



HAL
open science

Valorisation énergétique d'un local informatique par free cooling

Philippe Egea, Olivier Fruchier

► To cite this version:

Philippe Egea, Olivier Fruchier. Valorisation énergétique d'un local informatique par free cooling. JRES (Journées réseaux de l'enseignement et de la recherche) 2017, Renater, Nov 2017, Nantes, France. hal-04806758

HAL Id: hal-04806758

<https://hal.science/hal-04806758v1>

Submitted on 27 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Valorisation énergétique d'un local informatique par *free cooling*

JRES 2017

Olivier FRUCHIER

Laboratoire Promes
Tecnosud,
Rambla de la thermodynamique
66100 PERPIGNAN

Philippe EGEA

Laboratoire Promes
Tecnosud,
Rambla de la thermodynamique
66100 PERPIGNAN

Résumé

Notre laboratoire PROMES, UPR 8521 du CNRS, est spécialisé en énergie solaire et en optimisation énergétique. Indispensable au maintien de bonnes conditions de fonctionnement des équipements informatiques des centres de données, la climatisation est un poste particulièrement énergivore. L'originalité de ce projet est de démontrer qu'un système de *free cooling* à air direct, dans une région méditerranéenne, peut être efficace dans un centre de données de proximité sans remettre en cause la structure de base existante. Nous donnerons notre retour d'expérience sur une année complète après l'installation de notre système. Nous présenterons notre système de *free cooling* commandé par un Raspberry et un programme Python. Ainsi, notre expérience vise à répondre aux questions suivantes :

- Est-il possible de refroidir une salle informatique polyvalente par *free cooling* si les flux d'air ne sont pas clairement canalisés ?
- Est-il possible de réchauffer notre bâtiment avec l'air chaud généré par l'informatique sans gêner les usagers du bâtiment ?
- Quelles sont les économies énergétiques et financières réalisées ?
- Comment se comporte ce système avec des climatiseurs existants lors des journées chaudes ?
- Comment recevoir des messages en cas de panne de rafraîchissement ?
- Quelle est la robustesse du système ?

Mots-clefs

« *free cooling* », « *data centre* », « *datacenter* », « *centre de données* », « *Raspberry* », « *PUE* », « *Green Building* »

1 Introduction : Pourquoi le *free cooling* ?

En 2005, la consommation électrique des data centres (ou datacenters) représentait 1% de la consommation électrique mondiale [1]. Entre 2007 et 2012, celle-ci a augmenté de plus de 50% et la consommation électrique des data centres est évaluée à 1,8% de la consommation mondiale [2]. Avec la

hausse du coût de l'électricité, la facture énergétique des centres de données s'alourdit au fil des années. La densité de puissance des équipements installés a été multipliée par 16 depuis 1992.

L'impact écologique des data centres est loin d'être négligeable. Publiée en 2008 par ClimateGroup, l'étude Smart 2020 [3] soulignait que les émissions de gaz à effets de serre liés aux centres de données devraient augmenter de 7% par an jusqu'en 2020, et qu'elles devraient atteindre 12% des émissions de CO2 à travers le monde. Simultanément, le nombre de centres de données devrait augmenter de 9% par an sur cette période. Il est important de souligner qu'au niveau mondial, les centres de données sont responsables d'une empreinte carbone plus importante que celles de certains pays comme l'Argentine ou les Pays-Bas.

De plus, il faut aussi remarquer que la moitié de la consommation électrique d'un data center est due au seul refroidissement des dispositifs informatiques, particulièrement celui des serveurs : *Figure 1*, [13].

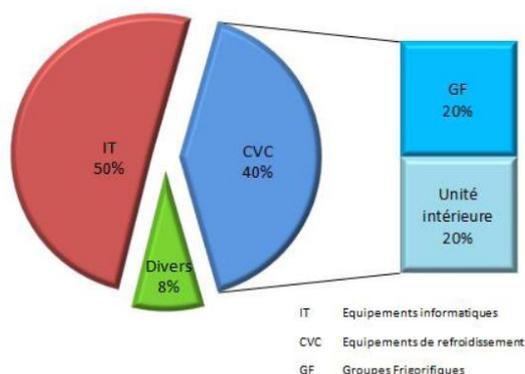


Figure 1 - Répartition des postes consommateurs d'énergie dans un Data Center[13]

Indispensable au maintien de bonnes conditions de fonctionnement des équipements informatiques des centres de données, la climatisation est un poste particulièrement énergivore, jusqu'à 50% des consommations. Dans ce contexte, le *free cooling* – locution anglophone signifiant littéralement rafraîchissement gratuit – apparaît être une méthode à privilégier. Cette méthode de rafraîchissement est économique, car elle utilise la différence de température entre l'air de sortie des ordinateurs et la température de l'air extérieur afin d'aider, voire de remplacer le système de refroidissement par détente. Le principe général consiste à faire circuler de l'air extérieur dans la pièce à refroidir lorsque la température extérieure passe en dessous d'une température de consigne. Ces systèmes sont quelquefois installés dans l'industrie et dans les centres de traitement de données économes en énergie.

2 Taille énergétique et mesure des performances des data centres

The Green Grid a défini entre autres le *Power Usage Effectiveness (PUE)* pour calculer l'efficacité énergétique d'un data center [4, 5, 8] :

$$PUE = \frac{\text{Energie totale consommée par le datacenter}}{\text{Energie utilisée par les équipements informatiques}}$$

Par définition, ce rapport ne peut être inférieur à 1. D'un point de vue énergétique, un PUE de 1 représenterait une efficacité optimale pour le data center. Une ancienne installation aura un PUE proche de 2 et une nouvelle installation proche de 1,2 [7].

Le PUE n'est pas toujours satisfaisant, car il ne tient pas compte de notion de travail utile [7] mais aussi de l'énergie revalorisée. Aussi, depuis janvier 2013, l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) a défini un nouvel indicateur d'efficacité pour les data centres appelé le DCEM (*Data Center Energy Management*) [4]. Il définit l'indicateur d'efficacité énergétique KPI_{DCEM} qui est composée de deux grandeurs : DC_G et DC_P Figure 2 (a) :

- La première, DC_G , permet de définir la "taille" d'un data center par rapport à sa consommation énergétique. Elle dépend uniquement du KPI_{EC} .
- La seconde, DC_P , définit la performance énergétique du data center pour une "taille" donnée. Elle est calculée par le biais de la formule suivante :

$$DC_P = KPI_{TE} \times (1 - W_{REUSE} \times KPI_{REUSE}) \times (1 - W_{REN} \times KPI_{REN})$$

Où W_{REUSE} et W_{REN} sont des facteurs correctifs compris entre 0 et 1 qui dépendent de la "taille" du data center, la valeur par défaut étant 0,5.

Les différents termes intitulés KPI en GWh sont calculés sur une année et sont définis ci-dessous :

- KPI_{EC} : énergie totale consommée par le data center ;
- KPI_{TE} : définition du PUE introduite ci-dessus ;
- KPI_{REUSE} : fraction de l'énergie réutilisée par le data center sur l'énergie totale consommée;
- KPI_{REN} : fraction de l'énergie provenant de sources renouvelables sur l'énergie totale consommée par le data center

La jauge DC_G , *Data centre Gauge*, détermine la taille énergétique d'un data centre par rapport à sa consommation annuelle moyenne, en GWh. Quatre tailles sont définies de la plus petite *S* pour *Small* à la plus grande *XL*. KPI_{EC} détermine l'énergie totale consommée par le data centre [8] Figure 2 (b).

DC_G	KPI_{EC} range
S	$KPI_{EC} \leq 1$ GWh
M	$1 \text{ GWh} < KPI_{EC} \leq 4$ GWh
L	$4 \text{ GWh} < KPI_{EC} \leq 20$ GWh
XL	$KPI_{EC} > 20$ GWh

(a) "Tailles"

DC commissioning date	since 2005 (see note)		before 2005 (see note)	
	DC_P		DC_P	
Class	\geq	$<$	\geq	$<$
A		0,70		1,00
B	0,70	1,00	1,00	1,40
C	1,00	1,30	1,40	1,70
D	1,30	1,50	1,70	1,90
E	1,50	1,70	1,90	2,10
F	1,70	1,90	2,10	2,30
G	1,90	2,10	2,30	2,50
H	2,10	2,40	2,50	2,70
I	2,40		2,70	

NOTE: Year of Kyoto Protocol entering into force.

(b) Classes de DC_P

Figure 2 - "Tailles" et classes de l'indicateur d'efficacité énergétique DCEM [4]

3 La pertinence du *free cooling* dans les data centres des laboratoires

Il existe plus d'un millier de laboratoires de recherche affilié au CNRS, UMR et UPR. Nous avons demandé au groupe de discussion ASR de nous donner la taille de leur salle machine/technique. Il apparait en majorité que les data centres des laboratoires sont de tailles *Small* au sens du DC_G . Ce résultat reste malgré tout approximatif et une étude plus poussée serait nécessaire pour connaître exactement la taille de nos laboratoires de recherche.

En attendant que se généralise la télégestion des serveurs dans des data centres *XL*, les petits data centres locaux continuent d'exister et sont souvent adaptés. Ce fut la conclusion de la journée *Edge Datacenters* organisée par EcoInfo du 16 mars 2017 [12].

4 Contexte à PROMES

4.1 Naissance du projet et dimension pédagogique

Le projet *free cooling* est né de la synergie suivante : la demande de la part du service informatique du laboratoire PROMES-CNRS d'un souhait d'économiser l'énergie électrique consommée par le système de climatisation de la salle informatique du laboratoire et de l'offre en termes de ressources humaines et techniques que représentent les projets pédagogiques. Ainsi, ce projet a été initié dans le cadre de l'enseignement informatique industrielle en troisième année de la licence *Science Pour l'Ingénieur (SPI)* à l'*Université Via Domitia (UPVD)* de Perpignan. Il a été proposé de mettre en place un système de free cooling dans le local informatique d'un laboratoire de recherche (Laboratoire PROMES CNRS UPR 8521).

4.2 Problématique

Le centre de données du laboratoire sur Perpignan est un local de 10m² d'informatique et d'ingénierie. Ce local est refroidi par deux climatiseurs qui fonctionnent en permanence : été comme hiver. Le souhait de mettre en place un tel système provient du constat simple que l'air extérieur pourrait suffire à refroidir la pièce informatique du laboratoire principalement durant la période hivernale.

Constitué dans la fin des années 2000 ce local, en partage avec des onduleurs photovoltaïques et adapté à des fins de recherches, a fortement évolué en ne suivant pas des standards de normalisation informatique.

Il est maintenant composé d'une armoire contenant des matériels actifs réseaux (commutateurs et routeurs), une armoire comprenant dix serveurs informatiques, un onduleur 30KVA pour pallier les pannes EDF ainsi que des onduleurs pour des panneaux photovoltaïques. Notre salle en termes de taille est classée SMALL au sens du DC_G *Figure 2 (a)*.

Aussi, ces éléments composent un ensemble hétérogène non compartimenté en termes de flux d'air. Cette pièce est située au premier étage du bâtiment et possède l'avantage d'avoir un mur mitoyen avec l'extérieur. Le défi est donc de pouvoir refroidir cette pièce sans remettre en cause l'organisation technique de la salle.

Ainsi, notre projet vise à répondre aux questions suivantes :

- Est-il possible de refroidir une salle informatique polyvalente par *freecooling* si les flux d'air ne sont pas clairement canalisés ?
- Est-il possible de réchauffer notre bâtiment avec l'air chaud sans gêner les usagers du bâtiment ?
- Quelles seraient les économies énergétiques et financières réalisées ?
- Comment se comporte ce système avec des climatiseurs existants ?
- Comment monitorer ce système de refroidissement ?

Toutes ces questions nous ont conduits naturellement à développer un projet pédagogique pluridisciplinaire et de recherche associant des aspects de thermiques, électroniques, informatique industrielle, et enfin de programmation.

4.3 ASHRAE

La norme ASHRAE de l'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* [9,10] est établie et reconnue par de nombreux fabricants d'équipements informatiques. Toutefois, les plages climatiques telles qu'elles sont définies dans la norme ASHRAE conduisent à une surconsommation du système de conditionnement d'air. Une solution pour améliorer l'efficacité énergétique serait donc d'élever la température de consigne de la climatisation afin de diminuer la puissance de froid nécessaire au refroidissement des équipements informatiques [8].

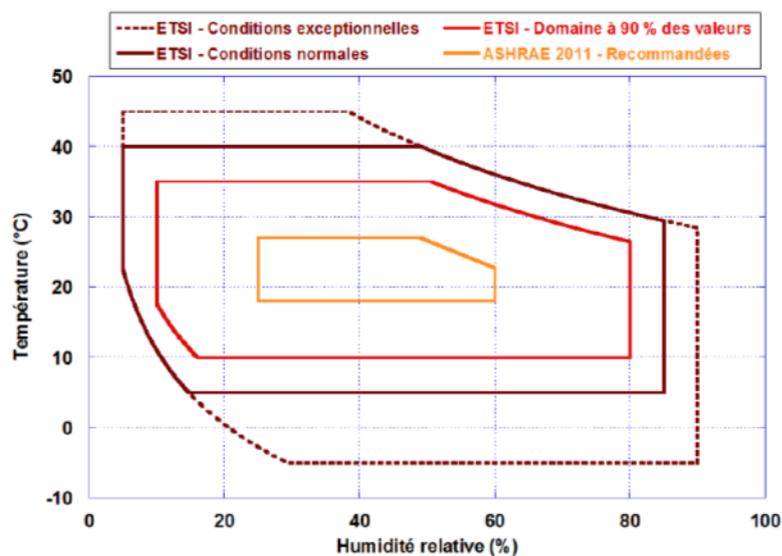


Figure 3 - Diagramme des normes des plages climatiques des équipements électroniques

Ainsi nous avons retenu une température de consigne de 24° à mi-hauteur de notre baie de serveur et des conditions de 60% d'humidité. Il est à noter que 24° est la température à la mi-hauteur de notre baie et que les températures constatées en haut de la baie sont de l'ordre de 27°. Si notre système de *free cooling* ne permet pas de rester dans les normes choisies, la climatisation prend le relais et le système *free cooling* s'arrête.

5 Etude du projet

5.1 Étude électrique et thermique

Afin de déterminer la puissance thermique dissipée dans la salle informatique, nous avons considéré les puissances électriques de chaque appareil présent dans la salle. Cela nous a donné une idée de la puissance thermique maximale à évacuer de la salle. Après un relevé des puissances nominales des appareils, il apparaît que la totalité des serveurs informatiques produit une puissance thermique de 5kW. Dans la salle, sont également présents cinq onduleurs photovoltaïques et un onduleur de sécurité de 30kVA ; nous pouvons estimer la production thermique, liée aux pertes de ces éléments, à environ 2kW thermiques. Au total, la pièce informatique dissipe 8kW modulés par l'utilisation des ordinateurs pour effectuer des calculs ou par les onduleurs photovoltaïques dont l'échauffement varie avec l'ensoleillement.

Ainsi, si l'on considère la consommation électrique journalière à la moitié de la puissance nominale, la pièce produit environ 100kWh thermiques par jour. La climatisation ayant un COP (Coefficient de Performance) de facteur 3, elle consomme 33kWh/jour, soit 12MWh par an.

5.2 Etude climatique

Conformément aux recommandations de l'ASHRAE et de l'ETSI, *Figure 3* nous avons fixé à 24° la température de consigne mesurée en face avant et à mi-hauteur de la baie informatique. Cette température de consigne est semblable à celle fixée par un thermostat d'ambiance. Aussi, pour faire fonctionner notre système, nous avons besoin d'une température extérieure maximale de 20°, soit 4° de moins que la consigne. Ainsi notre maximum de température extérieure admise est de 24° et nous n'avons pas fixé de minimum.

Nous avons observé les températures minimales et maximales moyennes à Perpignan. En effet, les températures maximales nous permettent de prévoir les plages de fonctionnement pour la période estivale critique.

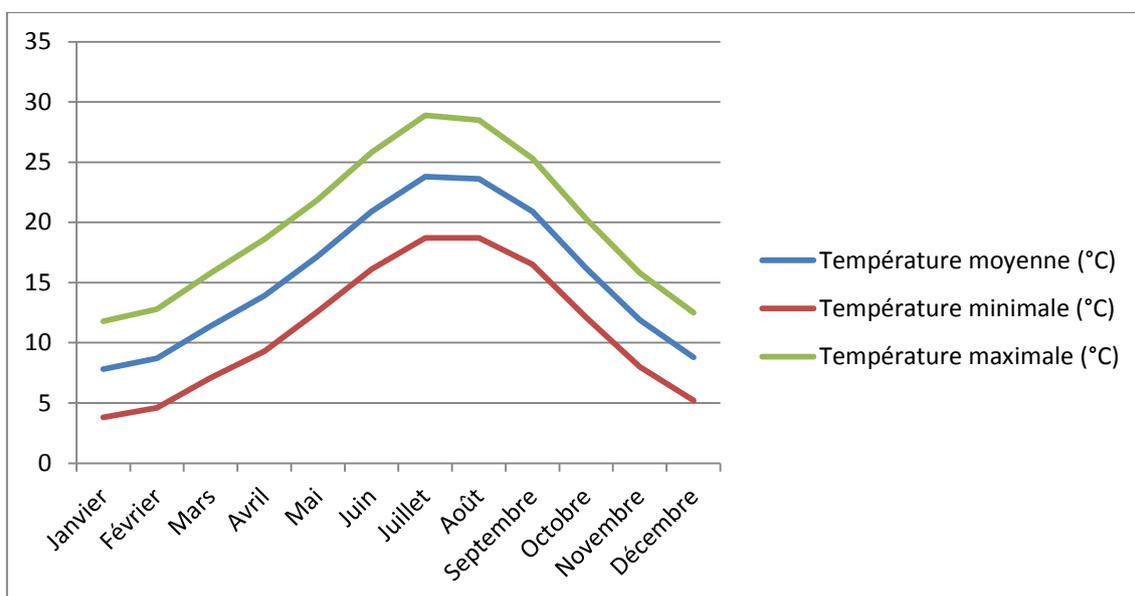


Figure 4 - Température moyenne sur Perpignan, source :<https://fr.climate-data.org>

5.3 Etude Aérodynamique

La pièce informatique possédant un volume de 25m^3 et si nous souhaitons un renouvellement de l'air de la pièce toutes les 5 minutes, il faut alors un débit d'air de $300\text{m}^3\text{h}^{-1}$ pour ventiler la pièce. Le choix d'un ventilateur de $830\text{m}^3\text{h}^{-1}$ (débit maximal), bien au-dessus de ce qui est nécessaire, a été fait pour compenser les pertes de charge des filtres et des grilles de ventilations. Cela permettra faire fonctionner ce ventilateur avec un variateur, à des débits plus faibles pour diminuer la consommation électrique. Ce ventilateur possède un diamètre de conduite de 200mm, ce qui est conforme compte tenu du débit d'air de $300\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

6 Réalisation

6.1 Electronique embarquée et réseau de capteurs

Dans le cadre du projet, le choix d'utiliser une carte *Raspberry Pi* a été fait. Une multitude de tutoriels sont présents sur le web ainsi que des forums d'entraide, etc. Le *Raspberry Pi* est un nano-ordinateur mono carte à processeur ARM il a la taille d'une carte de crédit, et est destiné à encourager l'apprentissage de la programmation informatique ; il permet l'exécution de plusieurs variantes du système d'exploitation libre GNU/Linux et des logiciels compatibles.

Pour réguler la température de la pièce, il est nécessaire de connaître la température à l'intérieur, mais aussi à l'extérieur de la pièce. Ainsi un réseau de capteurs a été réalisé en utilisant le protocole I2C et connecté au port GPIO de la carte. Trois capteurs : extérieur, intérieur de la pièce et bâtiment sont suffisants pour permettre la régulation des deux ventilateurs. Un ventilateur puissant extrait l'air vers l'extérieur du bâtiment et un ventilateur silencieux et moins puissant extrait l'air chaud dans le bâtiment. Un boîtier de commande permet aussi de contrôler la puissance du ventilateur extérieur : *Figure 5*.

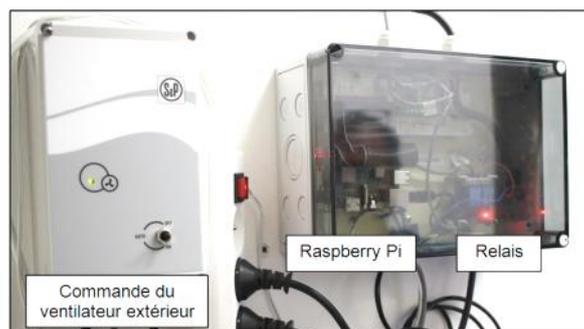


Figure 5 - Boîtiers de commande électronique embarquée

6.2 Ouvertures dans le bâtiment et filtrage

Le mur a été percé deux fois pour un diamètre de 200mm, un pour l'insufflation, l'autre pour l'extraction. Une demande d'autorisation a été demandée à l'Université de Perpignan, propriétaire du bâtiment pour réaliser les travaux. Le ventilateur extérieur est placé en hauteur pour extraire l'air chaud de la pièce. L'air chaud étant moins dense que l'air froid, il s'élève dans la pièce et son extraction est plus efficace. L'insufflation se fait au niveau du sol en plein centre du mur, dans l'axe de l'allée centrale de la pièce et de façon "naturelle", on parle ici d'un système de ventilation hybride combinant une ventilation "naturelle" et "mécanique". Il est très important de remarquer que l'air frais insufflé se réchauffe naturellement lors de son parcours dans la pièce ; un air trop froid pourrait être dommageable. Un filtre au niveau de l'entrée d'air, est placé afin d'éviter les poussières de l'extérieur. Ces filtres sont identiques à nos filtres de climatiseurs. Concernant la consommation du ventilateur, il absorbe au maximum une puissance de 125W pour un courant de 0,5A. Afin de récupérer l'air chaud pour l'insuffler dans le bâtiment, un extracteur d'air de type VMC silencieux et discret est installé entre le mur de la salle informatique et le couloir du bâtiment.

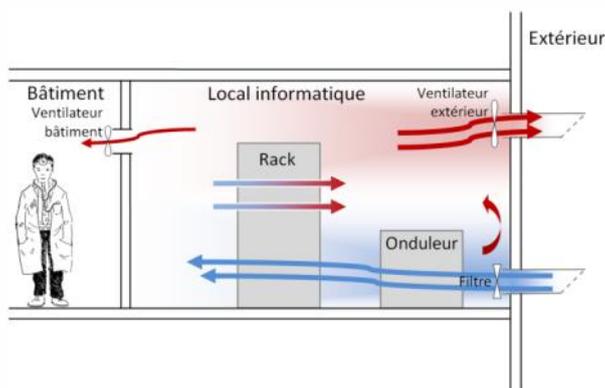


Figure 6 - fig : Flux d'air dans le local informatique

La figure 6 représente une vue schématique des flux d'air à l'intérieur de la pièce informatique. L'air chaud est représenté en rouge et le l'air froid est représenté en bleu.

7 Contrôle commande, logiciel et interface web

Pour la commande des ventilateurs et l'enregistrement des mesures, un programme écrit en langage python a été réalisé. Ce choix a été déterminé surtout par les capteurs I2C dont les bibliothèques et les tutoriels étaient fournis dans ce langage. La structure du programme s'avère relativement simple. Après les initialisations, le programme s'effectue suivant une boucle infinie dans laquelle est effectué le relevé des capteurs. Ainsi les ventilateurs sont activés par les valeurs d'humidités et de températures afin de respecter les conditions de consigne définies au paragraphe 4.3. Les ventilateurs sont réglés par une

boucle de type PID : régulation Proportionnelle - Intégrale – Dérivée, conformément aux conditions de température et d'humidité.

De plus, un système d'alerte par courriel est activé dans le cas de dépassement d'une consigne de la température de la pièce. Afin d'effectuer un suivi du comportement du système, une base de données MySQL, dans laquelle nous enregistrons l'état des ventilateurs (allumé ou éteint), ainsi que toutes les données des capteurs ont été créées. La base de données, hébergée sur un serveur du laboratoire permet un affichage en temps réel des données sous forme graphique et accessible depuis le web, *Figure 7*.

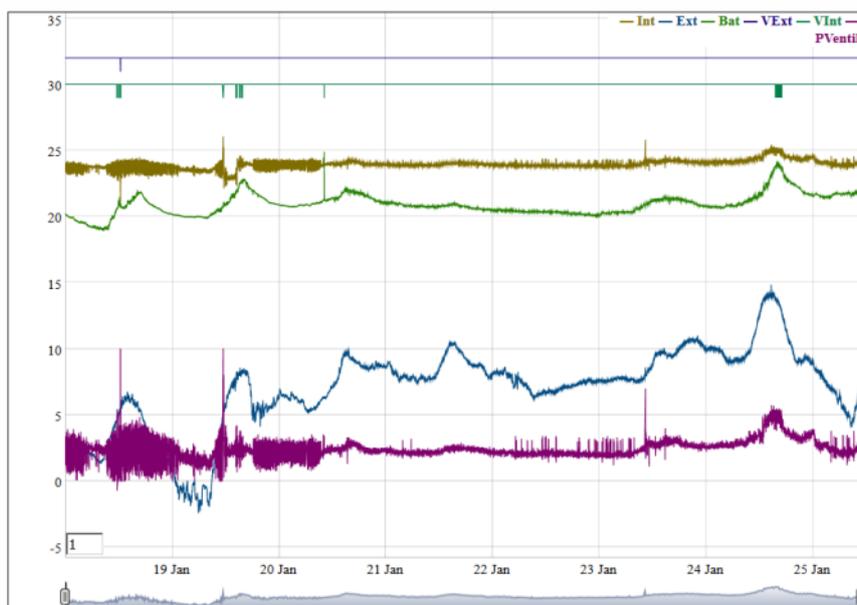


Figure 7 - Interface web présentant les températures internes, températures externes et températures du bâtiment ainsi que l'état de fonctionnement des ventilateurs : période du 19 janvier au 25 janvier 2017

Cette interface nous permet de suivre sur 24 heures, une semaine, un mois, une année le fonctionnement du *free cooling*. Les deux premières lignes nous donnent l'état des ventilateurs couloir et extérieur: « On Off ». La troisième courbe représente la température de consigne de 24°. La quatrième courbe représente la température du bâtiment autour de 20°. La quatrième courbe représente la température extérieure et enfin la cinquième courbe représente le pourcentage de ventilation du ventilateur extérieur. D'autres graphiques sont aussi disponibles pour connaître la consommation des ventilateurs ainsi que l'énergie récupérée pour réchauffer le bâtiment.

7.1 Fiabilité du projet

Afin de fiabiliser notre projet, nous surveillons le processus de *free cooling* par un système de « watch dog ». En cas de dysfonctionnement, nous pouvons relancer le système. De plus, nous disposons d'un Raspberry sur étagère pour remplacer le boîtier en cas de dysfonctionnant physique.

8 Bilans

8.1 Bilan énergétique et classification

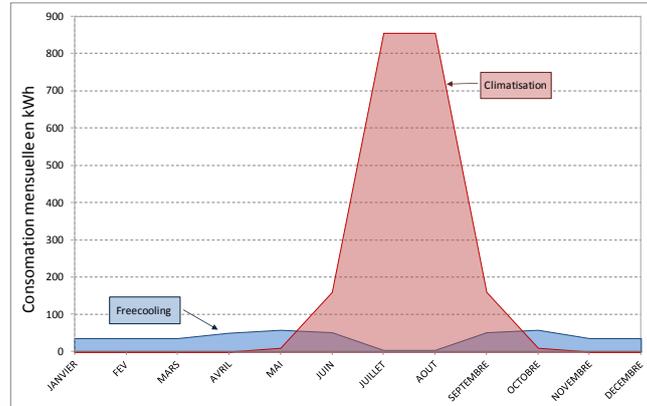


Figure 8 - Estimation de la consommation annuelle du système

Malgré notre situation géographique et au vu des données météorologiques historiques à Perpignan, nous pouvons estimer une période de fonctionnement de huit mois pleins sur un an. Sur la *figure 8*, nous avons représenté la consommation annuelle du système complet. Ainsi nous pouvons constater que l'été la climatisation est le poste de consommation énergétique majeur. Le *free cooling* fonctionne seul l'hiver et majoritairement en intersaison.

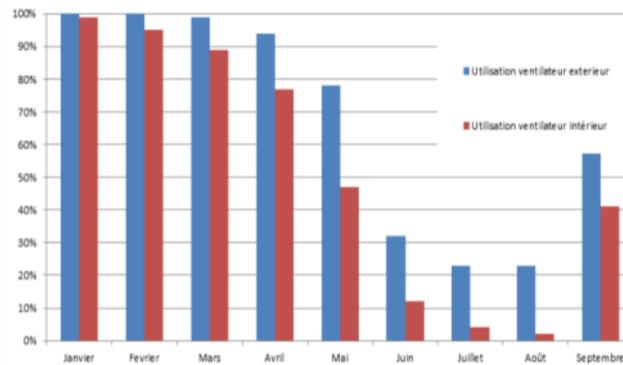


Figure 9 - Utilisation du free cooling sur 9 mois d'après nos relevés

Finalement, nos prévisions se sont avérées proches de nos estimations. L'hiver est proche de 100% d'utilisation du *free cooling*, le printemps proche de 80%, l'été aux alentours de 20% et enfin l'automne devrait être dans une fourchette entre de 70 et 80%, *Figure 9*.

	P_{IT} Consommation machine Annuel en kWh	P_{Tech} Refroidissement + Onduleur kWh	PUE
Avant	43800	26280	1,6
Après	43800	9460	1,216

Figure 10 - Bilan des consommations PUE

	Avant	Après	Optimisé
KPI_{TE}	1,6	1,216	1,216
W_{REUSE} : 0,5 par défaut	0,5	0,5	0,5
KPI_{REUSE}	0	0,3	0,91
DCP	1,6	1,03	0,66
CLASSE	E	B	A

Figure 11 - Bilan des consommations DCp

Ainsi, avec le rafraîchissement par *free cooling* nous avons pu passer de la classe E à la classe B en termes de DCp . La colonne optimisée avec une classe A aurait correspondu à 100% de récupération de la chaleur. Nous n'avons pas pu récupérer 100% de la chaleur pour des raisons de bruit. Nous avons dû choisir un ventilateur silencieux, limité en puissance pour ne pas déranger nos collègues des bureaux adjacents.

8.2 Bilan économique

	Avant	Après
Consommation climatiseur	12166 kWh	1825 kWh
Consommation <i>free cooling</i>	0	459 kWh
Total	12166 kWh	2284 kWh
Coût (0,13€ le kWh)	1581€	300€

Figure 12 - : Bilan énergétique et financier sur 1 an

Annuellement, la consommation totale du système est estimée à 2284kWh, respectivement 459kWh pour le *free cooling* et 1825kWh pour la climatisation. La consommation annuelle sans *free cooling*, uniquement avec la climatisation est de l'ordre de 12000kWh. Ainsi, le gain estimé est d'environ 10000kWh par an, correspondant à 1300€ annuel d'économie. Si l'on compare ces économies financières au coût total du projet, Figure 13, de l'ordre de 2000€, le système possède un retour sur investissement très intéressant de 1 an et demi.

De plus, nous avons pu récupérer environ 13140 kWh de la chaleur rejetée par les serveurs sur une année complète, soit environ 1/3. Pour améliorer ce procédé, il aurait fallu utiliser un ventilateur de couloir plus puissant mais aussi plus bruyant et mieux canaliser les flux d'air. Cependant 13140 kWh de chaleur représentent une économie supplémentaire d'environ 500€ produite par un système de chauffage électrique standard de type climatisation réversible.

	Coût € TTC
Électronique	200€
Ventilateurs + filtre + pose	800€
Perçage des ouvertures	1000€
TOTAL	2000€

Figure 13 - : Coût financier du projet

Ce projet a nécessité environ une charge de travail de 12 mois-hommes pour 5 étudiants de troisième année de la licence Science Pour l'Ingénieur (SPI) de l'Université Via Domitia de Perpignan [14]. Pour notre part, notre temps total d'encadrement et de finalisation du projet est estimé à environ 8 mois-hommes.

9 Conclusion

Ce projet fonctionnel et opérationnel a permis de mettre en avant la possibilité de refroidir un local multifonction produisant de l'énergie thermique tout en réalisant des économies d'énergie conséquentes estimées à un facteur 5 sur l'année.

Aussi, cette réalisation a montré qu'il est possible de rafraîchir une pièce réseau où les flux d'air ne sont pas totalement maîtrisés. Ce *free cooling* permet donc d'éviter la climatisation au moins les $\frac{3}{4}$ de l'année et ceux sur toute la France métropolitaine.

Nous espérons que ces expérimentations serviront à étendre le *free cooling* vers d'autres salles machines de nos laboratoires de recherche et pour les data centres de type *small*.

Les prochaines évolutions de notre système *free cooling* consisteront à améliorer la commande du ventilateur par un système d'inférence floue [11].

Bibliographie

- [1] Koomey J. G., "Worldwide electricity used in data centers", *Environmental Research Letters*, vol. 3, p. 034008, July 2008.
- [2] W. Van Heddeghem, S. Lambert, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012," *Computer Communications*, vol. 50, pp. 64–76, Sept. 2014.
- [3] Webb M., "Smart 2020: Enabling the low carbon economy in the information age," *The Climate Group. London*, 2008.
- [4] "ETSI GS OEU 001 V2.1.1," Dec. 2014.
- [5] E. Jaureguiualzo, "PUE : The Green Grid metric for evaluating the energy efficiency in DC (Data Center). Measurement method using the power demand," in *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International*, pp. 1–8, Oct. 2011.
- [6] A. H. Beitelmal and D. Fabris, "Servers and data centers energy performance metrics," *Energy and Buildings*, vol. 80, pp. 562–569, Sept. 2014.
- [7] B. Boutherein « Bonnes pratiques pour l'infrastructure d'un Datacentre éco-responsable » GIP RENATER. 16 Déc 2014.
- [8] F. Douchet « Optimisation énergétique de data centers par utilisation de liquides pour le refroidissement des baies informatiques Energie électrique ». Université de Bretagne Sud, 2015. Français.
- [9] E. T. S. Institute, "ETSI EN 300 019-1-3 V2.3.2," 2009
- [10] ASHRAE, "Thermal guidelines for data processing environments - expanded data center classes and usage guidance," vol. 9.9, 2011.
- [11] Paris B., "Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment EnR", *7e Colloque sur l'enseignement des technologies et des sciences de l'information et des systèmes, Oct 2008, Bruxelles, Belgique*. 7, pp.23, 2008
- [12] Edge datacenters, un levier pour l'innovation – 16 mars 2017, <http://ecoinfo.cnrs.fr/?p=12176>
- [13] A. Barbier. L'efficacité énergétiques dans les data centres, enr'cert, nov 2016
- [14] O. Fruchier, P. Egea, T. Talbert, D. Gachon CETSI 2017 Mise en place d'un système de rafraîchissement d'un local informatique par ventilation hybride