



***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 : Etudes de cas à Marseille :**

**Bâtiment Calypso**

***Résultats de mesure***

***Livrable 2.1***

**mars 2020**

***rédigé par***  **ENERTECH**

Nicolas Andreau [andreau@enertech.fr](mailto:andreau@enertech.fr) 04 75 90 18 54



***Le projet SWACool est lauréat de l'Appel à Projets de Recherche ADEME « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 » - 3<sup>ème</sup> édition.***

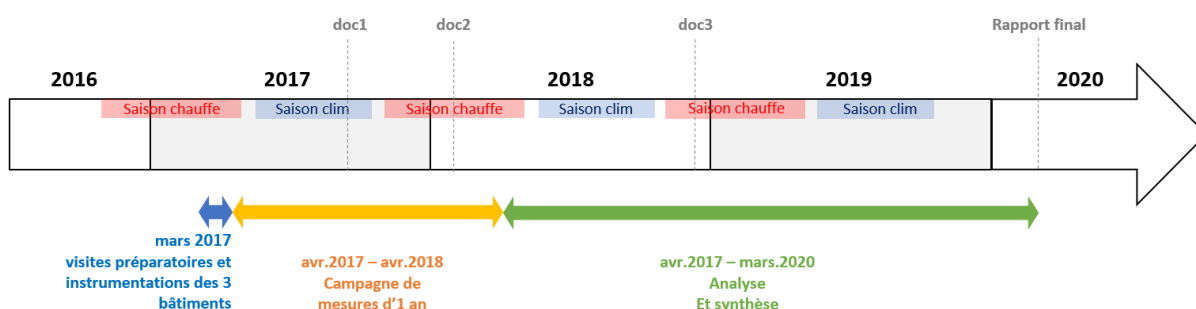
Référent Réunion : Fabien Picgirard [fabien.picgirard@ademe.fr](mailto:fabien.picgirard@ademe.fr) 02 67 71 15 46

Référent métropole : Jean-Pierre Harinck [jean-pierre.harinck@ademe.fr](mailto:jean-pierre.harinck@ademe.fr) 04 91 32 84 62

## Documents de référence remis en cours de mission

<b>doc 1</b>	SWACOOOL_avancement_volet_metropole (.doc) <i>(Rapports d'instrumentation des 3 bâtiments)</i>	Remis le 15/09/2017
<b>doc 2</b>	180130_Swacool_Resultats_intermediaires (.ppt) <i>(Résultats de mesures sur Calypso et Golden Tulip)</i>	Remis le 30/01/2018
<b>doc 3</b>	181212_Swacool_Resultats_intermediaires (.ppt) <i>(Résultats de mesures sur Mirabeau2)</i>	Remis le 12/12/2018

## Calendrier de la mission



## Nomenclature utilisée :

<b>kWh<sub>ef</sub></b>	: kilowattheure d' <b>énergie finale</b> . L'énergie finale correspond à l'énergie livrée au poste de consommation (compteur électrique, compteur gaz, compteur réseau chaleur, etc.).
<b>kWh<sub>él</sub></b>	: kilowattheure d' <b>énergie électrique</b> = kilowattheure d'énergie finale appliqué à l'énergie électrique.
<b>kWh<sub>froid</sub></b>	: kilowattheure d' <b>énergie utile de froid</b> . L'énergie utile de froid correspond à l'énergie sous forme de frigories consommée en un point donné de l'installation. Elle se mesure avec un compteur de chaleur.
<b>kWh<sub>chaleur</sub></b>	: kilowattheure d' <b>énergie utile de chaleur</b> . L'énergie utile de chaleur correspond à l'énergie thermique consommée en un point donné de l'installation. Elle se mesure avec un compteur de chaleur.
<b>kWh<sub>EP</sub></b>	: kilowattheure d' <b>énergie primaire</b> . L'énergie primaire correspond à la première forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Cette énergie diffère de l'énergie finale essentiellement pour la production électrique (rapport Ep/Ef de l'ordre de 3 pour la production électrique française en métropole), l'énergie bois ou encore un réseau de chaleur alimenté tout ou partiellement par des énergies renouvelables.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte énergétique et objectif du projet SWACOOOL .....</b>	<b>5</b>
1.1	<i>Contexte .....</i>	5
1.2	<i>Objectifs.....</i>	8
<b>2</b>	<b>Description du bâtiment CALYPSO .....</b>	<b>12</b>
2.1	<i>Généralités .....</i>	12
2.1.1	Le bâtiment .....	12
2.1.2	Abonnements et maintenance.....	14
2.2	<i>Climatisation et traitement d'air.....</i>	14
2.2.1	Sous-station Thassalia .....	14
2.2.2	Distribution et émission .....	16
2.2.3	Traitement d'air.....	17
<b>3</b>	<b>Description de la campagne de mesures .....</b>	<b>18</b>
3.1	<i>Capteurs posés par Enertech.....</i>	18
3.2	<i>Données Thassalia.....</i>	19
3.3	<i>Données GTC .....</i>	19
<b>4</b>	<b>Résultats de mesure .....</b>	<b>21</b>
4.1	<i>Caractéristiques de la météo à Marseille.....</i>	21
4.1.1	Résultats mensuels.....	21
4.1.2	Température et hygrométrie .....	21
4.1.3	Ensoleillement.....	24
4.2	<i>Consommation de froid du bâtiment .....</i>	25
4.2.1	Variabilité saisonnière.....	25
4.2.2	Signature énergétique.....	26
4.2.3	Intermittence journalière .....	27
4.2.4	Puissance appelée .....	29
4.3	<i>Régimes de températures et débits.....</i>	29
4.3.1	Vue d'ensemble.....	29
4.3.2	Températures primaire/secondaire.....	30

4.3.3	Débits primaire/secondaire .....	35
4.4	<i>Consommation électrique des auxiliaires</i> .....	37
4.5	<i>Gestion des ambiances et des émetteurs</i> .....	39
4.5.1	Ventilo-convecteurs .....	39
4.5.2	Centrales de traitement d'air (CTA) .....	42
4.5.3	Ambiances .....	44
<b>5</b>	<b>Synthèse et conclusion</b> .....	<b>47</b>

# 1 Contexte énergétique et objectif du projet SWACOOOL

## 1.1 Contexte

En 2014, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) a consommé 41% (respectivement 28 et 13%) de l'énergie finale en France, majoritairement sous forme d'électricité (37%) et de gaz (32%), dédiés aux 3/4 au chauffage et à la climatisation (MEDDE, 2015). De manière évidente, le bâtiment a un rôle majeur à jouer dans la transition énergétique.

A La Réunion, le poids du secteur du bâtiment dans la consommation d'énergie finale est moins important (22% en 2014), avec une consommation d'énergie finale par habitant pour le résidentiel et le tertiaire 4 fois moins élevée (3000kWh/hbt/an contre 12000 en métropole) à cause d'une différence évidente de climat. Par contre, la consommation du bâtiment se fait à 91% sous forme d'électricité, or l'électricité à La Réunion est à 78% d'origine fossile (cf. Figure 1) donc fortement émettrice en CO<sub>2</sub>, contrairement à la situation en métropole (766gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> à La Réunion contre 37gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> en métropole) (MEDDE, 2015 et Energies Réunion, 2015). La situation est similaire dans les autres DOM-TOM.

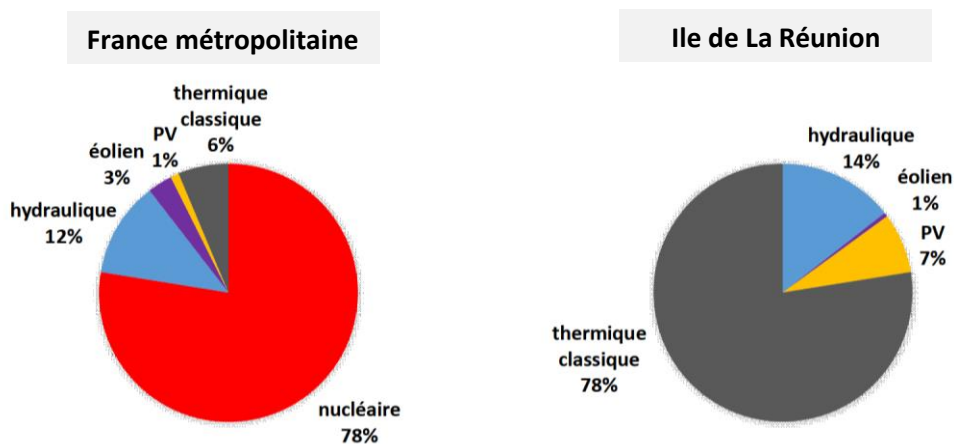


Figure 1 : Origine de l'électricité produite en France métropolitaine et à La Réunion (source des données : MEDDE, 2015 et Energies Réunion, 2015)

### Contexte réunionnais

Le bâtiment consommant 86% de la demande électrique totale de l'île (dont 45% pour le résidentiel et 41% pour le tertiaire), la maîtrise de la demande électrique dans ce secteur est un enjeu majeur à La Réunion, dans une double perspective de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et d'augmentation de l'indépendance électrique de l'île. La climatisation représente une part importante de cette consommation avec 80% des bâtiments tertiaires climatisés et un taux de climatisation des bâtiments d'habitation en constante augmentation. La climatisation constitue près de la moitié de la consommation électrique des bâtiments tertiaires (plus de 500GWh<sub>el</sub> 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 d'engager des coûts démesurés. Dans ce cas, même après réduction des besoins de froid grâce à la rénovation, le maintien d'un moyen de climatisation est incontournable pour assurer un niveau de confort minimal. Si on considère que la majorité du parc bâti existant à La Réunion n'est pas bioclimatique et ne le deviendra pas dans un avenir proche, il est nécessaire pour assurer un niveau de confort minimal de développer des moyens de production de climatisation propres à un coût abordable. Le recours à un réseau de froid vertueux tel que le SWAC en est un.

Les réseaux thermiques ont de multiples avantages. Outre le fait qu'ils permettent de valoriser des énergies renouvelables ou fatales de manière massive tout en mutualisant les investissements, ils ont également un rôle structurant sur la ville. Ils sont en principe implantés au cœur de zones à forte demande thermique et initient souvent une dynamique positive autour de la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. La logique veut que soient raccordés en priorité les bâtiments existants présentant une forte demande thermique et difficiles à rénover. Idéalement la création d'un réseau thermique s'accompagne d'une planification énergétique territoriale qui détermine un ordre de priorité dans les actions à mettre en œuvre dans les bâtiments. Par exemple il n'est pas judicieux de rénover lourdement des bâtiments se trouvant dans le périmètre d'un réseau thermique vertueux car cela représente un double investissement dans la rénovation du bâtiment ET dans la mise en œuvre du réseau (souvent onéreuse dès lors qu'il s'agit de créer un nouveau réseau ou de valoriser des ressources renouvelables). Il n'est pas non plus forcément opportun de raccorder des bâtiments déjà bioclimatiques et donc à faible impact énergétique, dans le sens où ils mobiliseront de la puissance sur le réseau qui ne sera plus disponible pour des bâtiments plus énergivores.

De nombreux systèmes ayant recours à l'eau froide pour le refroidissement des groupes de froid existent en France et dans le monde comme le réseau de Climespace à Paris qui utilise l'eau de la Seine. Par contre les réseaux utilisant l'eau pompée en direct (sans abaisser sa température) pour la climatisation des bâtiments sont peu nombreux. Seuls deux systèmes utilisant l'eau de mer profonde comme source de froid (SWAC, Sea Water Air Conditioning) existent, ils alimentent deux complexes hôteliers situés en Polynésie, l'un à Bora Bora mis en service en 2006 (hôtel Intercontinental), l'autre à Tetiaroa mis en service en 2014 (complexe Marlon Brando). Leur puissance se limite cependant à quelques  $MW_{\text{froid}}$ .

Le SWAC Nord de La Réunion<sup>1</sup> devait être le 1<sup>er</sup> projet SWAC grande ampleur au niveau mondial ( $40MW_{\text{froid}}$  à terme) mais a été finalement abandonné. D'autres systèmes de taille

---

<sup>1</sup> Le projet de réseau de froid urbain SWAC Nord à La Réunion devait être opérationnel en 2017 mais a été abandonné. Le réseau devait être construit et exploité par Climabyss (filiale d'Engie) dans le cadre d'une délégation de service public d'une durée de 24 ans. Il aurait été alimenté directement (sans machine de froid) par de l'eau de mer puisée dans l'Océan Indien à une profondeur de 1100m et à une température de 5°C. Le réseau de 23km aurait desservi une cinquantaine de preneurs du secteur tertiaire (aéroport, hôpital, université, bureaux, supermarchés, etc.) situés sur les villes de Saint Denis et de Saint Marie pour une puissance de

significative mais utilisant l'eau d'un lac comme source de froid (LWAC, Lake Water Air Conditioning) existent, comme le réseau Genève- Lac-Nations en Suisse (16MW<sub>froid</sub>, mis en service en 2009) ou celui de l'Université de Cornell aux Etats-Unis (71MW<sub>froid</sub>, mis en service en 2000). D'autres projets sont en préparation (SWAC Sud (CHU St Pierre) à La Réunion, LWAC GLU-GLA à Genève).

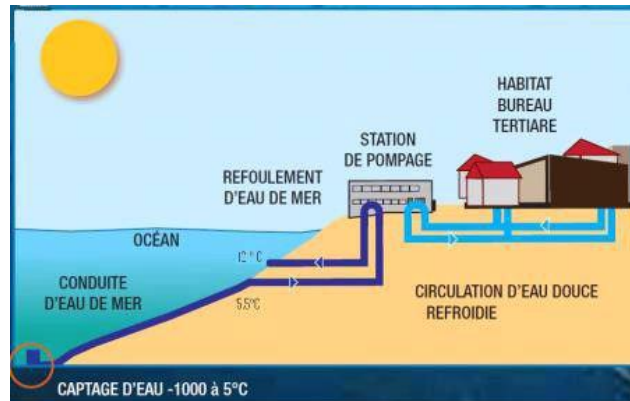


Figure 2 : Schéma de principe d'un réseau SWAC (Sea Water Air Conditioning) (Source : Engie)



Figure 3 : Schéma de principe simplifié du réseau SWAC Nord à La Réunion (source : ARER) – projet aujourd'hui abandonné.

36MW<sub>froid</sub> dans un 1<sup>er</sup> temps, totalisant une production annuelle de l'ordre de 80GWh<sub>froid</sub> annuels. Le Coefficient de Performance prévisionnel était de 10 contre 2.25 en moyenne avec les groupes froids actuels. Le gain de performance devait donc permettre une réduction par plus de 4 de l'électricité consommée et des émissions de CO<sub>2</sub> associées. L'enjeu du projet était de produire 30 à 40GWh<sub>el</sub> par an (sur les 500GWh<sub>el</sub> consommés annuellement par la climatisation dans le secteur tertiaire sur l'île) et de générer ainsi une économie de 20 à 30 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an.



## Contexte en Métropole

En métropole, le poids de la climatisation dans la consommation du secteur du bâtiment n'est pas aussi important et la production électrique n'est pas aussi émettrice de CO2 que dans les DOM-TOM puisqu'en majorité issue du nucléaire (cf. Figure 1). Cependant la demande et l'équipement en climatisation dans le secteur tertiaire ne cesse d'augmenter et des enjeux semblables à ceux observés dans les DOM-TOM commencent à se dessiner, en particulier sur le pourtour méditerranéen. La climatisation en métropole reste toutefois un usage très peu étudié en regard des autres sujets thermiques.

Les réseaux de froid sont encore peu nombreux en métropole mais l'engouement pour la création de réseaux de froid vertueux est important. Le projet Thassalia à Marseille en est un exemple. Ce réseau, déjà en fonctionnement, a pour vocation de distribuer de la chaleur et du froid à 500 000m<sup>2</sup> de bâtiments de l'écocité Euroméditerranée via un réseau chaud/froid de 3km (cf. Figure 4). Le réseau est alimenté par des machines frigorifiques refroidies par de l'eau pompée dans la mer Méditerranée (système hybride).

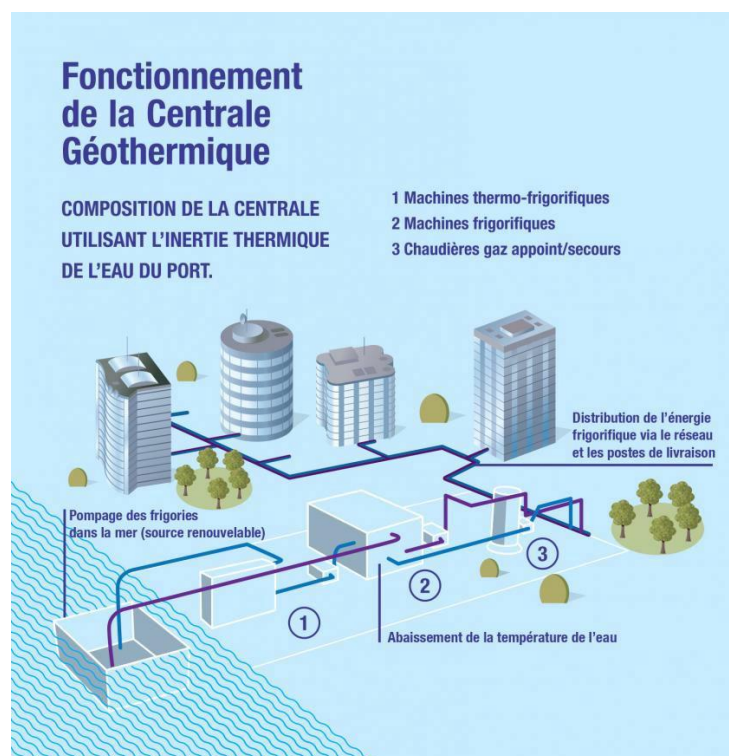


Figure 4 : Schéma de principe simplifié du réseau Thassalia à Marseille (source : Engie).

### 1.2 Objectifs

L'objectif général du projet SWACOOOL est de déterminer les possibilités d'optimisation des systèmes de climatisation dans les bâtiments existants. Les optimisations se situent à deux niveaux :

- La réduction de la demande (sans réalisation de travaux lourds) ;
- L'adaptation de la distribution pour la connexion à un réseau de froid vertueux.



Le présent projet de recherche se propose d'étudier cette problématique au travers d'exemples concrets de bâtiments et de proposer une méthodologie générale d'adaptation de la distribution de froid dans les bâtiments à des réseaux de froid vertueux, sur la base de deux cas concrets en climat tropical et méditerranéen : le réseau SWAC Nord à La Réunion et le réseau Thassalia à Marseille.

Les objectifs de ce travail se situent à plusieurs niveaux :

### 1. Prendre en compte le système dans son ensemble et son environnement

L'intérêt du projet est d'étudier l'interaction entre le bâtiment, le réseau et le climat, tandis que dans la plupart des cas les études portent sur l'un ou l'autre des éléments pris séparément. Or dans le cas d'un réseau vertueux, le comportement du bâtiment a un impact important sur les performances du réseau. D'autre part, il est admis que la caractérisation précise de la demande thermique réelle est primordiale pour une bonne compréhension et implémentation du système : ce volet occupera une place importante dans le travail.

### 2. Apprendre par l'exemple et le retour d'expérience grâce à la mesure

Le projet met l'accent sur l'étude de cas concrets sur des bâtiments existants, avec l'idée d'implémenter d'abord sur quelques cas puis de généraliser (au lieu de faire l'inverse). **Très peu de campagnes de mesures portant sur les paramètres influant sur les consommations de climatisation dans les bâtiments ont à ce jour été menées en France.** Or les habitudes de la construction ont beaucoup évolué durant ces dernières décennies. L'enveloppe a profondément changé et son contenu a aussi beaucoup évolué. A l'intérieur des bâtiments on trouve aujourd'hui de nombreux équipements et de nombreux occupants. La quantité d'équipements de bureautique a explosé, tout comme les besoins en lumière artificielle. Tous ces matériels rendent service aux occupants, mais ils consomment de l'électricité, qui finit en quasi-totalité en chaleur à l'intérieur des locaux. Enfin, les exigences des occupants ont changé. La notion de confort a beaucoup évolué en cinquante ans.

Fort de ce constat, Enertech a mené en 2002 **une première étude** en région Provence Alpes Côte d'Azur (Enertech, 2002), visant à mesurer puis optimiser sur 6 bâtiments les niveaux de consommation de climatisation ainsi que les conditions de confort obtenues.

**Une seconde étude** a été menée sur ce thème à la Réunion en 2014. Elle a porté sur 5 bâtiments qui devaient être raccordés au réseau SWAC (Enertech, 2014). Afin que la ressource profite au plus grand nombre, il était souhaitable que la mise en œuvre de ce réseau de climatisation s'accompagne d'actions d'optimisation énergétiques sur les bâtiments raccordés. Enertech a donc mené pour le compte de l'ADEME une mission visant à étudier les optimisations énergétiques envisageables dans les bâtiments qui devaient être raccordés au SWAC. Pour ce faire, des diagnostics basés sur une campagne de mesures et des simulations dynamiques ont été réalisés sur un échantillon représentatif de 5 bâtiments (enseignement, bureaux, process, hôpital). Ils ont mis en évidence :

- les caractéristiques des bâtiments et des systèmes

- les conditions météorologiques
- l'évaluation de l'existant à partir de la campagne de mesures in situ et de la simulation thermique dynamique
- des préconisations d'optimisation énergétique en précisant les potentiels d'économies (bâti et systèmes)
- un plan d'actions chiffré découlant des préconisations
- les besoins de froid et la puissance associée, dans l'optique de fournir des éléments synthétiques permettant de dimensionner l'échangeur qui sera installé à la place des groupes de froid actuels si le bâtiment est raccordé au réseau SWAC La campagne de mesures a été de courte durée (3 mois), ce qui a obligé à des extrapolations pour se rapporter à une année complète. Cette première étude a montré qu'il était nécessaire de détailler davantage le fonctionnement des réseaux de distribution (équilibre et régulation terminale) afin de pouvoir proposer des solutions concrètes d'optimisation.

**Le présent projet** s'inscrit dans le prolongement de ces deux études préliminaires. En premier lieu, on se propose de **qualifier précisément l'existant par des mesures sur une année complète** et plus seulement sur 3 mois. Le champ d'action sera également élargi en incluant des bâtiments raccordés à un réseau sous climat méditerranéen : le réseau Thassalia à Marseille.

### 3. Revaloriser le travail de gestion des bâtiments

Si les enjeux sont plutôt à l'échelle du réseau, les actions proposées sont exclusivement au niveau du bâtiment pour le rendre responsable et limiter son empreinte par le biais d'un mode de climatisation vertueux et optimisé. Il est à noter que le travail d'adaptation effectué peut se faire indépendamment de la connexion des bâtiments au réseau SWAC. Le projet vise à remettre l'optimisation des bâtiments existants au cœur de la problématique alors que la plupart des projets menés actuellement portent sur les technologies de production d'énergie ou l'écoconception de bâtiments neufs. Le potentiel d'économies d'énergies par ce type d'actions est significatif et très rarement mis en œuvre.

Il n'est pas forcément nécessaire de refondre complètement la distribution de froid dans un bâtiment pour le rendre compatible avec un réseau de froid vertueux, cependant un minimum d'interventions est nécessaire, qui peuvent se faire à moindre frais. Par sécurité, par habitude ou absence de calculs précis, les débits de distribution sont souvent surdimensionnés par rapport à la demande à fournir, comme en témoignent les faibles différences de température observées sur la distribution. Une diminution des débits de distribution n'est généralement pas difficile à mettre en œuvre (à moins d'un réseau très déséquilibré hydrauliquement) et peut-être très profitable au bâtiment comme au réseau.

Une meilleure régulation de la distribution dans les bâtiments présente également des avantages sur un réseau de froid classique ou même en l'absence de connexion à un réseau

de froid, en permettant par exemple le fonctionnement des groupes de froid à plus haute température lorsque la demande est faible ou la réduction de la consommation électrique liée à la distribution, qui peut être considérable car les pompes fonctionnent une grande partie du temps. La problématique est donc transposable à de nombreux cas dans les DOM-TOM ou en métropole.

Le volet métropole de l'étude SWACOOOL étudie la climatisation de trois bâtiments à Marseille à travers une campagne de mesures détaillée :

- Le bâtiment de bureaux **Calypso** (Covivio) connecté au réseau de froid Thassalia.
- L'hôtel **Golden Tulip** (Covivio) connecté au réseau de froid Thassalia.
- Le bâtiment de bureaux **Mirabeau2** (CD13) disposant d'une production de froid indépendante.

**Le présent rapport traite du bâtiment Calypso.**

## 2 Description du bâtiment CALYPSO

### 2.1 Généralités

#### 2.1.1 Le bâtiment

Le bâtiment Calypso est un bâtiment de bureaux de 9800m<sup>2</sup> livré en 2016 et propriété de Covivio (auparavant Foncière des Régions) qui loue cet espace à différentes structures comme Ernst&Young ou la Régie des Transports Marseillais. Le bâtiment est situé sur le boulevard Euroméditerranée avec une façade principale orientée vers l'Ouest (Figure 5).



Figure 5 : Situation et vues du bâtiment Calypso à Marseille (en bas à gauche toiture technique, en bas à droite photo intérieure d'un étage encore inoccupé).

Le Calypso comporte 7 niveaux (RDC à R+6) organisés en demi-plateaux (Figure 6). Chaque demi-plateau est sous-compté indépendamment pour l'électricité et la consommation d'eau glacée.



Figure 6 : Plan d'étage type du bâtiment Calypso.

Il faut noter qu'en début de mission (avril 2017) les niveaux R1 et R3 n'étaient pas occupés à 100% et ont été loués en cours de campagne. L'occupation du bâtiment durant la période de mesure a pu être évaluée grâce aux compteurs électriques remontés sur la GTC par demi-plateau au pas de temps de 10 minutes. Elle a été globalement de 95% (Tableau 1).

occupation	R1		R2		R3		R4		R5		R6	
	nord	sud	nord	sud	nord	sud	nord	sud	nord	sud	nord	sud
avr-17		X	X	X			X	X	X	X	X	X
mai-17		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
juin-17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
juil-17	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
août-17			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
sept-17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
oct-17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
nov-17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
déc-17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
janv-18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
févr-18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mars-18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
avr-18	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 1 : Occupation du bâtiment mois par mois et par demi-plateau d'après l'analyse des consommations électriques remontées par la GTC.



Au niveau des fluides :

- La climatisation du bâtiment est assurée par un réseau d'eau glacée alimenté en sous-station par le réseau Thassalia. Ce réseau alimente les batteries de ventilo-convecteurs situés dans les bureaux.
- Le chauffage est réalisé par des résistances électriques aux niveaux des CTA et des ventilo-convecteurs (choix technique théoriquement incompatible avec la RT2012, sans doute permis par la météo plus clémente à Marseille).
- L'ECS est assurée ponctuellement par des cumulus électriques.

La climatisation est globalement mobilisée de mi-avril à fin octobre, avec une relance de climatisation observée du 17/11/2017 au 24/11/2017. La saison de chauffe 2017/2018 ayant commencé le 06/11/2017, il arrive donc ponctuellement sur ce bâtiment que les demandes de froid et de chaleur se superposent, aussi étonnant que cela puisse paraître.

### 2.1.2 Abonnements et maintenance

Le bâtiment dispose d'un abonnement électrique tarif vert (puissance non connue) et d'un abonnement en eau glacée au réseau Thassalia (puissance souscrite  $390\text{kW}_{\text{froid}}$ ).

La maintenance et le pilotage des installations CVC est réalisé par l'entreprise Maintenance Thermique (MT) filiale d'Engie.

## 2.2 Climatisation et traitement d'air

### 2.2.1 Sous-station Thassalia

La sous-station de climatisation du bâtiment dispose d'un seul échangeur sur la boucle Thassalia correspondant à une puissance souscrite de  $390\text{kW}_{\text{froid}}$ . Le schéma de principe de la sous-station est présenté en Figure 7.

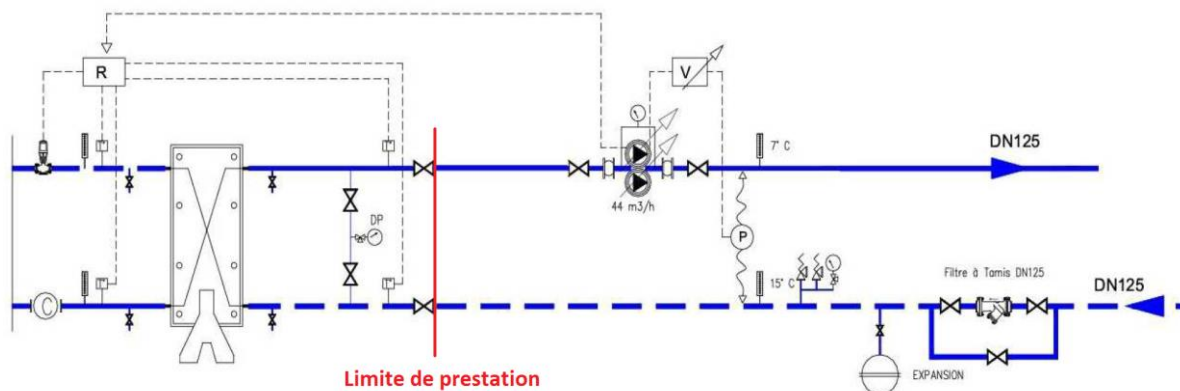


Figure 7 : Schéma de principe de la sous-station Thassalia (extrait du DOE).

Les régimes théoriques sont  $6^{\circ}\text{C}/14^{\circ}\text{C}$  côté primaire de l'échangeur (boucle Thassalia) et  $7^{\circ}\text{C}/15^{\circ}\text{C}$  côté secondaire de l'échangeur (distribution Calypso). Le réseau de distribution

dispose d'une pompe double à vitesse variable (15 à 50Hz) régulée à pression constante entre l'aller et le retour. Il fonctionne théoriquement à débit variable (voir §2.2.2).

Un compteur de frigories est installé au primaire Thassalia sur le retour. Il est relié au système Cofely Visio qui archive les données au pas de temps horaire : débit, températures primaires aller/retour et puissance délivrée à l'échangeur. Ces données nous ont été fournies par Cylergie tout au long de l'année de mesure.

La boucle froide Thassalia est disponible 24h/24 et 7j/7. L'arrêt de la pompe de distribution côté secondaire entraîne néanmoins la fermeture de la vanne deux voies (V2V) située au primaire, grâce à un retour de marche fourni au régulateur de la vanne.

La V2V motorisée Thassalia se trouve sur la branche aller du primaire et permet de moduler le débit fourni à l'échangeur (donc la puissance). Nous ne sommes pas parvenus à obtenir de Thassalia la loi de régulation de cette vanne. Les mesures que nous avons analysées montrent a priori que l'ouverture de la vanne est simplement proportionnelle à l'écart de température aller/retour du secondaire.

Quelques photos de la sous-station sont présentées en Figure 8.



Figure 8 : Sous-station Thassalia du bâtiment Calypso.



## 2.2.2 Distribution et émission

Trois colonnes d'eau glacée alimentent l'ensemble des ventilo-convecteurs de chaque étage. Des soupapes de pression différentielles sont disposés en tête de colonne. Elles permettent de garantir un débit minimum en cas de fermeture des terminaux (Figure 9).

Les émetteurs de froid sont des ventilo-convecteurs gainés qui fonctionnent en recyclage avec apport d'air neuf (§4.5.1). Ils sont alimentés en froid par des batteries piquées sur le réseau d'eau glacée et disposent également de batteries chaudes électriques (effet joule) pour l'hiver. Les batteries froides sont pilotées par des **vannes deux voies motorisées modulantes**. Ce point est important car il implique que **le réseau d'eau glacée fonctionne à débit variable**. Les vannes de décharge en tête de colonne atténuent toutefois potentiellement l'amplitude de variation du débit vu de la sous-station.

Les ventilo-convecteurs sont asservis à des thermostats d'ambiance dont les consignes sont pilotées par la GTC. **Des détecteurs de présence indiquent à la GTC si les bureaux sont occupés ou non**. La GTC détermine alors (selon un calendrier préprogrammé) la consigne de température à adopter parmi les 3 consignes possibles (différenciées par trames de bureaux) : « occupation », « préconfort » ou « arrêt total ». Par ailleurs **des feuilluremètres sont disposés sur les fenêtres pour couper la climatisation en cas d'ouverture de celles-ci**.

Des compteurs de frigories sont disposés en tête de chaque demi-plateau à tous les étages. La colonne centrale qui irrigue les ventilo-convecteurs des paliers en est dépourvue.

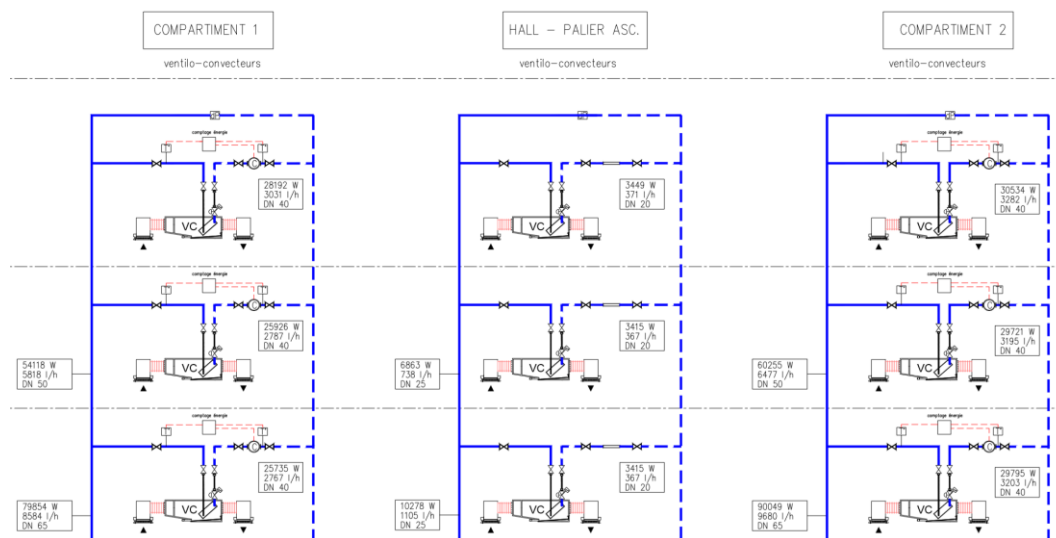


Figure 9 : Synoptique de distribution d'eau glacée (seuls les derniers niveaux sont dessinés).

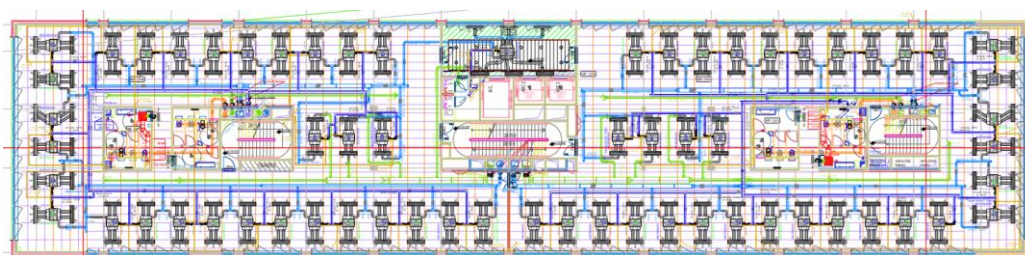


Figure 10 : Plan d'étage de la distribution d'eau glacée.

### 2.2.3 Traitement d'air

Le traitement d'air du bâtiment est assuré principalement par deux centrales double flux avec récupération de chaleur à roue (Figure 11 et Figure 12). Elles totalisent 21 480m<sup>3</sup>/h d'air soufflé et 18 570m<sup>3</sup>/h d'air repris. Il faut noter que ces CTA ne disposent pas de batteries froides mais que leurs réseaux d'air soufflé sont gainés directement sur les ventilo-convecteurs de chaque bureau, ce qui permet à l'air neuf de se mélanger à l'air recyclé et donc de traverser les batteries froides des ventilo-convecteurs.

Quelques caissons d'insufflation et d'extraction simple flux sont également mis en œuvre et totalisent 5 200m<sup>3</sup>/h soufflés et 12 215m<sup>3</sup>/h extraits.

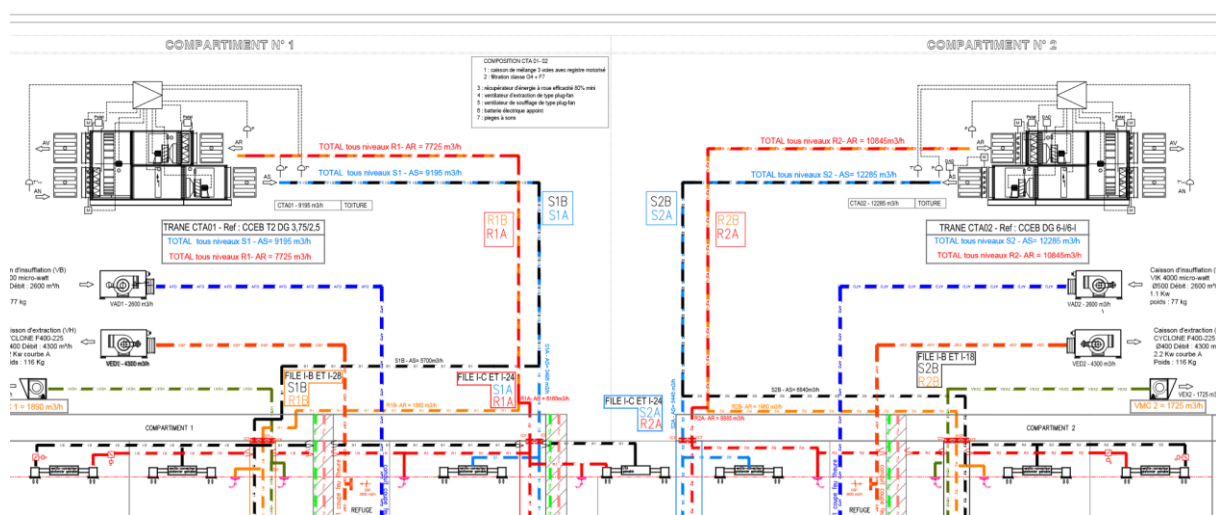


Figure 11 : Synoptique de ventilation du bâtiment Calypso.

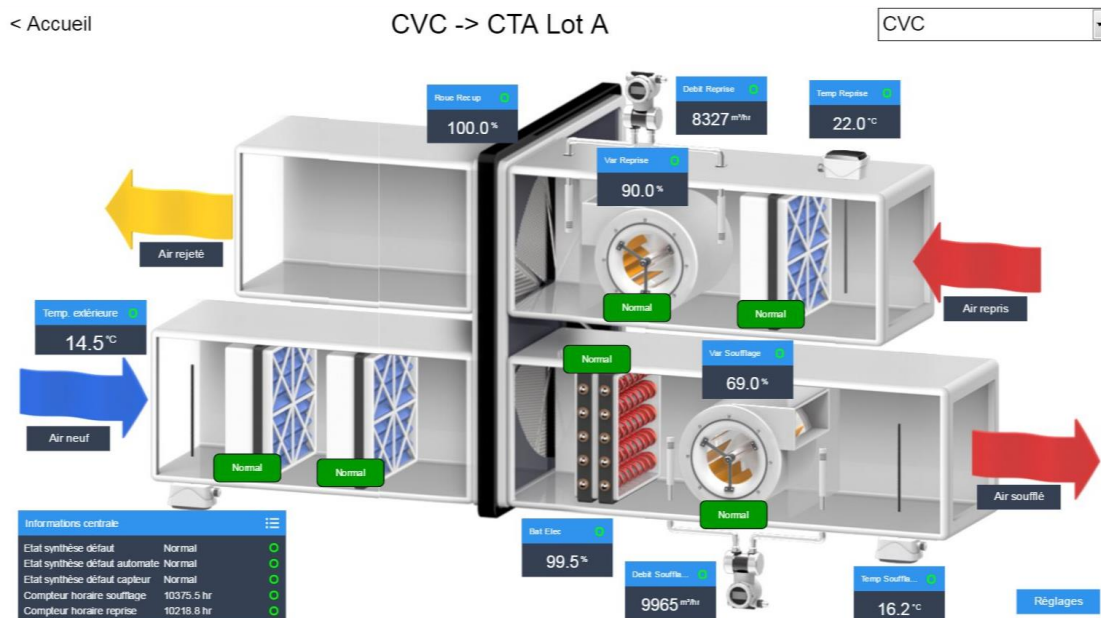


Figure 12 : Vue GTC d'une des deux CTA double-flux (récupérateur à roue)


### 3 Description de la campagne de mesures

**La campagne de mesure a duré un an : du 08/04/2017 au 07/04/2018.**

#### 3.1 Capteurs posés par Enertech

En vue de détailler le fonctionnement des installations de climatisation, de traitement d'air et de qualifier les ambiances, des capteurs ont été installés par Enertech en sous-station, au TGBT, au niveau des CTA et dans les bureaux. Ces capteurs ont fonctionné au pas de temps de 10 minutes pendant un an. Au total 50 points de mesures ont été installés, dont 22 températures et 28 points de mesure électrique (Tableau 2).

*NB : il n'a pas été nécessaire d'installer un compteur de frigorie puisque Thassalia a accepté qu'Enertech récupère les données horaires de la régulation du primaire (§3.2).*

Local	Libellé
Sous station Thassalia	Température primaire échangeur aller et retour
	Température secondaire échangeur aller et retour
	Consommation électrique pompes distribution
CTA Nord	Température air extrait CTA
	Température air soufflé CTA
	Consommation électrique
CTA Sud	Température air extrait CTA
	Température air soufflé CTA
	Consommation électrique
CTA EY	Température air extrait CTA
	Température air soufflé CTA
	Consommation électrique
TGBT	Consommation électrique générale
	Consommation électrique extracteur VED 1
	Consommation électrique extracteur VAD 1
	Consommation électrique extracteur VAD 2
Pour chaque bureau : C5107 C5115 C5214 C5207 C5210 open space R+1 sud open space R+1 nord	Température ambiante
	Hygrométrie ambiante
	Température soufflage
	Détecteur de présence
	Capteur ouverture fenêtre
Station météo installée sur un bâtiment à proximité (Mirabeau 2) avec :	
• Température	
• Hygrométrie	
• Ensoleillement	
• Vitesse vent	
• Direction vent	
• Pluviométrie	

**Tableau 2 : Capteurs posés par Enertech dans le cadre de la campagne de mesures du bâtiment Calypso.**

### 3.2 Données Thassalia

Les données suivantes sont issues des compteurs de chaleur Thassalia de l'échangeur froid de la sous-station du Calypso. Thassalia a donné son autorisation pour la communication par Cylergie de ces données à Enertech. Les données mises à disposition sont les suivantes :

- Débit de froid (pas de temps 1h)
- Volume de froid (pas de temps 10 minutes)
- Energie de froid (pas de temps 10 minutes)
- Température primaire arrivée (pas de temps 1h)
- Température primaire retour (pas de temps 1h)
- Température secondaire départ (pas de temps 1h)
- Température secondaire retour (pas de temps 1h)

### 3.3 Données GTC

Le maître d'ouvrage du bâtiment a autorisé Enertech à procéder à l'enregistrement des données GTC, qui a pu être effectué après travail de l'intégrateur. Ces données (au pas de temps de 10 minutes) sont présentées dans le Tableau 3.

Local	Libellé
Commun	Comptage énergie électrique général bâtiment
	Comptage énergie électrique CVC
	Comptage énergie électrique CVC-2
	Comptage énergie électrique ascenseur
	Comptage énergie électrique éclairage
	Comptage énergie électrique prises de courant
	Comptage de frigorie_Frigorie général
	Comptage de frigorie_Comptage volumétrique
	Comptage de frigorie_Température aller
	Comptage de frigorie_Température retour
CFA	Comptage énergie électrique général
	Comptage énergie électrique CVC
	Comptage énergie électrique Eclairage
	Comptage énergie électrique prises de courant
Pour chaque demi-niveau du Rdc jusqu'au R+6 Sud	Comptage énergie électrique général
	Comptage énergie électrique CVC
	Comptage énergie électrique Eclairage
	Comptage énergie électrique prises de courant
	Comptage de frigorie_Frigorie demi plateau
	Comptage de frigorie_Comptage volumétrique demi plateau
	Comptage de frigorie_Température aller demi plateau
	Comptage de frigorie_Température retour demi plateau
Bureau R+1 Nord 6/15/24	Demande batterie EG
Bureau R+1 Sud 8/19/29	Demande batterie électrique
Bureau R+4 Nord 6/15/24	Consigne
Bureau R+4 Sud 8/17/24	Vitesse du ventilateur
Bureau R+4 Nord 10/15/19	Température air repris

Bureau R+4 Sud 1/18	Température air repris
Bureau R+5 Nord 6/15/24	
Bureau R+5 Sud 8/19/29	
Bureau R+2 Nord 6/15/24	
Bureau R+2 Sud 8/22	
Bureau R+3 Nord 6/15/24	
Bureau R+3 Sud 8/19/29	

**Tableau 3 : Données GTC enregistrées et mises à disposition de la campagne de mesures.**

*NB : un certain nombre de données GTC se sont avérées manquantes ou non exploitables : températures soufflées par les VC, général TGBT et quelques index et températures de compteurs de frigories d'étages.*

## 4 Résultats de mesure

### 4.1 Caractéristiques de la météo à Marseille

#### 4.1.1 Résultats mensuels

La station météo du projet a été posée en toiture du bâtiment Mirabeau 2 qui se trouve à quelques centaines de mètres du bâtiment Calypso. Cette station a mesuré pendant 1 an et communiqué au pas de temps de 10 minutes les paramètres suivants : température, hygrométrie, ensoleillement, vitesse et direction du vent (photo ci-contre).



Les résultats mensuels sont présentés dans le Tableau 4.

	Température			Humidité Relative			Humidité absolue (gr. H2O / kg air sec)			Ensoleillement		DJU Clim	DJU Chauff.
	Tmin	Tmoy	Tmax	Hmin	Hmoy	Hmax	Rmin	Rmoy	Rmax	ures >120W/r	Irradiation Horiz	base 18	base 18
avr.-17	7,6°C	<b>15,6°C</b>	25,6°C	23%	<b>60%</b>	99%	3 gr	<b>8 gr</b>	15 gr	254 h	157 kWh/m2	2 dju	60 dju
mai-17	8,2°C	<b>19,3°C</b>	28,2°C	33%	<b>65%</b>	98%	6 gr	<b>11 gr</b>	20 gr	367 h	237 kWh/m2	59 dju	22 dju
juin-17	15,7°C	<b>24,4°C</b>	33,3°C	21%	<b>67%</b>	93%	7 gr	<b>16 gr</b>	25 gr	377 h	256 kWh/m2	190 dju	-
juil.-17	17,5°C	<b>25,2°C</b>	37,1°C	21%	<b>59%</b>	92%	8 gr	<b>15 gr</b>	25 gr	378 h	258 kWh/m2	226 dju	-
août-17	17,5°C	<b>25,2°C</b>	34,7°C	21%	<b>60%</b>	92%	5 gr	<b>15 gr</b>	26 gr	338 h	205 kWh/m2	225 dju	-
sept.-17	12,0°C	<b>19,3°C</b>	28,1°C	35%	<b>67%</b>	96%	7 gr	<b>12 gr</b>	19 gr	289 h	153 kWh/m2	53 dju	9 dju
oct.-17	11,3°C	<b>18,3°C</b>	25,7°C	27%	<b>68%</b>	96%	5 gr	<b>11 gr</b>	20 gr	251 h	112 kWh/m2	34 dju	14 dju
nov.-17	4,7°C	<b>12,0°C</b>	21,0°C	34%	<b>66%</b>	97%	4 gr	<b>7 gr</b>	15 gr	163 h	57 kWh/m2	1 dju	168 dju
déc.-17	0,9°C	<b>8,9°C</b>	16,9°C	44%	<b>74%</b>	99%	3 gr	<b>7 gr</b>	13 gr	113 h	39 kWh/m2	-	278 dju
janv.-18	6,6°C	<b>12,6°C</b>	18,8°C	38%	<b>72%</b>	96%	4 gr	<b>8 gr</b>	12 gr	131 h	45 kWh/m2	-	169 dju
févr.-18	-1,5°C	<b>7,3°C</b>	15,5°C	37%	<b>68%</b>	97%	2 gr	<b>6 gr</b>	11 gr	174 h	69 kWh/m2	-	294 dju
mars-18	2,1°C	<b>11,9°C</b>	18,0°C	28%	<b>71%</b>	97%	3 gr	<b>8 gr</b>	12 gr	265 h	131 kWh/m2	-	186 dju
avr.-18	8,8°C	<b>15,2°C</b>	22,5°C	32%	<b>63%</b>	89%	5 gr	<b>8 gr</b>	12 gr	68 h	37 kWh/m2	1 dju	27 dju
totaux :										<b>3 169 h</b>	<b>1 757 kWh/m2</b>	<b>791 dju</b>	<b>1228 dju</b>

Pic  
estival

**Tableau 4 : Grandeurs mensuelles mesurées par la station météo du projet (installée en toiture du bâtiment Mirabeau2 à Marseille).**

Ces données mettent en évidence une période estivale très concentrée en juin/juillet/août avec des températures moyennes mensuelles supérieures à 24°C, des températures maximales dépassant les 30°C (maximale à 37.1°C) et des DJU<sub>clim</sub> qui concentrent en trois mois 80% de la somme des DJU<sub>clim</sub> annuels.

En termes de DJU<sub>clim</sub>, Marseille a surclassé en 2017 la plupart des villes de France (tableau ci-contre) avec un facteur quasiment 2 en comparaison de villes comme Paris ou Nantes (référence utilisée :

<https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2017/marseille-marignane-marseille-provence/valeurs/07650.html> )

Infoclimat	DJUclim 2017	p/r Marseille
Montpellier	795	1%
Nice	766	-3%
Lyon	635	-20%
Bordeaux	574	-27%
Strasbourg	471	-40%
Paris	441	-44%
Nantes	376	-52%

#### 4.1.2 Température et hygrométrie

Les courbes de température et hygrométrie à 10 minutes sont présentées en Figure 13. Ces courbes temporelles permettent de visualiser la saisonnalité de la température avec le pic estival en juin/juillet/août. Une courte période de canicule<sup>2</sup> est également visible début août.

<sup>2</sup> Les seuils officiels de la canicule à Marseille sont de 35°C le jour et 24°C la nuit.



On observe également la stabilité annuelle de l'amplitude jour/nuit de l'hygrométrie relative, qui se traduit cependant par une saisonnalité forte de l'hygrométrie absolue comme montré dans le Tableau 4 : 15 à 16 gr<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>airsec</sub> en été avec des pics à 25 grammes contre 7 à 8 gr<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>airsec</sub> en hiver avec des pics à 12 grammes. Rappelons que l'hygrométrie absolue de l'air conditionne la quantité d'énergie latente qui entre en jeu dans l'émission de froid (déshumidification de l'air subie au niveau des batteries froides des ventilo-convecteurs).

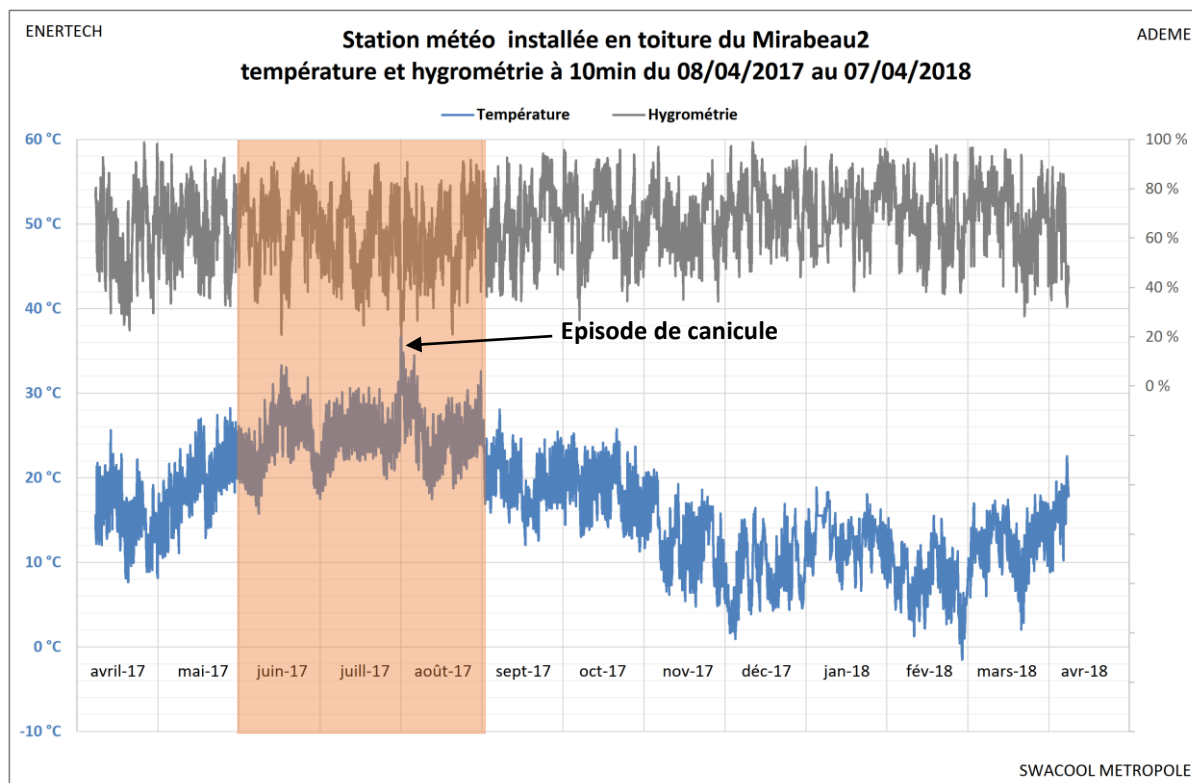


Figure 13 : Température et hygrométrie mesurées par la station météo du projet.

Les deux graphiques suivants (Figure 14 et Figure 15) permettent de visualiser les moyennes, min et max mensuels de la température et de l'hygrométrie mesurées par la station du projet, comparés aux mêmes grandeurs sur la station météo de Marignane située à 19km à vol d'oiseau au bord de l'étang de Berre. L'intérêt de cette comparaison est de quantifier l'écart entre une météo locale et une météo de référence située plus à l'intérieur des terres.



Les mesures montrent que la situation maritime du bord de mer à Marseille permet globalement d'atténuer l'amplitude de variation des températures. Les pics de chaleur en été et les pics de froid en hiver sont légèrement moins marqués sur la station météo du projet. Par ailleurs l'humidité de l'air au niveau de la station est sensiblement plus élevée que celle de la station de Marignane.

**La station de Marignane montre par ailleurs que les températures de l'été 2017 sont globalement restées dans les normales de saison.**



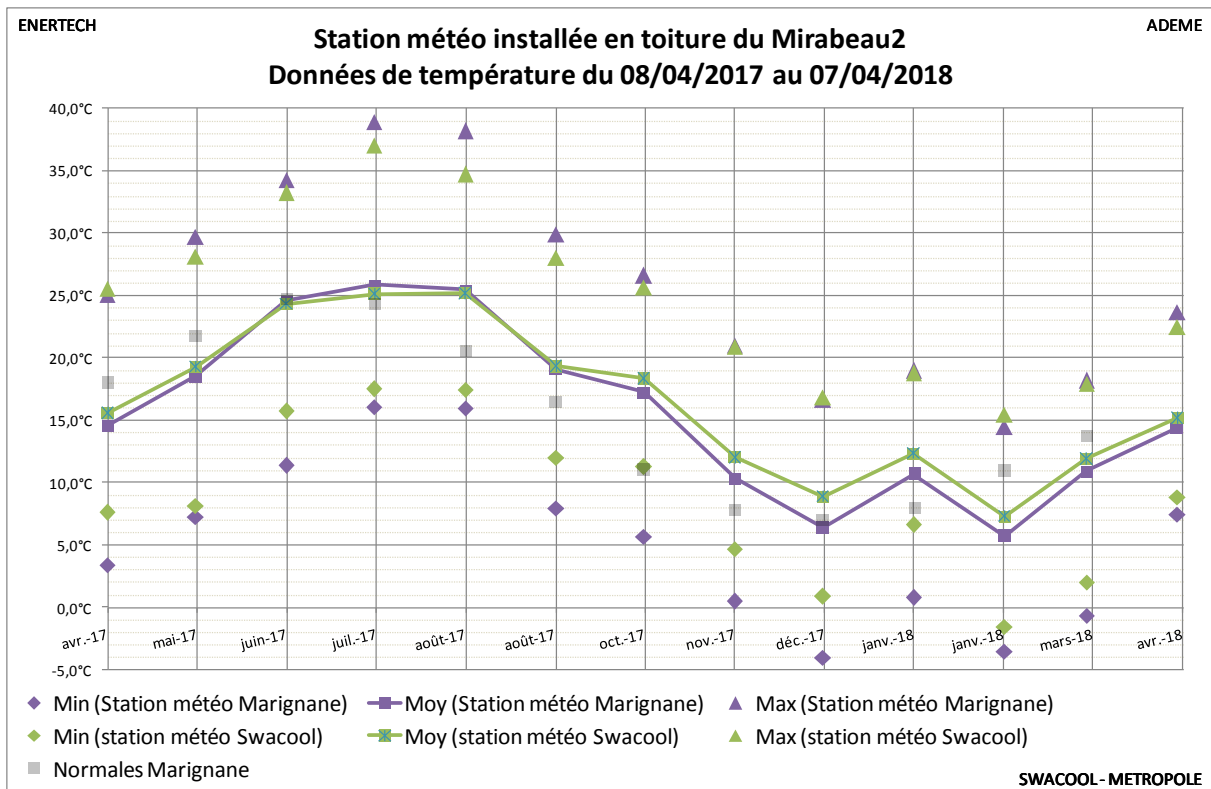


Figure 14 : Températures mensuelles comparées entre la station météo du projet et la station météo de Marignane.

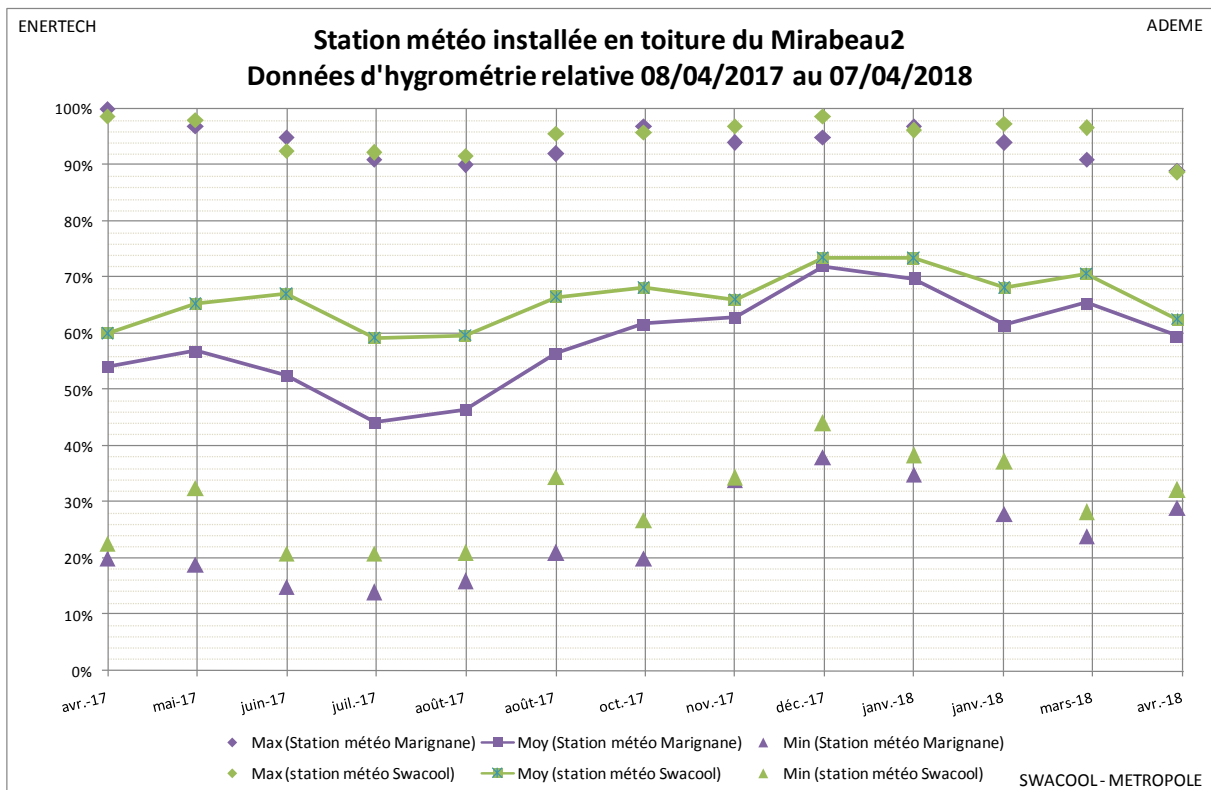


Figure 15 : Hygrométries mensuelles comparées entre la station météo du projet et la station météo de Marignane.

### 4.1.3 Ensoleillement

L'ensoleillement mesuré est présenté en Figure 16 et Figure 17. D'après la station de Marignane l'ensoleillement de mai à septembre 2017 a été de 6% supérieur à la normale.

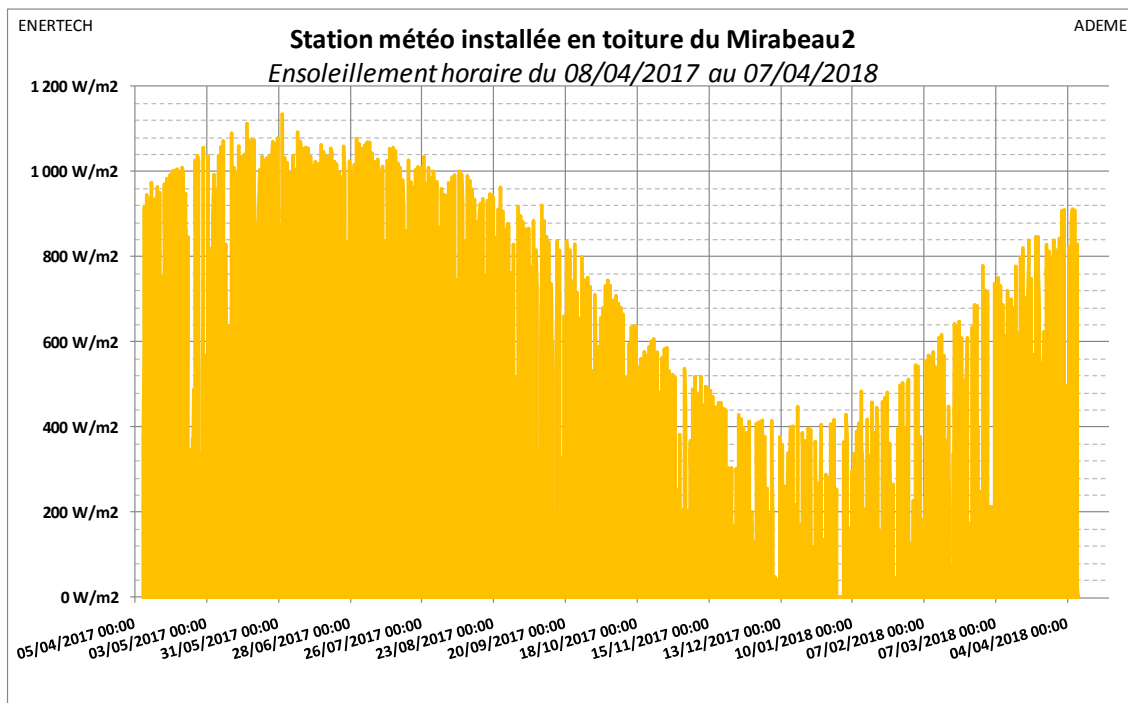


Figure 16 : Irradiation horaire mesurée par la station météo du projet.

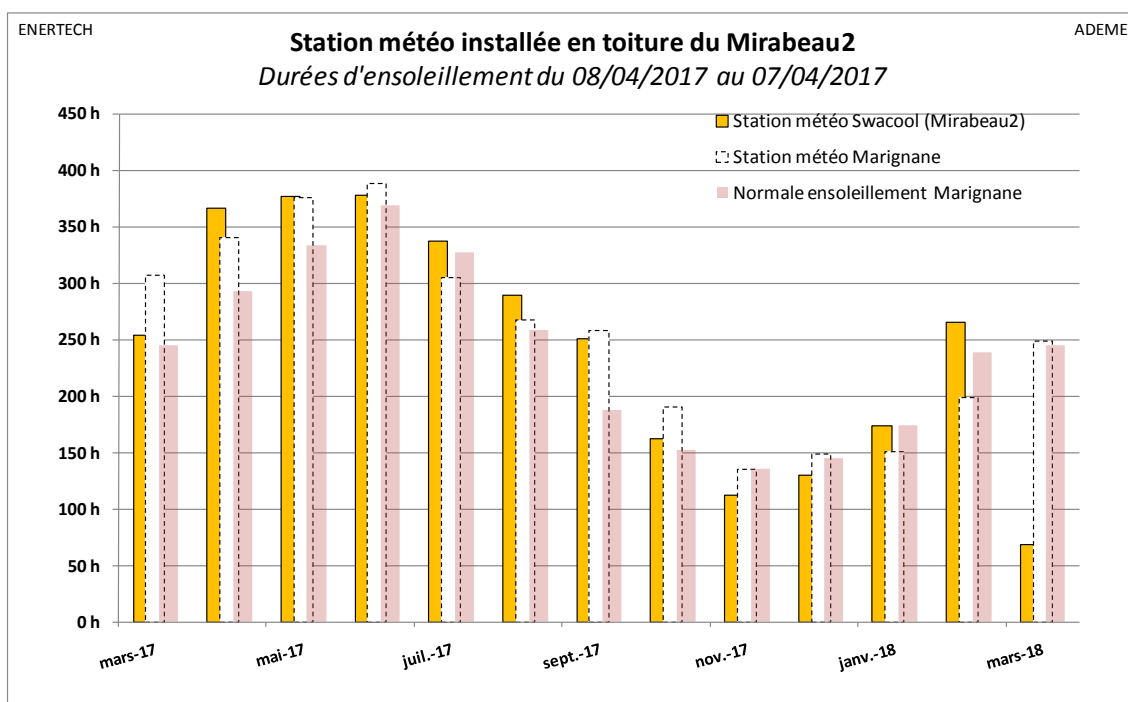


Figure 17 : Durées d'ensoleillement comparées entre la station météo du projet et celle de Marignane (avec normales d'ensoleillement à Marignane).

## 4.2 Consommation de froid du bâtiment

### 4.2.1 Variabilité saisonnière

La consommation d'énergie utile de froid du bâtiment est mesurée par enregistrement horaire des données du compteur Thassalia. Le bâtiment Calypso a consommé **196MWh<sub>froid</sub>** entre mai et novembre 2017 ce qui représente **19.8kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup>/an**, consommation faible comparée au Golden Tulip (88.8kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup>/an) ou au Mirabeau2 (81.4 kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup>/an).

La variabilité mensuelle de la consommation est très marquée (Figure 18) avec 77% de la consommation réalisée entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 août 2017. La corrélation avec les DJU de climatisation est très forte comme illustré ci-dessous ( $R^2=0.97$ ).

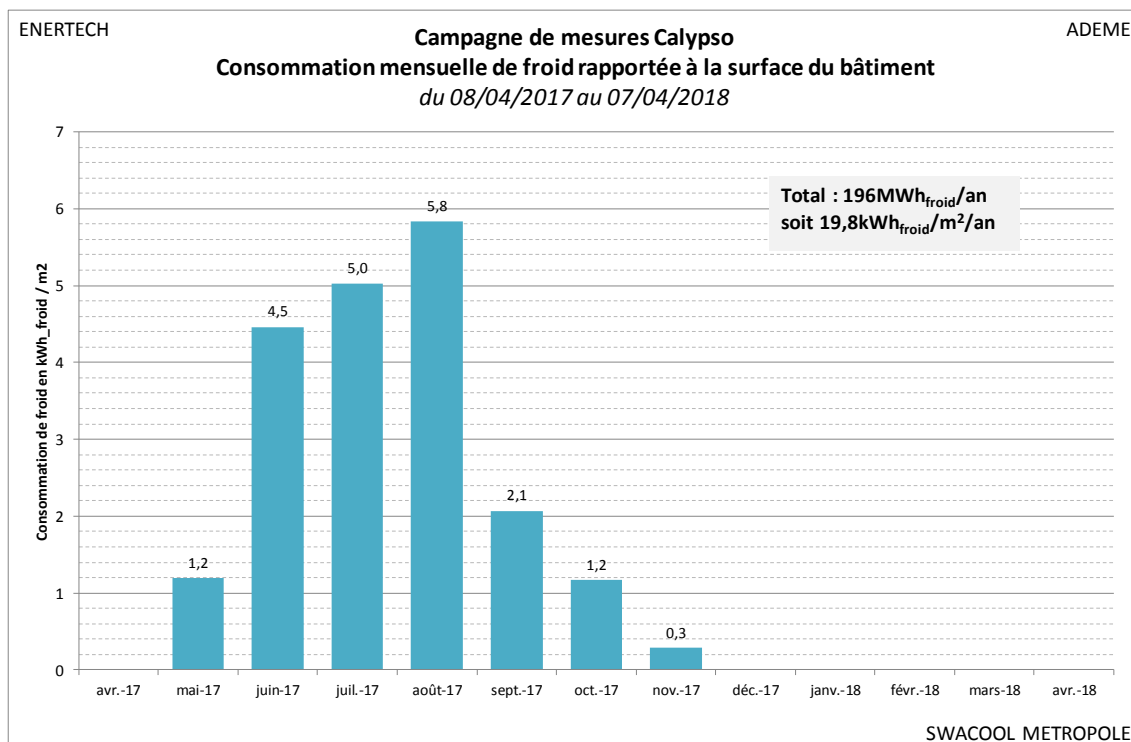
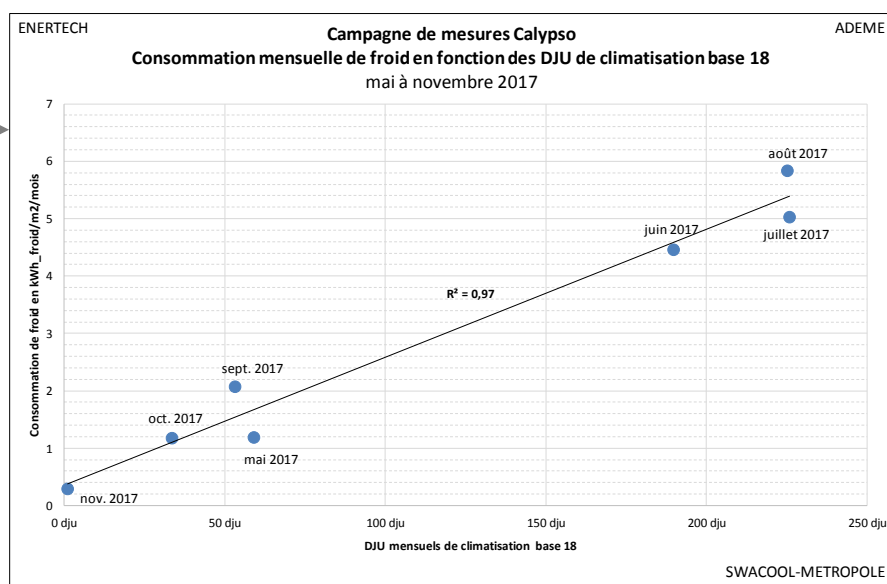


Figure 18 : Consommation mensuelle de froid du bâtiment prise sur l'échangeur.

Lien avec les  
DJU clim



#### 4.2.2 Signature énergétique

Nous tentons ici d'approcher plus finement la dépendance de la consommation journalière de climatisation du bâtiment aux conditions météorologiques extérieures.

**La meilleure corrélation a été obtenue avec la température extérieure** (Figure 19) : corrélation linéaire de  $R^2=0.76$  en jour ouvré et  $R^2=0.65$  le week-end pour des températures extérieures supérieures à 18°C. La signature des consommations est donc relativement nette. On distingue néanmoins un « talon de consommation » pour les températures extérieures inférieures à 18°C. Ce talon représente l'énergie nécessaire pour vaincre les apports internes et solaires ainsi que les pertes de distribution en bord de saison de climatisation.

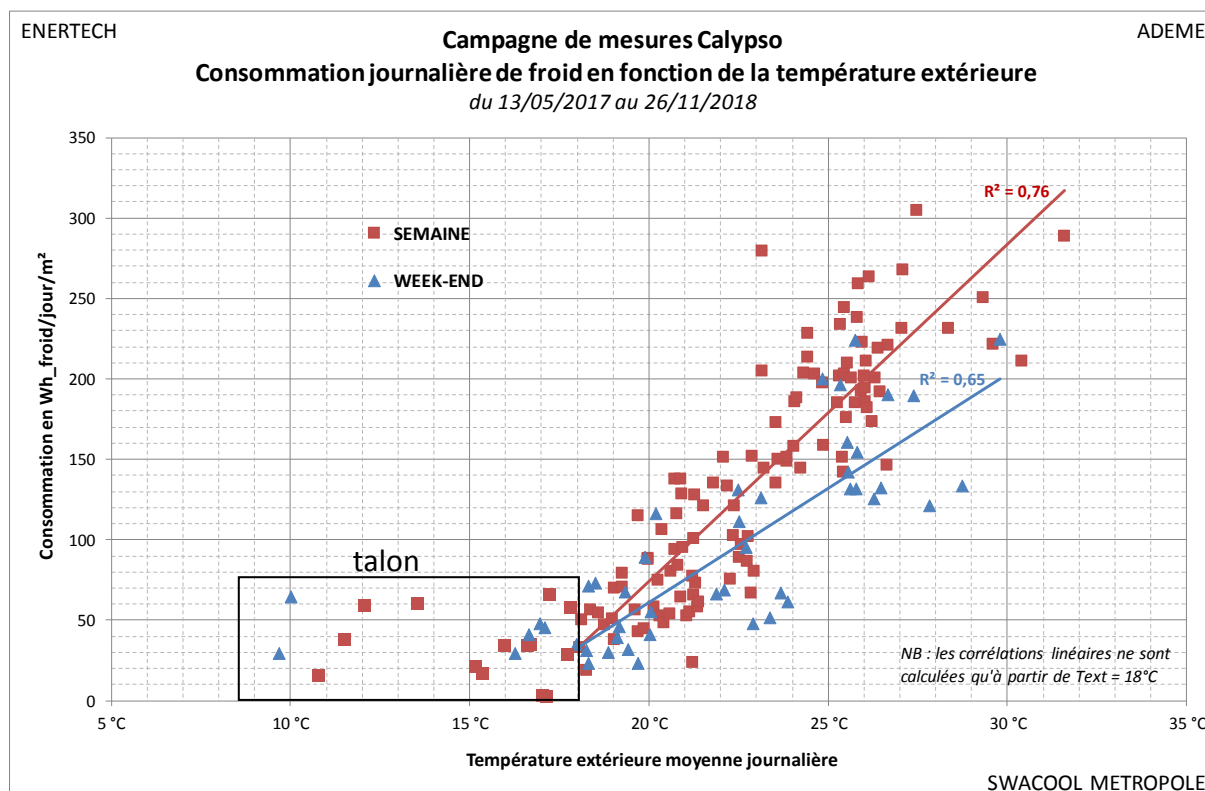


Figure 19 : Signature énergétique de la consommation de froid du bâtiment Calypso en fonction de la température extérieure.

Contrairement aux cas mesurés sur l'île de La Réunion, la corrélation avec l'enthalpie de l'air extérieur est moins bonne sur le Calypso ( $R^2=0.61$  pour la régression linéaire en semaine et  $R^2=0.48$  pour la régression linéaire le week-end) qu'avec la température. Ceci est peut-être dû au fait que la part latente de la consommation de climatisation est moins importante qu'à La Réunion (climat moins humide et peut-être aussi moins d'échange d'air entre le bâtiment et l'extérieur du fait de la contrainte hivernale).

Par ailleurs la distinction des signatures jours ouvrés / week-ends permet de quantifier le bénéfice du ralenti de la climatisation le week-end : moins 27% en moyenne par rapport à la consommation en semaine.

Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, la façade principale du bâtiment orientée à l'ouest **n'entraîne pas de sensibilité particulière de la consommation de climatisation à l'ensoleillement** (Figure 20) : la corrélation avec l'irradiation horizontale journalière est très faible et le demeure même si l'on considère l'irradiation postérieure à midi solaire.

De plus il est constaté que la dispersion des points autour de la signature énergétique en température (Figure 19) n'est pas liée non plus à l'irradiation.

Nous pouvons en conclure que sur le bâtiment Calypso les autres contributeurs à la charge de climatisation (échanges conductifs et aérauliques liés au dT intérieur-extérieur, apports internes à combattre, pertes du réseau) sont dominants devant l'irradiation solaire.

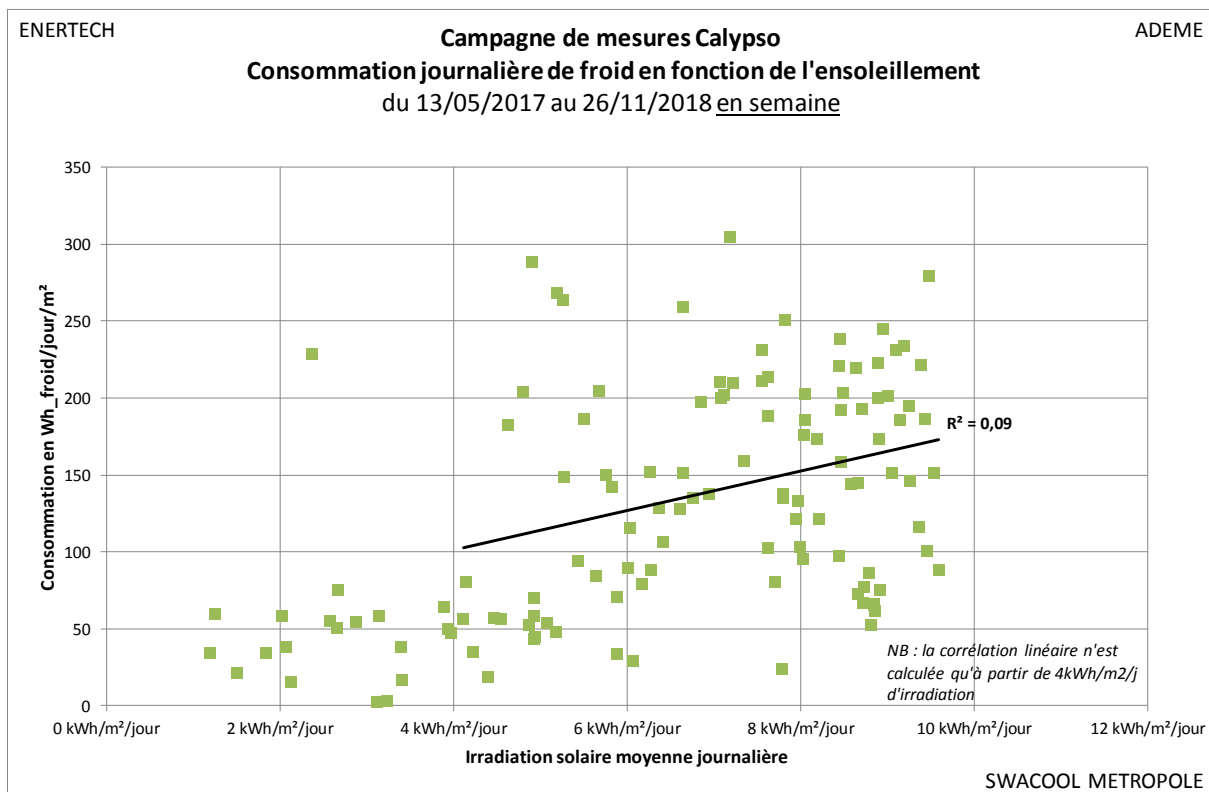


Figure 20 : Signature énergétique de la consommation de froid du bâtiment Calypso en fonction de l'irradiation solaire (jours ouvrés). Corrélation faible à nulle.

#### 4.2.3 Intermittence journalière

Les détecteurs de présence disposés dans les bureaux permettent aux régulateurs des VC de basculer sur leur consigne d'inoccupation (programmée sur la GTC). Une intermittence occupation/inoccupation est donc visible au niveau des consommations. Sur l'ensemble de la saison de climatisation, **la consommation en occupation a représenté 57% de la consommation totale** alors que l'occupation proprement dite (jours ouvrés de 7h à 19h) représente environ 40% du temps. **Cela signifie que la puissance froide appelée baisse environ de moitié en inoccupation.**

Les courbes de charge hebdomadaires et journalières (Figure 21 et Figure 22) confirment cette tendance avec une baisse de puissance appelée de 60 à 70% la nuit en semaine et de

28 à 35% le week-end. Cette intermittence s’explique essentiellement par la gestion de l’inoccupation décrite en §2.2.2 ; on note cependant qu’elle ne semble pas optimale car on attendrait une baisse de consommation plus forte la nuit et surtout les week-ends.

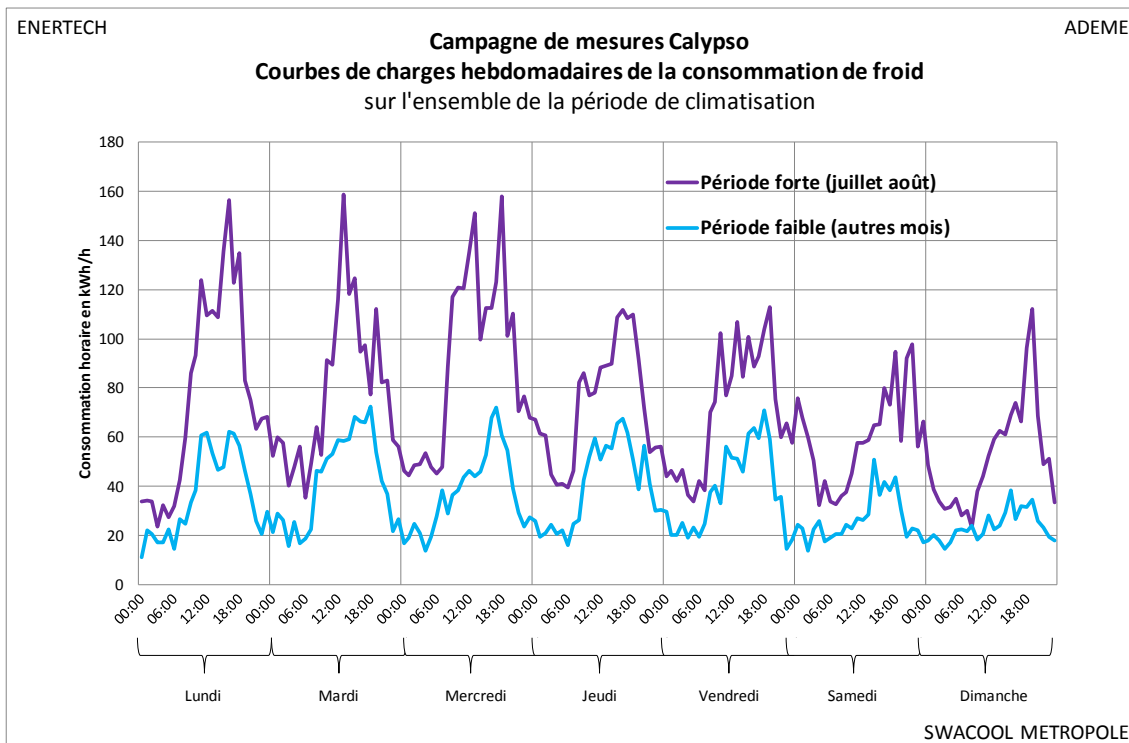


Figure 21 : Courbes de charges hebdomadaires de la consommation de froid du bâtiment.

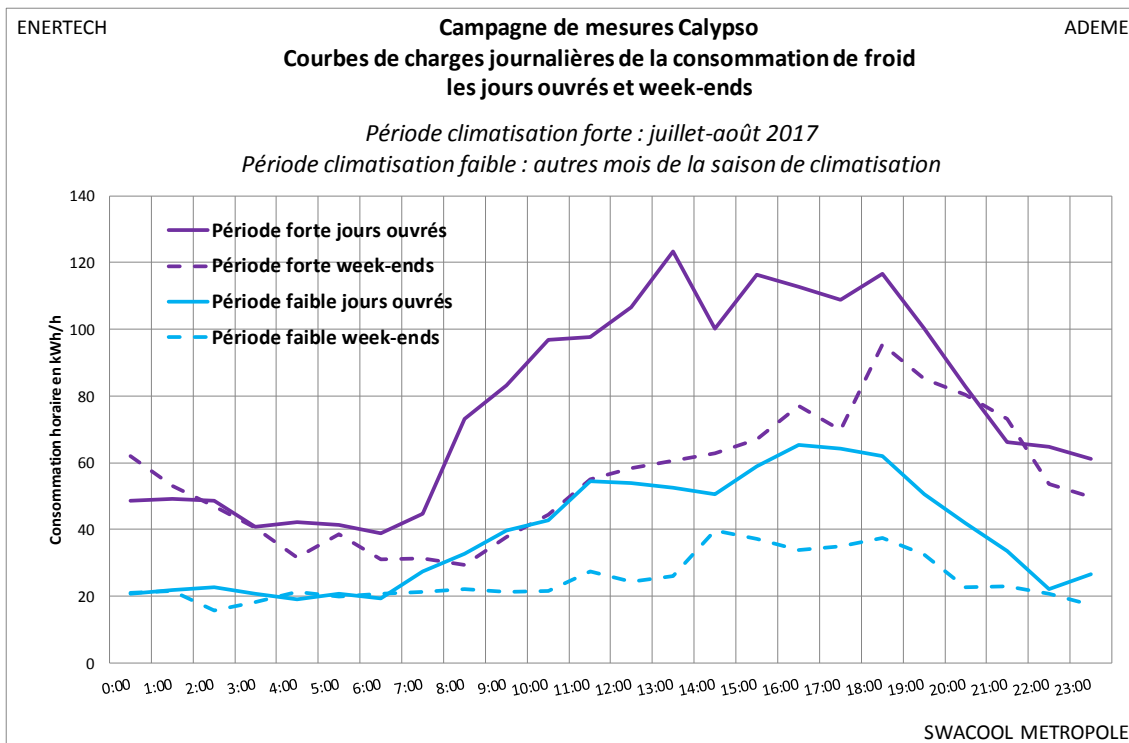


Figure 22 : Courbes de charges journalières de la consommation de froid du bâtiment.

#### 4.2.4 Puissance appelée

Le monotone de la puissance de climatisation appelée par le bâtiment Calypso est présentée en Figure 23. La puissance souscrite est de 390kW et n'a été dépassée que pendant 1 heure en 2017. La puissance de 300kW n'a été dépassée que pendant 10 heures, on peut donc s'interroger sur la pertinence de la puissance souscrite étant donné son poids important dans la facture énergétique du bâtiment (coût du kW souscrit non communiqué).

Par ailleurs on peut constater que **la puissance appelée est au moins 4 fois inférieure à la puissance souscrite environ 90% du temps**. Cette donnée montre qu'il est primordial de définir à la conception un réseau et une production capables de s'adapter à une telle variation de puissance tout en conservant des régimes température avantageux pour les réseaux (c'est-à-dire minimisant les débits). C'est la problématique qui est abordée en §4.3.

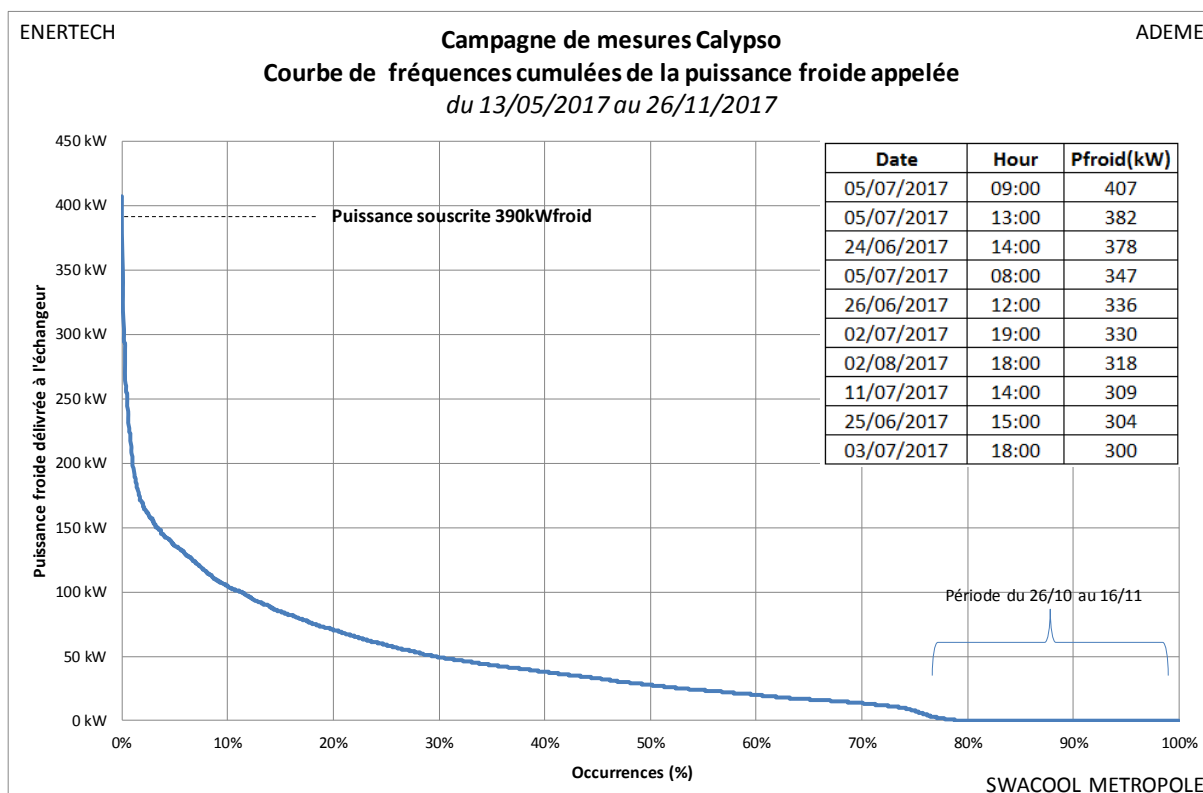


Figure 23 : Monotone de la puissance froide appelée à l'échangeur durant la saison de climatisation.

### 4.3 Régimes de températures et débits

#### 4.3.1 Vue d'ensemble

Le graphique de la Figure 24 présente une vue d'ensemble des 4 températures aux bornes de l'échangeur Thassalia et du débit primaire entre mai et octobre. Avant d'entrer dans les détails on peut déjà constater :

- Qu'aucune des 4 températures n'est constante. Même la température d'arrivée de la boucle Thassalia, théoriquement stable à 6°C, subit des variations sensibles avec une



élévation jusqu'à 8-10°C en bord de saison de climatisation notamment en septembre-octobre.

- Que les « delta T°C » des réseaux primaires et secondaires ne sont pas de 8°C comme prévu en conception (à la puissance nominale), mais plutôt de 5-6°C au primaire et 3-4°C au secondaire.
- Que le débit délivré au primaire varie globalement comme la puissance absorbée, excepté sur certaines phases où la puissance appelée est faible et où la V2V (donc le débit primaire) entre dans un phénomène de « pompage ».

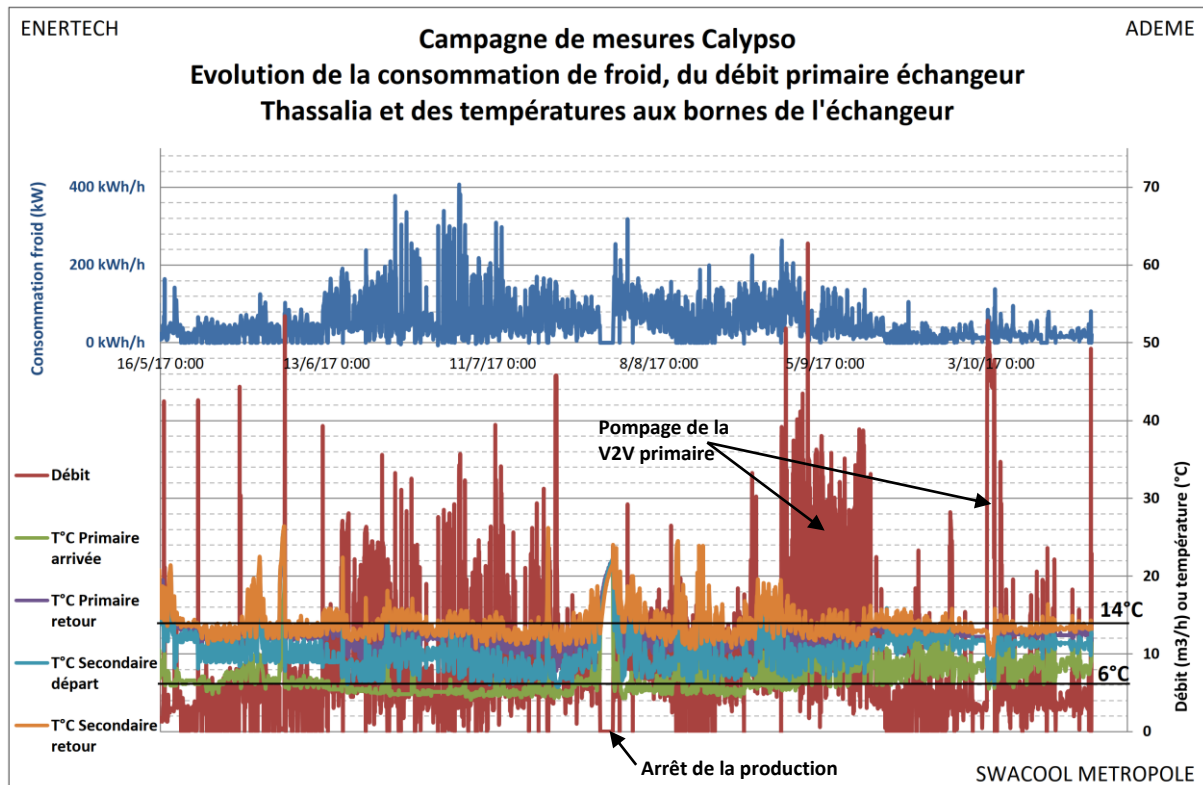


Figure 24 : Visualisation temporelle de l'ensemble des paramètres principaux mesurés aux bornes de l'échangeur Thassalia du bâtiment Calypso, durant l'ensemble de la saison de la climatisation.

Les paragraphes suivants s'appliquent à mieux détailler et quantifier les régimes de fonctionnement primaire/secondaire en température et en débit.

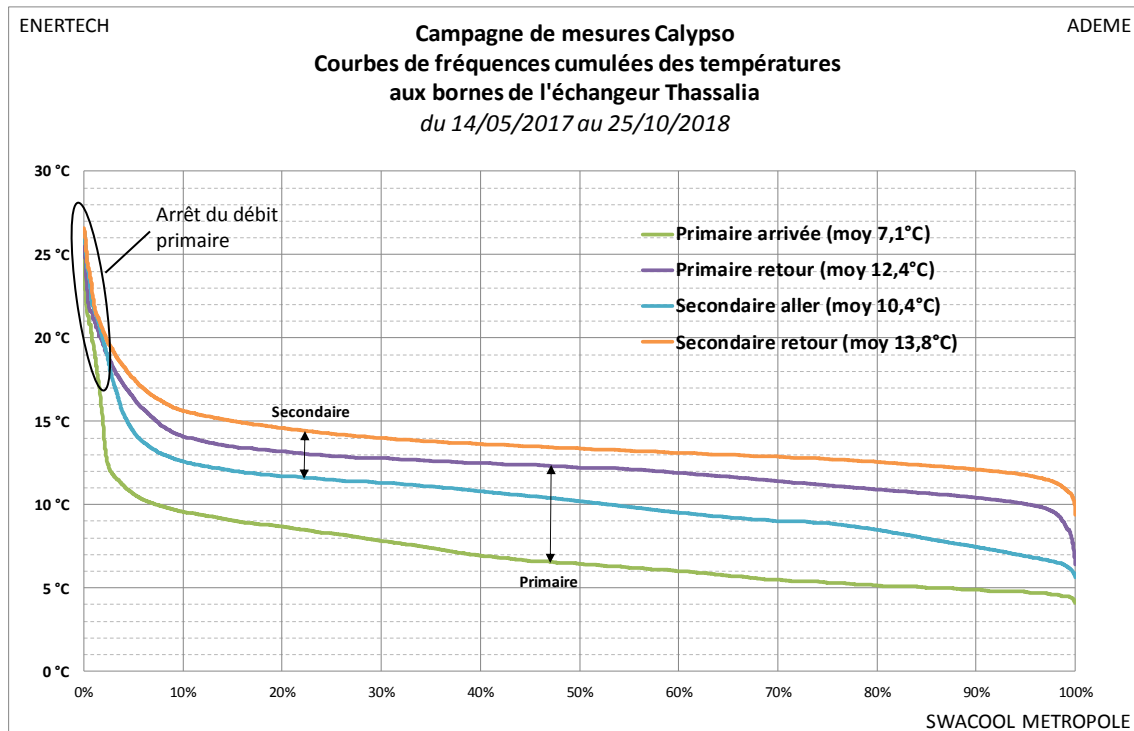
#### 4.3.2 Températures primaire/secondaire

Voici **ce qui était attendu du fonctionnement** d'après les régulations décrites dans les documents consultés et les informations recueillies sur place :

- Une température délivrée à 6°C par Thassalia avec un retour à 14°C, à la puissance nominale (autour de 400kW) ;
- Une V2V (Thassalia) qui module le débit a primaire en fonction de la puissance consommée par le bâtiment (loi de pilotage non connue) ;

- Un débit variable au secondaire qui dépend du nombre d'émetteurs en demande (pompe à variation de vitesse avec consigne de pression constante).
- Un régime de température au secondaire qui subit l'ensemble des contraintes ci-dessus, avec un équilibre de régime à 7°C/15°C lorsque la puissance nominale est appelée.

Les graphiques suivants montrent les régimes de température réels mesurés durant la saison de climatisation, en courbe de fréquence cumulée (Figure 25) et en « delta T°C » en fonction de la puissance d'échange (Figure 26).



**Figure 25 : Courbes de fréquences cumulées des températures aux bornes de l'échangeur durant la saison de climatisation.**

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- La température primaire délivrée par Thassalia a été légèrement plus chaude que prévu avec 6.8°C de moyenne (si l'on exclut les points à débit nul) et une variation courante dans la plage 4.5°C – 10.5°C (90% du temps).
- Le pincement des températures retour secondaire / retour primaire est assez bon, avec 1.4°C en moyenne entre les 2 sorties d'échangeur, ce qui démontre un comportement correct de la V2V Thassalia dans le sens d'une minimisation du débit primaire pour délivrer la puissance absorbée au secondaire (minimisation bien évidemment recherchée par Thassalia pour améliorer son COP et minimiser ses charges).
- En revanche on constate un « delta T°C » secondaire assez faible (moyenne 3.4°C), surtout lié au fait que le débit secondaire est globalement trop élevé par rapport à la puissance distribuée (Cf. §4.3.3).

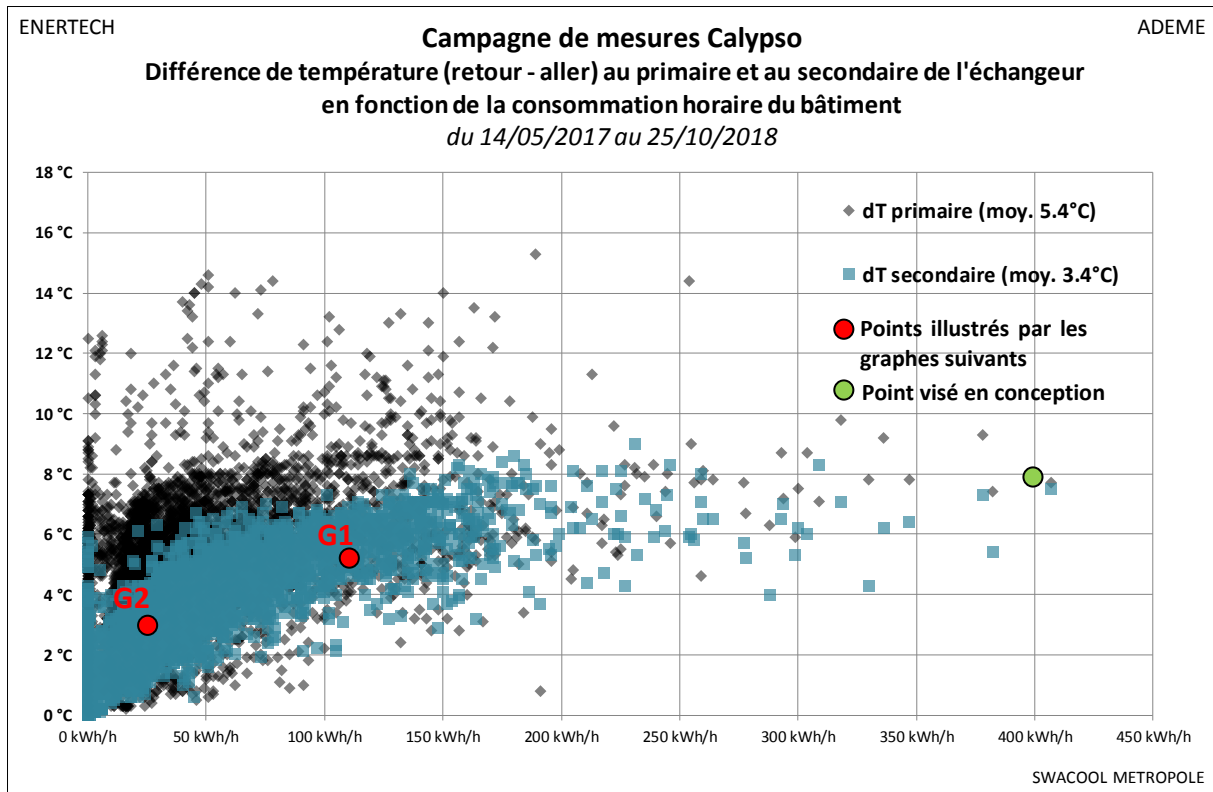


Figure 26 : Différences de températures aller/retour du primaire et du secondaire en fonction de la puissance délivrée par l'échangeur.

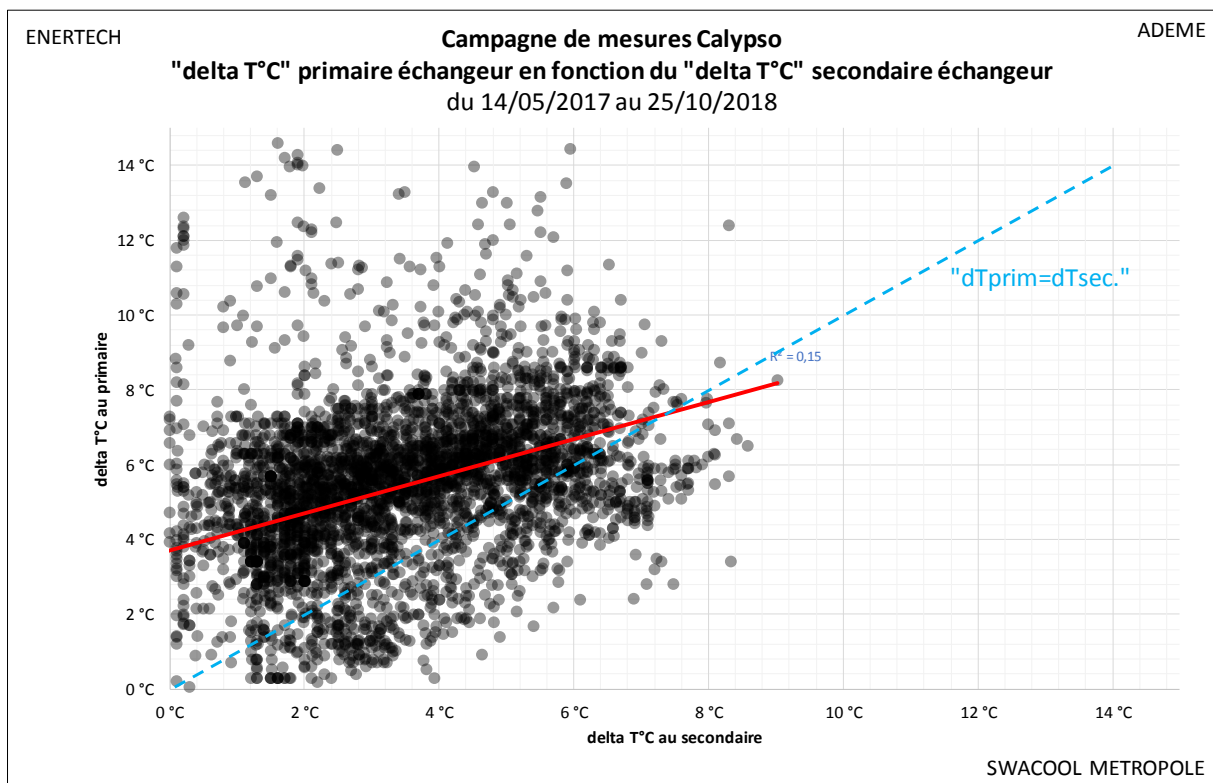


Figure 27 : « delta T » réalisé au primaire de l'échangeur en fonction du « delta T » réalisé au secondaire.

On constate en effet sur la Figure 26 que le « delta T°C » secondaire, s'il est correct à la puissance nominale (point vert) s'affaisse aux puissances intermédiaires. La variation de débit insuffisante de la pompe et/ou le bypass provoqué par les soupapes de décharge en tête de colonne, ne permet pas de maintenir le delta T°C de 8°C observé aux fortes puissances, malgré la mise en œuvre de V2V terminales sur les ventilo-convecteurs.

Il s'en suit dans ces conditions un retour secondaire plus froid que prévu (recyclage). Le « delta T°C » (dT) secondaire diminuant, la V2V au primaire se ferme (voir sa loi d'évolution au §4.3.3) ce qui permet, tout en passant la puissance nécessaire, de maximiser le dT au primaire (moyenne 5.4°C) qui est d'ailleurs supérieur en moyenne au dT secondaire (moyenne 3.4°C) si on met à part les transitoires et les phénomènes de pompage (Figure 27). La réaction du primaire Thassalia s'adapte donc convenablement au bâtiment Calypso, compte tenu des limites de fonctionnement imposées par ce dernier.

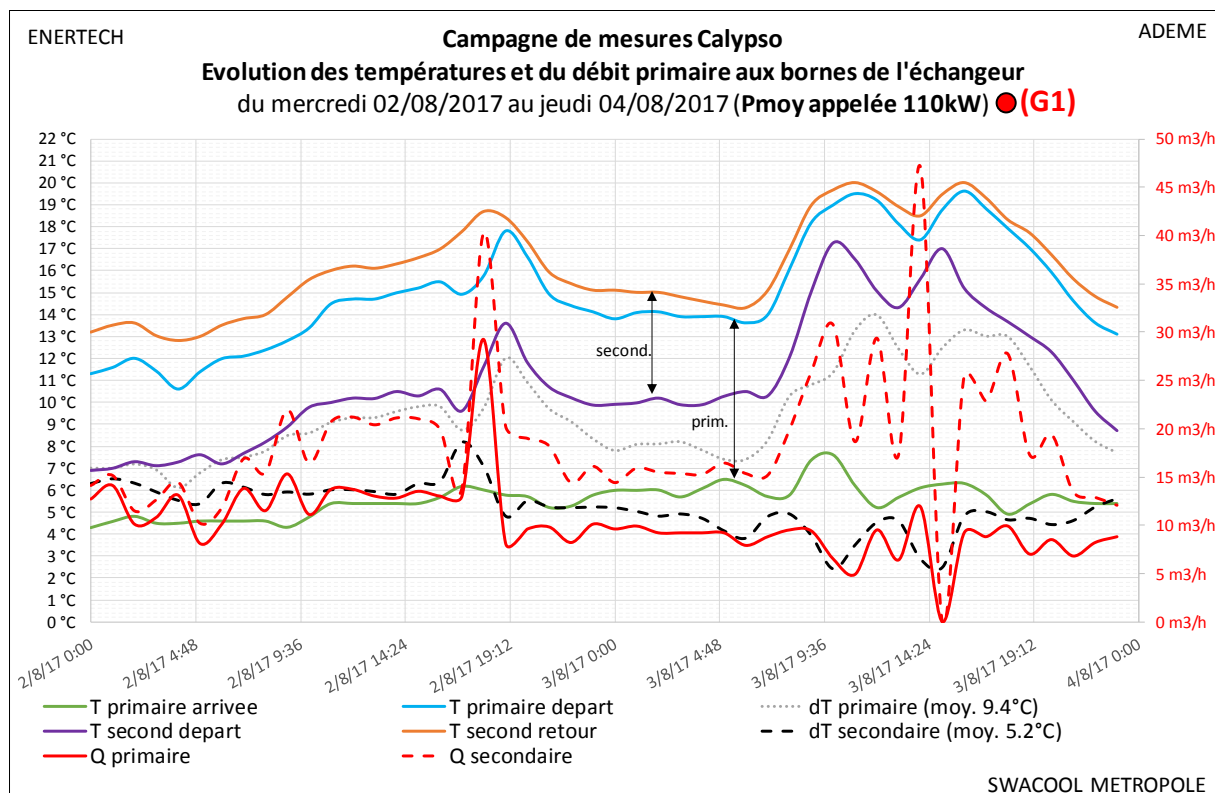
Le dT plutôt faible du secondaire Calypso a deux effets néfastes :

1. Il occasionne une surconsommation électrique de la distribution (sur-débit du réseau pour acheminer une puissance donnée).
2. Il contraint le dT primaire à diminuer ce qui provoque un sur-débit au primaire pour transmettre une puissance donnée au bâtiment ainsi qu'une hausse de la température de retour à Thassalia (donc dégradation du COP Thassalia).

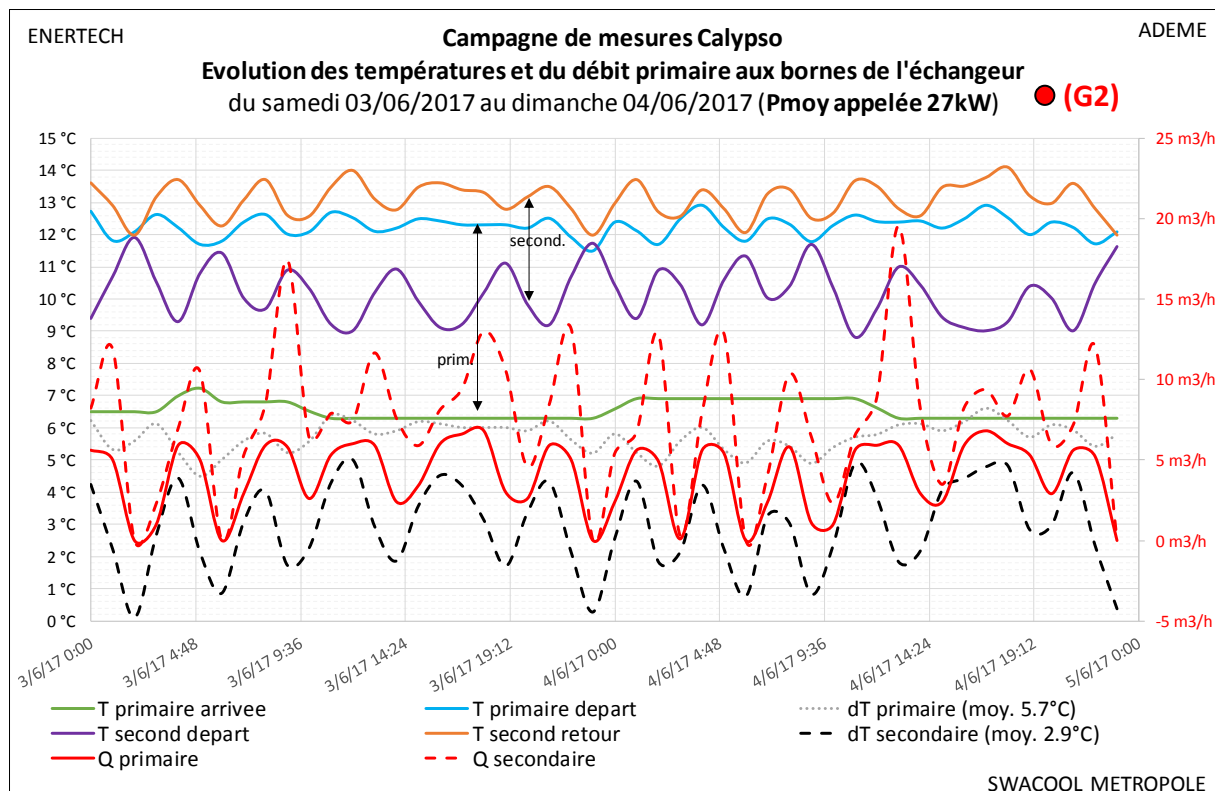
Les deux graphiques suivants illustrent ce qui précède avec deux régimes de fonctionnement différents :

- Une puissance moyenne (Figure 28, 110kW) où le retour secondaire est suffisamment chaud (moyenne 16°C) pour permettre au primaire de fonctionner à un dT avantageux de 9.4°C qui permet bien de minimiser le débit primaire ; en revanche on observe le matin du 03/08 un phénomène d'augmentation de la T°C de départ secondaire amplifiée par la régulation du primaire (décrite en §4.3.3). Ce phénomène est difficilement évitable compte tenu de la régulation en place au primaire, elle-même imposée par l'insuffisance de variation du débit au secondaire (voir §4.3.3).
- Une puissance faible (Figure 29, 27kW) où le retour secondaire est plus froid que dans le cas précédent (moyenne 13°C) ce qui provoque un affaissement du dT primaire (5.7°C) amplifié par le fait que l'arrivée de la boucle Thassalia est aussi plus chaude (moyenne 6.5°C). Un débit secondaire plus faible sur cette séquence permettrait de sortir de l'échangeur à une température plus froide et le cas échéant de revenir plus chaud. Cela maximiserait le dT secondaire ce qui serait favorable au régime primaire.

**NB :** On observe par ailleurs sur le 2<sup>e</sup> cas (Figure 29) un pompage de la régulation de la V2V au primaire, qui a pour effet d'envoyer des trains de froid dans le bâtiment (oscillation entre 0kW et 50kW) ce qui se répercute sur la température de départ secondaire qui oscille avec une amplitude de 2°C. ce type de pompage s'est produit à plusieurs reprises durant la saison (Cf. Figure 24) et nécessiterait d'investiguer le réglage du PID de la V2V du primaire Calypso.



**Figure 28 : Temporel n°1 : fonctionnement à moyenne puissance, retour secondaire chaud idéal pour la régulation primaire**



**Figure 29 : Temporel n°2 : fonctionnement à faible puissance, retour secondaire plus froid ce qui limite le dT primaire et donc augmente le débit primaire pour véhiculer la puissance. On observe par ailleurs un « pompage » du système lié à la régulation de la V2V primaire.**

### 4.3.3 Débits primaire/secondaire

#### Régulation du débit primaire

N'ayant pu obtenir la loi de régulation de la V2V auprès des acteurs du projet, nous avons essayé plusieurs corrélations entre le débit du primaire et les différentes températures mesurées aux bornes de l'échangeur. La meilleure corrélation a été (de loin) obtenue avec le dT secondaire avec lequel on observe une loi de débit proportionnelle (Figure 30).

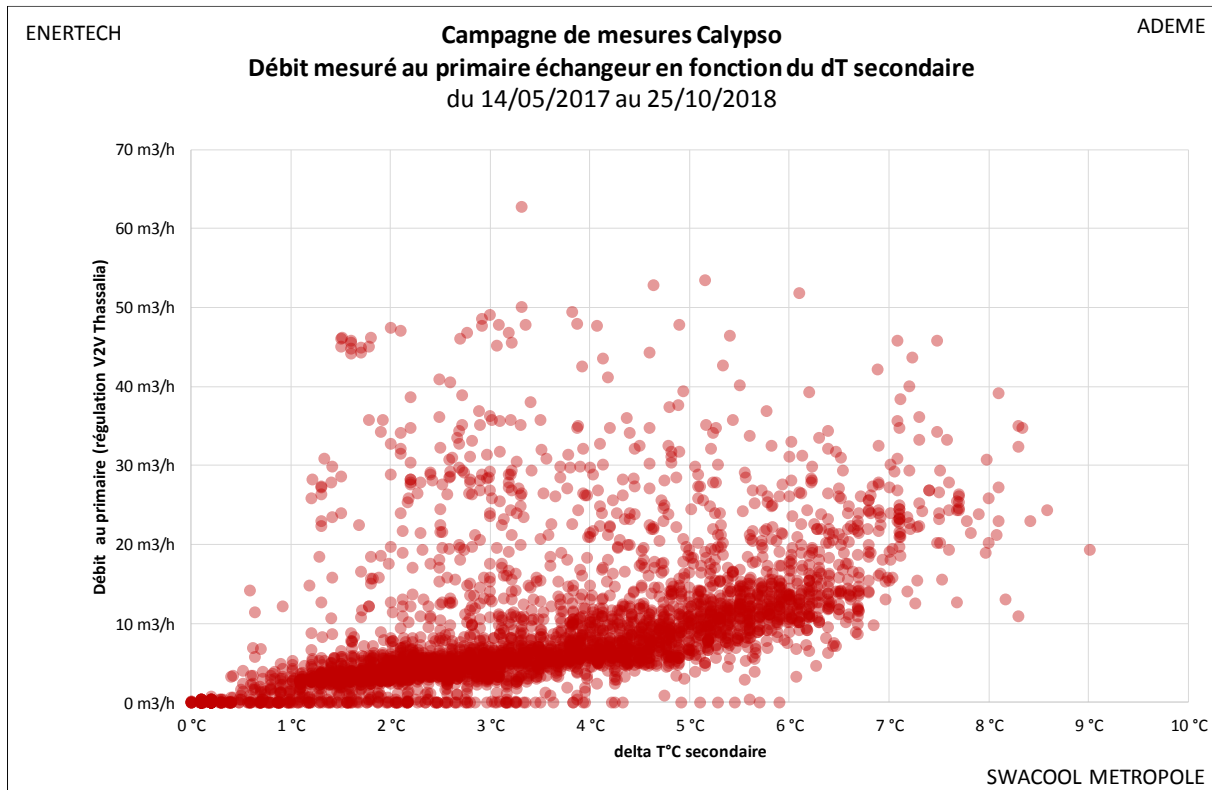


Figure 30 : Corrélation entre le débit primaire et le dT secondaire échangeur (loi de régulation de la V2V Thassalia).

**La V2V Thassalia piloterait donc le débit au primaire proportionnellement au dT secondaire.** Cette régulation peut paraître surprenante au regard du fonctionnement théoriquement prévu au secondaire (régime 7°C - 15°C avec variation de débit, donc pas de variation prévue du dT secondaire) toutefois le régime secondaire est loin de ce comportement théorique comme on a pu le constater, ce qui légitime cette approche. Le couplage obtenu est néanmoins complexe car au lieu d'avoir un système d'adaptation des débits et régimes de températures constantes, on obtient des régimes de température qui se modifient mutuellement en permanence.

#### Régulation du débit secondaire

La régulation du débit secondaire est une régulation classique qui – théoriquement - maintient une consigne de pression constante aux bornes du réseau grâce au variateur de fréquence qui pilote la pompe. Cette régulation est rendue opportune par la présence de



V2V terminales sur les ventilo-convecteurs : quand un ensemble de terminaux se ferment le maintien de la consigne de pression oblige la pompe à diminuer son débit.

Le débit au secondaire a pu être déduit des mesures du débit primaire, du dT primaire et du dT secondaire (il n'y a pas de compteur de frigorie au secondaire). La consommation de la pompe a été mesurée au pas de temps de 10 minutes. Le résultat est présenté en Figure 31.

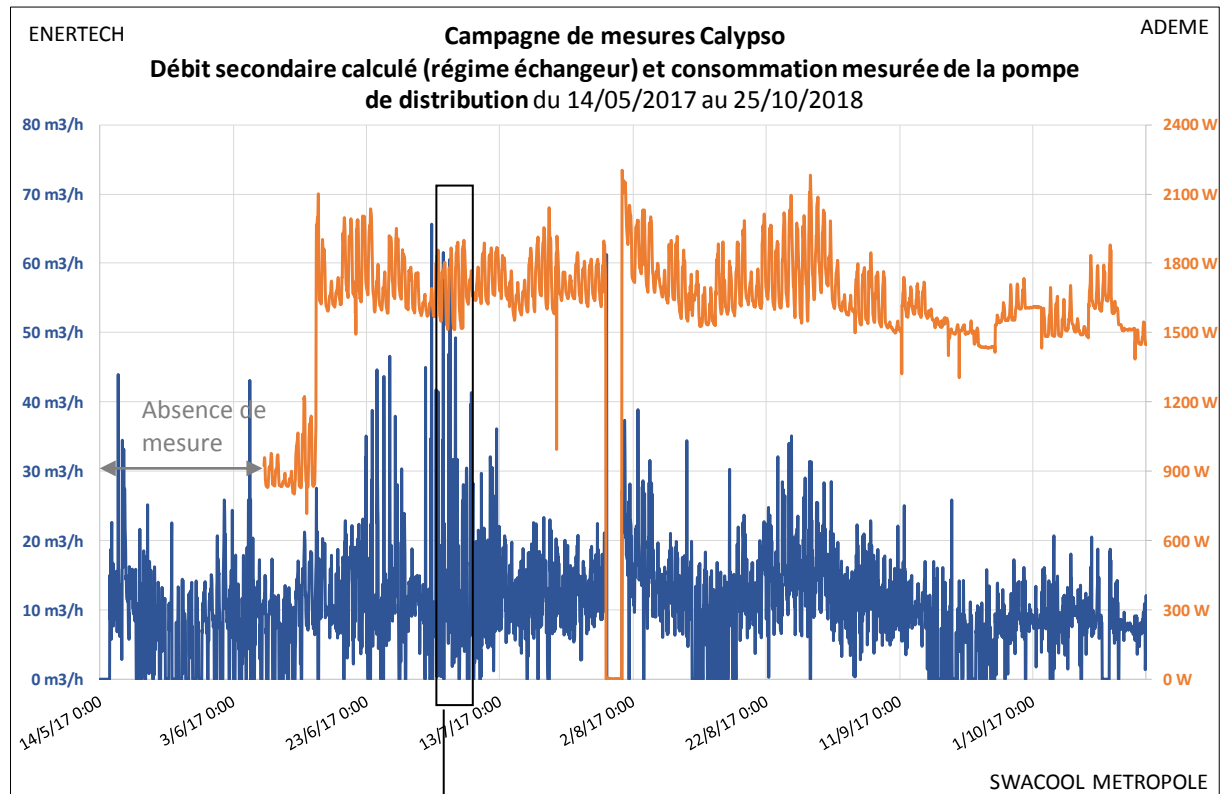
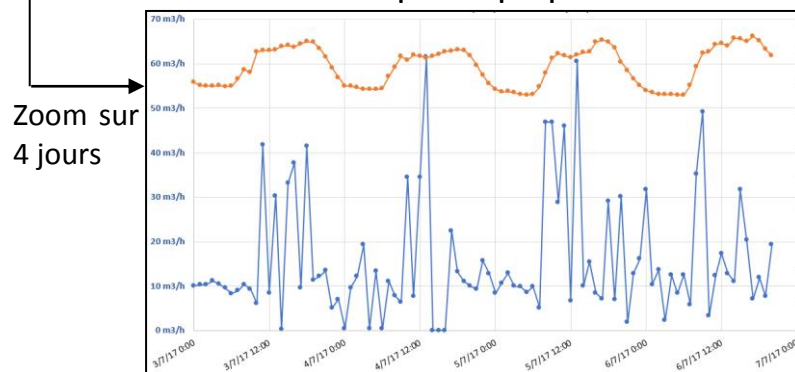


Figure 31 : Estimation du débit secondaire et consommation électrique de la pompe de distribution.



**Point d'attention :** l'estimation du débit secondaire repose sur la division de la puissance échangeur par le dT secondaire : une puissance proche de 0 ne permet donc pas d'estimer le débit ce qui limite l'observable (NB : ces points ont été retirés de l'estimation).

Ces données appellent deux remarques importantes :

- Le débit ne varie que dans une faible proportion (amplitude globale de 1 à 5 et amplitude courante plutôt de 1 à 3) ;
- La puissance appelée varie très peu (amplitude environ 30%) ;



Ces deux constatations, cohérentes entre elles, **nous amènent à penser que les variateurs de fréquences n'ont pas modulé pendant la campagne de mesure**. Une modulation réelle de débit sur un réseau avec une pompe à vitesse variable ou un variateur externe crée une amplitude d'appel de puissance électrique de la pompe de 1 à 3 pour une amplitude de débit potentielle de 1 à 10 au minimum.

La faible variation de débit constatée est peut-être le fait d'une régulation de la pompe à vitesse constante : la fermeture des terminaux en V2V occasionne alors :

- Une baisse du débit dans des proportions plus faibles qu'attendu (constaté sur le graphique) ;
- Une augmentation de la pression dans le réseau ;
- Un maintien (ou quasi-maintien) de la puissance électrique appelée par la pompe (constaté sur le graphique) avec une dégradation forte du rendement de pompe consécutive à un décrochage de la turbine.

L'absence de variation de vitesse sur la pompe a par ailleurs un effet collatéral possible qui est de déclencher les soupapes de décharge en tête de colonne aux faibles débits car la pression dans le réseau augmente. Ce phénomène dégrade la variation de débit attendue.

Il est possible que ce pilotage à vitesse constante (qui reste une hypothèse) soit volontaire et lié à un problème d'équilibrage ; par exemple un groupe de ventilo-convecteurs éloigné de la sous-station qui n'aurait pas assez de débit.

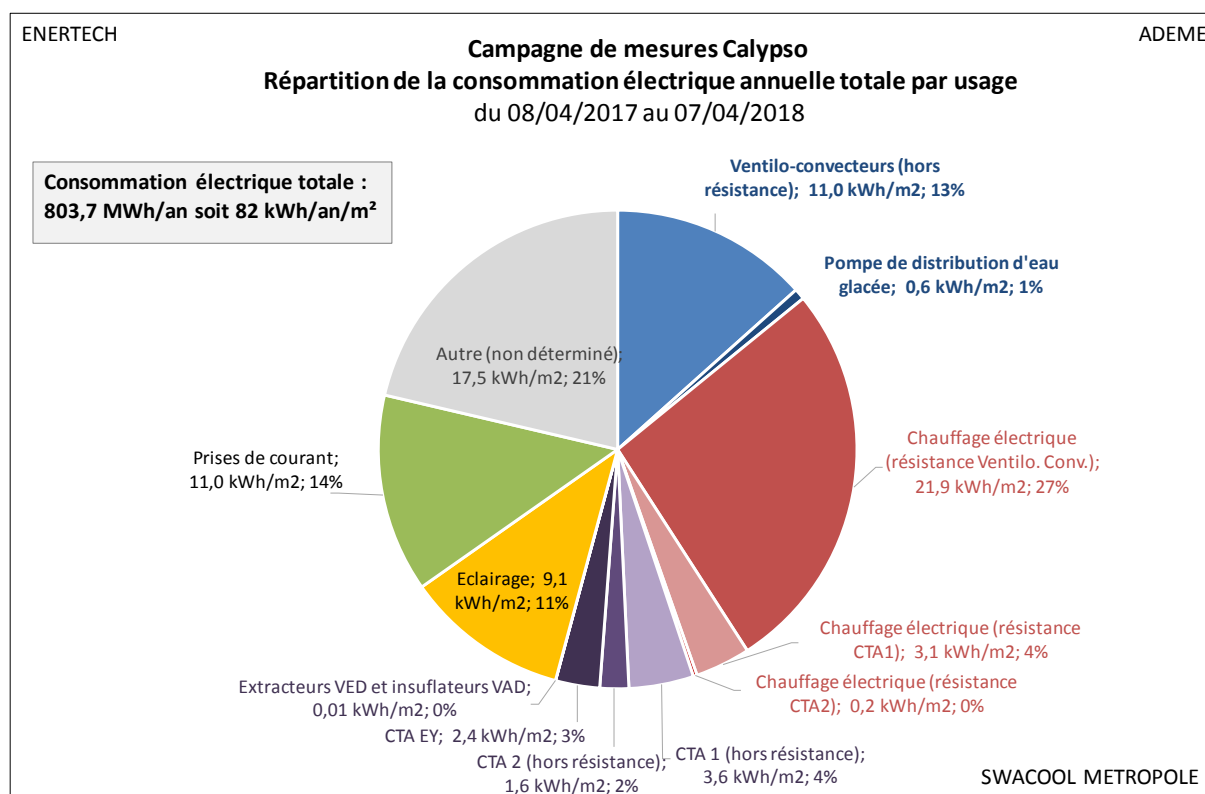
Quoi qu'il en soit il serait l'un des facteurs principaux permettant d'expliquer la valeur trop resserrée du dT secondaire (§4.3.2).

#### **4.4 Consommation électrique des auxiliaires**

La consommation électrique totale du bâtiment ainsi que la consommation des CTA et VMC du site ont été mesurés au TGBT. La consommation de la pompe d'eau glacée a été mesurée de la même manière dans le TD de la sous-station. Par ailleurs l'extraction des données GTC à 10 minutes a permis de remonter à la consommation électrique de l'ensemble des ventilo-convecteurs du site ainsi qu'à celle de l'éclairage et des prises de courant.

L'analyse des données à 10 minutes a permis d'isoler les consommations des résistances électriques des CTA 1 et 2 et de l'ensemble des ventilo-convecteurs, ce qui permet de fournir l'information de la consommation de chauffage du bâtiment.

Le résultat de cette analyse est présenté en Figure 32.



**Figure 32 : Consommation électrique totale du bâtiment et répartition par usage.**

**Le bâtiment a consommé 803.7MWh<sub>él</sub> sur l'année de mesure soit 82kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an.** Le chauffage électrique a représenté 25.2kWh/m<sup>2</sup>/an ce qui est un résultat performant qu'il convient de rapprocher de la consommation de froid du bâtiment de 19.8kW<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup>/an (Cf §4.2.2). **La proximité de ces valeurs est intéressante et montre que les sujets « chauffage » et « climatisation » peuvent être d'intensité comparable.**

Les usages liés à **l'électricité spécifique** (tous les usages excepté l'effet joule lié au chauffage) représentent **56.8kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an**. On retrouve dans cette consommation celle des **ventilo-convecteurs** qui assurent l'émission de froid et celle du chauffage. Ces derniers ont consommé 11kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an soit 13% de la consommation totale d'électricité du bâtiment et 19% de la consommation d'électricité spécifique. **La part de leur consommation imputable à la climatisation** est de 170j/365j soit 47% de leur consommation annuelle, environ **5kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an**. La consommation des ventilo-convecteurs pour l'émission des frigories est donc tout à fait conséquente dans le bilan global de production et d'émission du froid.

**On note enfin que la consommation de la pompe de distribution en sous-station est marginale dans le bilan : 6MWh<sub>él</sub>/an soit 0.8% de la consommation totale d'électricité ou encore 0.6kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an, consommation 8 fois inférieure à celle nécessaire aux ventilo-convecteurs pour émettre le froid dans les bureaux.** On retrouve là le principe selon lequel l'air est un mauvais caloporteur et nécessite d'importantes consommations électriques pour émettre les frigories (ce qui, au passage, est également vrai pour les calories du chauffage).

Le sujet de la variation de débit de la pompe d'eau glacé (§4.3.3) est donc avant tout un sujet d'adaptation des régimes de température et d'optimisation de raccordement plutôt qu'un sujet énergétique en soi.

Nous pouvons conclure ce paragraphe en insistant sur l'importance de la consommation électrique des auxiliaires : pompe de distribution et surtout ventilo-convecteurs. On peut par exemple comparer leur consommation à la quantité d'électricité utilisée pour la production du froid. Si l'on fait l'hypothèse que la COP moyen de la production Thassalia est de 3, la part de consommation électrique nécessaire à la production du froid pour le bâtiment Calypso serait de  $19.8\text{kWh}/\text{m}^2 \div 3 = 6.6\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2/\text{an}$ . La prise en compte des auxiliaires du bâtiment Calypso dans le calcul du COP dégraderait ce dernier à  $19.8 \div (6.6+5+0.6) = 1.6$  ! Soit quasiment la moitié du COP initial. On sent donc l'importance de rationaliser l'utilisation des auxiliaires notamment des ventilo-convecteurs en favorisant au maximum leur intermittence.

## 4.5 Gestion des ambiances et des émetteurs

### 4.5.1 Ventilo-convecteurs

Les ventilo-convecteurs sont les émetteurs de climatisation disposés dans chaque bureau. Ils sont alimentés en eau glacée par des piquages sur le réseau, munis de vanne deux voies. Ils sont par ailleurs asservis à la présence et à l'ouverture des fenêtres. Ils disposent d'une régulation recevant deux consignes de température de la GTC de manière individuelle : consigne de confort et de pré-confort. Ces consignes permettent d'effectuer des ralentis en inoccupation la nuit et les week-ends. On peut constater sur la Figure 33 l'intermittence des consignes effectivement appliquées sur un certain nombre de ventilo-convecteurs, avec une variabilité sensible d'un bureau à l'autre. Le Tableau 5 montre que la moyenne des consignes en occupation est de 23°C en mode confort contre 24.5°C en mode préconfort.

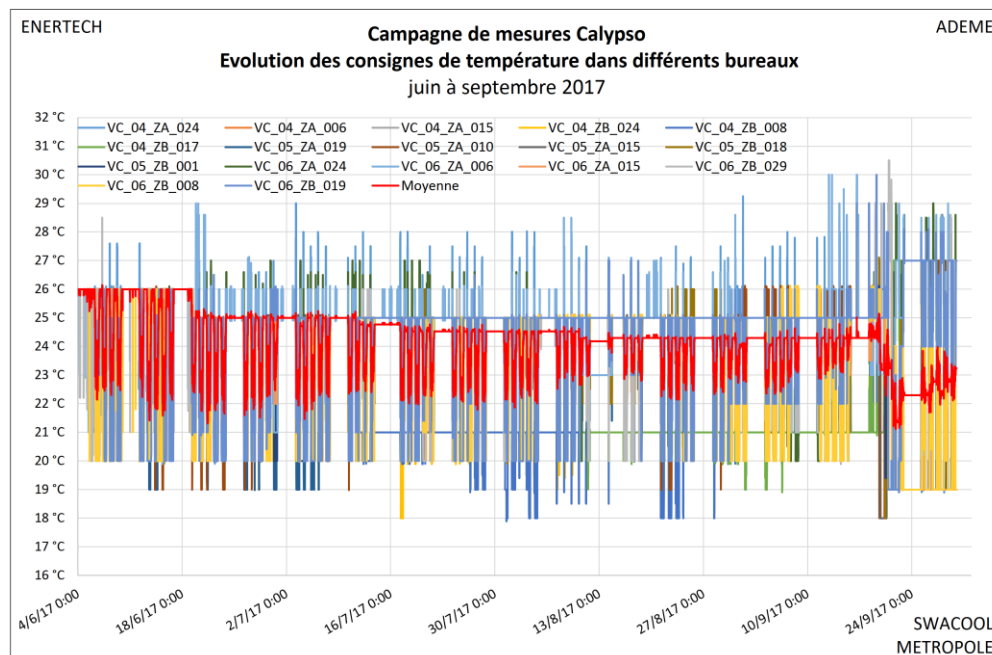


Figure 33 : Températures de consignes d'ambiance programmées sur un échantillon de ventilo-convecteurs (données GTC).

	Consignes inoccupation			Consignes occupation		
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
VC_04_ZA_024	23,0 °C	25,0 °C	29,0 °C	20,0 °C	24,1 °C	29,2 °C
VC_04_ZA_006	21,0 °C	25,0 °C	25,0 °C	20,0 °C	23,3 °C	25,0 °C
VC_04_ZA_015	22,5 °C	25,0 °C	25,0 °C	20,0 °C	24,6 °C	25,0 °C
VC_04_ZB_024	19,0 °C	22,1 °C	25,0 °C	18,0 °C	21,3 °C	25,0 °C
VC_04_ZB_008	18,0 °C	21,6 °C	25,0 °C	17,9 °C	20,7 °C	25,0 °C
VC_04_ZB_017	20,0 °C	23,6 °C	25,0 °C	19,0 °C	23,5 °C	25,0 °C
VC_05_ZA_019	20,0 °C	25,0 °C	25,0 °C	19,0 °C	23,2 °C	25,0 °C
VC_05_ZA_010	20,0 °C	25,0 °C	25,1 °C	19,0 °C	24,2 °C	26,1 °C
VC_05_ZA_015	20,0 °C	25,0 °C	25,1 °C	20,0 °C	23,2 °C	25,1 °C
VC_05_ZB_018	20,0 °C	24,9 °C	26,0 °C	19,9 °C	23,1 °C	26,1 °C
VC_05_ZB_001	20,0 °C	24,9 °C	25,0 °C	20,0 °C	24,2 °C	25,0 °C
VC_06_ZA_024	20,0 °C	24,9 °C	27,0 °C	20,0 °C	22,8 °C	25,0 °C
VC_06_ZA_006	21,0 °C	24,7 °C	28,6 °C	21,0 °C	22,5 °C	26,1 °C
VC_06_ZA_015	20,0 °C	25,0 °C	25,0 °C	20,0 °C	24,6 °C	25,0 °C
VC_06_ZB_029	20,0 °C	24,8 °C	26,0 °C	20,0 °C	21,9 °C	25,0 °C
VC_06_ZB_008	20,0 °C	24,7 °C	25,1 °C	20,0 °C	22,3 °C	25,1 °C
VC_06_ZB_019	20,0 °C	24,9 °C	27,0 °C	20,0 °C	22,2 °C	27,0 °C
<b>Moyennes :</b>	22,4 °C	24,5 °C	25,2 °C	21,5 °C	23,0 °C	24,8 °C

**Tableau 5 : Températures de consignes programmées sur un échantillon de 17 ventilo-convecteurs, de début juin 2017 à fin septembre 2017.**

Les graphiques temporels présentés ci-après (Figure 34) permettent deux observations :

- Il y a bien des appels de puissance des ventilo-convecteurs en dehors des heures d'occupation. La demande de froid du bâtiment en inoccupation n'est donc pas uniquement issue du recyclage dans les colonnes et des pertes du réseau, mais bel et bien des bureaux eux-mêmes (du moins en partie).
- Le comportement des ventilo-convecteurs est complexe à analyser par la mesure, d'une part parce qu'il dépend de nombreux paramètres (programmation des consignes GTC + présence + contacts de feuillures), d'autre part parce qu'il est possible que certaines données GTC soient interverties entre bureaux voire non valides (par exemple on ne voit pas toujours le lien entre la température soufflée et la demande d'eau glacée).

En conclusion, l'émission du froid dans le bâtiment Calypso relève bien d'une conception performante, tant par le matériel mis en place que par sa régulation et sa supervision. Il apparaîtrait toutefois nécessaire de bien valider la cohérence des informations GTC et de vérifier le comportement de chaque émetteur. Une optimisation des ralenti hors occupation semble possible, ce que confirment les températures ambiantes (§4.5.3).

Orange :  
demande EG

Vert :  
présence  
d'occupants

Violet :  
T°C soufflage

Gris :  
consigne T°C

Bleu :  
T° ambiante

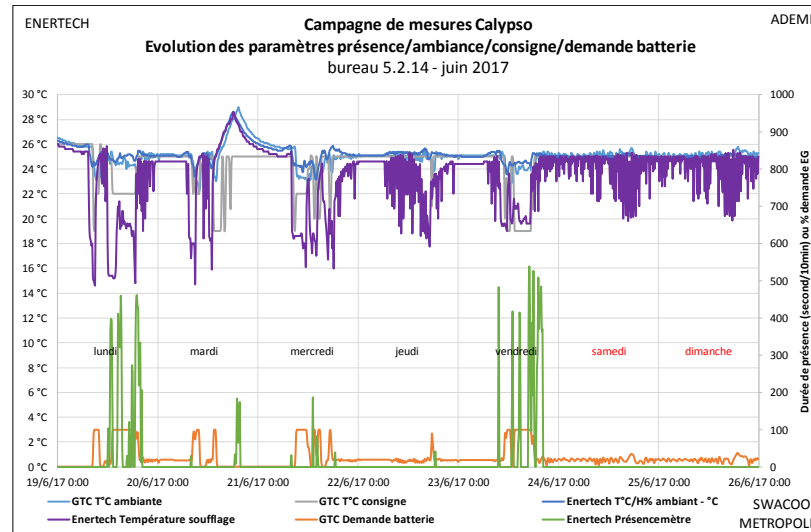
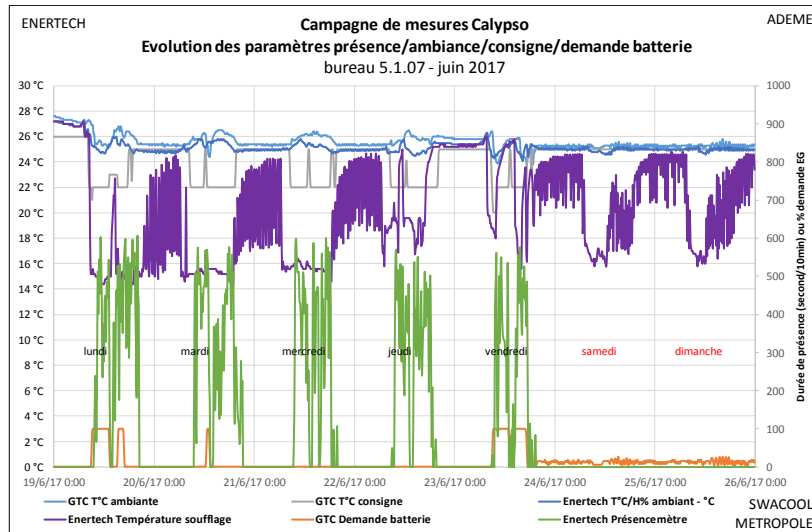
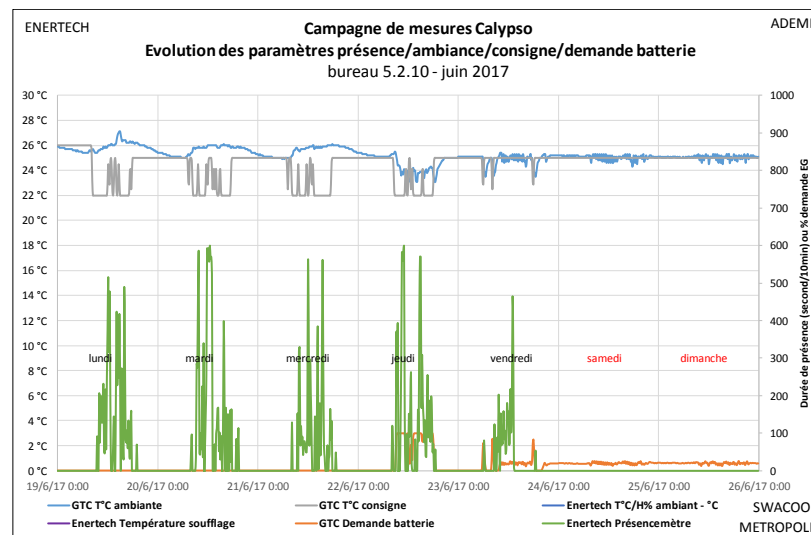
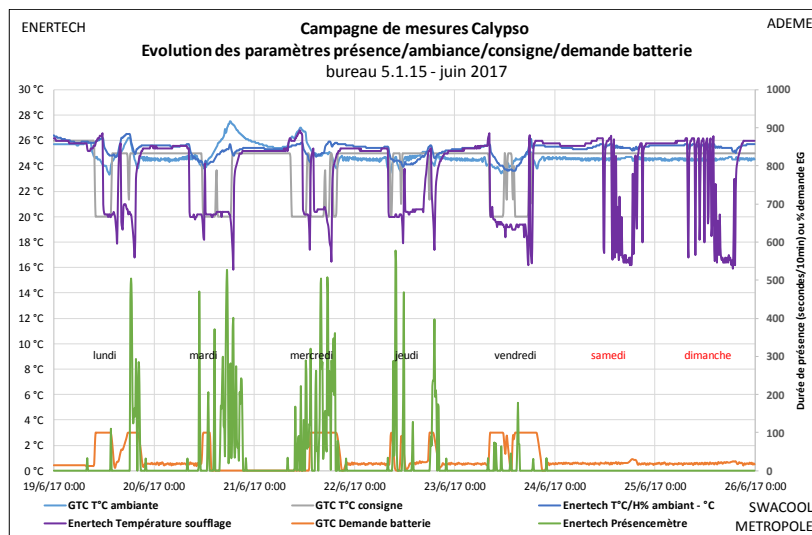


Figure 34 : Exemples temporels de gestion des ventilo-convecteurs dans 4 bureaux durant la semaine du 19 au 26 juin 2017.

#### 4.5.2 Centrales de traitement d'air (CTA)

Les CTA double flux (récupération de chaleur à roue) ne disposant pas de batteries froides, elles ne jouent qu'à la marge dans le régime de fonctionnement de la climatisation. Elles constituent en revanche une charge potentielle de chaleur que la climatisation doit combattre. On se contente de signaler ici, sur les deux CTA principales :

- Un fonctionnement permanent constaté du 25 août au 18 novembre (probablement involontaire), ainsi qu'une intermittence moins marquée à partir du 18 novembre (Figure 35).
- Une consommation importante de la batterie électrique de chauffage de la CTA1 (9195m<sup>3</sup>/h) avec 30MWh<sub>él</sub>, alors que celle de la CTA2 (12 265m<sup>3</sup>/h) est très faible avec 2MWh<sub>él</sub> (voir §4.4) ce qui pose la question du bon fonctionnement de l'échangeur de la CTA1 étant donné que les températures soufflées des deux CTA sont équivalentes en hiver (environ 17°C en occupation).
- **Un fonctionnement des roues récupératrice (échangeurs) qui semble anormal en été** (Figure 36 et Figure 37) puisqu'on observe très souvent un soufflage à température extérieure alors que l'échangeur doit permettre de conserver une partie de la fraîcheur de l'air repris. Ce dysfonctionnement constitue une charge supplémentaire (et évitable) au besoin de climatisation. **Chaque degré perdu au soufflage provoque un appel de puissance supplémentaire de 8kW sur l'échangeur Thassalia compte tenu du débit total de soufflage des deux centrales (21480m<sup>3</sup>/h).**

Les CTA nécessiteraient donc une mise au point pour fonctionner de manière optimale. Ceci permettrait de minimiser leur charge sur le besoin de climatisation.

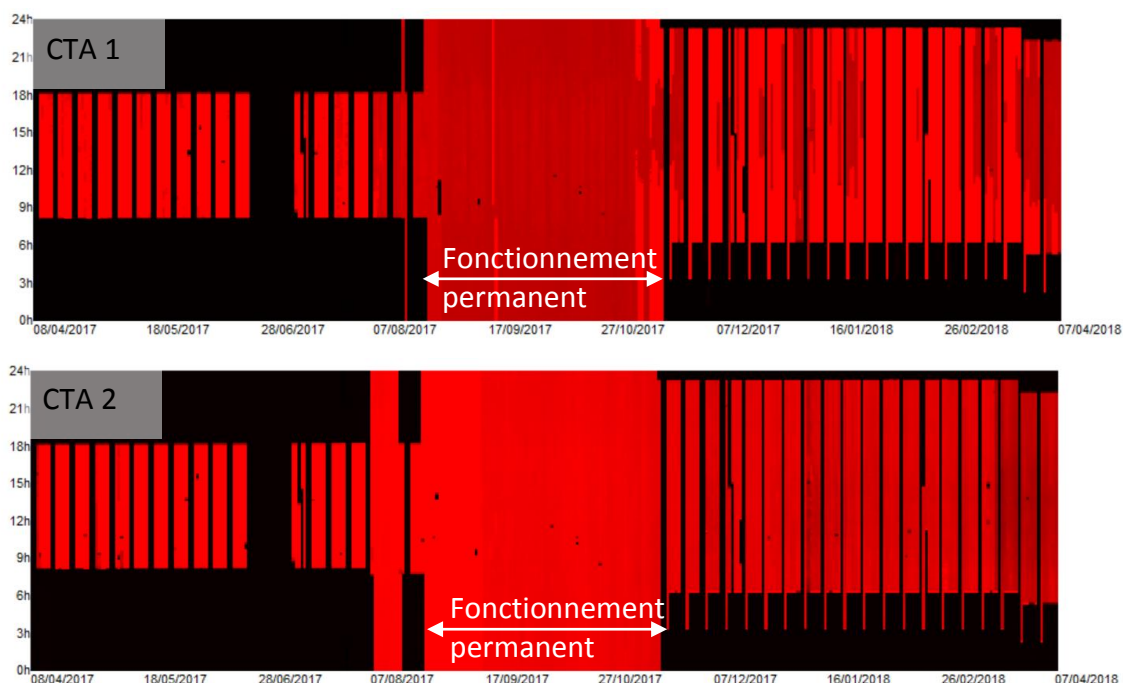


Figure 35 : Diagramme d'intermittence des CTA 1 et 2 pendant l'année de mesure (rouge vif = puissance maximale, noir absence de consommation. Les pics de puissance liés aux résistances électriques ont été gommés pour que l'échelle de couleur reste lisible).



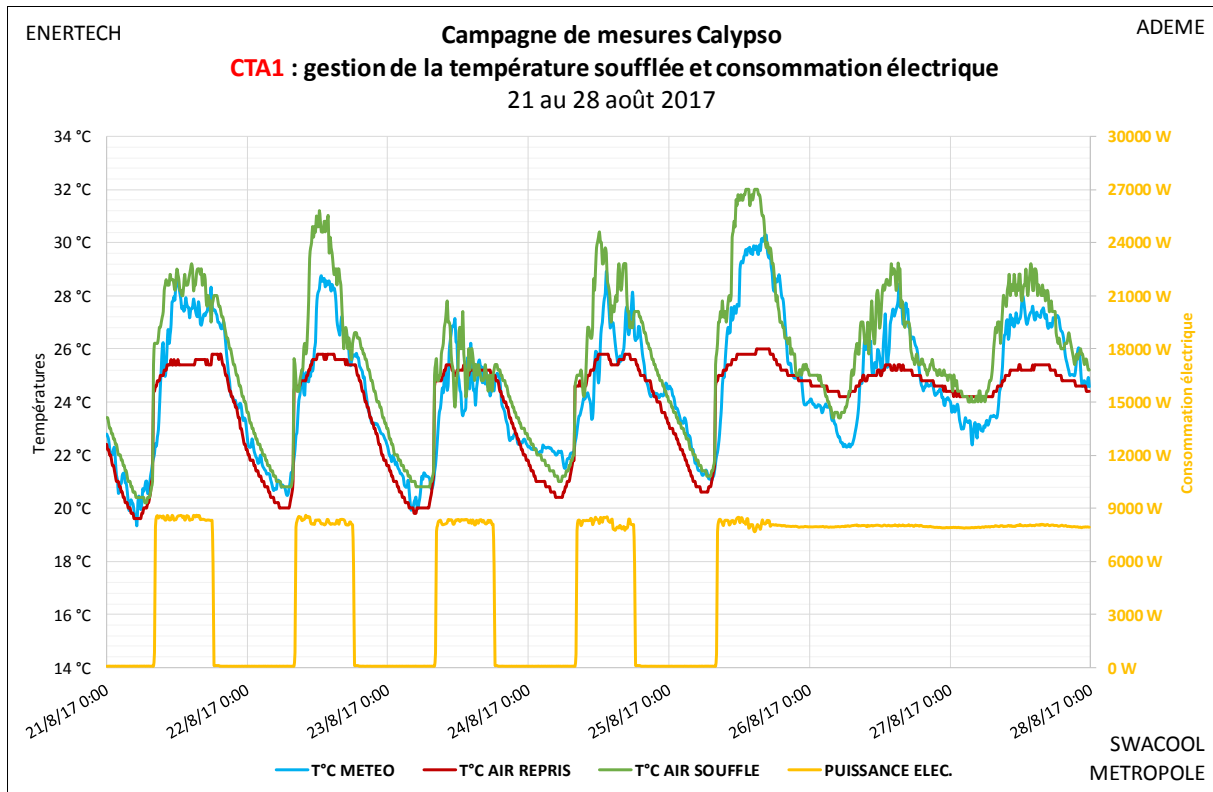


Figure 36 : (CTA1) gestion de la température de l’air soufflé et puissance appelée durant une semaine.

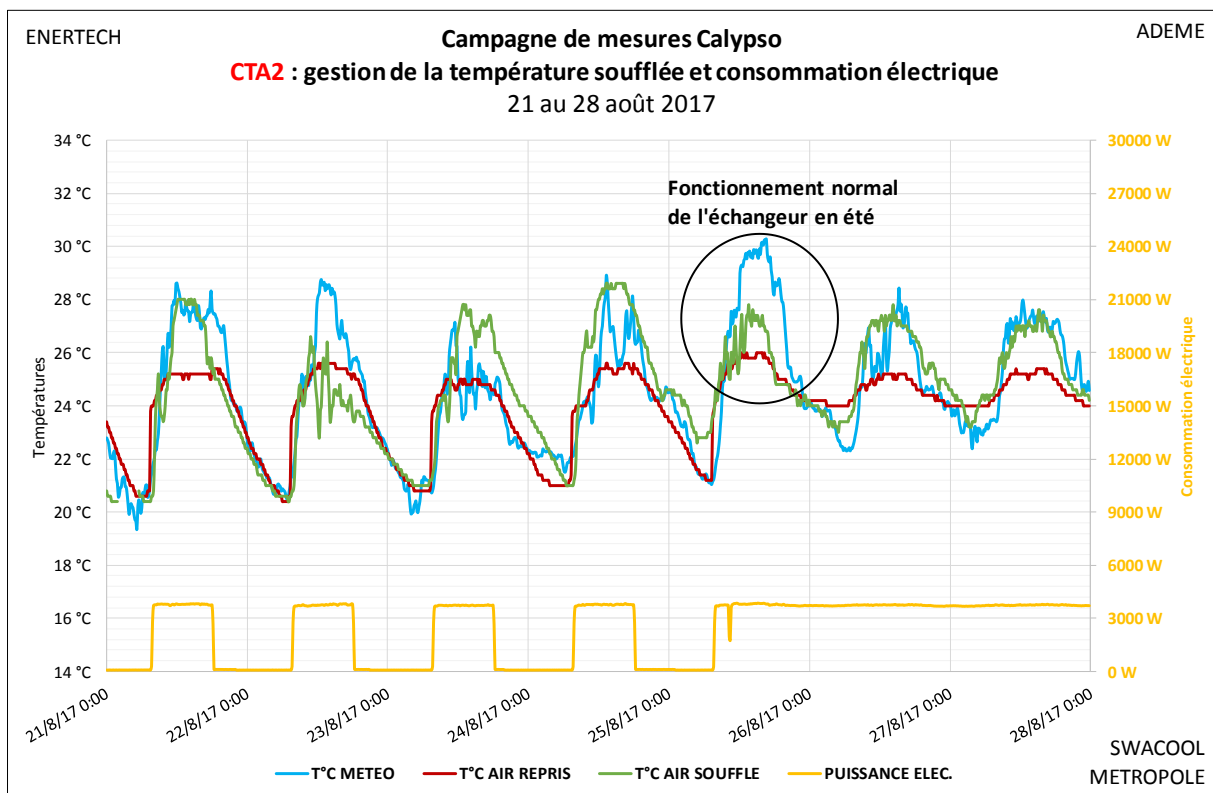


Figure 37 : (CTA2) gestion de la température de l’air soufflé et puissance appelée durant une semaine.

### 4.5.3 Ambiances

Les températures ambiantes de 19 bureaux ont été analysées via les données GTC. Ces températures nous renseignent sur le niveau de confort exigé par les occupants et permettent de mieux appréhender les consommations d'énergie et le pilotage des équipements. La température moyenne observée tout au long de l'année de mesure dans ces bureaux est présentée en Figure 38. Le détail des ambiances en forte période de climatisation est donné en Figure 39 et dans le Tableau 6.

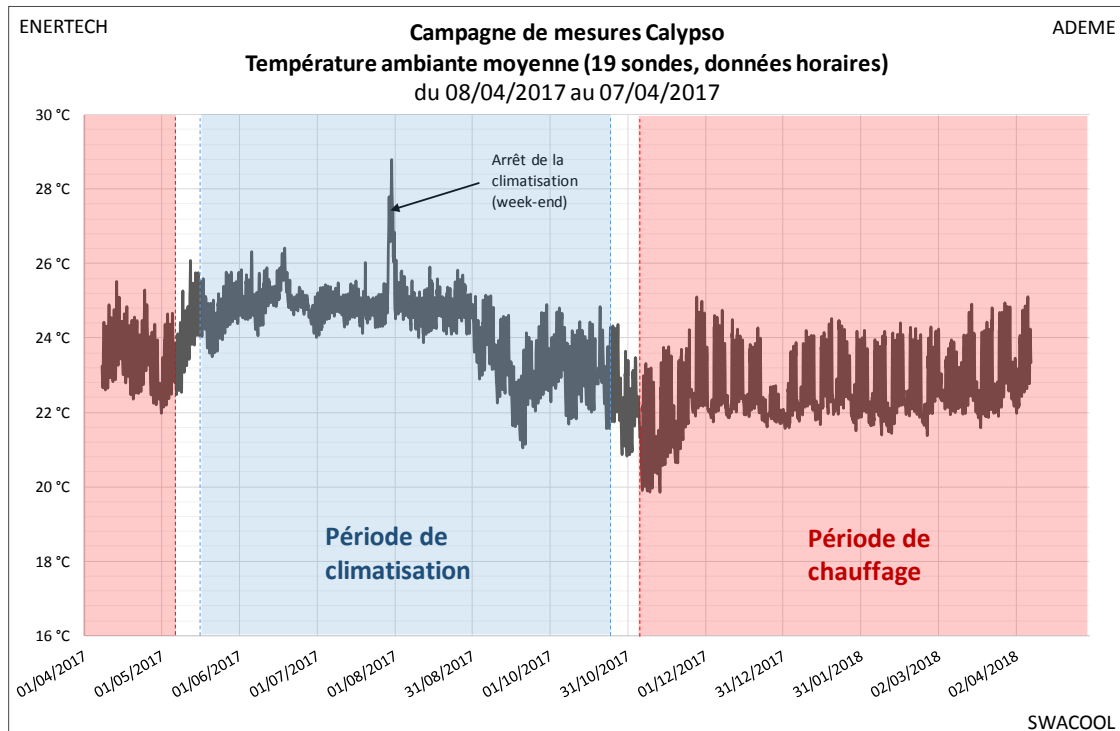


Figure 38 : Température ambiante moyenne observée dans 19 bureaux du bâtiment.

Ces valeurs nous permettent de faire plusieurs observations :

- Les ambiances moyennes constatées en période estivale et en occupation sont de **25°C en haute saison (juillet/août)** et 24.3°C sur le reste de la période.
- Les intermittences pratiquées en été grâce au pilotage des ventilo-convecteurs sont peu visibles sur les températures ambiantes : -0.2°C en inoccupation juillet/août (24.8°C) et -0.4°C sur le reste de la période de climatisation (23.9°C).
- Le maximum de 26.9°C observé correspond à l'ambiance du bâtiment lundi 31 juillet au matin après une panne de climatisation le week-end qui a amené l'ambiance de 24.8°C à 28.8°C en 40 heures de panne. Au redémarrage de l'installation l'ambiance était à 27.5°C et a mis environ 16 heures à redescendre à 25°C, en occupation et avec une puissance moyenne mobilisée de 129kW. Ceci montre qu'une intermittence plus marquée est possible à condition d'anticiper un minimum la relance. Un « optimiseur » permettrait d'ajuster la relance de manière optimale.
- En hiver l'intermittence des températures ambiantes est plus marquée qu'en été avec 23.5°C en occupation et 22.2°C en inoccupation (décembre à mars 2017).

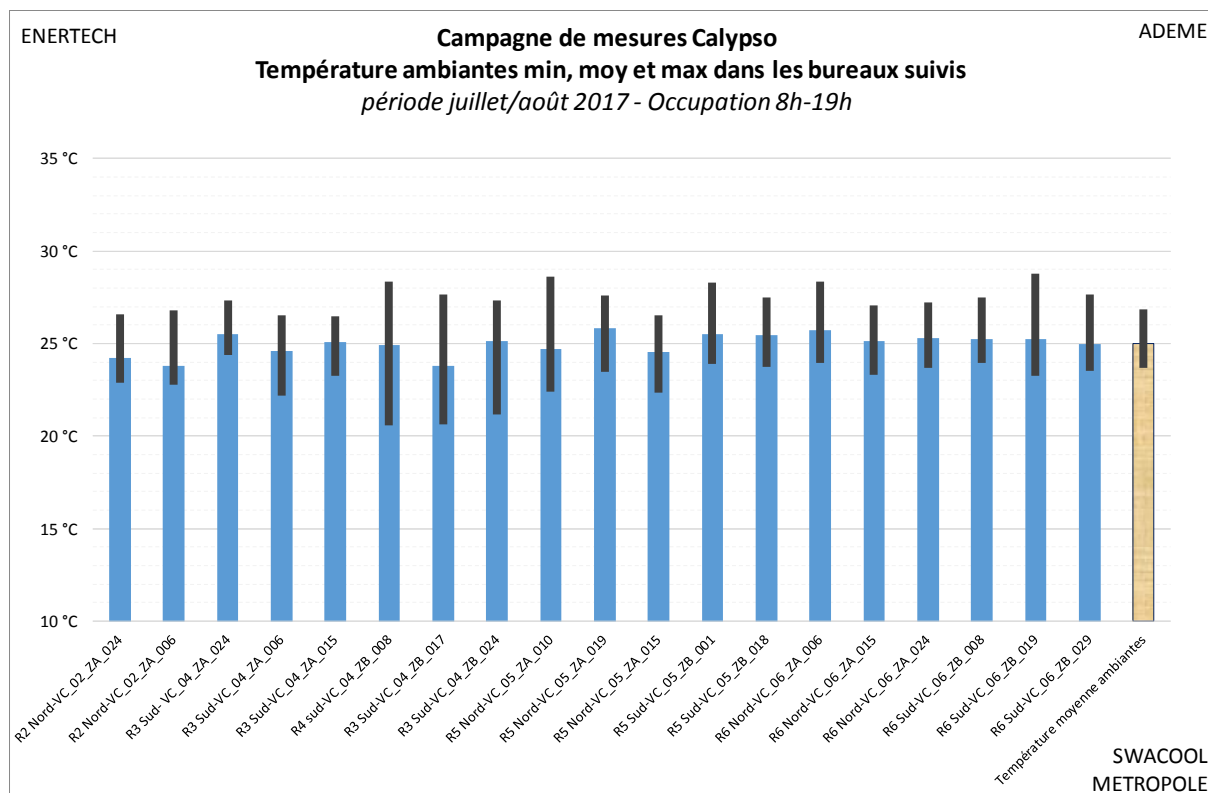


Figure 39 : Températures ambiantes en juillet/août dans 19 bureaux du bâtiment, en occupation des locaux.

	Inoccupation			Occupation		
	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
R2 Nord-VC_02_ZA_024	22,9 °C	23,8 °C	27,5 °C	22,9 °C	24,2 °C	26,6 °C
R2 Nord-VC_02_ZA_006	22,6 °C	23,4 °C	28,2 °C	22,8 °C	23,8 °C	26,8 °C
R3 Sud- VC_04_ZA_024	24,4 °C	25,3 °C	27,9 °C	24,4 °C	25,5 °C	27,3 °C
R3 Sud-VC_04_ZA_006	22,2 °C	24,9 °C	29,2 °C	22,2 °C	24,6 °C	26,5 °C
R3 Sud-VC_04_ZA_015	24,1 °C	25,2 °C	27,8 °C	23,2 °C	25,1 °C	26,5 °C
R4 sud-VC_04_ZB_008	20,5 °C	24,9 °C	30,3 °C	20,6 °C	24,9 °C	28,4 °C
R3 Sud-VC_04_ZB_017	20,5 °C	23,3 °C	29,6 °C	20,7 °C	23,8 °C	27,6 °C
R3 Sud-VC_04_ZB_024	21,2 °C	24,7 °C	28,3 °C	21,2 °C	25,1 °C	27,3 °C
R5 Nord-VC_05_ZA_010	23,8 °C	25,2 °C	30,0 °C	22,4 °C	24,7 °C	28,6 °C
R5 Nord-VC_05_ZA_019	23,2 °C	25,2 °C	28,4 °C	23,5 °C	25,8 °C	27,6 °C
R5 Nord-VC_05_ZA_015	23,2 °C	24,9 °C	27,8 °C	22,4 °C	24,5 °C	26,5 °C
R5 Sud-VC_05_ZB_001	23,7 °C	25,6 °C	31,0 °C	23,9 °C	25,5 °C	28,3 °C
R5 Sud-VC_05_ZB_018	23,7 °C	25,3 °C	30,2 °C	23,8 °C	25,5 °C	27,5 °C
R6 Nord-VC_06_ZA_006	24,2 °C	25,3 °C	29,6 °C	23,9 °C	25,7 °C	28,3 °C
R6 Nord-VC_06_ZA_015	23,3 °C	25,0 °C	28,9 °C	23,3 °C	25,1 °C	27,0 °C
R6 Nord-VC_06_ZA_024	24,0 °C	25,0 °C	27,7 °C	23,7 °C	25,3 °C	27,2 °C
R6 Sud-VC_06_ZB_008	24,1 °C	25,1 °C	28,9 °C	23,9 °C	25,2 °C	27,5 °C
R6 Sud-VC_06_ZB_019	23,3 °C	24,9 °C	29,4 °C	23,3 °C	25,2 °C	28,8 °C
R6 Sud-VC_06_ZB_029	23,9 °C	25,0 °C	28,6 °C	23,5 °C	24,9 °C	27,7 °C
Moyennes	23,9 °C	24,8 °C	28,8 °C	23,7 °C	25,0 °C	26,9 °C

Tableau 6 : Températures ambiante occupation/inoccupation dans 19 bureaux en juillet/août 2017.

La bâtiment Calypso est donc assez sobre au niveau des températures ambiantes en période de climatisation (25°C). Une marge de sobriété réside dans la mise en place d'intermittences jour/nuit et semaine/week-end plus marquées, par exemple en arrêtant totalement les ventilo-convecteurs en inoccupation. Cette pratique aurait plusieurs effets bénéfiques :

- Diminution de la consommation de froid du bâtiment ;
- Augmentation de la puissance moyenne de froid appelée en fonctionnement, ce qui est bénéfique pour les régimes de températures (Cf. §4.3.2 : dT de fonctionnement plus important au secondaire donc au primaire, température de retour secondaire plus élevée donc moins de pénalités financières) ; et in fine augmentation du COP de production Thassalia ;
- Diminution de la consommation électrique des auxiliaires.

## 5 Synthèse et conclusion

### Rappel succinct sur le bâtiment et les installations.

Le bâtiment Calypso, propriété de Covivio (anciennement de la Foncière des Régions), est un bâtiment de bureaux livré en 2016 et destiné à la location d'espaces de travail. Il est alimenté en froid par la boucle Thassalia et dispose d'une sous-station abritant l'échangeur et un unique départ non régulé en température. La puissance froide souscrite est de  $390\text{kW}_{\text{froid}}$  soit  $40\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$  ( $52\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$  sur le Golden Tulip). Ce réseau d'eau glacée dessert 3 colonnes de ventilo-convecteurs régulés par des vannes 2 voies. Les ventilo-convecteurs des bureaux sont asservis à une détection de présence qui provoque une bascule de la consigne de température. Les consignes de température (confort, pré-confort) et leurs plages horaires sont pilotées par la GTC du site. Enfin des contacts de feuillure dans les fenêtres permettent de couper la climatisation lorsque les fenêtres sont ouvertes.

Les centrales d'air double flux à récupération de chaleur (échangeur à roue) ne disposent pas de batteries froides ; l'air soufflé est en revanche gainé sur les ventilo-convecteurs afin de rafraîchir l'air neuf insufflé dans le bâtiment par les deux CTA principales.

### Campagne de mesure et objectifs

Une campagne de mesure a été menée sur le bâtiment Calypso du 8 avril 2017 au 7 avril 2018 dans le but d'analyser l'installation de climatisation. Enertech a récupéré et mis en base l'ensemble des données du régulateur Thassalia (donnant accès aux mesures du compteur de frigorie situé au primaire et aux températures du secondaire) et déployé 50 points de mesure supplémentaires sur les installations en sous-station mais aussi dans les bureaux. L'intégrateur GTC a par ailleurs été mobilisé par Enertech dans le but de déclencher l'enregistrement de certaines données de la GTC à 10 minutes, notamment l'ensemble des paramètres de plusieurs ventilo-convecteurs. Enfin une station météo complète et communicante a été déployée dans le cadre du projet, en toiture du Mirabeau 2 situé à quelques centaines de mètres du Calypso.

Les objectifs de cette campagne de mesures étaient :

- De caractériser la météo à Marseille.
- De caractériser la demande de froid du bâtiment (consommation totale, variabilité saisonnière/mensuelle/journalière, monotone de puissance appelée, signature énergétique en lien avec la météo et le pilotage des installations).
- D'étudier le raccordement du bâtiment au réseau Thassalia à travers les régimes de température et de débits des boucles primaires et secondaires, en lien avec la demande de froid.
- De proposer des optimisations sur le fonctionnement du raccordement de ce bâtiment, et plus généralement sur l'optimisation du raccordement d'un bâtiment à un réseau de froid vertueux.

## Résultats principaux de l'étude

Calypso - 9800m <sup>2</sup> mesures 08/04/2017 - 07/04/2018	Froid Thassalia (énergie utile)		Régime de température au primaire			Régime de température au secondaire			Pompe distrib. EG	Ventilo- convecteurs
	Conso.	Pmax	T°C arrivée	T°C départ	dT prim	T°C départ	T°C retour	dT second	Conso. Élec.	Conso. Élec.
avr-17	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0004 kWh/m2	0,72 kWh/m2
mai-17	1,2 kWh/m2	184 kW	6,8 °C	13,3 °C	6,5 °C	11,5 °C	14,0 °C	2,5	0,03 kWh/m2	0,80 kWh/m2
juin-17	4,5 kWh/m2	378 kW	6,0 °C	12,5 °C	6,5 °C	10,0 °C	14,1 °C	4,1	0,10 kWh/m2	0,06 kWh/m2
juil-17	5,0 kWh/m2	407 kW	6,4 °C	12,2 °C	5,8 °C	9,8 °C	13,8 °C	3,9	0,12 kWh/m2	1,02 kWh/m2
août-17	5,8 kWh/m2	318 kW	6,5 °C	12,7 °C	6,2 °C	9,9 °C	14,4 °C	4,5	0,13 kWh/m2	1,10 kWh/m2
sept-17	2,1 kWh/m2	143 kW	8,6 °C	12,1 °C	3,5 °C	11,1 °C	13,5 °C	2,4	0,12 kWh/m2	1,06 kWh/m2
oct-17	1,2 kWh/m2	138 kW	8,6 °C	11,9 °C	3,3 °C	11,2 °C	13,1 °C	1,9	0,08 kWh/m2	1,42 kWh/m2
nov-17	0,3 kWh/m2	84 kW	16,2 °C	16,4 °C	0,1 °C	16,9 °C	16,9 °C	0,0	0,02 kWh/m2	4,95 kWh/m2
déc-17	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0004 kWh/m2	6,73 kWh/m2
janv-18	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0005 kWh/m2	4,82 kWh/m2
févr-18	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0004 kWh/m2	5,41 kWh/m2
mars-18	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0008 kWh/m2	3,84 kWh/m2
avr-18	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0001 kWh/m2	0,54 kWh/m2
<b>Bilan saison Clim:</b> <small>(15/05-26/10 puis 17-25 /11)</small>	<b>20 kWh/m2</b> <i>(Total)</i>	<b>407 kW</b> <i>(max)</i>	<b>7,2 °C</b> <i>(moyenne primaire hors nov)</i>	<b>12,5 °C</b> <i>(moyenne primaire hors nov)</i>	<b>5,3 °C</b> <i>(moyenne primaire hors nov)</i>	<b>10,6 °C</b> <i>(moyenne secondaire hors nov)</i>	<b>13,8 °C</b> <i>(moyenne secondaire hors nov)</i>	<b>3,2 °C</b> <i>(moyenne secondaire hors nov)</i>	<b>0,6 kWh/m2</b> <i>(Total)</i>	<b>5,5 kWh/m2</b> <i>(Total)</i>

Tableau 7 : Récapitulatif mensuel des mesures effectuées sur les installations de climatisation du Calypso.

La campagne de mesures a bien fonctionné. Aucune perte de donnée majeure n'est à signaler.

### ▪ Météo

La météo marseillaise bénéficie d'une influence maritime qui tempère les pics de chaleur en été et de froid en hiver et présente une hygrométrie plus élevée que l'intérieur des terres notamment en été. Pour autant le nombre de DJU<sub>clim</sub> (base 18°C) à Marseille est l'un des plus élevés de France, deux fois plus élevé par exemple que les villes de Paris ou de Nantes. Globalement l'été 2017 à Marseille s'est trouvé dans les normales de saisons, tant pour les températures que pour l'ensoleillement.

### ▪ Demande de froid

La saison de climatisation 2017 sur le Calypso s'est étendue du 15 mai au 25 octobre. Il n'y a pas eu de recoupement avec la saison de chauffage même si la zone neutre a été de très courte durée. Le bâtiment a consommé 196MWh<sub>froid</sub> soit 19.8kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup> durant cette saison de climatisation. Cette consommation est spectaculairement faible en comparaison des deux autres bâtiments du projet (bureaux Mirabeau2, hôtel GoldenTulip) qui ont consommé plus de 4 fois plus de froid par unité de surface. Elle est toutefois comparable en ordre de grandeur d'énergie utile, à la consommation de chaleur du même bâtiment durant la saison de chauffe 2017/2018 (25kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>).

La variabilité mensuelle de la consommation de froid est forte et liée aux DJU<sub>clim</sub> de la météo avec un excellent facteur de corrélation. 77% de la consommation de froid est réalisée de début juin à fin août. L'intermittence journalière est marquée avec un ralenti important de la puissance appelée la nuit en semaine (environ -60%) et les week-ends (environ -30%).

La signature énergétique journalière la plus claire est obtenue en fonction de la température sèche extérieure (et non de l'enthalpie). La corrélation à l'ensoleillement est faible.



Enfin le monotone de puissance froide appelée à l'échangeur montre que la puissance maximale souscrite ( $390\text{kW}_{\text{froid}}$ ) a été effectivement atteinte, même si le bâtiment a appelé moins de  $100\text{kW}_{\text{froid}}$  environ 90% du temps et qu'il aurait été possible, d'après les mesures, de souscrire à  $300\text{kW}_{\text{froid}}$  puisque cette puissance n'a été dépassée que 10 heures sur l'année. L'enjeu financier de l'abonnement justifierait une optimisation plus poussée de la puissance souscrite en année 1.

#### ▪ Régimes de température et débits

L'analyse des régimes de fonctionnement (température/débit) d'eau glacée aux bornes de l'échangeur est rendue complexe par le fait que la température n'a pas été délivrée par Thassalia à une valeur constante (moyenne de  $6.8^{\circ}\text{C}$  avec des variations court et long terme dans une plage  $4^{\circ}\text{C} - 13^{\circ}\text{C}$ ). On peut retenir que le fonctionnement à *puissance nominale* est correct avec les écarts de températures aller/retour globalement conformes à ce qui était prévu en conception ( $dT=8^{\circ}\text{C}$  sur le primaire et le secondaire). En dessous de  $200\text{kW}$  de puissance appelée (c'est à dire la plupart du temps) le  $dT$  secondaire chute ce qui a tendance à brider le  $dT$  primaire et donc à augmenter le débit nécessaire pour transmettre la puissance au bâtiment.

Au primaire : il ressort de l'analyse que la V2V primaire pilote le débit proportionnellement au  $dT$  du secondaire. Cette régulation fonctionne puisque le pincement (retour primaire – retour secondaire) est de l'ordre de  $1.4^{\circ}\text{C}$  : le débit au primaire est donc minimisé dans la mesure de ce que lui autorise le retour secondaire. La difficulté posée par la fluctuation de la température délivrée par Thassalia est qu'une hausse à l'arrivée primaire va provoquer une hausse au départ secondaire, donc un abaissement du  $dT$  secondaire à iso-puissance<sup>3</sup>, donc une diminution du débit primaire ce qui limite globalement la puissance disponible durant la hausse en question sur la température délivrée.

Au secondaire : le débit de la pompe est théoriquement régulé en fonction du  $dP$  aller/retour côté secondaire (consigne à  $dP$  constant) mais les mesures montrent que le débit secondaire ne varie pas dans les proportions attendues (1 à 3 seulement), et surtout ne se traduit pas par une réelle baisse de la puissance électrique appelée par la pompe. Il est donc probable que la pompe soit régulée à vitesse constante ce qui très clairement ne favorise pas l'augmentation de la  $T^{\circ}\text{C}$  de retour en sous-station. En effet une fermeture des V2V des ventilo-convecteurs sera rapidement compensée par une augmentation de pression qui provoquera un recyclage dans les soupapes en tête de colonne, empêchant le débit de diminuer dans la proportion attendue, et diminuant de fait le  $dT$  du secondaire.

Une réflexion doit être menée dans les futures conceptions sur la suppression de ces soupapes, permises par les nouvelles pompes avec variateur intégré (type Grundfos Magna3) qui savent gérer seules les conséquences d'une fermeture totale du réseau. Par ailleurs la GTC, qui connaît l'état des V2V terminales, pourrait aussi commander l'arrêt de la pompe de distribution en cas d'absence de demande de froid sur le réseau.

#### ▪ Consommation électrique des auxiliaires

---

<sup>3</sup> Quand la température départ secondaire augmente, la puissance d'échange dans les ventilo-convecteurs diminue donc les V2V terminales vont s'ouvrir, ce qui augmente le débit secondaire et fait donc baisser le  $dT$  si la puissance est conservée.

Les mesures montrent que la consommation électrique de la pompe de distribution est négligeable dans le bilan de consommation d'électricité spécifique (1% des 56.8kWh/m<sup>2</sup>/an consommés en électricité spécifique par le bâtiment). Toutefois rétablir sa régulation est primordial pour assurer les régimes de T°C attendus et soulager ainsi le débit primaire.

Les ventilo-convecteurs en revanche consomment une quantité importante d'électricité (10 fois supérieure pour la part affectable à la climatisation) ce qui incite à réduire les plages de temps d'utilisation, ce qui va d'ailleurs dans le bon sens, à savoir augmenter le taux de charge en occupation (du fait qu'il soit diminué en inoccupation) ce qui favorise les bons régimes de températures aux bornes de l'échangeur.

#### ▪ Gestion des ambiances et des émetteurs

On peut retenir que des ralentis nuit et week-ends sont pratiqués sur le fonctionnement des installations (via un jeu de consignes confort/préconfort individualisé par ventilo-convecteur), ainsi qu'une modulation locale liée à la présence et l'ouverture des fenêtres, mais que cette gestion se traduit par des fluctuations encore trop faibles sur les températures ambiantes (24.8°C en occupation, 25°C en inoccupation). La marge réside dans le fait de couper plus systématiquement l'émission de froid hors occupation.

Côté CTA, on observe des dysfonctionnements sur l'intermittence des centrales et sur la gestion des échangeurs à roue, qui se traduisent par une charge accrue sur la climatisation.

### Optimisation du raccordement à Thassalia ?

Le fonctionnement détaillé de l'installation montre des défaillances qui nuisent à son fonctionnement *optimal*, si l'on entend par là un fonctionnement qui viserait à la fois à maximiser le COP de production du réseau Thassalia (distribution incluse) et à minimiser la consommation de froid et d'auxiliaires côté Calypso. On peut retenir par ordre d'importance :

1. La pompe du réseau secondaire (Calypso) qui fonctionne vraisemblablement à vitesse constante ce qui a pour effet de diminuer le dT de fonctionnement au secondaire plutôt que le débit ; La cause de ce fonctionnement (volontaire ?) est inconnue. Il n'est pas exclu qu'elle soit la conséquence d'un problème d'équilibrage.
2. Un réseau primaire (Thassalia) qui n'est pas assez stable en température de livraison ce qui accentue la complexité du couplage entre les régimes primaire/secondaire.
3. Un usage de la climatisation pas assez intermittent malgré les possibilités offertes par la régulation ; l'augmentation de la température ambiante en inoccupation (nuit et week-ends) pourrait être plus marquée.
4. Des dysfonctionnements sur la gestion des échangeurs CTA et des intermittences des centrales, qui accroissent la charge de climatisation.

Une mise au point du réseau de climatisation du Calypso serait donc nécessaire pour parvenir à une réelle modulation du débit secondaire. A ce titre une pompe à vitesse variable et moteur à aimants permanents aurait été plus avantageuse qu'une pompe classique avec un variateur de fréquence externe comme c'est le cas actuellement. En effet

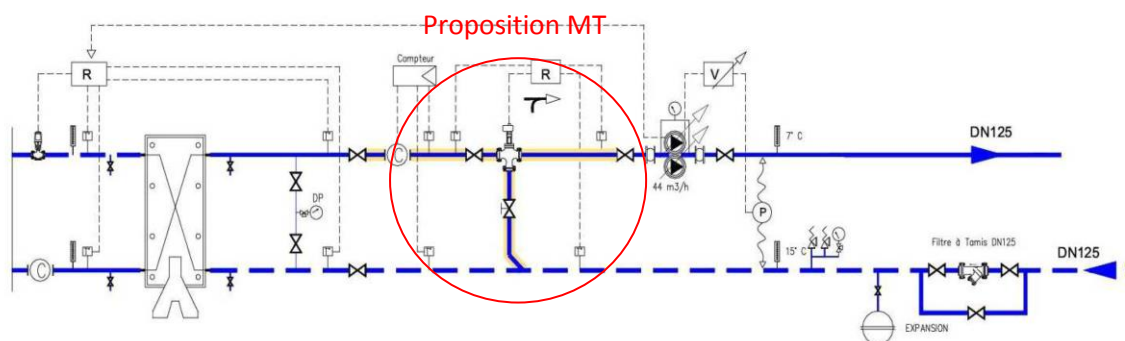
l'amplitude de variation du débit aurait été potentiellement plus importante<sup>4</sup>. L'équilibrage du réseau reste, dans cadre, la question centrale : un réseau à débit variable est complexe à équilibrer et tout défaut se traduit en général par l'augmentation du débit.

Avec une plage suffisante de variation de débit, stabiliser un régime 7°C / 15°C au secondaire deviendrait plus envisageable. La modulation de puissance au niveau des ventilo-convecteurs serait uniquement provoquée par des variations de débit au niveau des V2V modulantes, avec une arrivée de l'eau glacée à une température constante de 7°C.

La variation de puissance délivrée par le primaire Thassalia se traduirait alors par la conservation d'un régime stable à 6°C/14°C et des variations de débits provoqués par la V2V, qui pourrait alors piloter une température constante de 7°C au départ secondaire. Ce fonctionnement nécessiterait toutefois une température d'arrivée primaire stable, ce qui n'a pas tout à fait été le cas durant la campagne (variations entre 4°C à 13°C).

L'entreprise de maintenance (Maintenance Thermique) a proposé en décembre 2016 un plan d'amélioration visant, en particulier, à assurer un retour constant de 15°C au secondaire grâce à l'installation d'une vanne 3 voies, **afin d'éviter les pénalités liées à des retours secondaires trop froids.**

Le schéma proposé était le suivant :



Le problème de cette proposition selon nous est que *forcer* par V3V un retour à 15°C, toutes choses égales par ailleurs (c'est-à-dire sans régler le problème de sur-débit au secondaire), va avoir pour effet d'augmenter la température de départ secondaire ce qui n'est a priori pas le fonctionnement prévu par les ventilo-convecteurs. Dans le cas où seulement quelques émetteurs sont en demande, la température de départ d'eau glacée augmenterait à 14°C ou plus ce qui est a priori impropre au bon fonctionnement des ventilo-convecteurs. Nous pensons donc qu'il est préférable de travailler à une meilleure variation du débit dans le réseau sans modification du schéma de principe en sous-station, pour permettre un départ secondaire à régime fixe.

La finalité de la réflexion étant la diminution du débit au primaire pour maximiser le COP de production du réseau Thassalia, on peut aussi s'interroger sur l'optimisation de la température délivrée. Il n'est pas exclu en effet qu'une température de livraison plus haute

<sup>4</sup> Exemple : pompe Grundfos Magna3 D 65-120 F : à 8mCE de HMT le débit peut varier de 0 à 43m<sup>3</sup>/h. Les vannes de décharge en tête de colonne sont alors inutiles.

en bord de saison soit possible. Elle aurait pour effet de diminuer les dT primaires des échangeurs des sous-stations ce qui provoquerait une augmentation des débits de distribution qui serait sans doute largement compensé par l'amélioration du COP de la production Thassalia. Un point de vigilance concernerait toutefois les locaux de type « informatiques » ou « salles serveurs » qui ont besoin d'une puissance quasiment constante tout au long de l'année.

### Conclusion générale

Le bâtiment Calypso est un bâtiment performant sur le plan de la climatisation. Il est de loin le bâtiment le moins consommateur des 3 bâtiments instrumentés dans le cadre du programme. Sur le plan de l'enveloppe, on ne peut déplorer que l'absence de protections extérieures sur les vitrages notamment ceux de la façade ouest. Les installations liées à la climatisation sont élaborées en termes de conception, d'analyse fonctionnelle et de supervision.

La campagne de mesures a permis de souligner la performance du bâtiment en termes de consommation de froid et de gestion des intermittences. Elle a permis aussi de dégager des pistes d'optimisation visant à améliorer le régime de fonctionnement au secondaire, c'est-à-dire à minimiser le débit pour augmenter le dT et stabiliser les régimes de températures. Parvenir à ce résultat nécessiterait une phase de mise au point poussée impliquant probablement de travailler sur l'équilibrage ; équilibrage qui reste souvent le maillon faible empêchant les installations de fonctionner aux régimes prévus en conception.