

Refroidir sans gaspiller

Bernard Bouterin

LPSC / ECOinfo
53 rue des Martyrs
38026 Grenoble

Résumé

La question du refroidissement est aujourd'hui un élément essentiel dans la réflexion pour la création d'un datacentre ou dans l'étude de l'évolution de celui-ci. En effet, d'une part le refroidissement est l'un des vecteurs principaux du coût de fonctionnement d'un datacentre, d'autre part la fiabilité du système de froid impacte directement la disponibilité de la ressource informatique et donc la qualité du service rendu.

Cet article va s'attacher à mettre en évidence les critères pour évaluer l'intérêt de tel ou tel moyen de refroidissement, pour évaluer sa performance énergétique et les consommations mises en jeu, et enfin savoir s'il est compatible avec les contraintes de production en termes de conditions de fonctionnement en température et humidité. En s'appuyant sur une revue des moyens de refroidissement possibles à ce jour pour un datacentre on étudiera dans quel contexte (géographique, disponibilité de certains fluides, impact sur le bâtiment : rénovation ou bâtiment neuf) ces systèmes peuvent s'appliquer.

Mots-clefs

Datacentre, refroidissement, cooling, écoresponsable, énergie, freecooling, adiabatique, climatisation, ASHRAE, hygrométrie, température, pompe à chaleur, air-direct

1 Introduction

Au début du processus de réflexion sur le choix d'une solution de froid pour un datacentre il est important d'envisager toutes les solutions possibles même si elles ne semblent pas applicables du fait du contexte ou du fait des réticences à priori des uns ou des autres.

Sur une installation existante, une remise à plat globale du système de refroidissement permettra d'éviter l'empilement de solutions, dans le but de garantir la disponibilité de la ressource. Cette remise à plat évitera les surcoûts d'investissement/fonctionnement et l'augmentation de la complexité du système de froid. Il faut noter que cette complexité est souvent la cause des dysfonctionnements qu'elle était supposée éviter.

Sur le plan de l'éco responsabilité, il faut avoir en tête le fait que les investissements dans l'infrastructure sont des investissements à long terme, classiquement de l'ordre de dix à vingt ans. On peut facilement imaginer qu'à une telle échéance la pression sur les ressources énergétiques sera encore beaucoup plus forte qu'elle ne l'est aujourd'hui. Les choix faits aujourd'hui devront ainsi être assumés dans une ou deux décennies. Ceci implique de ne faire aucune concession aujourd'hui sur l'efficacité énergétique du système retenu.

2 Les enjeux

Un datacentre est un bâtiment d'une surface de quelques centaines à plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, qui héberge des baies de matériel informatique. Une seule baie de 60 ou 80 cm de large contient de 40 à 80 serveurs, ou jusqu'à 240 tiroirs de disques durs.

Les plus gros centres de données, ceux de Google en particulier, alignent des milliers de baies qui totalisent ainsi des puissances de traitement et des capacités de stockage qui donnent le vertige.

Mais la consommation électrique donne aussi le vertige : en 2010 selon une étude de Jonathan Koomey, spécialiste en efficacité énergétique à Stanford, Google consommait à peu près 300MW (1) en continu, soit la production en continu d'une tranche de centrale nucléaire ou l'équivalent de la consommation d'une ville de un million d'habitants.

= > et Google ne représente que 1% de la consommation électrique des datacentres dans le monde !

=> et les datacentres ne représentent qu'un tiers de l'énergie nécessaire pour « le Web », un autre tiers est nécessaire pour alimenter les réseaux (dont partie importante va dans les bornes Wi-Fi des internautes¹) et un troisième tiers alimente les ordinateurs des internautes

=> et un ordinateur de bureau nécessite 80 fois plus de CO2 pour le fabriquer que pendant un an d'usage !

Le présent article développera seulement la question de la consommation électrique d'un datacenter en phase d'utilisation mais le lecteur qui souhaiterait plus d'informations sur l'ensemble du cycle de vie des TIC pourra les trouver dans l'ouvrage (2) publié par le groupe Ecoinfo : <http://www.ecoinfo.cnrs.fr>

3 Comment économiser

3.1 Où va l'énergie dans un datacentre ?

Dans un datacentre, l'énergie est destinée à alimenter les serveurs, mais une partie très importante est aussi utilisée pour alimenter les groupes froids. Les autres postes moins importants concernent les UPS et dans une moindre mesure les autres systèmes électriques tels que l'éclairage du datacentre.

Toute l'énergie consommée dans le datacentre est transformée en chaleur qu'il faut évacuer.

3.2 Le PUE

Le PUE est le ratio entre l'énergie qui rentre dans le datacentre et l'énergie qui va dans les serveurs.

Pour les très gros datacentres tels que ceux de Google, ou des Fournisseurs d'Accès Internet, la maîtrise du PUE est un enjeu puisque celui-ci impacte directement les coûts de fonctionnement de l'entreprise. Pour diminuer les coûts d'exploitation de gros efforts sont effectués pour diminuer les coûts énergétiques. Ainsi Google affiche un très bon PUE avec une moyenne de 1,12 sur ses datacentres.

Pour les datacentres plus petits tels que ceux qui sont opérés dans le monde université-recherche, les PUE observés se situent plutôt dans une fourchette de 1.5 pour les meilleurs à 2.5 pour les plus mauvais !

Les plus mauvais PUE sont observés quand l'installation est surdimensionnée. Un groupe froid dimensionné pour une installation de 100KW pourra consommer autant ou plus que la charge IT si celle-ci est de seulement 10 ou 20 KW avec en conséquence un PUE supérieur à deux.

Si on veut prévoir une croissance tout en maîtrisant son PUE il faudra prévoir une installation modulaire.

3.3 Economiser sur la consommation des serveurs

Pour économiser, il faut choisir des alimentations à haut rendement, conformes à la certification « 80 plus » dont les caractéristiques sont données Fig. 1. Ces alimentations doivent être dimensionnées pour être utilisées à la puissance nominale. En cas d'alimentations redondantes, il est important de s'assurer que ces dernières ont un bon rendement à mi charge.

¹ Une Box consomme seulement 15W, mais elle est allumée en permanence et il y avait 600 milliard de foyers connectés fin 2011 selon l'Union Internationale des télécommunications (7)



Paramètres Charge à 80plus		Bronze	Argent	Or	Platinum	Titanium
	10%	-	-	-	-	90%
Efficacité	20%	80%	82%	85%	87%	94%
	50%	80%	85%	88%	90%	96%
	100%	80%	82%	85%	87%	91%

Figure 1 - Efficacité des différents labels « 80 plus » en fonction de la charge

=> A l'heure actuelle il faut viser la labellisation « Energy Star » qui englobe la « 80 plus »

Il faut également choisir des processeurs de faible consommation. Le processeur est un poste très important de la consommation d'un serveur. Il est possible d'agir aussi en essayant de maximiser la charge des processeurs au cours du temps ce qui permettra d'arrêter les serveurs qui tournent à vide. C'est l'un des objectifs de la virtualisation qui permet de mutualiser l'usage d'un processeur sur plusieurs applications.

3.4 Gagner en efficacité grâce à la modularité

L'efficacité des systèmes de froid ainsi que celle des UPS est meilleure à puissance nominale. Elle peut être très mauvaise si l'installation est surdimensionnée. Par exemple un groupe froid calculé pour refroidir 200kW sera médiocre pour refroidir 20kW et il pourra engendrer un PUE supérieur à 2. Il en est de même pour un UPS.

Il est donc important de ne pas sur-dimensionner l'installation même si on espère une forte croissance. Dans ce cas on préférera une installation modulaire avec des extensions possibles par paliers. Une telle installation aura une meilleure efficacité énergétique au départ et permettra de suivre les évolutions. De plus cela permettra d'échelonner les investissements. Par ailleurs une installation modulaire en termes de froid et d'UPS autorisera la mise en place d'une redondance de type n+1.

Enfin la modularité permettra un zonage par niveau de service, et une adaptation des contraintes d'exploitation au besoin à minima « rightsizing ». Ainsi pour les services qui l'exigent, et seulement pour eux, on pourra mettre en place une redondance en termes d'UPS ou de climatisation, une régulation fine de la température ou/et de l'hygrométrie.

3.5 Maitriser les flux

Le cloisonnement permet de séparer le couloir chaud et le couloir froid. L'air froid est aspiré par les serveurs en face avant dans le couloir froid. L'air chaud est rejeté à l'arrière dans le couloir chaud.

Le cloisonnement devra interdire tout retour d'air du couloir chaud vers le couloir froid. Cela suppose de fermer par une cloison le dessus et le pourtour des baies. On choisira des baies avec des joues latérales pour éviter les retours d'air entre les baies. Enfin il est important de placer des panneaux en face avant pour fermer la baie quand il n'y a pas de machine. La figure 2 montre les retours intempestifs que l'on peut avoir si on ne prend pas de précaution.



Figure 2 - Cartographie infrarouge d'une baie, la flèche rouge pointe un cache oublié entre 2 serveurs, la flèche verte montre la conséquence du point de vue thermique.

La réalisation d'un bon cloisonnement est la première étape pour économiser l'énergie. L'objectif poursuivi par cette technique est de permettre une augmentation de la température moyenne de la salle informatique qui a une influence directe sur les coûts de fonctionnement. A l'occasion du Techworld 2012, Intel a conseillé à ses clients d'augmenter la température de leur datacentre en affirmant que chaque degré d'augmentation permettait d'économiser 4% sur la facture énergétique (3).

La maîtrise des flux d'air grâce au cloisonnement va permettre d'augmenter sensiblement la température de la salle informatique tout en conservant dans le couloir froid une température optimale pour les serveurs. Si par exemple, avant la mise en place du couloir froid, la température en face avant des serveurs est de 21°C tandis qu'elle est de 25°C en face arrière, la moyenne est de 23°C. En mettant en place un cloisonnement efficace on va pouvoir maintenir les 21°C en face avant, tout en augmentant la température en face arrière jusqu'à 33°C, pour une température moyenne de 27°C ! On aura donc une augmentation de la température moyenne de 4°C par le biais du cloisonnement sans changer les conditions d'exploitation.

Bien cloisonner pour éviter les points chauds

Dans le cas où il existe des retours intempestif d'air chaud depuis l'arrière des machines dans le couloir froid, on peut avoir des points chauds de plusieurs degrés au-dessus de la température moyenne du couloir froid. Par exemple avec un point chaud à +7°C, si on veut garantir la température de 25°C à l'entrée de tous les serveurs il va falloir abaisser de 7°C la température de consigne, soit 18°C dans le couloir froid !

Un cloisonnement de bonne qualité doit permettre d'avoir une température homogène dans le couloir froid et éviter les points chauds.

Cloisonner pour brasser moins d'air

L'énergie Q évacuée dans les serveurs est donnée par la relation suivante où M est la masse d'air qui traverse les serveurs (reliée au débit d'air D), C la chaleur massique de l'air et ΔT la différence de température entre le couloir froid et le couloir chaud.

$$Q = M \times C \times \Delta T \Rightarrow P(W) = 0,34 \cdot D(m^3/h) \cdot \Delta T$$

Cette relation montre qu'à puissance égale si on augmente le ΔT par le cloisonnement le débit de ventilation nécessaire pour évacuer la chaleur diminue.

Augmenter le ΔT de température permet d'améliorer l'efficacité du système de froid, de brasser moins d'air, et de fonctionner dans de meilleures conditions (température plus basse en face avant) avec la même puissance de froid.

4 Les différentes techniques de refroidissement

Ce chapitre concerne l'étude des trois principales techniques de refroidissement possibles. Pour chacune de ces techniques, nous allons évaluer les ordres de grandeur des énergies et débits de fluides à mettre en œuvre dans le but d'être capable de comparer leurs impacts respectifs en termes de coûts énergétiques et de fluides.

4.1 Techniques à base de circulation d'air ou d'eau

4.1.1 Refroidissement direct à air

Le refroidissement direct à air consiste à dissiper l'énergie produite par les machines par le biais d'une circulation d'air. L'air froid est aspiré à l'extérieur et il est envoyé dans le couloir froid. Il traverse ensuite les serveurs et sa température s'élève. L'air chaud qui sort de l'arrière des serveurs est rejeté à l'extérieur.

Évaluation du débit d'air nécessaire en fonction de la puissance à dissiper :

$$Q = M \times C_{\text{air}} \times \Delta T_{\text{air}}$$

Où Q est la quantité d'énergie à évacuer, C_{air} la chaleur massique de l'air, ΔT la différence de température entre l'air entrant et l'air sortant.

$$P(W) = 0,34 \cdot D_{\text{air}}(m^3/h) \cdot \Delta T_{\text{air}}$$

Pour une puissance IT installée P de 100kW et un ΔT de température entre face avant et arrière de 13°C, le débit d'air nécessaire D est de 23 000 m³/h.

L'air direct permet d'atteindre des PUE sensiblement inférieurs à 1.1 (1.05 sur l'installation du LPSC voir figure 3).

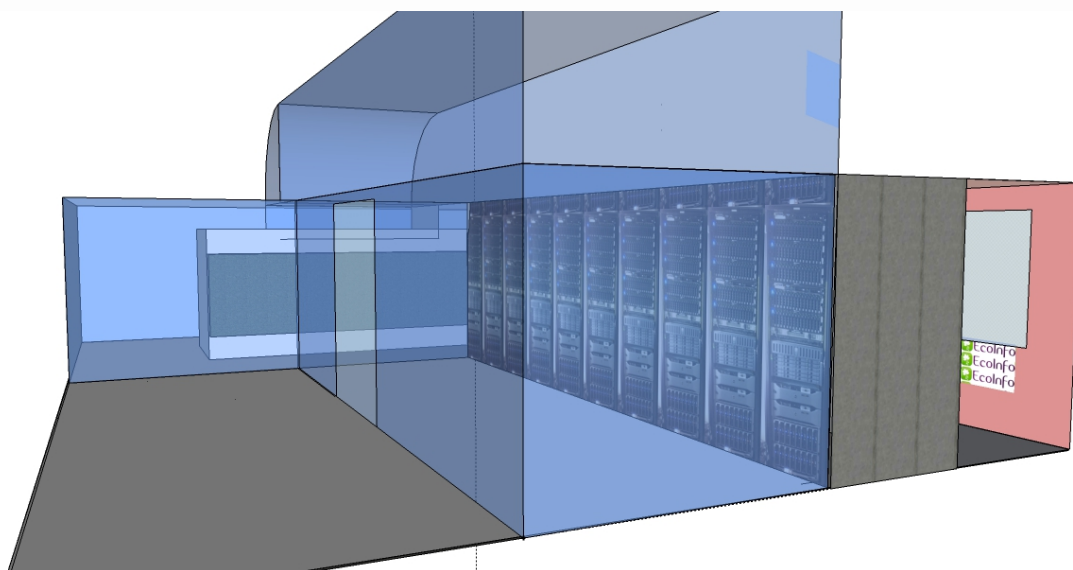


Figure 3 - ECOCLIM, salle informatique du LPSC en free-cooling à air direct.

4.1.2 Refroidissement direct à eau

Le refroidissement direct à eau consiste à refroidir les cartes électroniques par une circulation d'eau. Cette technique est utilisée en particulier dans les cas où la densité de puissance est importante comme pour les baies HPC. Les baies refroidies par eau ne dissipent pas d'énergie dans la salle informatique où elles sont installées. Toutes les calories sont évacuées par l'eau qui subit une élévation de température.

Evaluation du débit d'eau nécessaire en fonction de la puissance à dissiper :

$$Q = M \times C_{\text{eau}} \times \text{delta_t}_{\text{eau}}^{\circ}$$

Où Q est la quantité d'énergie à évacuer, C_{eau} la chaleur massique de l'eau, delta_t la différence de température entre l'air entrant et l'air sortant.

$$P(W) = 1161 \cdot D_{\text{eau}}(\text{m}^3/\text{h}) \cdot \text{delta_t}_{\text{eau}}^{\circ}$$

Pour une puissance IT installée P de 100kW et une différence de température de 5°C entre l'entrée et la sortie de la baie, le débit d'eau nécessaire D est de 20 m³/h.

Le PUE que l'on peut atteindre avec une installation refroidie par eau dépend de la façon dont est produite l'eau froide. Si on utilise de l'eau de pompage issue d'une nappe phréatique ou d'une rivière il sera possible d'atteindre des PUE de l'ordre de 1.1. Si on utilise un système classique à base de compresseur le PUE sera plutôt de l'ordre de 1.5.

4.2 Techniques qui utilisent l'évaporation d'eau (refroidissement adiabatique)

L'énergie nécessaire pour faire changer l'eau d'état de liquide vers gazeux est très importante. Elle est mesurée par la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui s'élève à 2 256 103 J/kg. Si on diffuse de l'eau dans l'air à température ambiante, en s'évaporant l'eau va donc absorber l'équivalent d'énergie à l'air qui l'entoure provoquant un abaissement de sa température.

Pour évaporer un kg d'eau il faut donc fournir 2256 kJ. L'évaporation est donc la technique la plus efficace pour refroidir. C'est la technique mis en œuvre quand on transpire pour refroidir son corps, c'est aussi celle utilisée pour refroidir les centrales nucléaires !

Evaluation du débit d'eau nécessaire pour refroidir 100kW par cette méthode :

$$Q = L_{\text{Veau}} * M$$

$$P(W) = 626\,000 \times D (\text{m}^3/\text{h})$$

Pour refroidir 100kW par évaporation il suffit d'un débit d'eau de D = 160 litres/h!

Exemple de mise en œuvre

L'ICEcube® (4) de SGI est un container qui fonctionne en air direct la plupart du temps et propose différentes solutions de refroidissement en période chaude dont une solution par évaporation.

Précautions à prendre avec la technique adiabatique

La technique adiabatique ne permet pas de refroidir des zones confinées car elle nécessite un renouvellement permanent de l'air pour plusieurs raisons. D'une part elle ne peut plus fonctionner dès que l'air est saturé en eau. D'autre part du fait qu'elle provoque une augmentation du taux d'humidité de l'air, elle crée un milieu propice au développement de bactéries de type salmonelles.

4.3 Systèmes de climatisation plus classique qui mettent en œuvre une pompe à chaleur

Principe de base

Une pompe à chaleur est basée sur deux principes fondamentaux : l'évaporation absorbe de l'énergie et produit donc du froid tandis que la condensation fournit de l'énergie et produit donc de la chaleur. En mettant en œuvre ces deux

changements d'état au cours de la circulation d'un liquide, il sera donc possible : d'absorber de l'énergie d'un côté du circuit là où a lieu l'évaporation, et de la rejeter de l'autre côté où aura lieu la condensation.

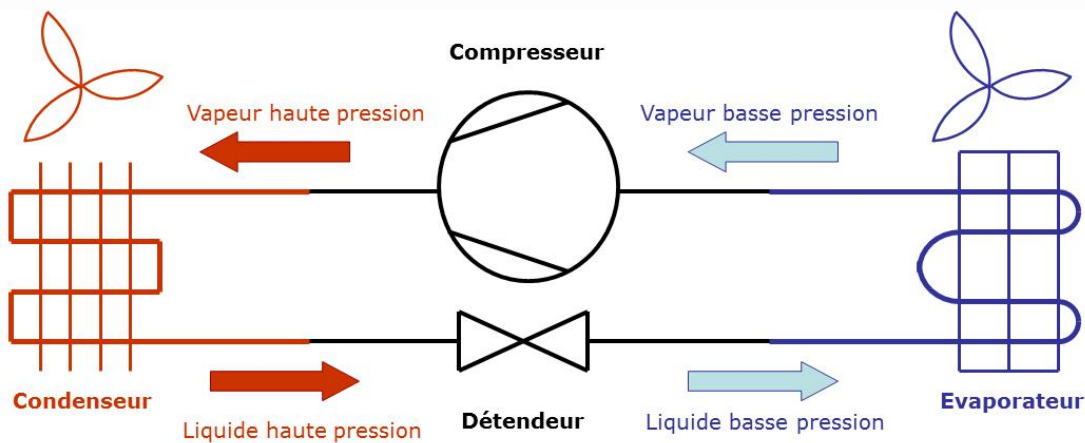


Figure 4 - Principe de la pompe à chaleur, l'évaporation du liquide basse pression refroidit l'évaporateur tandis que la condensation de la vapeur haute pression chauffe le condenseur

La pompe à chaleur absorbe des calories dans la salle informatique où sera placé l'évaporateur pour les restituer à l'extérieur où sera placé le condenseur.

La puissance électrique nécessaire pour alimenter le compresseur et les ventilateurs est, en principe, sensiblement inférieure à la puissance thermique évacuée. Le « rendement » d'une pompe à chaleur est donc supérieur à 1. On utilisera le terme de « coefficient de performance » ou COP au lieu de rendement.

Une étude sur les COP chauffage donne des valeurs entre 1,5 et 4 avec une moyenne à 2,5. Mais dans le cas du chauffage, les pertes d'énergie contribuent positivement au chauffage ce qui n'est pas le cas en refroidissement.

Une pompe à chaleur va consommer de l'énergie pour refroidir même s'il fait beaucoup plus froid dehors que dans votre salle informatique ce qui est assez frustrant et peu écoresponsable. C'est pourquoi les systèmes les plus modernes prévoient un bypass du compresseur quand il fait très froid dehors (voir figure 5). Cette technique – parfois appelée freechilling – permet une économie qui peut être importante en fonction de la région où on se trouve.

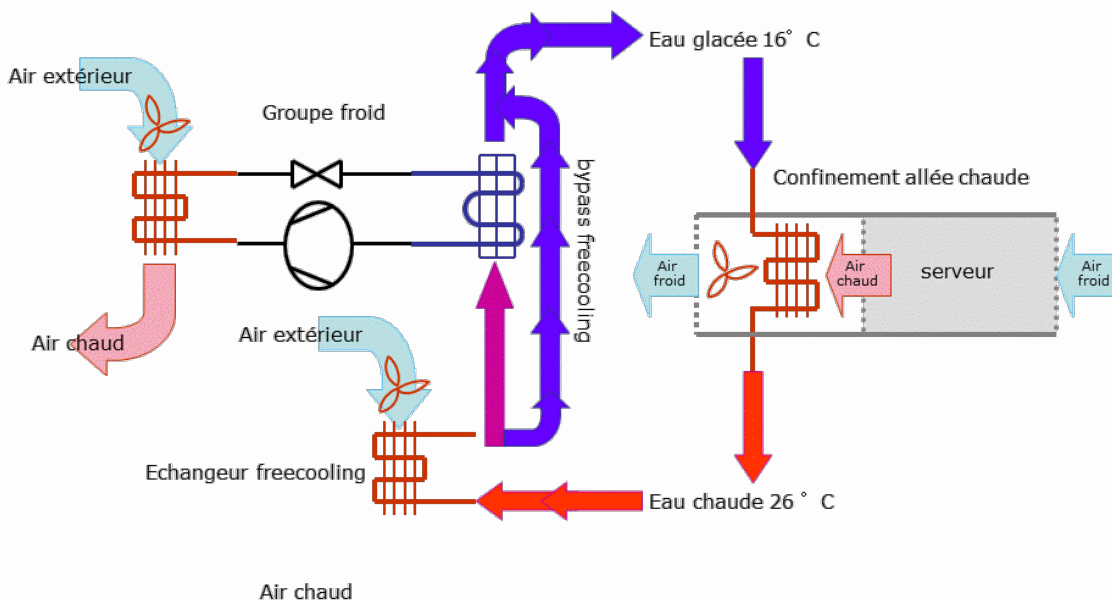


Figure 5 - Freechilling, bypass du compresseur en période hivernale

4.4 Quid de la récupération de chaleur

La possibilité de récupération de chaleur directement ou indirectement, est souvent mise en avant pour justifier le caractère « vert » d'une installation. Dans la pratique il est rare que les systèmes de récupération de chaleur soient à la hauteur des attentes pour plusieurs raisons. Tout d'abord la production de chaleur d'un datacentre va suivre sa montée en puissance. Par conséquent l'utilisateur qui projette d'utiliser la chaleur du datacentre ne fera pas l'économie d'investissement d'une chaudière dont il aura besoin pendant la phase de montée en puissance du datacentre. De plus dans le cas du chauffage d'un bâtiment la chaleur produite ne sera utilisée que l'hiver, soit moins de 6 mois par an et seulement quelques semaines à pleine puissance, le reste du temps la chaleur produite devra être dissipée d'une autre façon. Enfin le point le plus important est que la récupération directe n'est souvent pas possible du fait des faibles températures en jeu. En effet une salle informatique permet de produire de l'air entre 35 et 40°C ou de l'eau aux alentours 30°C dans le cas le plus favorable. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre une pompe à chaleur pour obtenir un caloporteur à une température suffisante.

Les conditions pour permettre la récupération de chaleur sont donc d'augmenter la température du caloporteur (air ou eau) pour permettre une récupération par échange simple de trouver des utilisations de la chaleur produite qui ne soient pas saisonnières.

5 Conditions d'exploitation en termes d'hygrométrie, température poussières; recommandations ASHRAE

Le système de cooling influe directement sur les conditions d'exploitation du matériel informatique.

Le diagramme psychrométrique (5) permet de positionner un point de fonctionnement en humidité et température. Quand l'air s'échauffe en traversant les serveurs ou se refroidit dans un climatiseur le point se décale sur une horizontale respectivement vers la droite ou vers la gauche tant que son hygrométrie absolue reste constante comme le montre la figure 6. Si en refroidissant l'air on atteint la courbe des 100% d'humidité relative et qu'on le refroidit encore, l'eau qu'il contient se condense et par conséquent son hygrométrie absolue diminue tandis que son hygrométrie relative suit la courbe des 100%.

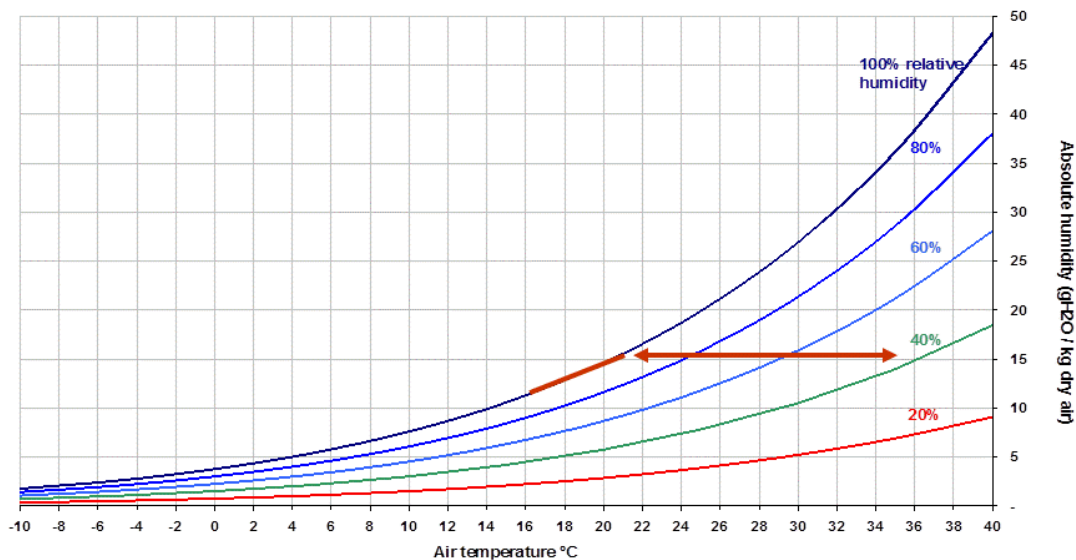


Figure 6 - Diagramme psychrométrique

Les constructeurs fournissent pour chaque serveur les conditions d'exploitation limites en humidité et en température qu'il ne faut pas dépasser. L'ASHRAE (6) (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) fournit également des recommandations plus générales sur les mêmes paramètres en fonction des classes de matériels (voir figure 7).

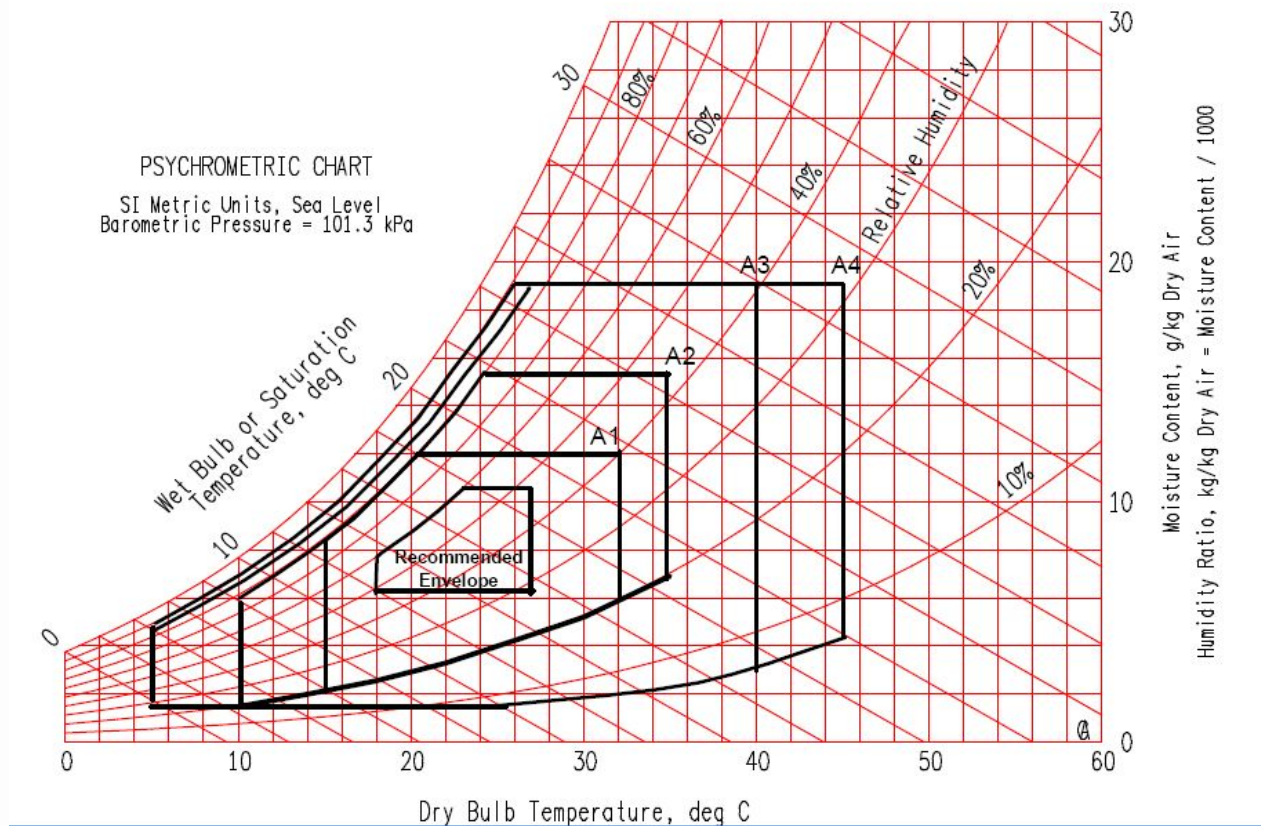


Figure 7 - Recommandations ASHRAE en fonction des classes de matériels

La plupart des matériels informatiques que l'on achète aujourd'hui sont dans la classe A2 c'est-à-dire qu'ils supportent 10 à 35°C en face avant et peuvent fonctionner avec une humidité relative comprise entre 20 et 80%. Certains matériels supportent même de fonctionner de 5 à 10% du temps en classe A4 !

Ces spécifications permettent l'utilisation de systèmes de refroidissement du type air direct comme le montre la figure 8. Elle devraient au moins inciter les responsables de datacentre à se libérer des contraintes sur le contrôle hygrométrique, très coûteux en coût de fonctionnement, et à augmenter la température de consigne de leur salle informatique (3).

La figure 8 montre les points de mesure en température et humidité à Grenoble en vert, les spécifications de fonctionnement pour du matériel Dell standard de 2011 dans le cadre rouge, et les spécifications de la classe A4 dans le cadre noir. Les points hors spécification sont tous situés à gauche des cadres. Un simple mélange de l'air extérieur avec de l'air de reprise provenant l'arrière des serveurs permettrait donc de ramener tous les points pratiquement dans les spécifications du constructeur et en tout cas très largement dans les spécifications de la classe A4. À Grenoble il est donc possible de faire fonctionner des matériels de ce type sans refroidissement !

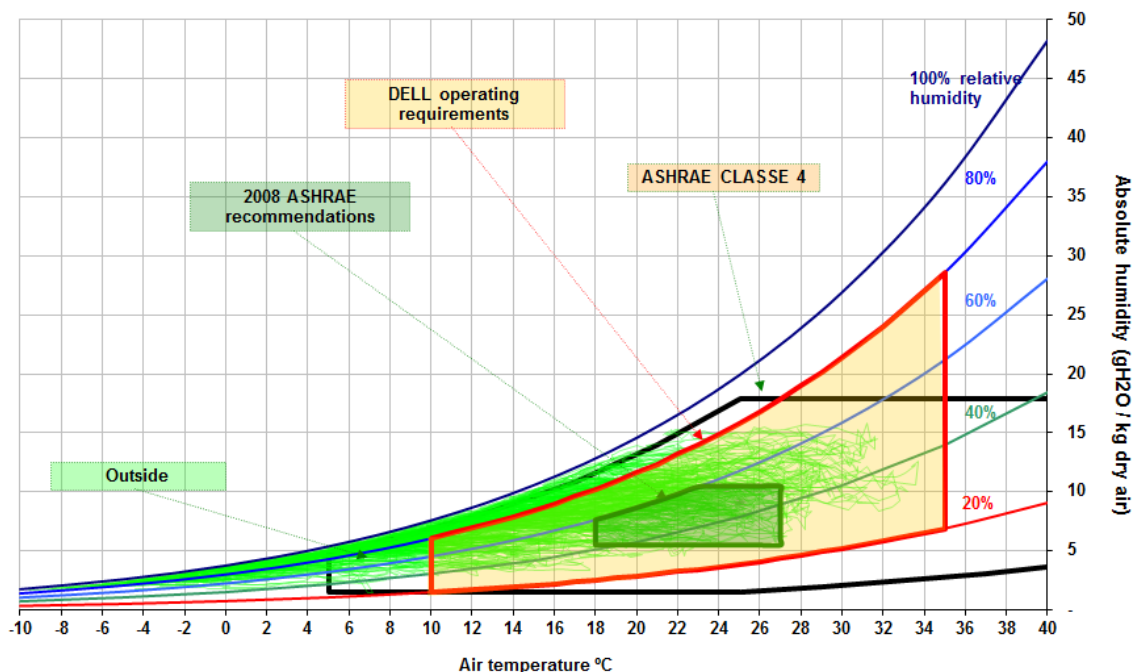


Figure 8 - Comparaison des températures et hygrométrie à Grenoble avec les spécifications de Dell sur du matériel standard de 2011 et la classe ASHRAE A4

Risques et précautions à prendre en cas d'hygrométrie trop basse ou trop haute

L'hygrométrie est basse en période hivernale quand l'air extérieur est froid et sec. Quand l'air est introduit dans la salle informatique sa température s'élève et son hygrométrie relative diminue. Il s'échauffe encore quand il traverse les serveurs ce qui renforce la baisse de son hygrométrie relative. Une faible hygrométrie pourrait poser des problèmes électrostatiques, comme des redémarrages intempestifs ou même la détérioration des composants par décharge électrostatique. Dans la pratique les constructeurs ont été contraints depuis longtemps à maîtriser ces risques car les composants utilisés sont destinés au grand public à qui il serait difficile d'imposer des conditions d'utilisation restrictives en particulier sur le taux d'humidité. Malgré tout, si le taux d'humidité peut atteindre des valeurs très basses, il est prudent de soigner la mise à la terre des baies et des serveurs ainsi que de mettre en place un plancher électrostatique relié à la terre.

En période estivale et par temps humide, l'air peut être chaud et chargé en eau. Si on le refroidit son hygrométrie relative augmente et il peut atteindre la saturation au niveau du système de refroidissement. Une forte hygrométrie peut poser des problèmes d'oxydation des matériels. Il y a également un risque de condensation si la température n'est pas homogène et s'il y a des points froids. Ce peut être le cas en particulier au niveau du système de refroidissement. Quand l'air traverse les serveurs, sa température s'élève et son hygrométrie baisse, il n'y a donc pas de risque de condensation dans les serveurs quand ils sont en fonctionnement. Précautions à prendre : il faut obligatoirement prévoir un système de récupération des condensats au niveau de l'échangeur. Il est nécessaire de bien maîtriser les flux et le cloisonnement pour éviter les points froids.

6 Filtration

L'objectif de la filtration de l'air est de garantir dans le temps une bonne qualité de la ventilation des serveurs de la salle informatique. En particulier les grosses particules telles que les pollens ne doivent pas pouvoir pénétrer dans la salle informatique. Un filtrage de base type G4 permettra d'éliminer facilement ces particules en générant une faible perte de charge. Les particules plus fines ne posent pas de problème particulier hormis l'encrassement des machines. Il est néanmoins possible de pallier à cet inconvénient en adjoignant un filtrage de type F7 en cascade après le filtrage G4.

Il est à noter que les constructeurs ne donnent pas de spécification sur la qualité de l'air en termes de filtration.

7 En conclusion

Refroidir peut coûter cher en énergie si on utilise une méthode classique mettant en œuvre un compresseur. Les composants de nos datacentres, serveurs et stockage, sont pourtant les mêmes que ceux développés pour le grand public et offrent des spécifications de fonctionnement compatibles avec une utilisation sans contrainte de température et humidité partout dans le monde. Cette tendance n'est pas réversible à court terme car les coûts de développement de composants spécifiques pour le HPC ou les datacentres ne seraient pas amortissables sur les faibles séries en jeu. Il est donc probable que l'on continue à utiliser des composants grand public dans nos datacentres avec des spécifications de fonctionnement qui permettront une utilisation sans surcoût énergétique pour les refroidir. Une fois ce point acquis il pourra être intéressant d'étudier les possibilités de récupération de la chaleur produite qui devient plus facile à exploiter à mesure que la température de fonctionnement augmente.

8 Bibliographie

1. **Komey, J.** *Growth in data Center Electricity Use*. Sandford : www.komey.com, 2005 to 2010, 2011.
2. **Philippe Balin, Françoise Berthoud, Amélie Bohas, Carole Chabuillet, Jean-Daniel Dubois, Eric Drezet, Cédric Gossart, Marianne Parry.** *Les impacts écologiques des technologies de l'information et de la communication*. s.l. : EDP Sciences, 2012. 978-2-7598-0761-1.
3. *Intel tells datacentre managers to turn up the heat.* **Sophie Curtis, Techworld.** 2012.
4. **SGL.** <http://www.sgi.com/pdfs/4274.pdf>. 2011.
5. **A.C.Mattos, BEE, MBA.** The Psychrometer, <http://www.amattos.eng.br/Public/Psychrometer/Psychrometer.htm>. 2005.
6. **ASHRAE.** <https://www.ashrae.org/>.
7. **UIT, Union internationale des telecommunications.** http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2012/70-fr.aspx#.UinxOT-jaa4. 2012.