CENTRE DES TECHNOLOGIES DE L'EAU

Rapport sur le banc d'essai

«Validation technologique de l'efficacité d'un système de recirculation d'eau pour le refroidissement des compresseurs dans le but d'éliminer le gaspillage de l'eau potable»

Juillet 2018

Table des matières

1. Contexte du projet 3

2. Présentation du banc d'essai 5

3. Essais préliminaires 13

4. Évaluation de l'efficacité du système 17

5. Évaluation de l'efficacité de la vanne de sécurité 20

6. Estimation des coûts d'opération 23

7. Recommandations 25

8. Corrélation avec l'étude précédente 28

Annexes 31

Personnes impliquées dans ce projet

- Monsieur **Rémi Haf,** conseiller en planification, Division de la gestion durable de l'eau, Direction de la gestion stratégique des réseaux d'eau, Service de l'eau
  Ville de Montréal.

- Madame **Édith Laflamme**, directrice générale du Centre des technologies de l'eau.

- Monsieur **Serge Panneton,** maître mécanicien en tuyauterie, Plomberie Robert Panneton.

- Monsieur **Jean-Claude Rolland**, professeur et chargé de projets pour le Centre des technologies de l'eau.

- Madame **Zénïab Diarra ing. jr.,** chercheur du Centre des technologies de l'eau.

- Monsieur **Jean-Marc Bélisle,** technicien en assainissement de l'eau pour le Centre des technologies de l'eau.

1. Contexte du projet

Le mandat, tel que défini en début de projet avait été élaboré pour l'installation d'un prototype dans la crémerie où nous avions caractérisé la consommation d'eau en période de pointe à l'été 2016.

Suite à l'impossibilité d'installer l'unité de refroidissement, sans contrevenir aux règlements de l'arrondissement, nous avons convenu de modifier l'orientation du travail et de faire un banc d'essai expérimental permettant d'évaluer l'efficacité du prototype pour atteindre les objectifs de la proposition initiale.

Étape 1. Surveillance des travaux de construction du prototype

En collaboration avec l'entrepreneur mandaté pour la construction du système, nous allons procéder au choix final des équipements requis : capacité réduite et caractéristiques.

Nous allons être présents durant le déroulement des travaux pour collaborer aux prises de décision tout au long du montage.

Étape 2. Mise en route du système

Un fois les travaux complétés, en collaboration avec l'entrepreneur mandaté pour la construction du système, nous allons procéder au démarrage de l'unité.
Nous allons installer des équipements de mesure de débit et des thermomètres en différents points nous permettant de mesurer les écarts de température, les débits et la fréquence des arrêts et départs de l'unité de refroidissement (chiller).

À cette étape nous allons procéder aux ajustements requis pour un fonctionnement adéquat :

- Ajustement des vannes pour régulariser les débits d'eau,
- Choix des températures de consignes,
- Vérification du fonctionnement de la vanne de sécurité (vers le drain) et des dispositifs de purge d'air.
- Vérification de l'efficacité de l'unité de refroidissement.

Étape 3. Ajustement et modifications

Une fois le banc d'essai opérationnel avec le branchement du chauffe-eau, nous allons évaluer le fonctionnement de l'ensemble.

À cette étape nous allons procéder à des essais préliminaires nous permettant de modifier certains aménagements dans le but d'optimiser le rendement global. Nous voulons nous assurer que les séquences de démarrage-arrêt de l'unité de refroidissement (chiller) sont acceptables.

Étape 4. Optimisation

Nous allons en premier lieu déterminer les débits optimums pour travailler sur le banc d'essai : débit pour la recirculation et débit pour le refroidissement.

Une fois ces paramètres fixés nous allons vérifier la capacité thermique que nous pouvons obtenir à partir du chauffe-eau qui produit la charge thermique nous permettant de simuler l'apport des compresseurs dans un cas réel.

Nous allons par la suite débuter des simulations de charge thermique pour évaluer le rendement du système

.

Étape 5. Corrélation entre la charge thermique et le tonnage

Puisque la boucle de refroidissement a l'option de fonctionner avec l'eau du réseau, ceci par mesure de sécurité dans le cas d'une défectuosité du système, nous avons la flexibilité de décider de la capacité pour l'unité de refroidissement (eau/air)

Nous pouvons fixer le tonnage de cette unité en fonction de la charge thermique maximum absorbée par la boucle de refroidissement ou encore réduire cette capacité sachant qu'en période de pointe le refroidissement sera assumé par l'eau du réseau.

Cette adéquation est difficile à établir pourtant elle a un impact direct sur le coût du système. Dans ce contexte, à partir du banc d'essai, du rendement mesuré et de la charge thermique calculée sur la base des relevés obtenus dans le projet précédent, nous allons par extrapolation établir une corrélation.

L'objectif est d'arriver à développer un outil d'aide à la décision pour le choix de l'unité de refroidissement (chiller) :

- tonnage vs charge thermique (indirectement le nombre de compresseurs à refroidir)
- tonnage versus pourcentage de réduction du volume d'eau utilisé : 100%, 95%, 90%, etc.…

Étape 6. Rédaction du rapport final

Ce rapport inclura les recommandations ainsi que les tableaux obtenus pour la corrélation telle que définie dans l'étape précédente.

2. Présentation du banc d'essai

Construction du banc d'essai

Le site : nous avons installé le banc d'essai au sous-sol du pavillon E du Cégep de Saint-Laurent; nous avions là un espace idéal facilement accessible et directement face à un ventilateur mural pour évacuer la chaleur dégagée.
Nous avions besoin d'une alimentation en eau pour le système et pour le chauffe-eau.
Nous avions aussi besoin d'un puits pour évacuer l'eau à l'ouverture de la vanne de sécurité.
Finalement nous avions aussi besoin d'alimentation électrique soit du 110 volts pour les pompes et du 220 volts pour le chauffe-eau et l'unité de refroidissement.

Travaux d'installation : Les travaux d'installation ont été réalisés par la **Plomberie Robert Panneton** sous la direction de monsieur Serge Panneton.





Photo1 : arrivée des composantes et travail d'assemblage

Fournisseur des composantes : La majorité des composantes utilisées ont été fournies par **le Groupe Master**, spécialiste en climatisation, situé à ville Saint-Laurent.

Une fois le montage complété nous avons démarré le travail expérimental :

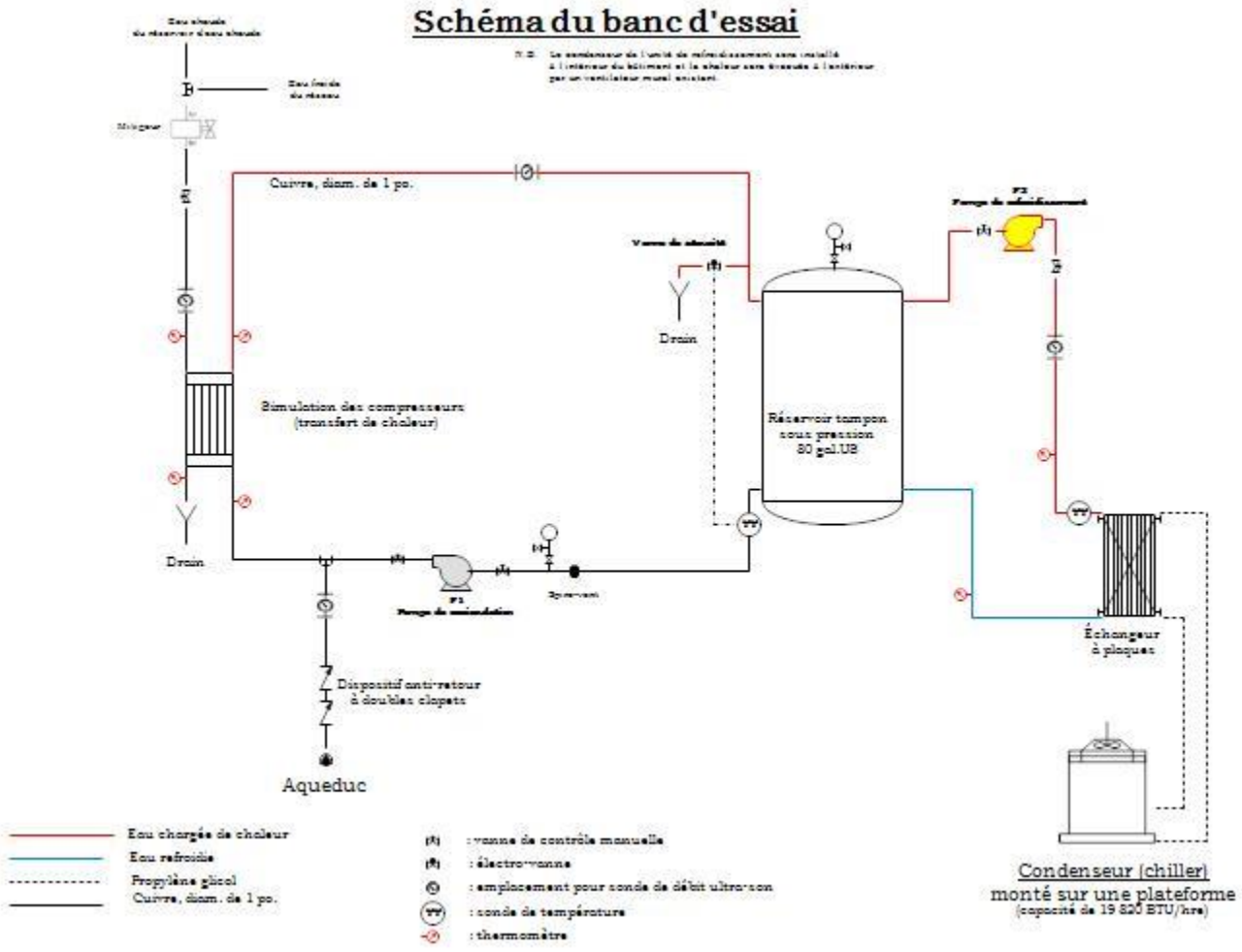


Photo 2 : montage du système complété

En premier lieu nous avons installé des équipements de mesure de débit soit le débit d'eau chaude en provenance du chauffe-eau, le débit de recirculation généré par la pompe de recirculation qui déplace l'eau de bas en haut du réservoir tampon, le débit de refroidissement généré par l'autre pompe qui fait circuler l'eau de haut en bas du réservoir tampon et le débit de l'eau évacuée à l'ouverture de la vanne de sécurité.

Nous avons installé des débitmètres à ultra-son portables dont la sonde est installée à l'extérieur de la conduite.

Toutes les lectures de température ont été faites sur des thermomètres à cadran et aiguille installés en permanence sur les conduites. Nous avions 6 thermomètres ainsi qu'une sonde à affichage numérique installée à l'entrée de la boucle de recirculation; cette sonde était reliée au contrôleur de la vanne de sécurité. De plus l'unité de refroidissement était commandée par une sonde température installée à l'entrée de la boucle de refroidissement.



La chaleur libérée par le condenseur est rejetée à l'extérieur par une unité murale de ventilation déjà en place :



- ## Les principales composantes

Nous présentons en détails chacune des principales composantes du système :

- **La pompe de recirculation (P1)**

Son rôle est de pousser l'eau du système vers chacun des compresseurs à refroidir; son débit (l /min) est déterminé en fonction du nombre. Un compresseur nécessite un débit de l'ordre de 5 à 15 l/min dépendant de la puissance du compresseur et de la température de l'eau.

Nous avons installé une pompe ayant trois vitesses pour un débit de 50 l/min à une pression de 10 psi. Une vanne manuelle en aval nous a permis d'ajuster le débit. Le débit retenu pour les essais a été déterminé en fonction de l'échangeur à plaques qui simulait les compresseurs. L'écoulement se faisait du bas du réservoir et le retour vers le haut. Son écoulement est en continu.

Photo de P1 :



- **La pompe de refroidissement (P2)**

Son rôle est de récupérer l'eau du système et la pousser vers l'unité de refroidissement (chiller); son débit (l /min) est déterminé en fonction de l'échangeur à plaques installé avec l'unité de refroidissement.

Nous avons installé une pompe ayant trois vitesses pour un débit de 100 l/min à une pression de 10 psi. Une vanne manuelle en aval nous a permis d'ajuster le débit.

Photo de P2 :



- **Le réservoir tampon**

Son rôle est d'assurer un mélange des eaux froides et chaudes et de créer un temps d'équilibre pour absorber les variations de la charge thermique.

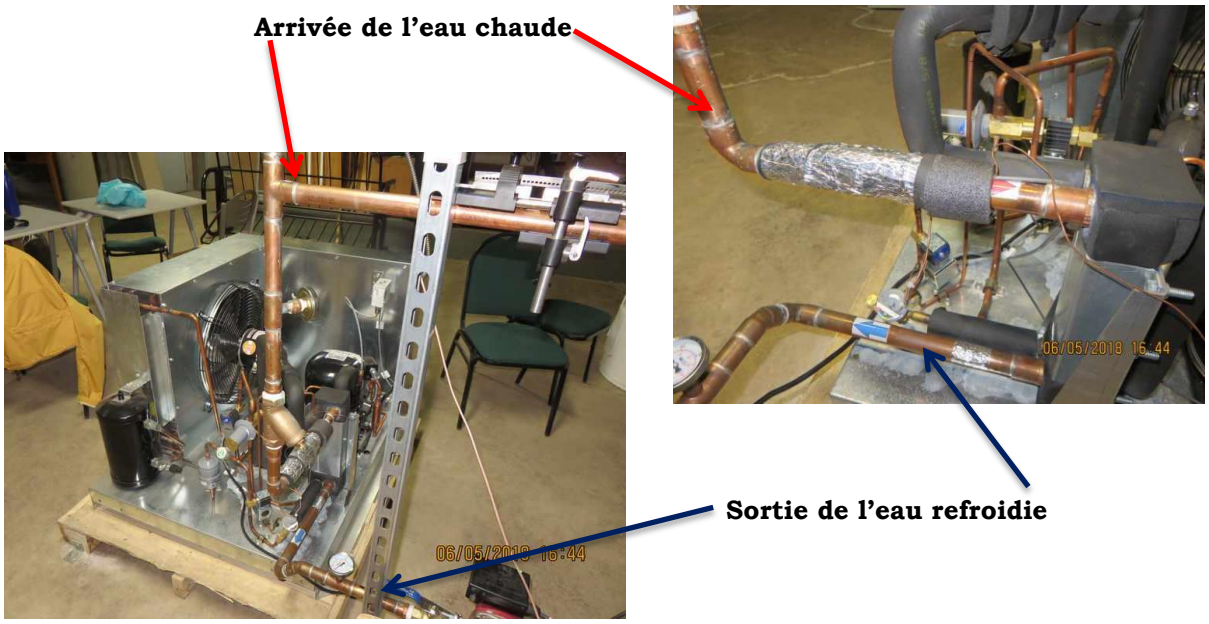
Nous avions un réservoir d'une capacité de 190 litres ayant deux prises dans la partie supérieure et deux autres dans la partie inférieure.

Photo du réservoir tampon :



- **L'unité de refroidissement (chiller)**

C'est la composante principale du système; elle a pour fonction de refroidir les eaux.



- **La vanne de sécurité**

Cette vanne est essentielle et c'est elle qui rend le système hybride, c'est à dire qu'en mode normal, le système évacue la chaleur par l'unité de refroidissement et qu'en période de pointe lorsque le système atteint sa capacité maximale, la vanne s'ouvre pour rejeter l'eau chargée de chaleur et cette eau est alors remplacée par l'arrivée de l'eau du réseau qui est de température plus basse.

Il s'agit d'une électrovanne, en mode ouvert lorsque l'alimentation électrique est coupée. Cette vanne est jumelée à une unité de contrôle ayant une sonde de température installée en amont de la pompe de recirculation. La programmation permet une valeur d'ouverture et une autre de fermeture.

Photo de la vanne de sécurité :



Contrôleur

Photo de la sonde de température :

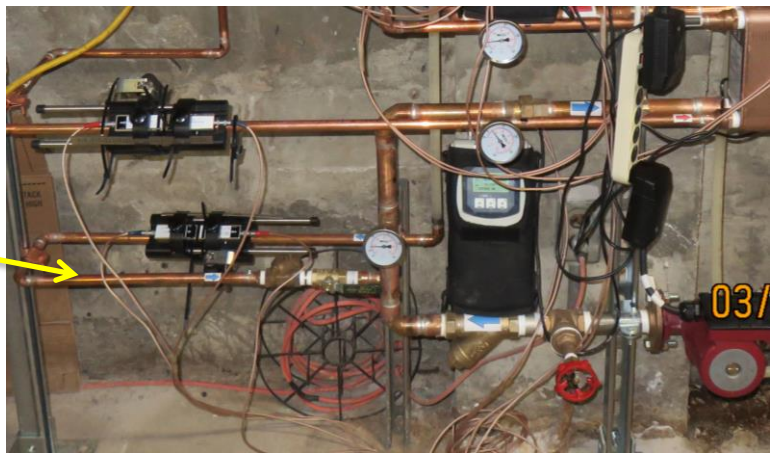


- **Le branchement sur le réseau**

La boucle de recirculation fonctionne en circuit fermé sauf lorsque la vanne de sécurité s'ouvre; il se produit alors une chute de pression qui laisse pénétrer l'eau du réseau. En circuit fermé la pression est de l'ordre de 60 à 70 psi et à l'ouverture de la vanne la pression tombe à 10 psi.

Ce branchement se situe en aval de la pompe de recirculation, un clapet anti-retour est aussi installé.

Conduite de branchement :



Protection obligatoire contre les raccordements croisés :



- **Un spiro-vent**

Une autre protection nécessaire contre l'accumulation d'air dans le système de recirculation est la mise en place d'un « spiro-vent » qui a pour fonction d'éliminer les microbulles.

Nous l'avons installé à l'amont de la pompe de recirculation.



- **Protection anti-bélier**

Le système fonctionnant en boucle fermée développe une pression par la force de poussée des pompes : la pression est de l'ordre 60 psi.



Lorsque la vanne de sécurité s'ouvre il se produit une chute de pression puisque l'évacuation se fait à la pression atmosphérique : la pression tombe à 10 psi.



Lorsque cette vanne se referme, il se produit une onde de choc qui risque d'endommager le système; il faut donc installer un réservoir pour absorber cette surpression :



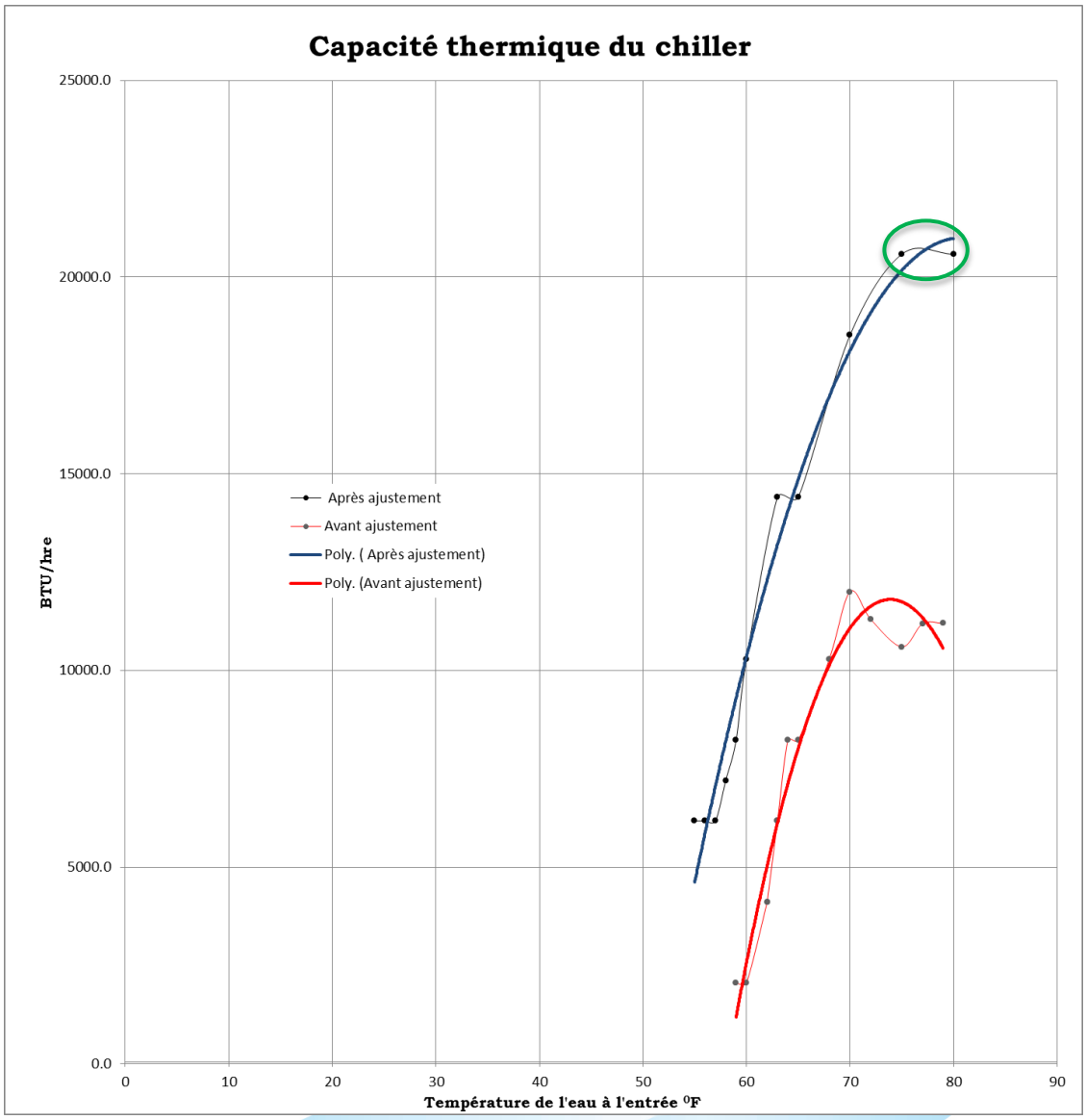
3. Essais préliminaires

- **Ajustement de l'unité de refroidissement**

Une fois installé, la première vérification que nous avons faite, a été de mesurer l'efficacité du «chiller» en fonction de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur.

Le fabricant avait certifié une capacité de **19820 BTU/hre** et dans nos premiers essais nous avons atteint une valeur maximale de 12 000 BTU/hre.

Nous savions que l'unité était mal ajustée et nous avons donc retenu les services d'un frigoriste pour faire les correctifs. Nous avons refait les mesures du rendement thermique en fonction de la température de l'eau. Nous avons obtenu **20600** BTU/hre pour une température entre **75 et 80 ^{0}F (24 à 27 ^{0}C)**



Zone efficace entre **75 - 80 ^{0}F**

- **Ajustement des débits**

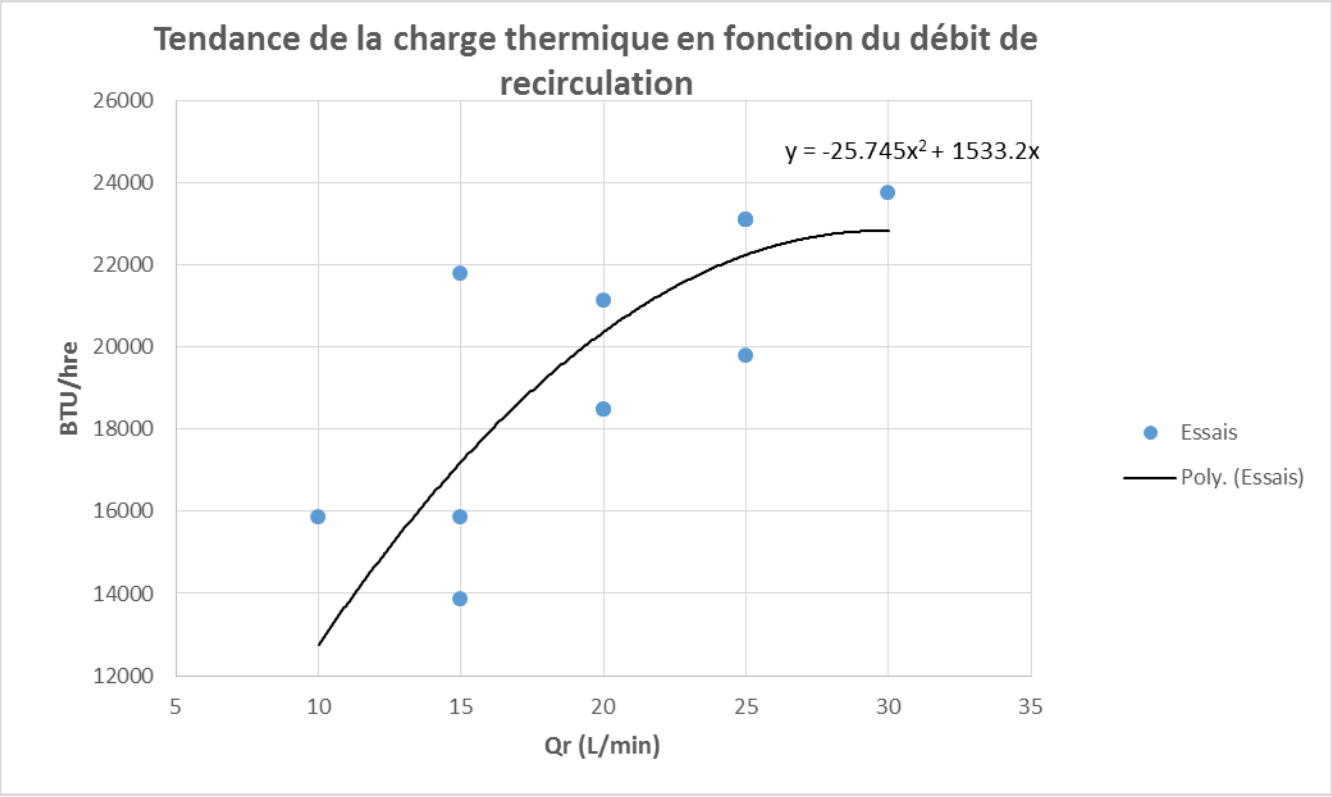
Les pompes P1 et P2 sont des pompes à trois vitesses et de plus nous avons installé une vanne en aval de chacune pour fixer ces débits à leur point optimum.

Optimisation du débit P1

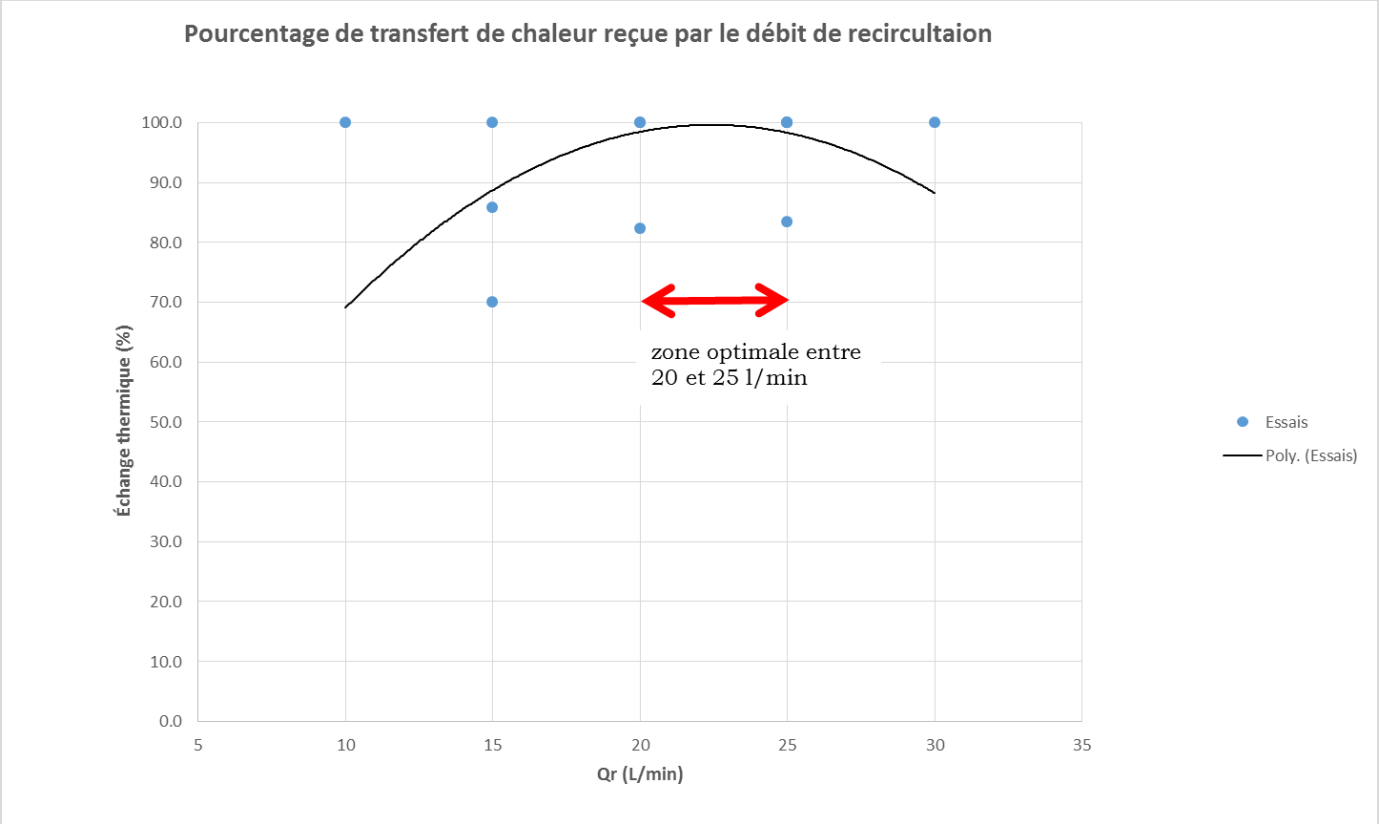
En installation réelle, ce débit sera déterminé en fonction de l'ouverture des vannes pour chacun des compresseurs. Ces vannes de régulation dite PENN s'ouvre en fonction de la pression du liquide réfrigérant pour chacun des compresseurs, pression définie par la température du liquide. Sur notre banc d'essai nous avons utilisé un échangeur à plaques alimenté par une eau chaude pour simuler la charge thermique.

Nous avons donc vérifié le débit de recirculation pour optimiser le transfert de chaleur.

Une première série d'essais où nous avons varié le débit de recirculation et mesurer la charge thermique récupérée :



Une deuxième série d'essais où nous avons varié le débit de recirculation et mesurer le pourcentage de transfert thermique entre l'eau chaude et l'eau de recirculation :



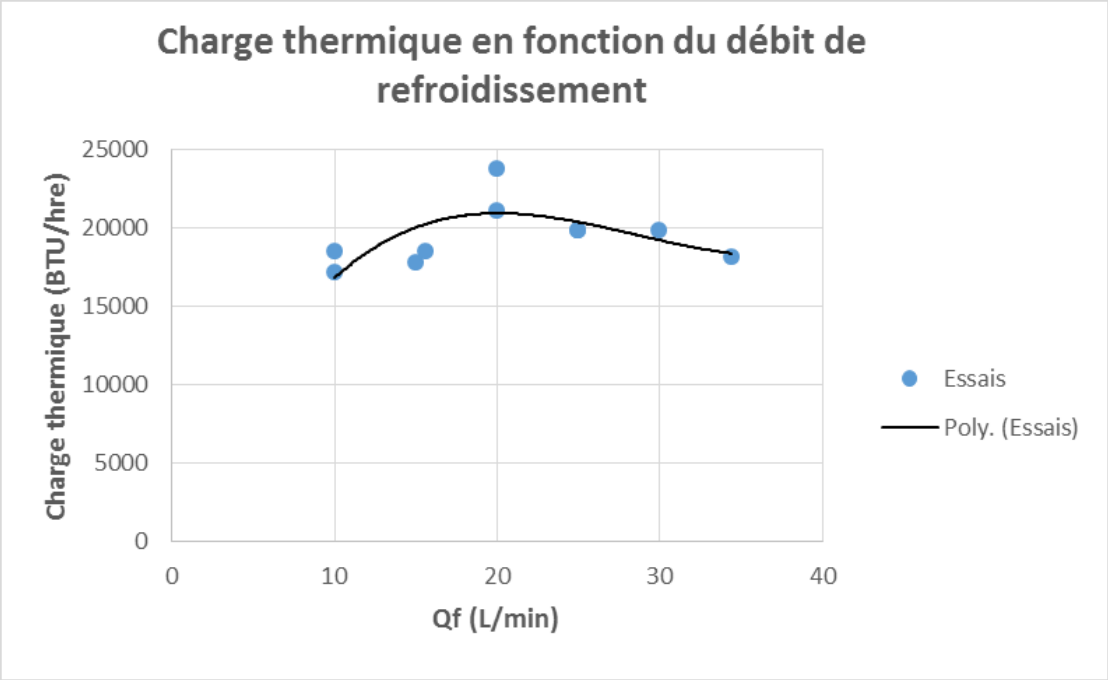
Nous avons donc retenu la valeur de **25 l/min** afin d'optimiser la charge thermique que nous pouvions transmettre à la boucle de recirculation.

Optimisation du débit P2

Cette valeur est très importante et dépend de l'échangeur de chaleur qui a été installé sur l'unité de réfrigération (chiller). Il faut donc ajuster le débit de la pompe pour obtenir un refroidissement optimal de l'eau.

Nous avons donc varié le débit et mesuré la charge thermique extraite par l'unité; dans nos résultats expérimentaux nous exprimons cette charge en BTU/hre :

$$\text{BTU/hre} = Q_r \times \Delta T \times \text{facteur de conversion}$$



Le point optimum est de **20 l/min** cependant nous avons retenu la valeur de **25 l/min** Dans le but d'équilibrer les mouvements de l'eau entre les deux boucles.

4. Évaluation de l'efficacité du système

Pour évaluer le comportement du système nous avons varié la charge thermique c'est-à-dire la chaleur transmise par l'eau chaude et dans chacun des cas nous avons établi un bilan thermique : eau chaude, eau recirculée et eau refroidie par le «chiller».

À la fin de l'essai nous vérifions si les conditions suivantes sont atteintes :

→ BTU $_{\text{eau chaude}}$ = BTU $_{\text{eau recirculée}}$

→ Les (BTU $_{\text{eau recirculée}}$) absorbés - les (BTU $_{\text{refroidissement}}$) extraits = ΔT du système

Ceci nous confirme si l'essai est valide et nous permet de déterminer la capacité réelle du «chiller» (BTU/hre) ainsi que son temps de fonctionnement minutes/heures. Une première série d'essais avec une séquence marche et arrêt de l'eau chaude 7/7 et une deuxième avec une séquence marche et arrêt 7/7 mais avec d'autres ajustement.

Commentaires :

Nous avions deux contraintes qui ont limités notre travail :

1) La capacité du chauffe-eau limitait la charge maximale et surtout sa durée.
2) La lecture des températures se faisait sur des thermomètres à lecture directe donc une précision de +/- 1 degré; au début nous avons utilisé l'échelle Fahrenheit (séries 1 et 2) mais nous avons réalisé que l'échelle Celsius était plus fonctionnelle.

Première série :

Charge thermique CIBLE BTU/hre	Charge thermique donnée par l'eau chaude BTU	Charge thermique captée par la recirculation BTU	Écart (%)	Charge thermique éliminée par le refroidissement BTU	ΔT BTU	Rendement du bilan global (%)	Rendement du chiller (BTU/HRE)	Durée de marche du chiller (min./HRE)
5000 ON: 7min. OFF: 7min.	6246	6160	1	7246	836	-6	18856	22.5
10000 ON: 7min. OFF: 7min.	11557	11330	2	13431	1254	-6	18483	39.5
15000 ON: 7min. OFF: 7min.	6361	5940	6.6	6369	0	-7	19107	48

Nous avions ajusté le système aux conditions suivantes :

débit de recirculation = 20 l/min, débit de refroidissement = 15 l/min

contrôle du chiller, démarrage = 75F, arrêt = 73F

Deuxième série :

Charge thermique CIBLE BTU/hre	Charge thermique donnée par l'eau chaude BTU	Charge thermique captée par la recirculation BTU	Écart (%)	Charge thermique éliminée par le refroidissement BTU	ΔT BTU	Rendement du bilan global (%)	Rendement du chiller (BTU/HRE)	Durée de marche du chiller (min./HRE)
5000 ON: 7min. OFF: 7min.	6753	6573	-3%	6930	0	5	20125	15.5
10000 ON: 7min. OFF: 7min.	12508	11770	-6%	11550	0	2	19565	32
15000 ON: 7min. OFF: 7min.	15284	12780	-16*	12375	0	3	20342	42
reprise **15000** ON: 7min. OFF: 7min	13990	13563	-3	12969	0	5	20873	41.4

Nous avions ajusté le système aux conditions suivantes :

débit de recirculation = 25 l/min (* il était de 41.2), débit de refroidissement = 25l l/min

contrôle du chiller, démarrage = 78, arrêt = 76

Troisième série :

Charge thermique CIBLE BTU/hre	Charge thermique donnée par l'eau chaude BTU	Charge thermique captée par la recirculation BTU	Écart (%)	Charge thermique éliminée par le refroidissement BTU	ΔT BTU	Rendement du bilan global (%)	Rendement du chiller (BTU/HRE)	Durée de marche du chiller (min./HRE)
10000 ON: 5min. OFF: 10min.	9870	9306	-6	9702	0	4	19149	33
15000 ON: 5min. OFF: 10min.	7831	7574	-3	7326	0	3	19111	35

Nous avions ajusté le système aux conditions suivantes :

débit de recirculation = 25 l/min, débit de refroidissement = 25l l/min

contrôle du chiller, démarrage = 26C, arrêt = 24C

Analyse :

Les résultats sont très satisfaisants. Dans tous les cas les bilans thermiques sont dans un % expérimental admissible sauf celui à 16 % qui s'explique par le fait que le débit de recirculation était trop élevé (problème dû au débitmètre). Nous avons d'ailleurs repris cet essai.

Nous obtenons un rendement optimum de l'unité de refroidissement avec un rendement de l'ordre de 20 000 BTU/hre conformément aux spécifications du fabricant. D'ailleurs il est intéressant de remarquer qu'en augmentant la température de démarrage du chiller (deuxième série versus la première) nous obtenons un rendement légèrement supérieur ce qui confirme les résultats obtenus dans les essais préliminaires.

Nous pouvons aussi constater l'efficacité du système dans son ensemble qui réponds tel que prévu et de **la durée de fonctionnement du chiller qui est directement reliée à la charge thermique.**

Les BTU récupérés par le système sont en équilibre avec les BTU évacués par le chiller.



5. Évaluation de l'efficacité de la vanne de sécurité

Cette vanne est un élément essentiel du système. D'une part elle assure la sécurité d'opération en tout temps si une panne se produit et d'autre part elle évite un surdimensionnement du système puisque en période de pointe lorsque le système atteint sa capacité maximale, elle prend la relève.



Nous avions comme objectifs de vérifier son efficacité et d'évaluer la capacité supplémentaire qu'elle apporte au système. Cette valeur est essentielle pour assurer que le système choisi aura une capacité suffisante en tout temps.

Nous avons appliqué la même méthode que précédemment en variant la charge thermique et faisant le bilan thermique dans chacun des cas. La durée de chaque essai est variable selon les conditions et c'est pourquoi nous présentons les résultats en BTU/hre, l/hre ou minutes/heure pour fin de comparaison.

Quatrième série :

Charge thermique CIBLE **BTU**	Charge thermique captée par la recirculation **BTU**	T aqueduc **^{0}C**	Volume eau évacuée **l/hre**	Charge thermique éliminée par la vanne **BTU**	Rendement vanne **BTU/HRE**	Charge thermique éliminée au chiller **BTU**	Rendement du bilan global **%**	Rendement du chiller **BTU/HRE**	Durée de marche chiller **min./HRE**
25000 **en continu**	4916	13	1597	7028	52384	---	3*	---	0
15000 **ON: 5min. OFF: 5min.**	5909	13	3290	2835	51859	2871	-3	20266	19.6

3* Le bilan tient compte du réchauffement de 3^{0}C de l'eau entre le début et la fin de l'essai.

Nous avions ajusté le système aux conditions suivantes :

débit de recirculation = 25 l/min, débit de refroidissement = 25l l/min

contrôle du chiller, démarrage = 26C, arrêt = 24C

contrôle de la vanne : ON à 24C et OFF à 23C

Cinquième série :

Charge thermique CIBLE BTU	Charge thermique captée par la recirculation BTU	T aqueduc ^{0}C	Volume eau évacuée l/hre	Charge thermique éliminée par la vanne BTU	Rendement vanne BTU/HRE	Charge thermique éliminée au chiller BTU	Rendement du bilan global %	Rendement du chiller BTU/HRE	Durée de marche chiller min./HRE
10000 en continu	6773	15	655	7309	30073	---	-8	---	0
15000 ON: 5min. OFF: 5min.	9088	15	1669	3398	30209	5493	2	18796	27
8000 ON: 7min. OFF: 7min.	3749	15	631	3539	25586	---	-6	---	0
10000 ON: 7min. OFF: 7min.	5148	15	0	0	0	5128	1	20390	38

Nous avions ajusté le système aux conditions suivantes :

débit de recirculation = 25 l/min, débit de refroidissement = 25l l/min

contrôle du chiller, démarrage = 26C, arrêt = 25C

contrôle de la vanne : ON à 24C et OFF à 23C

Analyse :

Nous avons changé les points de consigne pour le contrôle de la vanne et aussi ceux du chiller. Nous voulions obtenir une action des deux mais les écarts de température étaient trop faibles; nous avons réussi dans deux essais. La capacité thermique du chauffe-eau a limité nos possibilités.

Sans aucun problème cette vanne de sécurité fonctionne très bien et réagit comme nous le souhaitions.

Les résultats sont révélateurs. D'une part nous sommes satisfaits des bilans obtenus qui sont tous dans la marge d'erreur. Ces bilans nous font réaliser que la capacité de refroidissement du système dépend du chiller, soit approximativement de 20 000 BTU/hre ou de l'apport d'eau du réseau d'aqueduc et finalement de la somme des deux en supposant une situation extrême. Au total nous obtenons un système très efficace.

Cependant nous constatons que la vanne de sécurité nous donne une capacité approximative de **50 000 BTU/hre** dans la première série et de **30 000 BTU/hre** dans la deuxième. Cette différence vient du fait que la température de l'eau d'aqueduc était différente : 13^{0}C versus 15^{0}C.

Cette perte d'efficacité est très importante puisque l'eau du réseau peut atteindre une température de 22^{0}C en période de canicule vers la fin du mois d'août et cela signifie que la vanne de sécurité est incapable de prendre la relève.

Cette charge thermique éliminée par la vanne lorsque ouverte se calcule de la façon suivante :

$$\mathbf{Q_{aqueduc} \times (T_{à\ la\ sortie} - T_{aqueduc}) \times Facteur\ de\ conversion}$$

Le phénomène qui se produit est que le débit d'évacuation est limité à une valeur maximale de 24 l/min; la conduite a un diamètre de ½ pouce et l'ouverture de la vanne d'évacuation provoque une chute de pression dans le système causée par cette sortie à la pression atmosphérique.

Un moyen pour remédier à ce problème serait l'installation d'une pompe sur la conduite d'alimentation pour créer une pression afin d'augmenter le débit. Une telle installation serait complexe et entrainerait des coûts supplémentaires.

Trois autres possibilités plus réalistes :

- faire un branchement de ¾ de pouce si disponible pour augmenter $\mathbf{Q_{aqueduc}} \uparrow$
- déplacer la conduite d'évacuation sur le circuit de refroidissement en amont de la pompe puisque c'est là que l'on retrouve la température la plus élevée dans notre système $\mathbf{T_{à\ la\ sortie}} \uparrow$
- faire travailler le système dans une zone de température plus élevée. Dans tous nos essais nous avons ajusté le chiller aux valeurs suivantes :78^{0}F – 76^{0}F ou 26^{0}C - 24^{0}C En augmentant cette zone de un degré soit **27^{0}C - 25^{0}C** nous obtenons une augmentation de $\mathbf{T_{à\ la\ sortie}} \uparrow$

Selon nos essais à 15^{0}C, le rendement était de 30 000 BTU/hre. L'augmentation du débit pourrait nous faire gagner un 30%. L'écart de température serait en moyenne de 10^{0}C en déplaçant la conduite d'évacuation et l'augmentation du point de consigne nous apporte un autre degré. Donc en considérant l'augmentation de la température de l'aqueduc de 7^{0}C nous aurions un écart net de 4^{0}C. Si on compare cette valeur à l'écart moyen mesuré qui était de 7^{0}C nous arrivons à une perte de 45%. Au total nous obtenons une perte de 15% ce qui veut dire que la vanne de sécurité au pire des cas aurait une capacité d'évacuation de **25 500 BTU/hre** . Évidemment il s'agit d'une projection qui devra être vérifiée en conditions réelles.

6. Estimation des coûts d'opération

Consommation électrique

La consommation électrique est relativement importante. Ce coût est directement proportionnel à la charge thermique. Cette charge varie tout au cours de l'année, il y aura des périodes de forte charge en période de canicule qui pourront représenter jusqu'à 80% en temps de fonctionnement et d'autres plus calmes.

Pour fin de projection nous appliquons, à titre d'exemple, un temps moyen d'opération du chiller à 60% ou 14.4 heures par jour :



Unité de refroidissement (chiller) :

- Intensité = 8 A
- Voltage = 208 V
- Puissance de 880 W ou .88 kWh
- Coût = 1.66 kWh × 14.4 × $ .09 = $2.15

Pompe de recirculation :

- Intensité = 1.3 A
- Voltage = 115 V
- Puissance de 150 W ou 0.15 kWh
- Coût journalier = 0.15 kWh × 24 × $ .09 = $ .32

Pompe de refroidissement :

- Intensité = 2.5 A
- Voltage = 265 V
- Puissance de 265 W ou 0.265 kWh
- Coût journalier = 0.265 kWh × 24 × $ .09 = $ .57

Coût journalier de $ 3.04 + taxes = $ 3.50

soit un coût annuel de $ 1278.00

Entretien préventif

Ce système est une mécanique qui nécessite des ajustements afin de performer à son plein rendement. Il faut donc prévoir l'intervention d'une personne compétente pour maintenir une bonne performance et prévenir les problèmes.

Dans ce contexte il faut donc prévoir une vérification au minimum de une à deux fois par année pour les ajustements et pour vérifier le comportement des différentes composantes.

soit un coût annuel de $300 à $500

Entretien

L'unité de refroidissement représente la pièce maîtresse et elle sera fortement sollicitée. Tout comme une unité de climatisation seul un frigoriste certifié peut intervenir. Sur une base annuelle il faudra vérifier le liquide réfrigérant et s'assurer que tout fonctionne adéquatement.

Les autres composantes sont les pompes, la vanne de sécurité et la vanne modulante sur le circuit de recirculation. Ces composantes ne devraient pas causer problème mais à long terme, des réparations sont à prévoir.

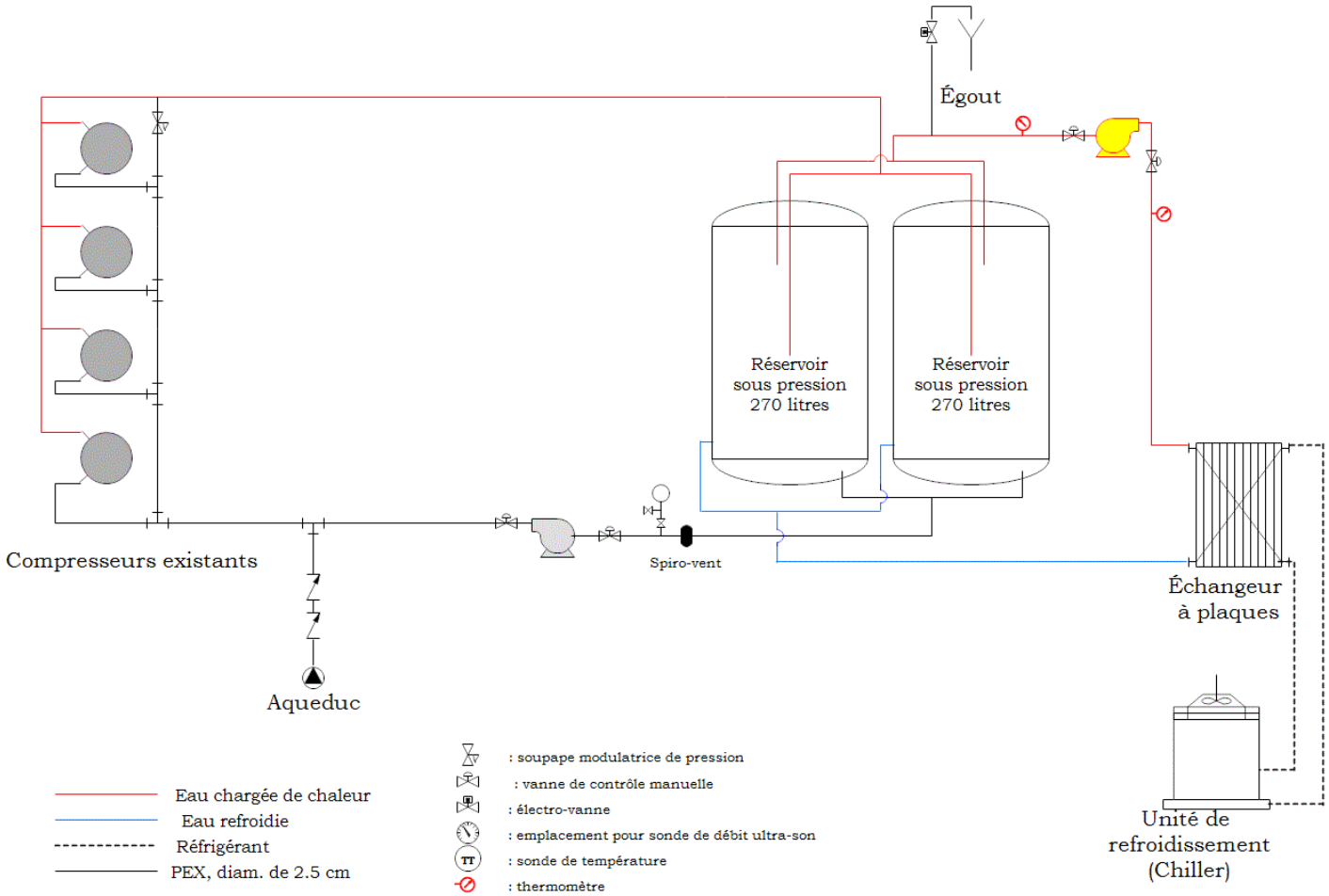
Difficile de fixer un coût mais pour être réaliste retenons une somme de $500 annuellement afin de constituer une réserve.

soit un coût annuel de $500

Au final, selon une approche conservatrice nous pouvons prévoir un coût d'opération annuel de l'ordre de **$2300**

7. Recommandations

Du banc d'essai à une installation concrète voici le schéma du système proposé sur la base des résultats obtenus :



Réservoir

Dans le cas où l'on installe un seul réservoir il serait plus fonctionnel d'installer deux tubes de plastique à l'intérieur du réservoir afin de créer une zone de mélange au centre pour ensuite laisser l'eau chaude aller vers le haut et l'eau froide vers le bas selon les lois de la densité. Cette modification augmenterait l'efficacité du réservoir et empêcherait les courants préférentiels :

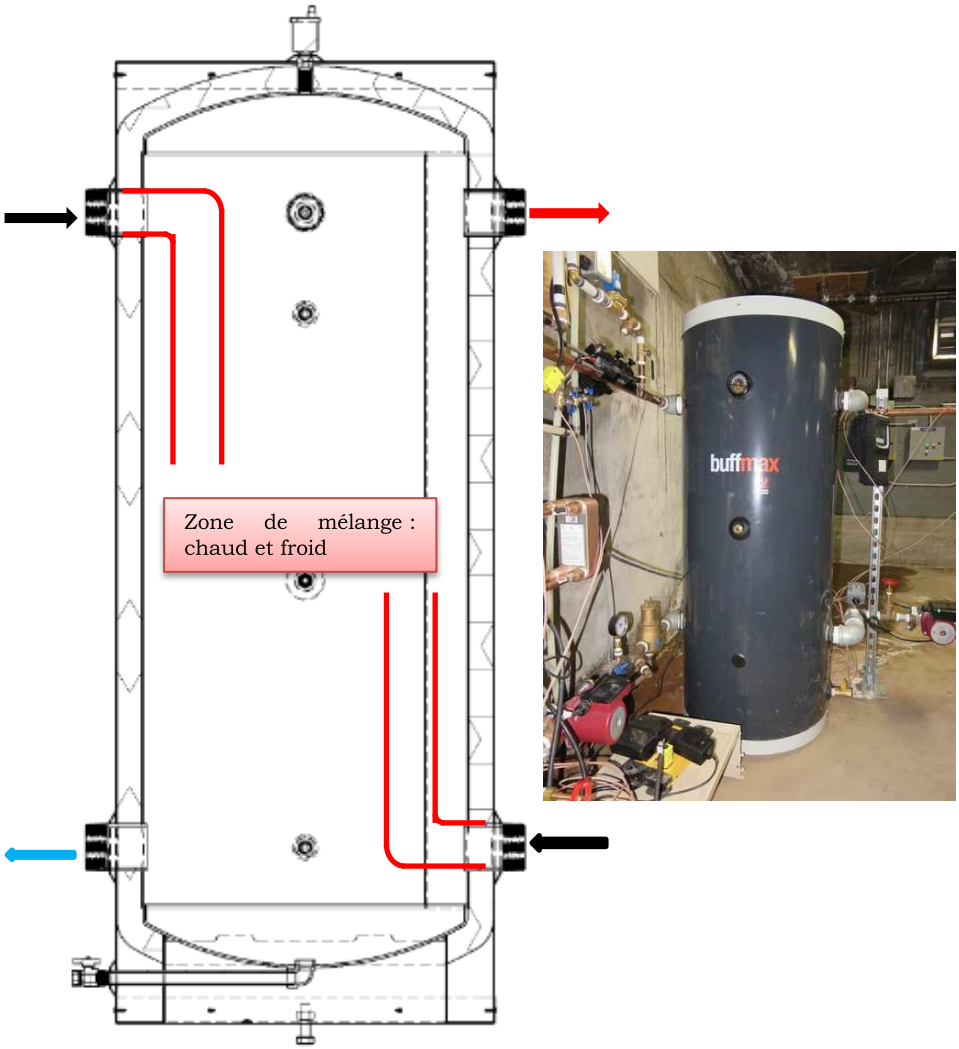


Schéma du réservoir (190 litres)

Dans le cas des doubles réservoirs qui permettent un pouvoir tampon supérieur (540 litres) Nous recommandons deux chauffe-eau de marque Giant qui permet les branchements selon ce qui est montré sur le schéma.

Vanne modulatrice de pression

Telle que montrée sur le schéma, cette vanne doit moduler, c'est-à-dire se refermer, pour assurer l'écoulement vers les compresseurs lorsque ceux-ci sont en phase de refroidissement.

Un inconnu reste à clarifier concernant la répartition du débit entre chacune des unités. Cette question n'a pu être vérifiée sur le banc d'essai et ne pourra l'être, uniquement sur une unité pilote.

Vanne de sécurité

Tel que longuement développé précédemment, cette vanne devra être installée sur un embranchement de la boucle de refroidissement situé en amont de l'échangeur du chiller afin d'optimiser le rendement de l'évacuation (voir sur le schéma).

Installation des pompes

La pompe de grande capacité devra être installée sur la boucle de recirculation **(P1)** puisque le débit doit satisfaire la demande des compresseurs pour une valeur de 40 à 50 l/min pour trois compresseurs.

La pompe de petite capacité devra être installée sur la boucle de refroidissement **(P2)** , le débit optimum étant de 20 l/min

Ajustement des contrôleurs

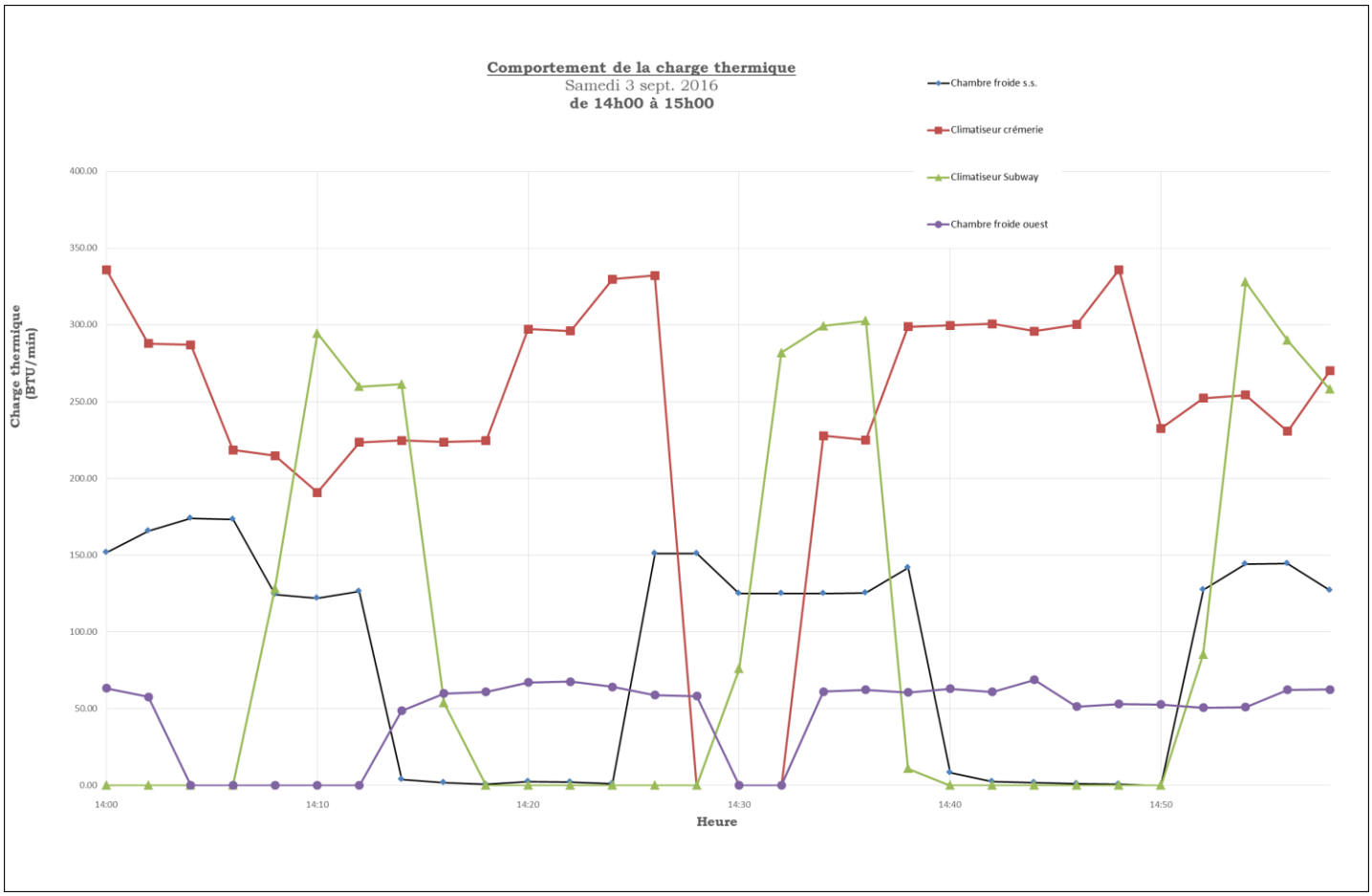
Ces ajustements devrait se situer dans les zones suivantes et à confirmer à l'usage :

- **Pour le chiller :** démarrage à 27^{0}C et arrêt à 24^{0}C
- **Pour la vanne de sécurité :** ouverture à 28^{0}C et fermeture à 26^{0}C

8. Corrélation avec l'étude précédente

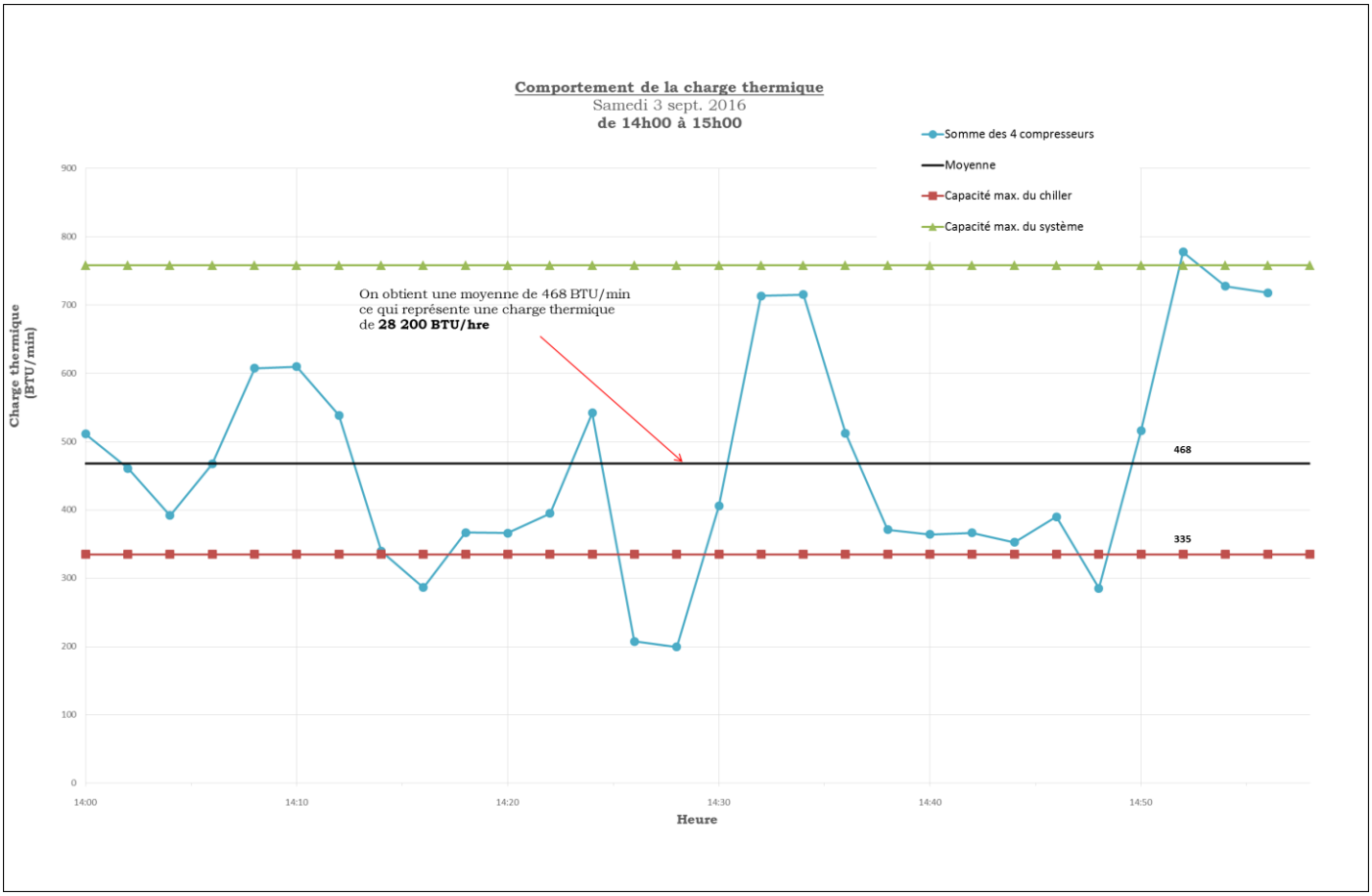
Cette étude de consommation présentée dans le rapport datant de janvier 2017 nous avait permis de déterminer la charge thermique horaire maximum (BTU/hre) atteinte durant une semaine de canicule.

Nous avions obtenu une valeur de **39 910 BTU/hre** comme pointe pour l'ensemble des 4 unités. Cette valeur ne tenait pas compte de la cadence propre à chaque unité. Nous avons repris ces données pour une période de une heure soit **de 14h00 à 15h00 le samedi**, une période de grande sollicitation pour les unités de réfrigération.



Graphique 1

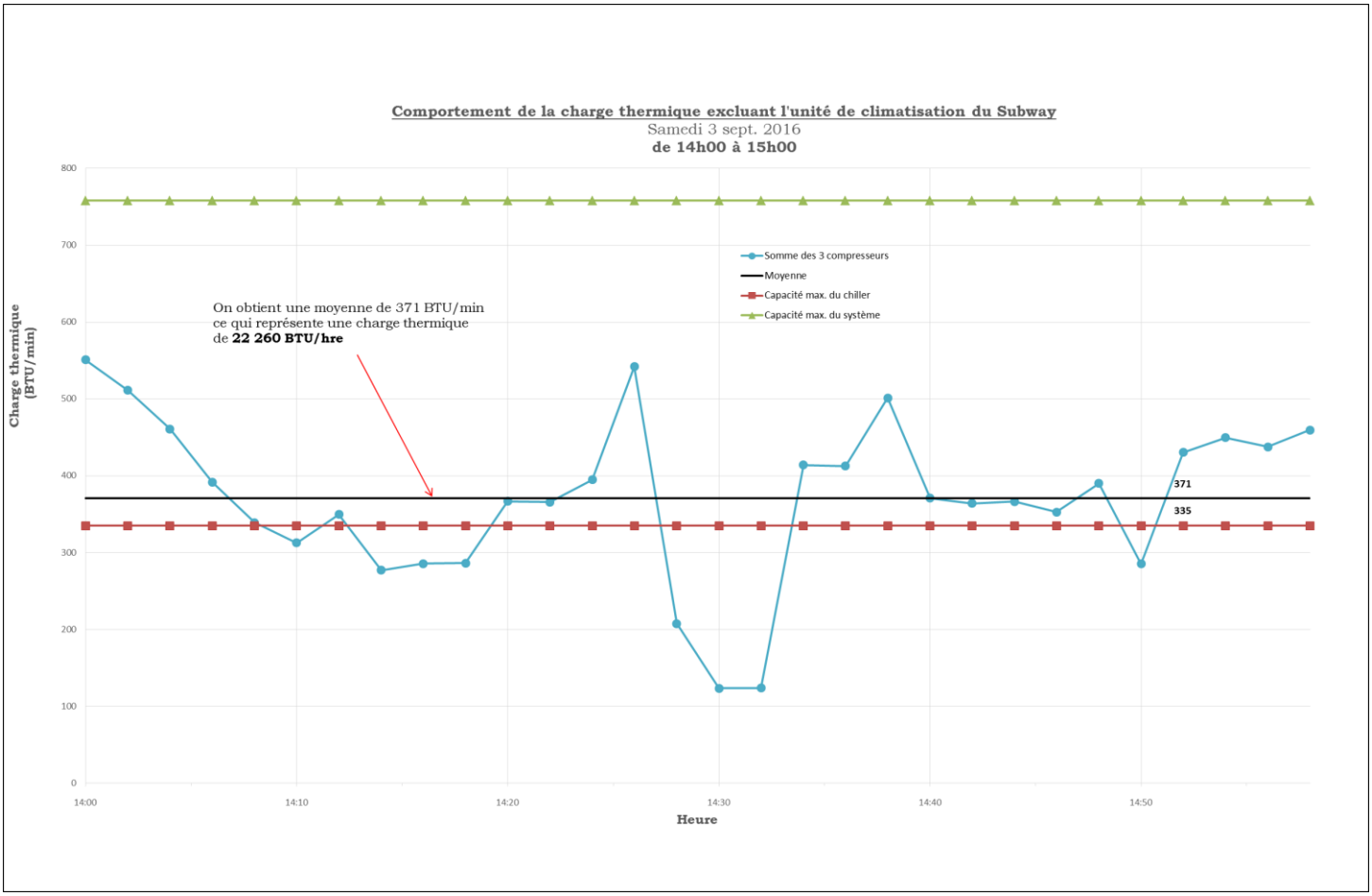
Ce premier graphique préparé à partir de la charge thermique mesurée à intervalle de deux minutes, nous montre la charge thermique de chacune des unités.



Graphique 2

Ce deuxième graphique présente la somme des 4 unités pour mieux visionner les variations de la charge thermique. De plus nous avons mis en rouge la limite de capacité du chiller soit 20 000 BTU/hre et en vert la capacité maximale du système soit 45 500BTU/hre ce qui signifie qu'entre le rouge et le vert la vanne est ouverte et simultanément le chiller travaille.

On constate que le système sera dépassé vers 14h50.



Graphique 3

Ce troisième graphique présente la même compilation que précédemment sauf que nous avons exclu l'unité de climatisation du Subway. Évidemment la charge thermique est moindre et nous retrouvons une charge que l'unité du banc d'essai peut absorber.

Température Piece (°C)	25			Date 29 mai 2018 :Essai charge thermique à 10 000BTU/h, mitigeur ΔT=15°F											
Départ (h:min:sec)															
Fin (h:min:sec)															
Durée (min)															
Chiller set point stop 73°F, ΔT=2, start 75°F															
		Eau chaude				Eau de recirculation				Eau de refroidissement					
		Charge Thermique Moyenne (BTU/h)				Charge Thermique Moyenne (BTU/h)				Charge Thermique Moyenne (BTU/h)					
		Débit eau chaude (L/min)			10.4	Débit eau de recirculation (L/min)			25	Débit eau chaude (L/min)			15		

Arrêt eau chaude	Temps	Température			Puissance	Température			Puissance	Température			Puissance	Chiller	
	0.00	99	83	16	366.08	73	79	7	385.00	76	67	9	297	1	
	1.00	100	83	17	388.96	72	79	8	440.00	77	67	10	330	1	
	2.00	100	82	18	411.84	71	78	8	440.00	76	67	9	297	1	
	3.00	100	82	18	411.84	71	77	7	385.00	76	67	9	297	1	
	4.00	100	83	17	388.96	70	77	8	440.00	77	67	10	330	1	
	5.00	99	82	17	388.96	71	76	6	330.00	77	67	10	330	1	
	6.00	97	82	15	343.20	71	76	6	330.00	76	67	9	297	1	
off	7.00	96	81		0.00	71	76		0.00	75	66	9	297	1	
off	8.00	95	81		0.00	71	73		0.00	75	66	9	297	1	
off	9.00	94	80		0.00	71	71		0.00	75	65	10	330	1	
off	10.00	93	80		0.00	71	71		0.00	74	64	10	330	1	
off	11.00	91	80		0.00	69	70		0.00	73	64	9	297	1	
off	12.00	90	80		0.00	69	70		0.00	72	63	9	297	1	
off	13.00	90	80		0.00	69	70		0.00	73	64	9	297	1	
	14.00	95	80	15	343.20	68	74	7	385.00	73	65	8	264	1	
	15.00	95	80	15	343.20	68	75	8	440.00	74	65	9	297	1	
	16.00	95	80	15	343.20	68	75	8	440.00	74	65	9	297	1	
	17.00	95	80	15	343.20	68	75	8	440.00	74	65	9	297	1	
	18.00	95	80	15	343.20	68	75	8	440.00	74	65	9	297	1	
	19.00	96	80	16	366.08	68	75	8	440.00	75	66	9	297	1	
	20.00	96	80	16	366.08	68	75	8	440.00	75	66	9	297	1	
off	21.00	96	80		0.00	68	70		0.00	74	65	9	297	1	
off	22.00	94	80		0.00	68	68		0.00	73	62	11	363	1	
off	23.00	92	79		0.00	67	67		0.00	71	65	6	198	0.5	0.5
off	24.00	91	79		0.00	70	69		0.00	71	71	0	0		1
off	25.00	90	78		0.00	70	70		0.00	71	71	0	0		1
off	26.00	90	78		0.00	71	70		0.00	71	71	0	0		1
off	27.00	89	77		0.00	71	70		0.00	71	71	0	0		1
	28.00	95	78	17	388.96	71	70	0	0.00	72	72	0	0		1
	29.00	95	80	15	343.20	72	76	5	275.00	73	73	0	0		1
	30.00	96	81	15	343.20	72	76	5	275.00	75	75	0	0		1
	31.00	96	81	15	343.20	72	76	5	275.00	75	66	9	297	0.7	0.3
	32.00	95	80	15	343.20	70	75	6	330.00	75	66	9	297	1	
	33.00	95	80	15	343.20	69	75	7	385.00	75	66	9	297	1	
	34.00	95	80	15	343.20	69	75	7	385.00	75	66	9	297	1	
off	35.00	94	79		0.00	69	70		0.00	74	65	9	297	1	
off	36.00	93	80		0.00	69	69		0.00	73	64	9	297	1	
off	37.00	91	79		0.00	68	68		0.00	72	63	9	297	1	
off	38.00	90	78		0.00	68	68		0.00	72	63	9	297	1	
off	39.00	90	78		0.00	69	69		0.00	71	71	0	0		1
off	40.00	89	77		0.00	70	70		0.00	71	71	0	0		1
off	41.00	88	78		0.00	71	70		0.00	71	71	0	0		1
	42.00	95	80	15	343.20	70	75	6	330.00	73	73	0	0		1
	43.00	95	81	14	320.32	72	76	5	275.00	75	75	0	0		1
	44.00	95	81	14	320.32	72	77	6	330.00	75	75	0	0		1
	45.00	94	79	15	343.20	71	76	6	330.00	75	66	9	297	0.7	0.3
	46.00	94	79	15	343.20	70	75	6	330.00	75	66	9	297	1	
	47.00	94	78	16	366.08	69	75	7	385.00	75	66	9	297	1	
	48.00	94	78	16	366.08	69	75	7	385.00	75	66	9	297	1	
off	49.00	93	79		0.00	70	70	0	0.00	74	65	9	297	1	
off	50.00	92	79		0.00	69	69	0	0.00	73	64	9	297	1	
off	51.00	90	77		0.00	69	69	0	0.00	73	64	9	297	1	
off	52.00	90	77		0.00	68	68	0	0.00	72	63	9	297	0.7	0.3
off	53.00	89	77		0.00	69	69	0	0.00	71	71	0	0		1
off	54.00	88	77		0.00	70	70	0	0.00	71	71	0	0		1
off	55.00	86	76		0.00	70	70	0	0.00	71	71	0	0		1
	56.00	94	79	15	343.20	71	75	5	275.00	72	72	0	0		1
	57.00	94	79	15	343.20	72	76	5	275.00	74	74	0	0		1
	58.00	94	79	15	343.20	72	76	5	275.00	74	74	0	0		1
	59.00	93	80	13	297.44	73	77	5	275.00	75	75	0	0		1
	60.00	94	80	14	320.32	71	76	6	330.00	75	66	9	297	1	
	61.00	95	80	15	343.20	70	75	6	330.00	75	66	9	297	1	
	62.00	95	80	15	343.20	70	75	6	330.00	75	66	9	297	1	
off	63.00	92	78		0.00	70	70	0	0.00	74	65	9	297	1	
off	64.00	91	78		0.00	69	69	0	0.00	73	64	9	297	1	
off	65.00	90	78		0.00	68	68	0	0.00	73	64	9	297	1	
off	66.00	89	77		0.00	68	68	0	0.00	72	63	9	297	1	
					11577.28				11330.00				13431.00	43.60	21.40
	RENDEMENT (BTU/hre):				**10525**	**BTU/hre**			**10300**	**BTU/hre**			**18483**	**BTU/hre**	

BILAN THERMIQUE:

Volume d'eau dans le système en litres:	190	
ΔT(°F) entre le début de l'essai et la fin	3	
	1254	

Température de l'eau dans le réservoir:		
Haut	74.00	71.00
Bas	74.00	71.00

	BTU eau chaude	BTU captés
Transfert à la boucle de recirculation	11577	11330

Pour le système au complet:	BTU captés	Variation des BTU	BTU extraits	Total	
	11330	1254	13431	-847	**-6%**

Annexe2 : exemple deuxième série

Reprise du bilan thermique à15000BTU/h, mitigeur ΔT=12°F

Démarrage	Température du système= 23 °C
	Chiller SP stop 76°C, ΔT=2°C, démarrage 78°C
Température finale	23 °C

Durée de l'essai 00:57:00

Δeau_chaude	12.3
Charge thermique BTU/h	15000

Eau chaude		**Eau de recirculation**		**Eau de refroidissement**	
Débit eau chaude (L/min)	10.3	Débit eau de recirculation (L/min)	25	Débit eau chaude (L/min)	25

Arrêt eau chaude	Temps	Température			Puissance	Température			Puissance	Température			Puissance	Chiller	
	(min)	In (°F)	Out (°F)	ΔT(°F)	BTU	In (°F)	Out (°F)	ΔT(°F)	BTU	In (°F)	Out (°F)	ΔT(°F)	BTU	marche	arrêt
	1.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	25	25	0	0.00		1
	2.00	42	31	11.5	469.06	24	28	4.5	445.50	26	26	0	0.00		1
	3.00	42	31	11.5	469.06	24	28	4.5	445.50	27	23	4	396.00	1	
	4.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	27	24	3	297.00	1	
	5.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
	6.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
	7.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	27	24	3	297.00	1	
off	8.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	23	4	396.00	1	
off	9.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	10.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	21	4	396.00	1	
off	11.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	12.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	20	4	396.00	1	
off	13.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	23	1	99.00	0.2	0.8
off	14.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	23	0	0.00		1
	15.00	41	30	11.5	469.06	23	26	3.5	346.50	24	24	0	0.00		1
	16.00	42	31	11.5	469.06	24	28	4.5	445.50	25	25	0	0.00		1
	17.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	26	24	2	198.00	0.5	0.5
	18.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	23	4	396.00	1	
	19.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	23	4	396.00	1	
	20.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
	21.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
off	22.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	23.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	22	3	297.00	1	
off	24.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	20	4	396.00	1	
off	25.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	20	4	396.00	1	
off	26.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	21	2	198.00	0.75	0.25
off	27.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	23	0	0.00		1
off	28.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	23	0	0.00		1
	29.00	40	30	10.5	428.27	23	26	3.5	346.50	24	24	0	0.00		1
	30.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	25	25	0	0.00		1
	31.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	26	25	1	99.00	0.25	0.75
	32.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	26	23	3	297.00	1	
	33.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	23	4	396.00	1	
	34.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
	35.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
off	36.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	37.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	22	3	297.00	1	
off	38.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	39.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	20	4	396.00	1	
off	40.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	22	2	198.00	0.5	0.5
off	41.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	24	0	0.00		1
off	42.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	24	0	0.00		1
	43.00	41	30	11.5	469.06	23	26	3.5	346.50	25	25	0	0.00		1
	44.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	26	26	0	0.00		1
	45.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	26	24	2	198.00	0.25	0.75
	46.00	42	30	12.5	509.85	24	28	4.5	445.50	26	23	3	297.00	1	
	47.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	23	4	396.00	1	
	48.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
	49.00	42	30	12.5	509.85	23	28	5.5	544.50	27	24	3	297.00	1	
	50.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	23	4	396.00	1	
	51.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	22	3	297.00	1	
off	52.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	53.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	20	3	297.00	1	
off	54.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	20	4	396.00	0.83	0.17
					13990.28				13563.00				12969.00	37.28	16.72
														2/3	**1/3**
	RENDEMENT (BTU/hre):				**15544.76**	**BTU/hre**			**15070.00**	**BTU/hre**			**20872.85**	**BTU/hre**	
												min./hre:		41.42222	

BILAN THERMIQUE:

Volume d'eau dans le système en litres: 190

ΔT(°F) entre le début de l'essai et la fin : 0

0

	BTU eau chaude	BTU captés	Ecart	
Transfert à la boucle de recirculation	13990	13563.00	-427	**-3%**

Pour le système au complet:	BTU captés	Variation des BTU	BTU extraits	Total	
	13563.0	0	12969.00	594.00	**5%**

Annexe3 : exemple troisième série

Bilan thermique à 10 220 BTU/h, mitigeur ΔT=12,5°C

Démarrage Température du système= 24 °C

Chiller SP stop 24°C, ΔT=2, start 26°C

Durée de l'essai 0:55:08

Eau chaude		Eau de recirculation		Eau de refroidissement	
Débit eau chaude (L/min)	10.3	Débit eau de recirculation (L/min)	25	Débit eau chaude (L/min)	25

Arrêt eau chaude	Temps	Température			Puissance	Température			Puissance	Température			Puissance	Chiller	
	(min)	In (°C)	Out (°C)	ΔT(°C)	BTU	In (°C)	Out (°C)	ΔT(°C)	BTU	In (°C)	Out (°C)	ΔT(°C)	BTU	marche	arrêt
	1.00	44	32	12	489.46	25	28	4	346.50	25	25	0	0.00		1
	2.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	26	26	0	0.00		1
	3.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	27	24	3	297.00	1	
	4.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	27	24	3	297.00	1	
	5.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	28	25	3	297.00	1	
off	6.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	24	3	297.00	1	
off	7.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	8.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	22	3	297.00	1	
off	9.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	10.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	11.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	20	4	396.00	0.4	0.6
off	12.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	–				1
off	13.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–				1
off	14.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–				1
off	15.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–				1
	16.00	44	30	14	571.03	24	28	5	445.50	24	–				1
	17.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	25	–				1
	18.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	26	–				1
	19.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	27	24	3	297.00	1	
	20.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	27	24	3	297.00	1	
off	21.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	24	3	297.00	1	
off	22.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	23.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	22	3	297.00	1	
off	24.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	25.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	26.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	22	1	99.00	0.6	0.4
off	27.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	–	–	–		1
off	28.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	–	–	–		1
off	29.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	–	–	–		1
off	30.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	–	–	–		1
	31.00	42	30	12	489.46	24	28	5	445.50	24	–	–	–		1
	32.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	25	–	–	–		1
	33.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	26	–	–	–		1
	34.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	27	24	3	297.00	1	
	35.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	27	24	3	297.00	1	
off	36.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	24	3	297.00	1	
off	37.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	38.00	–	–	–	–	–	–	–	–	25	22	3	297.00	1	
off	39.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	40.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	41.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	22	2	198.00	0.8	0.2
off	42.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–	–	–		1
off	43.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–	–	–		1
off	44.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–	–	–		1
off	45.00	–	–	–	–	–	–	–	–	23	–	–	–		1
	46.00	42	30	12	489.46	23	26	4	346.50	24	–	–	–		1
	47.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	25	–	–	–		1
	48.00	44	32	12	489.46	24	28	5	445.50	26	–	–	–		1
	49.00	44	32	12	489.46	25	30	6	544.50	27	25	2	198.00	0.5	0.5
	50.00	44	32	12	489.46	25	28	4	346.50	27	24	3	297.00	1	
off	51.00	–	–	–	–	–	–	–	–	27	23	4	396.00	1	
off	52.00	–	–	–	–	–	–	–	–	26	22	4	396.00	1	
off	53.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	54.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	55.00	–	–	–	–	–	–	–	–	24	21	3	297.00	1	
off	56.00	–	–	–	–	–	–	–	–					0.1	0.9
					9870.70				9306.00				9702.00	30.40	25.60
	RENDEMENT (BTU/hre):				**10575.75**	**BTU/hre**			**9970.71**	**BTU/hre**			**19148.68**	**BTU/hre**	
												min/hre:		**33**	
	BILAN THERMIQUE:														

Volume d'eau dans le système en litres: 190

ΔT(°F) entre le début de l'essai et la fin : 0

0

	BTU eau chaude	BTU captés	Ecart	
Transfert à la boucle de recirculation	9871	9306	-565	**-6%**

Pour le système au complet:	BTU captés	Variation des BTU	BTU extraits	Total	
	9306	0	9702.00	-396.00	**-4%**

Bilan thermique avec fonctionnement de la vanne de sécurité du système

Charge thermique moyenne au système (BTU/hre): 15 000

Séquence: 5 minutes ON et 5 minutes OFF

Ajustement de la vanne de sécurité ON (° C) 24

OFF (° C) 23

$Q_{eau\ chaude}$ 10.2

$Q_{recirculation}$ 25

$Q_{refroidissement}$ 25

Ajustement du chiller ΔT(° C)= 2 SP OFF (° C) 24

ON (° C) 26

Charge thermique à l'eau chaude BTU/h 30294

ΔT °C 12.5

Arrêt eau chaude	Temps	Recirculation			Vanne ouverte (min)	Débit aqueduc(L/min)	Débit R+ aqueduc (L/min)	Charge thermique (BTU)	Charge thermique évacuée (BTU)	Chiller en marche (min)	Refroidissement		Charge thermique (BTU)
	(min)	In (°C) sonde	Out (°C)	In (°C) thermomètre							In (°C)	Out (°C)	
	1	23	25	23	0	0	25	198	0	0	23	24	0
	2	23	26	23	0	0	25	297	0	0	25	25	0
	3	24	28	23	0.1	22.4	25	51	133	0	25	26	0
	4	24	22	17	0.2	22.4	36.6	281	160	0.75	25	21	396
	5	23	26	20	0	0	25	594	0	1	24	21	297
off	6	22	24	22	0	0	25	198	0	1	24	21	297
off	7	22	23	22	0	0	25	99	0	1	24	21	297
off	8	22	22	21	0	0	25	99	0	1	23	20	297
off	9	22	22	21	0	0	25	99	0	0	23	23	0
off	10	23	22	21	0	0	25	99	0	0	23	23	0
	11	23	26	22	0	0	25	396	0	0	24	24	0
	12	24	28	23	0	0	25	495	0	0	25	26	0
	13	24	30	20	0.5	21	35	554	707	0	26	26	0
	14	23	22	22	0.41	22	36	0	321	1	25	21	396
	15	23	26	22	0	0	25	396	0	1	25	21	396
off	16	22	23	21	0	0	25	198	0	1	24	21	297
off	17	22	22	21	0	0	25	99	0	0.75	23	21	198
off	18	22	23	22	0	0	25	99	0	0	23	23	0
off	19	23	23	22	0	0	25	99	0	0	23	23	0
off	20	23	23	22	0	0	25	99	0	0	23	23	0
	21	23	26	22	0	0	25	396	0	0	24	24	0
	22	24	27	23	0	0	25	396	0	0	25	25	0
	23	24	25	23	0.07	22.7	37	113	76	0	25	25	0
	24	24	22	18	1	22.7	36.8	223	809	0	25	25	0
	25	24	20	16	1	22.7	36.8	223	629	0	24	24	0
off	26	24	18	16	0	24	37.4	106	0	0			
					3.28	179.9	730.6	5909	2835	8.5			2871
				Équivalent en BTU/hre:				**23636**	**51857**				**20266**
						3290.85366				19.6153846			

Bilan du système:

BTU captés par la boucle: 5909

BTU extraits du système: 5706

-3%

Annexe5 : exemple cinquième série

Bilan thermique avec fonctionnement de la vanne de sécurité du système en mode hybride

Charge thermique moyenne au système (BTU/hre): 15,000

Séquence: 5 min ON et 5 min OFF

Ajustement de la vanne de sécurité — ON (° C) 24 — OFF (° C) 23

$Q_{eau\ chaude}$ 10.1 — $Q_{recirculation}$ 25 — $Q_{refroidissement}$ 25

Ajustement du chiller ΔT(° C)= 2 — ΔT(° C)= 1 — SP OFF (° C) 24 — ON (° C) 26

Charge thermique à l'eau chaude BTU/h 28797.12 — ΔT °C 12

Arrêt eau chaude	Temps	Recirculation			Aqueduc	Vanne ouverte	Débit aqueduc(L/min)	Débit R+ aqueduc (L/min)	Charge thermique (BTU)	Charge thermique évacuée (BTU)	Chiller en marche (min)	Refroidissement		Charge thermique (BTU)
	(min)	In (°C) sonde	Out (°C)	In (°C) manomètre	In (°C)	(min)						In (°C)	Out (°C)	
	1	24	26	23	15	0	0	25	297.0	0.0	0	25	25	0
	2	24	25	20	15	0.25	22.5	36	267.3	222.8	0	25	25	0
	3	24	22	18	15	1	22.5	36	213.8	623.7	0	25	25	0
	4	24	22	18	15	1	22.5	36	213.8	623.7	0	24	24	0
	5	24	22	18	15	1	22.2	36	218.6	615.4	0	24	24	0
off	6.5	24	20	17	15	1	24.85	37.3	147.9	492.0	0	24	24	0
off	7	24	18	16	15	1	24	37	103.0	285.1	0	24	24	0
off	8	23	18	16	15	1	24.6	37.2	99.8	292.2	0	23	23	0
off	9	23	20	19	15	0.5	24.6	25.1	2.0	243.5	0	23	23	0
off	10	23	22	21	15	0	0	25.1	99.4	0.0	0	23	23	0
	11	23	26	22	15	0	0	25	396.0	0.0	0	25	25	0
	12	24	26	23	15	0	0	25	297.0	0.0	0	25	25	0
Chiller off à 25°C	13	24	26	23	15	0	0	25	297.0	0.0	0.2	25	24	95.04
	14	23	26	23	15	0	0	25	297.0	0.0	1	26	22	348.48
	15	23	26	22	15	0	0	25	396.0	0.0	1	25	22	261.36
off	16	23	24	22	15	0	0	25	198.0	0.0	1	25	21	332.64
off	17	22	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	1	24	20	316.8
off	18	22	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	0.7	24	21	249.48
off	19	23	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	0	23	23	0
off	20	23	23	22	15	0	0	25	99.0	0.0	0	23	23	0
	21	23	24	22	15	0	0	25	198.0	0.0	0	23	23	0
	22	23	26	23	15	0	0	25	297.0	0.0	0	25	25	0
	23	24	28	24	15	0	0	25	396.0	0.0	0.17	26	23	273.24
	24	23	28	24	15	0	0	25	396.0	0.0	1	26	23	273.24
	25	23	26	22	15	0	0	25	396.0	0.0	1	26	23	273.24
off	26	23	24	22	15	0	0	25	198.0	0.0	1	25	21	332.64
off	27	22	23	22	15	0	0	25	99.0	0.0	1	24	21	249.48
off	28	22	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	1	24	21	249.48
off	29	22	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	0.5	23	22	87.12
off	30	22	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	0	23	23	0
	31	23	24	22	15	0	0	25	198.0	0.0	0	25	25	0
	32	24	28	23	15	0	0	25	495.0	0.0	0	25	25	0
	33	23	28	22	15	0	0	25	594.0	0.0	1	26	23	273.24
	34	23	28	22	15	0	0	25	594.0	0.0	1	27	23	364.32
	35	23	28	22	15	0	0	25	594.0	0.0	1	27	23	364.32
off	36	23	24	22	15	0	0	25	198.0	0.0	1	25	21	332.64
off	37	22	23	22	15	0	0	25	99.0	0.0	1	24	20	316.8
off	38	22	22	22	15	0	0	25	0.0	0.0	1	24	21	249.48
off	39	22	22	21	15	0	0	25	99.0	0.0	1	24	21	249.48
						6.75	187.75	1055.7	9087.606	3398	17.53			5492.52
				Équivalent en BTU/hre:					**14737**	**30209**				**18796**
							1668.88889				26.974359			

Bilan du système:

BTU captés par la boucle:	9088	
BTU extraits par la vanne:	3398	
BTU extraits par le chiller:	5493	
Différence:	**197**	**2%**