation.

Concernant les pratiques actuelles, on relèvera le surdimensionnement systématique de la production et de la distribution de froid révélé par ce travail, qui dégrade les performances et engendre un cyclage du groupe froid. Cette pratique est guidée par la peur des plaintes, à l'heure actuelle la seule réponse aux problèmes de confort est une augmentation de la puissance froide alors que les installations sont déjà largement surdimensionnées... alors qu'un rééquilibrage hydraulique pourrait probablement résoudre le problème à lui seul.

On ne peut que constater la difficulté à faire évoluer les pratiques de travail alors que les bonnes pratiques sont connues : un enjeu futur sera de parvenir à les diffuser et à les faire appliquer... Au-delà de la qualité du dimensionnement, on peut citer comme problématiques la généralisation du recours aux pompes à débit variable sur la distribution (malheureusement pas encore systématiques sur les nouvelles installations), la prise de conscience de l'importance d'un bon équilibrage hydraulique, la nécessité de mise en place d'un suivi énergétique des installations (via du comptage)...