



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 Mirabeau 2

Résultats de mesure

Livrable 2.3

mai 2020

rédigé par  **ENERTECH**

Nicolas Andreau 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^{ème} édition.

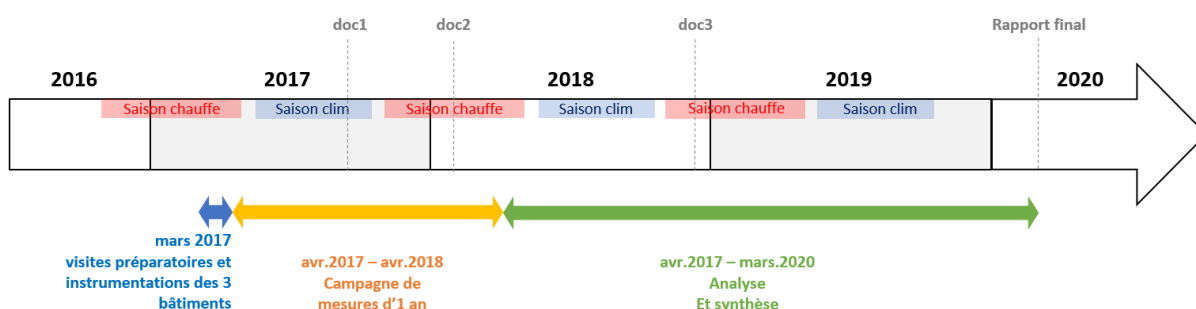
Référent Réunion : Fabien Picgirard fabien.picgirard@ademe.fr 02 67 71 15 46

Référent métropole : Jean-Pierre Harinck jean-pierre.harinck@ademe.fr 04 91 32 84 62

Documents de référence remis en cours de mission

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

Calendrier de la mission



Nomenclature utilisée :

kWh_{ef}	: kilowattheure d' énergie finale . L'énergie finale correspond à l'énergie livrée au poste de consommation (compteur électrique, compteur gaz, compteur réseau chaleur, etc.).
kWh_{él}	: kilowattheure d' énergie électrique = kilowattheure d'énergie finale appliqué à l'énergie électrique.
kWh_{froid}	: kilowattheure d' énergie utile de froid . 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.
kWh_{chal}	: kilowattheure d' énergie utile de chaleur . 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.
kWh_{EP}	: kilowattheure d' énergie primaire . 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

1	Contexte énergétique et objectif du projet SWACOOOL	5
1.1	<i>Contexte</i>	5
1.2	<i>Objectifs.....</i>	8
2	Description du bâtiment MIRABEAU 2	12
2.1	<i>Généralités</i>	12
2.1.1	Le bâtiment	12
2.1.2	Abonnements et maintenance.....	14
2.2	<i>Climatisation et traitement d'air.....</i>	15
2.2.1	Productions de froid.....	15
2.2.2	Distribution et émission	18
2.2.3	Traitement d'air.....	21
3	Description de la campagne de mesures	24
3.1	<i>Capteurs posés par Enertech.....</i>	24
3.1.1	Mesures électriques	24
3.1.2	Mesures de température	26
3.1.3	Mesures de débits	28
3.1.4	Station météo.....	29
3.2	<i>Données GTC</i>	30
4	Résultats de mesure	31
4.1	<i>Caractéristiques de la météo à Marseille.....</i>	31
4.1.1	Résultats mensuels.....	31
4.1.2	Température et hygrométrie	31
4.1.3	Ensoleillement.....	34
4.2	<i>Consommation de froid du bâtiment</i>	35
4.2.1	Variabilité saisonnière	35
4.2.2	Signature énergétique.....	36
4.2.3	Intermittence journalière	39
4.2.4	Puissance appelée	40

4.3	<i>Régimes de températures et débits (production confort)</i>	42
4.3.1	Rappel des régimes attendus	42
4.3.2	Régimes mesurés	42
4.4	<i>COP et consommation électrique des auxiliaires</i>	51
4.4.1	COP production confort	51
4.4.2	COP production informatique	54
4.4.3	Pompes de distribution, ventilo-convecteurs, CTA.....	55
4.5	<i>Gestion des ambiances et des émetteurs</i>	59
4.5.1	Ambiances dans les bureaux.....	59
4.5.2	Gestion des ventilo-convecteurs.....	60
4.5.3	Gestion des CTA.....	62
5	Synthèse et conclusion	65

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 CO₂, contrairement à la situation en métropole (766gCO₂/kWh_{el} à La Réunion contre 37gCO₂/kWh_{el} en métropole) (MEDDE, 2015 et Energies Réunion, 2015). La situation est similaire dans les autres DOM-TOM.

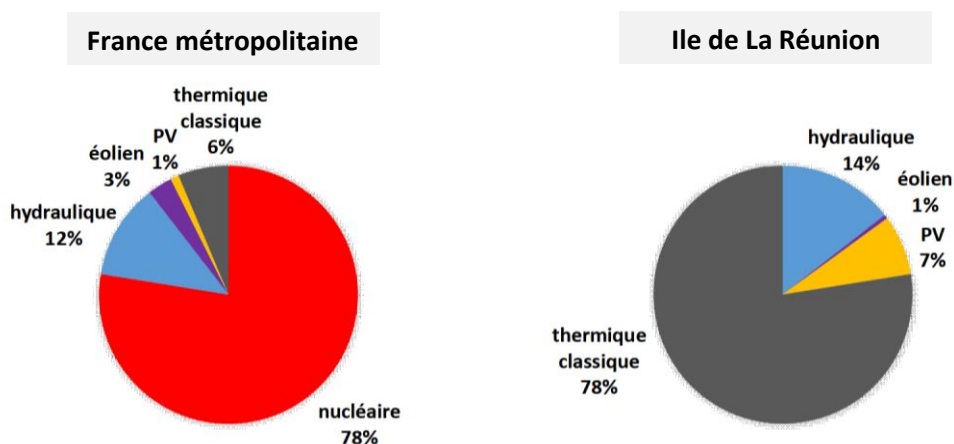


Figure 1 : Origine de l'électricité produite en France métropolitaine et à La Réunion (source des données : MEDDE, 2015 et Energies Réunion, 2015)

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 CO₂ 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_{el} 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_{froid}.

Le SWAC Nord de La Réunion¹ devait être le 1^{er} projet SWAC grande ampleur au niveau mondial (40MW_{froid} à terme) mais a été finalement abandonné. D'autres systèmes de taille

¹ 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_{froid}, mis en service en 2009) ou celui de l’Université de Cornell aux Etats-Unis (71MW_{froid}, mis en service en 2000). D’autres projets sont en préparation (SWAC Sud (CHU St Pierre) à La Réunion, LWAC GLU-GLA à Genève).

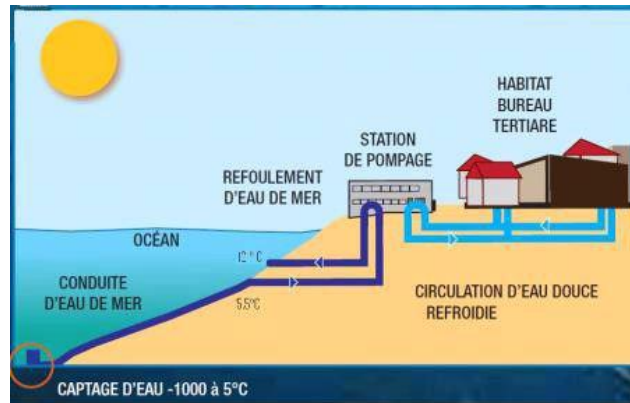


Figure 2 : Schéma de principe d’un réseau SWAC (Sea Water Air Conditioning) (Source : Engie)



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

36MW_{froid} dans un 1^{er} temps, totalisant une production annuelle de l’ordre de 80GWh_{froid} 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_{el} par an (sur les 500GWh_{el} 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 000m² 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).

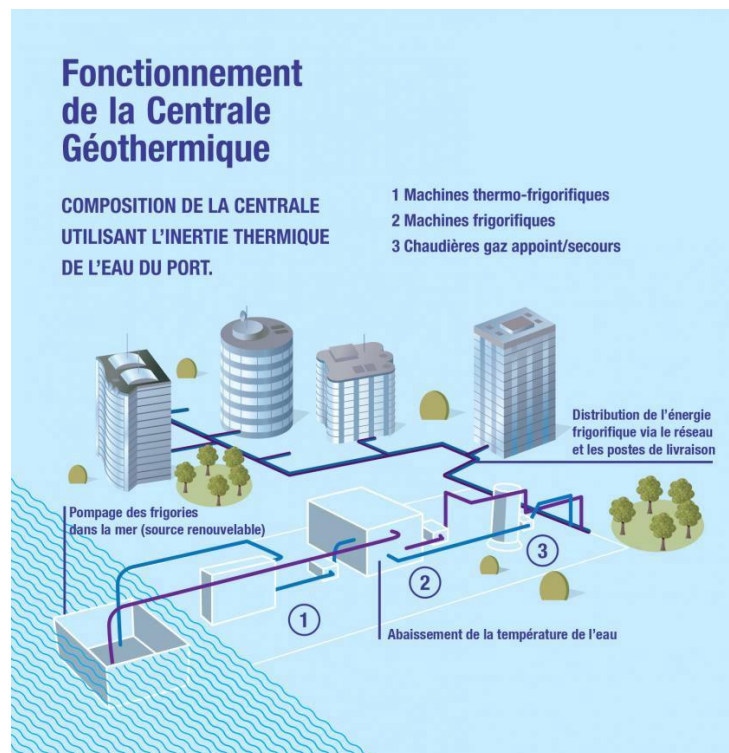


Figure 4 : Schéma de principe simplifié du réseau Thassalia à Marseille (source : Engie).

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 Mirabeau 2.

Ce bâtiment dispose de sa propre production de froid mais envisage dans le futur un raccordement à Thassalia.

2 Description du bâtiment MIRABEAU 2

2.1 Généralités

2.1.1 Le bâtiment

Le bâtiment Mirabeau2 est bâtiment de bureaux en R+11 de 16 780m² datant de 2002. Situé en bordure du boulevard Euroméditerranée à Marseille, il est propriété du CD13 depuis 2009. Il était auparavant le siège de la compagnie maritime CMA-CGM, armateur de porte-conteneurs français et leader mondial du secteur. Cette compagnie occupe aujourd'hui l'immense « tour CMA-CGM » qui jouxte le Mirabeau2. Quelques photographies du bâtiment sont présentées en Figure 5.

Comme le montre le Tableau 1, le bâtiment abrite essentiellement des bureaux et plus ponctuellement des archives, un auditorium, des locaux techniques mais aussi 4 niveaux de parking en sous-sol. Le 2^e étage, abritant à l'origine la cuisine du bâtiment, est aujourd'hui désaffecté car la restauration du site a été délocalisée. Ce niveau, vide d'occupants, ne contient plus que quelques locaux techniques.

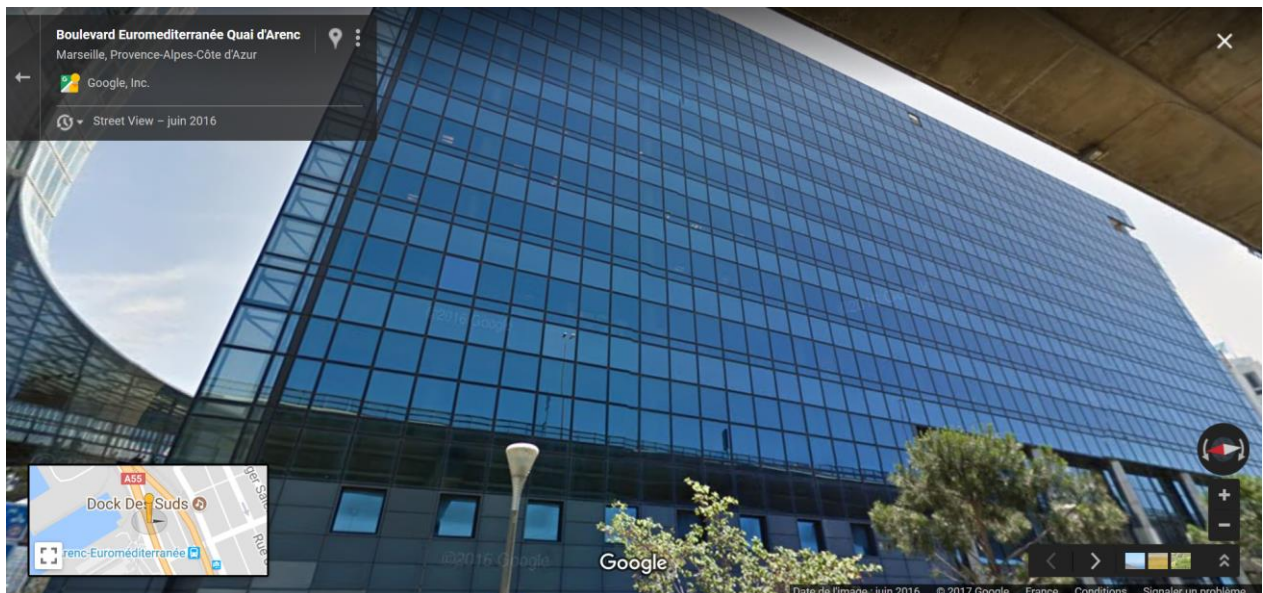




Figure 5 : Situation et vues du bâtiment Mirabeau2 à Marseille (au milieu à droite : aquarium de l'accueil au RDC ; en bas à gauche : bureau et couloir courants ; en bas à droite : local informatique principal abritant les serveurs informatiques du département).

La surface utile du bâtiment se décompose approximativement comme suit (grandeurs « déclaratives ») :

- Bureaux : 10 762m²
- Circulations, escaliers, sanitaires : 2 158 m²
- Niveau R+2 : 2 092m² inoccupé (locaux cuisine désaffectés)
- Archives : 376m²
- Locaux techniques : 1 044m²

Niveau	Nom	Occupation Maximum
RDC-R+1	Hall	63
	Atrium	60
R+2	Conférence	90
	Restaurant	350
R+3	Bureaux	60
R+4	Bureaux	66
R+5	Bureaux	84
R+6	Bureaux	96
R+7	Bureaux	100
R+8	Bureaux	84
R+9	Bureaux	72
R+10	Bureaux	44
R+11	Bureaux	30

Tableau 1 : Agencement fonctionnel des différents étages du Mirabeau2.

2.1.2 Abonnements et maintenance

Le bâtiment dispose d'un abonnement électrique tarif vert avec une puissance souscrite de 1398kVA (Figure 6).



Figure 6 : Installation électrique du site : à gauche les transformateurs, à droite les cellules électriques haute tension.

L'historique des consommations d'électricité du bâtiment est fourni en Figure 7. Le bâtiment a consommé 3031MWh_{él} en 2017 (après un travail de réduction des consommations des équipements CVC mené par le CD13 et Dalkia) ce qui représente 181kWh_{él}/m²/an. Ce ratio de consommation inclut le chauffage (électrique) du site, la climatisation, le traitement d'air et l'ensemble des usages spécifiques de l'électricité.

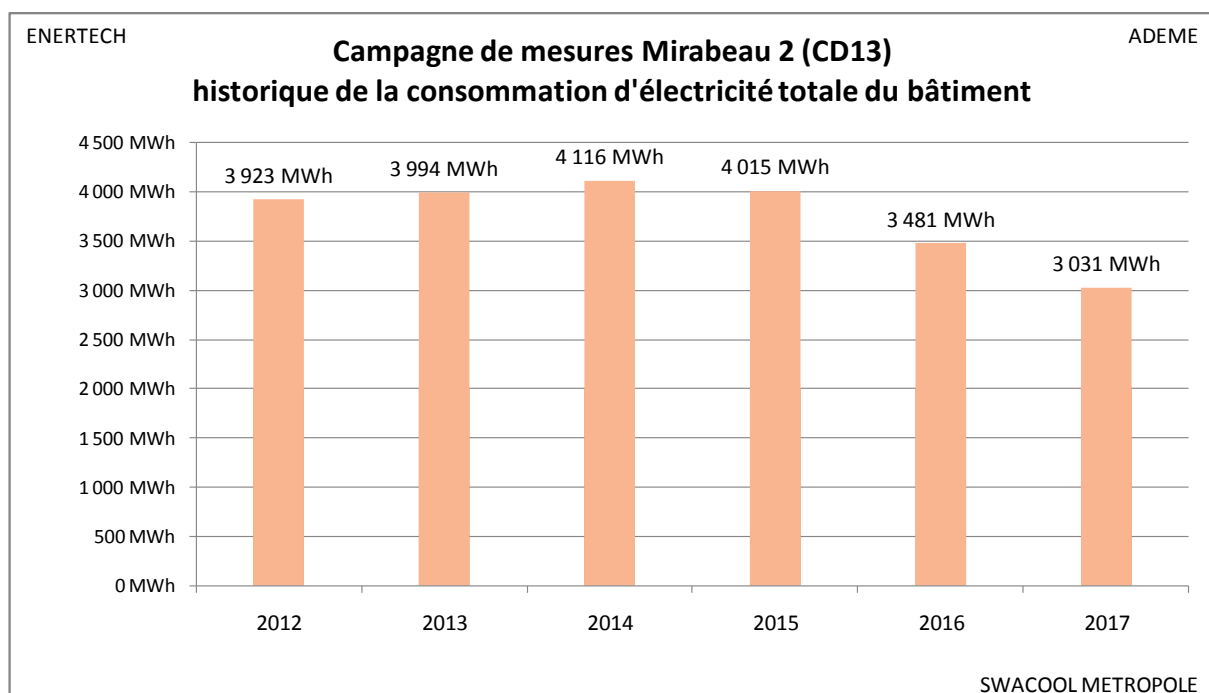


Figure 7 : Historique des consommations d'électricité du Mirabeau2 (données fournies par le CD13).

La maintenance et le pilotage des installations CVC sont réalisés par l'entreprise Dalkia.

2.2 Climatisation et traitement d'air

2.2.1 Productions de froid

Les installations de climatisation du Mirabeau2 comprennent 6 systèmes de production de froid :

1. **Production froid confort** ($3 \times 575 \text{kW}_{\text{froid}}$) : 3 groupes froids à Vis Carrier 30HXC175 (6 paliers de puissance par GF), avec tours de refroidissement adiabatiques alimentant un réseau d'eau glacée (DN250, $250 \text{m}^3/\text{h}$), servant à climatiser les bureaux ;
2. **Production froid informatique** ($2 \times 80 \text{kW}_{\text{froid}}$) : 2 groupes froids Carrier 30-RA-080 alimentant un réseau d'eau glacée (DN65, $27 \text{m}^3/\text{h}$) desservant le local CTI ;
3. **Production froid secours informatique** : 2 groupes froids Hitachi RAS 8AG8E alimentant un réseau d'eau glacée desservant le local CTI ;
4. **Climatisation local onduleur 160kVA** : 1 climatisation à détente directe ;
5. **Climatisation poste SGX** : 1 climatisation à détente directe ;
6. **Climatisation poste Bureaux** : 1 climatisation à détente directe.

Nous nous intéressons plus particulièrement dans ce rapport aux productions principales qui servent à la climatisation des bureaux (production 1) et du local CTI (production 2).

Production « confort » (bureaux)

Cette production d'eau glacée, la plus grosse du site, permet de climatiser des bureaux. Chacun des 3 groupes froids fonctionne avec 2 circuits d'eau (Figure 8, Figure 9, Figure 10) :

- Le circuit d'eau chaude « condenseur » ($30^\circ\text{C}-11.5^\circ\text{C}$) qui évacue les calories vers les tours aéroréfrigérantes (TAR) qui augmentent leur pouvoir rafraîchissant par pulvérisation d'eau (eau utilisée en circuit fermé) ;
- Le circuit d'eau glacée « évaporateur » ($5.5^\circ\text{C}-11.5^\circ\text{C}$) qui achemine les frigories vers un collecteur avec bypass soit l'équivalent d'une bouteille de découplage (Cf. §2.2.2).

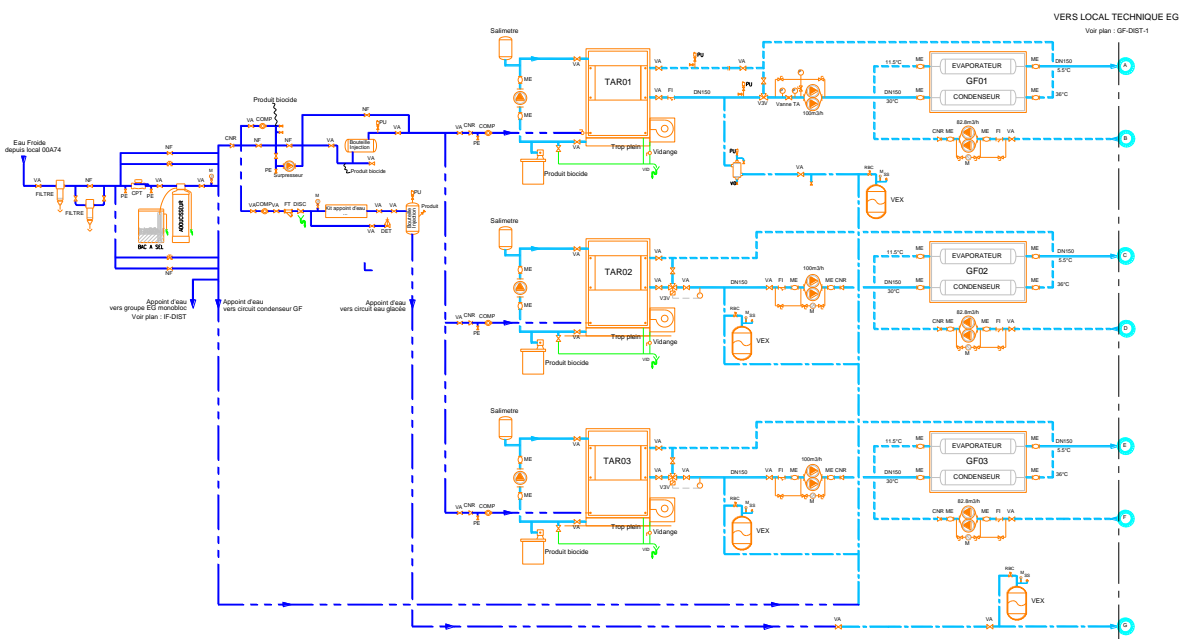


Figure 8 : Schéma de principe de la production d'eau glacée « confort ».



Figure 9 : Production confort 3x575kW_{froid} : groupe froid (haut gauche), tour de refroidissement (haut droite), pompe double d'un circuit condenseur (bas, gauche), pompe double d'un circuit évaporateur (bas, droite).

* Produit	30HXC175-PH3	
Gamma	Performance calculée selon EUROVENT 30HXC Phase3 (Standard)	
Puissance Nette	575	kW
Puissance Absorbée unité	126	kW
Puiss.Abs.Compresseur	120	kW
Puissance Pompe Evap.	2.63	kW
C.O.P.	4.57	
Nombre de paliers de charge	6	
Palier minimum	21	%
Réfrigérant	R134a	
Détendeur	EXV	

* Condenseur		
Fluide	Eau	
Entrée	30	°C
Delta	6	K
Sortie	36	°C
Débit	27.6	L/s
Perte Charge	34	kPa
Encrassement	0.04403	m ² -K/kW
Puissance Pompe	3.12	kW
T.H.R.	692	kW

* Evaporateur		
Fluide	Eau	
Sortie	5.5	°C
Delta	6	K
Entrée	11.5	°C
Débit	23	L/s
Perte Charge Evaporateur	35	kPa
Encrassement	0.04403	m ² -K/kW
Taille connexion eau	141,3	mm
Pression maxi eau	1000	kPa

* Nombre de compresseurs	2
Type des compresseurs	screw
Vitesse moteur compresseurs	49
Type de starter	WYE/DELTA

Figure 10 : Caractéristiques techniques des groupes de la production de froid « confort ».

A noter que nous ne disposons dans cette étude d'aucune analyse fonctionnelle nous permettant de connaître les logiques de fonctionnement des équipements (gestion de la cascade des groupes froids, des régimes de températures, des variateurs de vitesse des pompes, etc.).

Production « informatique » (local CTI = informatique)

Seconde production du site, elle est constituée de deux groupes froids intégrant leur propre aérocondenseur et circulateur d’eau glacée. Un collecteur achemine l’eau glacée vers le local informatique (Figure 11, Figure 12, Figure 13).

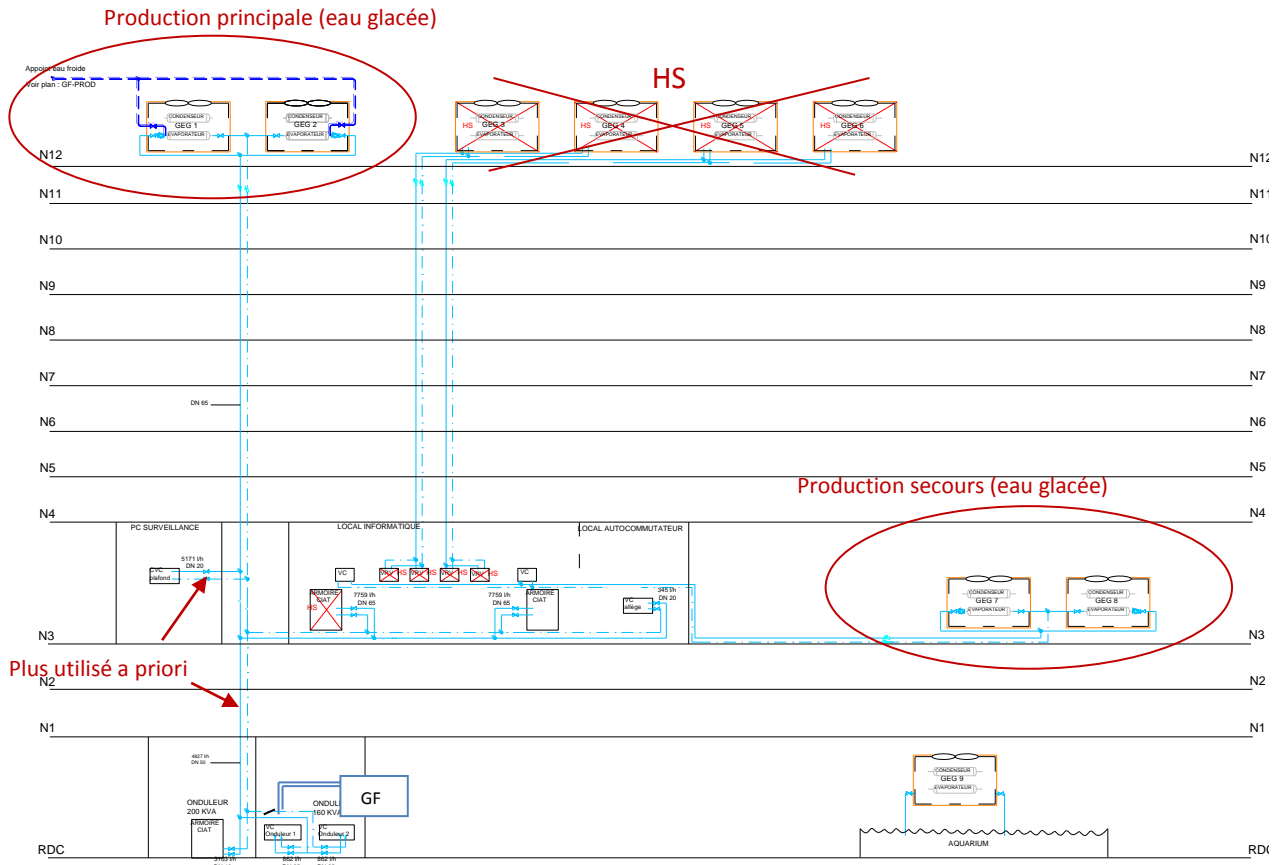


Figure 11 : Synoptique de distribution du froid « informatique ».



Figure 12 : Photographies des groupes de production « informatique » Carrier (eau glacée, 2x80kW_{froid}, toiture) à gauche et des groupes de secours Hitachi (eau glacée, niveau 3) à droite.

* Liste des options sélectionnées :		
Module Hydraulique base pompe simple sans ballon tampon (option pompe double)		
Puissance Nette	80	kW
Puissance Absorbée unité	31.5	kW
Puiss.Abs.Compresseur	28.6	kW
C.O.P.	2.52	
Nombre de paliers de charge	2	
Palier minimum	50	%
Réfrigérant	R407C	
Détendeur	TXV	
* Evaporateur		
Fluide	Eau	
Sortie	7	°C
Delta	5	K
Entrée	12	°C
Débit	3.81	L/s
Perte Charge Evaporateur	29	kPa
Pression Disponible	104	kPa
Encrassement	0.04403	m ² -K/kW
Taille connexion eau	2" gas thread (male conic)	
Pression maxi eau	300	kPa
* Condenseur		
Air	34	°C
Altitude	0	m
T.H.R.	107	kW
* Nombre de compresseurs		
Type des compresseurs	2	
Type des compresseurs	hermetic scroll	
Vitesse moteur compresseurs	48.3	r/s
Type de starter	Direct	

Figure 13 : Caractéristiques techniques des groupes de la production de froid « informatique » en toiture.

2.2.2 Distribution et émission

Distribution (confort)

Le schéma de principe de la distribution est présenté en Figure 14. Le local technique se trouve en toiture du bâtiment.

Deux collecteurs assurent le lien entre la production et la distribution. Un bypass central de gros diamètre entre les deux collecteurs permet de gérer le déséquilibre éventuel des débits (si le débit est supérieur au primaire il y a un recyclage partiel au primaire et vice-versa au secondaire). Si les débits sont équilibrés, les régimes de température sont identiques au primaire et au secondaire (théoriquement départ à 6°C, retour à 11°C).

Ce bypass dans le collecteur permet d'envisager un fonctionnement hydraulique proche de celui d'une bouteille de découplage.

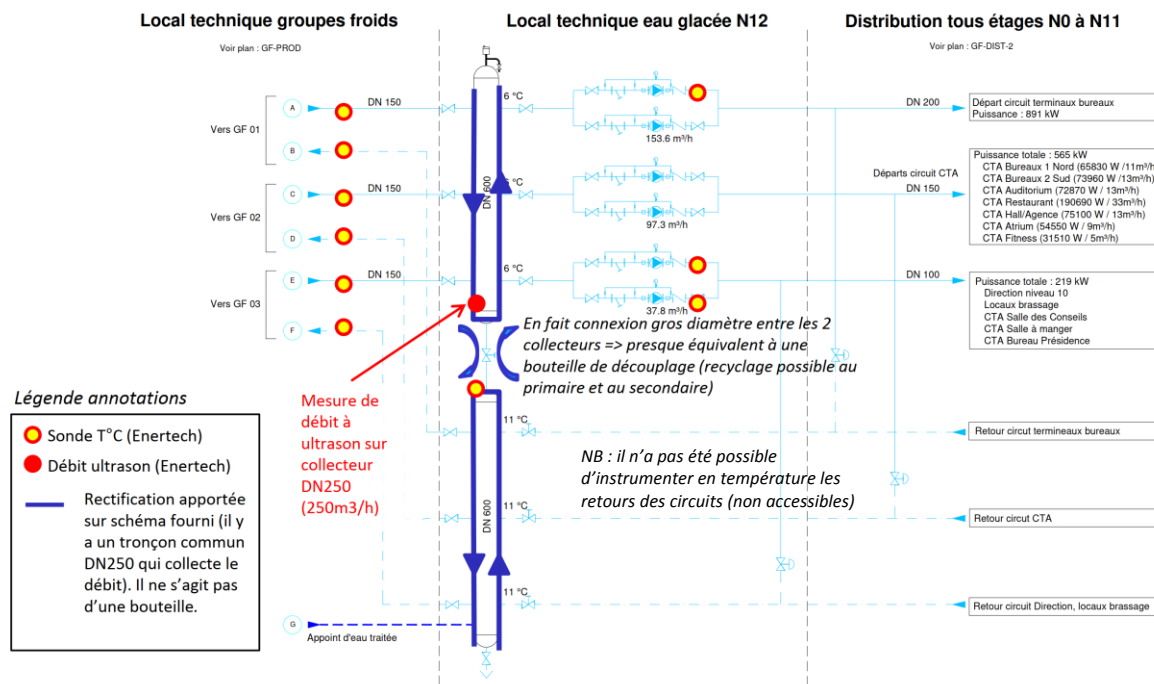


Figure 14 : Schéma de principe de la distribution du réseau d'eau glacée « confort », annoté dans le cadre du projet. L'instrumentation réalisée dans le cadre du projet est indiquée sur le schéma (détail en §3.1.23.1).

Trois circuits d'eau glacée desservent le bâtiment à l'aide de pompes à variation de vitesse intégrée (Figure 14, Figure 15) :

- **Le circuit principal « bureaux »** (puissance nominale du circuit **891kW_{froid}**, débit théorique 153.6m³/h, HMT théorique 9mCE, pompe double KSB Etaline HD 125-160) ;
- **Le circuit « CTA »** qui alimente les batteries froides sur V2V des CTA (puissance nominale du circuit **565kW_{froid}**, débit théorique 97.3m³/h, HMT théorique 16mCE, pompe double KSB Etaline HD 100-200) ;
- **Le circuit « direction »** qui alimente les CTA et émetteurs du niveau 10 (puissance nominale du circuit **219kW_{froid}**, débit théorique 37.8m³/h, HMT théorique 12.5mCE, pompe double KSB Etaline HD 65-160).

La somme des débits à puissance nominale est donc de 289m³/h (soit 1675kW_{froid} = 3x558kW_{froid}), légèrement supérieure à la somme théorique des débits primaires (Cf. Figure 8 : débit primaire = 3x 82.8m³/h = 248m³/h).

Des soupapes de décharge permettent le recyclage du débit en cas de fermeture d'un grand nombre d'émetteurs, l'ensemble des batteries froides de ces derniers étant pilotées par des vannes deux voies.

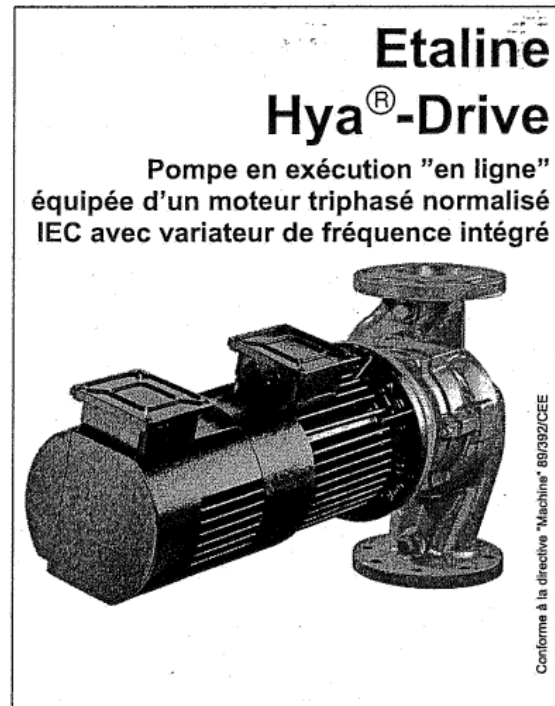


Figure 15 : Pompes de distribution d'eau glacée (KSB Etaline avec variateur de fréquence intégré).

Emission de froid

Ventilo-convecteurs (confort)

La climatisation dans les bureaux est réalisée par des ventilo-convecteurs Carrier (42 EL Aqualia) « 2 tubes 2 fils » disposant d'un moto ventilateur multi vitesse, d'une batterie d'eau glacée et une résistance électrique pour le chauffage.



Les batteries d'eau glacée sont gérées par des **vanne deux-voies tout ou rien (T.O.R)**. L'air est soufflé dans les bureaux et repris en vrac dans les circulations. L'air soufflé contient une partie d'air neuf car les réseaux de soufflage des CTA sont gainés sur les ventilo-convecteurs. La consigne de température ambiante est imposée par GTC (22°C en hiver, 24°C en été), l'utilisateur disposant d'une molette pour déroger à ces valeurs de $\pm 2/3^\circ\text{C}$. Le ventilateur est soit géré en manuel (vitesse 1 à 3) soit en « auto », c'est-à-dire adaptant automatiquement sa vitesse en fonction de l'écart entre consigne et ambiance.

D'après la documentation technique les puissances électriques des ventilateurs sont de $0.012W_{\text{elec}}/W_{\text{froid}}$ (ventilateur tangentiel) à $0.025W_{\text{elec}}/W_{\text{froid}}$ (ventilateur centrifuge). Nous ne savons quel est le type de ventilateur utilisé au Mirabeau2 mais il pourrait s'agir du ventilateur centrifuge car il supporte des pressions statiques plus élevées (nécessaire car la ventilation est gainée sur les ventilo-convecteurs). Le bâtiment disposerait d'environ 500 ventilo-convecteur selon l'agent technique.

CTA (confort)

Chaque CTA du site dispose d'une batterie froide hydraulique pour le rafraîchissement de l'air soufflé et d'une batterie chaude électrique pour le préchauffage. Les batteries sont pilotées par des vannes deux-voies qui permettent de respecter une consigne d'air soufflé (10°C dans les DOE).

Les centrales d'air qui réalisent extraction et soufflage disposent d'un récupérateur de chaleur hydraulique (circuit d'eau glycolé en boucle fermé qui tourne sur deux batteries d'échange).



Armoires de climatisation (informatique)

La climatisation du local informatique (production de froid « informatique ») est assurée par deux armoires de climatisation CIAT d'une puissance unitaire de 20kW_{froid}, alimentées en eau glacée.

Lors de la campagne une seule armoire était en service. Un projet en cours visait à supprimer la climatisation du local pour passer en ventilation naturelle.



2.2.3 Traitement d'air

Le traitement d'air du bâtiment est assuré par des CTA simple et double flux et des extracteurs simple flux. Les CTA sont toutes pourvues de batteries froides sur vannes deux-voies et de batteries chaudes électriques. Les CTA double flux disposent d'un récupérateur de chaleur hydraulique (batteries en eau glycolée entre l'air repris et l'air soufflé).

Le débit ventilé total (théorique) du bâtiment est de 106 125m³/h au soufflage et 94 180m³/h à l'extraction (Tableau 2).

La zone bureau est gérée par deux grosses CTA double flux totalisant 29 500m³/h et quelques extracteurs (synoptique en Figure 16).

Les autres zones disposent de CTA double flux et simple flux ainsi que de quelques extracteurs (synoptique en Figure 17).

Les températures de consigne des ventilo-convecteurs étant gérées depuis la GTC, nous pouvons supposer qu'il en est de même pour les consignes de température de soufflage des CTA.

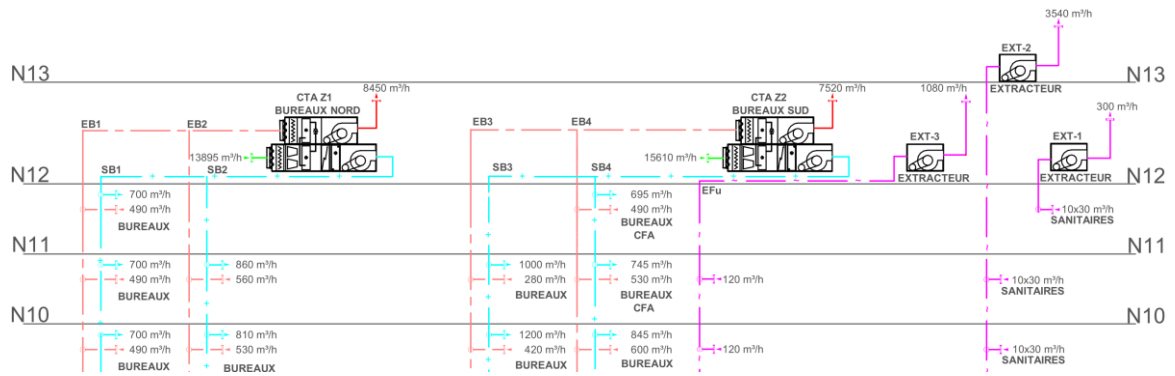


Figure 16 : Synoptique du traitement d'air des bureaux.

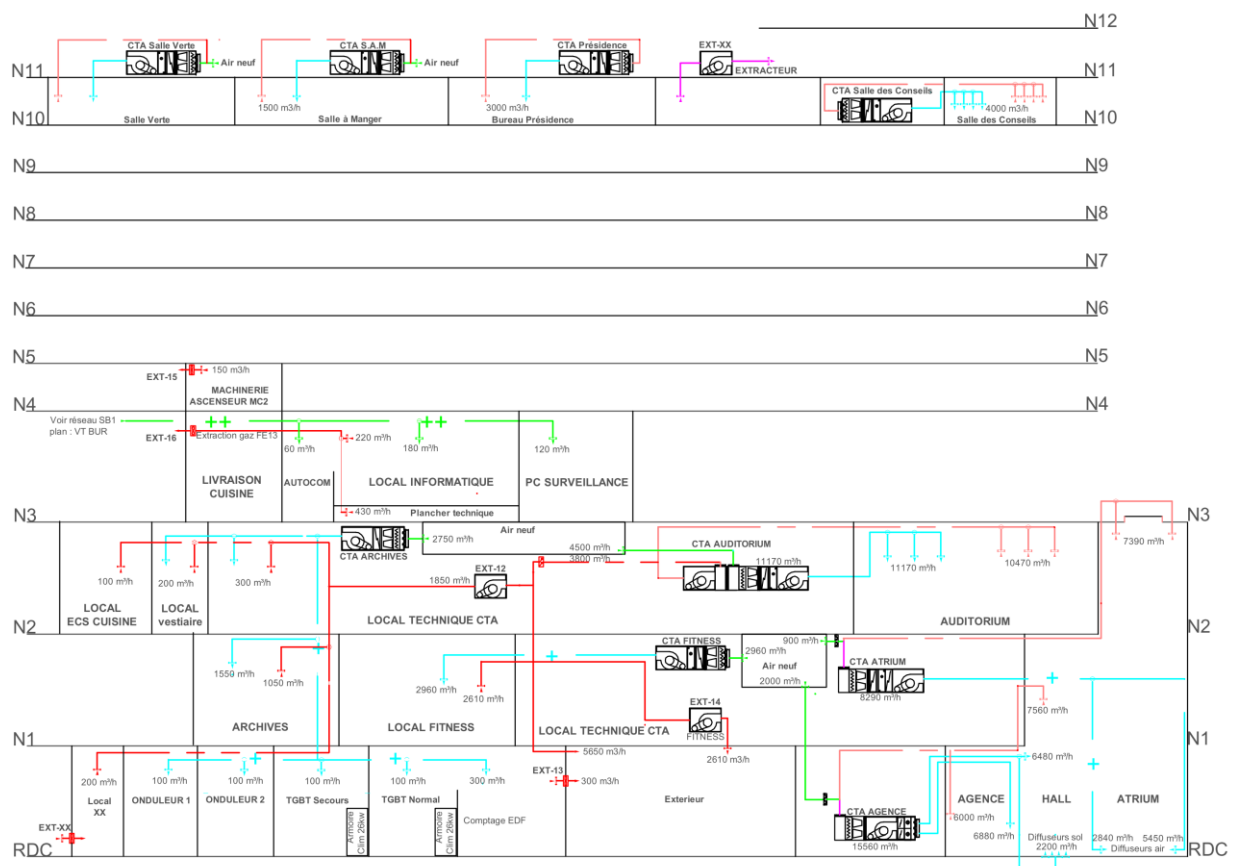


Figure 17 : Synoptique du traitement d'air des locaux hors bureaux.

SF= simple flux ;
 DF=double flux avec récupération
 SO = sans objet

	Type	Locaux desservis	Débit	
			Soufflage	Extraction
CTA bureaux Nord	DF	Bureaux	13895 m ³ /h	8450 m ³ /h
CTA bureaux Sud	DF	Bureaux	15610 m ³ /h	7520 m ³ /h
CTA Salle verte	DF	Salle verte	Pas d'info	Pas d'info
CTA salle à manger	DF	Salle à manger étage 10ème	1500 m ³ /h	1500 m ³ /h
Bureau présidence	DF	Bureaux présidence	3000 m ³ /h	3000 m ³ /h

Salle du conseil	DF	Salle du conseil	4000 m3/h	4000 m3/h
CTA archives	SF	Archives	2750 m3/h	SO
CTA auditorium	DF	Auditorium	11170 m3/h	10470 m3/h
CTA fitness	SF	Salle fitness	2960 m3/h	SO
CTA atrium	DF	Atrium	8290 m3/h	7390 m3/h
CTA agence	DF	Agence	15560 m3/h	13560 m3/h
CTA restaurant	SF	Soufflage compensation restaurant	18500 m3/h	SO
CTA cuisine	SF	Soufflage compensation cuisine	8890 m3/h	SO
Extracteur 1	SF	Sanitaires	SO	300 m3/h
Extracteur 2	SF	Sanitaires	SO	3540 m3/h
Extracteur 3	SF	Sanitaires	SO	1080 m3/h
Extracteur 3 cuisine	SF	Cuisine	SO	380 m3/h
Extracteur 5	SF	Cuisine	SO	1030 m3/h
Extracteur 6	SF	Cuisine	SO	8000 m3/h
Extracteur 7	SF	Cuisine	SO	6500 m3/h
Extracteur 8	SF	Cuisine	SO	6000 m3/h
Extracteur 9	SF	Cuisine	SO	3000 m3/h
Extracteur 10	SF	Cuisine	SO	3000 m3/h
Extracteur 11	SF	Cuisine	SO	800 m3/h
Extracteur 12	SF	Archives / auditorium	SO	1850 m3/h
Extracteur 14	SF	Fitness	SO	2810 m3/h
Total			106 125 m3/h	94 180 m3/h

Tableau 2 : Débits des CTA et extracteurs du bâtiment Mirabeau2.



Figure 18 : Photographies de quelques CTA. De haut en bas et de gauche à droite : CTA bureaux sud, CTA salle verte, CTA Fitness et CTA Agence.

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 201 points de mesures ont été installés et ont enregistré pendant un an au pas de temps de 10 minutes.** Nous les détaillons ici.

3.1.1 Mesures électriques

Ces mesures sont effectuées directement dans les tableaux électriques concernés à l'aide du système multivoie (MV). Ce système effectue une prise de tension dans le tableau puis chaque départ suivi fait l'objet d'une mesure de courant à l'aide d'une pince ampèremétrique. Le système calcule alors la puissance électrique moyenne du départ toutes les 10 minutes. La liste des 103 départs suivis (unités de production de climatisation, CTA, auxiliaires de climatisation) est indiquée dans le Tableau 3. Tous ces capteurs ont été déposés en fin de campagne.

Local	Libellé	type
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 100kVA L1	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 100kVA L2	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 100kVA L3	MV
TGBT Secours	Alim Clim poste Bureaux L1	MV
TGBT Secours	Alim Clim poste Bureaux L2	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 200kVA L3 (armoire froide)	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 200kVA L1	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 200kVA L2	MV
TGBT Secours	Alim Clim poste SGX L1	MV
TGBT Secours	Alim Clim poste SGX L2	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 160kVA 1 L1 (Hitachi)	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 160kVA 1 L2 (Hitachi)	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 160kVA 1 L3 (Hitachi)	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 160kVA 2 L1 (Hitachi)	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 160kVA 2 L2 (Hitachi)	MV
TGBT Secours	Alim Clim local Ondulé 160kVA 2 L3 (Hitachi)	MV
TGBT Secours	Alim clim CTI L1	MV
TGBT Secours	Alim clim CTI L2	MV
TGBT Secours	Alim clim CTI L3	MV
TGBT Secours	multiclip L1	MV
TGBT Secours	multiclip L2	MV
TGBT Secours	multiclip L3	MV
Armoire CTA Zone 2	Moteur soufflage L1	MV
Armoire CTA Zone 2	Moteur extraction L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 1 PV L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 1 GV L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 1 Pompe L1	MV

Armoire Tour Refroidissement	T.F. 1 Thermo L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 2 PV L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 2 GV L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 2 Pompe L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 2 Thermo L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 3 PV L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F.3 GV L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 3 Pompe L1	MV
Armoire Tour Refroidissement	T.F. 3 Thermo L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Pompe 1 circuit CTA L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Pompe 2 circuit CTA L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Pompe 1 circuit Bureaux L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Pompe 2 circuit Bureaux L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Pompe 1 circuit Direction L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Pompe 2 circuit Direction L1	MV
Armoire LT Pompe EG	Général Armoire L1 1	MV
Armoire LT Pompe EG	Général Armoire L1 2	MV
Armoire LT Pompe EG	Général Armoire L2 1	MV
Armoire LT Pompe EG	Général Armoire L2 2	MV
Armoire LT Pompe EG	Général Armoire L3 1	MV
Armoire LT Pompe EG	Général Armoire L3 2	MV
Armoire CTA Zone 1	Moteur soufflage L1	MV
Armoire CTA Zone 1	Moteur soufflage L2	MV
Armoire CTA Zone 1	Moteur soufflage L3	MV
Armoire CTA Zone 1	Moteur extraction L1	MV
Armoire CTA Zone 1	Moteur extraction L2	MV
Armoire CTA Zone 1	Moteur extraction L3	MV
TD CTA R+10	CTA présidence PV L1	MV
TD CTA R+10	CTA présidence GV L1	MV
TD CTA R+10	CTA présidence batterie L1	MV
TD CTA R+10	CTA SaM PV L1	MV
TD CTA R+10	CTA SaM GV L1	MV
TD CTA R+10	CTA SaM batterie L1	MV
TD CTA R+10	CTA salle verte moteur L1	MV
TD CTA R+10	CTA salle verte résistance fixe L1	MV
TD CTA R+10	CTA salle verte résistance variableL1	MV
TD CTA R+2	CTA Conférence soufflage PV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Conférence soufflage GV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Conférence extraction PV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Conférence extraction GV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Restaurant PV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Restaurant GV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Cuisine PV L1	MV
TD CTA R+2	CTA Cuisine GV L1	MV
TD CTA R+2	CTA soufflage Archive L1	MV
TD CTA R+2	CTA extraction Archive L1	MV
TD local info	Alim Clim 1 salle CTI L1 (uniquement ventilation) disj à l'arret	MV
TD local info	Alim Groupe Froid 1 L1 (carrier)	MV
TD local info	Alim Clim 2 salle CTI L1 (uniquement ventilation) mauvaise phase voir tableau	MV

TD local info	Alim Groupe Froid 2 L1 (carrier)	MV
TGBT	Alim CTA Hall L3	MV
TGBT	Alim GF 3 L2	MV
TGBT	Alim GF 3 L3	MV
TGBT	Alim GF 1 L1	MV
TGBT	Alim GF 1 L2	MV
TGBT	Alim GF 2 L1	MV
TGBT	Alim GF 2 L2	MV
TGBT	Alim CTA fitness et atrium L2	MV
TGBT	Alim CTA fitness et atrium L3	MV
R+7 "terminal"	Général VC 1 L1	MV
R+7 "terminal"	Général VC 1 L2	MV
R+7 "terminal"	Général VC 1 L3	MV
R+7 "terminal"	Général VC 2 L1	MV
R+7 "terminal"	Général VC 2 L2	MV
R+7 "terminal"	Général VC 2 L3	MV
R+7 "terminal"	Général VC 3 L1	MV
R+7 "terminal"	Général VC 3 L2	MV
R+7 "terminal"	Général VC 3 L3	MV
R+7 "terminal"	Général VC 4 L1	MV
R+7 "terminal"	Général VC 4 L2	MV
R+7 "terminal"	Général VC 4 L3	MV
R+10	CE CTA salle des conseils L1	MV
R+10	CE CTA salle des conseils L2	MV
R+10	CE CTA salle des conseils L3	MV
R+10	CE CTA présidence L1	MV
R+10	CE CTA présidence L2	MV
R+10	CE CTA présidence L3	MV
Niv0 parking local CTA	CE CTA Agence L1	MV
Niv0 parking local CTA	D2 bat Elec L1	MV
Niv0 parking local CTA	D3 bat Elec L1	MV
Niv0 parking local CTA	Coffret Hall L1	MV
Niv0 parking local CTA	Coffret atrium L1	MV
Bureau 07B81	Alim Ventilateur convecteur	PM
Bureau 07A75	Alim Ventilateur convecteur	PM
Bureau 07A46	Alim Ventilateur convecteur	PM
Bureau 07B44	Alim Ventilateur convecteur	PM

Tableau 3 : Liste des départs électriques instrumentés par Enertech sur le bâtiment Mirabeau2.

3.1.2 Mesures de température

Des capteurs de température ont été installés dans le bâtiment. Il s'agit soit de températures techniques (TM) soit de températures ou températures + hygrométries d'ambiance (TM ou HM). Ces capteurs enregistrent au pas de temps de 10 minutes. La liste des 90 points de mesure effectués est indiquée dans le Tableau 4. Tous ces capteurs ont été déposés en fin de campagne.

Local	Libellé	type
R+2 local CTA	T°C air soufflé salle réunion Arenc	TM

R+2 local CTA	T°C air soufflé salle réunion Joliette	TM
R+2 local CTA	T°C air soufflé salle réunion Estaque	TM
R+2 "terminal"	T°C ambiante salle réunion Arenc	HM
R+2 "terminal"	T°C ambiante salle réunion Joliette	HM
R+2 "terminal"	T°C ambiante salle réunion Estaque	TM
Toiture	T°C air soufflé CTA zone nord	TM
Toiture	T°C air extrait CTA zone nord	TM
Toiture	T°C air soufflé CTA zone sud	TM
Toiture	T°C air extrait CTA zone sud	TM
R+11 côté Ouest	T°C air soufflé CTA présidence	TM
R+11 côté Ouest	T°C air extrait CTA présidence	TM
R+11 côté Ouest	T°C air soufflé CTA SaM présidence	TM
R+11 côté Ouest	T°C air extrait CTA SaM présidence	TM
R+11 côté Ouest	T°C air soufflé CTA salle verte	TM
R+11 côté Ouest	T°C air extrait CTA salle verte	TM
R+10	T°C air soufflé CTA salle des conseils	TM
R+10	T°C air extrait CTA salle des conseils	TM
R+3 salle info	T°C soufflage unité CiAT	TM
R+3 salle info	T°C ambiante	TM
R+2 local CTA	T°C air soufflé CTA conférence	TM
R+2 local CTA	T°C air extrait CTA conférence	TM
R+2 local CTA	T°C air soufflé CTA RESTO réseau principal	TM
R+2 local CTA	T°C air soufflé CTA RESTO réseau 2A	TM
R+2 local CTA	T°C air soufflé CTA RESTO réseau 2B	TM
R+2 local CTA	T°C air soufflé CTA RESTO réseau 3C	TM
R+1	T°C air soufflé CTA Fitness	TM
R+1	T°C air extrait CTA Fitness	TM
R+1	T°C air soufflé CTA Atrium	TM
R+1	T°C air extrait CTA Atrium	TM
Niv0 parking local CTA	T°C air soufflé CTA Hall	TM
Niv0 parking local CTA	T°C air extrait CTA Hall et agence	TM
Niv0 parking local CTA	T°C air soufflé CTA Agence	TM
Niv0 parking local CTA	T°C air soufflé cuisine zone 1	TM
Niv0 parking local CTA	T°C air soufflé cuisine zone 2	TM
Niv0 local ondul prise courant	T°C ambiante local onduleur	HM
Niv0 local ondul prise courant	T°C air soufflé clim 1	HM
Niv0 local transfo + TGBT bureau	T°C ambiante	HM
Niv0 local transfo + TGBT bureau	T°C soufflage unité CiAT	HM
Local onduleur droite	T°C ambiante	TM
Niv0 TGBT général sg	T°C ambiante	TM
LT Pompe EG	T°C départ circuit direction 2	MVTM
LT Pompe EG	T°C départ circuit direction 1	MVTM
LT Pompe EG	T°C départ circuit bureau 1	TM
LT Pompe EG	T°C départ circuit bureau 1_2	TM
LT Pompe EG	T°C retour EG	MVTM
LT prod 3 GF	T°C Départ Groupe EG 3	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG 3	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ Groupe EG 1	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG 1	TM

LT prod 3 GF	T°C Départ Groupe EG 2	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG 2	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour Groupe EG circuit info	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ chaud EG 3	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour chaud EG 3	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ chaud EG 1	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour chaud EG 1	TM
LT prod 3 GF	T°C Départ chaud EG 2	TM
LT prod 3 GF	T°C Retour chaud EG 2	TM
Bureau 07B81	T°C Ambiante	TM
Bureau 07B81	T°C soufflage	TM
Bureau 07A75	T°C Ambiante	TM
Bureau 07A75	T°C soufflage	TM
Bureau 07A46	T°C Ambiante	TM
Bureau 07A46	T°C soufflage	TM
Bureau 07B44	T°C Ambiante	TM
Bureau 07B44	T°C soufflage	TM
Bureau 09BA82	T°C Ambiante	TM
Bureau 09BA82	T°C soufflage	TM
Bureau 09B84	T°C Ambiante	TM
Bureau 09B84	T°C soufflage	TM
Bureau 09B46	T°C Ambiante	TM
Bureau 09B46	T°C soufflage	TM
Bureau 09A41	T°C Ambiante	TM
Bureau 09A41	T°C soufflage	TM
Bureau 03A38	T°C Ambiante	TM
Bureau 03A38	T°C soufflage	TM
Bureau 03A77	T°C Ambiante	TM
Bureau 03A77	T°C soufflage	TM
Bureau 03A81C	T°C Ambiante	TM
Bureau 03A81C	T°C soufflage	TM
Bureau 04B17	T°C Ambiante	TM
Bureau 04B17	T°C soufflage	TM

Tableau 4 : Liste des capteurs de température/hygrométrie installés par Enertech sur le bâtiment Mirabeau2.

3.1.3 Mesures de débits

Le bâtiment possède deux installations frigorifiques en toiture (Cf. §2.2.1). L'installation principale est utilisée pour le confort des locaux (3 groupes en cascade, collecteur DN250 – 250m³/h – 1725kW_{froid}). La seconde installation est dédiée aux installations informatiques (2 groupes en cascade, collecteur DN65 – 27m³/h – 190kW_{froid}). Ces productions ne comportent aucun comptage de chaleur.

Les délais de travaux proposés par Engie et les réticences (compréhensibles) des différents acteurs devant l'arrêt nécessaire des installations n'ont pas permis d'envisager la pose de compteurs de frigorifiques.

En accord avec l'Ademe et le CD13 il a donc été décidé de poser deux débitmètres à ultrason non intrusifs (marque Fuji Electric type Portaflow-C) sur les collecteurs principaux des deux installations.

Ces appareils ont été installés sur site le 27 mars 2017 en présence du fabricant (Figure 19). Le débit d'eau glacée des deux installations de climatisation a pu être ainsi enregistré au pas de temps de la minute pendant 1 an. Les mesures de températures d'eau glacée aller et retour (Cf. §3.1.2) ont permis de remonter à des énergies utiles de froid produites par les groupes. Les mesures de consommations électriques (Cf. §3.1.1) ont par ailleurs permis de remonter à des COP de production.



Figure 19 : Pose d'un débitmètre à ultrason portatif par Enertech sur le Mirabeau2 (ici production de froid confort).

3.1.4 Station météo

Une station météo communicante a été installée en toiture du bâtiment Mirabeau2. Elle a fourni pendant un an les mesures suivantes au pas de temps de 10 minutes :

- Température de l'air (°C) ;
- Hygrométrie de l'air (%HR) ;

- Irradiation solaire (W/m² sur l'horizontale) ;
- Vitesse du vent (m/s) ;
- Direction du vent (°) ;
- Pluviométrie (mm).

Cette station a produit l'ensemble des données météo du projet, communes aux trois bâtiments étudiés (Calypso, Golden Tulip, Mirabeau2).



Figure 20 : Station météo communicante posée en toiture du Mirabeau2 par Enertech.

3.2 Données GTC

Une GTC est présente sur site, essentiellement pour la gestion des consignes d'ambiances des ventilo-convecteurs. L'agent technique responsable du bâtiment nous a indiqué qu'il n'était pas possible de récupérer de données sur cette GTC.

4 Résultats de mesure

4.1 Caractéristiques de la météo à Marseille

4.1.1 Résultats mensuels

Les résultats mensuels des mesures météorologiques effectués par la station du projet (Cf. §3.1.4) sont présentés dans le Tableau 5.

	Température			Humidité Relative			Humidité absolue (gr. H2O / kg air sec)			Ensoleillement		DJU Clim	DJU Chauff.
	Tmin	Tmoy	Tmax	Hmin	Hmoy	Hmax	Rmin	Rmoy	Rmax	heures >120W/r	Irradiation Horiz	base 18	base 18
avr.-17	7,6°C	15,6°C	25,6°C	23%	60%	99%	3 gr	8 gr	15 gr	254 h	157 kWh/m2	2 dju	60 dju
mai-17	8,2°C	19,3°C	28,2°C	33%	65%	98%	6 gr	11 gr	20 gr	367 h	237 kWh/m2	59 dju	22 dju
juin-17	15,7°C	24,4°C	33,3°C	21%	67%	93%	7 gr	16 gr	25 gr	377 h	256 kWh/m2	190 dju	-
juil.-17	17,5°C	25,2°C	37,1°C	21%	59%	92%	8 gr	15 gr	25 gr	378 h	258 kWh/m2	226 dju	-
août-17	17,5°C	25,2°C	34,7°C	21%	60%	92%	5 gr	15 gr	26 gr	338 h	205 kWh/m2	225 dju	-
sept.-17	12,0°C	19,3°C	28,1°C	35%	67%	96%	7 gr	12 gr	19 gr	289 h	153 kWh/m2	53 dju	9 dju
oct.-17	11,3°C	18,3°C	25,7°C	27%	68%	96%	5 gr	11 gr	20 gr	251 h	112 kWh/m2	34 dju	14 dju
nov.-17	4,7°C	12,0°C	21,0°C	34%	66%	97%	4 gr	7 gr	15 gr	163 h	57 kWh/m2	1 dju	168 dju
déc.-17	0,9°C	8,9°C	16,9°C	44%	74%	99%	3 gr	7 gr	13 gr	113 h	39 kWh/m2	-	278 dju
janv.-18	6,6°C	12,6°C	18,8°C	38%	72%	96%	4 gr	8 gr	12 gr	131 h	45 kWh/m2	-	169 dju
févr.-18	-1,5°C	7,3°C	15,5°C	37%	68%	97%	2 gr	6 gr	11 gr	174 h	69 kWh/m2	-	294 dju
mars-18	2,1°C	11,9°C	18,0°C	28%	71%	97%	3 gr	8 gr	12 gr	265 h	131 kWh/m2	-	186 dju
avr.-18	8,8°C	15,2°C	22,5°C	32%	63%	89%	5 gr	8 gr	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 5 : 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_{clim} qui concentrent en trois mois 80% de la somme des DJU_{clim} annuels.

En termes de DJU_{clim}, 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 21. Ces courbes temporelles permettent de visualiser la saisonnalité de la température avec le pic estival en juin/juillet/août. Une courte période de canicule² est également visible début août.

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 5 : 15 à 16 gr_{H2O}/kg_{airsec} en été avec des pics à 25 grammes contre 7 à 8 gr_{H2O}/kg_{airsec} 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

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

froid (déshumidification de l'air subie au niveau des batteries froides des ventilo-convecteurs).

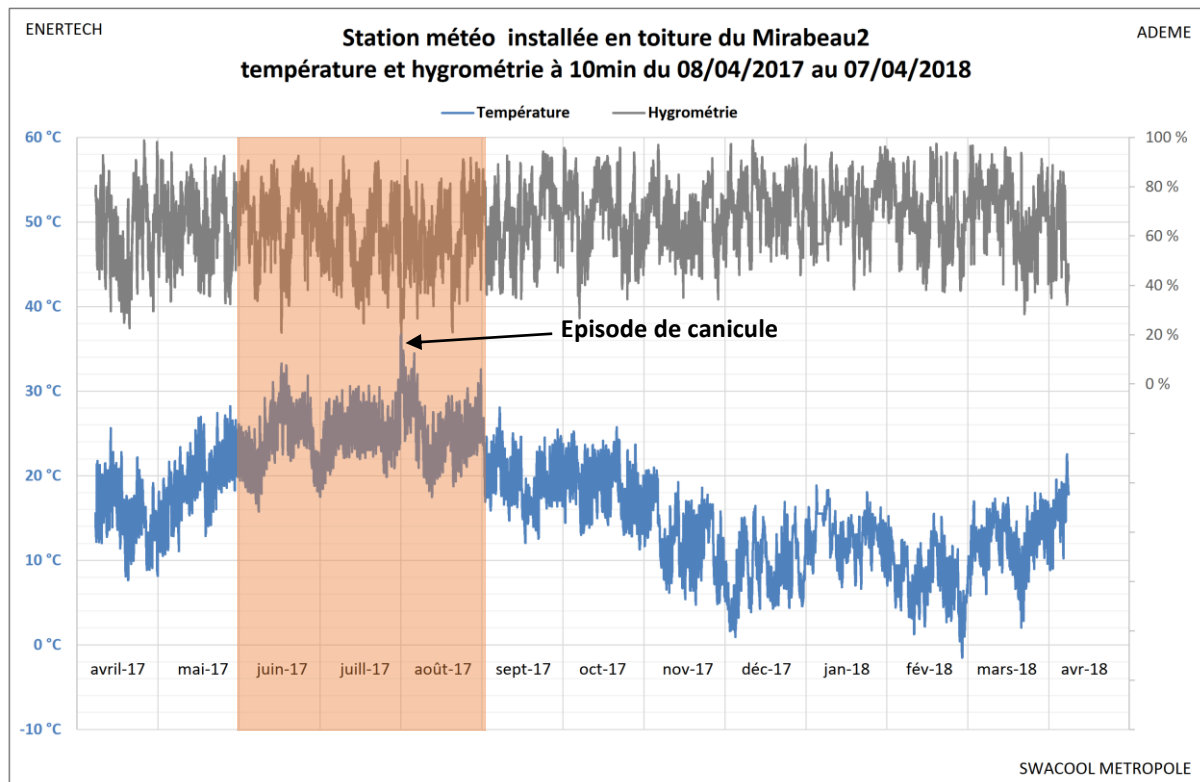


Figure 21 : Température et hygrométrie mesurées par la station météo du projet.

Les deux graphiques suivants (Figure 22 et Figure 23) 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.

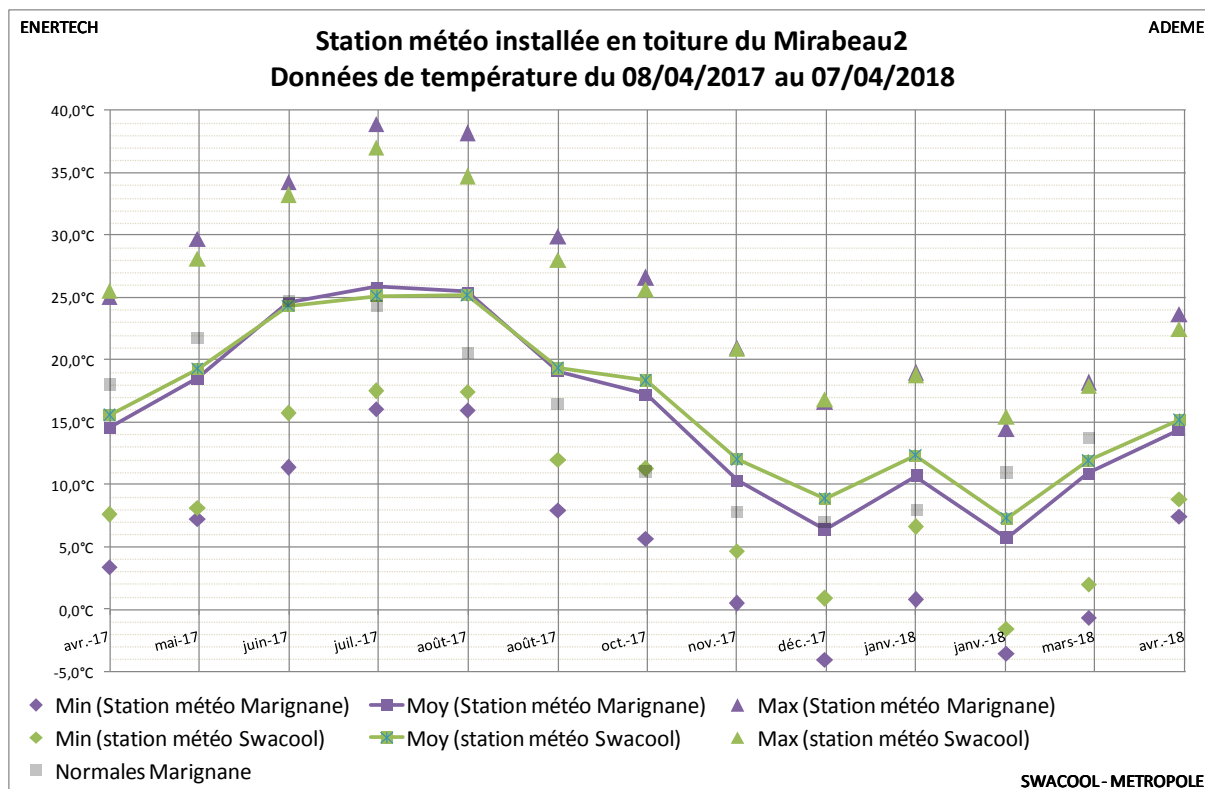


Figure 22 : Températures mensuelles comparées entre la station météo du projet et la station météo de Marignane.

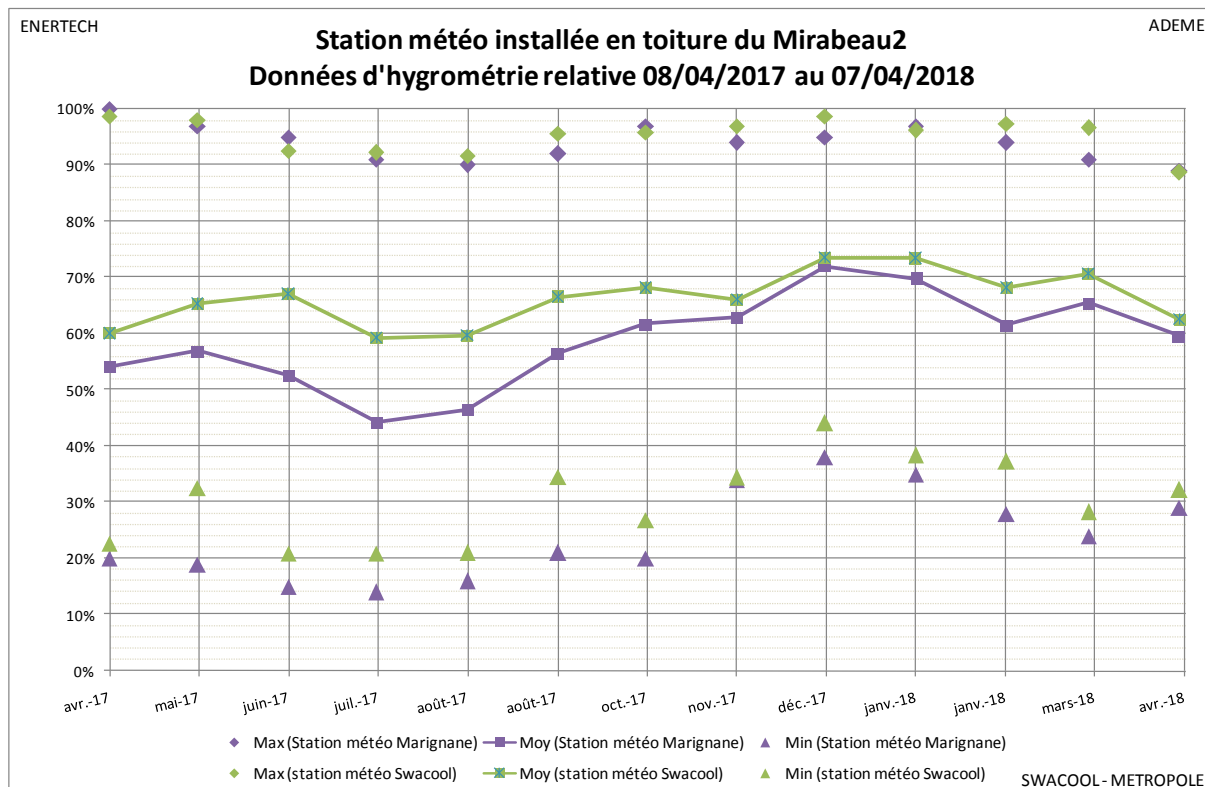


Figure 23 : Hygrométries mensuelles comparées entre la station météo du projet et la station météo de Marignane.

4.1.3 Ensoleillement

L'ensoleillement mesuré est présenté en Figure 24 et Figure 25. D'après la station de Marignane l'ensoleillement de mai à septembre 2017 a été de 6% supérieur à la normale.

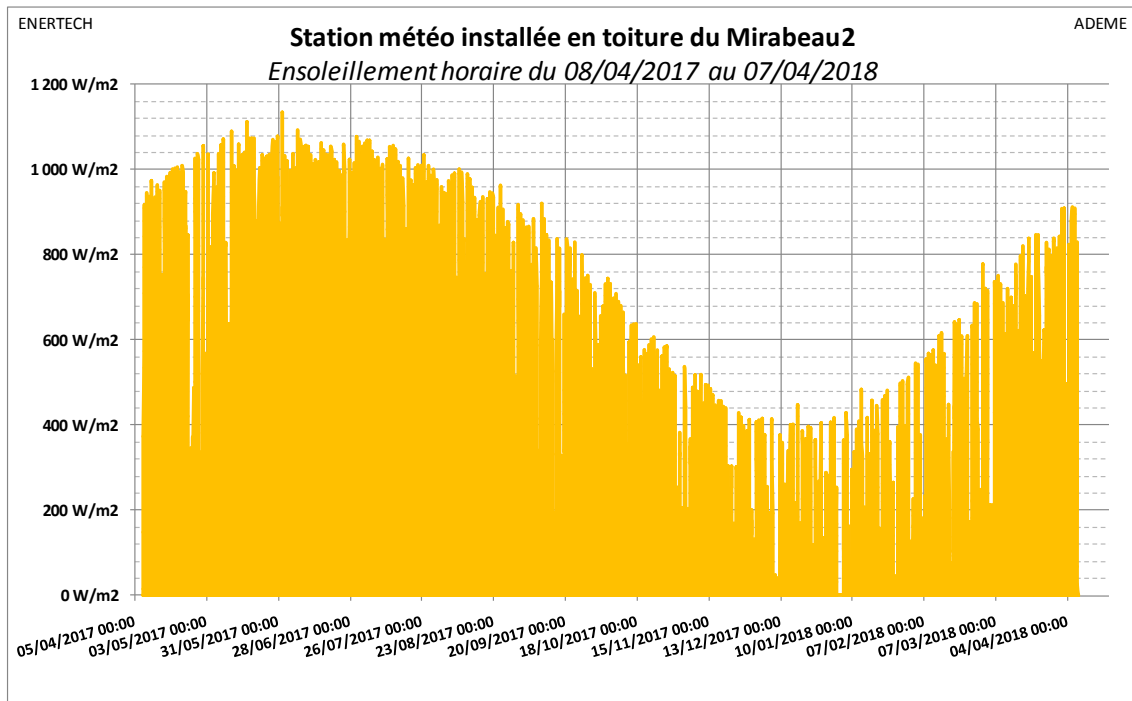


Figure 24 : Irradiation horaire mesurée par la station météo du projet.

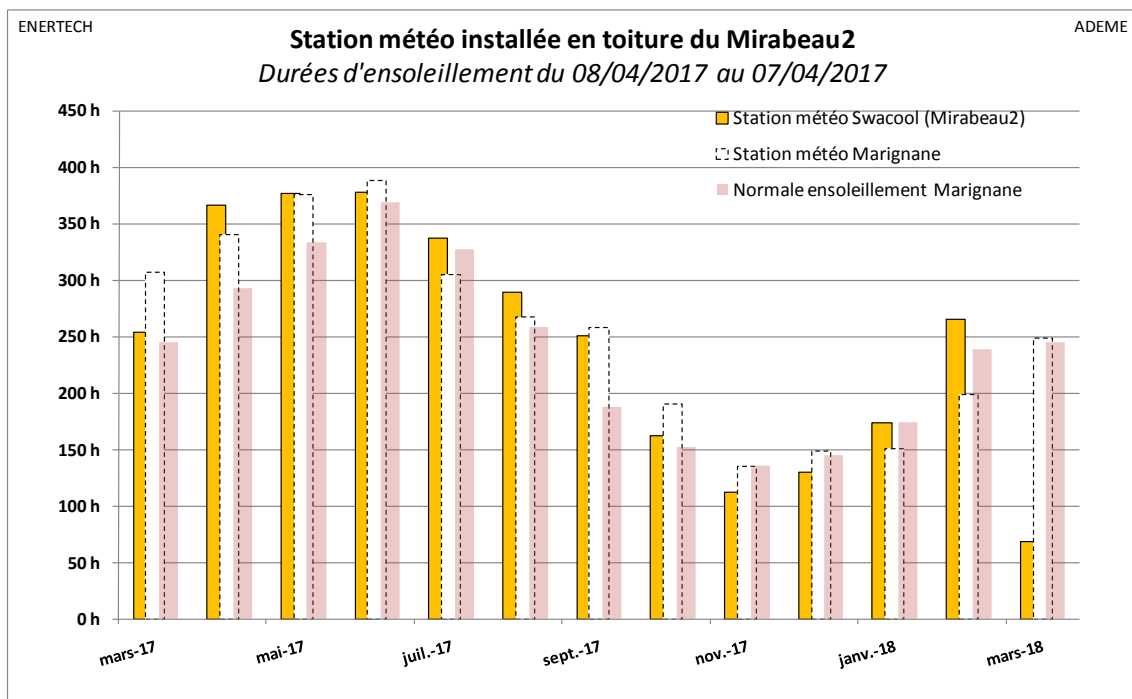


Figure 25 : Durées d'ensoleillement comparées entre la station météo du projet et celle de Marignane (avec normales d'ensoleillement à Marignane).

4.2 Consommation de froid du bâtiment

4.2.1 Variabilité saisonnière

La consommation d'énergie utile de froid du bâtiment est mesurée par comptage non intrusif de frigories sur les deux productions principales (Cf. §3.1.3) et par extrapolation des mesures de consommation électrique pour les productions annexes³.

Le bâtiment Mirabeau2 a consommé 1365MWh_{froid} entre le 8 avril 2017 et le 7 avril 2018 ce qui représente 81.4kWh_{froid}/m²/an. Il s'agit donc d'un bâtiment très consommateur de froid⁴.

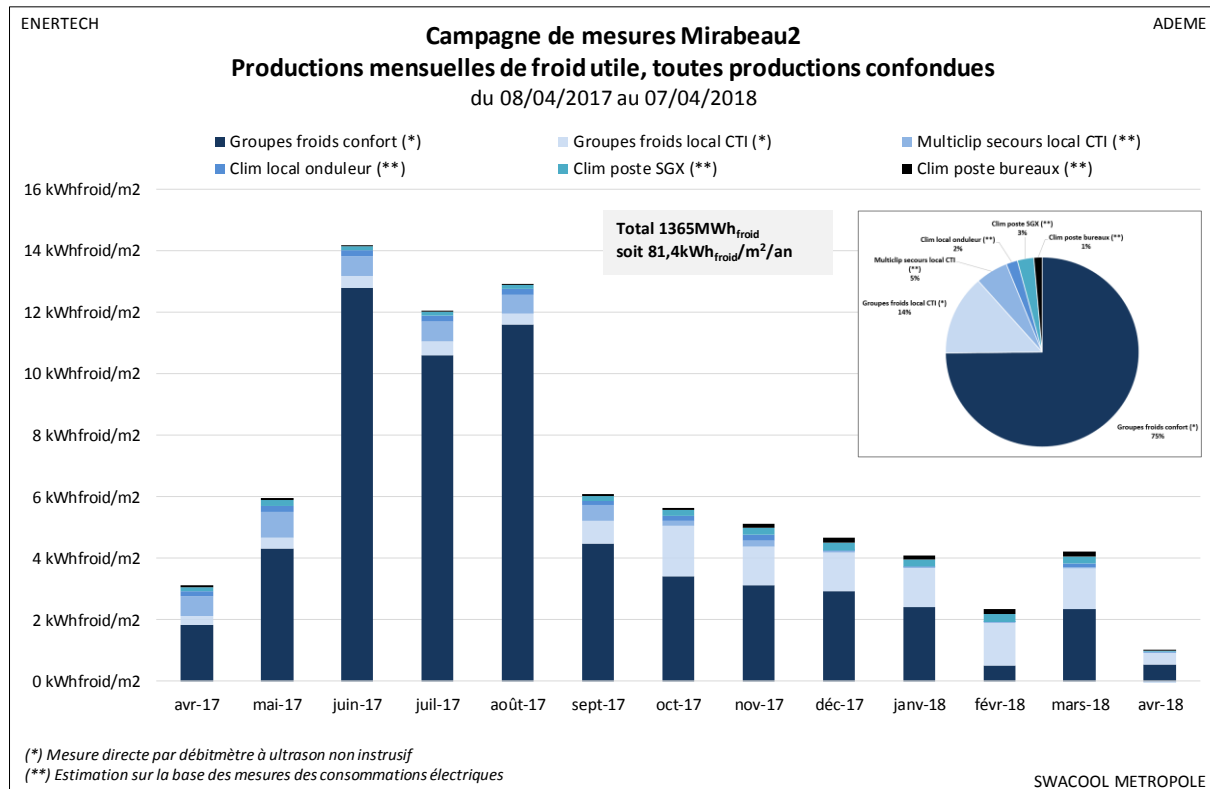
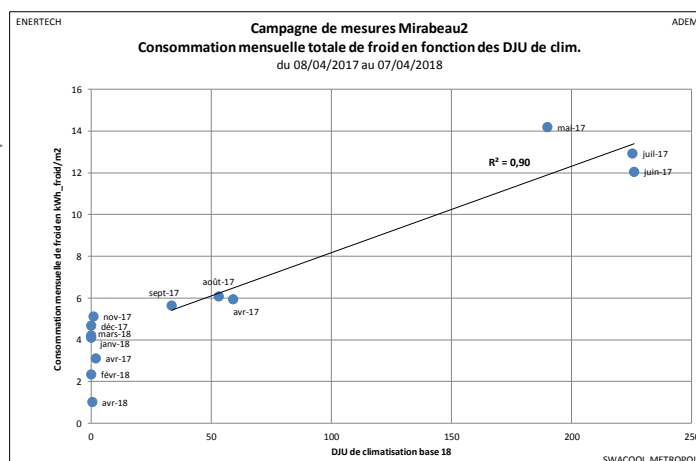


Figure 26 : Consommation mensuelle totale de froid du bâtiment Mirabeau2.

Lien avec la conso. Totale de froid et les DJU clim



³ Hypothèse : $COP_{split} = 3.17 - 0.06 \times T^{\circ}C_{extérieure}$ (rég. lin. du COP mesuré sur la production « informatique »).

⁴ Les bâtiments Calypso et Golden Tulip ont consommé respectivement 19.8 et 88.8kWh_{froid}/m²/an.

La variabilité mensuelle de la consommation est marquée (Figure 26) avec 48% de la consommation réalisée entre le 1^{er} juin et le 31 août 2017. Cette part de consommation estivale est toutefois la plus faible des 3 bâtiments étudiés, ce qui montre surtout que le talon de consommation hivernal sur le Mirabeau2 est plus élevé.

La corrélation des consommations avec les DJU de climatisation (illustré sous le graphique de la Figure 26) montre :

- Une corrélation forte des consommations avec les DJU en dehors du talon hivernal ($R^2=0.90$) ;
- Un talon de consommation hivernal moyen de $3.5\text{kWh}_{\text{froid}}/\text{m}^2/\text{mois}$ qui est le plus élevé des 3 bâtiments étudiés ($0\text{kWh}_{\text{froid}}/\text{m}^2/\text{mois}$ sur le Calypso et $2.4\text{kWh}_{\text{froid}}/\text{m}^2/\text{mois}$ sur le Golden Tulip). Le froid « confort » n'explique toutefois que 57% de ce talon, montrant l'importance des usages « process » dans ce résultat.

Les groupes froids de la production « confort » ont consommé 75% du bilan total de froid utile. On retrouve des consommations « confort » tout au long de l'année ce qui est particulièrement étonnant puisqu'en hiver les températures moyennes journalières se situent entre 2°C et 15°C. La façade vitrée plein ouest expliquerait en partie ce besoin (selon l'agent technique du CD13) mais il n'est pas exclu que les régulations des ventilos-convecteurs et/ou des CTA génèrent des pompages « chaud/froid » au sein d'une même journée, comme cela est observé sur le Golden Tulip.

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.

Production confort

La meilleure corrélation a été obtenue avec la température extérieure (Figure 27) : corrélation quasi-linéaire de coefficient $R^2=0.79$, assez proche de celles observées sur le Golden Tulip et le Calypso (R^2 respectifs de 0.82 et 0.76). Comme pour les autres bâtiments du projet métropole, la signature des consommations est meilleure avec la température qu'avec l'enthalpie de l'air.

On distingue très nettement un talon de consommation pour les températures extérieures journalières inférieures à 18°C, comme cela est observé sur les autres bâtiments. Ce talon est constitué de l'énergie nécessaire pour :

- En bord de saison de climatisation : 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) ;
- En hiver (décembre à mars) : compenser les pertes de distribution inhérentes au fait de maintenir la disponibilité du froid sur tous les émetteurs ainsi que compenser les éventuels défauts de régulation (voir ci-avant). Les apports solaires de la façade ouest, évoqués par l'agent technique comme cause de maintien de la climatisation en hiver, n'apparaissent pas du tout clairement sur le graphique de la Figure 28.

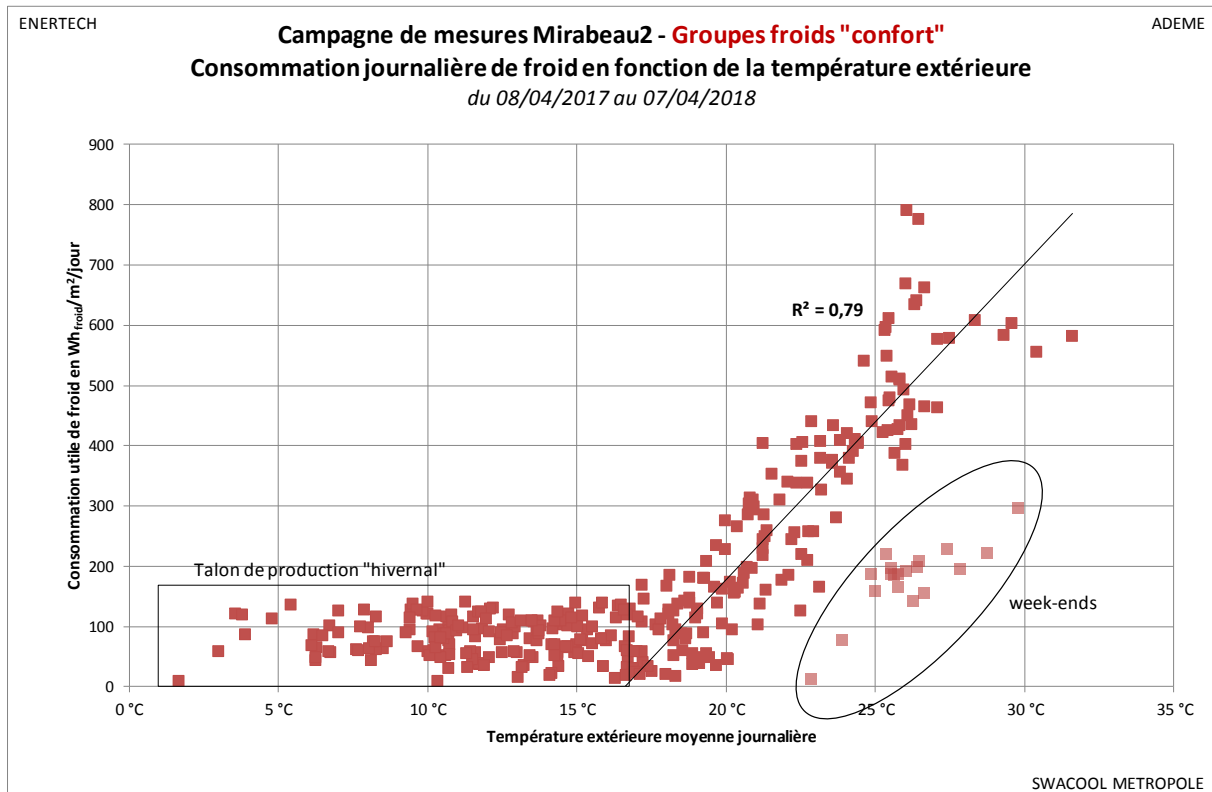


Figure 27 : Signature énergétique de la consommation journalière de froid « confort » du bâtiment Mirabeau2 en fonction de la température extérieure.

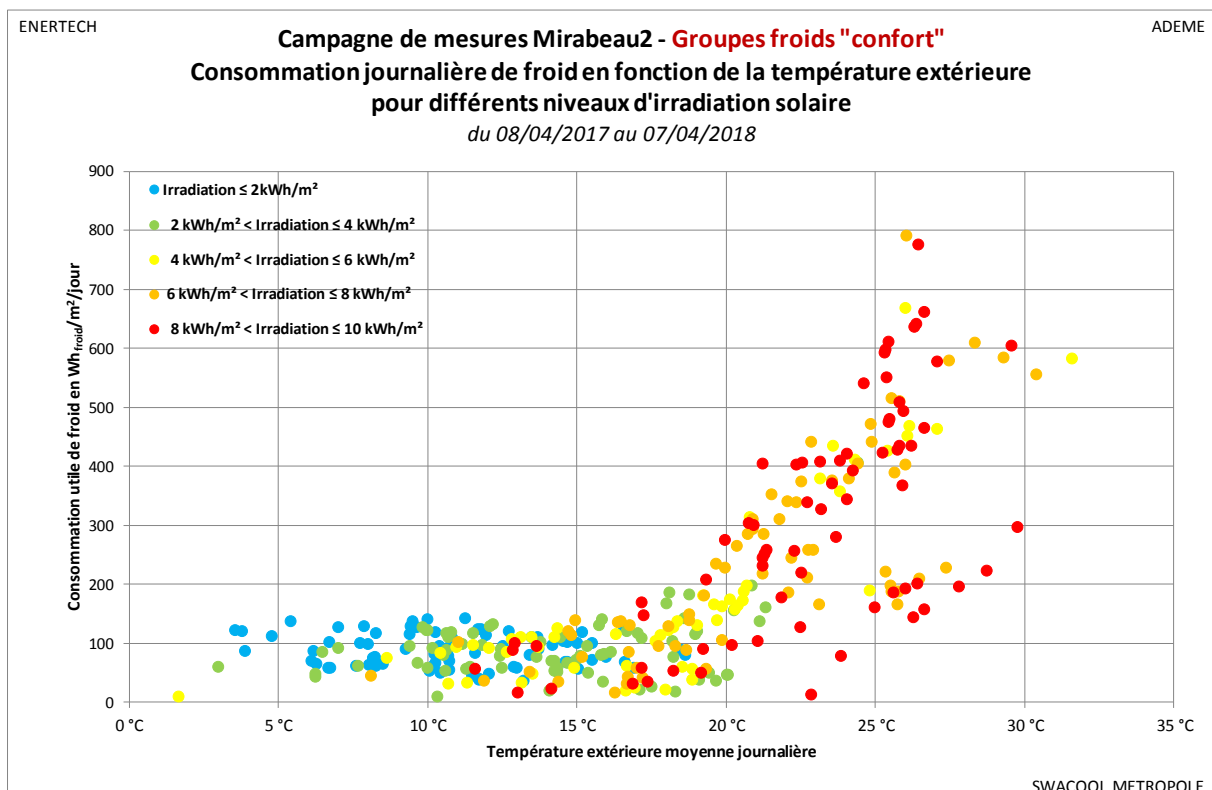


Figure 28 : Influence de l'ensoleillement sur la signature énergétique de la consommation de froid « confort » du bâtiment Mirabeau2.

Contrairement à ce que l'on aurait pu penser, la grande façade vitrée orientée à l'ouest du bâtiment Mirabeau2 **n'entraîne pas de sensibilité particulière de la consommation de climatisation à l'ensoleillement** (Figure 28) : pour une température extérieure donnée, 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. Les apports internes du bâtiment et la gestion des auxiliaires et niveaux de températures (eau glacée, ambiances) sont donc a priori des facteurs de plus grande influence sur la consommation de froid que l'irradiation solaire.

Enfin contrairement aux cas mesurés sur l'île de La Réunion, et de la même manière que sur les bâtiments Calypso et Golden Tulip, la corrélation des consommations de froid avec l'enthalpie de l'air extérieur est moins bonne qu'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).

Production de froid « informatique »

La signature énergétique de la production d'eau glacée « informatique » en fonction de la température extérieure est présentée en Figure 29. On constate que cette signature est très plate et ne dépend que peu de la température extérieure. Outre le fonctionnement de la production « secours » qui peut effacer une partie des consommations, la charge interne de chaleur (fonctionnement des serveurs) serait le premier déterminant des consommations.

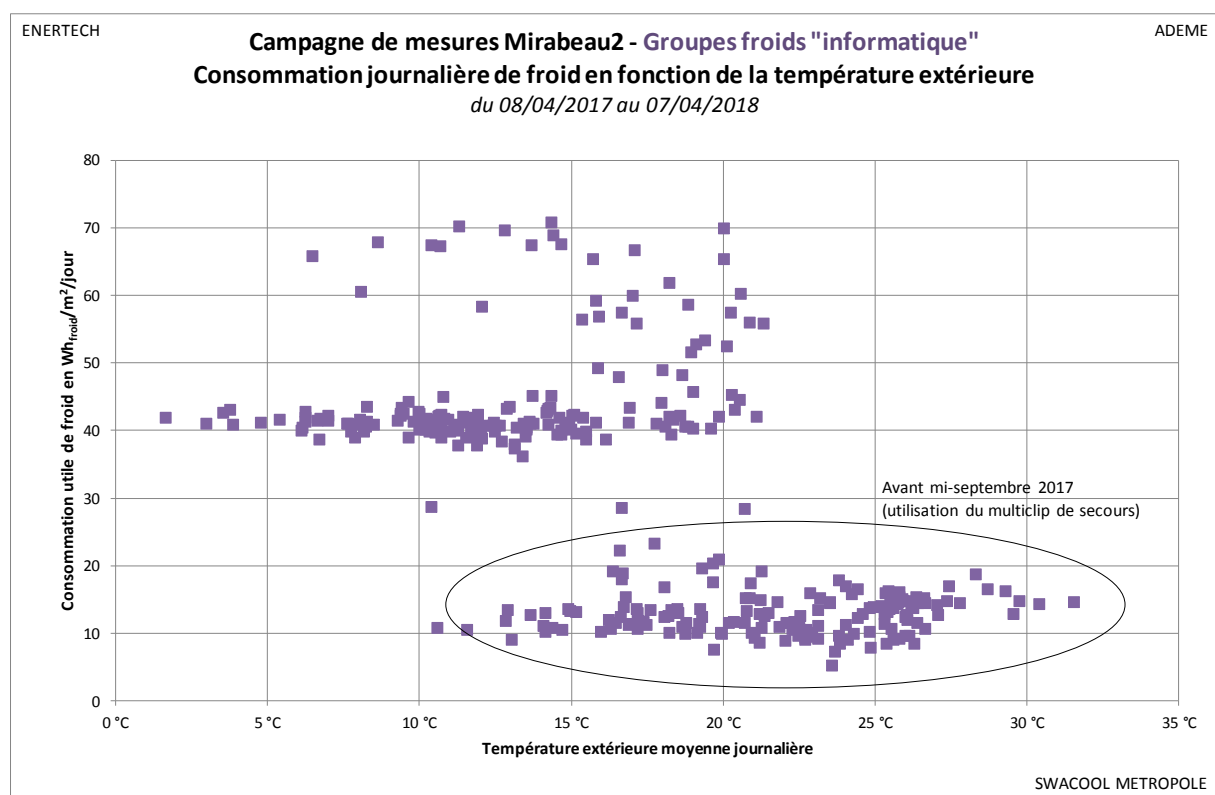


Figure 29 : Signature énergétique de la consommation journalière de froid « informatique » (production eau glacée uniquement) du bâtiment Mirabeau2 en fonction de la température extérieure.

4.2.3 Intermittence journalière

L'analyse des consommations de la production « confort » montre une dépendance très claire à l'occupation (Figure 30) : la consommation moyenne de froid utile chute d'un facteur 3 à 4 en inoccupation (nuits et jours non travaillés) en haute et moyenne saison de climatisation, et d'un facteur 2 en hiver.

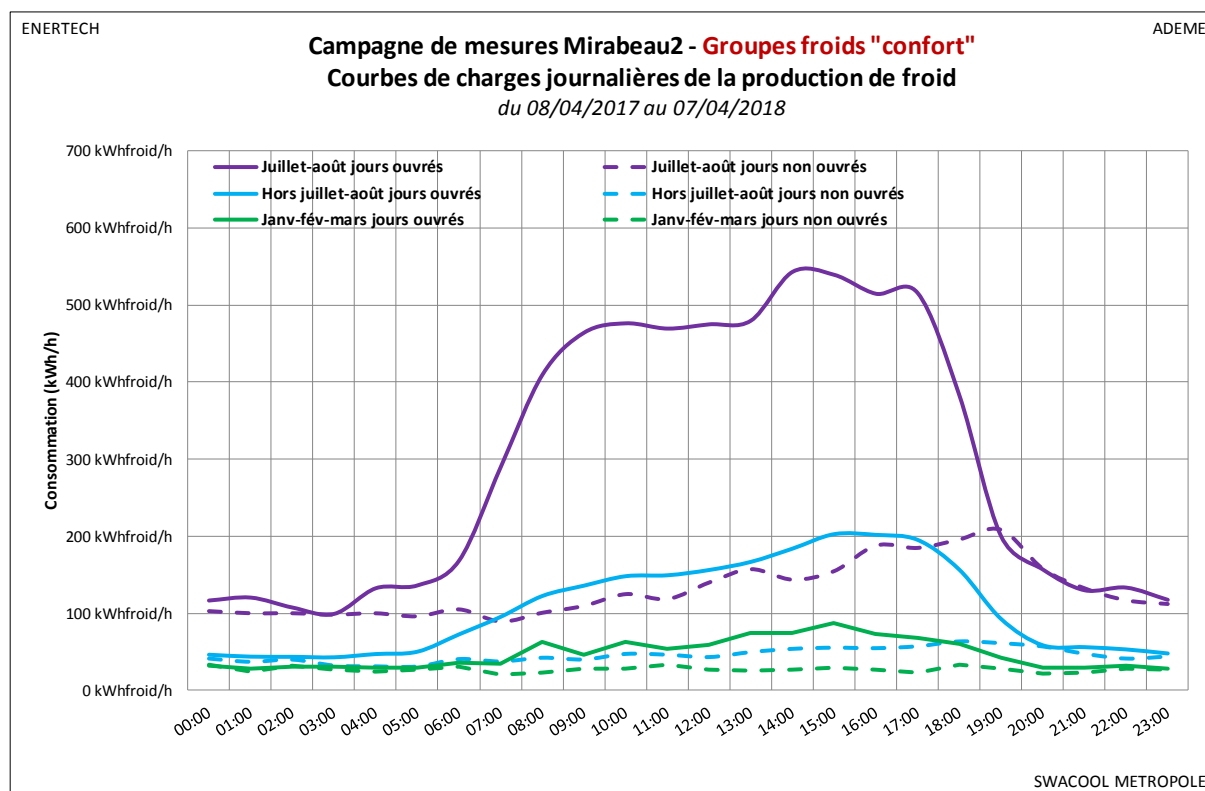


Figure 30 : Courbes de charges journalières de la consommation de froid du bâtiment.

Etant donné le peu de variations constatées sur les températures ambiantes (Cf. §4.5.1) nous pensons que ces variations de charge occupation/inoccupation sont essentiellement liées à l'augmentation des apports internes de chaleur en occupation (apports de chaleur humains, électriques et charge supplémentaire liée à la ventilation⁵), que la climatisation doit combattre pour maintenir la température.

Nous ne savons pas si un abaissement des consignes d'ambiance dans les bureaux est pratiqué hors occupation via la GTC, toutefois la majeure partie des ventilo-convecteurs sont coupés hors occupation (Cf. §4.5.2) ce qui revient à pratiquer un ralenti maximum.

⁵ Une intermittence de fonctionnement est bien appliquée sur la plupart des CTA, Cf §4.5.3.

4.2.4 Puissance appelée

Production « confort »

La monotone de la puissance utile appelée par le réseau d'eau glacée « confort » est présenté en Figure 31.

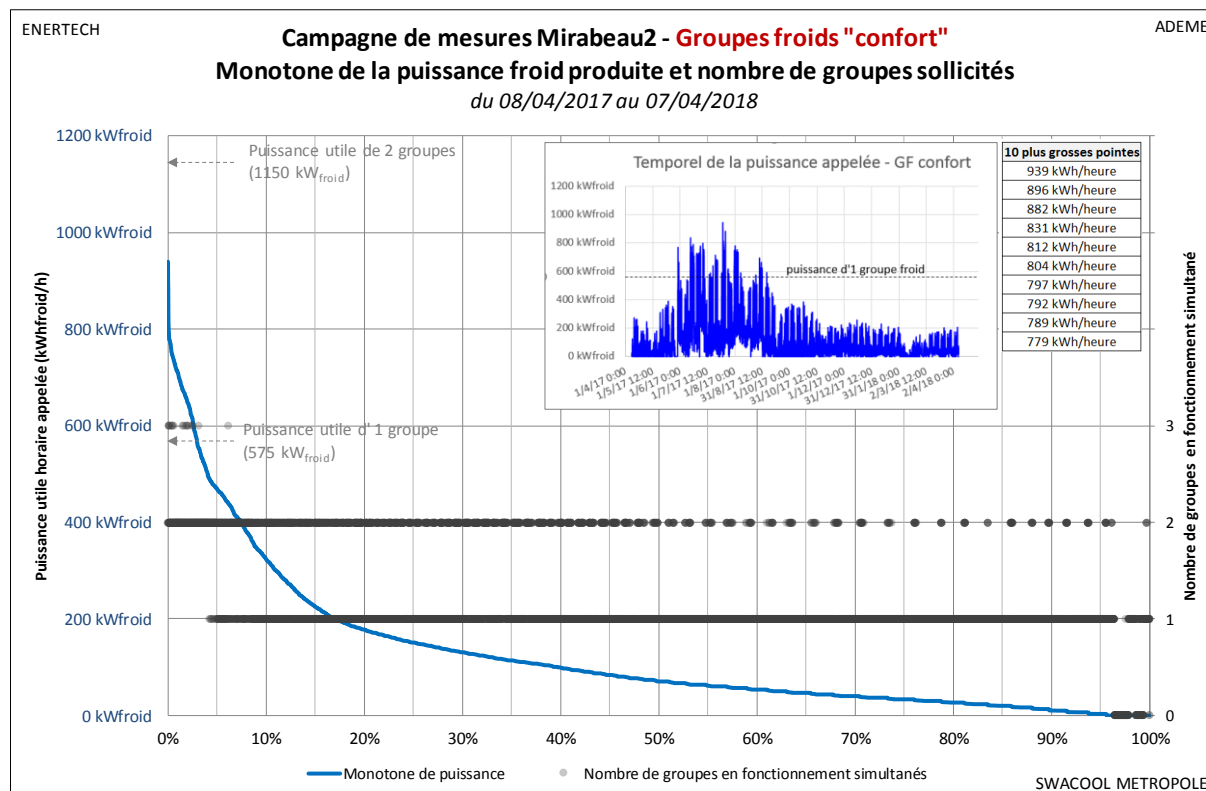


Figure 31 : Monotone de la puissance froide appelée par les 3 groupes froids « confort » durant l'année de mesure.

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- La puissance horaire maximale produite par les groupes froids « confort » est de $939 \text{ kW}_{\text{froid}}$ ce qui représente $56 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$. La dixième pointe horaire chute à $779 \text{ kW}_{\text{froid}}$ soit $46 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$. La puissance maximale obtenue en sommant toutes les productions de froid du bâtiment au pas de temps horaire est sensiblement identique⁶. Ces puissances sont plus proches des valeurs mesurées sur le Calypso ($P_{\text{max}} = 46 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$: 10^e valeur = $31 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$) que de celles mesurées sur le Golden Tulip ($P_{\text{max}} = 111 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$: 10^e valeur = $65 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$).
- La puissance maximale de $939 \text{ kW}_{\text{froid}}$ représente la puissance de « 1.6 » groupe froid (puissance unitaire d'un groupe $575 \text{ kW}_{\text{froid}}$) ce qui montre que la production, avec 3 groupes froids, est assez nettement surdimensionnée.
- On constate que plusieurs groupes froids sont parfois utilisés sans que la puissance consommée par le bâtiment ne le justifie *a priori* (par exemple 2 groupes froids en

⁶ Nos calculs sur la somme des puissances horaires de toutes les productions du site (Cf. §2.2.1) donnent un maximum absolu de la somme à $58 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$ et une dixième valeur à $49 \text{ W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$.

production pendant 22% du temps où la puissance produite est inférieure à $575\text{kW}_{\text{froid}}$). Quelques heures sont également enregistrées avec 3 groupes froids en fonctionnement (18 heures en tout). Cette « sous-utilisation » des groupes est nuisible au COP global de l'installation puisqu'elle met en jeu un plus grand nombre de pompe et engendre un fonctionnement à charge partielle des compresseurs.

- La puissance appelée est 80% du temps inférieure à $200\text{kW}_{\text{froid}}$ (soit 12% de la puissance installée) et 60% du temps inférieure à $100\text{kW}_{\text{froid}}$ (soit 6% de la puissance installée).
- Enfin les calculs relatifs à la monotone présenté montrent que 80% de l'énergie annuelle du réseau « confort » est produite avec moins de $500\text{kW}_{\text{froid}}$, et 50% avec moins de $230\text{kW}_{\text{froid}}$.

Ces données montrent qu'il est primordial de définir à la conception un réseau et une production capables de s'adapter à de fortes variations de puissance tout en conservant des régimes température avantageux pour les réseaux (c'est-à-dire minimisant les débits et maximisant les COP de production), démarche qui montre bien sûr des limites lorsque la puissance appelée est très faible. C'est la problématique qui est abordée au §4.3.

Production « informatique »

La monotone de puissance de la production d'eau glacée « informatique » est présenté en Figure 32. Le profil est beaucoup plus plat que sur le réseau « confort ». La puissance appelée n'a jamais excédé celle d'un seul groupe (puissance max théorique $80\text{kW}_{\text{froid}}$, puissance maximale mesurée $68.6\text{kW}_{\text{froid}}$), ce qui peut sembler sous optimal dans la mesure où une production de secours existe.

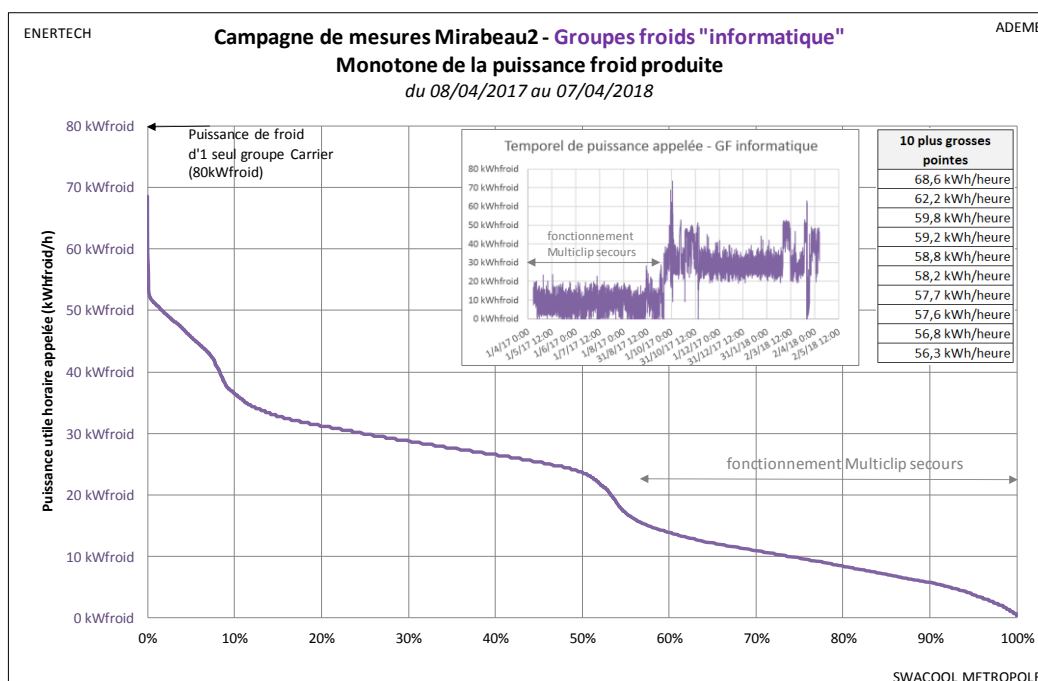


Figure 32 : Monotone de la puissance froide appelée par la production « informatique » en toiture.

4.3 Régimes de températures et débits (production confort)

NB : Pour ne pas alourdir l'étude **nous ne traitons dans ce chapitre que la production de froid « confort »**, qui représente 75% de la consommation de froid du bâtiment. Notons que la production d'eau glacée « informatique » présente un régime globalement plus stable⁷ que la production « confort ».

4.3.1 Rappel des régimes attendus

Voici ce qui était attendu du fonctionnement théorique :

- Groupes froids à variation de puissance et débit constant côté condenseur et évaporateur. Puissance unitaire d'un groupe $575\text{kW}_{\text{froid}}$, 2 compresseurs à vis par groupe, 6 paliers de puissance par groupe ;
- Régime de production nominal d'eau glacée : départ 5.5°C – retour 11.5°C ;
- Débit évaporateur constant, donc modulation de puissance par variation du « delta T » ;
- Régime de fonctionnement distribution : départ 6°C – retour 11°C ;
- Débits variables des circuits de distribution (pompes avec variateur de fréquence intégré) : batteries froides CTA et ventilo-convecteurs sur vannes deux-voies.
- Pas d'information spécifique sur la gestion de la cascade des trois groupes froids.

4.3.2 Régimes mesurés

Gestion de la cascade

Les agents techniques du site nous ont indiqué que les allumages/extinctions des groupes froids étaient gérés manuellement en fonction des besoins du bâtiment. Le graphique en Figure 33 illustre la simultanéité de fonctionnement des groupes durant l'année de mesure.

On constate que 74% du temps au cours de l'année, un seul groupe froid est mobilisé. En haute saison de climatisation deux groupes sont mobilisés avec un passage anecdotique sur trois groupes (pendant un total de 18 heures). Les groupes 1 et 2 sont utilisés majoritairement. Ils représentent respectivement 59% et 39% de la somme des heures de production.

Il semble clair que le nombre d'heure de fonctionnement sur 2 groupes froids est bien supérieur au nombre d'heures où cela est *théoriquement* nécessaire, à savoir une puissance consommée par le bâtiment qui excède $575\text{kW}_{\text{froid}}$ (puissance nominale d'un groupe). On constate en effet que durant 1872 heures en saison estivale, deux groupes fonctionnent en simultané alors que la puissance utile consommée est inférieure à $575\text{kW}_{\text{froid}}$ (voir aussi la Figure 31 du §4.2.4). Nous ne connaissons pas les raisons de cette pratique mais elle est fortement nuisible au COP de production (Cf. §4.4.1).

⁷ Production « informatique » : débit d'eau glacée établi à $17.3\text{m}^3/\text{h}$; température moyenne de départ mesurée à 10.2°C (minimum 7°C à puissance froide maximale, maximum 11°C à faible puissance) ; température moyenne de retour mesurée à 11.3°C (minimum 10°C à puissance froide maximale, maximum 11°C à faible puissance). Le « delta T » aller/retour de la production informatique évolue ainsi de 3°C à P_{max} à 0°C à P_{min} . Il ne vaut en moyenne que 1.1°C , signe d'un sur-débit.

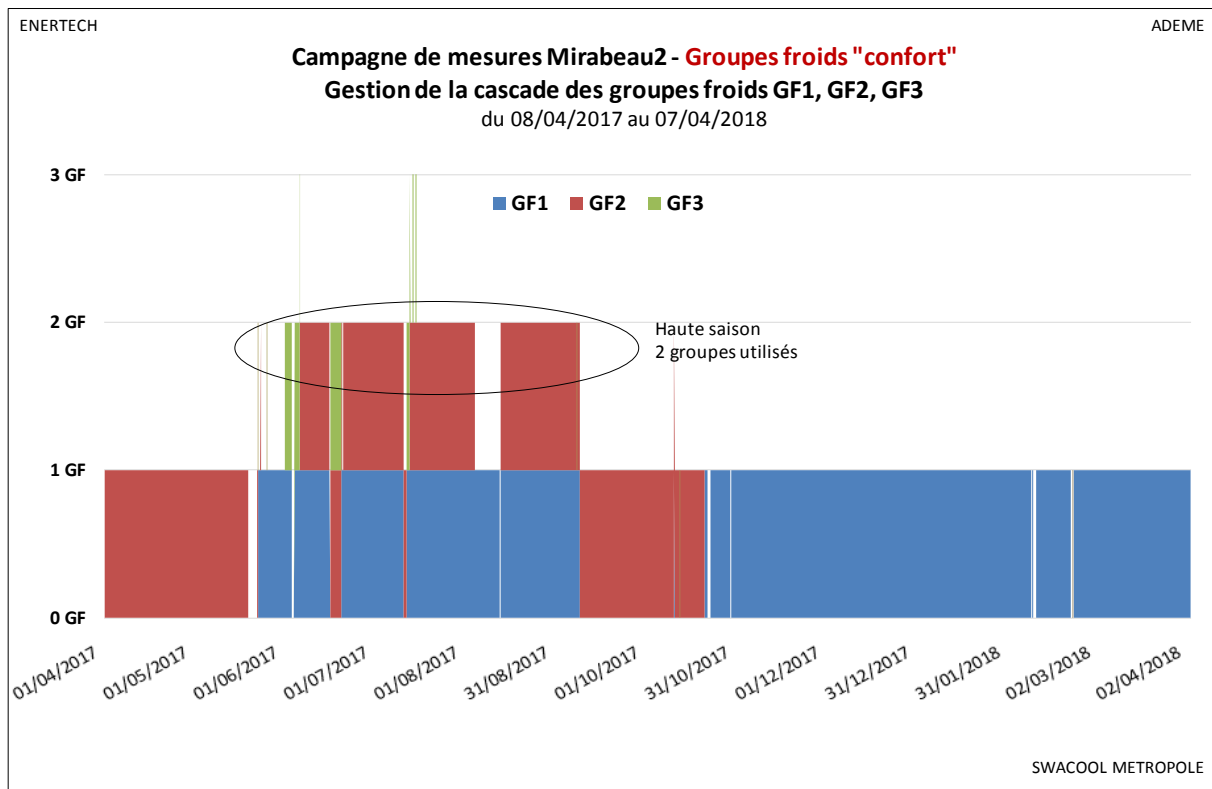


Figure 33 : Gestion de la cascade des groupes froids « confort » durant l'année de mesure.

Evolution annuelle des régimes de débit et de température

Les graphiques en Figure 34 et Figure 35 présentent l'évolution annuelle des paramètres suivants :

- Température météo ;
- Températures aller, retour et « delta T » d'eau glacée ;
- Production de froid utile ;
- Débit primaire d'eau glacée ;
- Consommation électrique des pompes de distribution.

Les observations générales que l'on peut faire sont les suivantes :

- On vérifie bien globalement que la distribution primaire d'eau glacée, c'est-à-dire entre groupes froids et collecteur de départ, est réalisée à débit constant (Figure 35, courbe du bas) et « delta T » variable (Figure 34, courbe grise) ;
- La moyenne annuelle de la température de départ d'eau glacée est plutôt élevée par rapport à la valeur attendue (5.5°C, Cf. §4.3.1), avec 9.2°C ;
- La température d'eau glacée produite par le groupe 1 est légèrement plus froide (moyenne 8.8°C) que celle produite par le groupe 2 (moyenne 9.5°C).

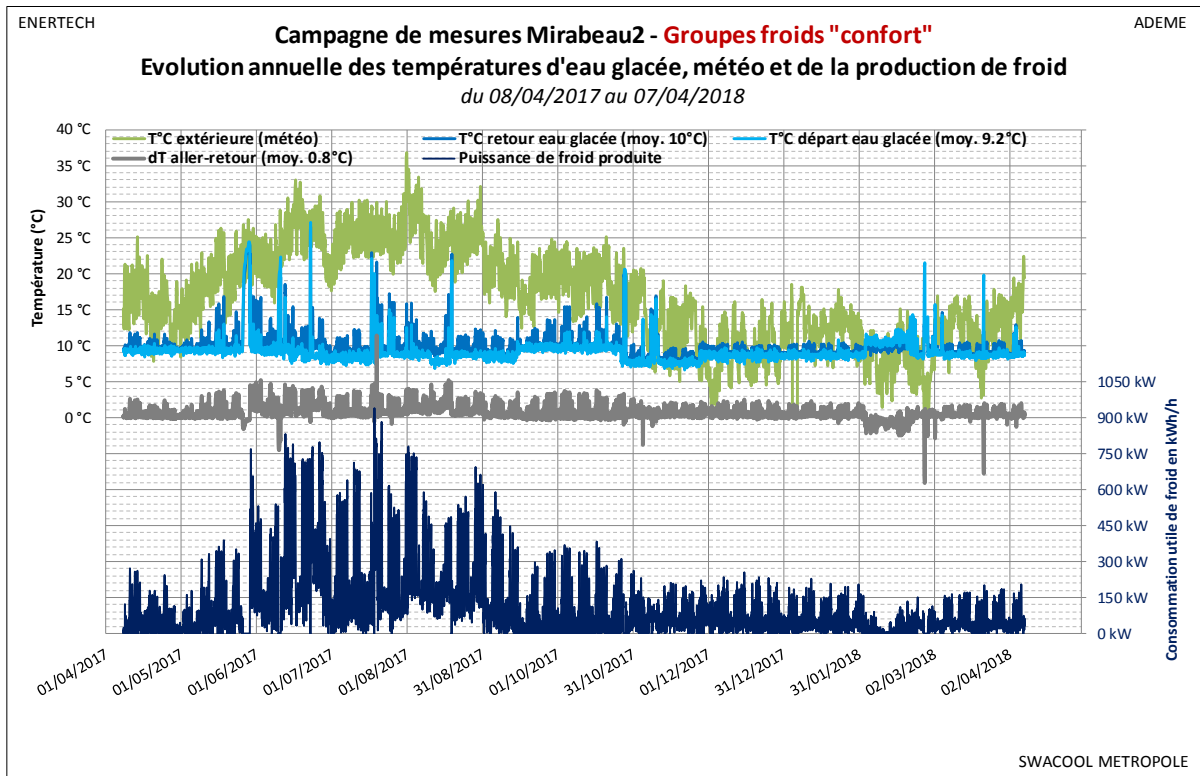


Figure 34 : Evolution des températures d’eau glacée et de la puissance utile produite par les groupes froids « confort » durant l’année de mesure.

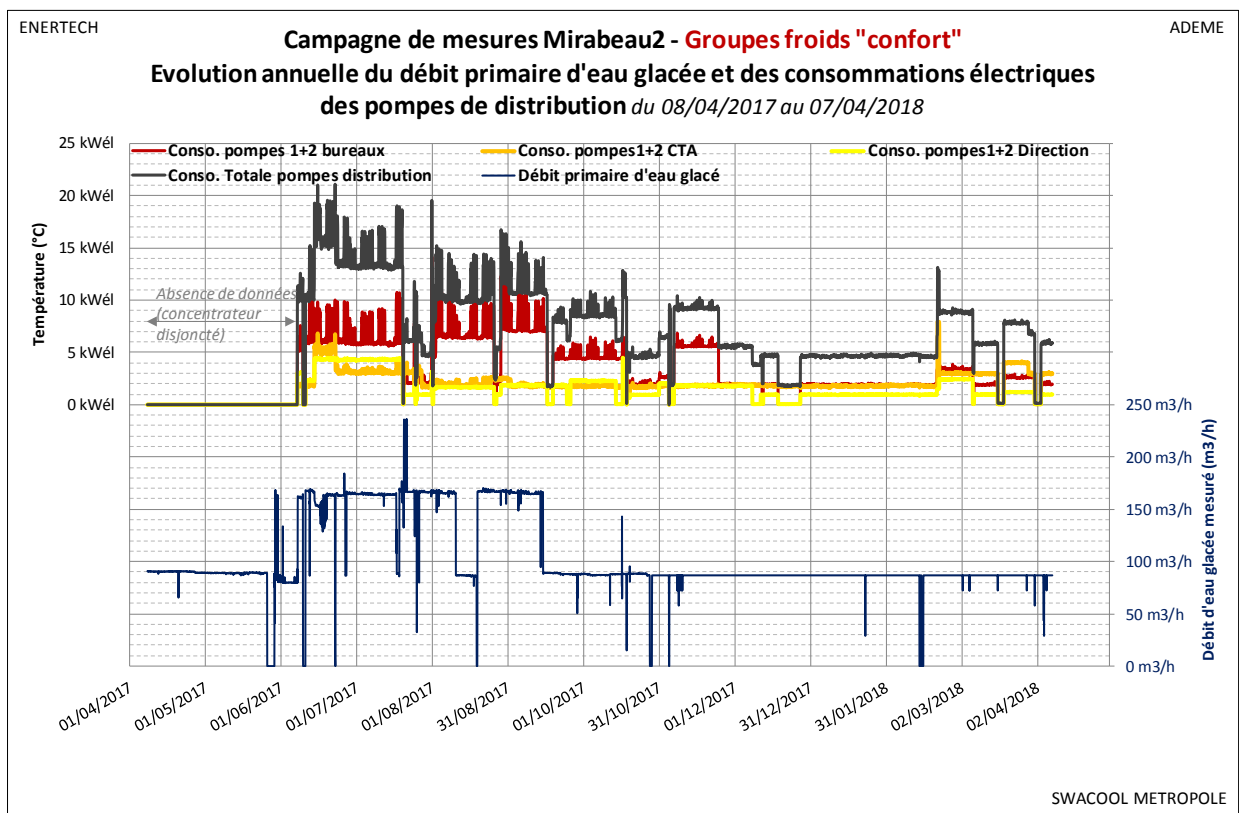


Figure 35 : Evolution du débit primaire d’eau glacée et de la consommation électrique des pompes de distribution (confort) durant l’année de mesure.

- **Le « delta T » mesuré sur l'eau glacé est en moyenne très faible sur l'année (0.8°C)**, même s'il atteint ponctuellement les 5°C prévus sur certaines pointes estivales en occupation. Ceci traduit un sur-débit récurrent au primaire (facteur 6 en moyenne) ;
- La pompe double du réseau de distribution « Bureaux » montre bien des variations de consommations journalières fortes en été ce qui traduit le débit variable mis en œuvre dans le réseau grâce à la mise en place de vannes deux-voies sur les ventilo-convecteurs ;
- Le Golden Tulip a toutefois montré qu'une réduction de puissance de pompe de -75% était possible sur un réseau à forte diminution de débit. La réduction jour/nuit observée sur la pompe « Bureaux » du Mirabeau2 étant de l'ordre de -40% en été, on peut émettre l'hypothèse que le débit ne diminue pas les proportions attendues, soit parce que la pompe est surdimensionnée, soit parce que les soupapes de recyclage du débit sont tarées trop basses en pression ce qui crée du recyclage ;
- **Les pompes des deux autres circuits ne montrent quasiment pas de variations de consommations occupation/inoccupation**, ce qui pose beaucoup de questions : sont-elles pilotées à vitesse constante ? Sont-elles surdimensionnées ? Les soupapes différentielles de recyclage sont-elles mal tarées ou fuyardes ?
- Enfin on observe sur les 3 circuits des paliers de puissances appelées par les pompes, d'ordres saisonniers. Nous pensons qu'il s'agit d'interventions/réglages manuels (fonctionnement de deux pompes en parallèle, modifications de consignes de pression ou de vitesse).
- On constate enfin qu'**aucun circuit n'est jamais arrêté, même en plein hiver**. Cette gestion pose une question évidente de sobriété énergétique.

Monotones et régimes en fonction de la puissance

Les monotones des températures aller/retour de production d'eau glacée sont présentés en Figure 36. Ces courbes illustrent sous un autre angle ce qui a été vu plus haut sur les temporels de la Figure 34 : **le « delta T » aller-retour ne prend des valeurs significatives que quelques pourcents du temps sur l'année**, à savoir les heures d'occupation du bâtiment entre le 1^{er} juin et la mi-septembre (environ 700 heures soit 8% du temps sur l'année). Sur cette période il vaut en moyenne 2.8°C avec des pointes à 5°C, cette valeur maximale étant la valeur prévue en conception à puissance nominale.

La température de départ eau glacée n'a jamais atteint 6°C comme imaginé en conception. En saison forte de climatisation elle est plutôt autour de 9°C, avec un retour à 14°C quand le « delta T » atteint 5°C. Ce constat n'est probablement pas lié à un déficit de puissance mais sans doute à un réglage effectué sur les groupes par les agents techniques.

Le graphique de la Figure 37 est très intéressant car il met en évidence **deux régimes de fonctionnements très distincts pour une même puissance froide appelée** : le régime avec un seul groupe en production et celui avec deux groupes. La mise en route de 2 groupes double le débit primaire. Le « delta T » chute d'un facteur deux. Ce mode de fonctionnement à deux groupes dégrade de manière évidente le COP de production, les auxiliaires des groupes représentant le tiers de la consommation électrique de production (Cf. §4.4.1).

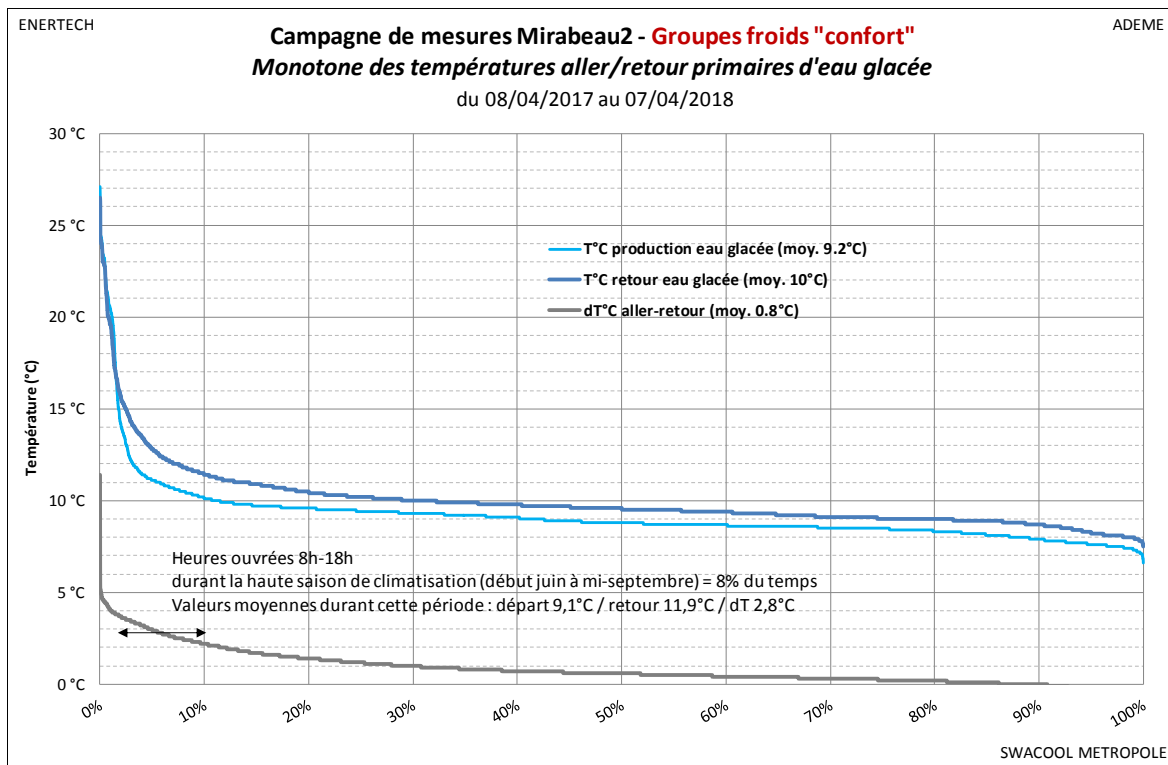


Figure 36 : Monotone des températures primaires d’eau glacée (confort) durant l’année de mesure.

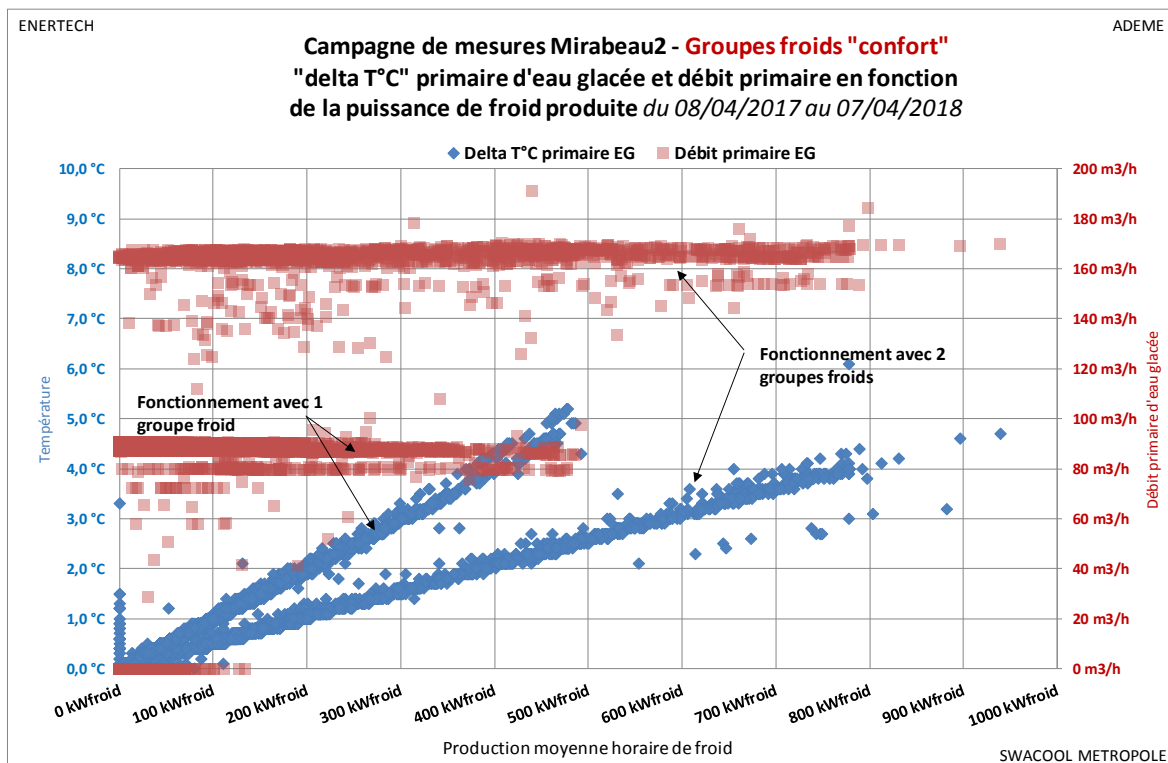


Figure 37 : Différentiel de température (aller-retour primaire) et débit primaire d’eau glacée en fonction de la puissance de froid produite (production confort).

Zooms temporels sur quatre semaines types

Nous présentons ici quatre graphiques temporels qui illustrent des fonctionnements types observés sur la production de froid confort :

- Figure 38 : Semaine type de juillet.** La demande de froid est très intermittente et atteint en journée 450 à 630kW_{froid}. Un fonctionnement à un seul groupe (puissance unitaire 575kW_{froid}) serait théoriquement possible la plupart du temps mais deux groupes fonctionnent en permanence. Si l'on zoome sur le vendredi 07/07/2017 on s'aperçoit que l'augmentation de la demande de froid l'après-midi (passage de 483 à 630kW_{froid}) engendre un passage des groupes 1 et 2 à leur puissance quasi maximale (111kW_{él}) et fait chuter le COP global de production de 2.8 à 2.4.

La température du départ d'eau glacée est maintenue à 8°C environ, celle du retour culmine à 11.5°C. Il y a de la marge par rapport au régime prévu à puissance maximale (départ à 6°C – retour 11°C). On peut toutefois supposer qu'avec un seul groupe en fonctionnement (ce qui devrait être observé selon nous), le débit primaire chuterait de 170m³/h à 85m³/h, et l'unique groupe en production fonctionnerait théoriquement sur un régime départ/retour de 8°C/15°C avec un recyclage minimum dans le collecteur. Ce n'est pas réellement ce qu'on observe (figure suivante).

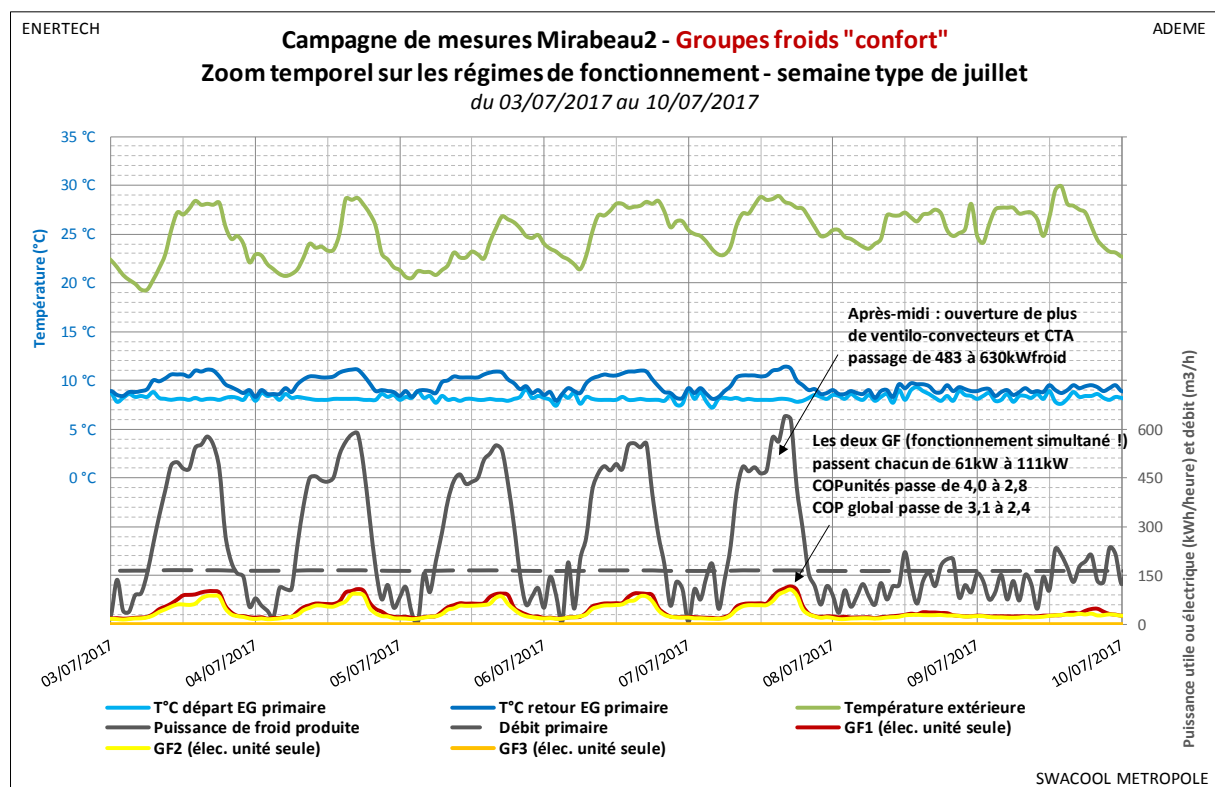


Figure 38 : Zoom temporel sur les régimes de la production d'eau glacée « confort » durant une semaine de juillet. Le fonctionnement simultané des groupes 1 et 2 dégrade le COP (Le COPunité et le COPglobal moyens sur toute la semaine valent respectivement 3.0 ; 2.1).

- Figure 39: Semaine type d'août.** La demande de froid est intermittente et augmente d'intensité au cours de la semaine. Contrairement à la séquence précédente et avec une puissance utile de froid qui atteint $480\text{kW}_{\text{froid}}$, un seul groupe froid est utilisé (ce qui est théoriquement normal puisque la puissance unitaire d'un groupe est de $575\text{kW}_{\text{froid}}$). Le COP moyen en semaine est de 2.7 et atteint 3.1 à midi les mercredi, jeudi et vendredi. Il est supérieur à celui observé précédemment avec deux groupes froids simultanés.

On peut constater toutefois que le groupe froid 1 semble en limite de puissance électrique en fin de semaine (puissance théorique unité $126\text{kW}_{\text{él}}$, puissance atteinte $120\text{kW}_{\text{él}}$) alors qu'il ne semble pas parvenir à stabiliser la température de départ d'eau glacée (courbe bleu-clair), qui monte à $11-12^\circ\text{C}$ alors qu'elle était stabilisée à $7-8^\circ\text{C}$ à faible puissance. On peut donc sérieusement s'interroger sur la capacité du groupe froid 1 à maintenir les régimes théoriques prévus dans sa fiche technique (à savoir : départ/retour eau glacée $5.5/11.5^\circ\text{C}$; débit $83\text{m}^3/\text{h}$; P_{utile} $575\text{kW}_{\text{froid}}$; température extérieure supérieure à 30°C , Cf. §2.2.1).

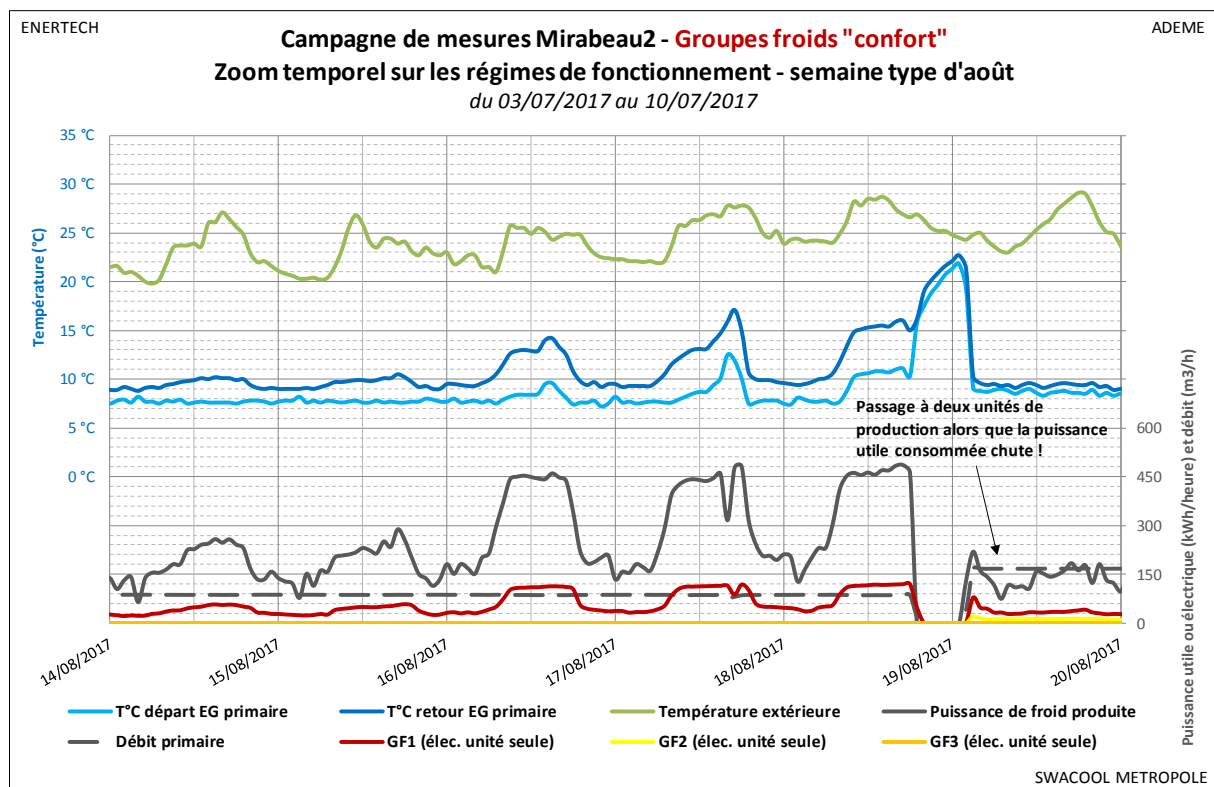


Figure 39 : Zoom temporel sur les régimes de la production d'eau glacée « confort » durant une semaine de juillet. Le COP_{unité} et le COP_{global} moyens valent respectivement 4.3 ; 2.7 en semaine et 3.0 ; 1.6 le week-end du fait du passage à deux groupes froids.

- Figure 40 : Semaine type de décembre.** La demande de froid est stabilisée à une valeur moyenne très faible ($77\text{kW}_{\text{froid}}$). Le groupe en fonctionnement (groupe froid 1) est parfois stoppé toutes les 2 heures. La consommation de l'unité compresseur et de ses auxiliaires ne s'envole pas pour autant au regard de la puissance utile fournie : le COP global moyen sur la semaine est de 3.1 ce qui est meilleur que le fonctionnement observé en juillet avec deux groupes froids (Figure 38). Il serait évidemment possible d'améliorer le COP en jouant sur des débits variables côté condenseur et évaporateur du groupe, les débits étant actuellement constants.

La température du départ d'eau glacée est maintenue à 8-9°C avec un « delta T » très faible lié à un fort recyclage dans le collecteur (débit primaire supérieur au débit de distribution, Cf. Figure 35).

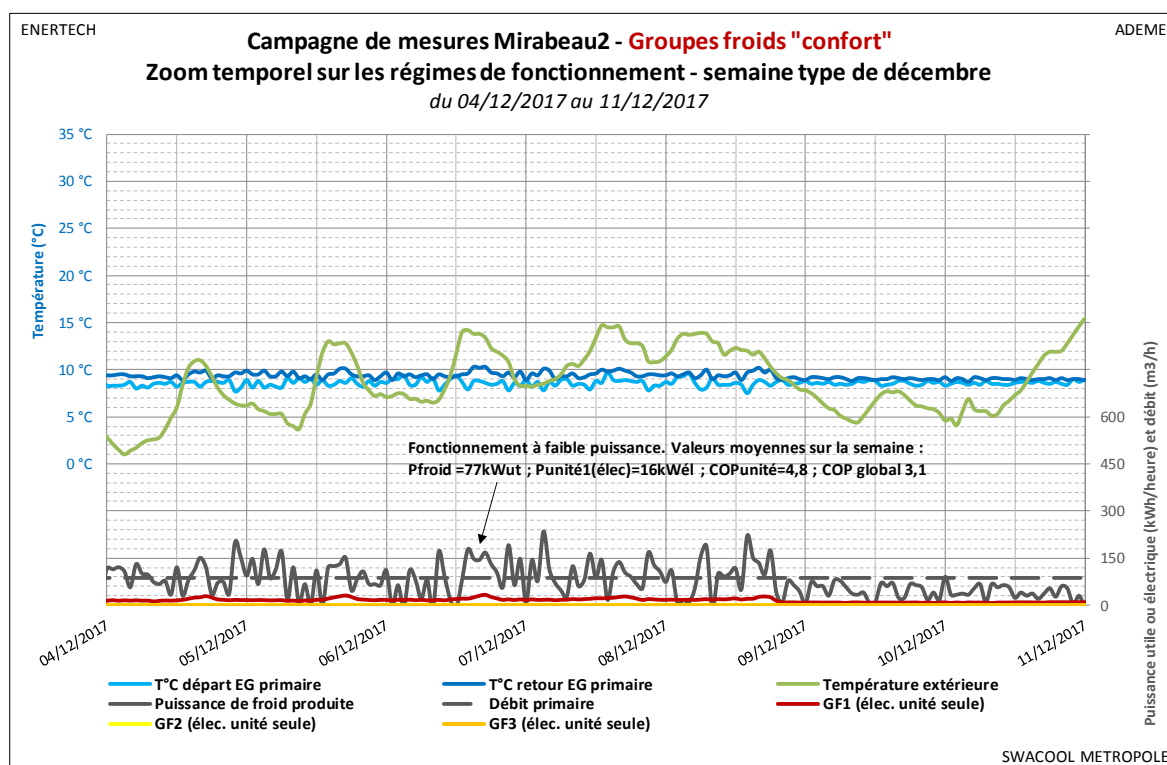


Figure 40 : Zoom temporel sur les régimes de la production d'eau glacée « confort » durant une semaine de décembre. La puissance utile moyenne est suffisante pour conserver un bon COP (COP global 3.1).

- **Figure 41: Semaine type de février.** La météo est froide. La demande est si basse ($11\text{kW}_{\text{froid}}$ en moyenne sur la semaine) que le recyclage est presque de 100% dans le collecteur. Les températures de départ et de retour ne sont plus réellement dissociables et évoluent autour de $10\text{-}11^\circ\text{C}$.

Le COP unité (= du groupe seul) et le COP global (groupe + pompes + tours) s'effondrent avec des valeurs respectives à 1.7 et 0.7.

NB (non visible sur le graphique) : pendant cette séquence la pompe primaire (côté évaporateur) fonctionne par intermittence comme le groupe, en revanche la pompe condenseur ainsi que l'aéroréfrigérant mobilisé fonctionnent en permanence, ce qui contribue à la dégradation forte du COP global sur cette période.

On peut vraiment s'interroger sur la nécessité de laisser tourner la production confort avec un besoin de froid aussi faible et un COP de production de 0.7.

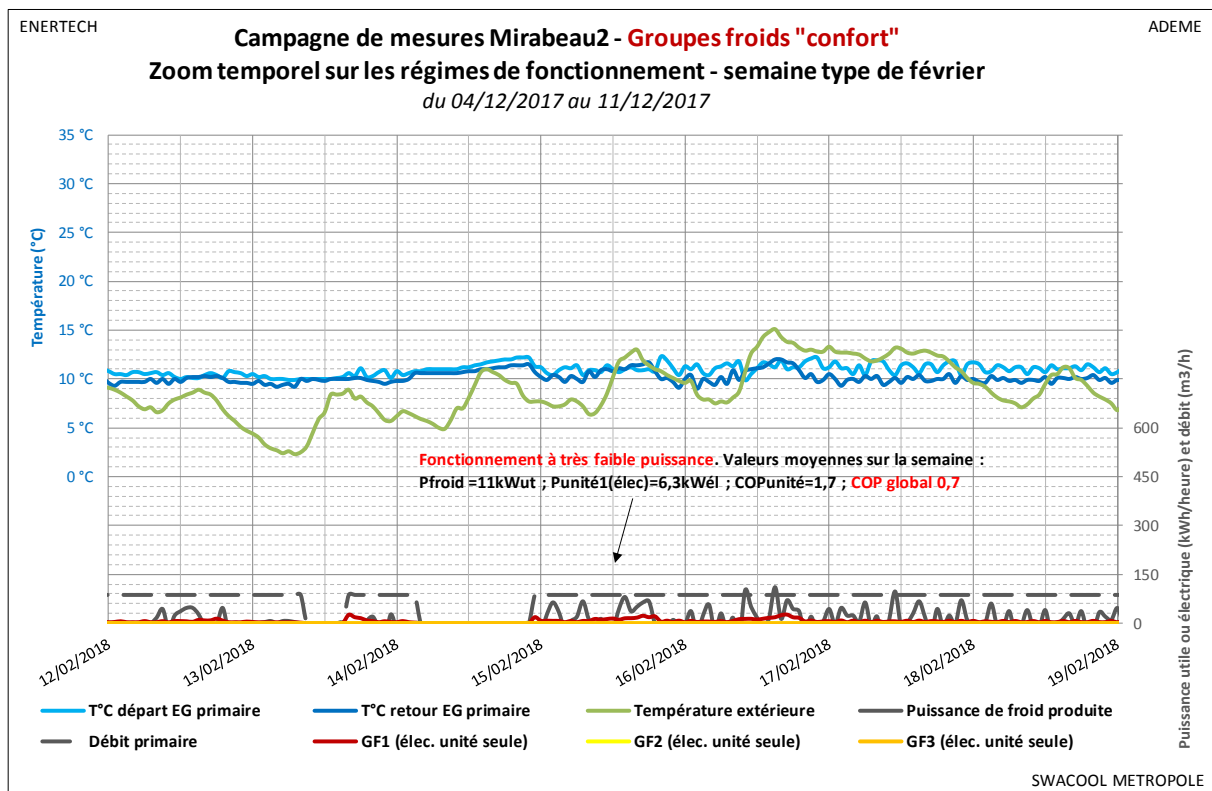


Figure 41 : Zoom temporel sur les régimes de la production d'eau glacée « confort » durant une semaine de février. La puissance utile est très faible, le COP s'effondre (COP global 0.7).

4.4 COP et consommation électrique des auxiliaires

4.4.1 COP production confort

Nous nous intéressons au COP annuel de la production « confort », à son évolution mensuelle, à la contribution des différents auxiliaires et à son évolution en fonction de la puissance utile produite.

- Nous appellerons **COP de l'unité (ou COP_{unité})** le COP de production du(des) groupe(s) froid(s) seul(s), c'est-à-dire sans prise en compte des pompes évaporateurs, des pompes condenseurs et des tours aéroréfrigérantes.
- Nous appellerons **COP global** le COP de production incluant les pompes évaporateurs, condenseurs, ainsi que les tours aéroréfrigérantes.
- NB : dans ce document les pompes de distribution des circuits ne sont jamais incluses dans les calculs de COP.

Le graphique de la Figure 42 présente les évolutions mensuelles de la production de froid « confort », de l'énergie électrique consommée et du COP global de production. **Le COP global annuel mesuré sur la production « confort » est de 2.14** avec un minimum mensuel observé en février (COP global 0.7) et un maximum observé en décembre (COP global 3.0). Comme nous le verrons plus loin, le COP global en haute saison de production est dégradé par le fait que 2 groupes fonctionnent en parallèle pour une puissance totale utile souvent inférieure à la puissance unitaire d'un groupe.

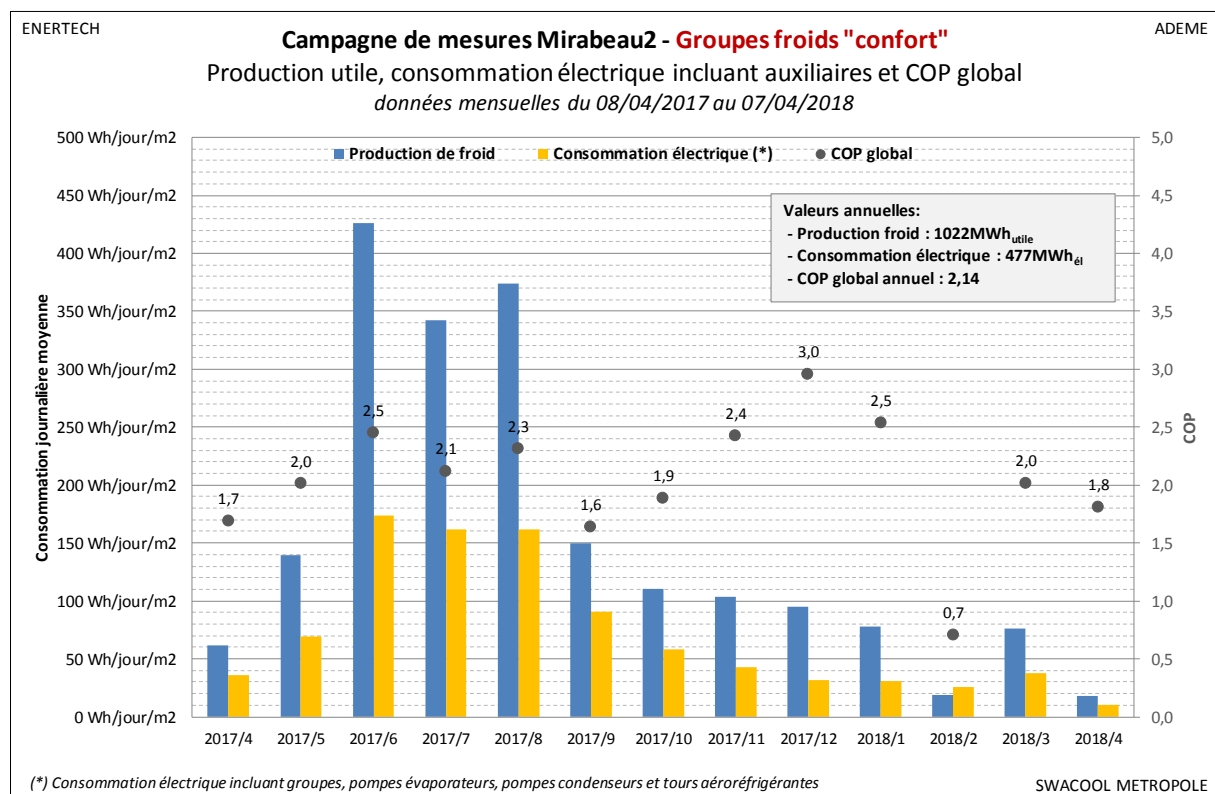


Figure 42 : Production utile, consommation électrique et COP global de la production « confort ».

La décomposition de la consommation électrique de la production « confort » est indiquée mois par mois en Figure 43. On remarque que la part de cette consommation affectable aux groupes seuls (sans les pompes ni les tours) est de 64% à l'année avec plutôt 60-70% en haute saison de climatisation et 40-60% en inter-saison et en hiver. La corrélation avec les COP globaux mensuels de la figure précédente n'est donc pas immédiate : ce n'est pas *uniquement* lorsque la part de consommation des auxiliaires augmente que le COP global se dégrade. Ce point est réabordé juste après.

On fait par ailleurs les constatations suivantes :

- En dehors de la haute saison de climatisation les tours aéroréfrigérantes (qui ont deux vitesses possibles de fonctionnement) fonctionnent à petite vitesse. La consommation des auxiliaires se répartit alors en : 27% pour les pompes évaporateurs, 58% pour les pompes condenseurs (qui ont une puissance instantanée supérieure du fait d'avoir deux échangeurs à vaincre) et 15% pour les tours.
- En haute saison de climatisation les tours aéroréfrigérantes sont plus souvent sur grande vitesse et leur part passe alors à 44% (avec 17% pour les pompes évaporateurs et 39% pour les pompes condenseurs).

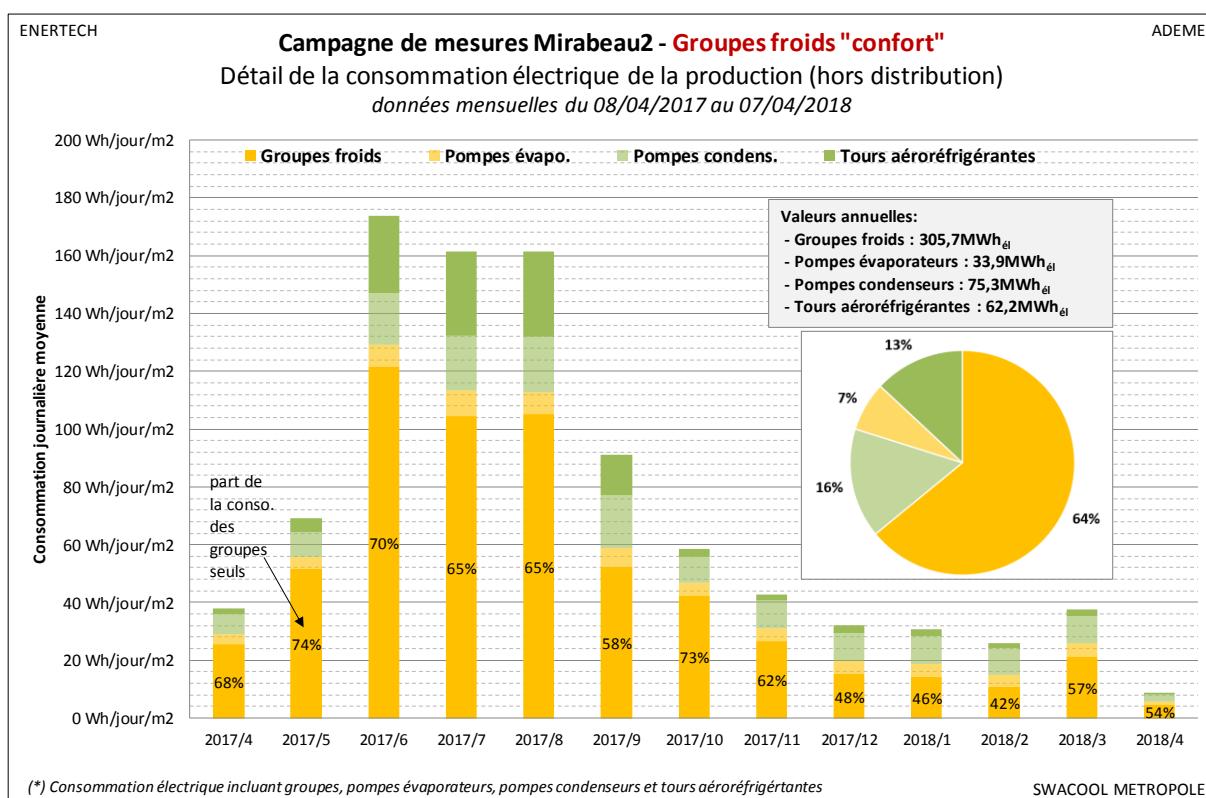


Figure 43 : Détail de la consommation électrique de la production de froid « confort » (hors distribution).

Les doubles pompes évaporateurs et condenseurs sont parfois utilisées simultanément pour augmenter le débit, comme le montrent les graphiques de la Figure 44.

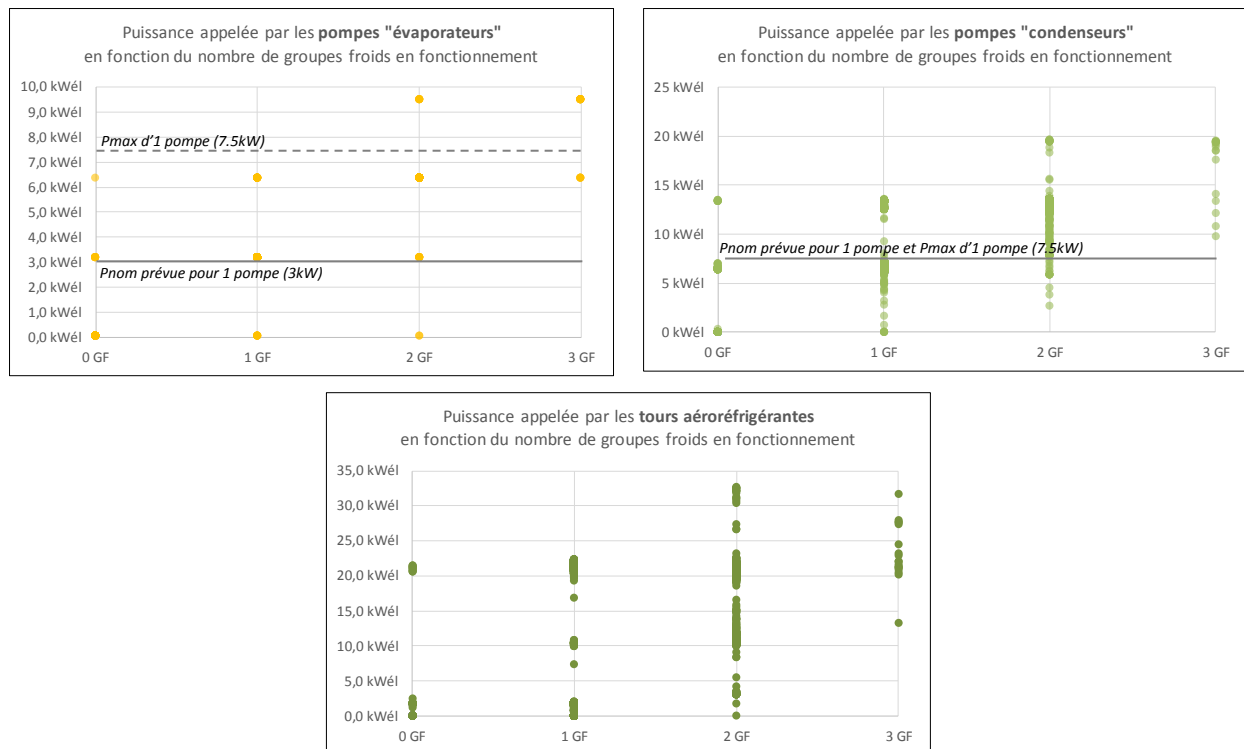


Figure 44 : Puissances instantanées appelées par les auxiliaires des groupes en fonction du nombre de groupes en fonctionnement (production confort)⁸.

Enfin la Figure 45 présente les différents COP horaires mesurés en fonction de la puissance utile de froid produite. Deux couleurs sont distinguées pour les heures fonctionnements à 1 groupe (rouge) et les heures fonctionnements à 2 groupes (orange).

Ce graphique met en évidence deux points principaux :

- **Il est clair que pour une puissance froid donnée, un fonctionnement à 2 groupes au lieu d'un seul dégrade le COP (points oranges plus bas que les points rouges sur le graphique), de 1 à 2 points environ ce qui est considérable.**
- **De plus nous constatons que le fonctionnement à un groupe froid (points rouges) présente des variations de COP énormes pour une puissance froid donnée, par exemple COP de 1.5 à 5 pour 100kW_{froid} produits ! Les différentes analyses de sensibilités menées⁹ n'ont pas permis de déterminer le paramètre expliquant ces variations (il ne s'agit ni de la température extérieure, ni de la température de départ). Nous pensons donc qu'il peut s'agir d'une variable interne aux groupes (gestion des compresseurs ? Pression de fonctionnement ?) ou d'un mauvais fonctionnement côté circuit condenseur (apport d'eau dans les tours ? Problème sur une V3V des circuits condenseur ?). Le groupe froid 1 est légèrement plus touché par le phénomène que le groupe froid 2.**

⁸ NB : les puissances des pompes évaporateurs sont prises sur le même départ que celui des groupes, aussi elles sont estimées sur la base du talon électrique observé et du débitmètre mis en place.

⁹ Ces analyses ont été documentées en cours de campagne dans un power point et sont disponibles si besoin. Elles ne sont pas présentées ici afin d'éviter d'alourdir trop le rapport.

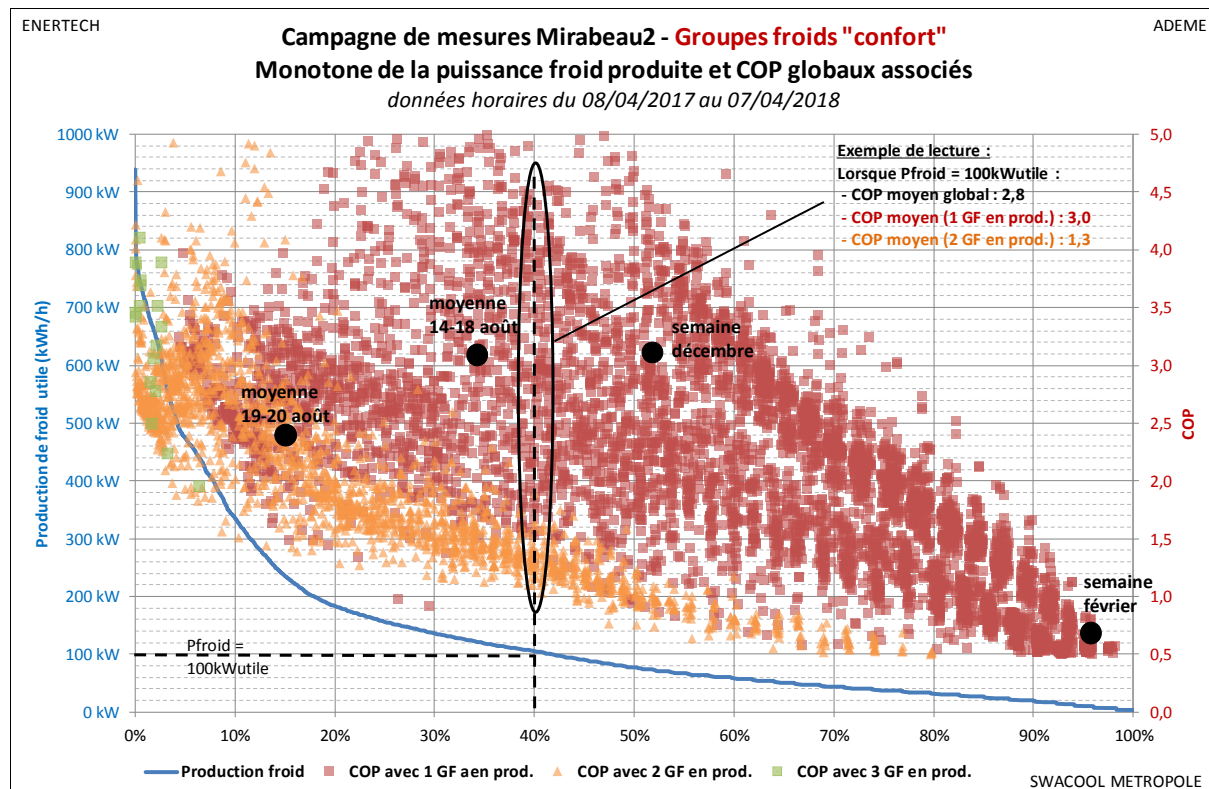


Figure 45 : Monotone de puissance utile de froid et COP globaux associés (orange : 2 GF en production ; rouge : 1 GF en production). Les points noirs font le lien avec les temporels des Figure 39 à Figure 41.

4.4.2 COP production informatique

Nous nous contentons ici de présenter brièvement les données mensuelles relatives à la production confort (Figure 46).

- **Le COP global moyen annuel de cette production est de 2.32** pour une production de froid utile 5.5 fois inférieure à celle de la production « confort ».
- Le fonctionnement est plus stable et régulier que celui de la production confort, la variation principale étant observée entre les premiers mois (jusqu'en septembre 2017) et les suivants où la production a fortement augmenté du fait de l'arrêt de la production de secours Hitachi qui climatise le même local.
- **La température de départ est proche de 11°C en première moitié de campagne puis 10°C ensuite.**
- Le « delta T » moyen est stable et vaut 1°C ce qui laisse **entrevoir une économie possible sur la réduction du débit de distribution** (les pompes sont intégrées aux groupes mais leur consommation a bien été retranchée dans l'analyse du COP).
- Le COP de production global est assez bien corrélé à la température extérieure avec une régression linéaire établie à : $\text{COP}(T_{\text{extérieure}}) = 3.17 - 0.06 \times T_{\text{extérieure}}$.

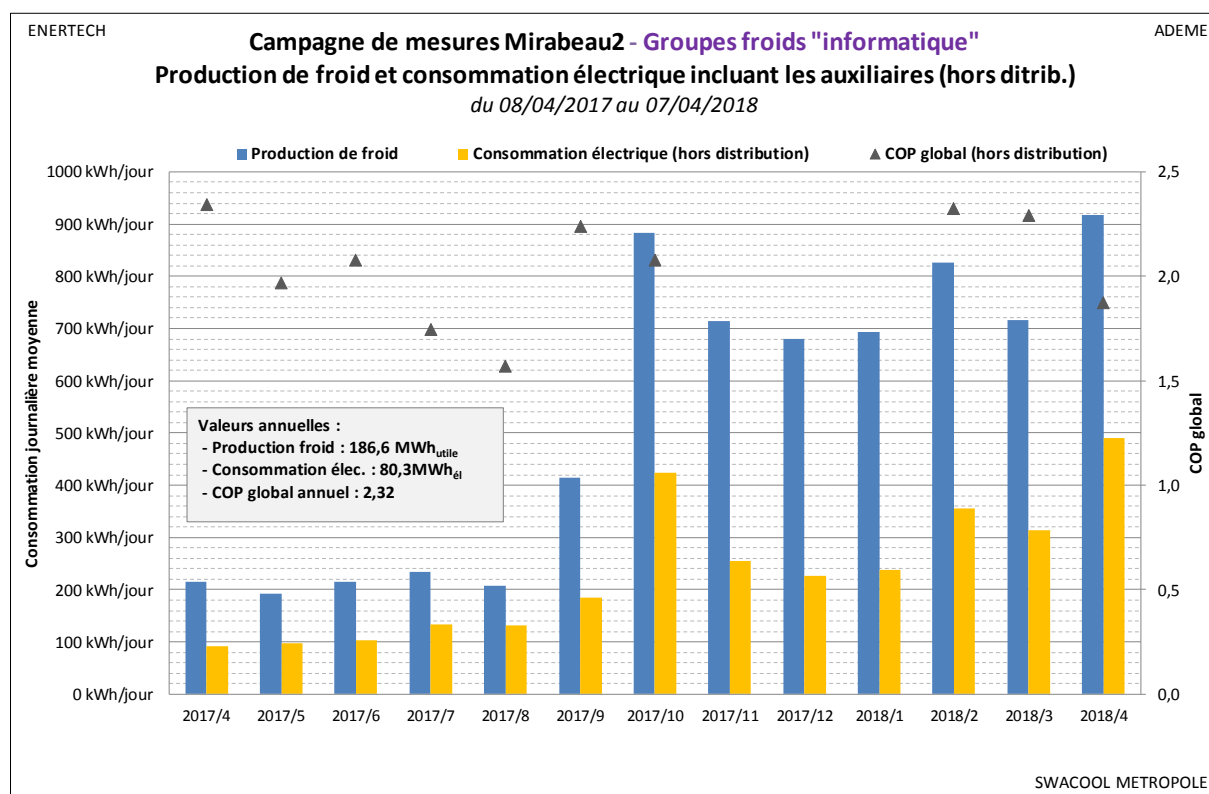


Figure 46 : Production utile, consommation électrique et COP global de la production « informatique ».

4.4.3 Pompes de distribution, ventilo-convecteurs, CTA

Nous souhaitons ici présenter les ordres de grandeurs des consommations électriques de la production de froid, de sa distribution et de ses émetteurs (CTA, ventilo-convecteurs) en regard de la consommation électrique du bâtiment. Le but est simplement :

- De connaître la part de la consommation électrique de la climatisation dans son ensemble dans la consommation totale du bâtiment ;
- De hiérarchiser les consommations électriques respectives de la production, de la distribution et de l'émission.

La consommation totale d'électricité du bâtiment est prise égale à la consommation de 2017 qui nous a été transmise. Les sous-usages identifiés sont des résultats de mesure avec quelques extrapolations/calculs que nous mentionnons ici :

- Les pompes de distribution « informatique » sont identifiées sur les mesures des départs électriques des groupes (Carrier, Hitachi) à partir de leur talon de consommation ;
- Les extracteurs du poste ventilation (part faible de la consommation) sont estimés sur la base de $0.3W/m^3.h$ extrait (débit tiré du DOE puis ratio tiré de l'expérience) ;
- Enfin la consommation des ventilo-convecteurs est une extrapolation (facteur 8) de la mesure du général ventilo-convecteur du niveau 7 du bâtiment.

La Figure 47 montre la répartition des consommations ainsi obtenue.

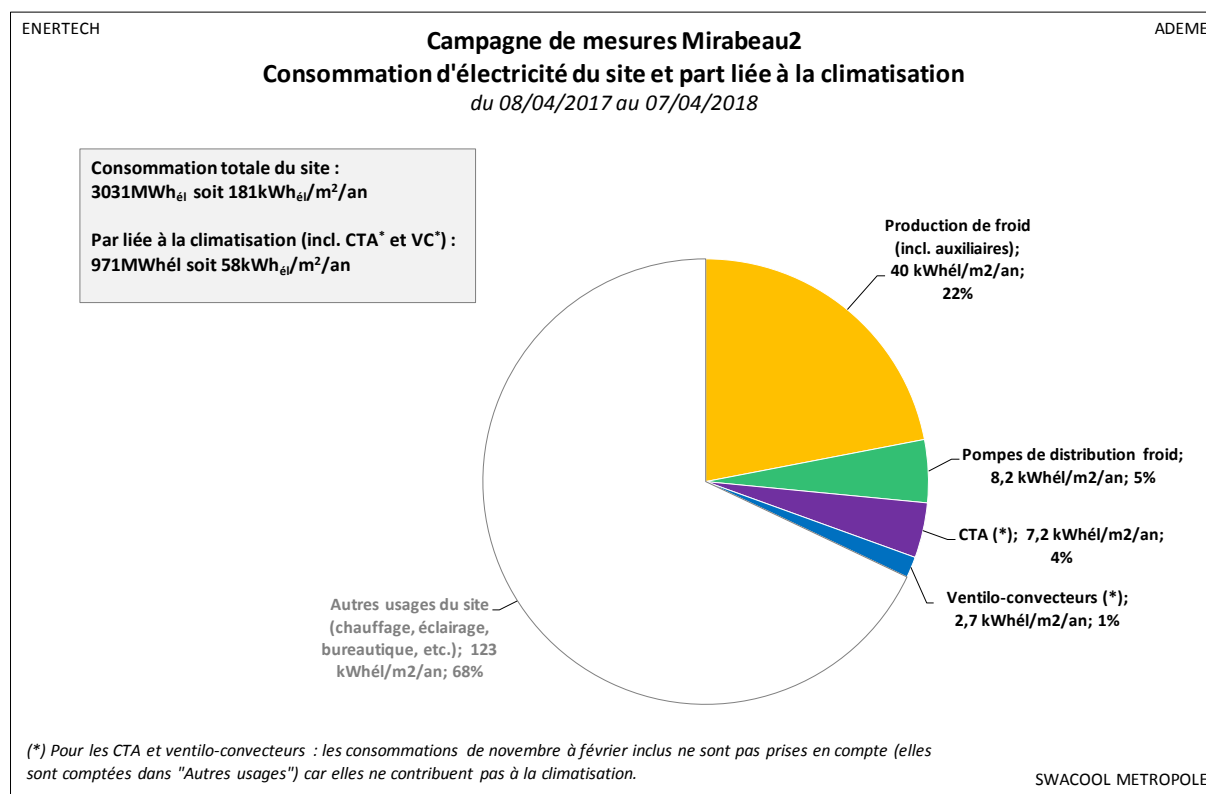


Figure 47 : Consommation d'électricité totale du site et part liée à la climatisation.

On peut effectuer quelques remarques :

- La climatisation représente environ **le tiers de la consommation d'électricité du bâtiment** en incluant les CTA (hors hiver) avec 58kWh_{él}/m²/an, sachant que le Mirabeau2 est chauffé électriquement. S'il était chauffé autrement la part de la climatisation pourrait atteindre 50% ou plus.
- La production de froid (compresseurs et auxiliaires primaires) représente plus des deux tiers de cette consommation.
- **Les pompes de distribution constituent un poste très élevé sur ce bâtiment** avec 8.2kWh_{él}/m²/an (quand il représente 0.6kWh_{él}/m²/an sur le Calypso !) du fait de leur fonctionnement permanent toute l'année ;
- **Les CTA constituent un poste maîtrisé** (similaire au bâtiment Calypso) ;
- **Les ventilo-convecteurs montrent un ratio de consommation faible par rapport au bâtiment Calypso** (2.7kWh_{él}/m²/an contre 11kWh_{él}/m²/an estimés sur le Calypso), signe d'une conduite maîtrisée de cet équipement.

Les sous-consommations des 3 postes principaux (production de froid, pompes de distribution et CTA) sont présentées dans les graphiques suivants en Figure 48, Figure 49 et Figure 50.

- **Production de froid (Figure 48)** : sans surprise la production confort représente quasiment les trois quarts de la consommation, le local CTI occupant 21% avec une part quasiment égale entre ses deux productions (nominale et secours). On rappelle ici que la production confort est constituée à 64% de la consommation propre des unités et à 36% de la consommation des auxiliaires primaires (pompes et tours).

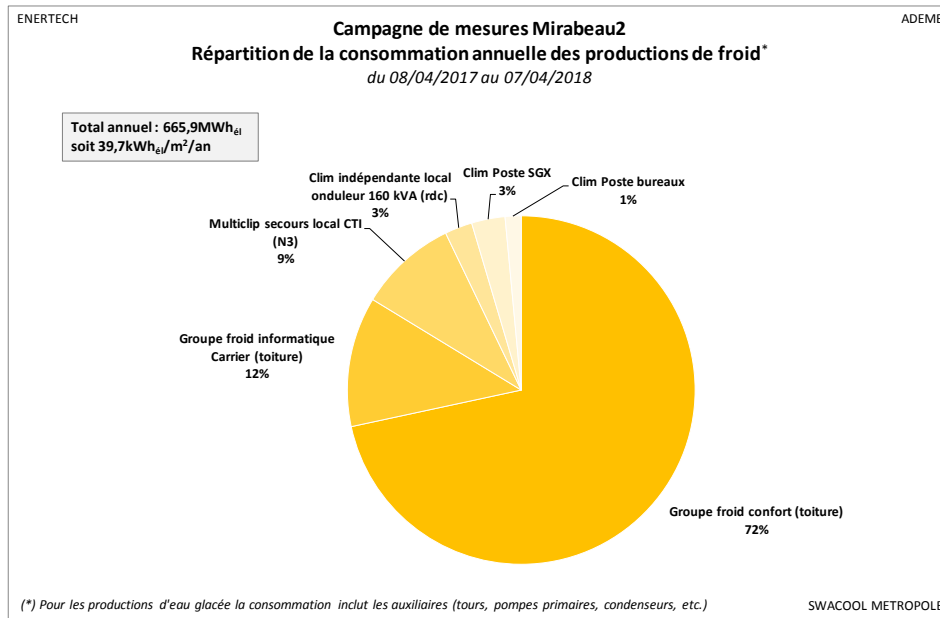


Figure 48 : Répartition des consommations électriques du poste « production de froid » du Mirabeau2.

- **Pompes de distribution (Figure 49)** : La consommation de la distribution informatique représente la moitié de la consommation totale de la distribution, ce qui n'est pas en adéquation avec la quantité de froid fournie. **Une économie significative est à chercher de ce côté** (les pompes informatiques sont en sur-débit, comme le montre le « delta T » de 1°C mesuré sur la production en toiture).

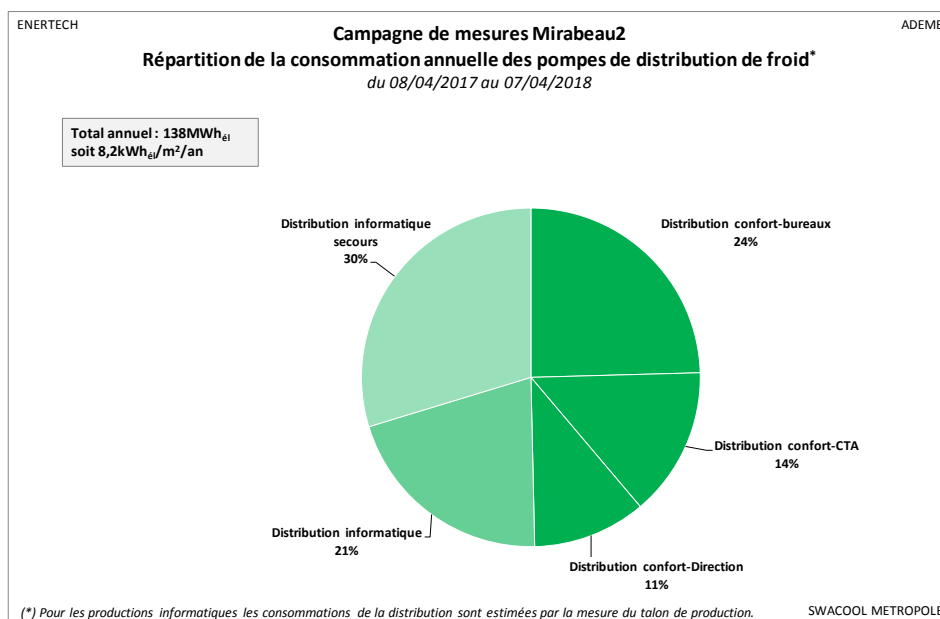


Figure 49 : Répartition des consommations électriques des pompes de distribution de froid dans le bâtiment.

- **CTA (Figure 50) :** Les CTA associées aux bureaux ne représentent que 38% du poste. On note par ailleurs l'importance de la consommation des petits extracteurs (sanitaires, archives/auditorium, fitness) avec 15% de part globale. Ceci provient du fait qu'ils ne sont jamais coupés dans l'hypothèse (très probablement réaliste) qui a été faite ici pour les inclure au bilan.

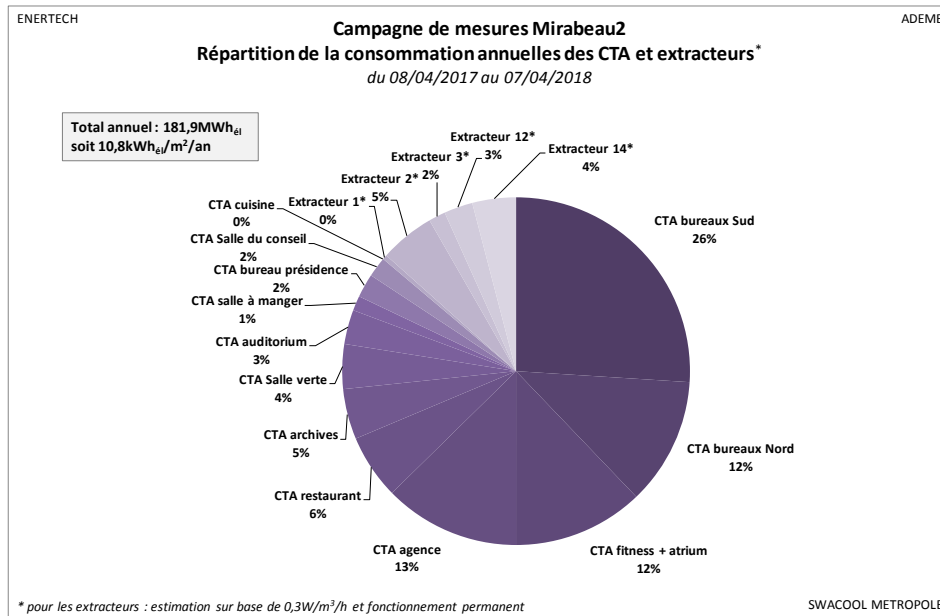


Figure 50 : Répartition des consommations électriques des CTA et extracteurs du Mirabeau2 (NB : le total affiché ici correspond au total annuel mesuré, incluant la période hivernale).

4.5 Gestion des ambiances et des émetteurs

4.5.1 Ambiances dans les bureaux

Les températures ambiantes mesurées dans quelques bureaux (Figure 51, Tableau 6) montrent des valeurs légèrement plus élevées que sur le Calypso d'environ 0.5°C en occupation, avec 25.5°C en haute saison et 24.9°C en basse saison. Les maximales observées sur la température moyenne sont de 30°C en occupation sur les deux saisons.

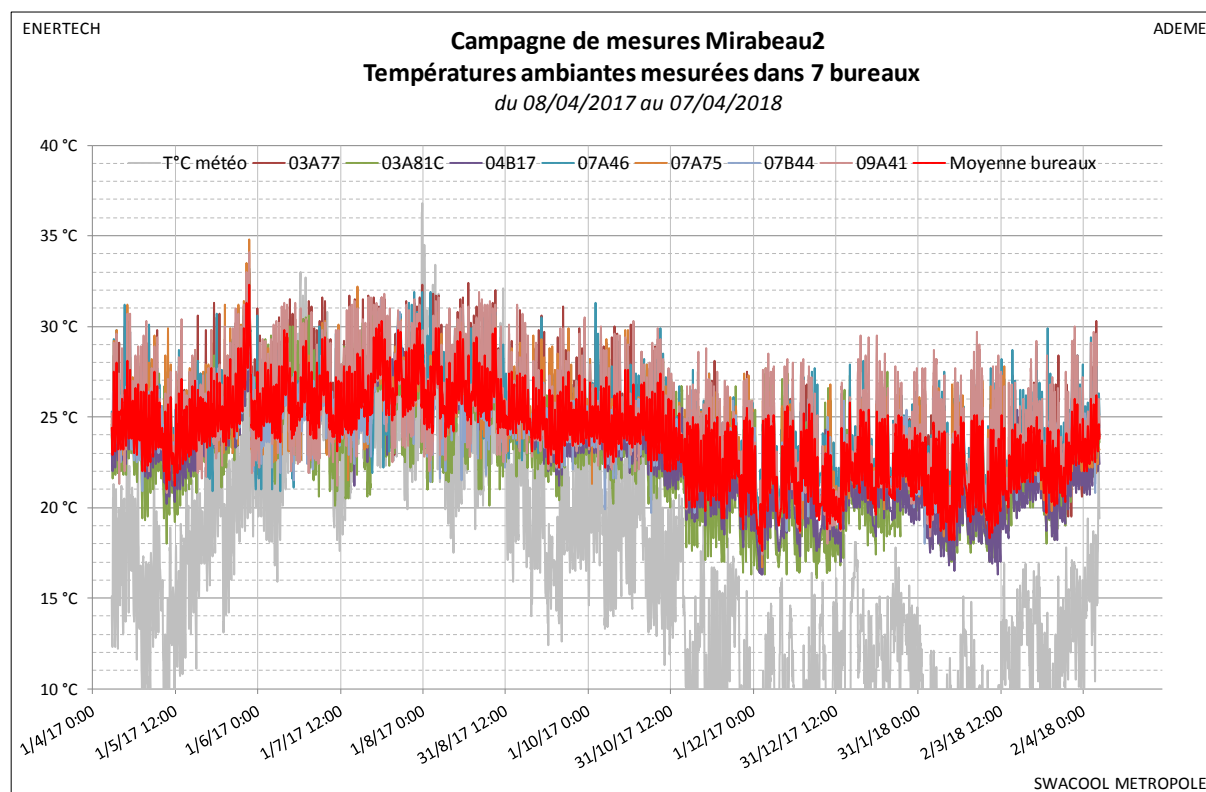


Figure 51 : Températures ambiantes mesurées dans quelques bureaux durant toute l'année de mesure.

A la différence du Calypso les ambiances moyennes en inoccupation sont légèrement plus élevées qu'en occupation (+0.2°C à 1.3°C) ce qui traduit une mise en œuvre plus stricte de l'intermittence de fonctionnement de la climatisation (voir aussi §4.2.3).

	Basse saison de clim. Avril à octobre (hors juillet-août)		Haute saison de clim. Juillet-août (2017)	
	Occupation	Inoccupation	Occupation	Inoccupation
Bureau 03A77	25,4 °C	25,7 °C	26,5 °C	27,5 °C
Bureau 03A81C	23,7 °C	24,4 °C	23,5 °C	26,2 °C
Bureau 04B17	24,5 °C	24,2 °C	25,7 °C	26,4 °C
Bureau 07A46	25,6 °C	25,5 °C	26,3 °C	27,2 °C
Bureau 07A75	24,7 °C	25,6 °C	25,6 °C	26,8 °C
Bureau 07B44	25,3 °C	24,7 °C	25,4 °C	26,2 °C
Bureau 09A41	24,9 °C	25,5 °C	25,9 °C	27,3 °C
Moyenne	24,9 °C	25,1 °C	25,5 °C	26,8 °C

Tableau 6 : Températures moyennes mesurées dans les bureaux en saison de climatisation.

4.5.2 Gestion des ventilo-convecteurs

Gestion de l'intermittence des VC

Comme évoqué au §4.2.3 l'intermittence journalière pratiquée sur la climatisation est assez marquée sur le Mirabeau2. On retrouve (assez logiquement) cette tendance sur la consommation électrique des ventilo-convecteurs comme illustré par les courbes de charges de la Figure 52, représentant l'ensemble des ventilo-convecteurs du niveau 7.

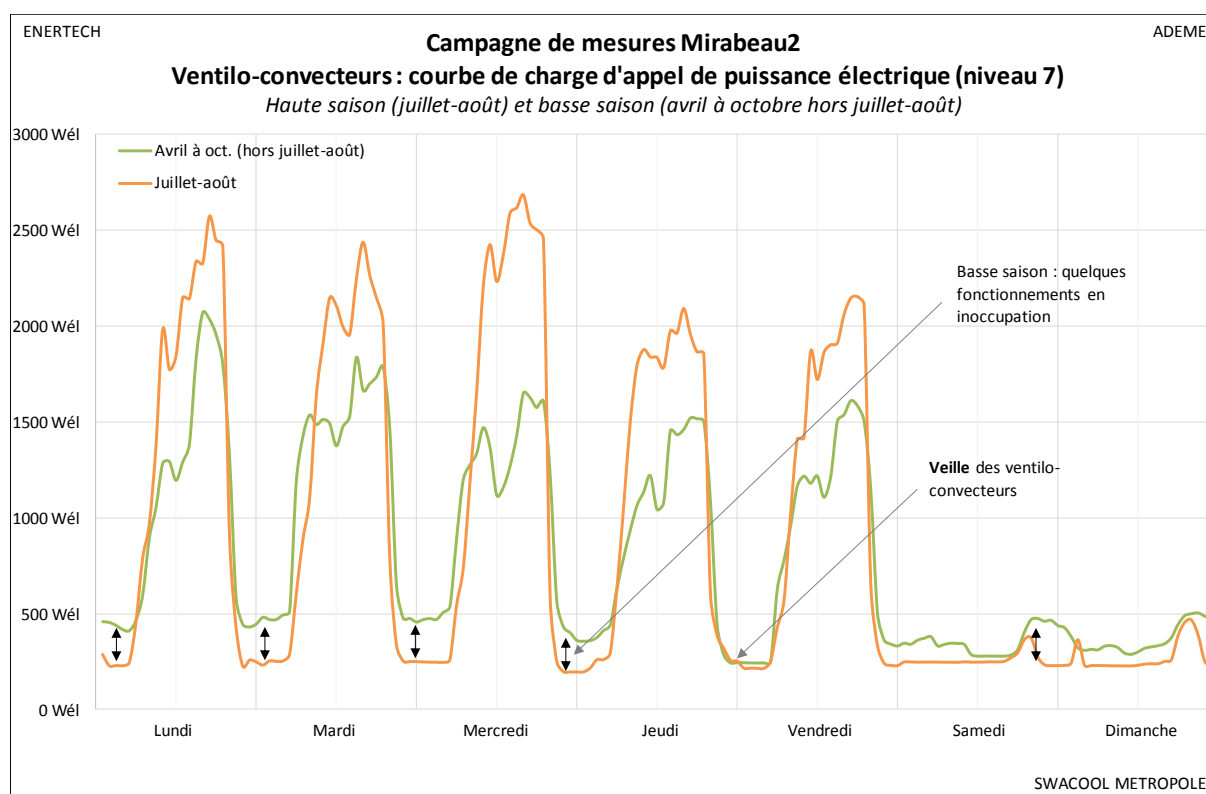


Figure 52 : Courbe de charge de la puissance électrique appelée par la somme des 4 départs généraux « ventilo-convecteurs » du niveau 7.

En haute période de climatisation (juillet-août) les ventilo-convecteurs sont rigoureusement arrêtés en inoccupation. On observe quelques exceptions en basse saison ce qui explique que la courbe de cette période soit souvent supérieure à la courbe « juillet-août » durant la nuit et les week-ends.

Il est intéressant de remarquer le talon incompressible de $250\text{W}_{\text{él}}$ qui correspond à la **somme des veilles** des ventilo-convecteurs du niveau 7. A l'échelle du bâtiment entier cette veille représenterait environ $2\text{kW}_{\text{él}}$ soit $0.75\text{kWh}_{\text{él}}/\text{m}^2/\text{an}$ en inoccupation sur toute l'année ou encore **20% de la consommation des ventilo-convecteurs en saison de climatisation** (Cf. §4.4.3). Cette veille est donc loin d'être négligeable et contribue à préférer d'autres moyens d'émission de climatisation (panneaux rayonnants, poutres froides) dans des bâtiments qui ont des objectifs ambitieux en matière de maîtrise de la demande d'électricité.

Températures de soufflage des ventilo-convecteurs

Les températures (minimum) soufflées par 11 ventilo-convecteurs sont présentées ci-dessous. On observe une moyenne des soufflages le plus froids à 13.9°C ce qui est légèrement plus froid que les températures mesurées sur les ventilo-convecteurs du Calypso (14-15°C) mais plus chaud que celles mesurées au Golden Tulip (9-11°C).

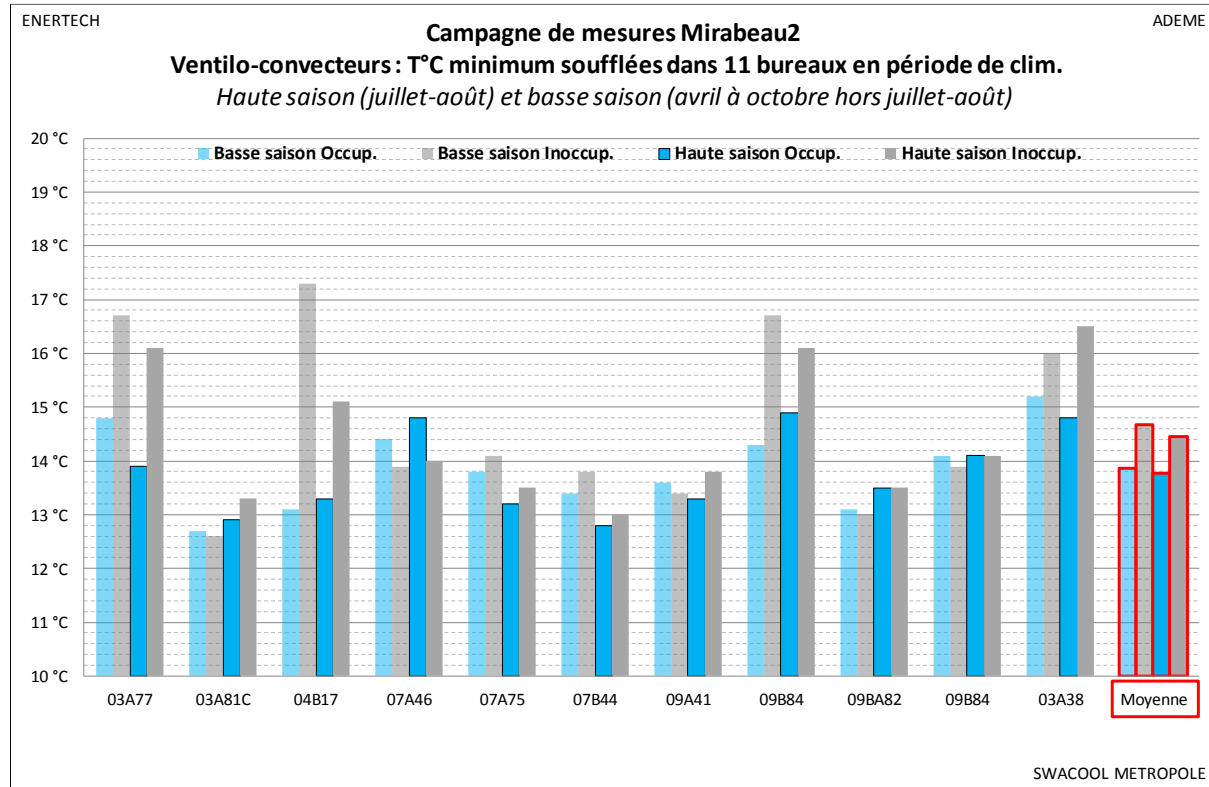


Figure 53 : Températures de soufflage de 11 ventilo-convecteurs dans le bâtiment.

Les moyennes des températures soufflées (tableau de droite ci-dessous) sont évidemment supérieures (22.2°C à 22.5°C) du fait de la modulation des ventilo-convecteurs autour de leur consigne de soufflage.

T°C soufflage MINIMUM	Basse saison avril-oct (hors juillet-août)		Haute saison Juillet-août	
	Occupation	Inoccupation	Occupation	Inoccupation
VC Bureau 03A77	14,8 °C	16,7 °C	13,9 °C	16,1 °C
VC Bureau 03A81C	12,7 °C	12,6 °C	12,9 °C	13,3 °C
VC Bureau 04B17	13,1 °C	17,3 °C	13,3 °C	15,1 °C
VC Bureau 07A46	14,4 °C	13,9 °C	14,8 °C	14,0 °C
VC Bureau 07A75	13,8 °C	14,1 °C	13,2 °C	13,5 °C
VC Bureau 07B44	13,4 °C	13,8 °C	12,8 °C	13,0 °C
VC Bureau 09A41	13,6 °C	13,4 °C	13,3 °C	13,8 °C
VC Bureau 09B84	14,3 °C	16,7 °C	14,9 °C	16,1 °C
VC Bureau 09BA82	13,1 °C	13,0 °C	13,5 °C	13,5 °C
VC Bureau 09B84	14,1 °C	13,9 °C	14,1 °C	14,1 °C
VC Bureau 03A38	15,2 °C	16,0 °C	14,8 °C	16,5 °C
Moyenne	13,9 °C	14,7 °C	13,8 °C	14,5 °C

T°C soufflage MOYENNES	Basse saison avril-oct (hors juillet-août)		Haute saison Juillet-août	
	Occupation	Inoccupation	Occupation	Inoccupation
VC Bureau 03A77	24,5 °C	26,2 °C	26,1 °C	26,7 °C
VC Bureau 03A81C	22,3 °C	24,3 °C	20,1 °C	24,1 °C
VC Bureau 04B17	22,5 °C	23,7 °C	21,2 °C	25,1 °C
VC Bureau 07A46	24,0 °C	24,3 °C	23,9 °C	25,3 °C
VC Bureau 07A75	21,8 °C	24,8 °C	23,6 °C	23,7 °C
VC Bureau 07B44	23,1 °C	24,0 °C	19,6 °C	24,3 °C
VC Bureau 09A41	21,9 °C	23,2 °C	21,5 °C	24,1 °C
VC Bureau 09B84	22,9 °C	24,8 °C	23,5 °C	25,4 °C
VC Bureau 09BA82	22,8 °C	26,1 °C	23,9 °C	25,5 °C
VC Bureau 09B84	19,3 °C	19,9 °C	19,2 °C	20,0 °C
VC Bureau 03A38	21,8 °C	24,9 °C	22,0 °C	25,8 °C
Moyenne	22,5 °C	24,2 °C	22,2 °C	24,5 °C

Tableau 7 : Températures minimum (à gauche) et moyennes (à droite) de soufflage des ventilo-convecteurs en haute et basse saison de climatisation.

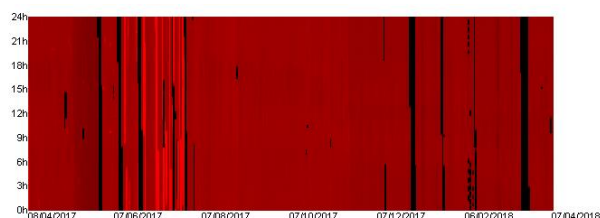
4.5.3 Gestion des CTA

Gestion de l'intermittence

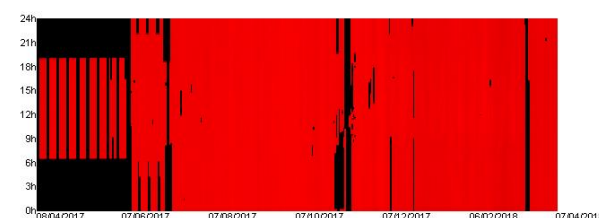
Une intermittence de fonctionnement est pratiquée dans l'ensemble sur les CTA (hors CTA bureaux nord et agence), ce qui explique que ce poste de consommation électrique soit *relativement* maîtrisée (Cf §4.4.3).

Les diagrammes d'intermittence présentés en Figure 54 (plus la couleur est proche du rouge vif plus la consommation est importante) sur les 6 CTA principales montrent toutefois de nombreuses irrégularité (volontaires ou non ?) de la gestion marche/arrêt des centrales avec des périodes d'arrêt total et des périodes de fonctionnement permanent. L'enjeu sur la charge de climatisation n'est pas nul ; il dépend bien sûr des périodes de l'année et de la bonne gestion des récupérateurs de chaleur sur les CTA qui en dépendent.

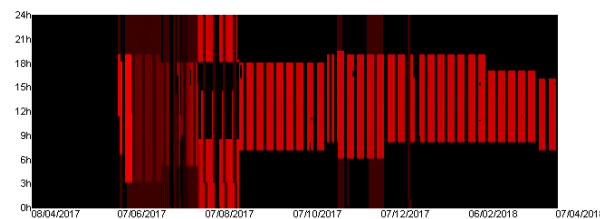
CTA bureaux nord



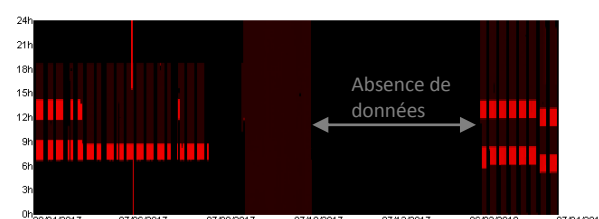
CTA agence



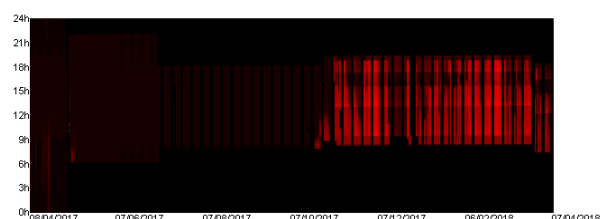
CTA bureaux Sud



CTA restaurant



CTA fitness+Atrium



CTA archives

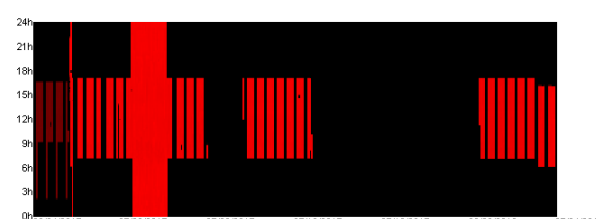
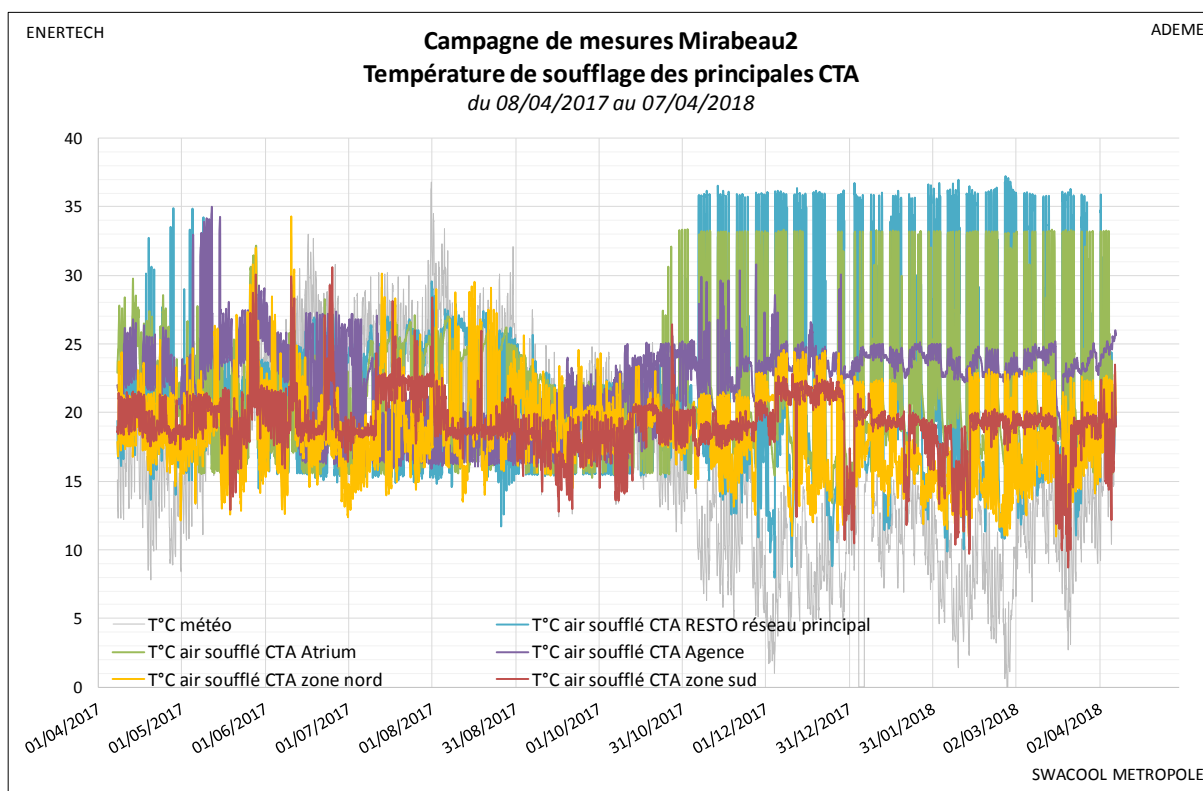


Figure 54 : Diagramme d'intermittence des 6 CTA les plus consommatrices du site pendant l'année de mesure (NB pour la lecture : en abscisse les jours de l'année, en ordonnée les heures du jour ; Code couleur : rouge vif = puissance maximale, noir = absence de consommation).

Températures d'air soufflées par les CTA

Les températures soufflées par les CTA sont présentées en Figure 55 et Figure 56. On constate une gestion très hétérogène entre les différentes CTA.

- En occupation et en basse saison de climatisation on observe une moyenne des températures soufflées de 19.8°C (18.7°C pour la CTA la plus froide et 22.6°C pour la CTA la plus chaude) ;
- En occupation et en haute saison de climatisation on observe une moyenne des températures soufflées de 19.3°C (17.1°C pour la CTA la plus froide et 21.8°C pour la CTA la plus chaude).



Les CTA sont donc très largement utilisées en période de climatisation pour rafraîchir le bâtiment et pas seulement pour souffler à température neutre. Elles soufflent en moyenne à 5°C voire 6°C de moins que les températures ambiantes des locaux.

On peut s'interroger sur la pertinence technico-économique d'apporter du froid par le biais des CTA quand on sait que la plupart sont munies d'échangeurs qui permettent de limiter l'écart entre les températures soufflées et les températures ambiantes des locaux. En effet l'apport de froid aux CTA minimise la charge moyenne à vaincre par les ventilo-convecteurs (donc multiplie les effets transitoires et courts-cycles de fonctionnement de ces derniers) et multiplie la consommation des auxiliaires et les pertes thermiques des réseaux.

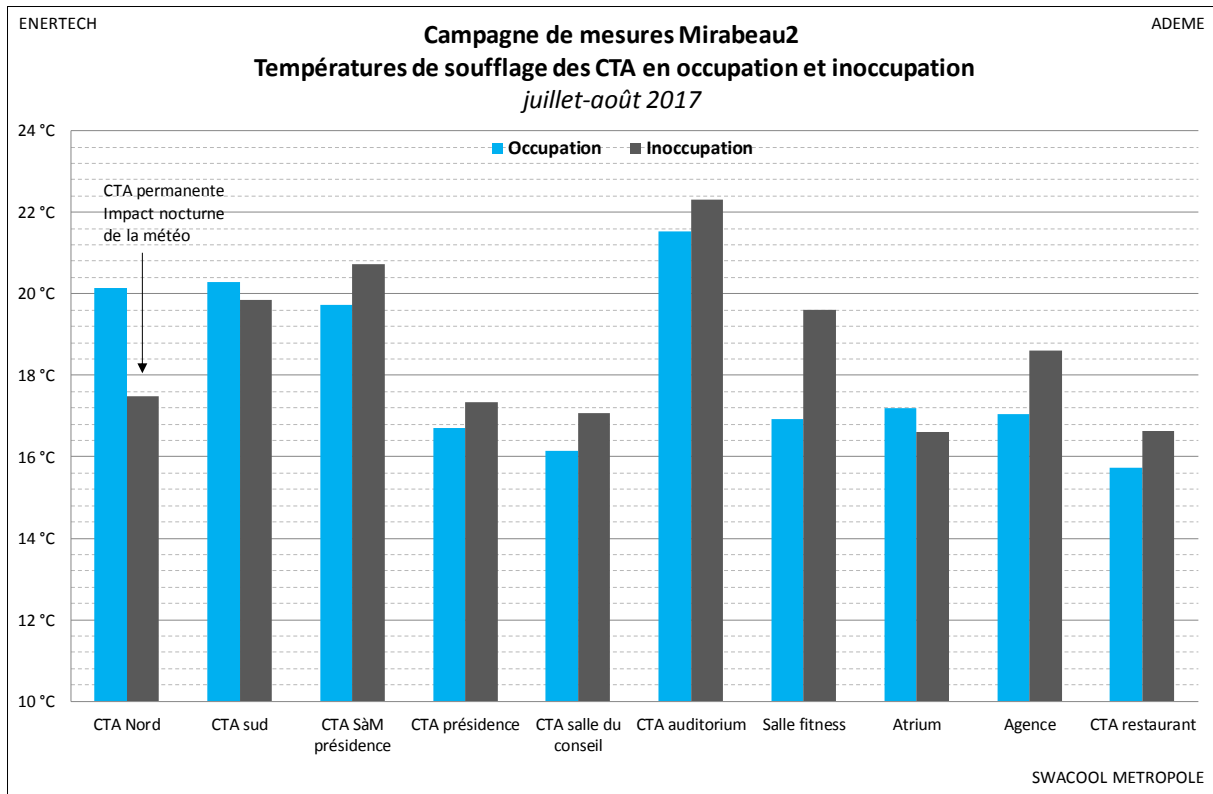


Figure 56 : Températures de soufflage des CTA en juillet-août 2017, en occupation et inoccupation des locaux.

5 Synthèse et conclusion

Rappel succinct sur le bâtiment et les installations.

Le bâtiment Mirabeau2 est un bâtiment de bureaux en R+11 de 16 780m² datant de 2002. Situé en bordure du boulevard Euroméditerranée à Marseille, il est propriété du CD13 depuis 2009. Il s'agit d'un bâtiment très vitré qui était auparavant le siège de la compagnie CMA-CGM.

Le bâtiment dispose de 6 productions de froid dont trois productions d'eau glacée et trois productions annexes à détente directe. Les deux productions d'eau glacée théoriquement les plus utilisées sont la production « confort » (3 groupes de 575kW_{froid}) située en toiture et destinée à climatiser les bureaux, et la production « informatique » (2 groupes de 80kW_{froid}) située également en toiture et destinée à climatiser le local CTI qui abrite les serveurs du département.

La production « confort », qui représente 75% du froid produit dans le bâtiment, est la production la plus détaillée dans cette étude. Ses régimes théoriques de température sont 5.5°C au départ et 11.5°C au retour. Les pompes primaires (côté condenseur et évaporateur) sont à vitesse fixe. La variation de puissance des groupes (2 compresseurs à vis et 6 paliers par groupe) est donc réalisée via une diminution de la température de retour (par recyclage dans le collecteur/bouteille) et donc une diminution du « delta T » de production.

Les régimes théoriques de température des circuits sont 6°C aller et 11°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 (« 2 tubes 2 fils ») disposent de batteries froides hydrauliques pour la climatisation et de résistances électriques pour le chauffage.
- Les CTA (centrales d'air double flux à récupération de chaleur par échangeurs à plaques) disposent de batteries chaudes électriques et de batteries froides hydrauliques. L'air soufflé est généralement gainé sur les ventilo-convecteurs.

Les débits (variables) des trois circuits sont gérés par des pompes disposant de variateurs de vitesse intégrés (dont on peut supposer un fonctionnement théorique à pression constante).

L'ensemble des consignes (températures de soufflage des CTA et de consignes des locaux) sont gérées par une GTC. Les consignes d'ambiances théoriques sont de 22°C en hiver et 24°C en été.

NB : l'ensemble des climatisations (confort, informatique, autres) sont disponibles et utilisées toutes l'année dans le bâtiment même au cœur de l'hiver.

Campagne de mesure et objectifs

Une campagne de mesure a été menée sur le bâtiment Mirabeau2 du 8 avril 2017 au 7 avril 2018 dans le but d'analyser les installations de climatisation. Enertech a procédé à la pose de 201 points de mesure à 10 minutes sur les installations techniques et dans les locaux

d'occupation. Aucune donnée GTC n'était disponible. Enfin une station météo complète et communicante a été installée dans le cadre du projet en toiture du bâtiment.

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, la monotone de puissance appelée, la signature énergétique en lien avec la météo et le pilotage des installations).
- D'étudier les régimes de fonctionnement (température, débit) en lien avec la demande de froid, en comparant si possible ces régimes aux deux autres bâtiments du projet (Golden Tulip et Calypso).
- 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

La campagne de mesures a bien fonctionné. Aucune perte de donnée majeure n'est à signaler. Le choix des débitmètres à ultrason non intrusifs sur les productions de froid s'est avéré décisif pour la réussite de la campagne. L'installation a été réalisée avec le fabricant.

Mirabeau2 - 16 780m ² Production CONFORT mesures 08/04/2017 - 07/04/2018	Froid "confort" (énergie utile)		Régime de température (de groupes à collecteurs)			Consommation d'électricité des groupes "confort" et COP global			Pompes distrib. EG	Ventilo- convecteurs
	Conso.	Pmax	T°C arrivée	T°C départ	dT prim	Conso. Élec. Incluant aux.	part des unités seules	COP global	Conso. Élec.	Conso. Élec.
avr-17	1,8 kWh/m2	272 kW	9,3 °C	9,8 °C	0,5 °C	1,1 kWhél/m2	68%	1,7	0,3 kWhél/m2	0,1 kWhél/m2
mai-17	4,3 kWh/m2	769 kW	10,7 °C	11,5 °C	0,9 °C	2,1 kWhél/m2	74%	2,0	0,3 kWhél/m2	0,3 kWhél/m2
juin-17	12,8 kWh/m2	831 kW	9,5 °C	11,2 °C	1,7 °C	5,2 kWhél/m2	70%	2,5	0,5 kWhél/m2	0,5 kWhél/m2
juil-17	10,6 kWh/m2	939 kW	8,9 °C	10,1 °C	1,2 °C	5,0 kWhél/m2	65%	2,1	0,5 kWhél/m2	0,3 kWhél/m2
août-17	11,6 kWh/m2	779 kW	8,6 °C	10,3 °C	1,7 °C	5,0 kWhél/m2	65%	2,3	0,5 kWhél/m2	0,3 kWhél/m2
sept-17	4,5 kWh/m2	589 kW	9,1 °C	9,8 °C	0,7 °C	2,7 kWhél/m2	58%	1,6	0,4 kWhél/m2	0,2 kWhél/m2
oct-17	3,4 kWh/m2	383 kW	9,7 °C	10,5 °C	0,8 °C	1,8 kWhél/m2	73%	1,9	0,3 kWhél/m2	0,1 kWhél/m2
nov-17	3,1 kWh/m2	232 kW	8,0 °C	8,7 °C	0,7 °C	1,3 kWhél/m2	62%	2,4	0,3 kWhél/m2	0,5 kWhél/m2
déc-17	2,9 kWh/m2	255 kW	8,6 °C	9,2 °C	0,6 °C	1,0 kWhél/m2	48%	3,0	0,2 kWhél/m2	1,6 kWhél/m2
janv-18	2,4 kWh/m2	228 kW	8,6 °C	9,2 °C	0,6 °C	1,0 kWhél/m2	46%	2,5	0,2 kWhél/m2	1,0 kWhél/m2
févr-18	0,5 kWh/m2	158 kW	10,4 °C	10,4 °C	0,0 °C	0,7 kWhél/m2	2%	0,7	0,2 kWhél/m2	1,7 kWhél/m2
mars-18	2,3 kWh/m2	201 kW	8,9 °C	9,4 °C	0,5 °C	1,2 kWhél/m2	57%	2,0	0,3 kWhél/m2	0,7 kWhél/m2
avr-18	0,5 kWh/m2	205 kW	8,8 °C	9,3 °C	0,5 °C	0,3 kWhél/m2	54%	1,8	0,04 kWhél/m2	0,1 kWhél/m2
Bilan annuel	61 kWh/m2 <i>(Total)</i>	831 kW <i>(Max)</i>	9,2 °C	10,0 °C <i>(Moyenne)</i>	0,8 °C	28 kWh/m2 <i>(Moyenne)</i>	64% <i>(Moyenne)</i>	2,14	4,0 kWh/m2 <i>(Total)</i>	7,4 kWh/m2 <i>(Total)</i>

(gris : extrapolé) (orange : résistance de chauffe possible)

Tableau 8 : Récapitulatif mensuel des mesures effectuées sur la production de climatisation « confort » du Mirabeau2.

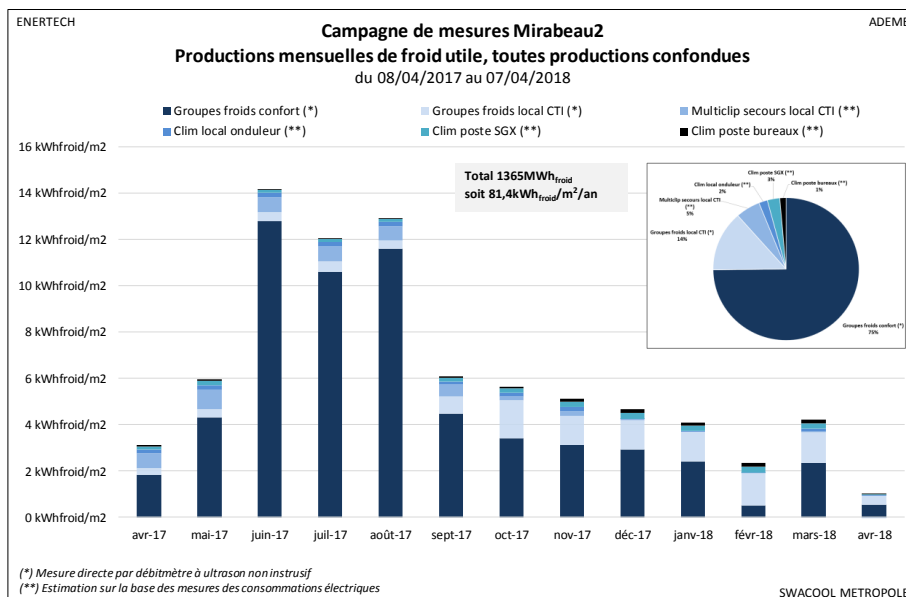
L'accès aux réseaux d'eau glacée de la production confort n'étaient pas aisé ce qui a malheureusement empêché d'instrumenter les températures de retour des circuits.

▪ 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_{clim} (base 18°C) à Marseille est l'un des plus élevés de France, deux fois plus élevé par exemple que les villes de Paris ou de Nantes. Globalement l'été 2017 à Marseille s'est trouvé dans les normales de saisons, tant pour les températures que pour l'ensoleillement.

▪ Demande de froid

La disponibilité de la climatisation est permanente sur le Mirabeau2, que ce soit pour les productions informatiques/annexes ou pour la production « confort ». Ce choix peut paraître surprenant quand on voit les températures hivernales qui règnent de novembre à février (mois au cours desquels le bâtiment consomme 20% de sa quantité annuelle de froid).



Le bâtiment a consommé, toutes productions confondues, 1365MWh_{froid} soit 81.4kWh_{froid}/m², dont 75% pour le froid « confort », du 8 avril 2017 au 7 avril 2018. Cette consommation est moins élevée que celle du Golden Tulip (88kWh_{froid}/m²/an) mais bien plus élevée que celle du Calypso (21kWh_{froid}/m²/an) qui est un bâtiment de bureaux de 9800m² situé à quelques centaines de mètres du Mirabeau2.

Cette consommation de froid est sans doute, comme sur le Calypso et le Golden Tulip, comparable en ordre de grandeur d'énergie utile, à la consommation de chaleur du même bâtiment (sachant que le chauffage électrique et l'électricité spécifique hors froid représentent par ailleurs 123kWh_{el}/m²/an).

La variabilité mensuelle de la consommation de froid est forte et liée aux DJU_{clim} de la météo avec un bon facteur de corrélation. 48% de la consommation totale de froid est réalisée de début juin à fin août (contre 70% pour le Calypso). Cette part monte à 57% pour le froid confort.

L'intermittence journalière de la production « confort » est très marquée avec une baisse de charge de l'ordre de 80% la nuit et les week-ends en saison de climatisation (plutôt 50% en hiver). C'est la plus forte intermittence observée sur les 3 bâtiments. Cette intermittence est beaucoup moins visible voire inexistante sur les productions des locaux annexes (apports internes constants, pas de soleil).

La signature énergétique journalière la plus nette, pour la production « confort », 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 les bâtiments Calypso et Golden Tulip. On constate toutefois un talon de puissance de l'ordre de $80\text{Wh}_{\text{froid}}/\text{m}^2/\text{jour}$ en hiver lorsque la température moyenne journalière est inférieure à 18°C . Ce talon représente 20 à 25% de la consommation annuelle. Nous pensons qu'il contient des pertes de distributions et des utilisations non judicieuses des ventilo-convecteurs (émission de froid et de chaud sur une même journée par exemple).

La monotone de puissance utile de la production « confort » montre un maximum annuel de $939\text{kW}_{\text{froid}}$ ce qui représente $56\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$. La dixième pointe horaire chute à $779\text{kW}_{\text{froid}}$ soit $46\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$. La puissance maximale obtenue en sommant toutes les productions de froid du bâtiment au pas de temps horaire est sensiblement identique. Ces maxima sont ailleurs plus proches des valeurs mesurées sur le Calypso ($P_{\text{max}} = 46\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2 : 10^{\text{e}}\text{valeur} = 31\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$) que de celles mesurées sur le Golden Tulip ($P_{\text{max}} = 111\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2 : 10^{\text{e}}\text{valeur} = 65\text{W}_{\text{froid}}/\text{m}^2$).

On note toutefois que deux groupes froids sont très souvent mobilisés alors que la puissance appelée est inférieure à $575\text{kW}_{\text{froid}}$ ce qui est largement préjudiciable au COP de production.

▪ Régimes de température et débits

L'instrumentation mise en place n'a pas permis d'analyser les régimes des circuits de distribution (secondaire collecteur¹⁰). En revanche le circuit primaire (entre groupes froids et collecteur) a été instrumenté en débit et en température. Les mesures permettent de faire les observations suivantes :

- La cascade des groupes est gérée vraisemblablement manuellement. Chaque groupe génère un débit d'eau glacée de l'ordre de $85\text{m}^3/\text{h}$ (constant). De juin à début septembre deux groupes sont en marche (quelle que soit la puissance appelée) si bien que le débit primaire d'eau glacée approche les $170\text{m}^3/\text{h}$ ce qui génère un fort recyclage dans le collecteur.
- La moyenne de la température de départ eau glacée (sortie groupes froids) est de 9.2°C et la moyenne de la température retour de 10°C . Le « delta T » est donc en moyenne très faible sur l'année : 0.8°C , ce qui traduit un sur-débit récurrent au primaire (ce qui vient confirmer la remarque précédente). La moyenne du « delta T » en haute saison de climatisation est de 1.5°C . On est donc loin du régime théorique 6°C - 11°C , tant du point de vue de la température de départ que de l'écart aller/retour.

¹⁰ Un bypass de gros diamètre a été installé entre le collecteur aller et le collecteur retour, si bien que ce collecteur se comporte macroscopiquement comme une bouteille de mélange, avec recyclage possible du débit primaire ou secondaire en fonction de l'équilibre des débits primaire/secondaire.

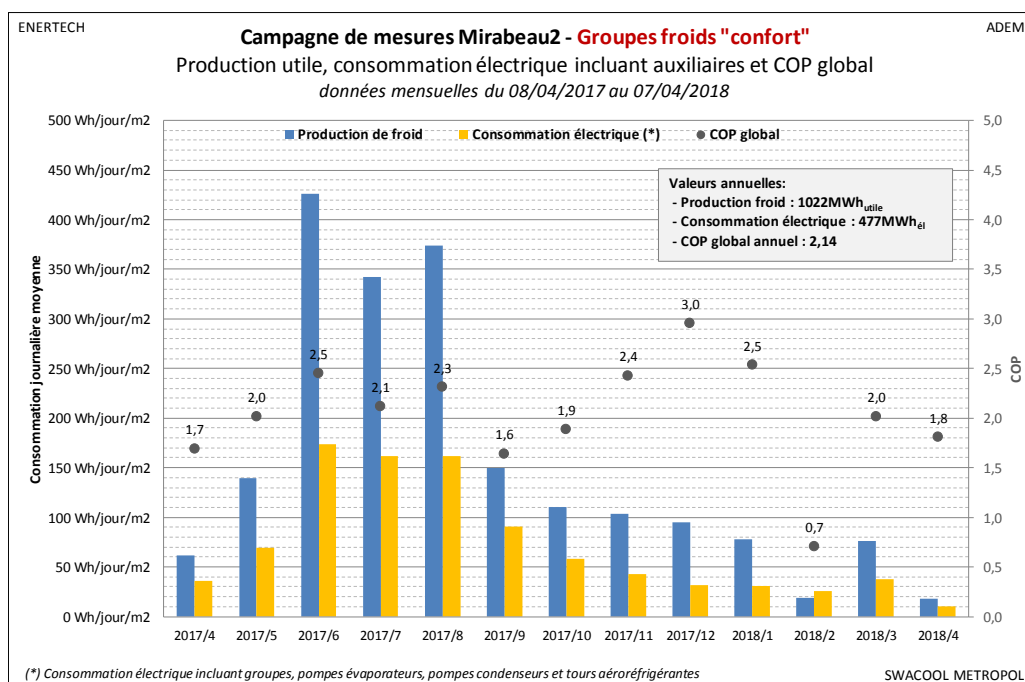
- Le fonctionnement intrinsèque de l'installation est un primaire à vitesse constante et « delta T » variable. Deux régimes sont toutefois identifiés : le régime avec un seul groupe froid en marche, qui montre des « delta T » linéaires culminant à 5°C pour 500kW_{froid} appelés ; et le régime avec deux groupes froids en marche qui montre un « delta T » linéaire deux fois plus faible, culminant à 5°C pour 1000kW_{froid} appelés (valeur maximale observée).
- Le retour eau glacée vers la production « confort » est inférieur à 15°C plus de 95% du temps. L'installation en l'état n'est donc pas compatible avec les contraintes imposées par Thassalia (retour supérieur ou égal à 15°C). Ce point est abordé plus loin.
- Côté distribution, les consommations électriques des pompes des 3 circuits montrent une variation de puissance moyenne sur le circuit bureaux (-40% en relatif de la puissance max) et très faible sur les deux autres circuits, malgré la présence de vannes deux voies sur l'ensemble des émetteurs. Les deux hypothèses que nous pouvons faire (si les pompes sont bien régulées à pression constante) sont : soit un surdimensionnement des pompes, soit un mauvais réglage des soupapes différentielles qui créent du recyclage juste en aval des pompes.

▪ COP et consommation électrique des auxiliaires

COP de la production confort

Le COP moyen annuel mesuré est de **2.14**.

Les valeurs mensuelles du COP montrent que les meilleurs COP sont atteints en novembre, décembre et janvier quand la demande de froid est encore présente et qu'un seul groupe fonctionne. Les mois de juin, juillet et août ne montrent pas des COP supérieurs du fait de la mobilisation de 2 groupes à faible puissance et des températures extérieures plus élevées.



Les auxiliaires de production : tours aéroréfrigérantes, pompes condenseur et pompes évaporateur représentent 36% de la consommation d'électricité de la production, à part sensiblement égale. Sans ces auxiliaires le COP annuel serait de 3.34.

La caractérisation du COP horaire en fonction de la puissance utile appelée montre un gain de COP de plus d'1 point en moyenne lorsqu'on fonctionne avec un seul groupe au lieu de deux (pour une même puissance utile appelée). **Fonctionner plus souvent avec un seul groupe constitue donc un enjeu d'économie d'énergie très important sur ce bâtiment.**

Lorsqu'un seul groupe fonctionne, le COP augmente en moyenne avec la puissance appelée mais la dispersion des points est surprenante et ne s'explique ni par la température extérieure ni par la température d'eau glacée. Nous pensons que cette dispersion dépend de paramètres internes au groupe (circuit compresseur moins efficace qu'un autre par exemple, paliers de puissances non équivalents, etc.) ou de dysfonctionnements côté condenseur (par exemple gestion des vannes trois voies des circuits ou gestion de l'apport d'eau dans les tours aéroréfrigérantes).

COP de la production informatique

Le COP annuel de la production informatique Carrier (en toiture) est de **2.32**. Ce COP évolue globalement linéairement avec la température extérieure.

Consommation électrique du poste climatisation et des émetteurs

La climatisation, ses auxiliaires de distribution et ses émetteurs (ventilo-convecteurs, CTA) représentent environ le tiers de la consommation d'électricité du site avec 58kWh_{él}/m²/an.

- **La production de froid et ses auxiliaires** constitue le premier poste avec **40kWh_{él}/m²/an**.
- **Les pompes de distribution** d'eau glacée (production confort, production informatique et production de secours informatique) arrivent en deuxième position avec **8.2kWh_{él}/m²/an** ce qui est très élevé pour ce poste et traduit des sur-débits récurrents, sur la production confort comme vu précédemment, mais aussi et surtout sur les deux productions informatiques qui représentent la moitié de ce poste !
- Les **CTA** et **ventilo-convecteurs** représentent respectivement **7.2kWh_{él}/m²/an** et **2.7kWh_{él}/m²/an** (hors hiver) ce qui reste maîtrisé.

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

On peut retenir sur le chapitre « ambiances et émetteurs » les éléments suivants :

Ambiances

Les températures ambiantes dans le bâtiment en période de climatisation ne sont pas particulièrement fraîches si on les compare au Calypso et *a fortiori* au Golden Tulip. La moyenne des températures s'établit autour de 25°C en basse saison de clim et 25.5°C en juillet-août.

A la différence du Calypso les ambiances moyennes en inoccupation sont légèrement plus élevées qu'en occupation (+0.2°C à 1.3°C) ce qui traduit une mise en œuvre plus stricte de l'intermittence de fonctionnement de la climatisation que dans les autres bâtiments étudiés. Ce différentiel de température entre occupation et inoccupation n'est toutefois pas spectaculaire au regard de la variation observée sur la demande de froid. Ceci s'explique par les très fortes charges de chaleur (apports internes et solaires) que doit vaincre la climatisation en occupation des locaux.

Ventilo-convecteurs

Les consommations électriques des ventilo-convecteurs montrent que les appareils sont bien arrêtés hors occupation. Elles montrent toutefois une consommation de veille importante, représentant jusqu'à 20% de la consommation électrique des appareils en saison de climatisation.

Les températures de soufflage mesurées sont de 14°C, proche des températures de soufflage mesurées sur le Calypso (14-15°C) et plus chaudes que celles mesurées sur le Golden Tulip (9-11°C).

CTA

Les CTA sont *globalement* coupées hors occupation mais de nombreuses exceptions sont constatées sur les mesures (CTA bureaux nord permanente, nombreuses séquences de fonctionnement permanent ou à vitesse réduite sur d'autres CTA). Ces exceptions engendrent des surconsommations électriques et constituent en moyenne une augmentation de charge de climatisation.

Les températures soufflées par les CTA sont très hétérogènes mais la moyenne mesurée est autour de 19°C ce qui montre que les CTA contribuent largement au rafraîchissement du bâtiment. On peut s'interroger sur la pertinence de cette stratégie (multiplication des auxiliaires et des réseaux pour apporter le froid, climatisation persistante en cas d'oubli d'arrêt de la CTA, baisse de la charge de climatisation des ventilo-convecteurs donc multiplication des courts-cycles). On note à ce sujet que les CTA du bâtiment Calypso n'ont pas de batteries froides.

Optimisation du raccordement à Thassalia ?

Nous nous concentrons ici sur les optimisations à envisager sur le réseau de climatisation « confort » dans l'éventualité (étudiée par le maître d'ouvrage en 2018) de raccorder les installations au réseau Thassalia.

NB : les productions informatiques sont volontairement écartées du sujet, d'une part parce qu'elles constituent une faible part de la consommation de froid, d'autre part parce que le maître d'ouvrage envisage leur suppression pour passer en rafraîchissement naturel.

La campagne de mesure menée sur le réseau « confort » nous permet d'envisager plusieurs pistes d'optimisation dans le but d'un raccordement à un réseau de froid vertueux :

1. Minimiser la consommation de climatisation et limiter la période de climatisation.

Les pistes d'optimisation sont :

- Exclure la période hivernale dans la mise à disposition du froid (a minima novembre à février). Etudier si besoin la mise en place de films solaires intérieurs (type IR50) en façade ouest ; envisager la mise en place d'actions de MDE (Maîtrise de la Demande d'Electricité) notamment sur l'éclairage et l'informatique ;
- (CTA) : Etudier la possibilité de se passer de batteries froides sur les CTA, comme cela est fait sur le bâtiment Calypso, pour concentrer la charge sur les ventilo-convecteurs.
- (CTA) : Procéder à un arrêt plus systématique des CTA hors occupation, sauf en cas de nécessité de rafraîchissement passif.
- (Ventilo-convecteurs et CTA) : Configurer une zone d'exclusion de plusieurs semaines entre climatisation et chauffage. Il ne doit pas être possible de rafraîchir puis chauffer au cours d'une même journée.

2. Les réseaux ont été conçus pour fonctionner en régime 6°C-11°C. Un raccordement à Thassalia nécessiterait un régime de fonctionnement proche de 7°C-15°C.

- Une température de départ de 7°C ne devrait pas poser de problème puisque le départ moyen mesuré est actuellement de 9.2°C avec un départ à 8-8.5°C en haute saison de climatisation).
- En revanche un retour à 15°C sous-entend une diminution du débit dans toutes les batteries froides (« delta T » de 8°C au lieu d'un « delta T » de 5°C). Ce point n'est pas nécessairement bloquant mais doit être étudié.
- Un dispositif amont (sur le primaire entre échangeur Thassalia et circuits d'eau glacée) peut permettre de rehausser le régime de température si le retour est inférieur à 15°C. L'installation du Golden Tulip utilise une vanne-deux voies de recyclage pilotée en 0-10V sur la température de retour. Il est aussi possible de mettre en place une vanne trois voies qui assure la même fonction.

3. La gestion des débits des circuits doit être améliorée. La variation de débit sur le circuit « bureau » est existante mais assez faible (-40% sur le débit). Les variations sur les deux autres circuits sont quasiment inexistantes. Il faut revoir le dimensionnement des pompes et le réglage des soupapes différentielles. Les vannes-deux voies déjà en place devraient permettre une variation de débit plus significative (-70% observé sur la variation de débit des circuits du Golden Tulip).

4. Enfin le débit primaire (entre futur échangeur Thassalia et collecteur de distribution) doit être minimisé. Il est actuellement très élevé de par le fonctionnement à vitesse constante des pompes « évaporateur » des groupes froids. Deux schémas sont possibles :

- Absence de pompe primaire (comme cela est fait sur le Golden Tulip) : le débit d'eau glacée est donc minimisé une fois qu'on a optimisé les débits de distribution ;
- Mise en place d'une pompe primaire (en remplacement des pompes « évaporateur » actuelles). Dans ce cas il faut que cette pompe soit à variation de vitesse. Son pilotage doit assurer un léger sur-débit par rapport au débit de distribution. Ceci peut être fait simplement en s'assurant que le retour vers l'échangeur est toujours 0.5°C ou 1°C plus froid que la température de retour des circuits, ce qui garantit un très léger recyclage du primaire dans le collecteur et donc une bonne mise à disposition de la température. NB : dans ce cas, la gestion d'un retour supérieur à 15°C peut être faite dans V2V ou V3V, simplement par gestion de la pompe primaire (diminution du débit primaire => recyclage au secondaire => augmentation du régime secondaire => retour plus chaud).

Conclusion générale

Le bâtiment Mirabeau2 est un gros consommateur de climatisation : trois à quatre fois plus consommateur par unité de surface que le bâtiment Calypso qui abrite également des activités de bureau et se trouve à quelques centaines de mètres seulement du Mirabeau2.

Le COP de production de son réseau principal de climatisation est de 2.1 ce qui est inférieur au COP de production Thassalia¹¹, avec un coût de maintenance des groupes vraisemblablement supérieur à celui d'une sous-station. Ce COP pourrait néanmoins être amélioré d'au moins 1 point avec une meilleure gestion de la cascade des groupes, une variation de vitesse sur ses pompes primaires et une meilleure gestion marche/arrêt des auxiliaires côté condenseur.

La connexion du Mirabeau2 au réseau Thassalia pour la production de climatisation est techniquement possible mais devrait être accompagnée d'une politique de réduction du besoin de froid pour la cohérence de la démarche. Cette réduction doit passer en priorité :

- Par une réduction des apports internes de chaleur : un programme de maîtrise de la demande d'électricité permettrait de les réduire de manière importante compte tenu des ratios de consommations actuels du bâtiment. Les usages à étudier sont principalement l'éclairage et la bureautique.
- Par une réduction des apports solaires, notamment sur la façade ouest. La piste technique d'un film solaire intérieur (type IR50) peut être par exemple étudiée.

¹¹ En décembre 2017 Thassalia évoquait au cours d'un échange technique dans le cadre du projet Swacool, un COP moyen annuel de production d'eau glacée de 3 avec un objectif à 4 voire 5 quand un lus grand nombre de bâtiments sera connecté au réseau. Le COP instantané monte à 10. Par ailleurs Thassalia mettait en avant à cette date le fait de n'utiliser que 200gr de fluide frigorigène par kW de froid installé.

C'est à travers cette réduction du besoin que le bâtiment doit envisager de restreindre sa saison de climatisation à quelques mois tandis que la climatisation est actuellement utilisée toute l'année.

Sur le plan purement hydraulique, la connexion du Mirabeau2 au réseau Thassalia devra s'accompagner d'une diminution du débit d'eau glacée dans les émetteurs qui ont été dimensionnés pour un régime 6°C-11°C (quand la connexion à Thassalia demandera plutôt un régime 7°C-15°C).

Un dispositif doit également être prévu, comme sur le Golden Tulip, pour limiter les retours froids à l'échangeur et ainsi éviter des pénalités. Ce dispositif aura pour effet de relever la température de départ en cas de retour froid, ce qui augmentera la température de retour. Plusieurs schémas sont possibles :

- Schéma type « Golden Tulip » : les pompes de distribution « tirent » directement sur l'échangeur via un collecteur. Mise en place d'une vanne deux-voies ou trois-voies de recyclage commune aux trois circuits (schéma Golden Tulip) ou indépendante par circuit de manière à éviter de remonter la température de départ d'un circuit qui ne présente pas de retour froid.
- Bouteille intermédiaire permettant de conserver le schéma actuel. Une pompe primaire à variation de vitesse serait alors nécessaire entre l'échangeur Thassalia et la bouteille. Cette pompe serait pilotée de manière à maintenir léger sur-débit en temps normal (pour que la température d'eau glacée soit bien transmise aux circuits), mais un sous-débit en cas de retour trop froid à l'échangeur, qui aurait le même effet que les vannes deux voies ou trois voies de la solution précédente. Cette dernière solution a l'avantage de découpler les circuits hydrauliquement ce qui rend plus aisée la mise au point et permet un fonctionnement plus stable des réseaux de distribution.