



***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 Golden Tulip**

***Résultats de mesure***

***Livrable 2.2***

**avril 2020**

***rédigé par*** 

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.***

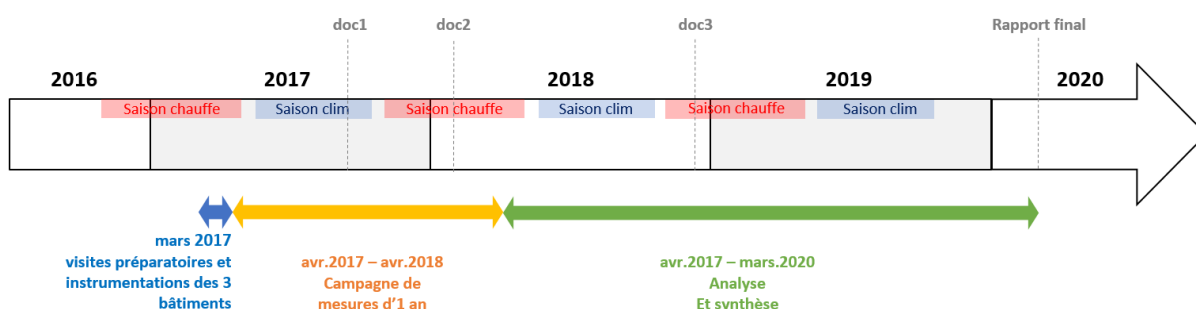
Référent Réunion : Fabien Picgirard [fabien.picgirard@ademe.fr](mailto:fabien.picgirard@ademe.fr) 02 67 71 15 46

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>chal</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 GOLDEN TULIP .....</b>	<b>12</b>
2.1	<i>Généralités .....</i>	12
2.1.1	Le bâtiment .....	12
2.1.2	Abonnements et maintenance.....	15
2.2	<i>Climatisation et traitement d'air.....</i>	15
2.2.1	Sous-station Thassalia .....	15
2.2.2	Distribution et émission .....	17
2.2.3	Traitement d'air.....	19
<b>3</b>	<b>Description de la campagne de mesures .....</b>	<b>22</b>
3.1	<i>Capteurs posés par Enertech.....</i>	22
3.2	<i>Données Thassalia.....</i>	23
3.3	<i>Données GTC .....</i>	23
<b>4</b>	<b>Résultats de mesure .....</b>	<b>26</b>
4.1	<i>Caractéristiques de la météo à Marseille.....</i>	26
4.1.1	Résultats mensuels.....	26
4.1.2	Température et hygrométrie .....	26
4.1.3	Ensoleillement.....	29
4.2	<i>Consommation de froid du bâtiment .....</i>	30
4.2.1	Variabilité saisonnière .....	30
4.2.2	Signature énergétique.....	31
4.2.3	Intermittence journalière .....	34
4.2.4	Puissance appelée .....	37
4.3	<i>Régimes de températures et débits.....</i>	38
4.3.1	Régimes théoriques.....	38
4.3.2	Régimes de températures .....	38

4.3.3	Débits primaire/secondaire et circuits de distribution .....	49
4.4	<i>Consommation électrique des auxiliaires</i> .....	53
4.5	<i>Gestion des ambiances et des émetteurs</i> .....	55
4.5.1	Consignes et ambiances dans les chambres .....	55
4.5.2	Gestion des ventilo-convecteurs.....	58
4.5.3	Gestion des CTA.....	61
<b>5</b>	<b>Synthèse et conclusion</b> .....	<b>65</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.

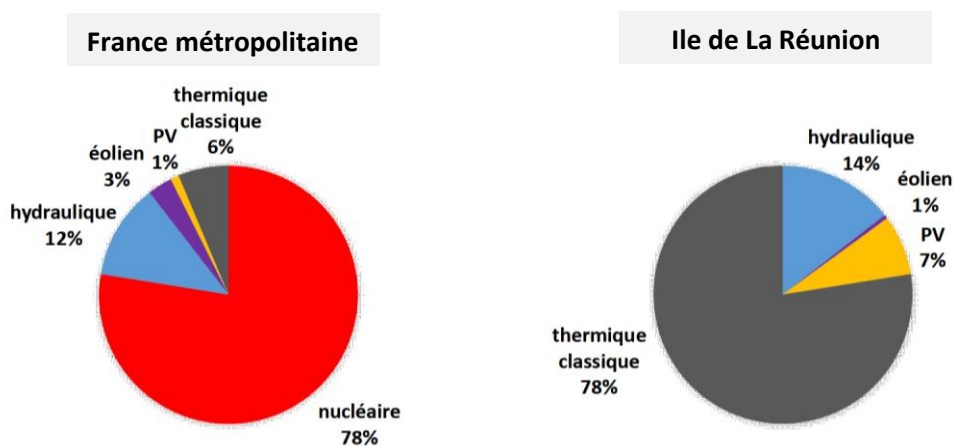


Figure 1 : Origine de l'électricité produite en France métropolitaine et à La Réunion (source des données : MEDDE, 2015 et Energies Réunion, 2015)

### 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).

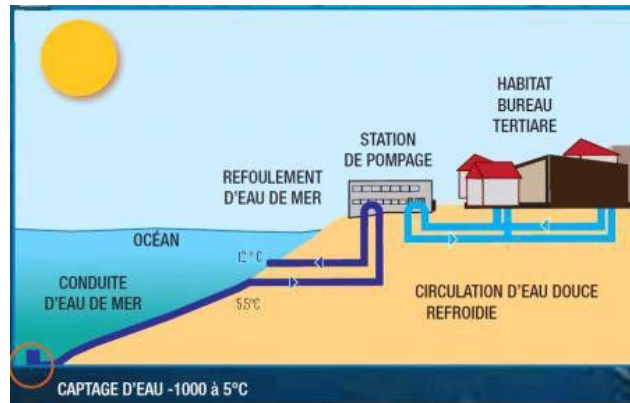


Figure 2 : Schéma de principe d’un réseau SWAC (Sea Water Air Conditioning) (Source : Engie)



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 CO2 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 CO2 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).

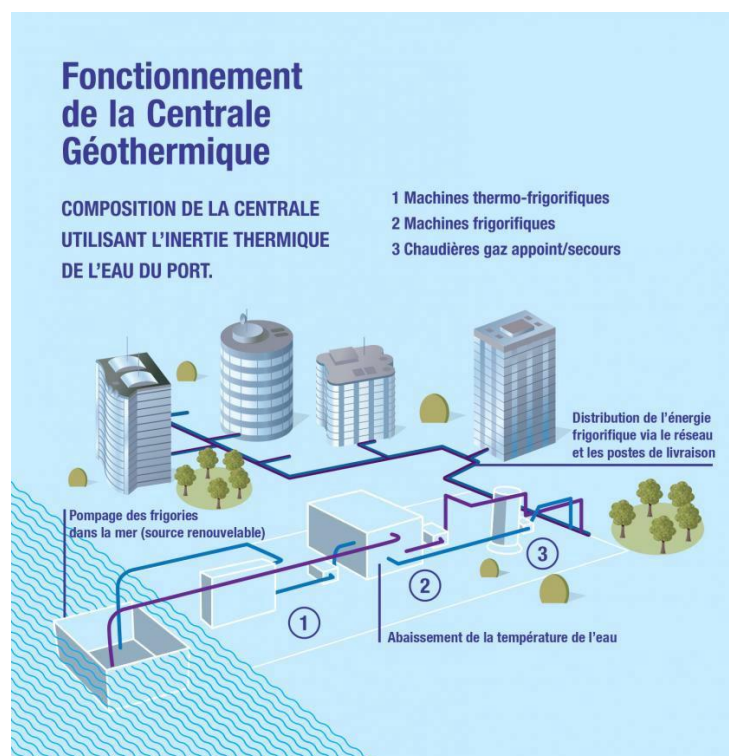


Figure 4 : Schéma de principe simplifié du réseau Thassalia à Marseille (source : Engie).

### 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 Golden Tulip.**

## 2 Description du bâtiment GOLDEN TULIP

### 2.1 Généralités

#### 2.1.1 Le bâtiment

Le bâtiment Golden Tulip est un hôtel de luxe 4 étoiles de 9500m<sup>2</sup> environ livré en avril 2016 et propriété de Covivio (auparavant Foncière des Régions). Le bâtiment est situé sur le boulevard Euroméditerranée avec une façade principale orientée vers l'Ouest (Figure 5).

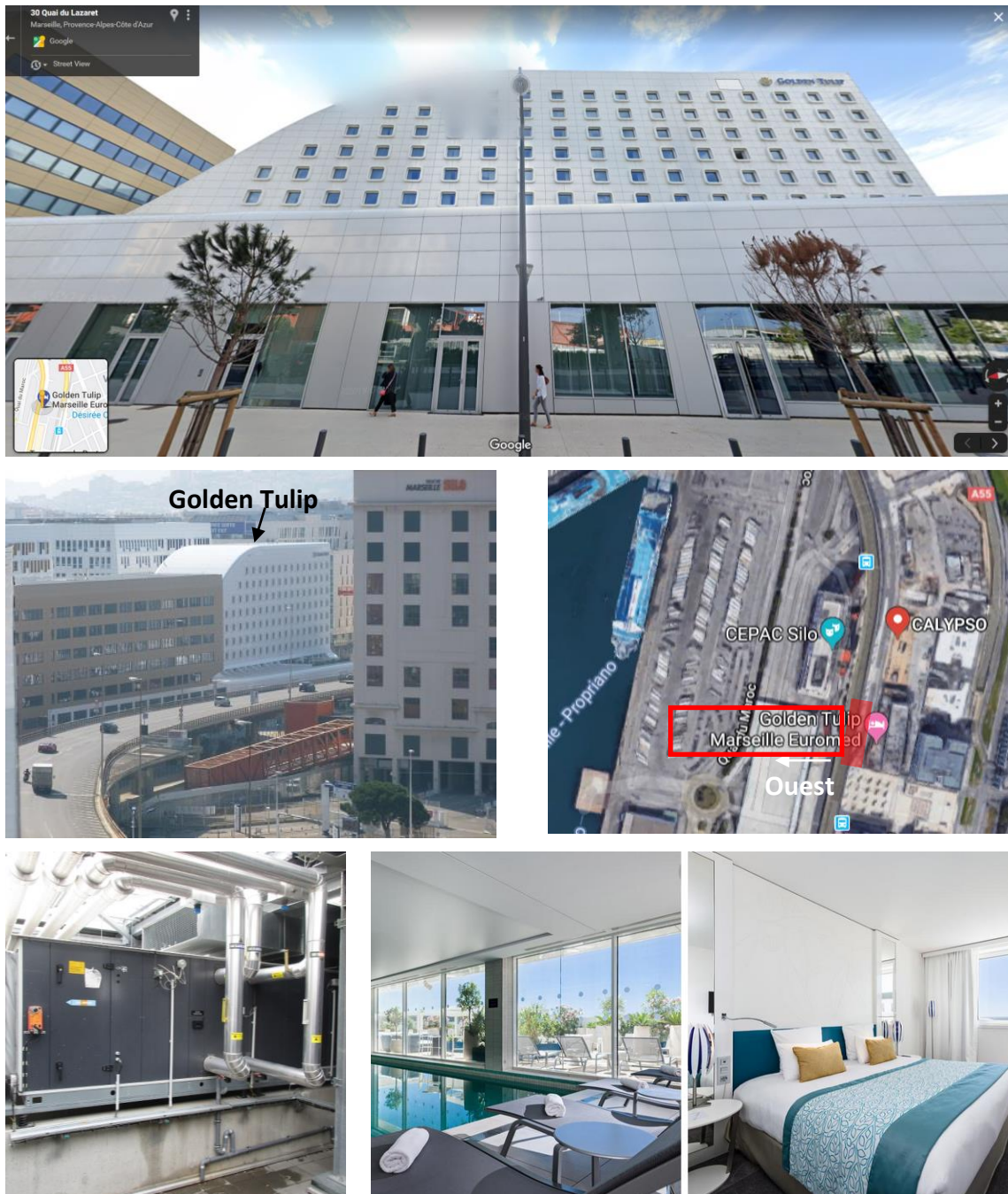


Figure 5 : Situation et vues du bâtiment Golden Tulip à Marseille (en bas à gauche toiture technique).

Le Golden Tulip comporte 10 niveaux (RDC à R+9) pour un total de 210 chambres :

- Les niveaux R+3 à R+8 sont uniquement dédiés aux chambres ;
- Le niveau R+2 abrite une piscine intérieure de 55m<sup>3</sup>, un bar lounge, une zone fitness des chambres et des terrasses extérieures ;
- Le niveau R+1 abrite des locaux techniques, des bureaux, la salle à manger des membres du personnel ;
- Le RDC abrite plusieurs salles de réunion, une salle polyvalente, l'accueil de l'hôtel ainsi qu'un restaurant comprenant une cuisine de production et une salle à manger d'une soixantaine de places (Figure 6).

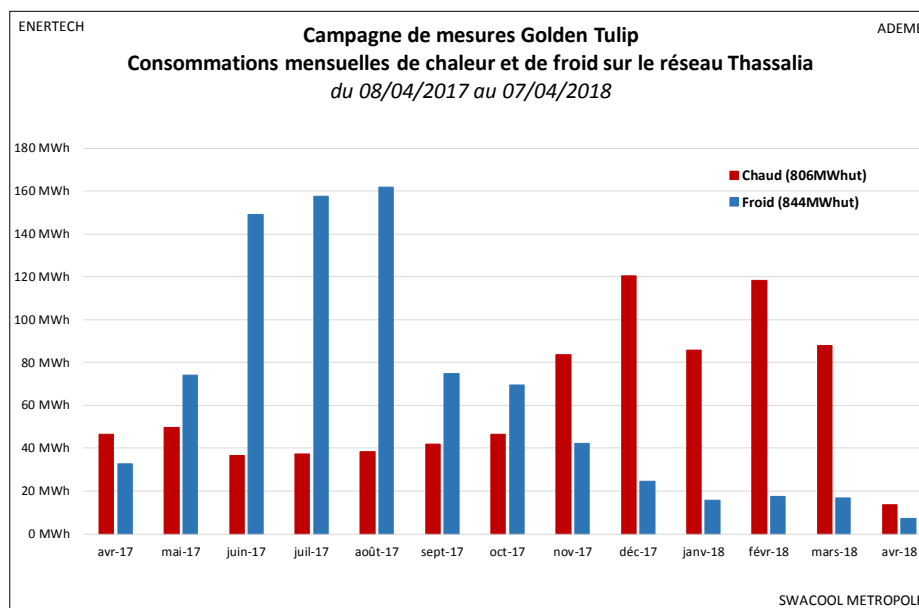


Figure 6 : Plans de niveau du bâtiment Golden Tulip (de haut en bas : étage courant, R+2, RDC).

### Au niveau des installations CVC et ECS :

- La climatisation du bâtiment est assurée par un réseau d'eau glacée alimenté en sous-station par le réseau Thassalia. Ce réseau alimente deux départs :
  - Un premier départ dédié aux batteries froides des ventilo-convecteurs des chambres ;
  - Un second départ dédié à tous les autres ventilo-convecteurs du site et aux batteries froides des CTA.
- Le chauffage est réalisé de deux manières différentes :
  - Un réseau de chauffage alimenté en sous-station par le réseau Thassalia et desservant deux départs : un premier départ pour l'ensemble des ventilo-convecteurs et VAV hors chambres et un second départ pour les batteries chaudes des CTA, l'échangeur piscine et la préparation ECS ;
  - Des batteries électriques sur l'ensemble des ventilo-convecteurs des chambres assurant le chauffage de ces dernières.
- L'ECS du site est assurée par une installation centralisée en toiture comprenant 10 000L de stockage (5 préparateurs de 2000L) et 3 réseaux de distribution bouclés (hébergement, services généraux, cuisine). Les préparateurs sont maintenus en chauffe par des échangeurs alimentés par un piquage sur la distribution générale (entre local Thassalia et local secondaire), complétés par un chauffage électrique de 90kW.

La climatisation ainsi que le chauffage sont mobilisés toute l'année comme le montre le graphique de la Figure 7. Le départ EG servant à la climatisation des chambres est arrêté entre mi-décembre et fin mars. Le départ EG vers les CTA n'est jamais arrêté. Les deux départs relatifs à la distribution de chauffage fonctionnent également toute l'année.



**Figure 7 : Consommations utiles de chaleur et de froid du Golden Tulip sur le réseau Thassalia.** NB : les sources de chaleur électriques (chauffage des chambres et production ECS par ex.) ne sont pas comptées ici.

### 2.1.2 Abonnements et maintenance

Le bâtiment dispose d'un abonnement électrique tarif vert (puissance non connue), d'un abonnement de froid au réseau Thassalia (puissance totale souscrite  $500\text{kW}_{\text{froid}}$ , 2 échangeurs) et d'un abonnement de chaleur au réseau Thassalia (puissance totale souscrite  $350\text{kW}_{\text{froid}}$ , 2 échangeurs).

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 de deux échangeurs sur la boucle Thassalia correspondant à une puissance souscrite de  $500\text{kW}_{\text{froid}}$ . D'après l'analyse fonctionnelle les deux échangeurs fonctionnent théoriquement simultanément sur le même régime. Le schéma de principe de la sous-station est présenté en Figure 8.

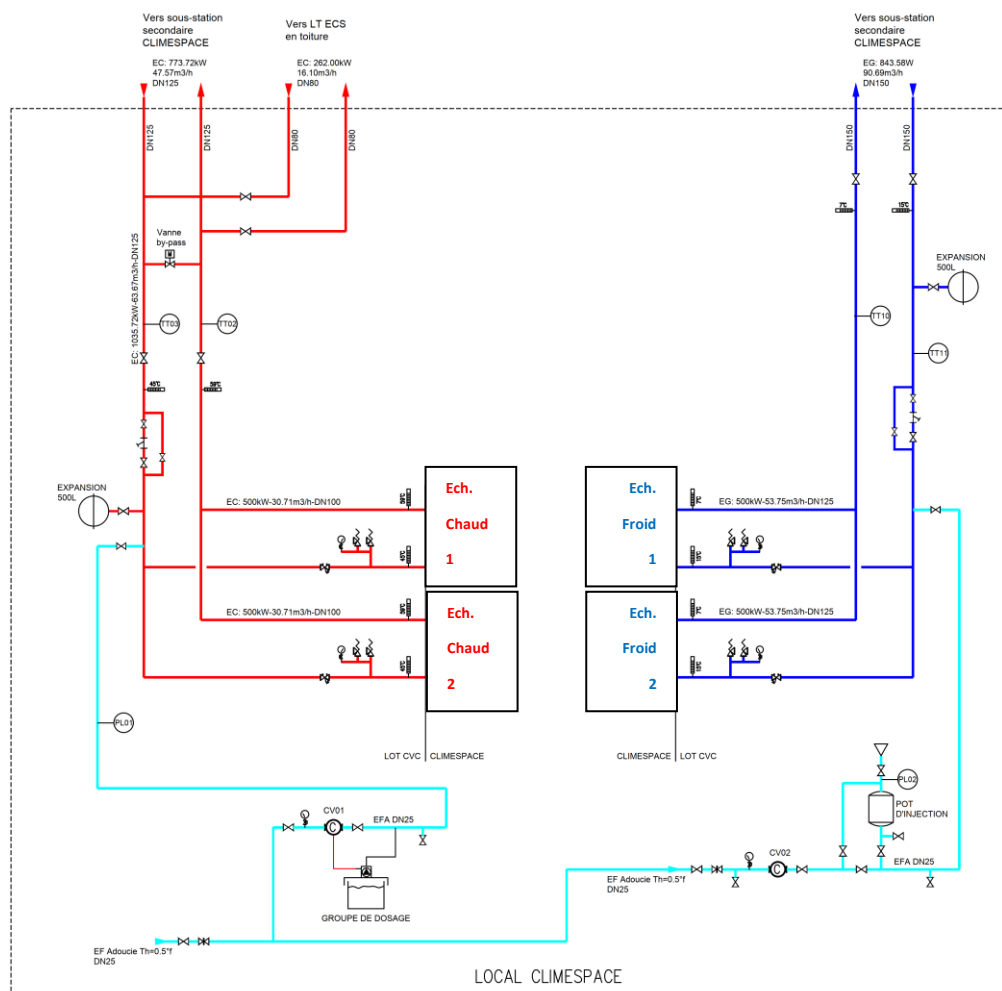


Figure 8 : Schéma de principe de la sous-station Thassalia (extrait du DOE).

Les régimes théoriques sont 6°C/14°C côté primaire de l'échangeur (boucle Thassalia) et 7°C/15°C côté secondaire de l'échangeur (distribution Golden Tulip). Une V2V motorisée sur le secondaire échangeur, pilotée en 0-10V sur la température commune de retour EG, permet théoriquement un retour échangeur supérieur à 15°C par effet de recyclage (Cf. Figure 10). Ce recyclage doit éviter les retours froids et les pénalités associées. Il provoque aussi naturellement une hausse de la température de départ au secondaire.

A noter toutefois que l'analyse fonctionnelle mentionne une alarme si la température de départ secondaire échangeur dépasse 10°C.

**Un compteur de frigories** est installé sur le retour du tronçon primaire Thassalia. 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 des pompes 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. Ce phénomène ne s'est pas produit durant la campagne de mesures.

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 théorique de régulation de cette vanne.

Des photos de la sous-station et du local technique secondaire sont présentées en Figure 9.



Figure 9 : Sous-station Thassalia et local technique secondaire du bâtiment Golden Tulip.



## 2.2.2 Distribution et émission

Deux réseaux d'eau glacée alimentent l'ensemble des émetteurs de froid : un premier réseau alimentant les ventilo-convecteurs des chambres et un second réseau alimentant les batteries froides des CTA et les autres ventilo-convecteurs ( Figure 10).

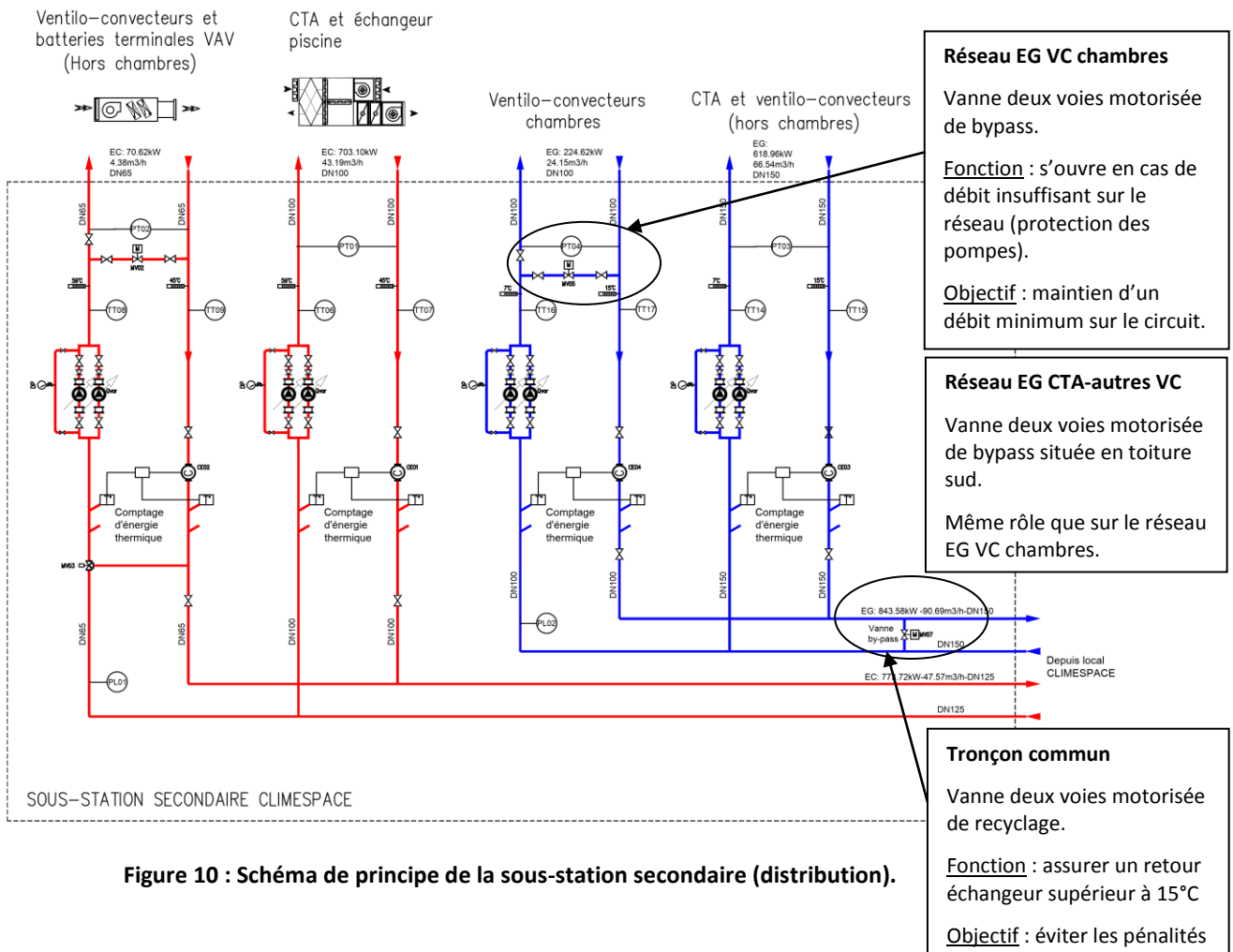


Figure 10 : Schéma de principe de la sous-station secondaire (distribution).

Chaque réseau dispose d'une pompe double pilotée par un variateur de fréquence (15-50Hz). La variation de vitesse est effectuée de manière à obtenir une pression constante sur le réseau. Les consignes théoriques sont :

- Réseau EG VC chambres : 160kPa (16mCE)
- Réseau EG CTA et autres VC : 140kPa (14mCE)

Des débits minimums liés à la protection des pompes sont par ailleurs définis dans l'analyse fonctionnelle. Ils sont permis par des V2V motorisées pilotées en 0-10V à partir de la mesure d'un capteur de débit (sortie 4-20mA) situé sur le retour de chaque circuit :

- Réseau EG VC chambres : débit nominal 24.2m<sup>3</sup>/h ; débit mini 3.4m<sup>3</sup>/h
- Réseau EG CTA et autres VC : débit nominal 66.5m<sup>3</sup>/h ; débit mini 11m<sup>3</sup>/h

Le débit théorique nominal total d'eau glacée est donc de  $90.7\text{m}^3/\text{h}$  (avec un débit minimum de  $14.4\text{m}^3/\text{h}$  soit 16% de la valeur nominale et théoriquement 10% du débit maximum des pompes) ce qui représente en régime 7-15°C une puissance nominale de  $843\text{kW}_{\text{froid}}$ . Un foisonnement a donc été appliqué pour ne souscrire qu'à une puissance de climatisation de  $500\text{kW}_{\text{froid}}$ .

L'émission de froid du bâtiment est organisé de la manière suivante :

- **Des batteries froides sur le soufflage de l'ensemble des CTA** permettent un soufflage dans les locaux à température neutre quelle que soit la température extérieure, de manière à éviter la charge thermique liée à la ventilation. Les batteries froides des CTA sont pilotées par des vannes deux voies terminales afin que le débit d'eau glacée puisse varier dans le réseau en fonction de la demande ;
- **Des ventilo-convecteurs permettent de climatiser les locaux par recyclage d'air.** Tous les ventilo-convecteurs du site sont alimentés par le réseau d'eau glacée et pilotés par des vannes deux voies pour maximiser la variation de débit. On distingue :
  - **Les ventilo-convecteurs des chambres** « 2 tubes 2 fils » : alimentés en eau glacée pour la climatisation, et disposant d'une résistance électrique pour le chauffage. Les consignes de température sont imposées par la GTC et un boîtier terminal permet à l'utilisateur d'effectuer les manipulations suivantes : augmenter ou baisser la consigne de 3°C, moduler manuellement la vitesse du ventilateur et mettre l'appareil à l'arrêt. Sans cette gestion manuelle, l'ouverture de la V2V et la vitesse du ventilateur sont proportionnelles à l'écart mesuré entre la sonde d'ambiance du boîtier et la consigne. Trois consignes de température GTC sont définies : occupation (présence client identifiée par le dispositif « Vingcard »), inoccupation courte (absence Vingcard mais chambre réservée) et inoccupation longue (chambre non réservée). Les consignes théoriques sont de 21°C en occupation, 19°C en inoccupation courte et 17°C en inoccupation longue, ce qui semble à première vue excessivement frais.
  - **Les ventilo-convecteurs des autres locaux** (bureaux, salles de réunion etc.) « 4 tubes » : alimentés en eau glacée et en eau chaude. Les températures sont imposées par la GTC avec une possibilité de décalage pour l'utilisateur de  $\pm 3^\circ\text{C}$ . L'utilisateur peut aussi moduler lui-même s'il le souhaite la vitesse du ventilateur et mettre l'appareil à l'arrêt. Les consignes de base sont : 19°C en inoccupation et 21°C en occupation.
  - Enfin les ventilo-convecteurs des **locaux informatiques** (SRI) « 2 tubes » : alimentés en eau glacée, sans possibilité de chauffage. La consigne de base programmée à la GTC est de 24°C. NB : le local SRI du R+1 dispose par ailleurs d'une armoire de climatisation eau glacée ainsi qu'une armoire de climatisation en détente directe.

Enfin **deux compteurs de frigories** sont disposés sur les départs d'eau glacée (un sur le réseau « VC chambres », un sur le réseau « CTA et autres VC »).

Sur les différentes **configurations aéraliques** rencontrées (

Figure 11), on peut retenir que le soufflage des CTA est dans la plupart des cas gainé sur le soufflage des ventilo-convecteurs. Les bouches de reprise des CTA et ventilo-convecteurs sont en revanche indépendantes.

Dans certains de nombreux cas (comme les chambres) les ventilo-convecteurs ne sont gainés qu'au soufflage mais pas à la reprise qui est faite directement en vrac dans le faux plafond, une grille donnant dans le local.

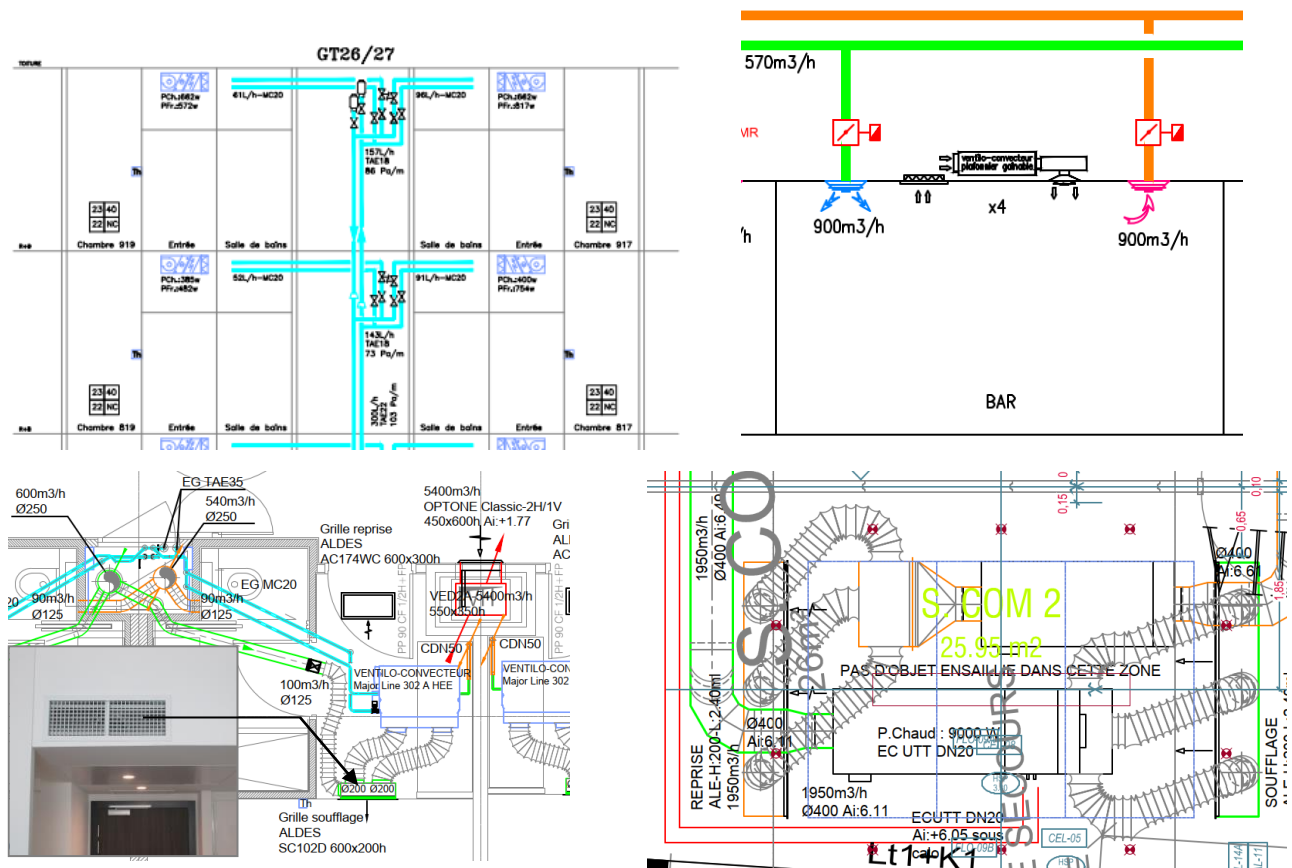


Figure 11 : De haut en bas et de gauche à droite : synoptique en coupe tronquée de la distribution EG gaine pour alimenter les chambres ; principe aéralique dans un local commun (bar) ; principe aéralique en plan dans une chambre ; principe aéralique en plan dans un local de réunion (S.com2).

### 2.2.3 Traitement d'air

Le traitement d'air du bâtiment est assuré principalement par des centrales double flux munies de récupérateurs de chaleur à plaque et de batteries chaudes et froides. Elles assurent théoriquement un le soufflage à température neutre (Figure 12). Les tronçons terminaux de soufflage sont la plupart du temps gainés sur ceux des ventilo-convecteurs.

La gestion des bypass échangeurs est théoriquement gérée de manière à minimiser l'énergie d'appoint chaud/froid à fournir pour respecter la consigne de soufflage (Figure 13).

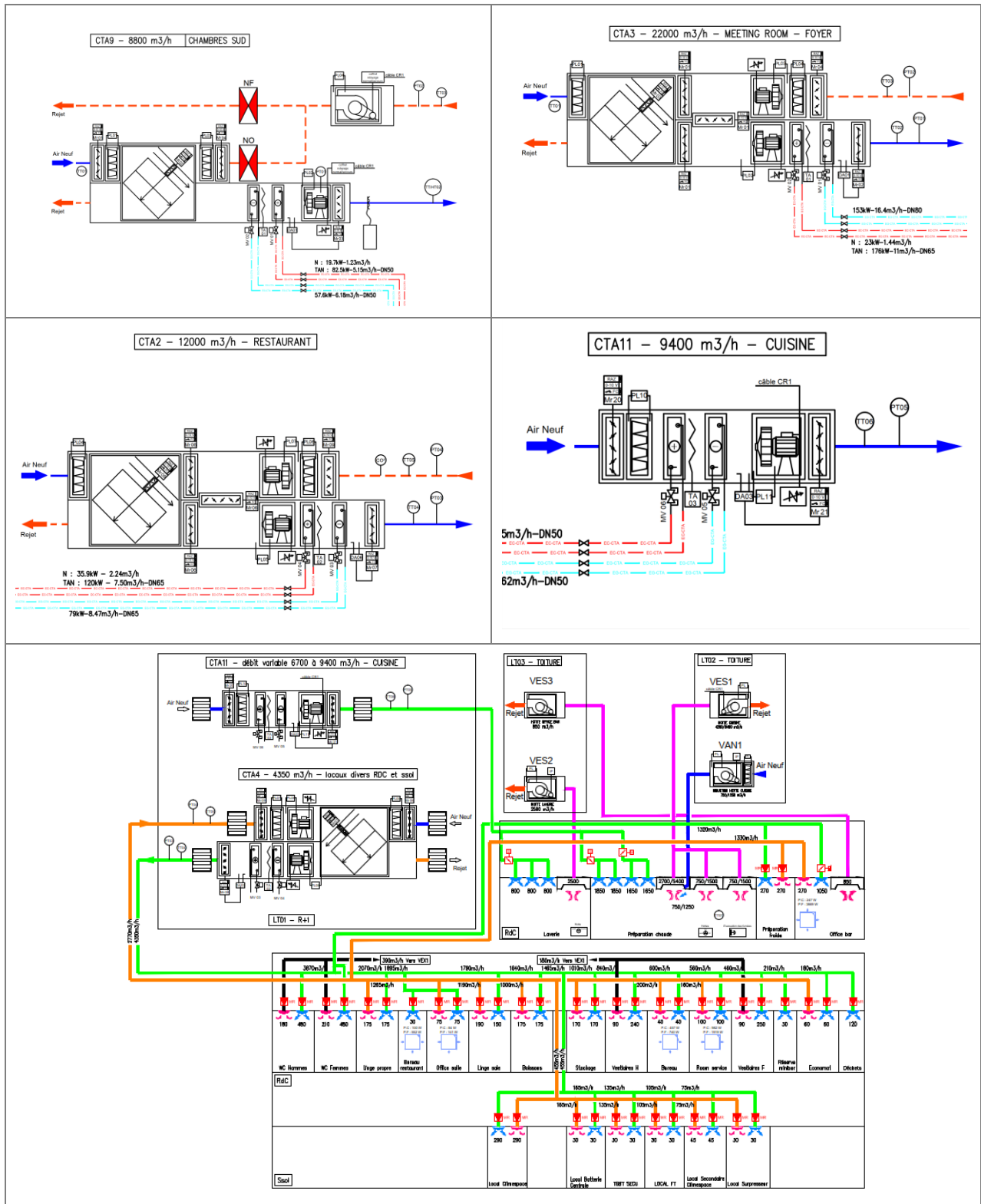


Figure 12 : Illustration des principes aérauliques et hydrauliques relatifs à quelques CTA.

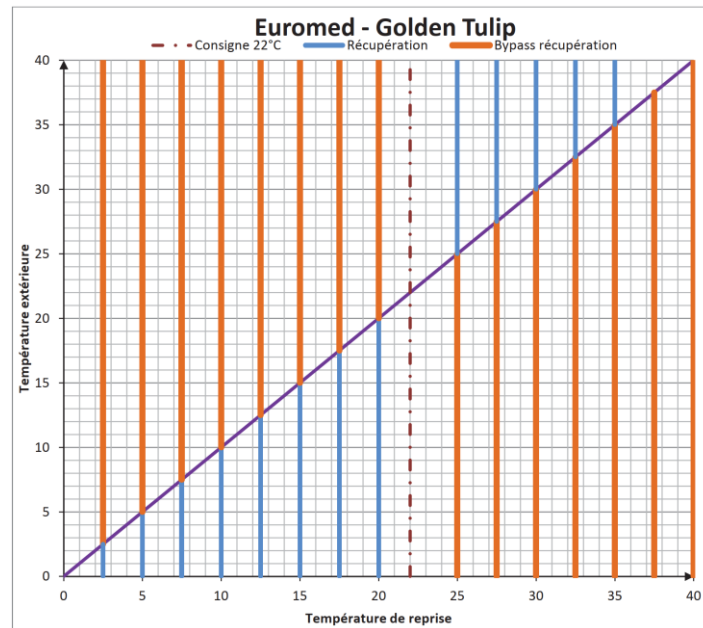


Figure 13 : Gestion du bypass des échangeurs CTA, ici pour une consigne d'ambiance de 22°C.

La liste exhaustive des CTA extracteurs est présentée dans le Tableau 1.

CTA / extrac	Dénomination (+ emplacement)	Récup. chaleur	Batterie chaude	Batterie froide	Soufflage /reprise	Débit
CTA1	Hall d'accueil / lobby (Toiture)	plaque	oui	oui	S + R	12 000m <sup>3</sup> /h
CTA2	Restaurant (Toiture)	plaque	oui	oui	S + R	12 000m <sup>3</sup> /h
CTA3	Meeting room / Foyer (LT01)	plaque	oui	oui	S + R	22 000m <sup>3</sup> /h
CTA4	Locaux divers RDC Ssol (LT01)	plaque	oui	oui	S + R	4 350m <sup>3</sup> /h
CTA5	Locaux divers R+1 R+2 (LT01)	plaque	oui	oui	S + R	3 725m <sup>3</sup> /h
CTA6/7	Circulations et lingerie (Toit LT03)	plaque	oui	oui	S + R	7 100m <sup>3</sup> /h
CTA8	Chambres nord (Toiture)	plaque	oui	oui	S + R	12 000m <sup>3</sup> /h
CTA9	Chambres sud (Toiture)	plaque	oui	oui	S + R	8 800m <sup>3</sup> /h
CTA10	PAC piscine	Plaque	oui	Non	S + R	4 300m <sup>3</sup> /h
CTA11	Cuisine (LT01)	non	oui	oui	S	9 400m <sup>3</sup> /h
VES1	Hotte cuisine (Toit LT02)	non	-	-	R	8 400m <sup>3</sup> /h
VES2	Hotte laverie (Toit LT03)	non	-	-	R	2 500m <sup>3</sup> /h
VES3	Hotte office bar (Toit LT03)	non	-	-	R	850m <sup>3</sup> /h
VES4	Extrac LT piscine	non	-	-	R	550m <sup>3</sup> /h
VES5	Hotte M à Laver (terrasse R+2)	non	-	-	R	1 500m <sup>3</sup> /h
VAN1	Induc. hotte cuisine (Toit LT02)	non	non	non	S	1 250m <sup>3</sup> /h
VEX1	Vestiaires du personnel	non	-	-	R	990m <sup>3</sup> /h

Tableau 1 : Liste des CTA et extracteurs du Golden Tulip. Débit total de renouvellement environ 96 000m<sup>3</sup>/h.


### 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 dans les locaux techniques, au niveau des CTA et dans les bureaux. Au total 73 points de mesures ont été installés (Tableau 2) et ont enregistré pendant un an au pas de temps de 10 minutes.

*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 échangeur froid 1 primaire échangeur aller et retour
	Température échangeur froid 1 secondaire échangeur aller et retour
	Température échangeur froid 2 primaire échangeur aller et retour
	Température échangeur froid 2 secondaire échangeur aller et retour
Sous station secondaire	Température VC chambres froid aller
	Température VC chambres froid retour
	Compteur frigories énergie VC chambres froid
	Compteur frigories volume VC chambres froid
	Température CTA et VC (hors chambre) froid aller
	Température CTA et VC (hors chambre) froid retour
	Compteur frigories énergie CTA et VC (hors chambre) froid
	Compteur frigories volume CTA et VC (hors chambre) froid
	Consommation électrique pompe EC CTA + Echangeur
	Consommation électrique pompe EC VCO + Batterie
	Consommation électrique pompe EG CTA + VCO
	Consommation électrique pompe EG VCO Chambres
CTA 1 / CTA 2 / CTA 3 CTA 4 / CTA 5 / CTA 6-7 CTA 8 / CTA 9 / CTA 11	Consommation électrique moteur soufflage Consommation électrique moteur extraction Température d'air soufflé Température d'air extrait
Chambres : 301 / 314 / 315 / 332 901 / 907 / 912 / 924	Température ambiante Hygrométrie ambiante Température d'air soufflé
Station météo installée sur un bâtiment à proximité (Mirabeau2) avec : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Température</li> <li>• Hygrométrie</li> <li>• Ensoleillement</li> <li>• Vitesse vent</li> <li>• Direction vent</li> <li>• Pluviométrie</li> </ul>	

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

### 3.2 Données Thassalia

Les données suivantes sont issues des compteurs de chaleur Thassalia de l'échangeur froid de la sous-station du Golden Tulip. 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 échangeur 1 (pas de temps 1h)
- Température secondaire retour échangeur 1 (pas de temps 1h)
- Température secondaire départ échangeur 2 (pas de temps 1h)
- Température secondaire retour échangeur 2 (pas de temps 1h)

Les mêmes données ont été fournies sur la partie chaleur de la sous-station.

### 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. L'intégrateur a été spécialement missionné par Enertech pour programmer l'enregistrement de ces données (au pas de temps de 10 minutes). Elles sont présentées dans les tableaux suivants.

Local	Libellé
Sous station Thassalia	Signal vanne bypass chaud
	Signal vanne bypass froid
	Température échangeur froid 1 secondaire échangeur aller et retour
	Température échangeur froid 2 secondaire échangeur aller et retour
	Température général froid aller et retour
	Température échangeur chaud 1 secondaire échangeur aller et retour
	Température échangeur chaud 2 secondaire échangeur aller et retour
	Température général chaud aller et retour
	Température froid aller VC et CTA

Local	Libellé
CTA salle de réunion	Commande vanne chaud
	Commande vanne froid
	Commande volet air mélangé
	Consigne pression air repris
	Consigne pression air soufflé
	Pression air repris
	Pression air soufflé
	CC température ambiante mini Bdv
	Signal variateur extraction
	Signal variateur soufflage
	Signal volet bypass
	Température d'air repris
Température d'air soufflé	
CTA restaurant	Commande vanne chaud
	Commande vanne froid
	Commande volet air mélangé





## Données GTC manquantes à l'issu de la mission :

### Comptage électrique :

- Compteur électrique alimentation générale du bâtiment ou R+1 TD PAC piscine
- Compteur électrique R+1 Traitement d'eau

### Comptage de frigories (compensé par suivi Enertech) :

- Compteur frigorie\_Energie CTA et VC (hors chambre) froid
- Compteur frigorie\_Volume CTA et VC (hors chambre) froid
- Compteur frigorie\_Energie VC chambres froid
- Compteur frigorie\_Volume VC chambres froid

### Températures froides (compensé par suivi Enertech):

- Températures VC chambres froid aller
- Températures VC chambres froid retour
- Température CTA et VC (hors chambre) froid aller
- Température CTA et VC (hors chambre) froid retour

### Comptage de chaleur :

- Compteur chaleur\_Energie circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud
- Compteur chaleur\_Volume circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud
- Compteur chaleur\_Energie CTA et échangeur piscine chaud
- Compteur chaleur\_Volume CTA et échangeur piscine chaud
- Compteur chaleur\_Energie ECS
- Compteur chaleur\_Volume\_ECS

### Températures chaudes :

- Température circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud aller
- Température circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud retour
- Température CTA et échangeur piscine chaud aller
- Température CTA et échangeur piscine chaud retour

### Positions de vannes :

- Position V3V circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud
- Position vanne by pass circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud
- Position vanne by pass circuit CTA et échangeur piscine chaud
- Position vanne by pass circuit VC chambres **froid**
- Position vanne by pass circuit CTA et VC (hors chambre) froid

### Différences de pressions

- Différence pression mesuré CTA et VC (hors chambre) froid
- Différence pression consigne CTA et VC (hors chambre) froid
- Différence pression mesuré VC chambres froid
- Différence pression consigne VC chambres froid
- Différence pression mesuré circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud
- Différence pression consigne circuit ventilo convecteur et batterie VAV (hors chambre) chaud
- Différence pression mesuré CTA et échangeur piscine chaud
- Différence pression consigne CTA et échangeur piscine chaud

## 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 Golden Tulip. 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 :										3 169 h	1 757 kWh/m2	791 dju	1228 dju

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 14. 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>H2O</sub>/kg<sub>airsec</sub> en été avec des pics à 25 grammes contre 7 à 8 gr<sub>H2O</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).

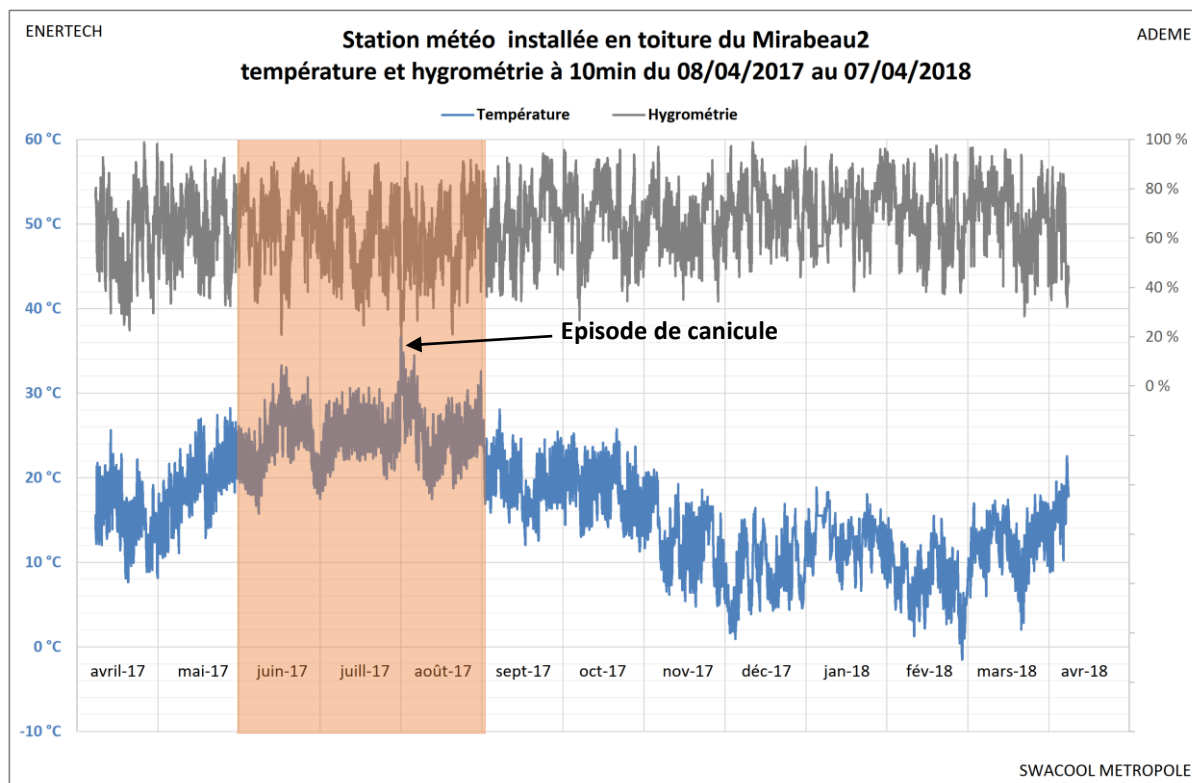


Figure 14 : Température et hygrométrie mesurées par la station météo du projet.

Les deux graphiques suivants (Figure 15 et Figure 16) 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.**

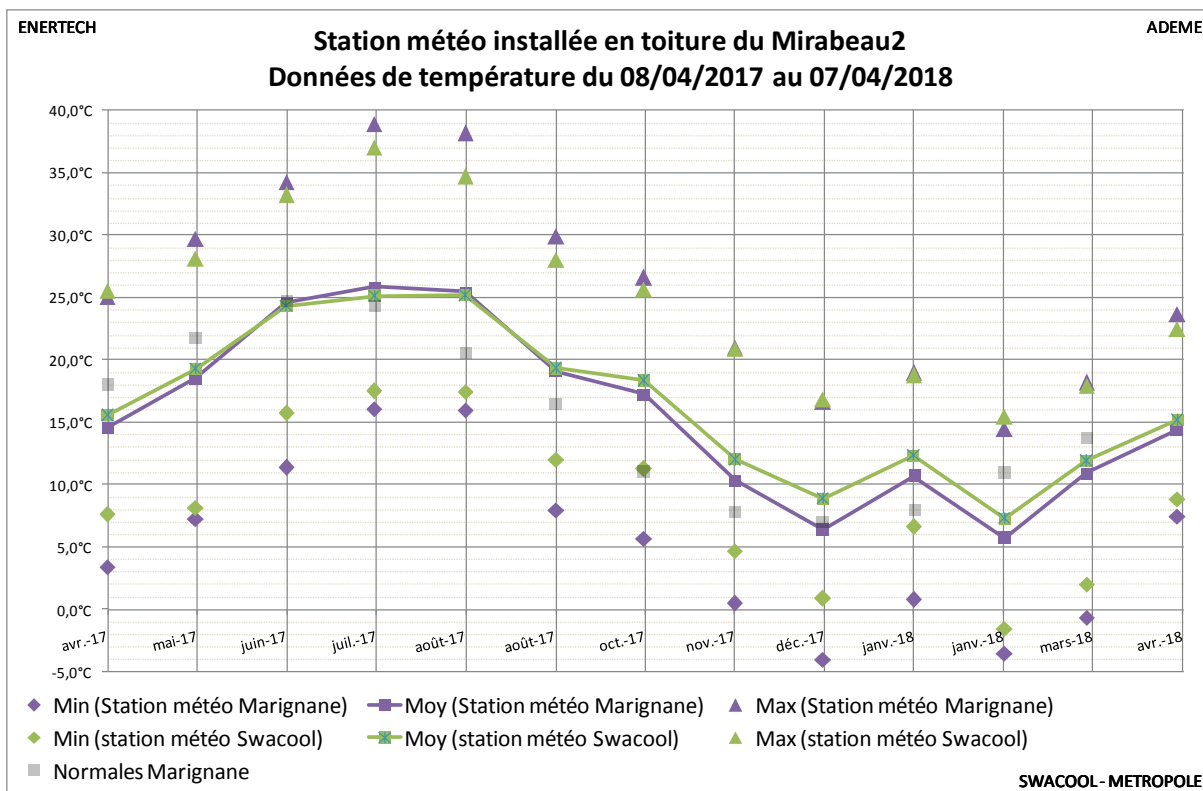


Figure 15 : Températures mensuelles comparées entre la station météo du projet et la station météo de Marignane.

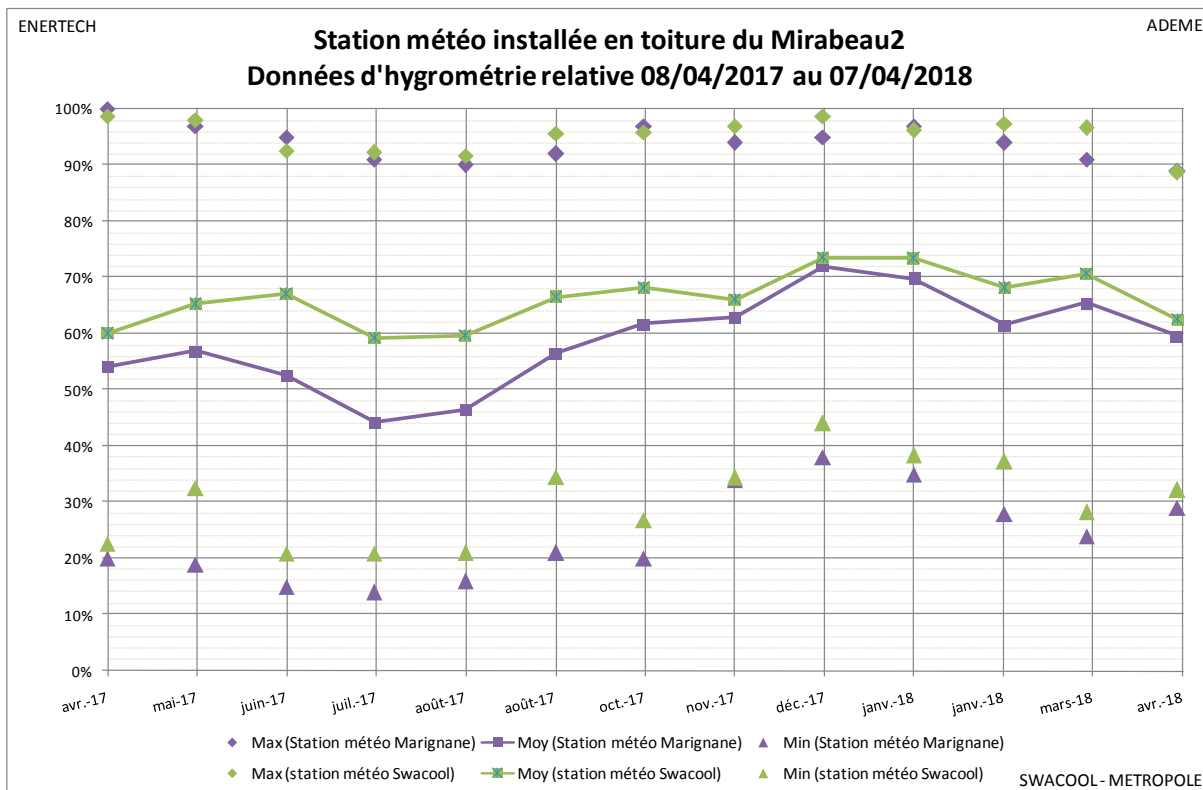


Figure 16 : Hygrométries mensuelles comparées entre la station météo du projet et la station météo de Marignane.

### 4.1.3 Ensoleillement

L'ensoleillement mesuré est présenté en Figure 17 et Figure 18. D'après la station de Marignane l'ensoleillement de mai à septembre 2017 a été de 6% supérieur à la normale.

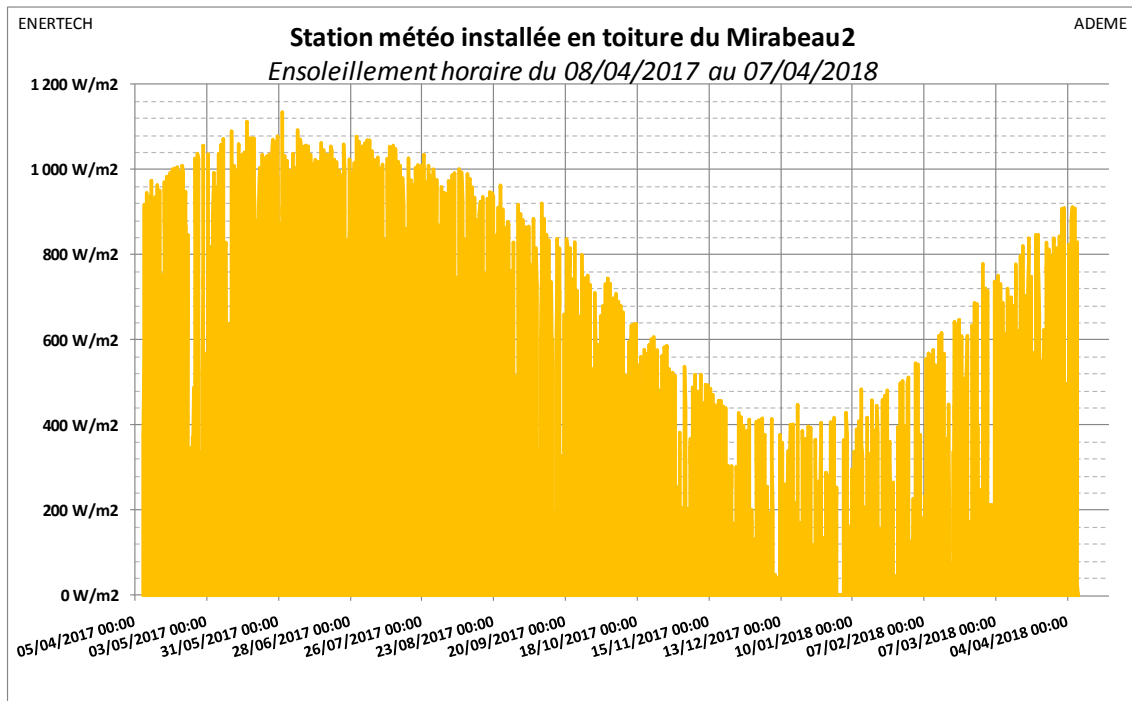


Figure 17 : Irradiation horaire mesurée par la station météo du projet.

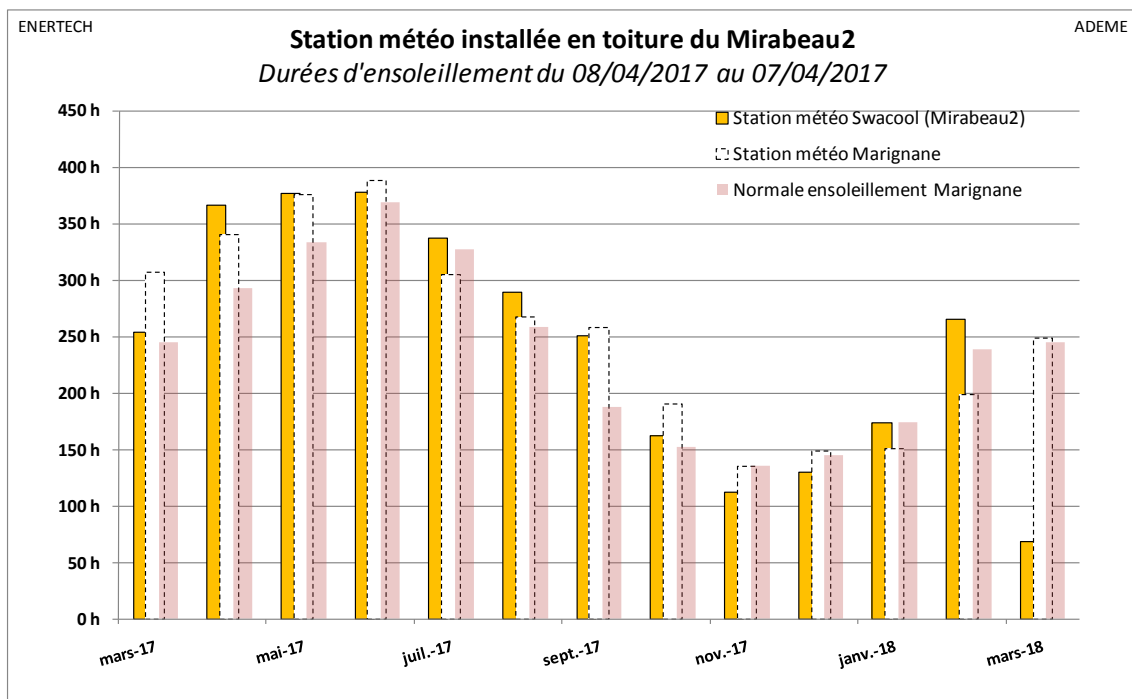


Figure 18 : Durées d'ensoleillement comparées entre la station météo du projet et celle de Marignane (avec normales d'ensoleillement à Marignane).

## 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 Golden Tulip a consommé **844MWh<sub>froid</sub>** entre le 8 avril 2017 et le 7 avril 2018 ce qui représente **88.8kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup>/an**. C'est le bâtiment le plus consommateur de froid du projet SWACOOL<sup>3</sup>. La consommation de froid du Golden Tulip est comparable à sa consommation de chauffage<sup>4</sup>. La variabilité mensuelle de la consommation est marquée (Figure 19) avec 55% 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 en dehors du talon hivernal comme illustré ci-dessous ( $R^2=0.99$ ).

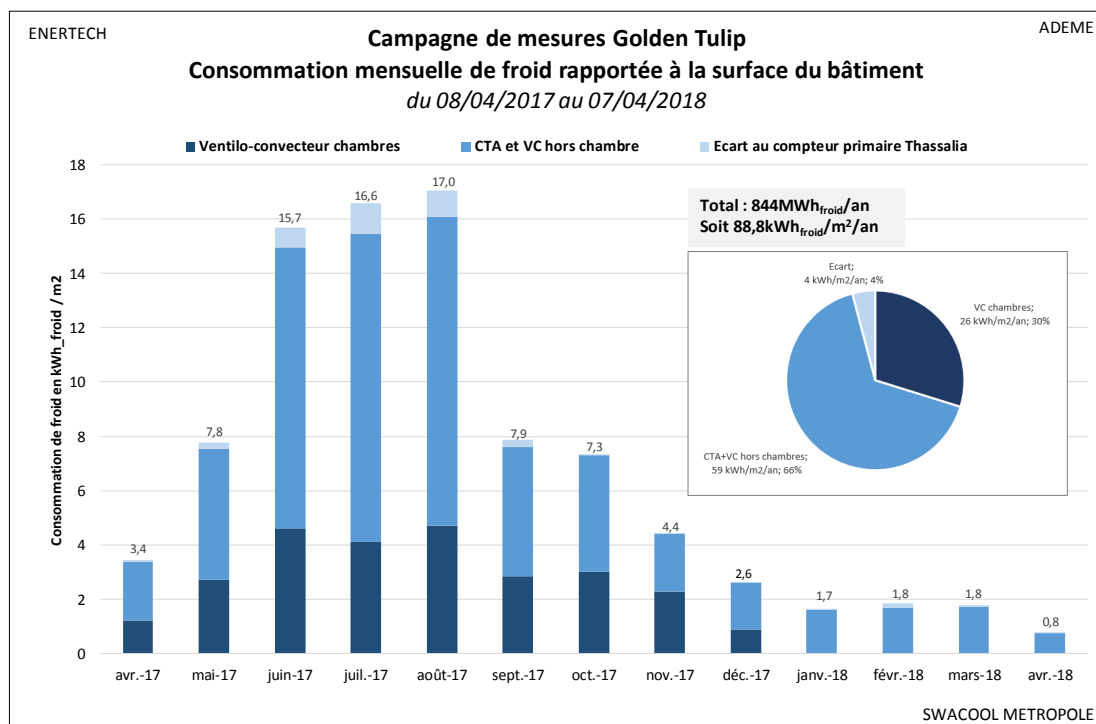
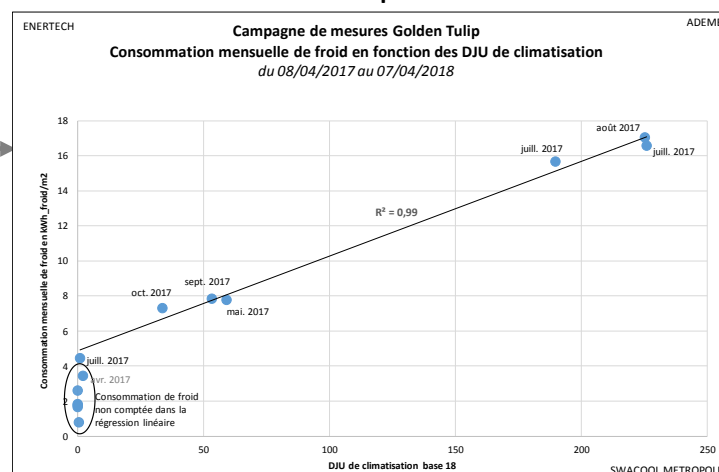


Figure 19 : Consommation mensuelle de froid du bâtiment prise sur le réseau Thassalia.

Lien avec les  
DJU clim



<sup>3</sup> Les bâtiments Calypso et Mirabeau2 ont consommé respectivement 19.8 et 81.4kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup>/an.

<sup>4</sup> Chaleur annuelle hors chambres : 85kWh<sub>chal</sub>/m<sup>2</sup>/an (Thassalia) + 14kWh<sub>é</sub>/m<sup>2</sup>/an (appoint électrique ECS)

Le réseau « CTA + ventilo-convecteurs hors chambres » consomme les deux tiers de l'énergie utile de froid, tandis que le réseau « Ventilo-convecteur chambres » consomme à peu près le tiers restant.

On note une différence de comptage entre le compteur de frigorie Thassalia (primaire échangeur) et la somme des compteurs de frigories des deux départs d'eau glacée (départ distribution). Cette différence annuelle de  $35\text{MWh}_{\text{froid}}$  représente 4% de la consommation totale (min mensuel -1% en décembre 2017, max mensuel 9% en février 2018). Une bonne partie de cet écart peut être attribuée selon nous à la précision de comptage.

On peut réellement s'interroger sur la consommation de froid hivernale (décembre à mars) du bâtiment qui est réalisée par le réseau « CTA et ventilo-convecteur hors chambres » et correspond à un appel moyen de froid utile de l'ordre de  $25\text{kW}_{\text{ut}}$ . La climatisation des locaux informatiques ne peut expliquer à elle seule cet appel de puissance. Les 2 pistes que nous pouvons évoquer sont :

- Les pertes de distribution sur les circulations d'eau glacées résiduelles
- Des unités terminales mal réglées qui appellent successivement du chaud et du froid pour maintenir leur consigne (PID trop raide)

Quoi qu'il arrive un besoin de froid en cette période devrait pouvoir être réalisé par apport d'air froid extérieur via les CTA.

#### 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 20) : corrélation quasi-linéaire de coefficient  $R^2=0.82$ , meilleure que sur le Calypso. La signature des consommations est donc relativement nette. On distingue très nettement le « talon de consommation » pour les températures extérieures inférieures à  $15^\circ\text{C}$  (talon qui apparaît plutôt sous  $18^\circ\text{C}$  extérieur pour le Calypso).

Les consommations relatives à ce talon sont concentrées sur la période du 29/10/2017 au 06/04/2018 (avec quelques points fin avril 2017), il s'agit donc d'un talon de consommation « hivernal ». Il est constitué de l'énergie nécessaire pour :

- En bord de saison de climatisation (saison étendue compte tenu des températures de consigne très basses) : vaincre les apports internes, solaires et conductifs pour respecter les consignes de températures, ainsi que compenser les défauts de régulation (si les PID sont trop « raides » il peut y avoir alternance chaud/froid sur un émetteur pour maintenir la consigne : hypothèse à confirmer) ;
- En hiver (décembre à mars) : compenser les pertes de distribution inhérentes au fait de maintenir la disponibilité du froid dans le réseau CTA, ainsi que compenser les éventuels défauts de régulation sur la gestion de la température soufflée par les CTA (PID trop « raide », voir ci-avant : hypothèse à confirmer).

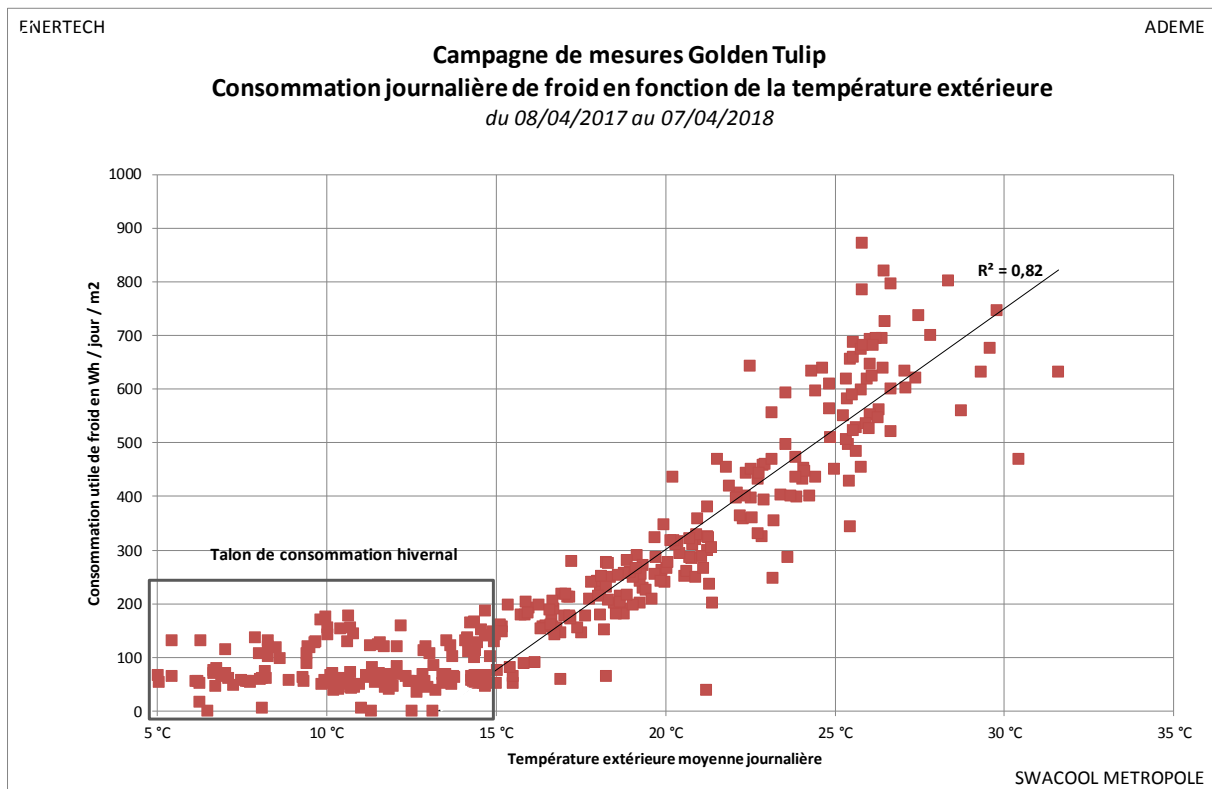


Figure 20 : Signature énergétique de la consommation journalière de froid du bâtiment Golden Tulip en fonction de la température extérieure.

Contrairement aux cas mesurés sur l'île de La Réunion, et de la même manière que sur le bâtiment Calypso, la corrélation des consommations de froid avec l'enthalpie de l'air extérieur est moins bonne qu'avec la température (Cf. Figure 21 :  $R^2=0.80$  avec l'enthalpie contre  $R^2=0.82$  avec la température). Ceci 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).

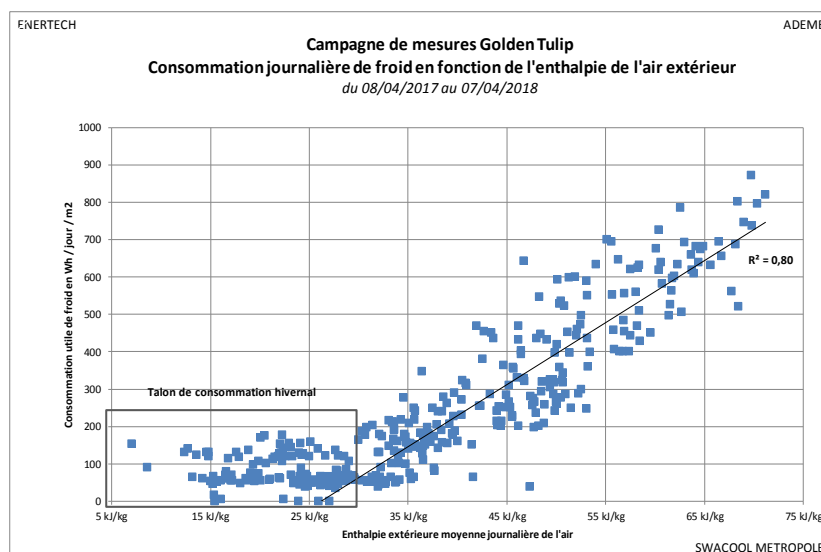


Figure 21 : Signature énergétique de la consommation journalière de froid du bâtiment Golden Tulip en fonction de l'enthalpie de l'air extérieur.



Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, la façade principale de l'hôtel orientée à l'ouest **n'entraîne pas de sensibilité particulière de la consommation de climatisation à l'ensoleillement** (Figure 22) : la corrélation de la consommation avec l'ensoleillement est très faible et le demeure même si l'on considère l'irradiation solaire de l'après-midi.

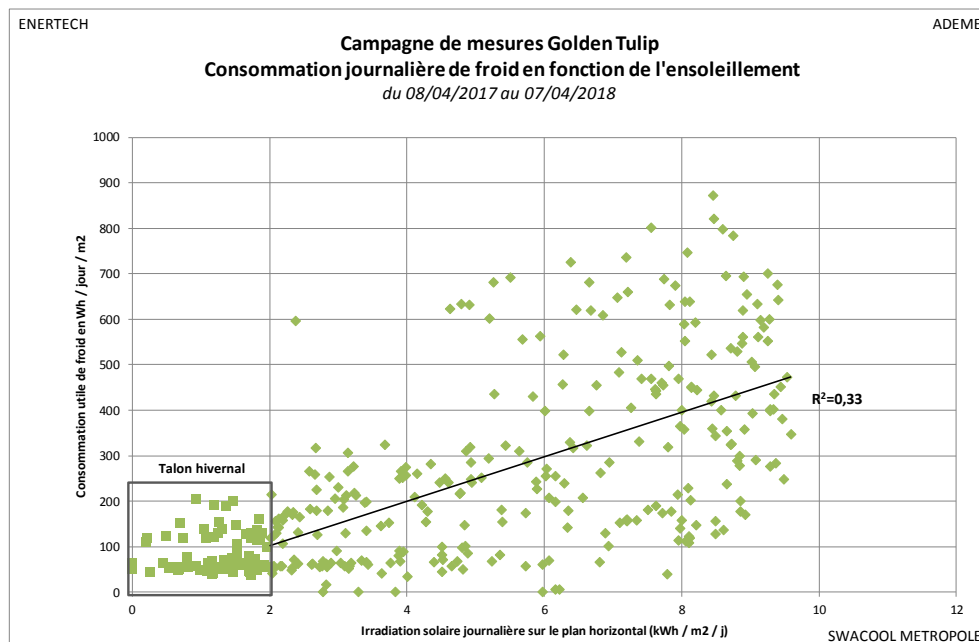


Figure 22 : Signature énergétique de la consommation de froid du bâtiment Golden Tulip en fonction de l'irradiation solaire (jours ouvrés). Corrélation très faible.

De plus il est constaté que la dispersion des points autour de la signature énergétique en température, c'est-à-dire la dispersion des consommations pour une température extérieure donnée, n'est pas liée non plus au premier ordre à l'irradiation (Figure 23).

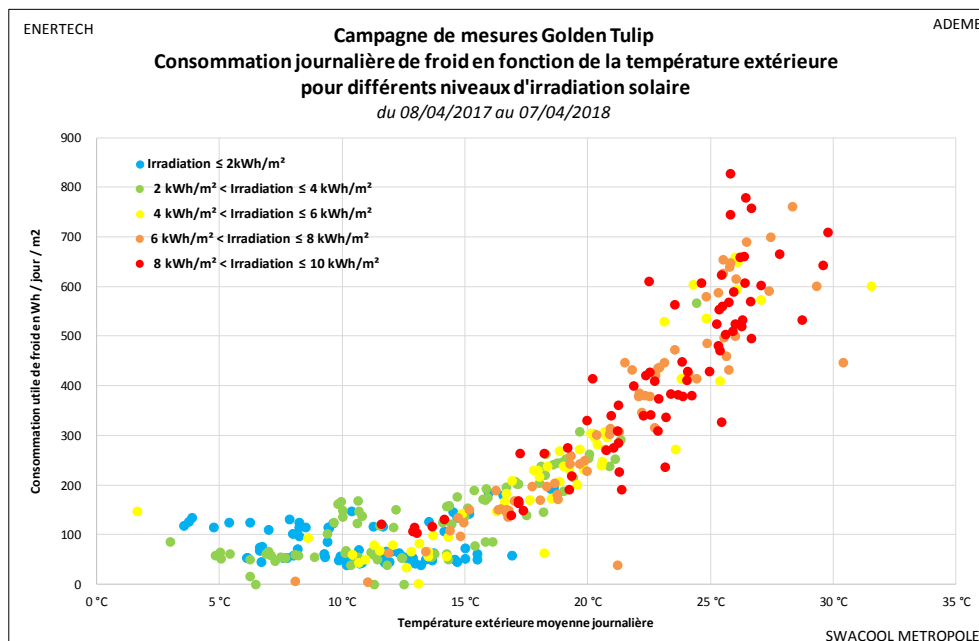


Figure 23 : Consommation journalière de froid du bâtiment Golden Tulip en fonction de la température extérieure, pour différents niveaux d'ensoleillements journaliers.

Nous pouvons en conclure que sur le Golden Tulip :

- Le premier déterminant de la consommation de climatisation **est la température moyenne extérieure** (en dehors du talon de consommation observé en inter-saison mais aussi en hiver sur le Golden Tulip) ;
- L'ensoleillement journalier n'apparaît que comme un déterminant mineur de la consommation. Les autres contributeurs à la charge de climatisation (échanges conductifs et aérauliques liés au dT intérieur-extérieur, apports internes à combattre, pertes du réseau, défauts potentiels de régulation qui engendrent des alternances chaud/froid au niveau des émetteurs (à confirmer)) sont donc dominants devant l'effet de l'irradiation solaire.

#### 4.2.3 Intermittence journalière

L'appel de puissance de climatisation des deux réseaux d'eau glacée peut varier de manière journalière pour trois raisons :

- Sur les deux réseaux : charge inférieure la nuit du fait de la température extérieure plus basse et de l'absence de soleil, ce qui diminue le besoin de puissance pour respecter les consignes d'air soufflé et d'ambiance ;
- Sur le réseau « Ventilo-convecteurs chambres » : pour un même taux de réservation des chambres, l'occupation diminue théoriquement en journée ce qui provoque un abaissement des consignes de climatisation par la GTC par détection d'absence (Cf. §2.2.2) ;
- Sur le réseau « CTA et autres Ventilo-convecteurs » : l'activité est plus importante le jour dans les locaux concernés ce qui augmente de fait la charge de climatisation.

La courbe de charge moyenne hebdomadaire présentée en Figure 24 permet d'observer qu'en effet **la puissance de froid appelée par le bâtiment diminue globalement de moitié la nuit** (hors période hivernale). On n'observe par ailleurs **aucune différence sensible entre les jours de semaine et les week-ends** comme on pouvait s'y attendre sur un bâtiment de type hôtel. Cette observation se vérifie sur chacun des deux circuits de distribution (Figure 26).

Lorsque l'on moyenne l'appel de puissance à la journée (Figure 25) on observe une **diminution nocturne de l'ordre de 40% en juillet-août et 50% les autres mois**. Si l'on discrimine la courbe de charge par circuit (Figure 26) on constate que cette diminution nocturne est plus provoquée par le circuit « CTA et autres ventilo-convecteurs » (-50% la nuit en juillet/août) que par le circuit « Ventilo-convecteurs chambres » dont la charge est plus plate (-35% la nuit en juillet/août). La diminution de charge du circuit CTA l'emporte donc sur celle du circuit ventilo-convecteurs chambres.

On constate enfin que **la consommation hivernale (janvier à mars) du circuit CTA est quasiment plate** (Figure 26), ce qui pousse vers l'interprétation d'un talon lié aux pertes de distribution et aux défauts de régulation, qu'il faut investiguer.

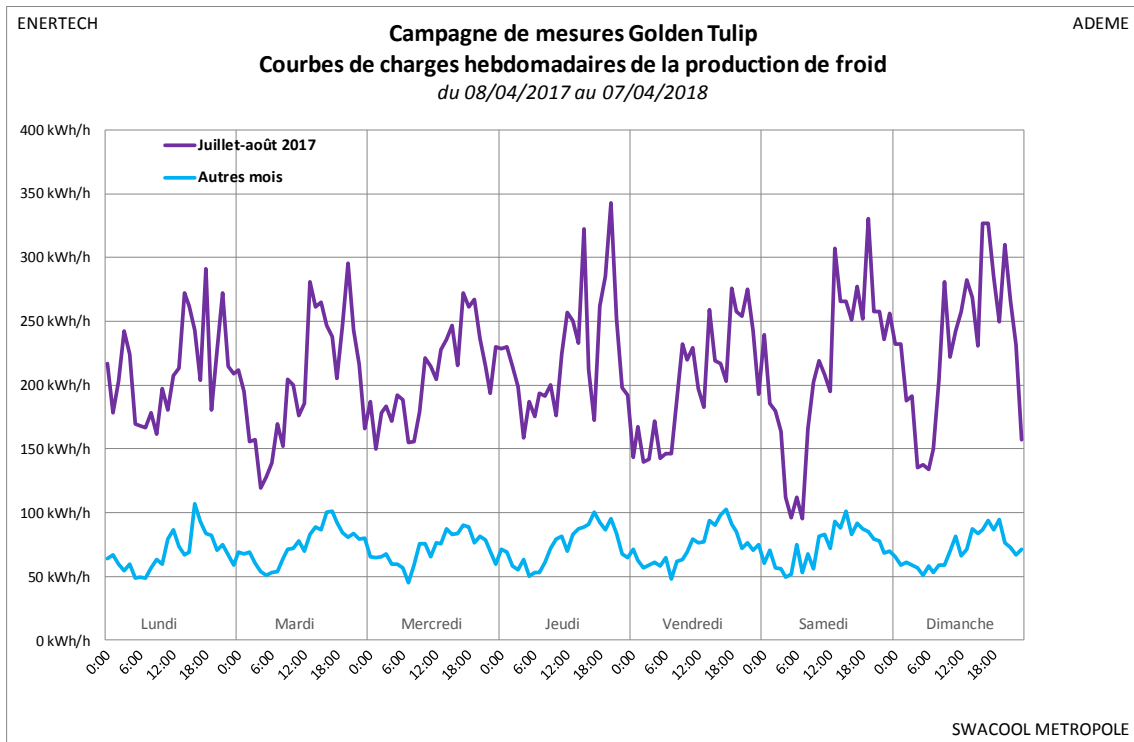


Figure 24 : Courbes de charges hebdomadaires de la consommation de froid du bâtiment.

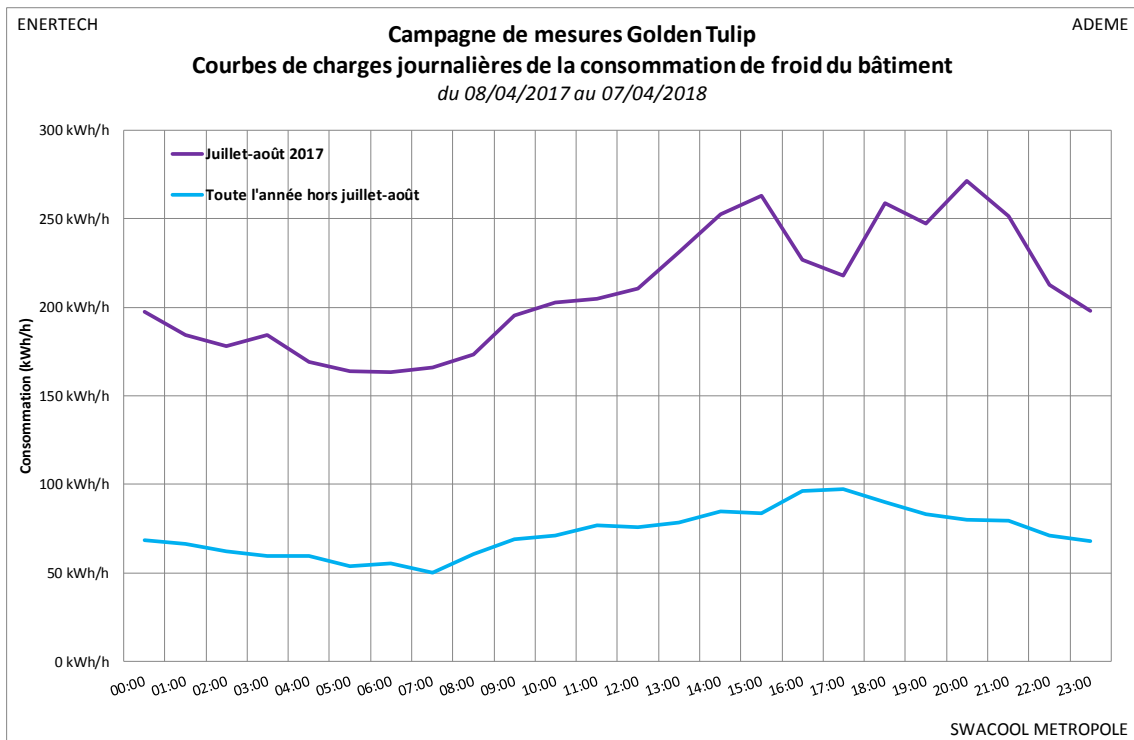


Figure 25 : Courbes de charges journalières de la consommation de froid du bâtiment.

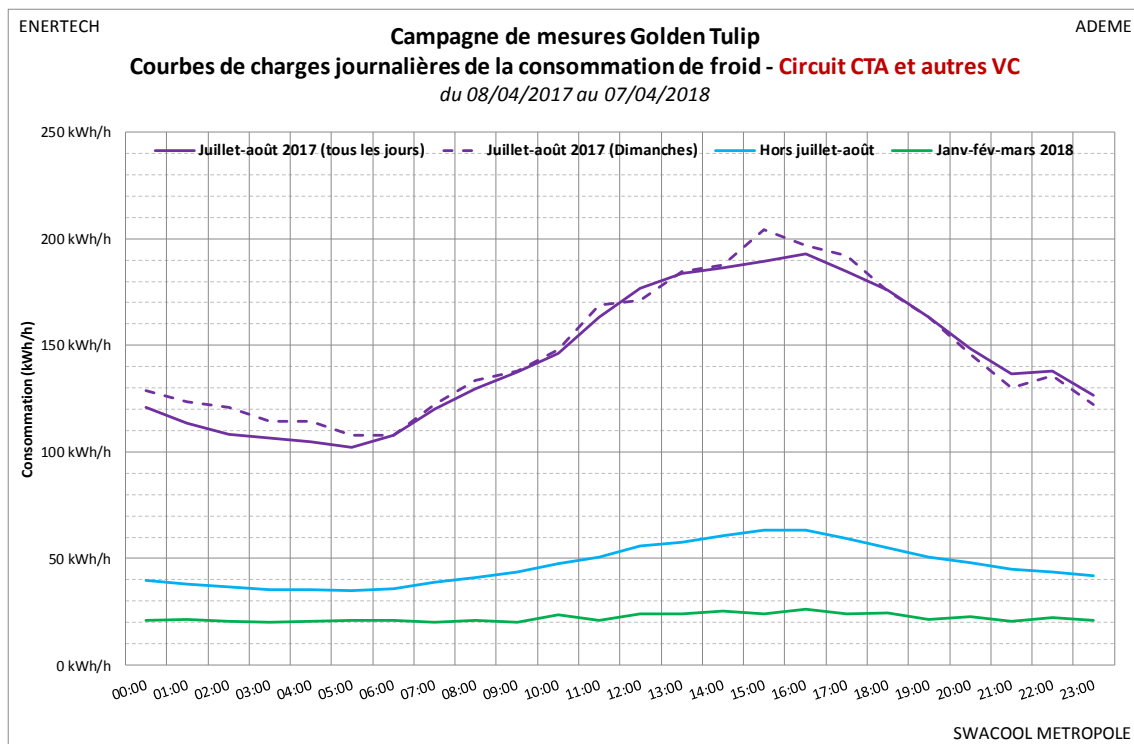
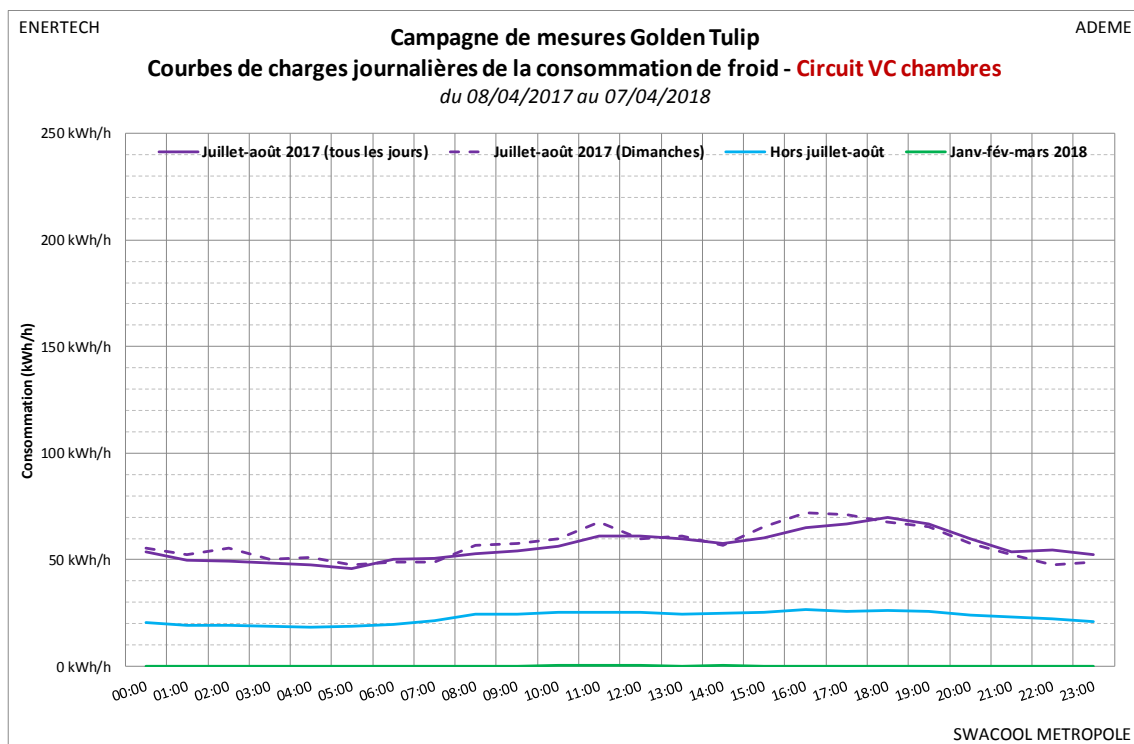


Figure 26 : Courbes de charges journalières de la consommation de froid par circuit (en haut circuit « ventilo-convecteurs chambres » ; en bas circuit « CTA et autres ventilo-convecteurs »). La courbe verte représente la période hivernale janvier-février-mars 2018.

#### 4.2.4 Puissance appelée

Le monotone de la puissance de climatisation appelée par le bâtiment Golden Tulip est présentée en Figure 27. **La puissance souscrite de 500kW<sub>froid</sub> a été dépassée pendant 27 heures durant la période de mesure.** La puissance maximale théorique de 843kW<sub>froid</sub> a été dépassée uniquement pendant 3 heures.

Il apparaît donc que la puissance souscrite sur le Golden Tulip est mieux dimensionnée que sur le bâtiment Calypso, qui n'a connu qu'une heure de dépassement de sa puissance souscrite sur la même période. Nous ne connaissons pas cependant le montant des éventuelles pénalités associées aux dépassements de la puissance souscrite.

On constate enfin que :

- **La puissance appelée est au moins 4 fois inférieure à la puissance souscrite environ 75% du temps.**
- Durant les mois de décembre 2017, janvier 2018 et février 2018 la puissance moyenne appelée est de 27kW<sub>froid</sub> ce qui est près de 20 fois inférieur à la puissance souscrite. Compte tenu du débit d'eau glacée minimum que l'installation peut supporter (27.6m<sup>3</sup>/h, Cf. §2.2.2) cette puissance moyenne correspondrait théoriquement à un « delta T » aller/retour d'eau glacée de moins de 1 degré.

Ces données montrent 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 et maximisant le COP de production), démarche qui montre bien sûr des limites lorsque la puissance appelée est trop faible. C'est la problématique qui est abordée en §4.3.

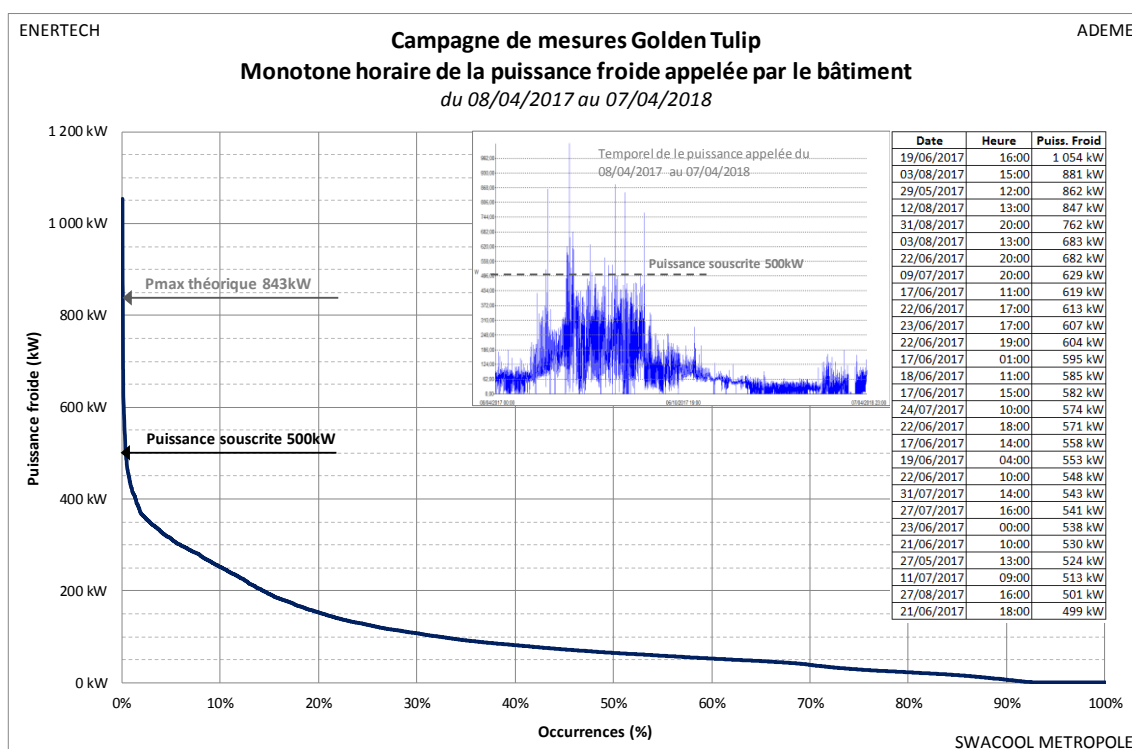


Figure 27 : Monotone de la puissance froide appelée par le Golden Tulip durant toute l'année mesurée.

## 4.3 Régimes de températures et débits

### 4.3.1 Régimes théoriques

**Voici ce qui était attendu du fonctionnement théorique** d'après l'analyse fonctionnelle :

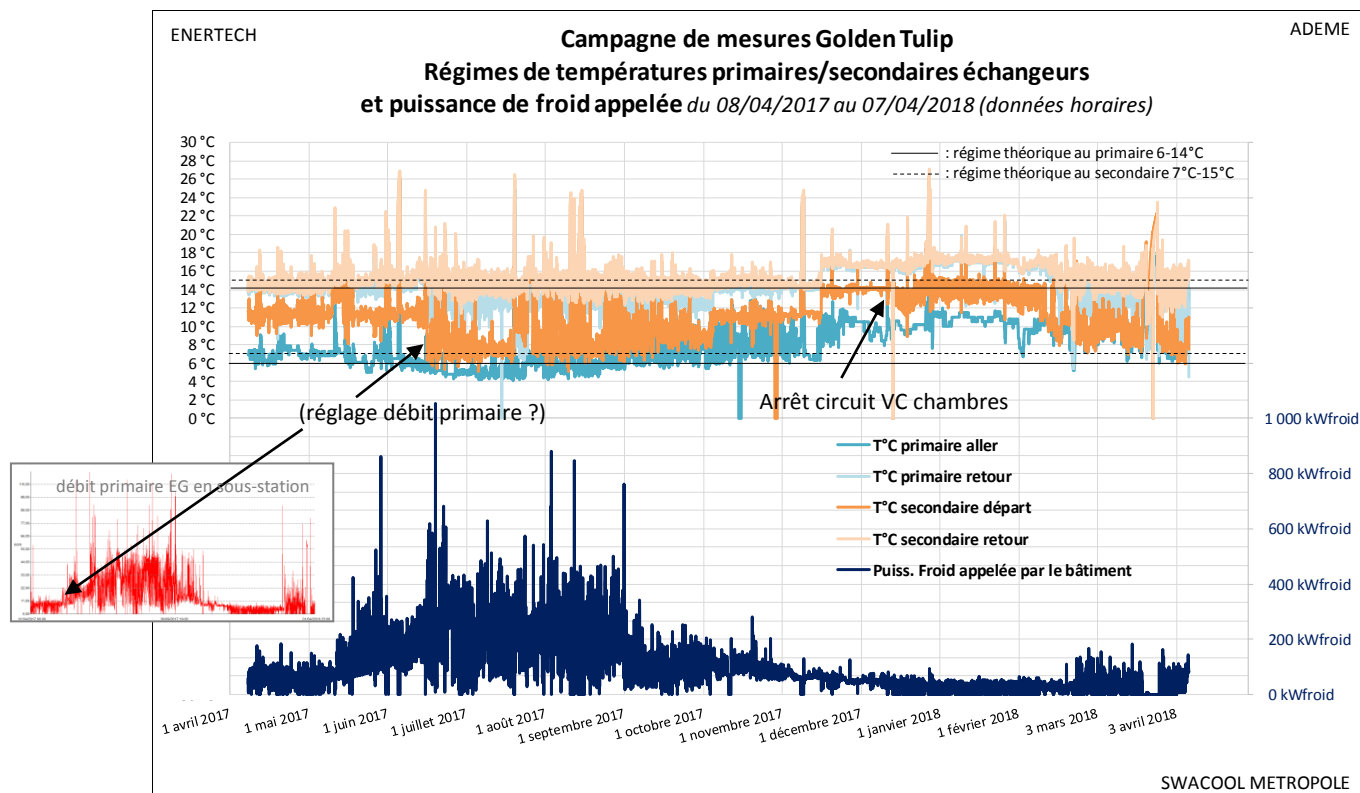
- Une température délivrée à 6°C par Thassalia avec un retour à 14°C ; Puissance d'abonnement 500kW<sub>froid</sub> ; Puissance maximale théorique 843.6kW<sub>froid</sub> (somme des puissances maximales des deux circuits) ;
- Une V2V (vanne deux voies) au primaire Thassalia qui module le débit primaire en fonction de la puissance consommée par le bâtiment (loi de pilotage théorique non connue) ; Débit théorique à la puissance souscrite : 54m<sup>3</sup>/h ; Débit à puissance maximale du bâtiment : 91m<sup>3</sup>/h ;
- Un débit variable au secondaire qui dépend du nombre de ventilo-convecteurs et CTA en demande (pompe à variation de vitesse avec consigne de pression constante, ensemble des émetteurs sur V2V) ;
- Une V2V en aval de la pompe de distribution sur chaque circuit permettant s'assurer un débit minimum visant à protéger les pompes (circuit « ventilo-convecteurs chambres » : débit nominal 24.15m<sup>3</sup>/h – débit minimum 3.4m<sup>3</sup>/h ; circuit « CTA et autres ventilo-convecteurs » : débit nominal 66.54m<sup>3</sup>/h – débit minimum 11m<sup>3</sup>/h) ;
- Un régime de température au secondaire qui subit l'ensemble des contraintes ci-dessus, avec un équilibre de régime théorique de 7°C/15°C ;
- Une V2V assurant un bypass des échangeurs sur les tronçons communs du secondaire ; pilotage 0-10V permettant de limiter à 15°C (valeur basse) la température de retour vers les échangeurs de manière à éviter les pénalités du concessionnaire.

### 4.3.2 Régimes de températures

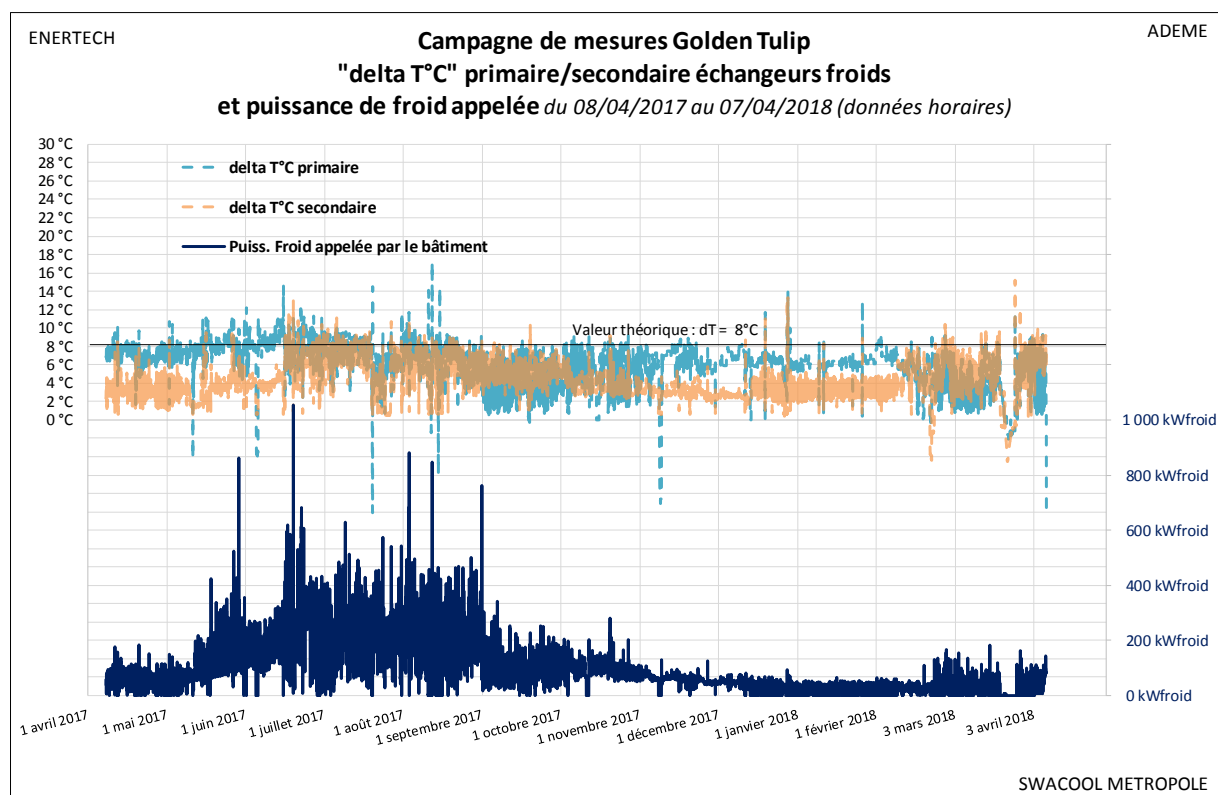
Les graphiques présentés en Figure 28 et Figure 29 présentent une vue d'ensemble temporelle des régimes de températures primaires/secondaires avec superposition de la puissance froide appelée par le bâtiment.

Avant d'entrer dans les détails on peut déjà constater :

- Qu'aucune des 4 températures n'est à proprement parler constante. La température d'arrivée de la boucle Thassalia, théoriquement stable à 6°C, subit des variations sensibles (par ex. élévation jusqu'à 9-10°C durant le mois de janvier 2018), qui démultiplient les variations au secondaire et complexifient la lecture des régimes.
- Que les « delta T » des réseaux primaires et secondaires ne sont pas de 8°C comme prévu en conception mais plutôt de l'ordre de 6°C au primaire et 4°C au secondaire avec de fortes variations journalières (Figure 29).
- Qu'un changement brusque semble abaisser la température du départ secondaire vers la mi-juin, or les débits secondaires sont stables (voire en augmentation de 12 à 18m<sup>3</sup>/h pour le réseau « CTA + autres VC ») ; on pense donc plutôt à un réglage de Thassalia provoquant une augmentation du débit primaire.



**Figure 28 :** Régimes de températures primaires/secondaires en sous-station Thassalia et puissance froide appelée par le bâtiment sur l'ensemble de l'année de mesure.



**Figure 29 :** « Delta T » primaires/secondaires en sous-station Thassalia et puissance froide appelée par le bâtiment sur l'ensemble de l'année de mesure.

Le graphique en Figure 30 présente le différentiel de température des deux circuits de distribution d'eau glacée (circuit « ventilo-convecteurs chambres » et circuit « CTA et autres ventilo-convecteurs »). On peut faire les constatations suivantes :

- Le « delta T » du circuit « ventilo-convecteurs chambres » est faible avec une moyenne annuelle de 2.5°C (valeur attendue 8°C), valeur assez stable au cours des différentes saisons. A l'arrêt de la pompe du circuit en décembre 2018 on constate que le « delta T » du circuit se superpose à celui du circuit « CTA et autres ventilo-convecteurs », phénomène sans doute lié à une circulation parasite d'eau glacée provoquée par couplage hydraulique.
- Le « delta T » du circuit « CTA et autres ventilo-convecteurs » montre une moyenne annuelle plus élevée de 4.9°C. Ses variations saisonnières sont plus importantes, avec une moyenne de l'ordre de 4°C en basse saison et une augmentation à 8°C (soit la valeur théorique prévue) autour de juillet-août lorsque la consommation de froid est maximale.

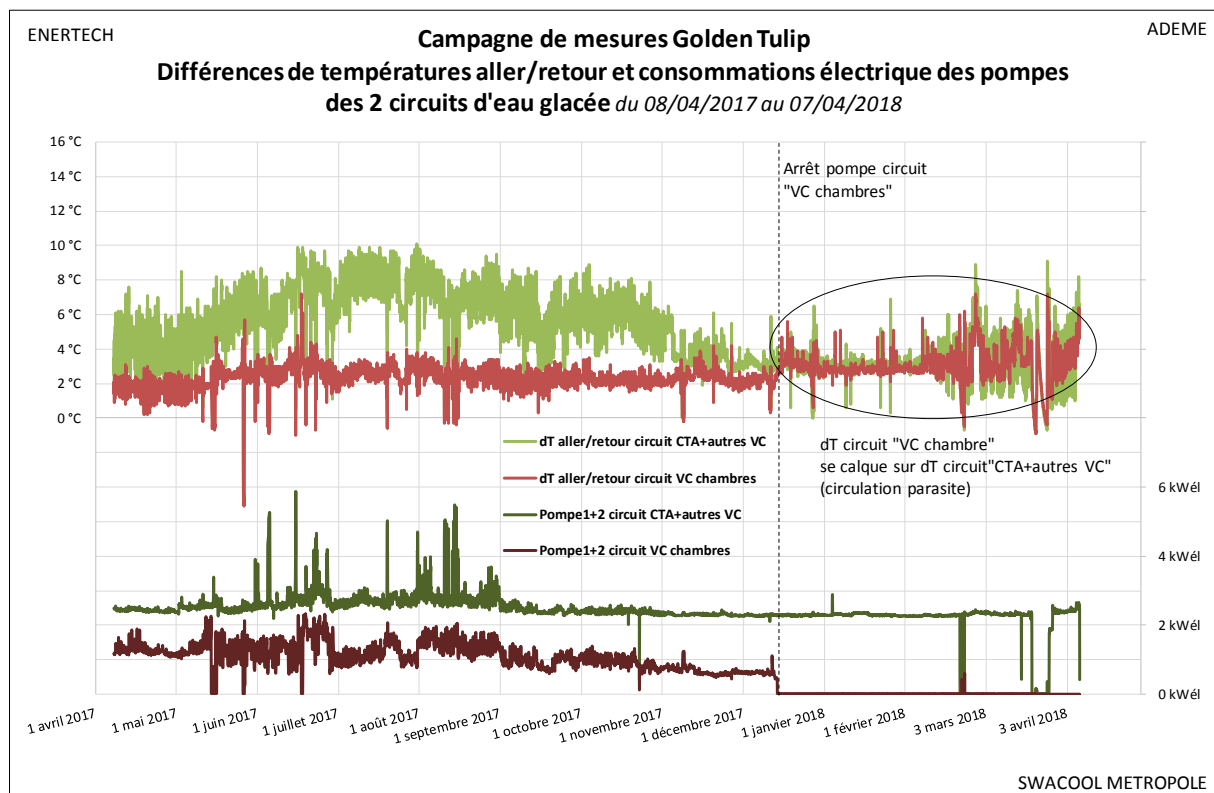


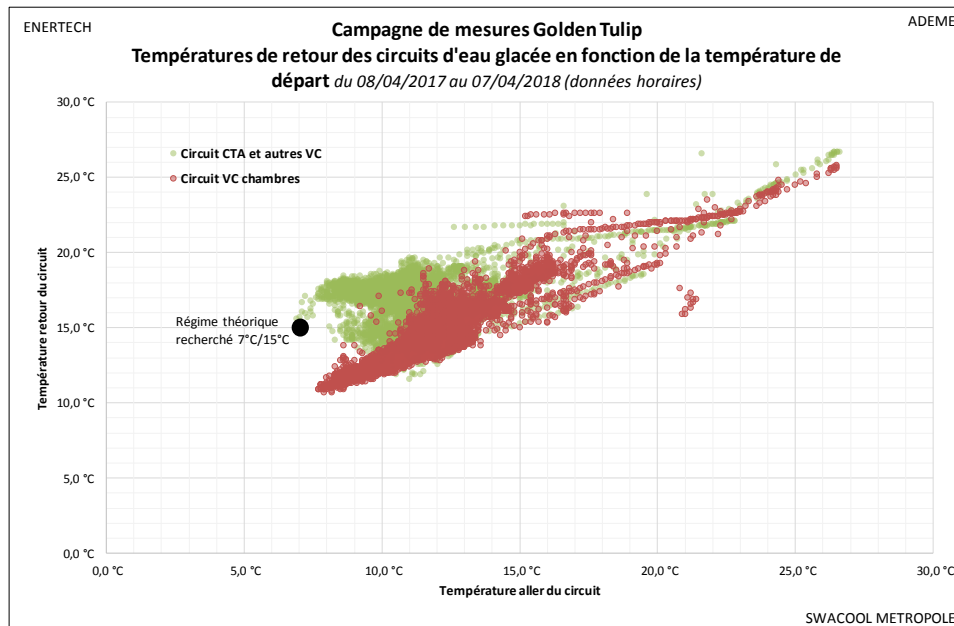
Figure 30 : « Delta T » aller/retour et consommation de pompes des deux circuits de distribution d'eau glacée.

On ne peut a priori pas imputer le faible écart de température aller-retour du circuit « VC chambres » au seul fait que la température départ secondaire est trop chaude. La Figure 31 montre en effet que pour un départ à 7°C ce circuit restitue un retour autour de 10°C tandis que le circuit CTA restitue bien un retour autour de 15°C.



Le problème se situe donc plutôt au niveau du débit d'eau glacée dans les ventilos-convecteurs, qui serait trop élevé pour produire un « delta T » suffisant. Il nous est impossible à ce stade de savoir s'il s'agit d'un sujet de conception ou de mise en œuvre.

Le circuit « CTA et autres VC », en revanche, présente un régime plus proche de celui prévu avec un retour à 15°C ou plus pour un départ à 7°C. Ce régime semble atteint quelle que soit la puissance, dès lors que la température du départ secondaire est conforme à la valeur prévue de 7°C. Le « delta T » plus important de ce circuit est peut-être aussi lié à un débit de distribution plus faible que celui prévu (Cf. §4.3.3).



**Figure 31 : Températures de retour des deux circuits d'eau glacée en fonction de la température de départ.**

Les monotonies de températures de chaque circuit (primaire, secondaire, distribution) sont présentées en Figure 32. Ces courbes amènent plusieurs remarques :

- La température délivrée par le primaire Thassalia dépasse 6°C (valeur théorique) plus de 80% du temps avec une moyenne annuelle de 8.2°C (minimum 4°C, maximum 12°C), ce qui est étonnamment chaud ;
- Le débit primaire semble bien minimisé puisque le pincement moyen entre le retour primaire et le départ secondaire est de 1.2°C ;
- Le départ secondaire est étonnamment chaud par rapport à la température délivrée au primaire (+3°C en moyenne) ce qui peut être lié à un sous-débit au primaire comme à un sur-débit au secondaire (discussion au §4.3.3) ;
- En conséquence du départ secondaire plus chaud, le retour secondaire est chaud lui aussi (50% du temps supérieur à 15°C). La courbe est plus plate pour les températures inférieures à 15°C ce qui pourrait être l'effet de la V2V de bypass des échangeurs (dont le rôle est de limiter les températures de retour trop froides). Le graphique montrant le fonctionnement de cette V2V (Figure 33) n'est cependant pas convainquant (un problème de validité de la donnée GTC n'étant pas à exclure).

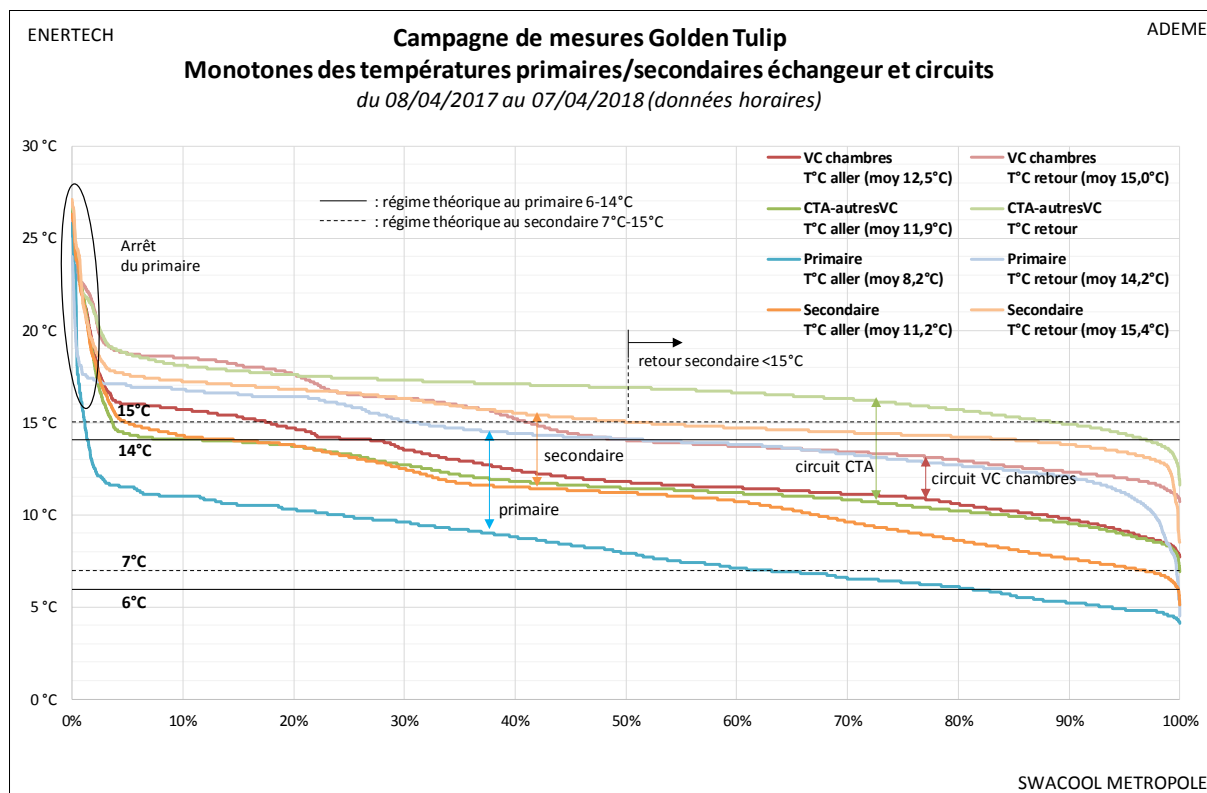


Figure 32 : Monotones des températures aux bornes de l'échangeur durant la saison de climatisation.

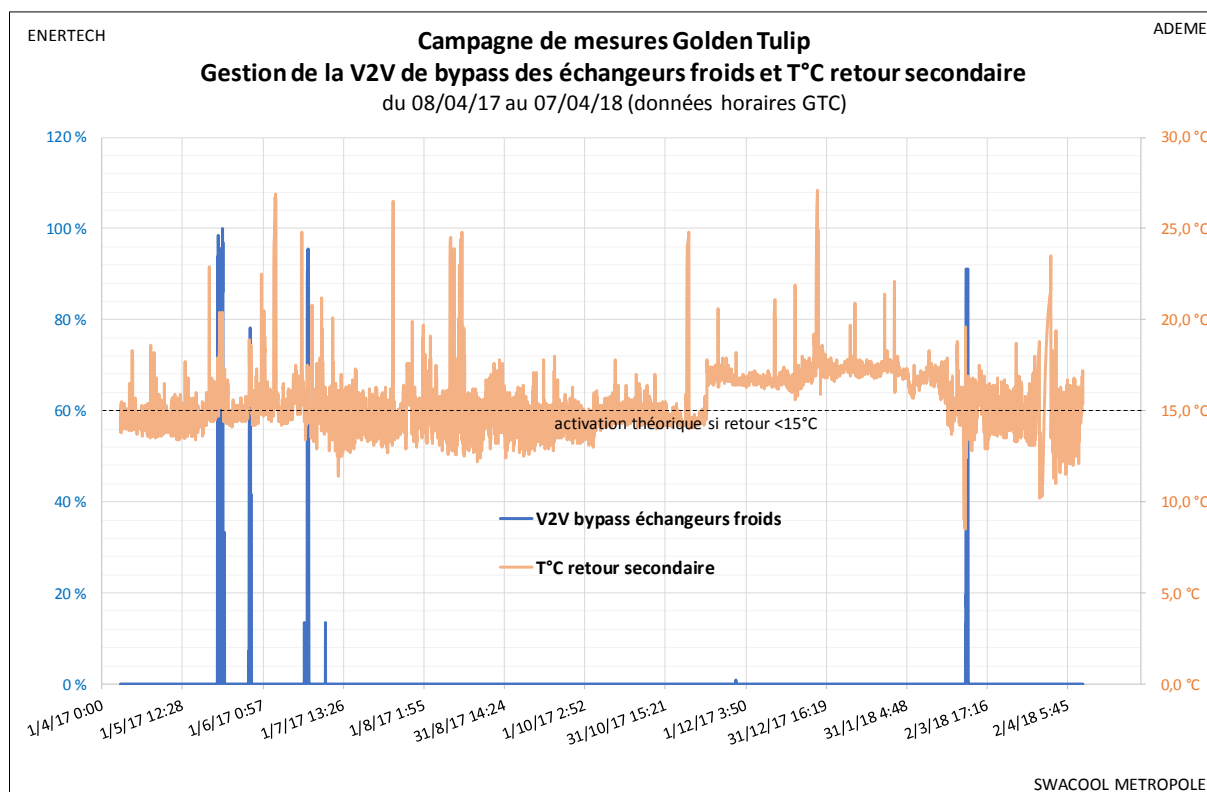
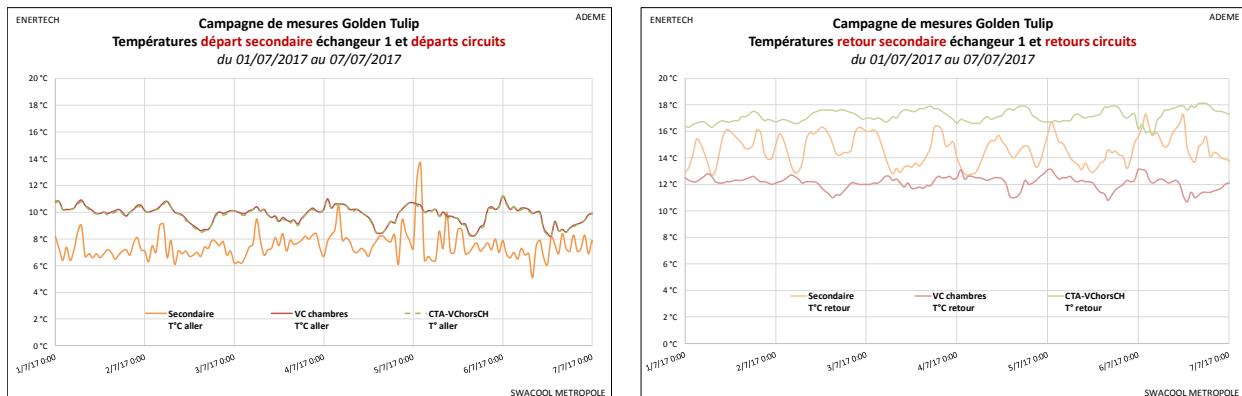


Figure 33 : Gestion de la V2V de bypass des échangeurs sur le tronçon commun secondaire (utilisée théoriquement pour limiter les retours inférieurs à 15°C) : peu d'action en apparence mais un problème de validité de la donnée GTC n'est pas à exclure car l'action de cette vanne semble visible par ailleurs.

En voyant les monotones de température des circuits (Figure 32), on peut s'interroger sur les écarts entre les températures des circuits de distribution et celles du tronçon commun secondaire. L'étude de courbes temporelles (Figure 34) montre sans surprise :

- Que les températures des départs des deux circuits sont bien supérieures ou égales au général secondaire (supérieures lorsque la V2V de bypass échangeur s'ouvre ; les données laissent donc penser que la vanne est plus souvent ouverte que ne semble le dire la donnée GTC, Cf. Figure 33) ;
- Que la température du retour général secondaire est bien toujours comprise entre les deux températures de retour des circuits (sauf artefact de mesure).



**Figure 34 : Zoom temporel d'une semaine sur les températures au secondaire échangeur et sur les départs-retours des circuits de distribution d'eau glacée.**

Si l'on se penche plus précisément sur les « delta T » des circuits primaires et secondaires en fonction de la puissance de froid consommée par le bâtiment (Figure 35 et Figure 36) on remarque :

- Que le « delta T » primaire présente une moyenne de 6°C et atteint 8°C quand la puissance dépasse 320kW<sub>froid</sub> ;
- Que le « delta T » secondaire présente une moyenne de 4.2°C et atteint 8°C quand la puissance dépasse 400kW<sub>froid</sub>.

Le « delta T » au primaire est donc en moyenne plus élevé, ce qui signifie que pour une puissance délivrée donnée, le débit d'eau glacée au secondaire est supérieur au débit primaire. Ceci est principalement dû au déséquilibre entre les deux réseaux de distribution d'eau glacée (Figure 37) : tandis que le circuit « CTA et autres VC » montre plutôt un « delta T » élevé qui l'emporte sur l'autre circuit aux fortes puissances, le circuit « Ventilconvecteurs chambres » montre un « delta T » faible qui pèse sur les puissances intermédiaires du fait de l'importance relative du débit de ce circuit (Cf. §4.3.3).

En juin/juillet/août, période maximale de climatisation du bâtiment, la puissance moyenne appelée est de l'ordre de 200kW<sub>froid</sub> avec un « delta T » primaire moyen de 7°C et un « delta T » secondaire moyen de 6°C, ce qui est un peu faible mais acceptable. En dehors de cette période les « delta T » chutent, ce qui implique des débits plus élevés et un retour plus froid vers la production Thassalia, phénomènes préjudiciables au COP de production Thassalia.

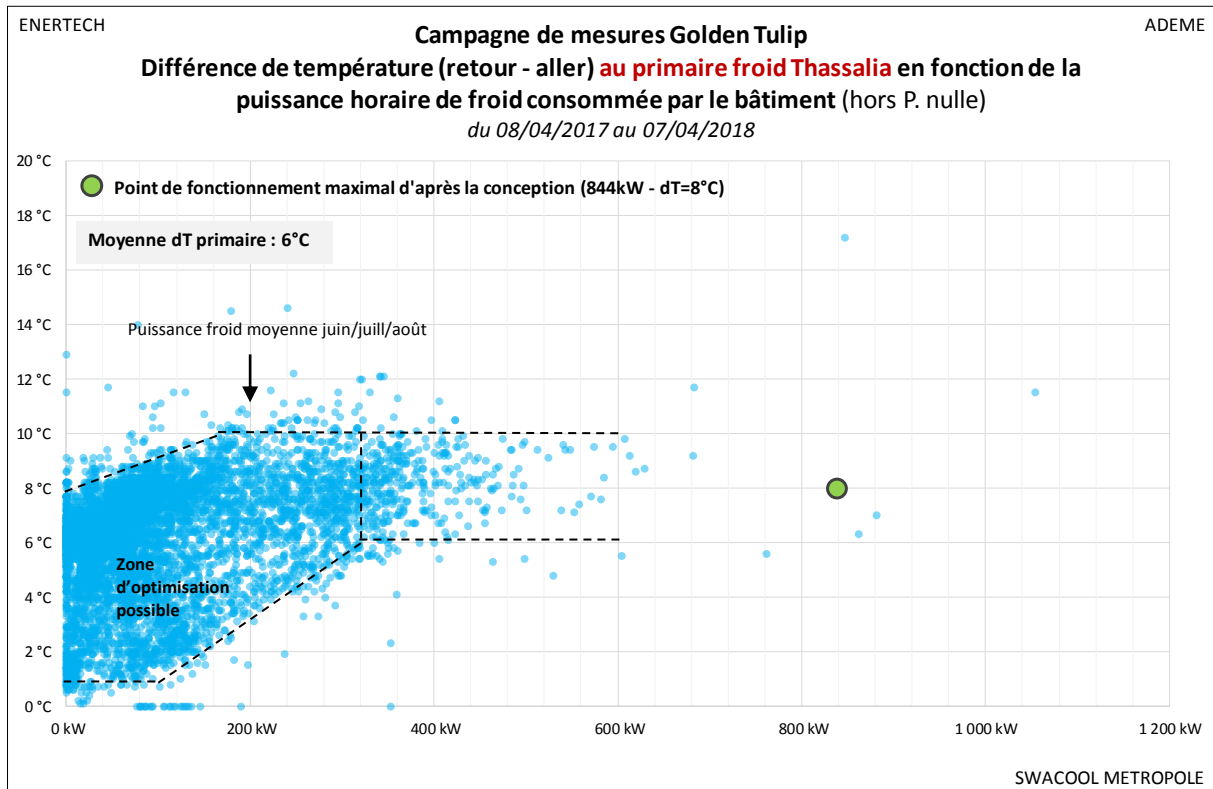


Figure 35 : Différence de température aller/retour au primaire en fonction de la puissance délivrée.

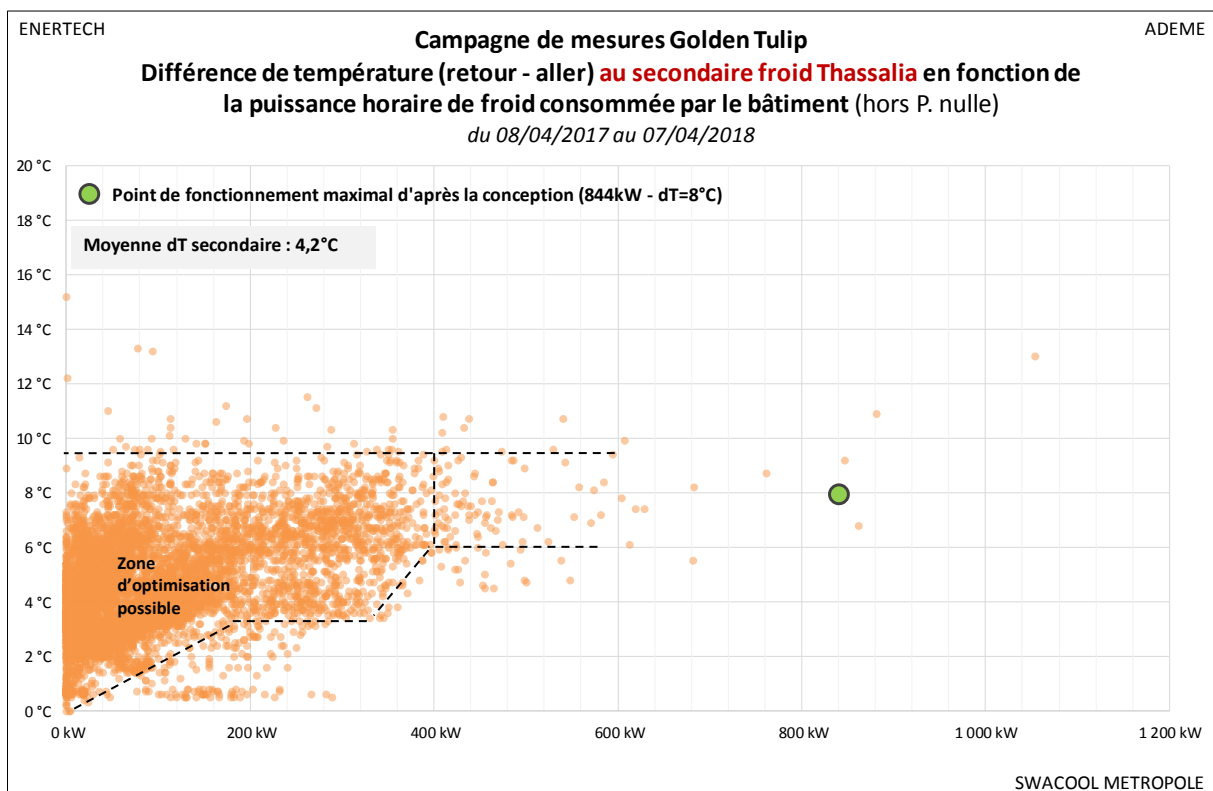
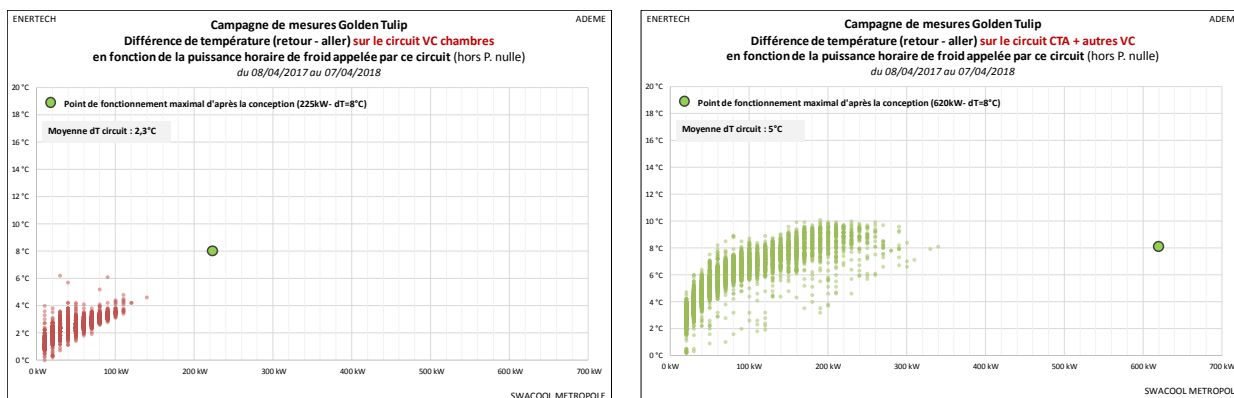


Figure 36 : Différence de température aller/retour au secondaire en fonction de la puissance délivrée.

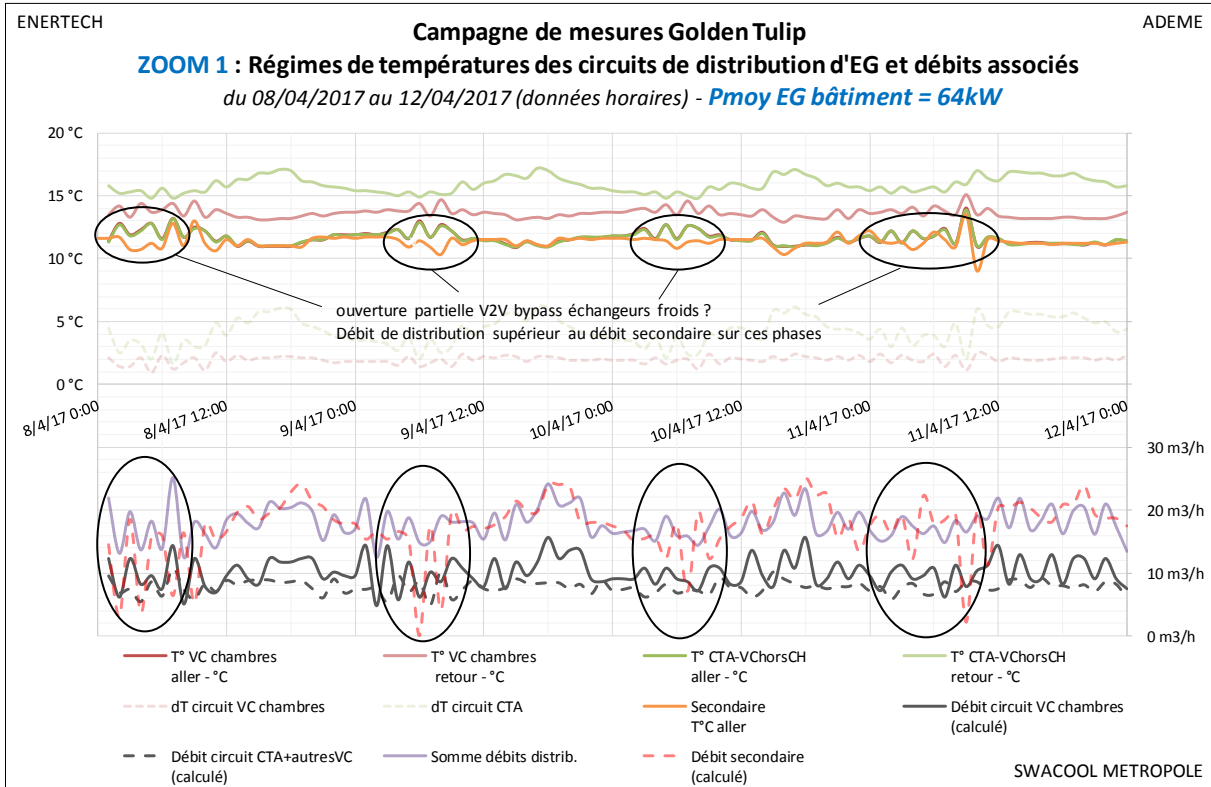
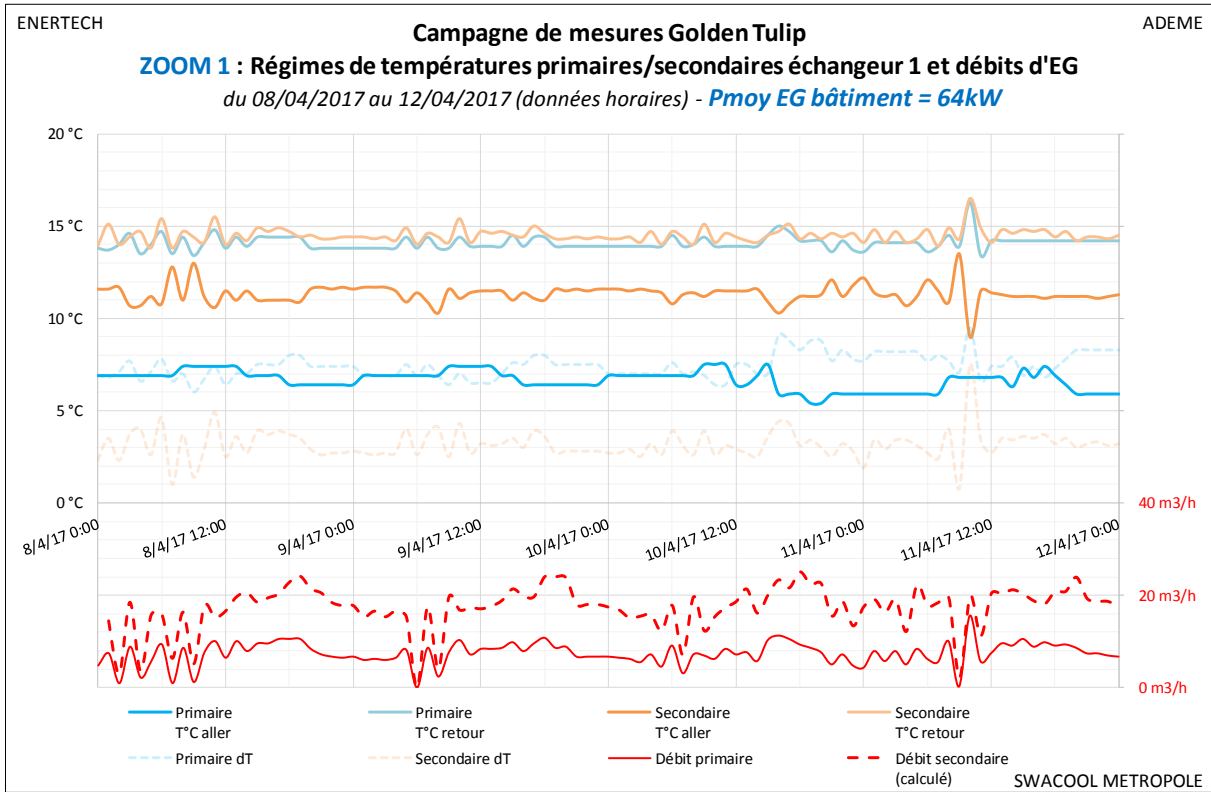


**Figure 37 : Différence de température aller/retour sur les deux circuits de distribution d'eau glacée en fonction de la puissance délivrée.**

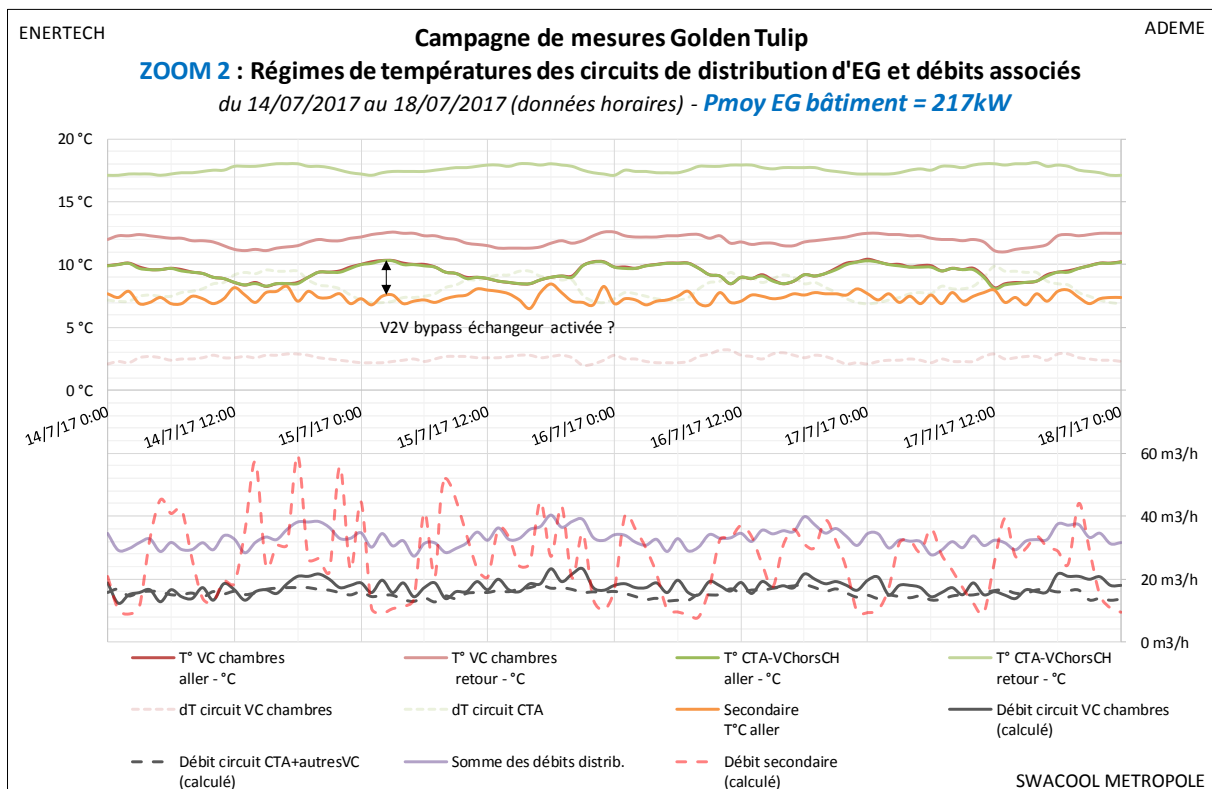
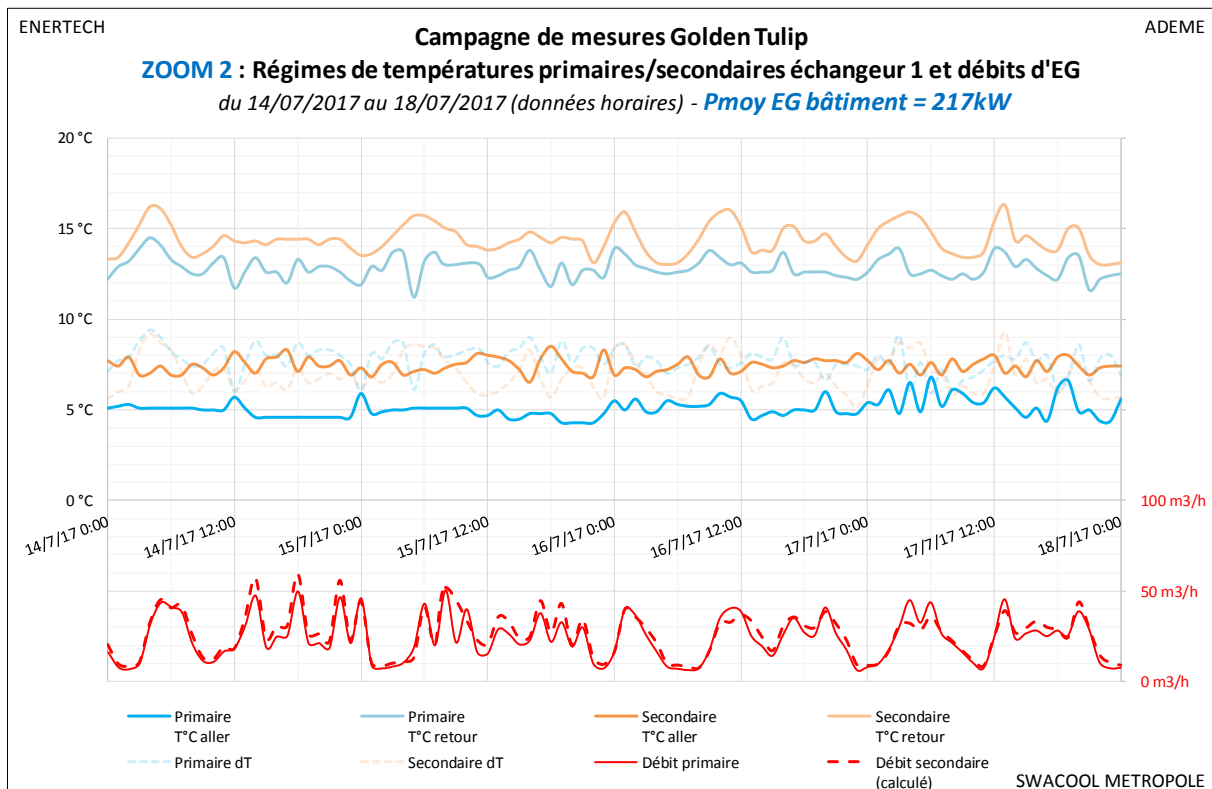
Les graphiques temporels présentés en Figure 38 et Figure 39 permettent d'illustrer deux séquences de fonctionnement du bâtiment, l'une à faible puissance ( $64\text{kW}_{\text{froid}}$ ) et l'autre à plus forte puissance ( $217\text{kW}_{\text{froid}}$ ). On voit globalement :

- Sur la séquence à faible puissance : l'écart entre les débits secondaire et primaire est important (débit secondaire plus fort) ce qui engendre un écart très net entre la température d'eau glacée délivrée par Thassalia ( $6-7^{\circ}\text{C}$ ) et le départ effectif au secondaire ( $11-12^{\circ}\text{C}$ ) ; Le retour secondaire est autour de  $14-15^{\circ}\text{C}$ . Le retour primaire suit cette valeur de très près du fait du débit inférieur, ce qui est positif côté Thassalia (faible débit, haute température de retour). La V2V de bypass échangeur ne semble que pas ou peu activée au secondaire, ce qui pourrait être questionné (retour parfois inférieur à  $15^{\circ}\text{C}$ ). On voit enfin que le « delta T » du circuit ventilo-convecteurs chambres est deux fois plus faible que celui de l'autre circuit. Le fonctionnement côté Thassalia est bon, celui côté bâtiment plutôt moyen (fort débit, température de départ élevé, « delta T » faible).
- Sur la séquence à forte puissance : les débits primaires/secondaires sont équilibrés. Les températures départ/retour des deux côtés sont proches des valeurs attendues, avec un léger déficit de « delta T » au primaire comme au secondaire ( $6-7^{\circ}\text{C}$  contre  $8^{\circ}\text{C}$  attendu). Ce déficit est lié au circuit « Ventilo-convecteurs chambres » qui affiche encore un « delta T » trop faible de l'ordre de  $2-3^{\circ}\text{C}$  tandis que l'autre circuit présente un « delta T » acceptable de  $7$  à  $9^{\circ}\text{C}$ .

*NB : L'écart entre les températures de départ secondaire/circuits tend à montrer que la V2V de bypass échangeurs est activée, ce qui est surprenant compte tenu de la valeur de la température de retour (proche du cas précédent, ente  $14$  et  $16^{\circ}\text{C}$ , où elle n'était a priori que pas ou peu active). Une investigation sur le fonctionnement de cette V2V nous semble nécessaire.*



**Figure 38 : Temporel n°1 : fonctionnement à faible puissance en avril 2017 (P<sub>froid</sub> moyenne bâtiment 64kW). Graphique du haut : régimes températures/débits aux bornes de l'échangeur Thassalia. Graphique du bas : régimes températures/débits des circuits de distribution.**

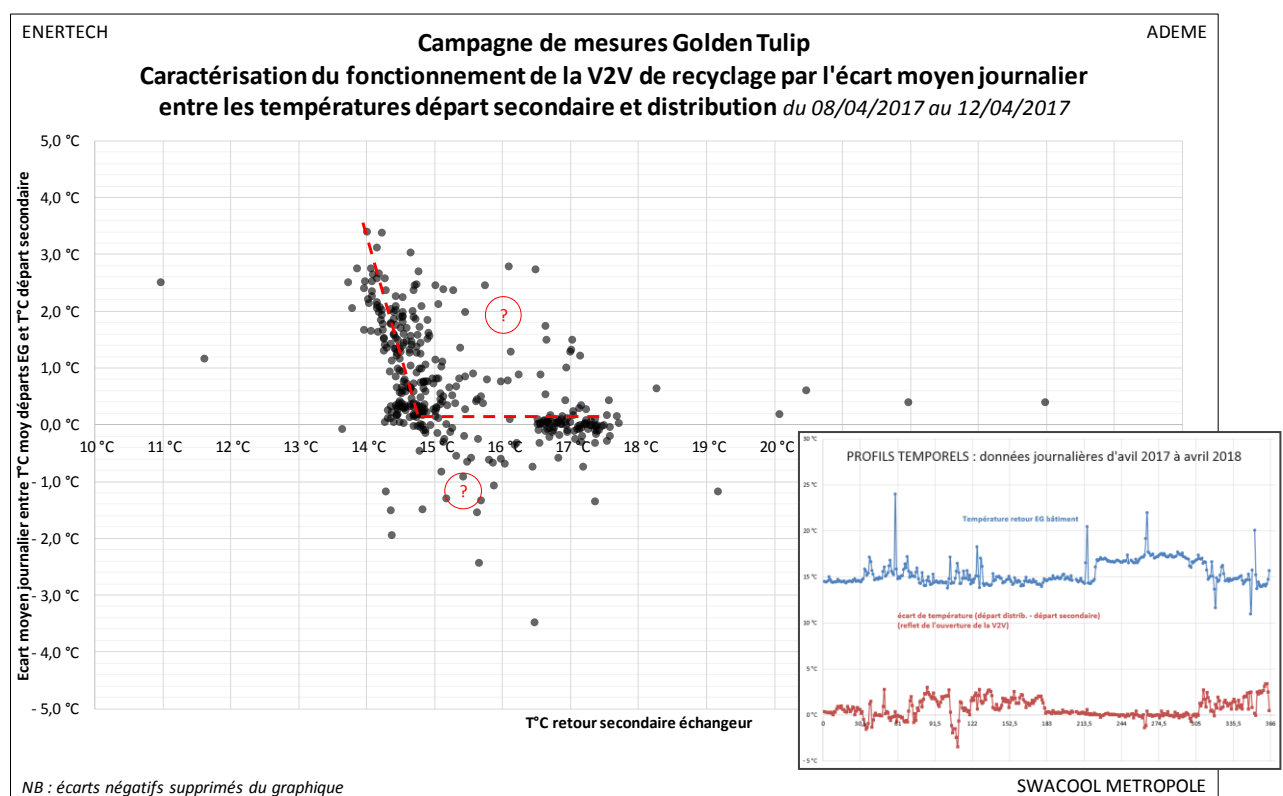


**Figure 39 : Temporel n°2 : fonctionnement à forte puissance en juillet 2017 ( $P_{\text{froid}}$  moyenne bâtiment 269kW).**  
**Graphique du haut : régimes températures/débits aux bornes de l'échangeur Thassalia. Graphique du bas : régimes températures/débits des circuits de distribution.**

Le graphique de la Figure 30 vise à caractériser le fonctionnement de la V2V de bypass situé sur le tronçon commun du secondaire. Cette vanne doit s'ouvrir progressivement en cas de retour trop froid, de manière à élever le régime au secondaire et ainsi éviter les pénalités qui ont lieu pour des retours secondaires inférieurs à 15°C. On trace ainsi l'écart entre la température du départ général secondaire et les températures de départ des circuits. Le pas de temps est pris à la journée pour s'affranchir des phénomènes de bords liés à la régulation.

On observe bien une « cassure » autour de 14-15°C (confirmée par les monotones de la Figure 32) qui tend à montrer que la vanne a une certaine action. On est donc plutôt surpris par la donnée GTC de l'ouverture de cette vanne (Figure 33) qui montre très peu de séquences d'ouverture. Il est possible (probable ?) que cette donnée soit incomplète ou erronée.

Certains points en dehors du nuage principal sont toutefois étonnants (comment les départs des circuits peuvent être plus froid que le départ secondaire en moyenne journalière ?) mais il est aussi possible que cette vanne ait fait l'objet de réglages durant la campagne. L'investigation précise de son fonctionnement nous semble toutefois nécessaire.



**Figure 40 : Caractérisation du fonctionnement de la V2V de bypass échangeur qui permet de limiter les retours froids par élévation de la température de départ des circuits d'eau glacée. On visualise bien la cassure de pente pour les retours inférieurs à 15°C comme évoqué dans l'analyse fonctionnelle.**



### 4.3.3 Débits primaire/secondaire et circuits de distribution

#### Débits primaires et secondaires

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 grandeurs mesurées aux bornes des échangeurs froids. La meilleure corrélation n'a pas été obtenue comme sur le Calypso avec le « dT secondaire » mais tout simplement avec la puissance froide délivrée au bâtiment (Figure 41). Le nuage de points obtenu pointe bien vers le régime théorique à puissance maximale, en revanche on observe de nombreux points périphériques qui reflètent des périodes de pompage en puissance et en débit (visible sur les graphes temporels).

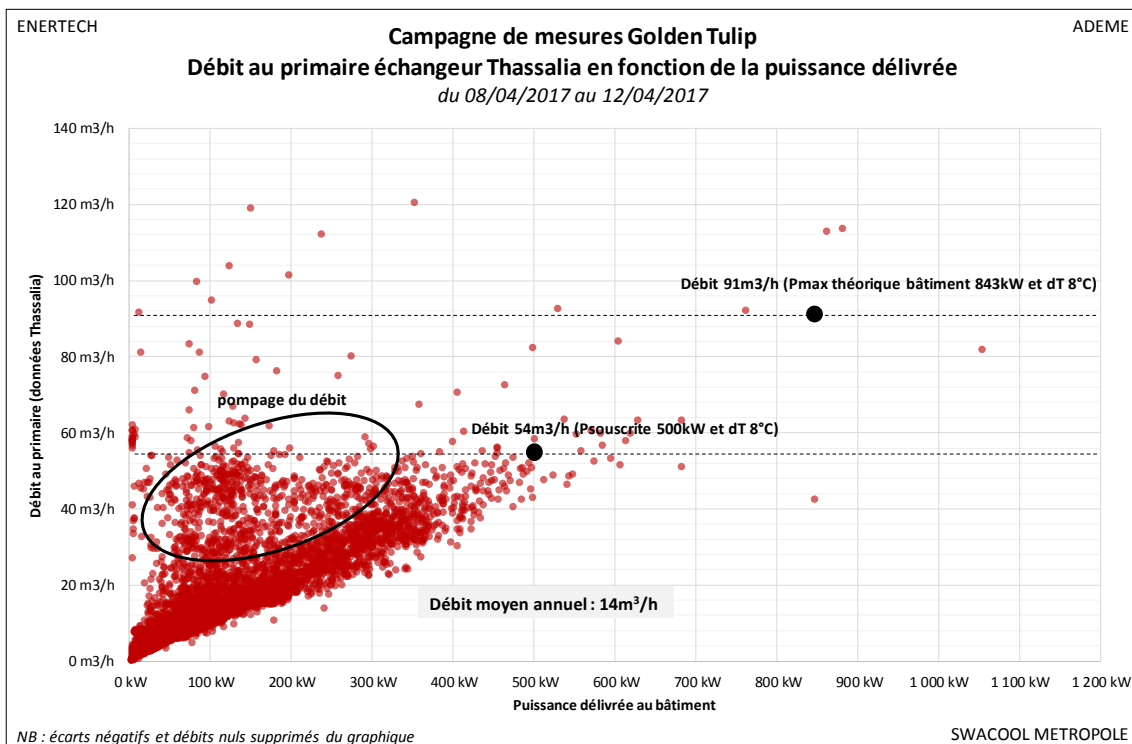
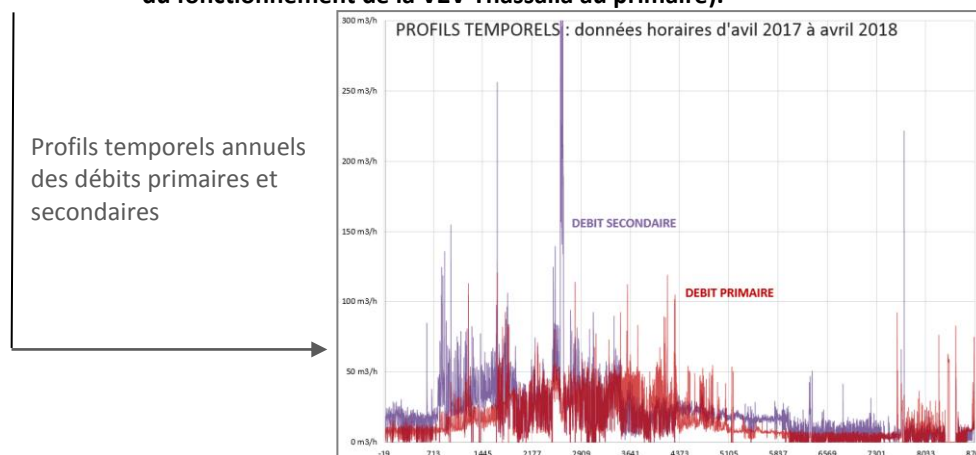
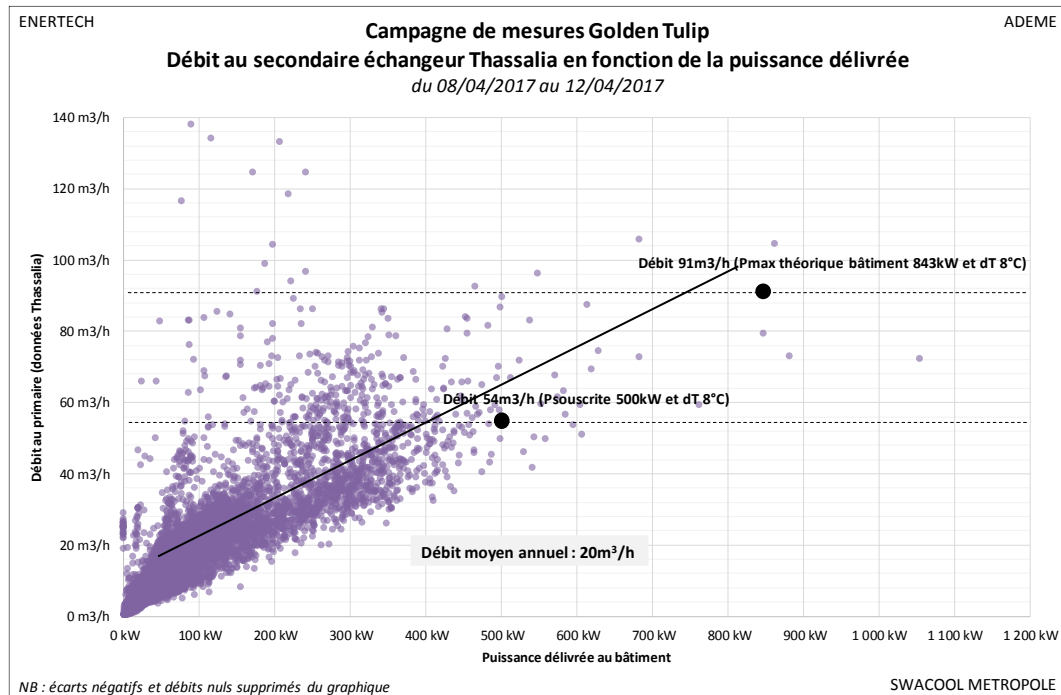


Figure 41 : Corrélation entre le débit primaire et la puissance délivrée aux échangeurs froids (caractérisation du fonctionnement de la V2V Thassalia au primaire).

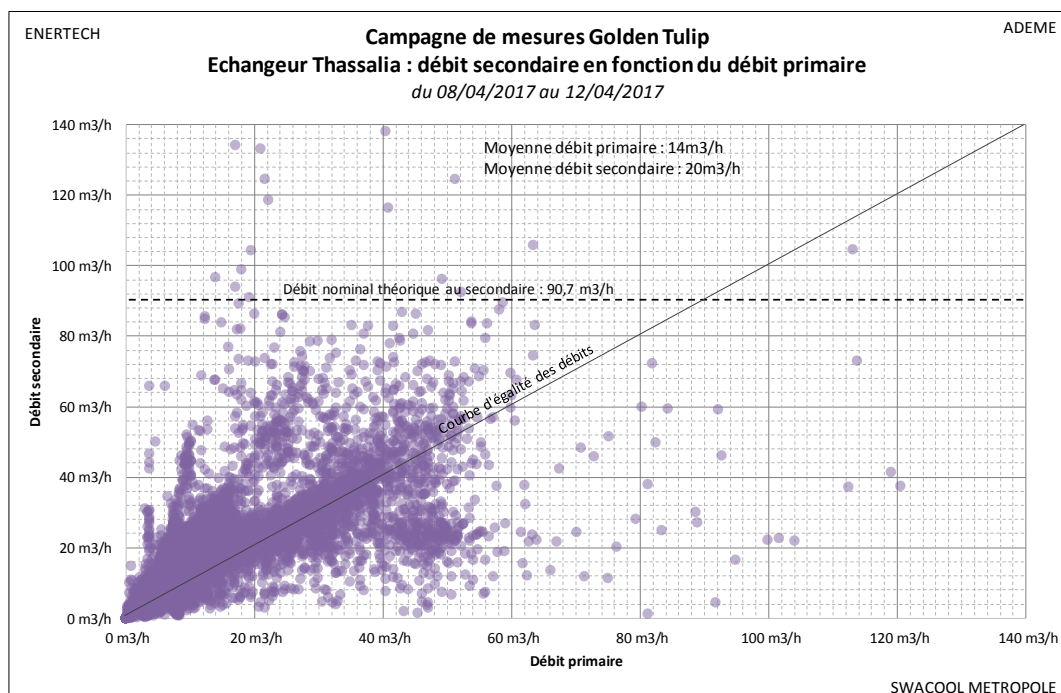


Ces épisodes d'instabilité du débit sont parfois plus marqués au primaire, parfois plus au secondaire selon les périodes. Les gammes de puissances concernées sont variables dans les

deux cas ce qui rend difficile l'attribution du phénomène. Le nuage de point du débit secondaire (Figure 42) pointe lui aussi vers le débit théorique à puissance maximale mais le débit est toutefois plus élevé en moyenne qu'au primaire ( $20\text{m}^3/\text{h}$  contre  $14\text{m}^3/\text{h}$ ) ce qui est cohérent de l'observation d'un « delta T » moins élevé au secondaire (§4.3.2).



Le tracé du débit secondaire en fonction du débit primaire (Figure 43) au pas de temps horaire confirme des phénomènes de pompages des deux côtés.



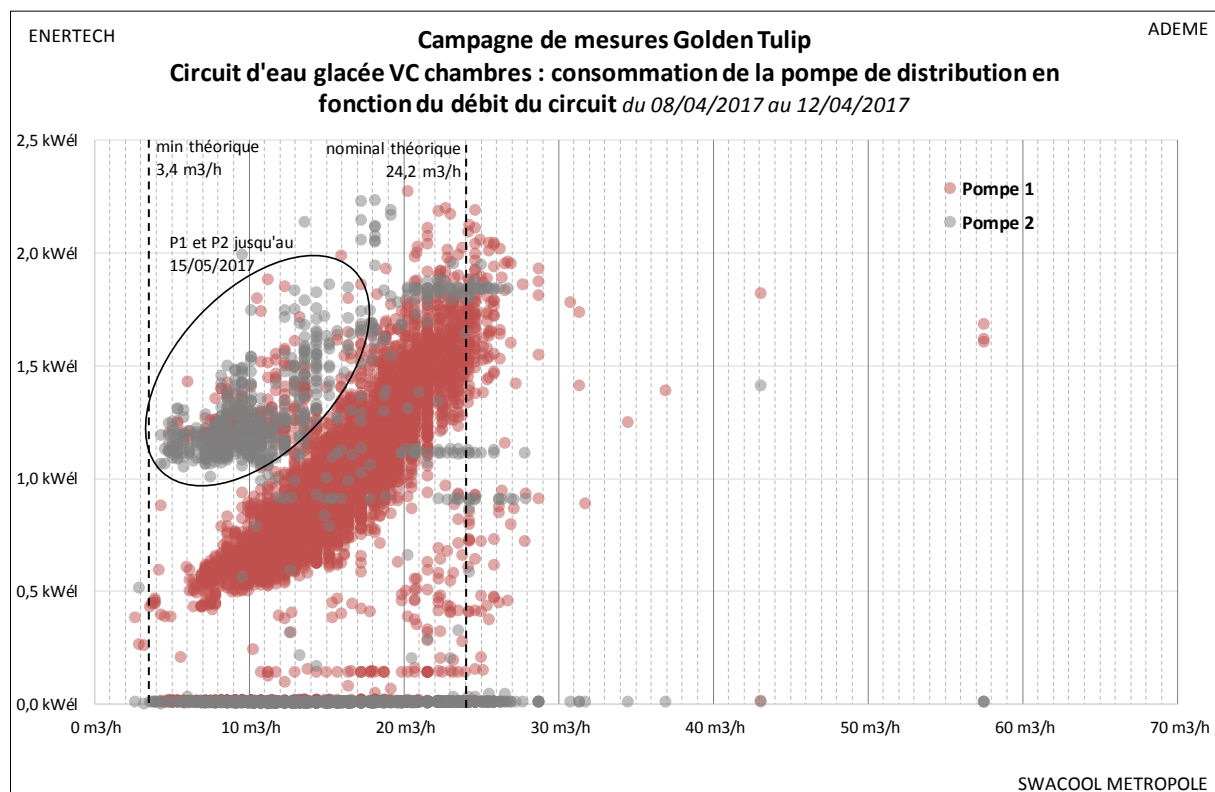
### Débites des deux circuits de distribution d'eau glacée

La régulation des débits de distribution est une régulation classique qui maintient une consigne de pression constante aux bornes du réseau grâce au variateur de fréquence qui pilote la pompe du circuit. Cette régulation prend tout son sens par la présence de V2V terminales présentes au niveau des ventilo-convecteurs et des CTA : quand un ensemble de terminaux se ferment le maintien de la consigne de pression oblige la pompe à diminuer son débit.

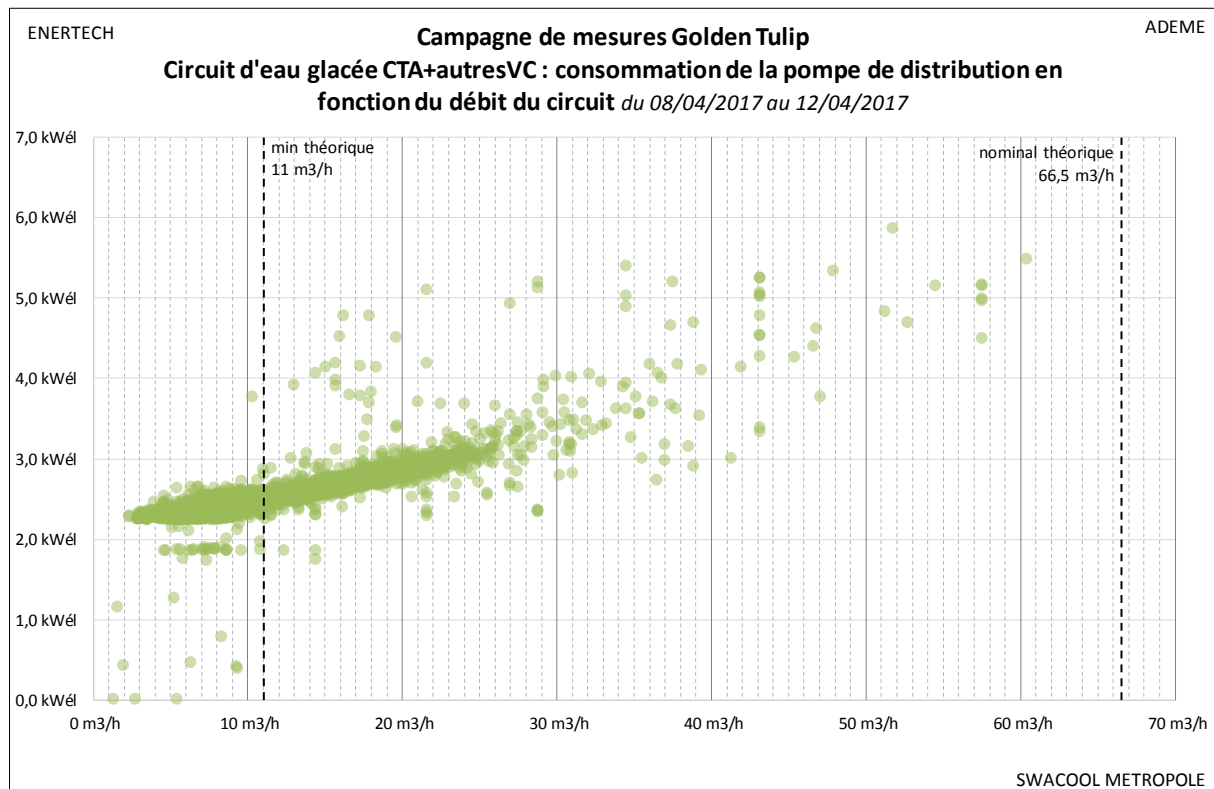
Les débits des circuits ont pu être suivis grâce à l'instrumentation des compteurs de frigories présents sur chaque circuit.

*NB : la somme des débits de distribution peut être supérieure au débit secondaire échangeur par la présence de la V2V de recyclage sur le tronçon commun, qui découple théoriquement les débits en cas de retour froid pour rehausser le régime de température de départ des circuits.*

Les graphiques des Figure 44 et Figure 45 permettent d'apprécier les variations de débit de chaque circuit en lien avec les puissances électriques des pompes de distribution. Les pompes 1 et 2 du circuit « ventilo-convecteurs chambres » ont été séparées car il a été constaté une différence de gestion intéressante à observer.



**Figure 44 : Circuit d'eau glacée « VC chambres » : consommation de la pompe double de distribution en fonction du débit du circuit.**



**Figure 45 : Circuit d'eau glacée « CTA + autres VC » : consommation de la pompe double de distribution en fonction du débit du circuit.**

Les constatations suivantes peuvent être faites :

- Le débit du circuit « ventilo-convecteurs chambres » varie globalement dans les limites attendues, avec une moyenne annuelle de 15.3m<sup>3</sup>/h ;
- Le débit du circuit « CTA et autres VC » est étonnamment faible avec une moyenne annuelle à 10m<sup>3</sup>/h et une plage de variation significativement en dessous de la plage attendue ;
- Seule la pompe 1 du circuit « ventilo-convecteurs chambres » (majoritairement utilisée sur ce circuit à partir de mai 2017) présente une variation acceptable de puissance électrique en fonction du débit, compte tenu de la régulation à pression constante. Dans les autres cas on observe une variation de puissance faible : -25 à -30% sur la puissance électrique de la pompe lorsque le débit chute de 20m<sup>3</sup>/h à 10m<sup>3</sup>/h (contre -100% pour la pompe citée précédemment). Ce constat nous porte à croire que le réseau « CTA et autres VC », soit n'est pas géré à pression constante mais à vitesse constante, soit dispose d'une pompe dont la puissance maximale est trop élevée par rapport au débit réellement sollicité, ce qui ne permet pas au variateur de fréquence d'avoir le même impact que sur l'autre circuit.

En conclusion, les différents débits observés dans ce paragraphe nous montrent :

- Une régulation de la V2V primaire Thassalia vraisemblablement proportionnelle à la puissance délivrée (donc consommée par le bâtiment) ;
- Des phénomènes de pompage au primaire comme au secondaire, rendant difficile la lecture des régimes moyens et posant question sur la bonne imbrication des différentes régulations (V2V primaire Thassalia, V2V recyclage secondaire, V2V de bypass des circuits, régulation de la puissance des pompes) ;
- Un débit au primaire globalement plus faible qu'au secondaire (14m<sup>3</sup>/h contre 20m<sup>3</sup>/h) ce qui est cohérent des « delta T » moyens observés (6°C au primaire ; 4.2°C au secondaire) ;
- Des débits qui varient globalement dans les plages attendues, voire en dessous de la plage attendue pour le circuit de distribution « CTA et autres VC » ;
- Une régulation des pompes de distribution qui permet bien un abaissement significatif de la puissance électrique de distribution consommée sur le réseau « VC chambres » depuis mai 2017, mais ne le permet pas vraiment sur le réseau « CTA et autres VC » soit parce que ce dernier n'est pas géré à pression constante, soit parce que la pompe est trop puissante pour s'adapter aux faibles débits observés.

#### 4.4 Consommation électrique des auxiliaires

Le bâtiment a consommé 1374MWh<sub>él</sub> entre le 08/04/2017 et le 07/04/2018, ce qui représente **145kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an**. Cette consommation est spectaculairement élevée. Elle est notamment plus importante (en énergie finale) que les consommations utiles de froid et de chaleur du bâtiment (Cf. §4.2.1).

Les données récupérées sur la GTC<sup>5</sup> n'ont pas permis de désagréger de manière complète cette consommation électrique. La part des ventilo-convecteurs des chambres (ventilateur et résistance de chauffe) reste malheureusement inconnue.

Le bilan désagrégé est présenté en Figure 46, avec l'ajout de la répartition des consommations des CTA et des pompes de distribution en Figure 47.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- La consommation « autre » qui recouvre notamment l'ensemble des ventilo-convecteurs du site et donc les consommations du chauffage électrique des chambres, représente la moitié de la consommation d'électricité du site avec 71kWh<sub>él</sub>/m<sup>2</sup>/an. On peut avancer l'hypothèse, en dressant le parallèle avec le bâtiment Calypso, que les ventilo-convecteurs représentent plus de la moitié de cette consommation ;

---

<sup>5</sup> Informations récupérées sur la GTC : général du site (avec facteur correctif de 20 appliqué sur la centrale de mesure après investigation sur les coefficients TI des pinces), ensemble des consommations d'éclairage, consommation du TD ECS, du TD sous-sol (sous-station) et du TD PAC piscine.

Informations extraites des mesureurs d'Enertech : consommations des CTA 1 à 11 (hors PAC piscine) et consommations unitaires des pompes de distribution de chaleur et de froid.

- En année 1 (année qui a précédé la campagne de mesure) l'ECS était faite uniquement par voie électrique, et aurait consommé (d'après l'index en début de campagne) environ 300MWh<sub>élec</sub> de plus que la présente année, soit un total de 46kWh<sub>élec</sub>/m<sup>2</sup>/an en année 1. La grande longueur du réseau de bouclage ECS explique en partie ce ratio de consommation très élevé ;
- Les CTA constituent environ un quart des consommations d'électricité avec 41% pour la zone chambre et 59% pour les autres zones où un gisement d'économie existe puisque l'on a constaté dans ces zones une absence d'intermittence du fonctionnement des CTA (voir §4.5.3) ;
- Les pompes de distribution chaud/froid ne constituent que 3% de la consommation d'électricité du site avec une prédominance très nette des pompes de distribution d'eau glacée (environ les 2/3 du bilan, dont les 3/4 pour la pompe « CTA + autres VC »).

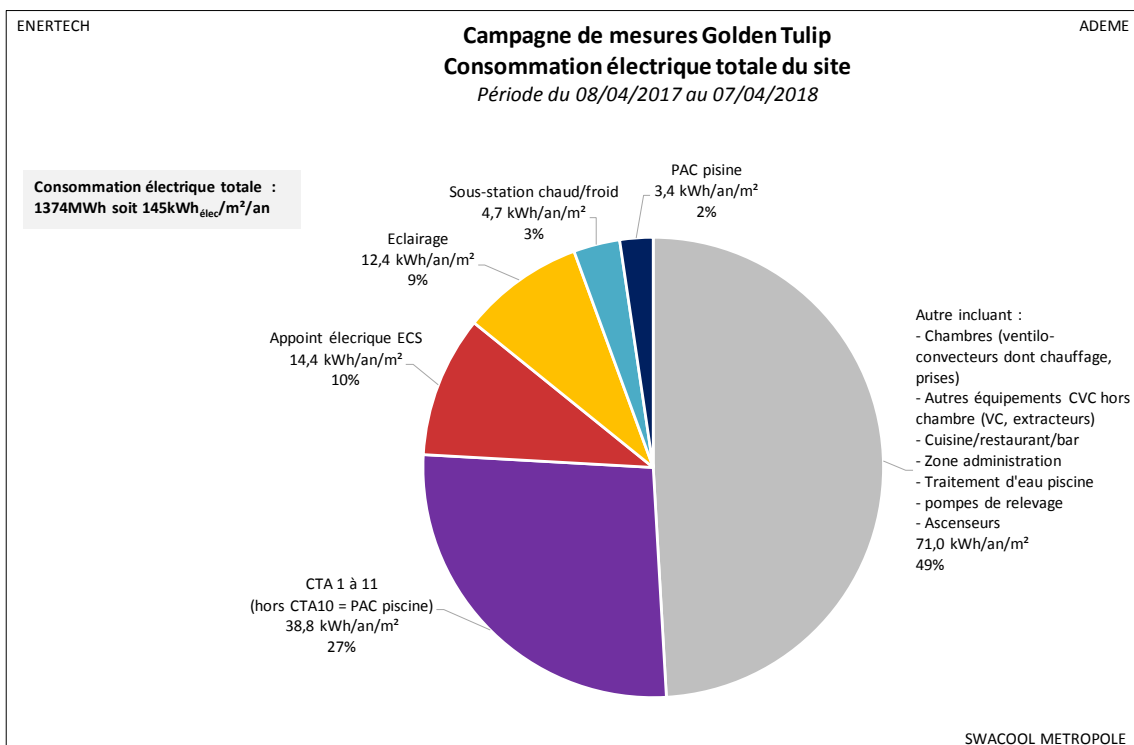


Figure 46 : Consommation électrique totale du bâtiment et répartition par usage.

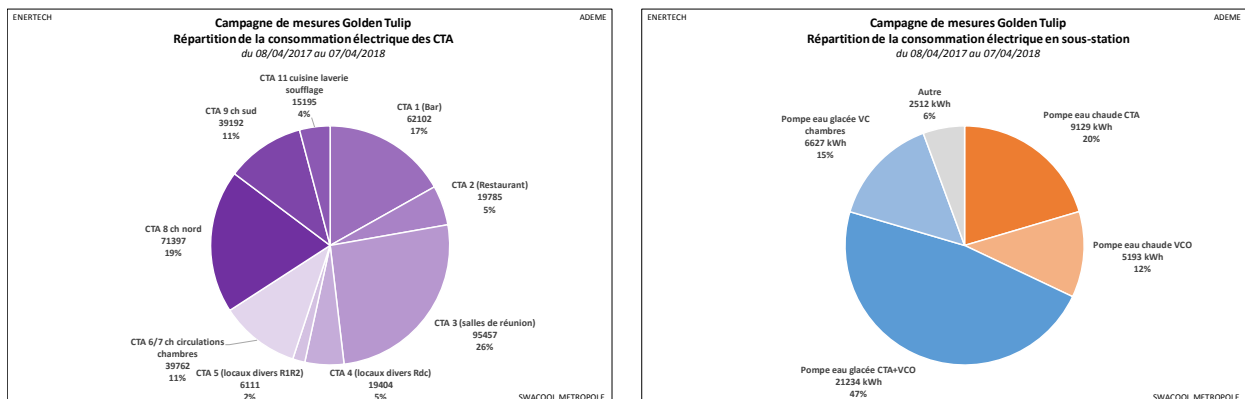


Figure 47 : Sous-répartition des consommations électriques des postes CTA et pompes de distribution.

## 4.5 Gestion des ambiances et des émetteurs

### 4.5.1 Consignes et ambiances dans les chambres

#### Températures de consignes

Les consignes de températures ambiantes de quelques chambres ont pu être récupérées sur la GTC. Ces données en juillet/août (Figure 48 et Tableau 5) montrent que les consignes estivales se situent en moyenne autour de 22°C avec des minimum observés à 16-19°C (consignes très basses imposées hors occupation, Cf. §2.2.2).

Ces consignes de température très basses sont similaires à celles observées en hiver. Elles se situent 1 à 2°C en dessous des consignes de température observées sur le bâtiment Calypso.

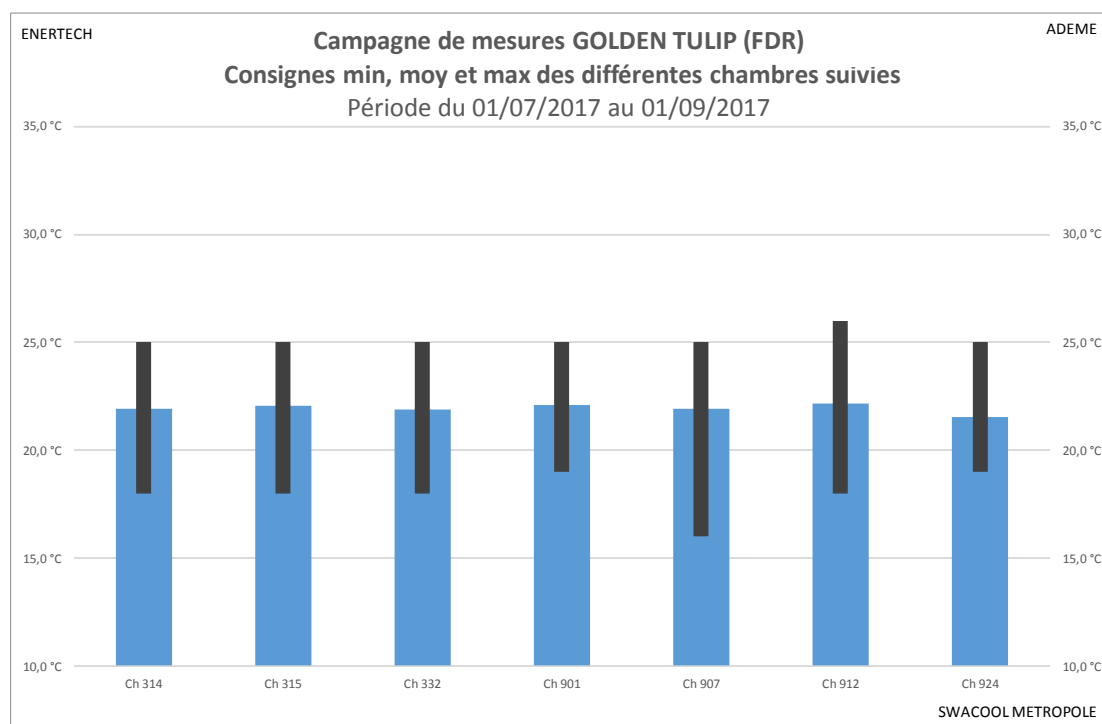


Figure 48 : Consignes de températures ambiantes en juillet/août 2017 dans quelques chambres (valeur dans Tableau 5).

Consignes ambiance VC	Min	Moyenne	Max
Ch 314	18,0 °C	21,9 °C	25,0 °C
Ch 315	18,0 °C	22,1 °C	25,0 °C
Ch 332	18,0 °C	21,9 °C	25,0 °C
Ch 901	19,0 °C	22,1 °C	25,0 °C
Ch 907	16,0 °C	21,9 °C	25,0 °C
Ch 912	18,0 °C	22,2 °C	26,0 °C
Ch 924	19,0 °C	21,5 °C	25,0 °C

Tableau 5 : Consignes de températures ambiantes en juillet/août 2017 dans quelques chambres.

## Températures ambiantes

Les températures ambiantes observées au cours de l'année (données GTC sur 26 chambres) sont présentées en Figure 49. On constate un profil moyen très « plat » en hiver comme en été autour d'une valeur moyenne de 22°C.

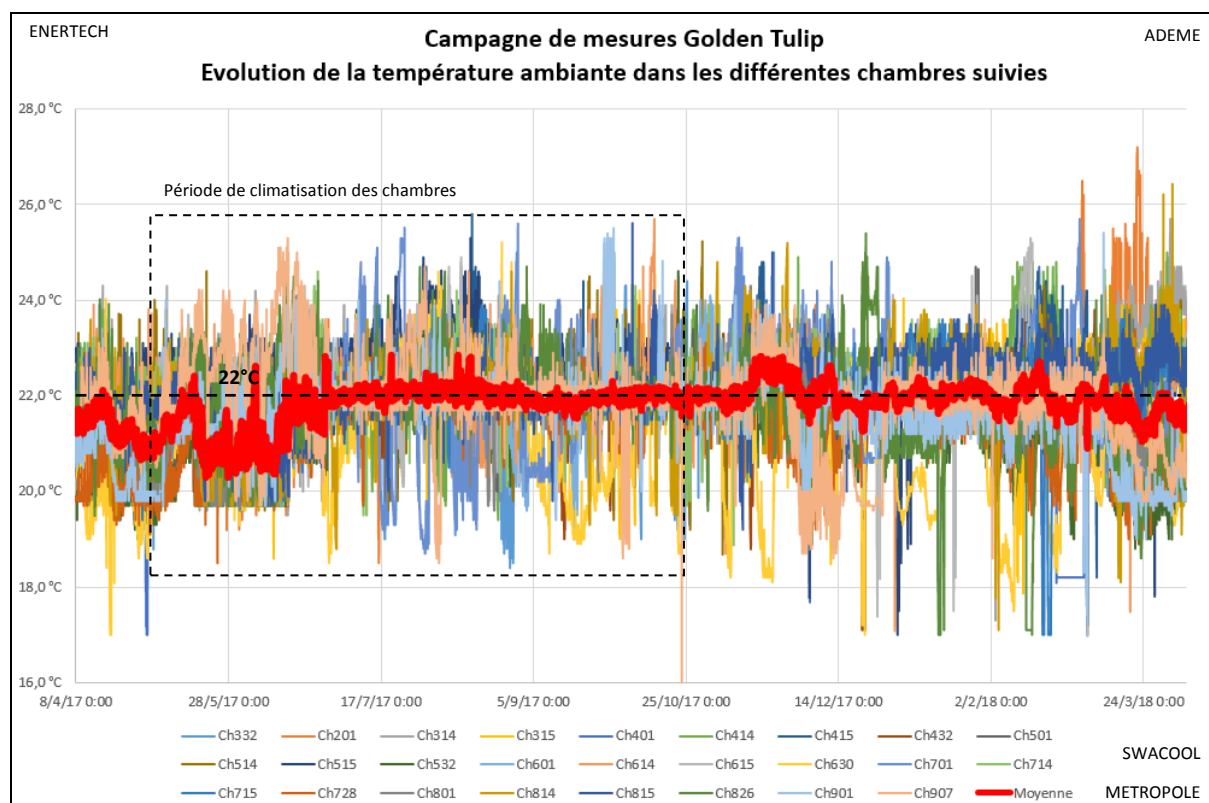


Figure 49 : Températures ambiantes observées dans 26 chambres du Golden Tulip durant l'année de mesure (moyenne en rouge).

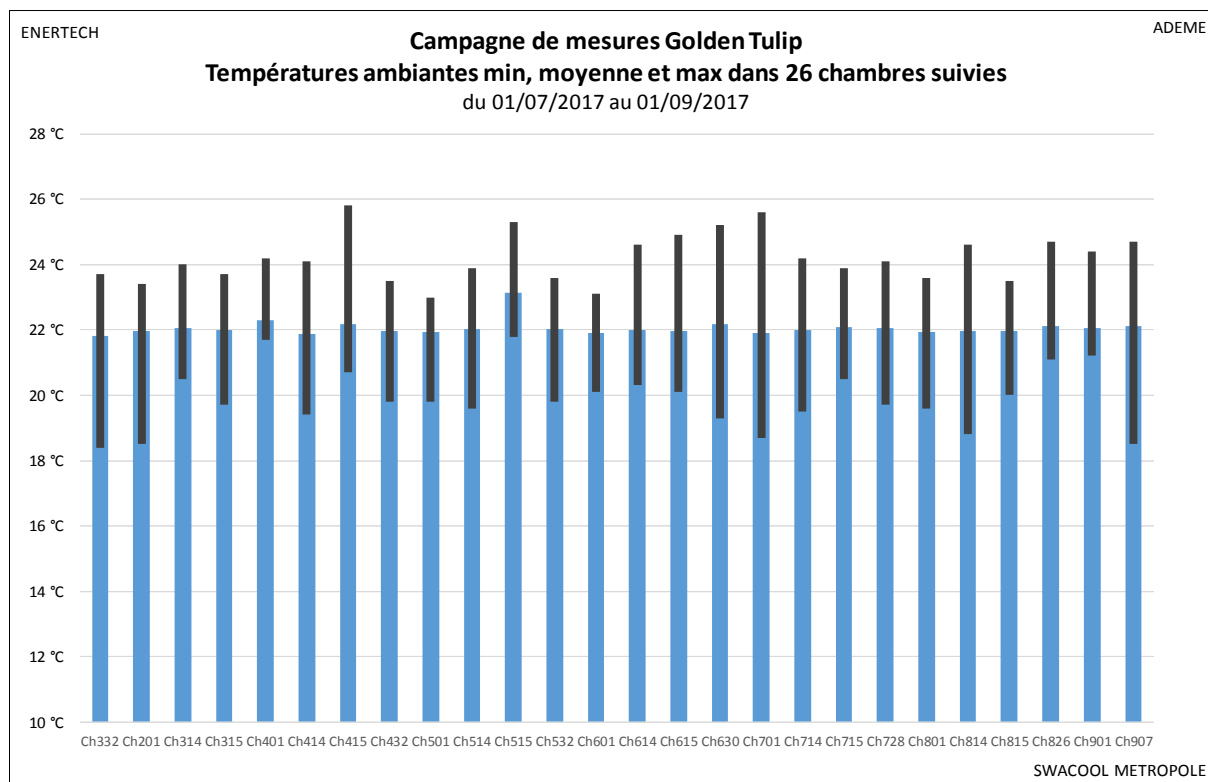
Les statistiques estivales moyenne/min/max présentées en Figure 50 sont cohérentes avec les consignes d'ambiances évoquées ci-dessus : moyenne à 22°C avec des minimum entre 18 et 22°C.

*NB : la chambre 907 n'a jamais atteint sa consigne minimum de 16°C en juillet-août puisqu'elle montre une ambiance minimum de 18.5°C sur cette période.*

**Ainsi les ambiances moyennes en haute saison de climatisation sur le Golden Tulip, avec 22°C, sont de 2 à 3°C plus froides que celle observées sur le bâtiment Calypso (25°C en haute saison de climatisation, 24.3°C sur le reste de la période de climatisation).**

Ces températures ambiantes en été peuvent paraître excessivement fraîches quand on sait que la température extérieure peut atteindre 40°C. Elles expliquent – en partie seulement – la très forte consommation de climatisation du Golden Tulip.





**Figure 50 : Températures ambiantes en juillet/août 2017 dans 26 chambres du Golden Tulip (valeurs dans le Tableau 6).**

Températures ambiantes	08/04/2017 au 08/04/2018			Juillet-août 2017		
	Min	Moyenne	Max	Min	Moyenne	Max
Ch332	18,4 °C	21,5 °C	25,0 °C	18,4 °C	<b>21,8 °C</b>	23,7 °C
Ch201	17,0 °C	21,7 °C	27,2 °C	18,5 °C	<b>22,0 °C</b>	23,4 °C
Ch314	17,2 °C	22,3 °C	25,7 °C	20,5 °C	<b>22,0 °C</b>	24,0 °C
Ch315	17,9 °C	22,0 °C	24,5 °C	19,7 °C	<b>22,0 °C</b>	23,7 °C
Ch401	17,0 °C	22,0 °C	24,7 °C	21,7 °C	<b>22,3 °C</b>	24,2 °C
Ch414	19,3 °C	22,0 °C	25,0 °C	19,4 °C	<b>21,9 °C</b>	24,1 °C
Ch415	18,2 °C	22,2 °C	25,8 °C	20,7 °C	<b>22,2 °C</b>	25,8 °C
Ch432	17,1 °C	21,6 °C	23,9 °C	19,8 °C	<b>22,0 °C</b>	23,5 °C
Ch501	17,2 °C	21,7 °C	24,7 °C	19,8 °C	<b>21,9 °C</b>	23,0 °C
Ch514	18,7 °C	22,0 °C	25,2 °C	19,6 °C	<b>22,0 °C</b>	23,9 °C
Ch515	17,0 °C	22,5 °C	25,3 °C	21,8 °C	<b>23,1 °C</b>	25,3 °C
Ch532	18,8 °C	21,3 °C	24,6 °C	19,8 °C	<b>22,0 °C</b>	23,6 °C
Ch601	17,5 °C	21,7 °C	24,1 °C	20,1 °C	<b>21,9 °C</b>	23,1 °C
Ch614	17,1 °C	22,0 °C	25,7 °C	20,3 °C	<b>22,0 °C</b>	24,6 °C
Ch615	17,4 °C	22,0 °C	25,3 °C	20,1 °C	<b>22,0 °C</b>	24,9 °C
Ch630	17,0 °C	21,1 °C	25,2 °C	19,3 °C	<b>22,2 °C</b>	25,2 °C
Ch701	17,9 °C	21,7 °C	25,7 °C	18,7 °C	<b>21,9 °C</b>	25,6 °C
Ch714	18,9 °C	22,0 °C	24,6 °C	19,5 °C	<b>22,0 °C</b>	24,2 °C
Ch715	17,0 °C	22,0 °C	23,9 °C	20,5 °C	<b>22,1 °C</b>	23,9 °C
Ch728	18,5 °C	21,4 °C	24,1 °C	19,7 °C	<b>22,0 °C</b>	24,1 °C
Ch801	17,2 °C	21,6 °C	24,3 °C	19,6 °C	<b>21,9 °C</b>	23,6 °C
Ch814	17,1 °C	22,0 °C	26,4 °C	18,8 °C	<b>22,0 °C</b>	24,6 °C
Ch815	19,2 °C	22,1 °C	25,6 °C	20,0 °C	<b>22,0 °C</b>	23,5 °C
Ch826	17,0 °C	21,7 °C	25,4 °C	21,1 °C	<b>22,1 °C</b>	24,7 °C
Ch901	17,0 °C	21,7 °C	25,5 °C	21,2 °C	<b>22,0 °C</b>	24,4 °C
Ch907	18,5 °C	21,8 °C	25,3 °C	18,5 °C	<b>22,1 °C</b>	24,7 °C

**Tableau 6 : Températures ambiantes en juillet/août 2017 dans 26 chambres du Golden Tulip.**

## 4.5.2 Gestion des ventilo-convecteurs

### Températures de soufflage

Les profils annuels des températures de soufflage<sup>6</sup> de quelques ventilo-convecteurs de chambres sont présentés en Figure 51. Les données des mois de juillet/août sont présentées en Figure 52.

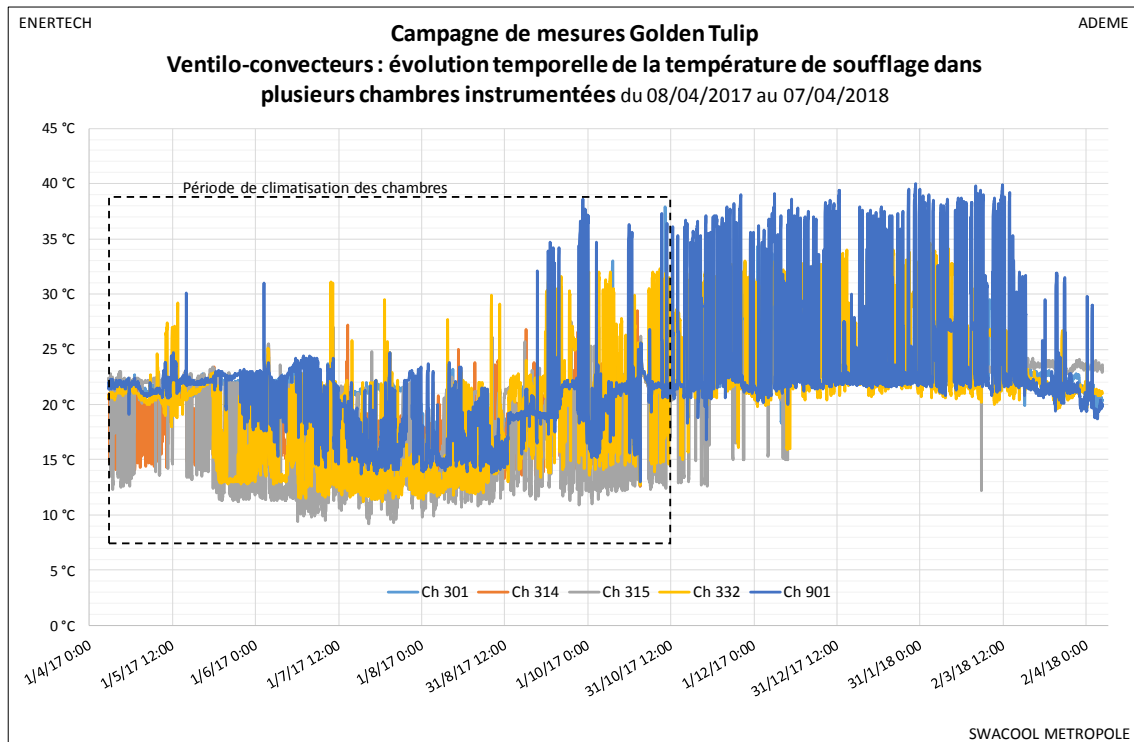


Figure 51 : Températures de soufflage de quelques ventilo-convecteurs durant l'année de mesure.

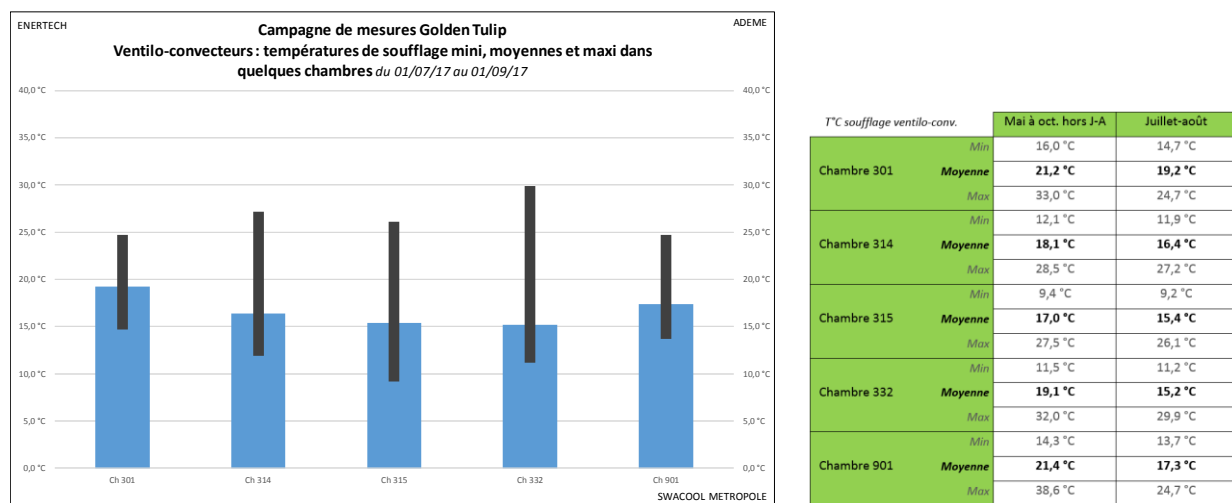


Figure 52 : Températures de soufflage de quelques ventilo-convecteurs en juillet/août 2017.

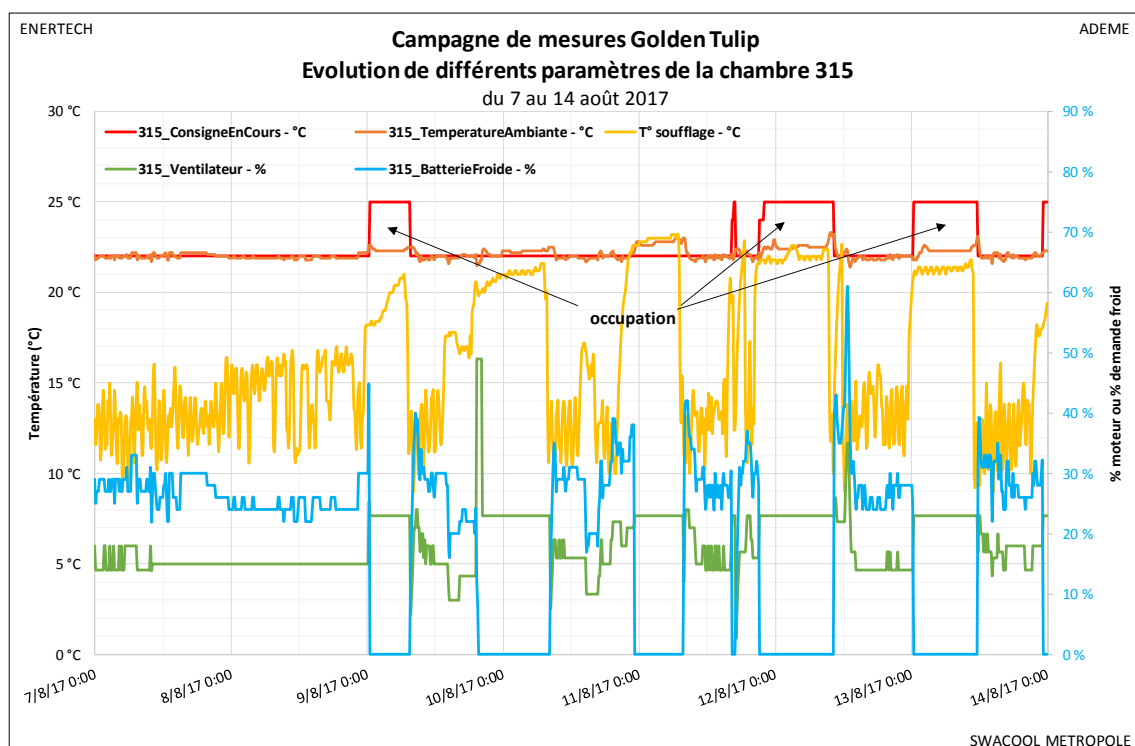
<sup>6</sup> NB : même en l'absence de soufflage du ventilo-convecteur lui-même un flux d'air refroidit existe du fait du gainage des réseaux de soufflage des CTA sur les ventilo-convecteurs.

On peut constater les éléments suivants :

- Les moyennes des températures soufflées se situent autour de 15°C à 19°C (mélange des régimes de soufflage des CTA et des ventilo-convecteurs) ;
- Les températures de soufflage minimum (donc celles des ventilo-convecteurs) s'étendent de 9°C à 15°C, justifiant un départ d'eau glacée à 7-8°C au moins sur les mois de juin/juillet/août ;
- Certains pics de chauffage (allumage de la résistance interne du ventilo-convecteur) sont visibles en pleine saison de climatisation ; des pics plus importants apparaissent en bord de saison de climatisation (traité ci-après).

Les profils temporels relatifs au ventilo-convecteur de la chambre 315 (Figure 53) montrent que la consigne de température ambiante est généralement augmentée par les occupants à leur arrivée dans la chambre (comme cela nous a été rapporté pendant la visite du bâtiment en mars 2017).

**Nous nous interrogeons ainsi sur la nécessité de pratiquer des consignes hors occupation aussi basses quand on estime que l'influence d'un degré d'ambiance sur la consommation est de l'ordre de 9%<sup>7</sup>.**



**Figure 53 : Evolution temporelle pendant une semaine de quelques paramètres du ventilo-convecteur de la chambre 315.**

<sup>7</sup> D'après les consommations mensuelles du Golden Tulip (Figure 19) **on estime la dépendance de la consommation de climatisation du bâtiment à 9% par degré d'ambiance**. En effet la consommation passe de 17.04kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup> en août (température extérieure moyenne 25.2°C) à 7.86kWh<sub>froid</sub>/m<sup>2</sup> en septembre (température extérieure moyenne 19.3°C). Sachant que la température intérieure est stable au cours de ces deux mois, on calcule la dépendance comme suit :  $(7.86-17.04)/17.04 / (19.3-25.2) = -54\% / -5.9\text{°C} = 9\% / \text{°C}$ .

### Gestion des V2V froides et des résistances de chauffage

L'étude détaillée de quelques ventilo-convecteurs montre qu'en fin de saison de climatisation des consommations sont visibles alors même que la température extérieure est très inférieure à la température ambiante et que la batterie électrique de chauffage est sollicitée (Figure 54). **Ce constat, alarmant pour les consommations, montre qu'il serait nécessaire de définir des zones d'exclusion de climatisation et de chauffage en fonction de la température extérieure. L'enjeu de réduction de consommation de climatisation du circuit « ventilo-convecteurs » est estimé à -15% voire -20%.**

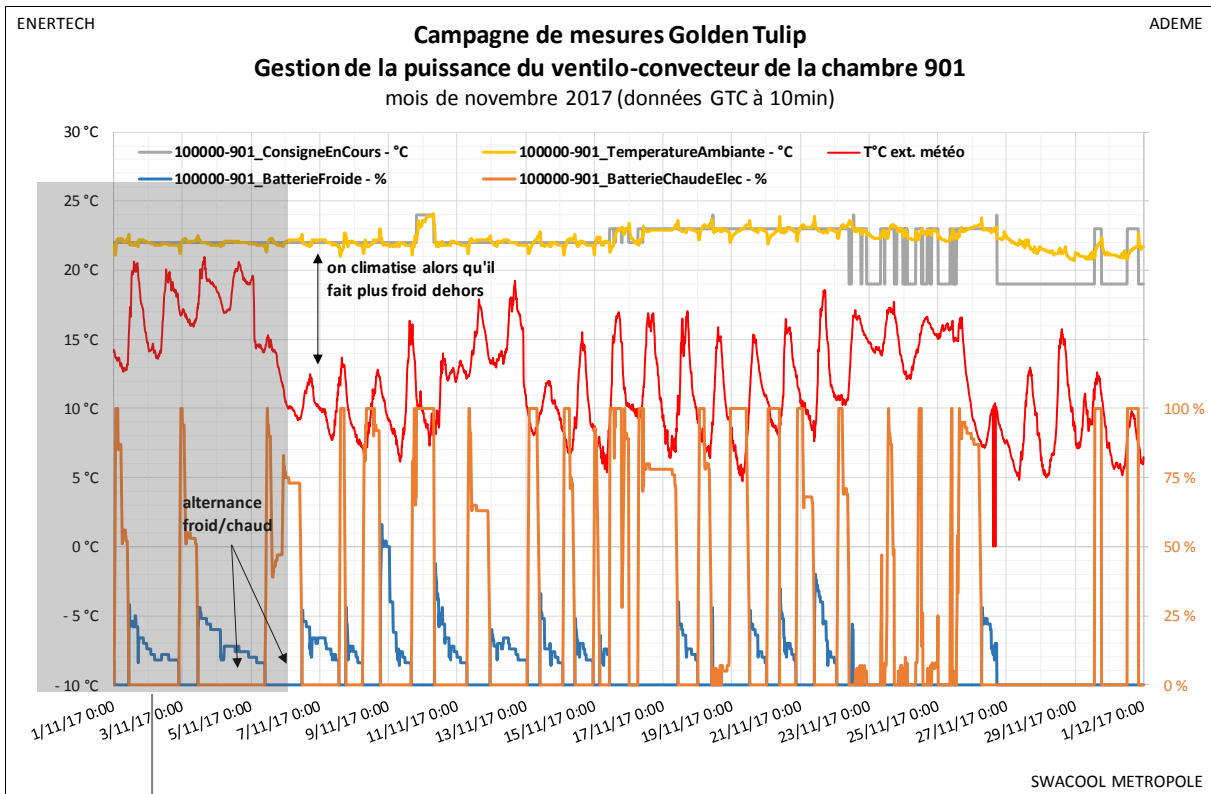
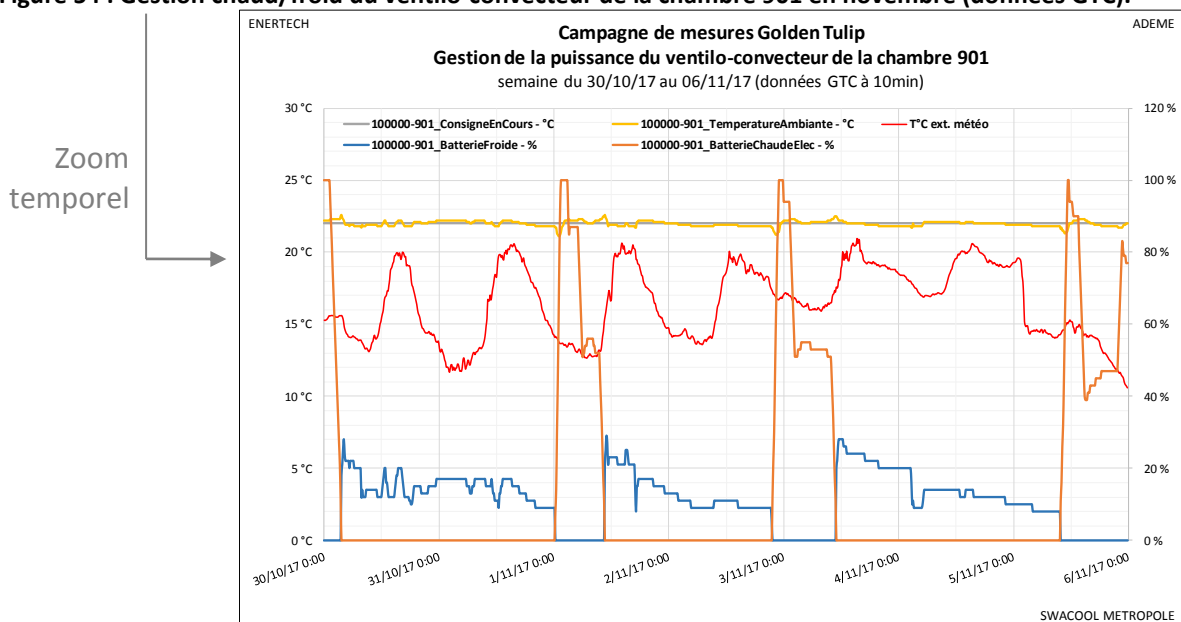


Figure 54 : Gestion chaud/froid du ventilo-convecteur de la chambre 901 en novembre (données GTC).

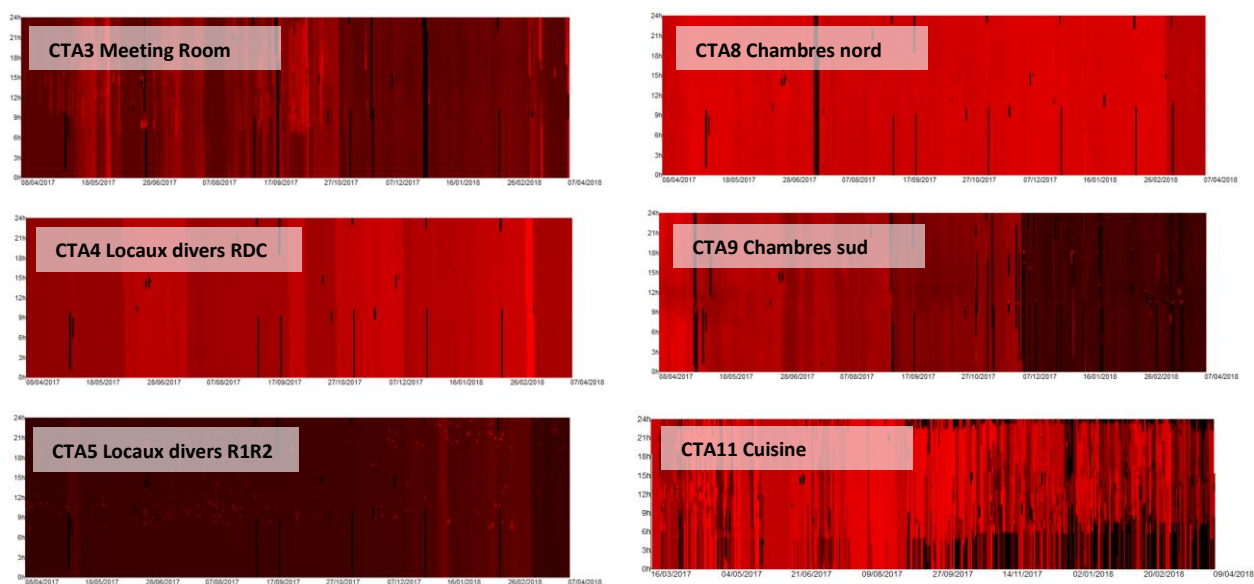


### 4.5.3 Gestion des CTA

#### Gestion de l'intermittence

L'ensemble des mesures effectuées montrent que **les CTA fonctionnent toute l'année sans interruption** (Figure 55).

Si cela est normal pour les trois CTA relatives aux chambres, cela ne l'est pas pour les autres CTA. **L'enjeu est non seulement électrique (les CTA représentent 27% de la consommation d'électricité du bâtiment) mais également thermique, puisque qu'un renouvellement d'air permanent entraîne des surconsommations de chauffage ou de climatisation selon les saisons.**



**Figure 55 : Diagramme d'intermittence des CTA 3,4,5,8,9,11 pendant l'année de mesure (en ordonnée l'heure de la journée, en abscisse les jours de l'année ; rouge vif = puissance maximale, noir = absence de consommation).**

#### Gestion des batteries chaudes/froides et de la récupération de chaleur

Deux autres sujets nous semblent particulièrement préoccupants sur la gestion des CTA :

1. Comme pour les ventilo-convecteurs, **l'absence de zones d'exclusion chauffage/climatisation créent des appels alternés de chaud et de froid par simple pompage des régulations** (Figure 56 et Figure 58). Il arrive même que **climatisation et chauffage soient simultanés**. Ce phénomène explique en grande partie les consommations de climatisation en hiver sur le réseau d'eau glacée CTA (§4.2.1).
2. **Les échangeurs des CTA (récupérateurs de chaleur ou de frigories selon la saison) montrent des bypass récurrents provoqués par une déficience de la régulation** (Figure 57 et Figure 58), qui annulent toute récupération de chaleur ou de frigorie alors que les batteries sont en demande.

A titre d'exemple durant l'année de mesure la CTA 9 (chambres sud) a sollicité ses batteries pendant 79% du temps : 39% du temps en chaud seul, 34% en froid seul et 6% en simultané. Parallèlement l'échangeur récupérateur a été by-passé 63% du temps !

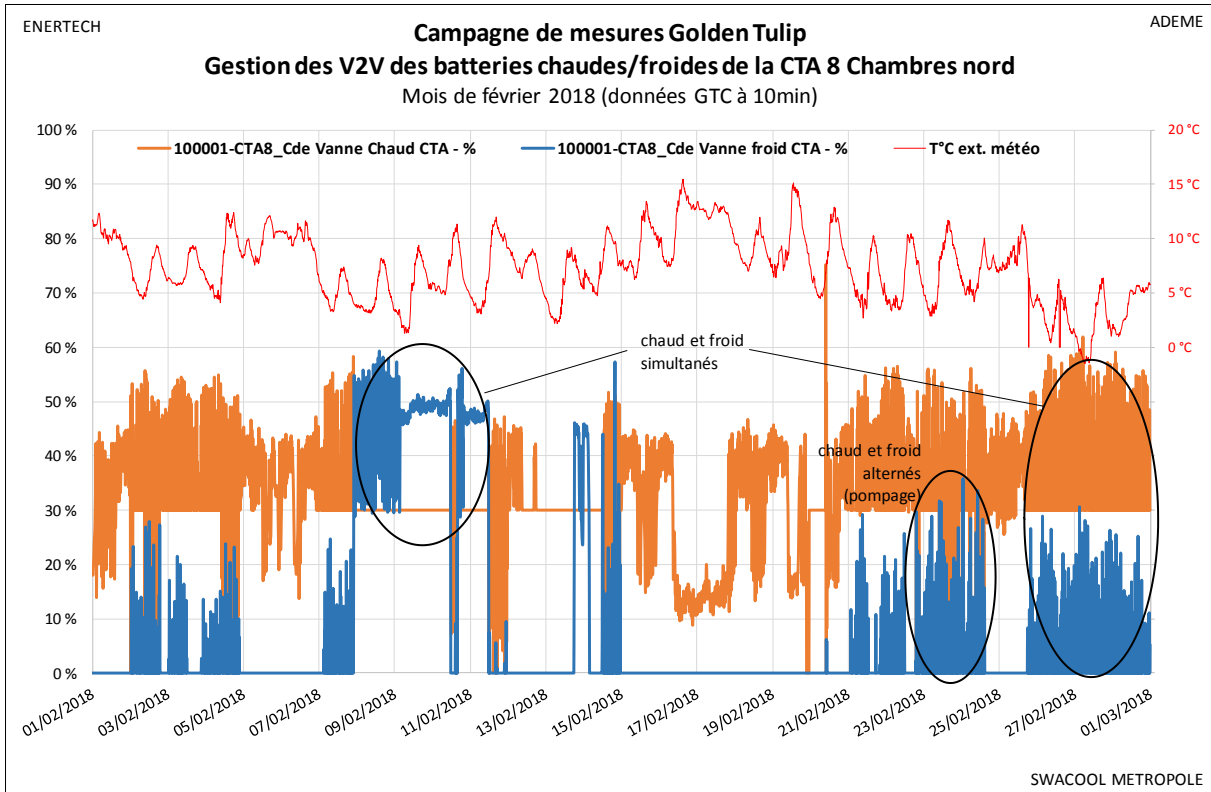


Figure 56 : Illustration d’appels simultanés de chaleur et de froid sur la CTA8 (chambres nord), février 2018.

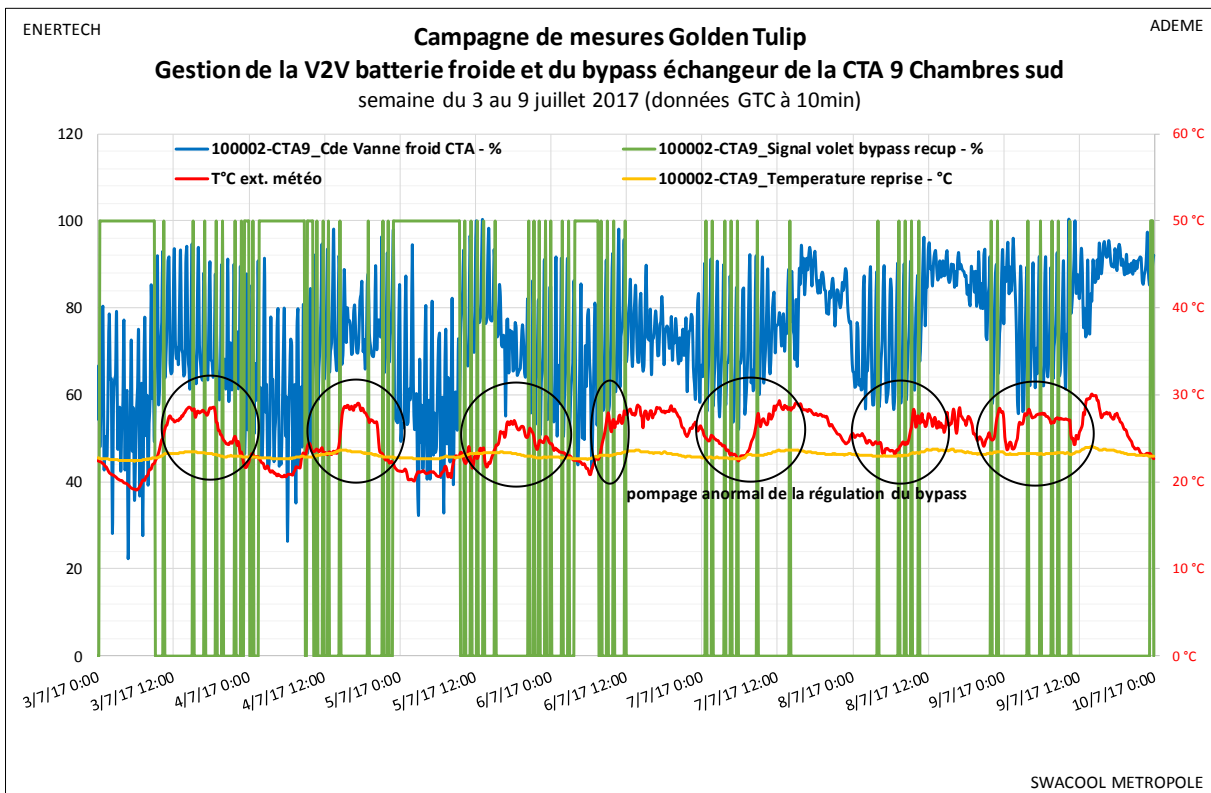


Figure 57 : Illustration d’un pompage anormal de la gestion du bypass échangeur sur la CTA9 (chambres sud).

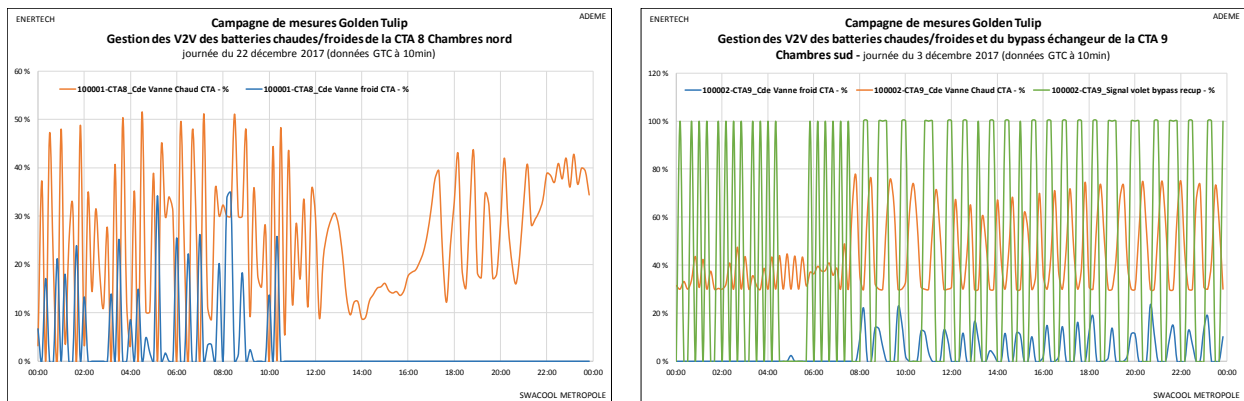


Figure 58 : Illustration du pompage de la régulation provoquant une alternance de demande chaud/froid sur les batteries des CTA8 (chambres nord, à gauche) et CTA9 (chambres sud, à droite). La donnée du bypass échangeur n'est pas disponible sur la CTA 8 mais il est très probable qu'il régisse comme celui de la CTA9.

Des consommations très importantes en chaleur et climatisation pourraient ainsi être évitées par une meilleure mise au point des régulations des batteries de CTA et des bypass des échangeurs. **Par ailleurs les pompages de puissances actuels nuisent fortement à la stabilité des régimes primaire/secondaire en sous-station.**

### Températures d'air soufflées

Les températures de soufflage des CTA sont présentées en évolution temporelle annuelle sur le graphique de la Figure 59.

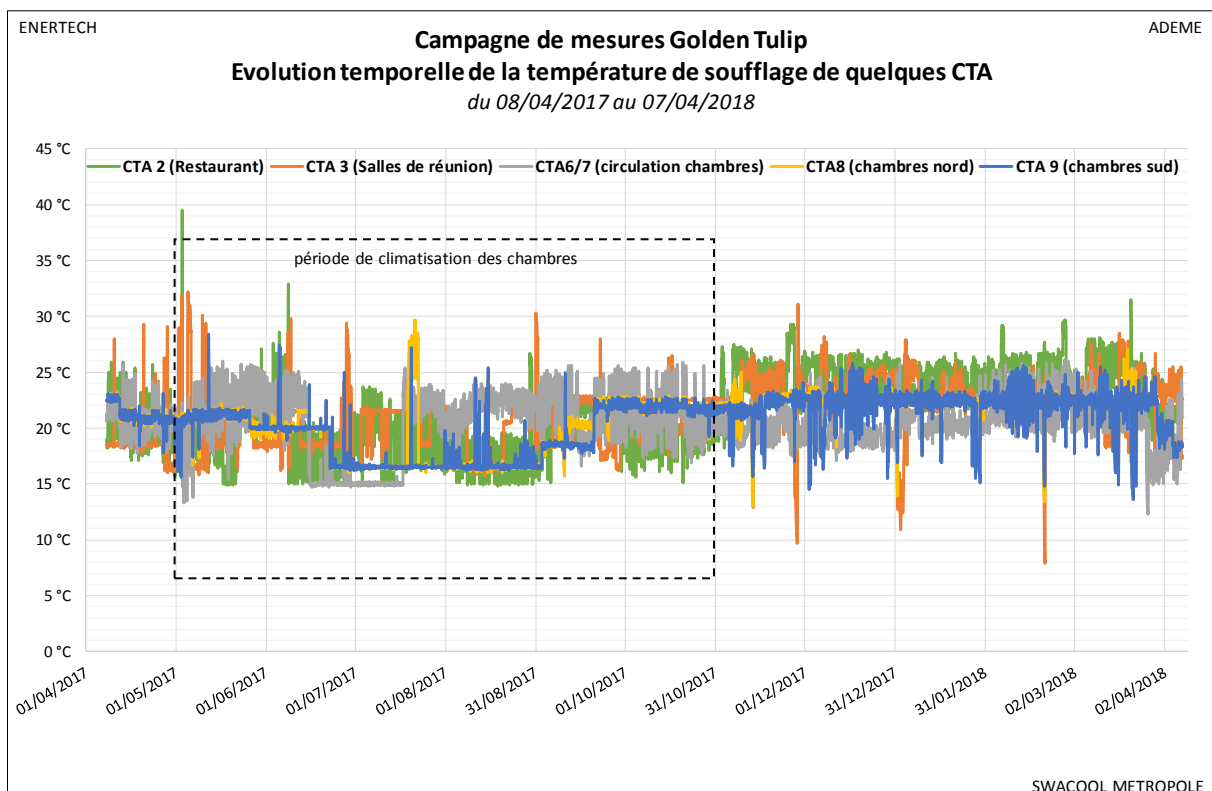


Figure 59 : Température de soufflage de quelques CTA durant toute l'année de mesure.

L'analyse fonctionnelle des installations décrivait un soufflage des CTA à température neutre. Les mesures montrent que cette contrainte n'est pas réellement respectée pour l'ensemble des CTA, avec des écarts notables à la température ambiante moyenne, principalement en été.

A titre d'exemple les CTA 8 et 9 (chambres nord et sud) soufflent bien autour de 22°C en hiver (aux phénomènes de pompage près) alors que les consignes de soufflage sont sensiblement abaissées en saison de climatisation :

- Température soufflée 21°C en avril/mai ;
- Température soufflée 20°C en juin ;
- Température soufflée 16.5°C en juillet/août ;
- Température soufflée entre 18.5°C et 20.5 °C en septembre.

Nous nous interrogeons sur la pertinence de l'abaissement des températures soufflées par les CTA alors que les ventilo-convecteurs étaient conçus au départ pour assurer seuls la climatisation des pièces. Une plus grande sollicitation du réseau « ventilo-convecteurs chambres » pourrait éventuellement contribuer à augmenter le « delta T » de ce réseau (Cf. problématique soulevée au §4.3.2).



## 5 Synthèse et conclusion

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

Le bâtiment Golden Tulip, propriété de Covivio (anciennement de la Foncière des Régions), est un hôtel 4 étoiles livré en avril 2016 et disposant d'un restaurant, d'une piscine intérieure et de salles de réunions. Il est alimenté en froid et en chaleur par la boucle Thassalia et dispose d'une sous-station abritant 4 échangeurs (2 chauds, 2 froids) reliés, via un tronçon commun, à 2 réseaux de distribution de chauffage (+ piquage ECS) et 2 réseaux de distribution d'eau glacée.

La puissance froide souscrite est de  $500\text{kW}_{\text{froid}}$  soit  $52\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$  ( $40\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$  sur le Calypso) pour un besoin maximal théorique de  $843\text{kW}_{\text{froid}}$ . Les deux réseaux d'eau glacée desservent respectivement les ventilo-convecteurs des chambres et les CTA + autres ventilo-convecteurs. Les régimes théoriques de température des circuits sont  $7^\circ\text{C}$  aller et  $15^\circ\text{C}$  retour. L'ensemble des émetteurs (CTA et ventilo-convecteurs) pilotent des vanne-2-voies modulantes permettant de gérer l'apport de froid.

- Les ventilo-convecteurs disposent de batteries froides hydrauliques et de résistances électriques pour le chauffage. Ils doivent pouvoir assurer seuls le chauffage et la climatisation d'après l'analyse fonctionnelle.
- Les CTA (centrales d'air double flux à récupération de chaleur par échangeurs à plaques) disposent de batteries hydrauliques chaudes et froides. L'air soufflé est généralement gainé sur les ventilo-convecteurs. L'analyse fonctionnelle décrit un soufflage à température neutre.

Les débits (variables) des 2 circuits sont simplement gérés à pression constante depuis la sous-station.

L'ensemble des consignes ( $T^\circ\text{C}$  de soufflage CTA,  $T^\circ\text{C}$  ambiante des chambres) sont gérées depuis une GTC. Trois consignes de température sont distinguées pour les chambres : chambre vacante ; chambre inoccupée mais réservée, chambre occupée. L'occupation est détectée par la présence du badge dans son support à l'entrée de la chambre.

### Campagne de mesure et objectifs

Une campagne de mesure a été menée sur le bâtiment Golden Tulip 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 73 points de mesure supplémentaires dans le bâtiment. L'intégrateur GTC a par ailleurs été missionné par Enertech dans le but de déclencher l'enregistrement de certaines données de la GTC comme des paramètres internes aux CTA ou aux 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 Golden Tulip.

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

Golden Tulip - 9500m <sup>2</sup> mesures 08/04/2017 - 07/04/2018	Froid Thassalia (énergie utile)		Régime de température au primaire			Régime de température au secondaire			Pompes distrib. EG	Ventilo- convecteurs	
	Conso.	Pmax	T°C arrivée	T°C départ	dT prim	T°C départ	T°C retour	dT second	Conso. Elec.	Conso. Elec.	
avr-17	3,4 kWh/m2	184 kW	7,0 °C	14,0 °C	7,1 °C	11,4 °C	14,5 °C	3,2 °C	0,21 kWh/m2	pas d'info	
mai-17	7,8 kWh/m2	862 kW	6,9 °C	14,4 °C	7,6 °C	11,7 °C	15,2 °C	3,4 °C	0,29 kWh/m2		
juin-17	15,7 kWh/m2	1 054 kW	6,2 °C	14,2 °C	8,0 °C	10,6 °C	15,6 °C	5,0 °C	0,32 kWh/m2		
juil-17	16,6 kWh/m2	629 kW	5,5 °C	12,4 °C	6,9 °C	8,9 °C	14,7 °C	5,9 °C	0,30 kWh/m2		
août-17	17,0 kWh/m2	881 kW	6,3 °C	13,1 °C	6,8 °C	9,0 °C	14,9 °C	5,8 °C	0,34 kWh/m2		
sept-17	7,9 kWh/m2	342 kW	8,6 °C	12,7 °C	4,1 °C	9,5 °C	14,5 °C	5,0 °C	0,26 kWh/m2		
oct-17	7,3 kWh/m2	281 kW	8,8 °C	13,9 °C	5,2 °C	10,9 °C	14,8 °C	3,8 °C	0,26 kWh/m2		
nov-17	4,4 kWh/m2	130 kW	9,5 °C	15,3 °C	5,8 °C	13,0 °C	15,9 °C	2,9 °C	0,23 kWh/m2		
déc-17	2,6 kWh/m2	94 kW	10,1 °C	16,5 °C	6,4 °C	14,1 °C	17,1 °C	3,0 °C	0,20 kWh/m2		
janv-18	1,7 kWh/m2	66 kW	10,8 °C	16,9 °C	6,1 °C	14,0 °C	17,3 °C	3,3 °C	0,18 kWh/m2		
févr-18	1,8 kWh/m2	167 kW	9,2 °C	14,8 °C	5,7 °C	11,5 °C	15,8 °C	4,3 °C	0,15 kWh/m2		
mars-18	1,8 kWh/m2	183 kW	9,3 °C	12,7 °C	3,4 °C	11,0 °C	14,9 °C	3,9 °C	0,14 kWh/m2		
avr-18	0,8 kWh/m2	144 kW	7,3 °C	12,1 °C	4,8 °C	7,9 °C	14,4 °C	6,5 °C	0,04 kWh/m2		
<b>Bilan annuel</b>	<b>89 kWh/m2</b>	<b>1 054 kW</b>	<b>8,1 °C</b>	<b>14,1 °C</b>	<b>6,0 °C</b>	<b>11,0 °C</b>	<b>15,4 °C</b>	<b>4,3 °C</b>	<b>2,9 kWh/m2</b>		Pas d'info
	(Total)	(Max)	(Moyenne)			(Moyenne)			(Total)		

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

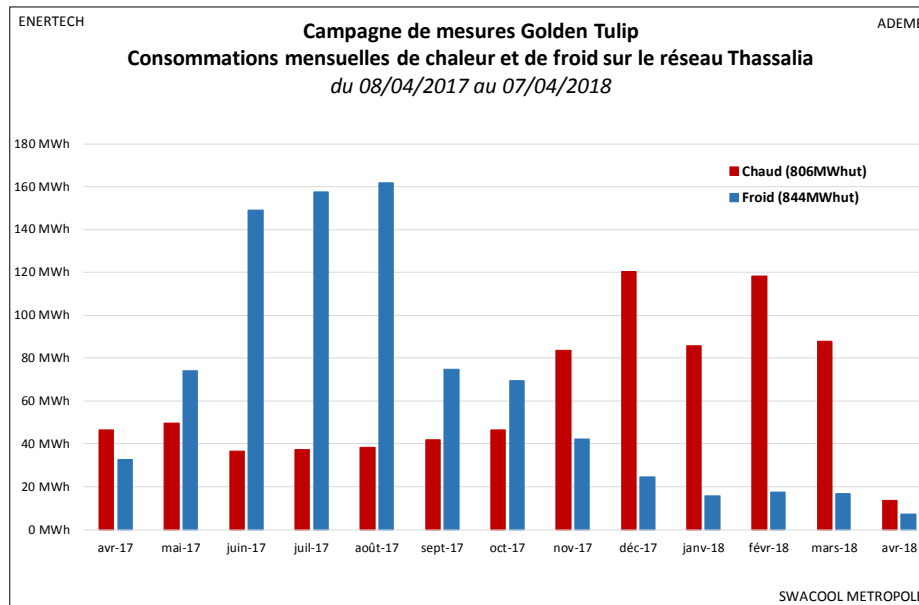
La campagne de mesures a bien fonctionné. Aucune perte de donnée majeure n'est à signaler. Il a toutefois été plus difficile de travailler avec les données GTC que sur le Calypso, car de nombreuses données n'ont pas pu être enregistrées par Pyretec comme cela était prévu.

#### ▪ 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

Les disponibilités de la climatisation et du chauffage (incluant une partie de la production ECS) sont toutes les deux permanentes sur le Golden Tulip. Nous verrons que cette disponibilité permanente de l'énergie pose des problèmes de régulation et génère un certain gaspillage énergétique.



Le bâtiment a consommé  $844\text{MWh}_{\text{froid}}$  soit  $89\text{kWh}_{\text{froid}}/\text{m}^2$  du 8 avril 2017 au 7 avril 2018. Cette consommation est la plus élevée des trois bâtiments du projet d'étude SWACOOOL (bureaux Mirabeau2  $81\text{kWh}_{\text{froid}}/\text{m}^2/\text{an}$ , Calypso  $21\text{kWh}_{\text{froid}}/\text{m}^2/\text{an}$ ). Elle est, comme sur le Calypso, comparable en ordre de grandeur d'énergie utile, à la consommation de chaleur annuelle enregistrée sur le même bâtiment ( $85\text{kWh}_{\text{chal}}/\text{m}^2$  sur les échangeurs Thassalia, hors consommation du chauffage électrique des chambres).

La variabilité mensuelle de la consommation de froid est forte et liée aux  $\text{DJU}_{\text{clim}}$  de la météo avec un excellent facteur de corrélation. 55% de la consommation de froid est réalisée de début juin à fin août (contre 70% pour le Calypso). L'intermittence journalière est légèrement moins marquée que sur le Calypso, avec tout de même 50% de baisse de puissance la nuit en juillet/août. En revanche la consommation de puissance froide en hiver (réseau CTA uniquement) constitue un talon sans aucune baisse nocturne. Il s'agit de pertes de distributions et de défauts de régulations (Cf. plus loin).

La signature énergétique journalière la plus nette est obtenue en fonction de la température sèche extérieure et non de l'enthalpie comme à la Réunion. La corrélation des consommations avec l'ensoleillement est faible. Ces deux constatations sont les mêmes que sur le bâtiment Calypso.

Enfin le monotone de puissance froide appelée à l'échangeur montre que la puissance maximale souscrite ( $500\text{kW}_{\text{froid}}$ ) a été dépassée pendant 27 heures, tandis que la puissance maximale théorique ( $843\text{kW}_{\text{froid}}$ ) n'a été dépassée que 3 heures. L'abonnement semble donc mieux dimensionné que sur le Calypso. A noter que la puissance froide consommée est tout de même 4 fois inférieure à la puissance souscrite plus de 75% du temps. Optimiser la variation des régimes de distribution d'eau glacée est donc indispensable.

### ▪ 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 la valeur constante de 6°C (moyenne annuelle de 8.1°C avec des variations court et long terme dans une plage 4°C - 13°C). On peut retenir que les régimes observés au-delà de 3-400kW<sub>froid</sub> sont corrects avec des écarts de températures aller/retour globalement conformes aux 8°C prévus en conception (dT=6 à 10°C au primaire et au secondaire). On note toutefois que le débit au secondaire est tendanciellement plus élevé qu'au primaire (20m<sup>3</sup>/h en moyenne contre 14m<sup>3</sup>/h au primaire) ce qui a tendance à écraser le dT secondaire (moyenne annuelle 4.3°C contre 6°C au primaire) et se traduit par un départ moyen à 11°C soit 3°C plus chaud que la température délivrée par Thassalia !

**Au primaire** : On peut déplorer comme sur le Calypso l'irrégularité de la température délivrée qui brouille les cartes de l'analyse. Côté débit il ressort de l'analyse que la V2V primaire pilote le débit proportionnellement à la puissance absorbée par le bâtiment. Cette régulation fonctionne macroscopiquement puisque le pincement (retour primaire – retour secondaire) est de l'ordre de 1.3°C : le débit au primaire est donc minimisé dans la mesure de ce que lui autorise le retour secondaire. De nombreux pompages du débit primaire sont en revanche observés (période de quelques heures), sans que l'on ne sache s'ils sont le résultat d'une instabilité de la régulation primaire ou d'un pompage de la consommation de puissance du bâtiment. Il semble tout de même que la V2V primaire soit plus instable que sur le Calypso.

**Au secondaire** : Le débit des deux circuits de distribution d'eau glacée ne dépend que de la pression aux bornes de la pompe (maintenue constante), donc de la quantité de V2V terminales ouvertes ou fermées. On observe une très bonne variation de débit (de 1 à 10 minimum sur les deux circuits), en revanche une faible variation de la puissance consommée par la pompe sur le circuit « CTA et autres VC » (facteur de baisse 1.5 alors qu'il vaut 4 sur l'autre circuit). Cela est possiblement lié à la trop grande plage de variation demandée à la pompe, qui ne fonctionne plus sur un régime acceptable à puissance minimum (mauvais rendement). On observe également certains mois des pompages importants de débit (période de 2h plus courte qu'au primaire) qui ne semble pas concomitants des pompages au primaire.

En termes de températures, on observe un dT très acceptable sur le circuit CTA (dT moyen de 5°C avec un dT de 8°C atteint aux deux tiers de la puissance maximale du circuit) mais beaucoup moins satisfaisant sur le circuit « ventilo-convecteurs chambres » (dT moyen 2.3°C culminant au maximum à 4°C). Ce dernier circuit dégrade le régime de fonctionnement au secondaire, comme décrit précédemment. Il s'en suit un débit trop important et donc un pincement important à l'échangeur qui provoque un départ à 11°C en moyenne pour une température délivrée par Thassalia à 8°C.

La V2V de bypass échangeur au secondaire (mise en place pour éviter les retours trop froids) semble jouer un rôle puisque la température moyenne de retour au secondaire est de 15.4°C. On se demande toutefois dans quelle mesure elle ne contribue pas également aux pompages de régimes observés au primaire et au secondaire (l'observable GTC ne semble malheureusement pas suffisamment exploitable pour investiguer ce point).

### ▪ Consommation électrique des auxiliaires

Les comptages électriques récupérés à la GTC ne permettent pas de faire un bilan électrique du bâtiment détaillé par usage car ils ne remontent que quelques TD spécifiques et beaucoup de sous compteurs d'éclairage. Les coefficients des TI ne semblent pas toujours avoir été pris en compte dans la remontée des index (par exemple sur l'index de la centrale de mesure) ce qui biaise les informations.

L'utilisation des données mises à disposition ainsi que l'instrumentation des pompes et des CTA dans le cadre du projet, ont toutefois permis de mettre en évidence que le bâtiment consomme  $145\text{kWh}_{\text{él}}/\text{m}^2/\text{an}$ .

Les CTA consomment 27% du bilan et fonctionnent toutes en permanence malgré l'intermittence de certains usages (comme la CTA salle de réunion, les CTA cuisine, etc.) ce qui aggrave bien évidemment les charges de climatisation et de chauffage.

Les pompes représentent 3% de la consommation avec une consommation plus importante des pompes d'eau glacées (62%) que des pompes de chauffage (48%). La pompe d'eau glacée « CTA + autres VC » consomme à elle seule 47% du bilan et mériterait une investigation étant donné que son débit est comparable à celui de l'autre circuit d'eau glacée (elle est en revanche plus puissante, Cf. point précédent).

Enfin la consommation des ventilo-convecteurs n'a pas pu être analysée car elle n'est pas remontée. Elle pourrait constituer une part importante des  $71\text{kWh}_{\text{él}}/\text{m}^2/\text{an}$  qui constituent le poste « autre » puisqu'elle recouvre le chauffage électrique des chambres.

### ▪ Gestion des ambiances, ventilo-convecteurs et CTA

On peut retenir sur le chapitre « ambiances et émetteurs » les idées suivantes :

#### Ambiances

- L'ambiance moyenne constatée dans le bâtiment se situe autour de  $22^{\circ}\text{C}$  hiver comme été, soit  $3^{\circ}\text{C}$  de moins que dans le bâtiment Calypso, ce qui explique en partie le ratio plus élevé de consommation de climatisation (sans toutefois justifier un facteur 4 car on estime à +9% le coût énergétique d'abaissement d'un degré des consignes) ;
- Il est regrettable de constater que les consignes de température en inoccupation sont tellement fraîches ( $16$  à  $20^{\circ}\text{C}$ ) que les occupants élèvent généralement la consigne quand ils entrent dans la chambre.

#### Ventilo-convecteurs

- Les températures de soufflage des ventilo-convecteurs s'étendent de  $9^{\circ}\text{C}$  à  $15^{\circ}\text{C}$  selon les cas, justifiant un départ d'eau glacée à  $7-8^{\circ}\text{C}$  au moins sur les mois de juin/juillet/août ;
- Des consommations de climatisation sont évitables sur ce circuit puisqu'on constate en bord de saison des alternances chauffage/climatisation dans une même journée avec une température extérieure très inférieure à celle de la chambre. Nous pensons

que la régulation devrait inclure des zones d'exclusions rendant impossible une telle simultanéité des énergie chaud/froid ;

### CTA

- Aucune CTA n'est arrêtée, ce qui serait possible sur certaines CTA dans des zones à occupation intermittente (restaurant, salle de réunion, cuisine, etc.). Enjeu : économies d'électricité, de chauffage et de climatisation ;
- Les températures de soufflage (prévues « neutres » dans l'analyse fonctionnelle) sont bien neutres en hiver sur les CTA des chambres mais sont abaissées de plusieurs degrés en été et donc contribuent fortement à la climatisation ce qui empiète sur la fonction du circuit d'eau glacée « ventilo-convecteurs chambres » ;
- Comme pour les ventilo-convecteurs, l'absence de zones d'exclusions crée des alternances d'utilisation chauffage/climatisation à l'échelle de la journée voire de l'heure. Des usages simultanés des batteries chaudes/froides sont même observés.
- Enfin les échangeurs récupérateurs de chaleur sont trop souvent bypassés. Il s'agit d'un problème de régulation qui engendre, outre des pertes d'énergie, des pompages de régime sur les circuits de distribution.

### **Optimisation du raccordement à Thassalia ?**

Le fonctionnement général du raccordement à Thassalia du Golden Tulip est meilleur que sur le bâtiment Calypso : si l'on compare les mêmes mois de fonctionnement (mai à octobre) on observe un retour primaire à 13.5°C soit 1°C plus chaud que le Calypso pour la même température délivrée (donc dT 1°C plus élevé), un départ secondaire 0.5°C plus froid et un dT secondaire 1.5°C plus élevé.

Les valeurs annuelles des régimes de températures primaire/secondaire du Golden Tulip restent plus avantageuses que sur Calypso, de l'ordre de 1°C.

Le fonctionnement détaillé de l'installation montre toutefois quelques 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 bâtiment. On peut retenir par ordre d'importance :

1. La consommation de climatisation du Golden Tulip nous semble sous optimale *dans son usage* ce qui nuit à la qualité des régimes de distribution d'eau glacée, et donc à celle des régimes au primaire Thassalia. Les pistes d'amélioration sont :
  - (Consignes d'ambiances) : Etudier la possibilité d'augmenter les consignes d'ambiance d'inoccupation des chambres ;
  - (Consignes soufflage CTA) : Etudier la possibilité de souffler à température neutre y compris en été pour redonner aux ventilo-convecteurs la charge de climatisation qui leur incombe selon l'analyse fonctionnelle ;

- (Ventilo-convecteurs) : Etudier le réglage des ventilo-convecteurs y compris le débit d'irrigation pour augmenter le « delta T » aller/retour d'eau glacée aux bornes de leur batterie froide ;
  - (Ventilo-convecteurs) : Etudier la mise en place de zones d'exclusions chauffage/climatisation pour éviter l'utilisation simultanée de la climatisation et du chauffage qui se compensent mutuellement à l'horizon de quelques heures ;
  - (CTA) : Etudier la mise en place d'une intermittence de fonctionnement des CTA qui le permettent (zones à occupation intermittente) ;
  - (CTA) : Améliorer la régulation pour éviter l'utilisation simultanée de la climatisation et du chauffage qui se compensent parfois mutuellement à l'horizon de quelques heures ;
  - (CTA) : Améliorer la gestion du bypass des échangeurs à plaque qui se produit beaucoup trop souvent (pilotage trop raide, potentiellement lié au point précédent) ;
2. Le réseau primaire (Thassalia) n'est pas assez stable en température de livraison ce qui accentue la complexité du couplage entre les régimes primaire/secondaire. Un pompage du débit primaire est par ailleurs observé, sans que l'on puisse affirmer avec certitude qu'il soit provoqué par une régulation trop raide de la V2V primaire. Une mise au point plus poussée du régime primaire est nécessaire pour stabiliser le fonctionnement.
  3. Il faut étudier la possibilité de rehausser le régime primaire Thassalia sur les bords de la saison de climatisation c'est-à-dire hors juin/juillet/août. Cette hausse, même si elle nécessite une augmentation du débit primaire, permettrait d'améliorer le COP de production. Le Golden Tulip étant très exigeant sur l'usage climatisation, il constitue un bon point de repère pour mener le test.
  4. Enfin étudier de plus près le fonctionnement de la V2V secondaire de recyclage (limitation des retours froids) nous semble nécessaire. La donnée GTC relative à cette vanne ne semble pas en adéquation avec son fonctionnement. Il faut s'assurer notamment que cette vanne ne crée pas des phénomènes de pompage des régimes température/débit au secondaire.

### Conclusion générale

Le bâtiment Golden Tulip est un bâtiment potentiellement performant si l'on en juge par les systèmes de climatisation mis en place et la qualité de leur conception et de leur analyse fonctionnelle, sans doute le plus abouti des trois bâtiments étudiés dans le cadre du projet. **Il est pourtant le bâtiment le plus consommateur et les ambiances très fraîches pratiquées en été ne justifient pas à elles seules cette surconsommation.**

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 qui laissent entrer la chaleur solaire l'après-midi.

Les régimes de fonctionnements températures/débits observés en sous-station sont assez proches en moyenne de ceux prévus en conception (plus proches que ceux du bâtiment Calypso) mais justifie la recherche et mise en place de quelques optimisations à même d'améliorer le COP de production du réseau Thassalia, les pompages de régimes observés et les charges énergétiques du bâtiment.

Le sujet principal d'efficacité énergétique relatif à la climatisation du Golden Tulip et à son lien au réseau Thassalia réside toutefois, en premier lieu, dans une meilleure gestion des ambiances et des régulations des unités terminales (CTA, ventilo-convecteurs) **qui permettrait notamment de se passer de climatisation une bonne partie de l'année à iso-confort des occupants.**