

Etude du refroidissement à eau des équipements de télécommunication.

Fabien DOUCHET^{1, 2*}, David NORTERSHAUSER¹, Stéphane LE MASSON¹, Patrick GLOUANNEC²

¹Orange Labs

2, avenue Pierre Marzin – 22300 Lannion

²Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB)

Rue de Saint Maudé – 56321 Lorient Cedex

* (auteur correspondant : fabien.douchet@orange.com)

Résumé - En raison de l'évolution des services (débits croissants, services plus complexes, etc.), conjointement à l'évolution des équipements (montées en fréquence des puces, multiplication du nombre de cœurs), la puissance dissipée par les équipements de télécommunication évolue significativement. Plus de 99% de l'énergie fournie aux équipements électroniques est transformée en chaleur (le % restant correspond à l'énergie mécanique des ventilateurs) diffusée dans les salles. Les systèmes de refroidissement à air classiquement utilisés sont énergivores et s'approchent en outre des limites de leur capacité de refroidissement. Une voie possible d'amélioration substantielle est l'exploitation de l'eau comme fluide caloporteur. Des expérimentations sont réalisées sur une baie équipée de plusieurs serveurs réels dans des conditions d'ambiance stabilisées. La mise en œuvre d'une instrumentation très conséquente jusqu'à l'échelle du composant permet d'effectuer un bilan énergétique précis (mesures des températures et débits d'air, des puissances électriques consommées, des conditions d'ambiance) et de s'assurer que la fonction refroidissement est correctement assurée pour tous les composants électroniques. Dans une première étape, des séquences de mesure sont réalisées avec un refroidissement classique des serveurs par une circulation d'air forcée. L'objectif est de disposer de données de référence pour quantifier les gains potentiels apportés par de nouveaux systèmes de refroidissement. Dans une seconde étape, des tests sont menés à l'échelle d'un serveur dont le refroidissement est essentiellement assuré par une circulation d'eau localisée (faible débit d'air). Pour cette étude, une instrumentation sur le circuit d'eau (températures et débit, puissances électriques) vient compléter l'instrumentation déjà initiée, pour être en mesure d'effectuer des bilans énergétiques au niveau des éléments clés de l'installation. Les séquences de mesures sont exploitées pour confronter les deux solutions sur l'aspect énergétique. D'autre part, cette base de données sera utilisée pour identifier les paramètres d'un modèle thermique simplifié destiné à la prédiction des températures du serveur refroidi par eau en fonction des paramètres opératoires (puissance, débit d'air,...).

Nomenclature

C_p	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	Q	débit volumique, $m^3.s^{-1}$
E	énergie, Wh	t	temps, s
P	puissance, W	T	température, K

1. Introduction

En raison de l'évolution des services (débits croissants, services plus complexes, etc.), conjointement à l'évolution des équipements (montées en fréquence des puces, multiplication du nombre de cœurs), la puissance dissipée par les équipements de télécommunication augmente significativement [1]. Plus de 99% de l'énergie fournie aux équipements électroniques est transformée en chaleur (le % restant correspond à l'énergie mécanique des ventilateurs) et diffusée dans les salles [2]. Pour maintenir les conditions ambiantes dans des plages de températures et d'hygrométrie compatibles avec le bon fonctionnement des équipements informatiques, des climatisations de fortes puissances sont alors employées.

Outre l'importante consommation énergétique de ces systèmes de conditionnement d'air, au fil des générations, l'augmentation de puissance volumique dans les salles pose des problèmes de type aéraulique, accentués par la distribution hétérogène des sources de puissance [3]. Par ailleurs, les niveaux de température d'air restant relativement faibles (de l'ordre de 45°C), une valorisation directe de l'énergie rejetée au milieu extérieur est difficilement envisageable. Enfin, les débits d'air nécessaires compte tenu de la densité et du confinement des équipements conduisent à des niveaux de bruit acoustiques posant des problèmes règlementaires [4].

Physiquement, les propriétés de l'air en tant que fluide caloporteur ne permettront pas de soutenir une telle tendance en assurant une efficacité énergétique satisfaisante, bien que l'emploi du free cooling (refroidissement en utilisant l'air frais du milieu extérieur) permette d'obtenir de bons rendements [5]. Le passage au refroidissement liquide semble une solution alternative adaptée mais requiert une anticipation, afin d'être en mesure de déployer une architecture de refroidissement optimisée en termes de consommation énergétique, de maintenance et de coûts. Par ailleurs, les possibilités de récupération d'énergie offertes par cette technologie sont en théorie importantes (canalisation aisée, température de sortie adaptée au chauffage) et ont été étudiées par Zimmermann et al. [6-7]. Contrairement à des refroidisseurs utilisant des tubes de faible diamètre qui introduisent des pertes de charge élevées [8], cette étude se focalise sur un système utilisant des diamètres plus élevés.

Cette étude vise dans un premier temps à effectuer une analyse d'un système de refroidissement de référence par air. Des équipements informatiques réels sont utilisés dans des conditions d'ambiance stabilisées. Une instrumentation complète est réalisée jusqu'à l'échelle du composant, de façon à pouvoir effectuer un bilan énergétique précis (mesures des températures et débits d'air, des puissances électriques, des conditions d'ambiance) et à s'assurer que la fonction refroidissement est correctement assurée pour tous les composants électroniques. Une seconde expérimentation est ensuite mise en place, en conservant les équipements électroniques. L'objectif est cette fois d'étudier le refroidissement à eau à l'échelle d'un serveur, à l'aide d'une plaque en aluminium dans laquelle circule de l'eau. Un flux d'air bien plus faible que dans le cas de référence est maintenu. Une instrumentation sur le circuit d'eau (températures et débit, puissances électriques) vient compléter l'instrumentation déjà initiée, pour être en mesure d'effectuer des bilans énergétiques au niveau de la plaque froide.

2. Dispositif expérimental

L'objectif des expérimentations est de mesurer l'évolution des températures et des consommations électriques d'un serveur et du système de refroidissement pour différentes conditions d'utilisation, afin de vérifier la fonction refroidissement et d'en tirer des bilans énergétiques. La plaque froide doit alors être capable de récupérer les calories dissipées par les composants en contact pour limiter ou éviter le recours à une climatisation additionnelle.

Un serveur *IBM HS21* (cf. Figure 1) en position verticale est placé dans une baie équipée de modules d'alimentation. Les ventilateurs centrifuges initialement présents dans la baie sont remplacés par six ventilateurs axiaux *SUNON PMD1204PQBX-A*, commandés en 0-12V et placés à l'entrée du serveur afin d'assurer le renouvellement de l'air. Le flux d'air aspiré en face avant du serveur est rejeté en face arrière à une température plus élevée du fait de la dissipation de chaleur des composants.

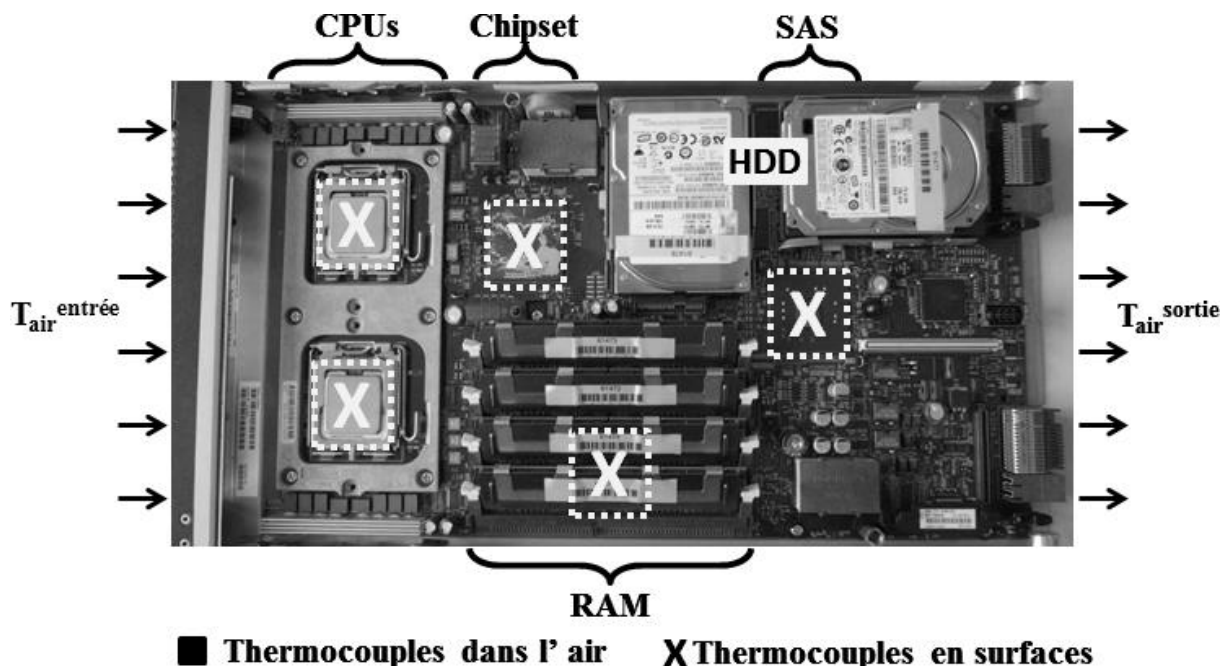


Figure 1 : Instrumentation d'un serveur

Une plaque en aluminium dans laquelle circule de l'eau est fixée au serveur (cf. Figure 2 et Figure 3). Le volume total de fluide de refroidissement est de $0,34 \text{ dm}^3$ pour une section moyenne de 200mm^2 . Quatre plots sont en contact direct avec les composants dissipant le plus de chaleur : les deux processeurs (CPUs), le chipset et le contrôleur mémoire (SAS). Du fait de la géométrie complexe du serveur, il n'a pas été possible de refroidir les barrettes de mémoire (RAM) à l'aide de la plaque. C'est pourquoi un flux d'air est maintenu afin d'éviter une élévation trop importante de la température des barrettes de mémoire. Un circuit hydraulique comprenant une pompe et un aérotherme extérieur est connecté à la plaque froide pour le rejet des calories en dehors de l'enceinte climatique.

Des mesures de vitesse d'air, en sortie du serveur, sont réalisées par des anémomètres à fil chaud *KimoCTV210*. La mesure du débit d'eau dans le circuit hydraulique est assurée par un débitmètre magnéto-inductif *IFM Electronic SM8050*. Enfin, les puissances électriques consommées par le serveur, les ventilateurs axiaux, la pompe et l'aérotherme extérieur sont enregistrées par un énergimètre *Fluke434*.

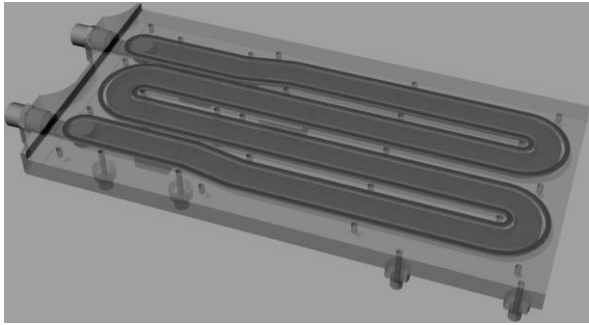


Figure 2 : Schéma du circuit d'eau interne de la plaque froide (vue de dessus)

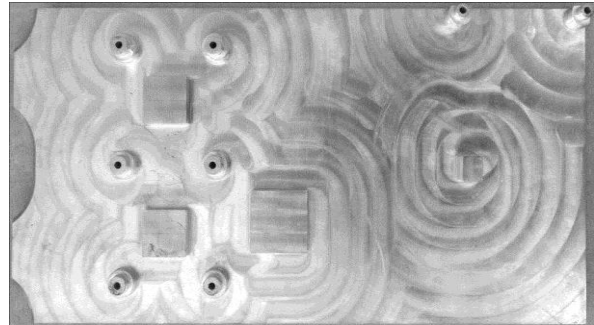


Figure 3 : Photo de la plaque de la plaque froide (vue de dessous)

Afin de disposer d'un bilan thermique sur la partie refroidissement à air, la température d'air est mesurée en entrée et sortie du serveur avec des thermocouples de type K. L'évolution de la température de surface ou ambiante locale des composants de puissances élevées (processeurs, chipset, contrôleur disque, mémoire vive et disque dur) est également suivie (voir Figure 1). Pour réduire le caractère intrusif de ces mesures internes au serveur, des fils de thermocouples de diamètre 0,1mm sont utilisés. Pour la température des composants, les thermocouples sont placés entre les plots et les composants. Les températures d'air ambiant à l'intérieur de l'étuve sont également relevées. Des thermocouples chemisés sont insérés dans les conduites du circuit hydraulique pour la mesure des températures d'eau en entrée et en sortie de la plaque froide. La mesure de température de l'air extérieur est effectuée. Toute la chaîne de mesures en température (thermocouples+centrales d'acquisition) a été préalablement étalonnée, permettant ainsi d'obtenir une incertitude de 0,1°C sur les mesures de température. Les incertitudes des différentes mesures sont renseignées dans le Tableau 1.

	<i>Thermocouple</i>	<i>Anémomètre</i>	<i>Débitmètre</i>	<i>Energimètre</i>
	°C	m/s	l/min	W
Précision	±0,1	±3% VM ±0,1	±2% VM ±0,5	±1,5% VM ±10

Tableau 1 : Incertitudes des appareils de mesures (VM=Valeur Mesurée)

3. Résultats et discussion

3.1. Protocoles des essais

Des mesures ont été réalisées en faisant varier trois principaux paramètres. Le premier paramètre est la température de consigne de l'air en entrée du serveur.

Le second paramètre est la puissance dissipée par les serveurs informatiques. En effet, on peut distinguer deux consommations de fonctionnement : la première P_{min} pour laquelle aucun programme informatique n'est lancé, seul le système d'exploitation fonctionne (solicitations et dissipation minimales des composants) ; et la seconde, notée P_{max} où des programmes permettent de faire fonctionner les composants à pleine capacité (notamment les processeurs), augmentant ainsi la puissance dissipée par les équipements. Le troisième paramètre est le débit d'eau, avec des valeurs comprises entre 0,9 et 3 l/min.

La température d'eau en entrée de la plaque est maintenue à 30°C. Le débit d'air à l'intérieur du serveur est également fixé et fait l'objet d'une étude préliminaire, présentée dans le paragraphe suivant.

3.2. Etude préliminaire

Cette première étude a pour objectif de déterminer le débit d'air minimal requis pour que la température limite des composants non refroidis par la plaque froide (notamment la RAM) ne soit pas atteinte, et que la consommation énergétique des ventilateurs soit la plus faible possible. Afin de réduire le nombre de paramètres opératoires, le débit d'eau est constant et a pour valeur 0,9 l/min. La température de consigne d'air en entrée de serveur est fixée à 25°C.

Dans un premier temps, les essais sont effectués à la puissance P_{min} . On fait ensuite varier la tension aux bornes des ventilateurs de 4 à 12V par pas de 2V. Les valeurs de températures, de vitesses et de puissances en régime stationnaire sont relevées. L'opération est répétée pour la puissance dissipée P_{max} . Le composant le plus fragile étant la mémoire vive (notamment une puce de mémoire tampon avancée, Advanced Memory Buffer) avec une température limite de surface de 95°C, le suivi de température se fait sur ce composant.

La Figure 4 représente les résultats obtenus en fonction du débit d'air à l'intérieur du serveur (la température d'air en entrée est fixée et égale à 26,3°C). On observe que la température de surface du composant décroît avec l'augmentation du débit d'air. On note également une différence de température moyenne d'environ 12,1°C entre P_{min} et P_{max} . La consommation des ventilateurs varie entre 3 et 31W pour des débits d'air allant de 2 à 11 m³/h.

Pour un débit d'air d'environ 7 m³/h, la température maximale atteinte par le composant est 70,1°C avec une puissance de ventilateurs proche de 12,8W. C'est ce point qui présente le meilleur compromis entre température de surface (inférieure à 95°C avec une marge de sécurité en cas de hausse de la température d'air en entrée) et puissance consommée par la ventilation (qui doit être la plus faible possible, tout en respectant le critère précédent).

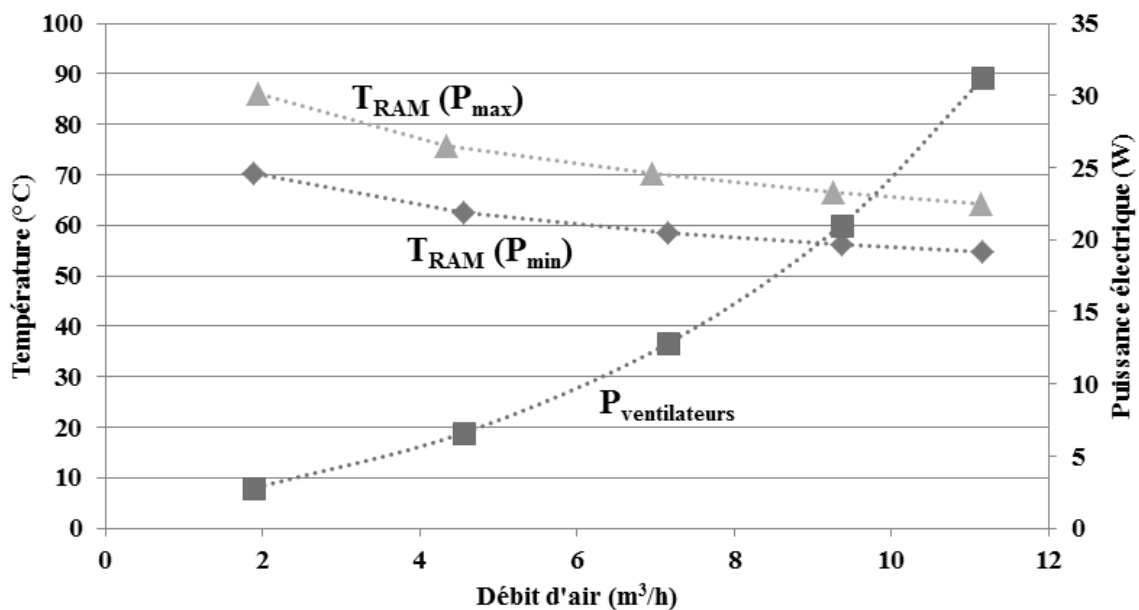


Figure 4 : Température de la mémoire vive et puissance consommée par les ventilateurs en fonction du débit d'air en entrée de serveur pour $T_{air}^{entrée} \approx 26,3^{\circ}C$

3.3. Résultats en régime établi

Des relevés de températures en régime stationnaire ont été effectués afin de vérifier si les températures de surface des différents composants ne dépassent pas les valeurs limites (cf. Tableau 2). Pour rappel, le débit d'air dans le serveur et la température d'eau en entrée ont été préalablement fixés.

Les Figure 5 à Figure 6 présentent les résultats obtenus pour un débit d'eau de 0,5 l/min tandis que les Figure 7 à Figure 8 concernent les résultats pour un débit d'eau de 3 l/min. Les résultats sont également présentés pour différentes températures d'air en entrée de serveur, comprises entre 22,0 et 31,3°C. On observe une hausse importante de la température de la surface des composants lorsque l'on passe de la puissance P_{min} à P_{max} , quel que soit le débit d'eau circulant dans la plaque. Par exemple, les processeurs voient leur température augmenter d'environ 15,9°C en moyenne et la RAM de 11,5°C. Les températures des autres composants ne s'élèvent que de quelques degrés. Cela s'explique par le fait que les processeurs sont les composants qui dissipent le plus de chaleur et que la RAM est uniquement refroidie par le flux d'air. On peut également noter que l'augmentation du débit d'eau de 0,5 à 3 l/min entraîne une baisse de la température des composants, estimée en moyenne à 3,2°C pour P_{min} et à 4,2°C pour P_{max} . De plus, les températures limites des composants ne sont jamais atteintes. Les composants les plus proches sont les processeurs dans les conditions les plus défavorables avec un débit d'eau minimal et une température d'air en entrée de serveur élevée.

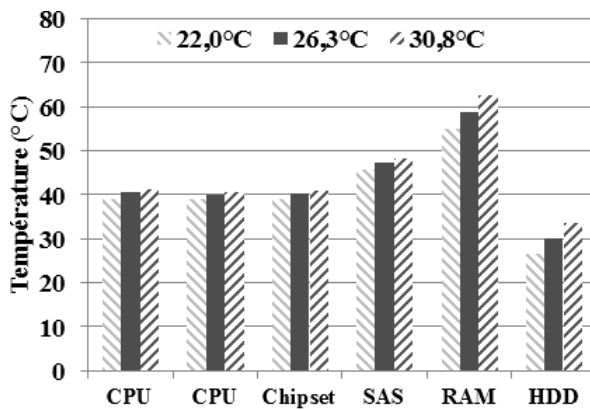


Figure 5 : Températures des composants à P_{min} pour $Q_{eau}=0,5$ l/min

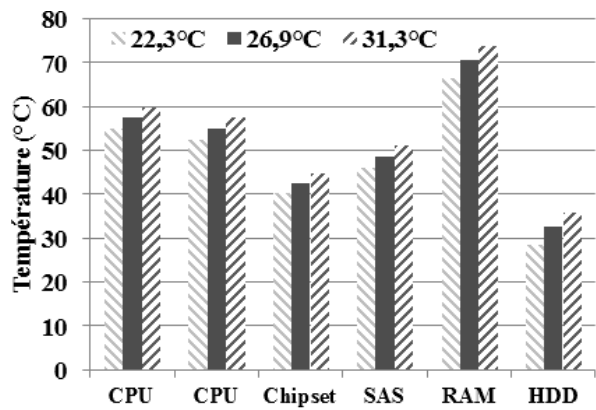


Figure 6 : Températures des composants à P_{max} pour $Q_{eau}=0,5$ l/min

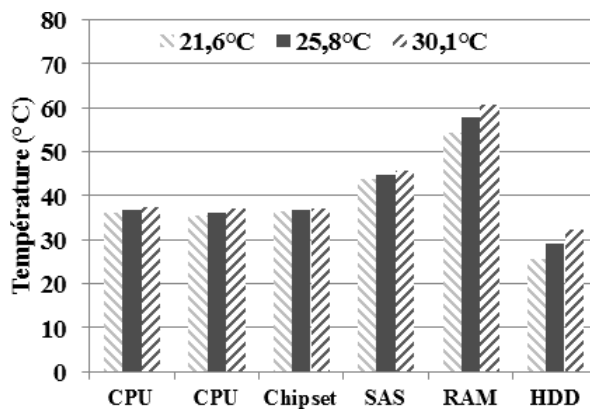


Figure 7 : Températures des composants à P_{min} pour $Q_{eau}=3$ l/min

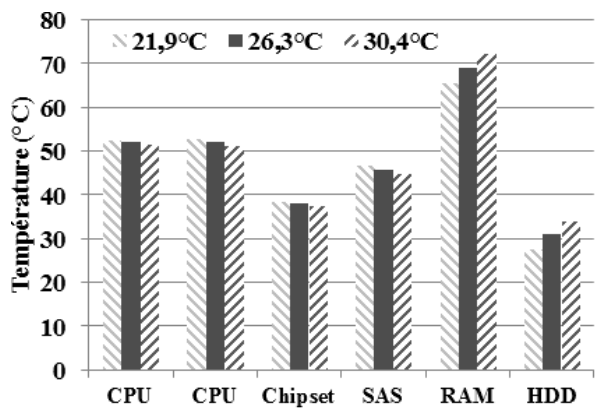


Figure 8 : Températures des composants à P_{min} pour $Q_{eau}=3$ l/min

	CPU	Chipset	SAS	RAM	HDD
Température (°C)	66	105	115	95	55

Tableau 2 : Valeurs de température limite de fonctionnement des composants

Lorsque les composants sont utilisés au maximum de leurs capacités, on constate une élévation de la consommation électrique du serveur de 70% par rapport à P_{min} (cf. Tableau 3). Pour le calcul des puissances thermiques avec $T_{air}^{entrée}$ proche de 30°C, les résultats indiquent que la puissance récupérée par l'eau est proche de la puissance électrique consommée par le serveur. En effet, le ratio entre ces deux quantités varie, selon le débit d'eau, entre 75 et 96% à P_{min} et entre 63 et 85% à P_{max} (cf. Figure 9 et Figure 10). La plaque froide mise en place assure donc une récupération correcte des calories dissipées par le serveur. Sur l'air, on ne récupère qu'une dizaine de watts, ce qui est compréhensible au vue des composants se trouvant dans le flux d'air. On constate que les températures de sortie des fluides baissent avec l'augmentation du débit d'eau, ce qui entraîne des différences de températures de 0,6 à 1,5°C entre la sortie et l'entrée du circuit d'eau de la plaque. Ce faible écart entraîne une baisse de la précision sur les valeurs de P_{eau} pour des débits d'eau supérieurs à 2-3 l/min.

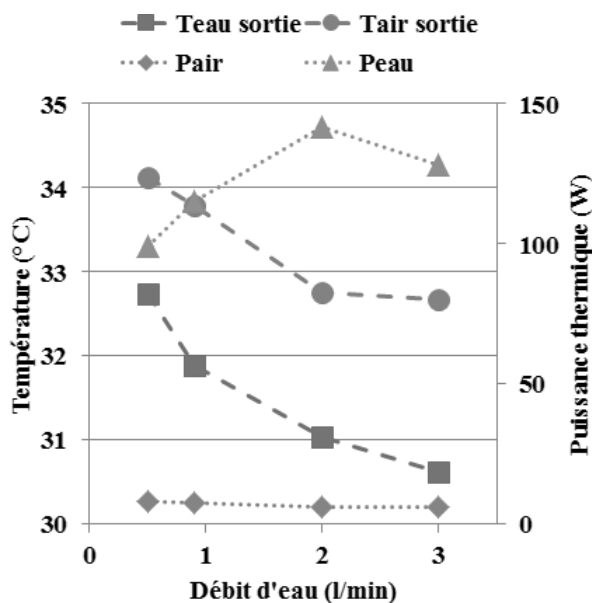


Figure 9 : Bilan thermique en fonction du débit d'eau à P_{min} avec $T_{air}^{entrée}=30,7^{\circ}C$

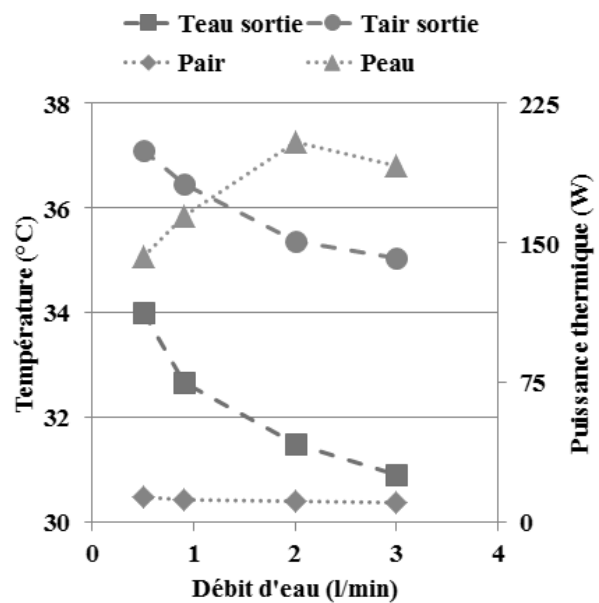


Figure 10 : Bilan thermique en fonction du débit d'eau à P_{max} avec $T_{air}^{entrée}=30,7^{\circ}C$

Les relevés des puissances électriques consommées d'une part par la baie informatique, et d'autre part par le système de refroidissement, permettent de chiffrer l'efficacité énergétique de l'installation. Toutefois, comparé au cas d'un datacenter réel, nous ne pouvons calculer qu'une efficacité partielle prenant uniquement en compte la seule partie refroidissement. Un consortium de sociétés informatiques, GreenGrid, définit un indicateur partiel d'efficacité énergétique comme suit [9] :

$$pPUE = \frac{\text{Energie totale consommée par l'informatique et le refroidissement}}{\text{Energie totale consommée par les équipements informatiques}} \quad (1)$$

La consommation du système de refroidissement dans notre étude est composée de la consommation de la pompe du circuit hydraulique et celle du ventilateur de l'échangeur eau/air extérieur, qui sont quasi constantes durant les essais. Le Tableau 3 récapitule les puissances électriques consommées par les équipements. On obtient des valeurs de $pPUE$ proches de 1,22 pour P_{min} et 1,13 pour P_{max} . Ces valeurs sont plus faibles comparées à un refroidissement à air [5], avec des valeurs de $pPUE$ ne dépassant pas les 1,3. De plus, elles sont susceptibles de baisser pour un plus grand nombre de serveurs, car l'installation hydraulique utilisée est surdimensionnée pour un seul serveur à refroidir.

	<i>Serveur (P_{min})</i>	<i>Serveur (P_{max})</i>	<i>P_{pompe}</i>	<i>$P_{aérotherme}$</i>	<i>$P_{ventilateurs}$</i>
	W	W	W	W	W
Puissance	133	226	10	22	12,8

Tableau 3 : Puissances électriques de l'installation

Par rapport à un système de refroidissement classique, on réduit la consommation énergétique des ventilateurs de 8W par serveur avec un débit d'air 7,6 fois moins important.

4. Conclusion et perspectives

Par le biais de cette étude nous avons expérimenté le refroidissement liquide d'un serveur informatique à l'aide d'une plaque où circule de l'eau, qui récupère les calories dissipées par les composants majeurs du serveur. Un faible flux d'air est maintenu pour le refroidissement des autres composants. Après avoir instrumenté l'installation en températures et débits pour les deux fluides et en suivant la consommation électrique des équipements, il s'est avéré que le bon refroidissement des composants est assuré tout en ayant un bilan énergétique final correct. Des essais supplémentaires auront lieu avec un plus grand nombre de serveurs afin de mettre sur pied un modèle nodal à l'échelle d'une baie, permettant de prédire l'impact d'une telle solution de refroidissement à l'échelle d'une salle de data center.

Références

- [1] P. X. Gao, A. R. Curtis, B. Wong, and S. Keshav, It's Not Easy Being Green, *SIGCOMM Computer Communication Review*, 42-4 (2012), 211–222.
- [2] K. Kant, Data center evolution: A tutorial on state of the art, issues, and challenges, *Computer Networks*, 53-17 (2009), 2939–2965.
- [3] J. Cho, J. Yang, and W. Park, Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers, *Energy and Building*, 68-A (2014), 270–279.
- [4] That sound you hear? The next data center problem, www.computerworld.com (2007).
- [5] K.-P. Lee and H.-L. Chen, Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones, *Energy and Building*, 64 (2013), 103–112.
- [6] S. Zimmermann, I. Meijer, M. K. Tiwari, S. Paredes, B. Michel, and D. Poulidakos, Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse, *Energy*, 43-1 (2012), 237–245.
- [7] S. Zimmermann, M. K. Tiwari, I. Meijer, S. Paredes, B. Michel, and D. Poulidakos, Hot water cooled electronics: Exergy analysis and waste heat reuse feasibility, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55-23 (2012), 6391–6399.
- [8] G. F. Goth, A. Arvelo, J. Eagle, M. J. Ellsworth, K. C. Marston, A. K. Sinha, and J. A. Zitz, Thermal and mechanical analysis and design of the IBM Power 775 water cooled supercomputing central electronics complex, *13th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)* (San Diego, 2012), 700–709.
- [8] Grid TG. PUE: a comprehensive examination of the metric, White Paper #49 (2012).