

Bureau d'Etudes Energie 20 rue Chanteraine 51100 Reims

Tél. 03 26 82 71 04 http://www.be-garnier.fr/ Membre de AICVF et de ICO

XPAIR Edition® 2013

L'objectif du maitre d'ouvrage et de remplacer les installations existantes de « froid «climatisation » et de « froid processus » de façon à répondre aux nombreux buts suivants : Supprimer la vétusté (la production de froid a 24 ans). Diminuer la consommation d'énergie et les coûts propres à la production de « froid dédié au rafraichissement et à la climatisation » par une meilleure efficience énergétique, Avoir un mix énergétique en production de froid (gaz en hiver et électricité en été),

Sommaire

1 Pr	ésentation du projet	2
1.1	Contexte	
1.2	Les intervenants sur ce projet	
	. ,	
2 Ob	jectifs des travaux	4
2 1 -		_
	programmation	
	Phase pré-opérationnelle	
	Phase opérationnelle	
3.3	Les relations entre intervenants	
3.4	Solutions techniques retenues à la suite de la phase opérationnelle	7
4 Co	nception et maîtrise d'œuvre	8
	Dépose des installations en place	
4.2	Conception du froid processus et climatisation	
4.2		
4.2		
4.2	v v	
4.2	*	
4.2		
4.2		
4.2		
4.2		
4.2		
4.2	10 Production de froid pour le processus - rafraîchissement - climatisation	20
4.2	11 Analyse fonctionnelle de la production de froid	20
4.2	12 Choix de la température d'eau glacée	25
4.3	Maîtrise d'œuvre	29
5 Co	ncommation at gain d'énargie	30
	nsommation et gain d'énergie Cout d'énergie en gaz naturel	30
5.1 5.1		
5.1	O Company of the comp	
5.1		
	Cout d'énergie en électricité	
5.2	6	
5.2		
5.2		
5.3	Gain sur le froid produit en EnR et énergie fossile	
5.3		
5.3		
5.3		
5.3		34
	cuments annexes	
6.1	Qu'est-ce que le free-chilling?	
6.1 6.1	0	
	3 Les différents type de free-chilling	
0.1	.o	TU

1 PRESENTATION DU PROJET

1.1 CONTEXTE

Filiale du groupe ESSILOR, BBGR est le second fabricant de verre à l'échelle européenne. Née de la fusion de deux sociétés d'optique oculaire dont ESSILOR, l'entreprise BBGR est également le 2ème fabricant de verres en France.

BBGR a réalisé 9,7 millions de verres l'année en 2012. Ce site fait partie du « secteur Industrie ».





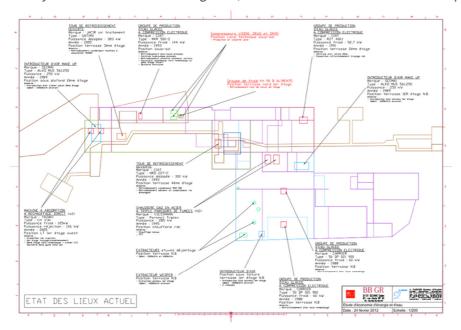
Vue aérienne du site de BBGR1 à Sézanne (avant travaux)

Bâtiment haut





« Polymérisation » au 1er étage - 9,7 millions de verres ont été fabriqués en 2012



Plan masse du site BBGR1 51120 Sézanne

Les installations de « production de froid processus ou climatisation » sont pour la plupart de 1989 et ont donc plus 24 ans, elles doivent être remplacées afin de tenir compte du secours et des nouveaux besoins de renouvellement d'air pour la santé.

De plus les équipements en place sont très consommateurs d'énergie car les groupes de froid sont individuels et ont été sélectionnés sur des valeurs élevées en condensation. C'est donc une remise en cause importante portant sur la stratégie énergétique de cette usine de production qui est recherchée.

Le planning alloué pour les 3 tranches a été de 6 mois pour les études et de 18 mois pour les travaux. Le site doit être opérationnel à la fin de la première tranche soit en août 2013 et ce n'est que, quand tout sera opérationnel, que la vérification des performances pourra avoir lieu. Les travaux correspondant doivent se dérouler en site occupé et il ne peut y avoir que 15 jours de coupure en été en tranche 1.

1.2 LES INTERVENANTS SUR CE PROJET

Maitrise d'Ouvrage:

- ESSILOR a un chef de projet
- BBGR a un responsable de travaux qui est aidé par un responsable maintenance et un responsable informatique.

Conception et maitrise d'œuvre :

Bureau d'études Energie & Fluides A. GARNIER 20 rue Chanteraine 51100 Reims.

Il connaît particulièrement bien les lieux pour y travaillé depuis 24 ans et avoir réalisé un audit énergétique il y a 2 ans.

Moyens humains dédiés à ce projet : Chef de projet + Ingénieur + Technicien

Le marché de conception et de maîtrise d'œuvre comporte :

- Une mission EXE de façon à gagner du temps : concevoir, bien dimensionner les installations et avoir une mise en service sans trop de problèmes.
- Une mission de contrôle et de réception des travaux avec vérifications des indicateurs de performance. Le bureau d'études a aussi un rôle de formation et d'accompagnement un peu particulier du fait des techniques innovantes utilisées.

Entreprise de CVC et de GTC :

COPRECS à Reims, adjudicataire du marché en janvier 2013 pour les 3 tranches de travaux.

Il connaît particulièrement bien les lieux pour y travailler depuis 20 ans.

Moyens humains dédiés à ce projet : Chef de projet + Ingénieur + Technicien + 20 monteurs en chauffage et en gaines, ainsi que des électriciens.

COPRECS a retenu SAUTER en tant que constructeur. Il a participé à l'analyse fonctionnelle.

2 OBJECTIFS DES TRAVAUX

L'objectif du maitre d'ouvrage et de remplacer les installations existantes de « froid «climatisation » et de « froid processus » de façon à répondre aux nombreux buts suivants :

- Supprimer la vétusté (la production de froid a 24 ans),
- Diminuer la consommation d'énergie et les coûts propre à la production de « froid dédié au rafraichissement et à la climatisation » par une meilleure efficience énergétique,
- Avoir un mix énergétique en production de froid (gaz en hiver et électricité en été),
- Faciliter l'exploitation,
- Diminuer la consommation d'électricité des auxiliaires.
- Avoir une possibilité de secours en froid (production d'énergie et dissipation de la chaleur),
- Supprimer les irritations et les odeurs dans les ateliers de polymérisation (santé et olfactif),
- Avoir le plus possible recours aux EnR (gain sur les coûts d'exploitation et indépendance vis à vis des fluctuations des coûts d'énergie fossile),
- Supprimer le R22 (CFC: chlorodifluorométhane) et prévoir son remplacement en R134a (HFC: tétrafluoréthane). Depuis le 1er janvier 2010 suivant le règlement européen 2037/2000 sur les CFC et HCFC: c'est la fin de la commercialisation du R22, mais prévoit l'utilisation du R22 recyclé jusqu'en 2015,
- Supprimer les actuels risques de légionellose (présence de tours ouvertes de refroidissement),
- Avoir à moyen terme une surpuissance en froid pour faciliter la maintenance,
- Assurer la continuité de la production de froid même en cas de panne (proposer un schéma de décision),
- Calculer et afficher les indicateurs de performances de façon à vérifier que les économies escomptées soient atteintes et qu'il n'y ait pas de dérive dans le temps,
- Compter l'énergie produite et fournie à chaque atelier,
- Remplacer l'isolation thermique de la toiture et installer une membrane blanche de l'atelier de polymérisation de façon à diminuer les besoins en froid.

3 LA PROGRAMMATION

3.1 Phase pre-operationnelle

Du fait des nombreux enjeux et du délai d'étude et de travaux, une méthodologie de programmation originale a été appliquée.

Un préprogramme a été élaboré par le MO. Une cellule de réflexion a été mise en place ; les participants : acheteur, concepteur, exploitant et utilisateur final ont pu échanger et enrichir le préprogramme.

Le bureau d'études a ainsi pu réaliser un audit énergétique avec des solutions pertinentes (Pré-Projet)

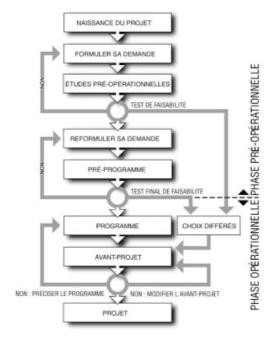
3.2 Phase operationnelle

Le bureau d'études a présenté au MO l'audit énergétique de façon à le faire valider et le transformer en Projet.

L'installateur a rejoint cette cellule de réflexion après avoir été choisi et a aussi apporté son savoir faire.

Cette méthodologie a été bénéfique au projet.

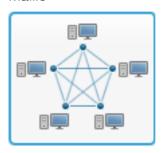
Le processus résumé est illustré par le schéma suivant :



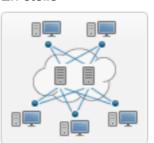
3.3 LES RELATIONS ENTRE INTERVENANTS

Dans bien des cas c'est une relation en « passerelle » qui est rencontrée lors de la conception et de la réalisation d'un projet. De ce fait, le MO soumet son programme au concepteur qui le met en forme suivant ses connaissances. Le résultat est que le projet soit figé et soit réalisé sans optimisation ni contrôle des performances.

Maillé



En étoile



Passerelle



Pour ce projet où la performance était recherchée, il y a eu une évolution entre deux types de relation qui ont été choisies consciemment.

Au stade du programme et des études d'avant projet : c'est le « réseau maillé » qui a été choisi. Car il permet à chaque intervenant d'intervenir vis à vis des autres. Il s'agit d'un choix calculé pour que chacun puisse s'exprimer et contribuer à rendre performant le projet : synthèse de conception. Chacun peut joindre tous les autres intervenants du projet.

Au stade des travaux : c'est le « réseau en étoile » qui a été choisi car il permet au MO de suivre les travaux et à l'entreprise de gérer son chantier tout en réalisant la synthèse d'exécution. Le concepteur pour sa part est déchargé de l'OPC qu'on lui attribue généralement, il peut ainsi contrôler les travaux et parfois affiner sa conception après que des réunions de synthèse de conception aient eu lieu. Chacun peut joindre très rapidement les autres intervenants du projet : MO , concepteur, entreprises, constructeurs.

Comment le marché a-t-il été passé ?

Il s'agit d'un marché privé répondant à un objectif de performance mais sans garantie de la part du concepteur et maître d'œuvre ou encore de l'entreprise; le MO étant lui-même exploitant et faisant appel à quelques sociétés spécialisées extérieures comme VEOLIA pour le recyclage d'eau ou un frigoriste pour les divers groupes de froid.

La garantie des consommations futures d'énergie n'a pas été évoquée par le MO car il n'existait pas de comptage d'énergie sur chaque besoin, que ce soit de confort ou du processus. Il s'agissait d'une « première avec toutes ses difficultés » du point de vue de la recherche de solutions et du calcul des indicateurs de performance. Il y avait en plus un phasage s'étalant sur 3 ans d'études et de réalisation avec des inter-réactions diverses sur les transferts thermiques et mix énergétique impossible à évaluer avec précision.

Il n'y a pas eu de campagne de mesure avant de procéder au remplacement des installations ce qui a obligé à se rapprocher des utilisateurs pour connaître les générateurs engagés suivant les cycles de fabrication et les saisons.

Le bureau d'études et MOe a été choisi pour ses compétences en thermique industrielle et une bonne connaissance du site.

Pour le choix de l'entreprise, il y a eu une mise en concurrence entre 4 sociétés régionales pré-désignées suivant une sélection croisée entre le MO et le MOe. Le choix s'est porté sur celle qui a remis le 2^{ème} prix mais qui, avec une variante, a su ramener son prix sur celui du moins disant, elle connaissait bien les lieux et a des moyens humains et la technicité requise.

3.4 SOLUTIONS TECHNIQUES RETENUES A LA SUITE DE LA PHASE OPERATIONNELLE

Il a été prévu de remplacer toutes les productions de froid diffuses et isolées par des équipements centralisés et performants faisant de plus appel en priorité aux EnR et aux transferts thermiques. Les équipements de production de froid doivent de plus recourir à un mix énergétique : EnR, gaz et électricité qui permet d'assurer la compétitivité.

Pour y parvenir a été prévu que l'on recourt principalement à un système 8 tubes 2 batteries comportant un free-chilling, une utilisation de la chaleur de réjection des groupes à compression électriques et des machines à absorption, une utilisation des transferts thermiques des processus, à des pompes à débit variable et à une GTC qui gèrera tous ces systèmes de façon performante.

Il a été prévu que l'on puisse réaliser dans le futur un contrôle de l'humidité dans l'atelier de polymérisation par le simple ajout d'une régulation d'humidité spécifique et le décalage du point de consigne de fabrication de l'eau glacée de 13 ℃ en hiver à 10 ℃ en été. On pourrait faire une loi glissante entre ces deux valeurs ce qui permettrait de gagner encore 4% de consommation d'énergie électrique.

Il a été prévu qu'il y ait un comptage électrique pour produire le chaud, le froid, le freechilling, la chaleur de réjection et des transferts thermiques ainsi que les auxiliaires (moteurs et ventilateurs). Il a été aussi prévu qu'il y ait un comptage des énergies consommées et produites ainsi que des sous-comptages réels ou virtuels par atelier.

Il a été prévu le remplacement en 2014 de l'isolation thermique de la toiture de l'atelier polymérisation, son étanchéité sera réalisée au moyen d'une membrane de couleur blanche pour réfracter les rayons solaires et diminuer les apports calorifiques importants dus à la toiture en été, car c'est l'un des postes les plus importants avec le processus.

Les autres incitations à réaliser ces travaux

Le personnel de maintenance atteint peu à peu l'âge de la retraite et la connaissance des opérations de maintenance préventives ou curatives qui se faisaient jusque là manuellement va être perdue et c'est toute la fabrication qui risque d'être arrêtée au moindre incident.

Une nouvelle stratégie doit donc être mise en place dans le but d'aider le futur personnel chargé de la maintenance : matériels de secours, automatismes, propositions de solutions de secours lors de pannes avec acquittement de l'opérateur.

4 CONCEPTION ET MAITRISE D'ŒUVRE

4.1 DEPOSE DES INSTALLATIONS EN PLACE



Vue aérienne du site de BBGR1 à Sézanne - Dépose des anciennes installations

La demande initiale de ESSILOR était de remplacer les installations existantes de production de « froid pour le processus » et de « froid pour le rafraichissement et la climatisation» jugées trop vétustes (24 ans) et qui, de plus, fonctionnent encore au R22 (HCFC).



Roof top CARRIER, make-up ALKO, extraction étuves, introduction d'air neuf en toiture de l'atelier de polymérisation du 1^{er} étage – Avant travaux



Batterie de refroidissement sur processus



Atelier de polymérisation du 2ème étage – Avant travaux

4.2 CONCEPTION DU FROID PROCESSUS ET CLIMATISATION

4.2.1 Futurs besoins en froid

Scénario : T.Ext ≤ 10 °C (le free-chilling est mis à contribution au maximum)

Besoins frigorifiques:

Circuits Processus & Confort	confort et p	Besoins rocessus (en kWf) Tranches finales	Besoins processus (en kWf) Tranche 1 Tranches finales		
Cassette (R+2, R+1)	120	120			
RDC	63	63	63	63	
Presses + bloc moule	90	90	90	90	
At. Poly 1er-Assemblage	70	70			
At. Poly 1er-Remplissage	30	30			
At. Poly 2eme-Assemblage		42			
At. Poly 2eme-Remplissage		46			
Total P. froid (en kWf)	373	461	153	153	

Production de froid (EnR & Fossile):

Machines	Puissance froid Tranche 1 Tranches finales			eur réjection Tranches finales
Groupe de froid élec / dry				
Machine à absorption gaz	105	105		
Aéroréfrigérant (Free-chilling)	340	340		
Compresseur d'air				
Total P. froid (en kWf)	445	445	0	0

Scénario: T.Ext > 16 °C (le froid thermodynamique est sollicité)

Besoins frigorifiques:

Circuits Processus & Confort	confort et p	Besoins rocessus (en kWf)			
	Tranche 1	Tranches finales	Tranche 1	Tranches finales	
Cassette (R+2, R+1)	120	120			
RDC	63	63	63	63	
Presses + bloc moule	90	90	90	90	
At. Poly 1er-Assemblage	70	70			
At. Poly 1er-Remplissage	30	30			
At. Poly 2eme-Assemblage		42			
At. Poly 2eme-Remplissage		46			
Total P. froid (en kWf)	373	461	153	153	

Production de froid (EnR & Fossile):

Machines	Puis	sance froid	Chaleur réjection		
	Tranche 1	Tranches finales	Tranche 1	Tranches finales	
Groupe de froid élec / dry	281	562	338	676	
Machine à absorption gaz	105		256		
Compresseur d'air			90	90	
Total P. froid (en kWf)	386	562	684	766	

4.2.2 Première analyse avant le choix des solutions

Connaissance des installations :

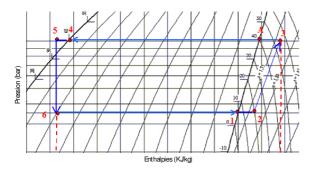
Un audit énergétique a été réalisé en 2012. Cet audit a porté sur la suppression de la vétusté, le remplacement du R22, une diminution de la consommation énergétique.

A la suite de cet audit et compte-tenu de l'échéance fin 2013 d'engager les travaux de remplacement du CFC, un marché de conception et de maîtrise d'œuvre a été attribué au bureau d'études GARNIER sur des critères telles que : l'expérience en production de froid, des EnR et de la connaissance du secteur industrie.

Le bon choix de la température future d'eau glacée et de refroidissement :

Lors de nos relevés nous avons détecté qu'une partie de l'eau glacée était inutilement produite à 7°C et que la sélection de la température d'eau de refroidissement des groupes était particulièrement élevée 45°C, hors :

- ➤ Un gain de 1 °C sur la température d'évaporation permet un gain électrique de 3% sur la consommation du compresseur.
- ➤ Un gain de 1 °C sur la température de condensation permet également un gain électrique de 3% sur la consommation du compresseur.



Les différentes transformations subies par le fluide frigorigène entre la sortie du compresseur état (3) et l'amont du détendeur état (5) :

- (3) vapeur sèche surchauffée, (point A) vapeur sèche saturée,
- (4) liquide saturé,
- (3) --> (4) condensation du gaz,
- (5) liquide sous-refroidi.

La présence de free-cooling :

Les ateliers de polymérisation possèdent actuellement chacun un make-up (centrale de traitement d'air fonctionnant en tout air neuf, équipée d'un brûleur gaz à veine d'air), des tourelles d'extraction d'air placées sur les points de pollution permettent l'équi-débit. A l'époque où ces ateliers ont été construits (il y a plus de 20 ans), le rafraîchissement n'était pas utilisé, le renouvellement d'air était alors de 6 vol/h.

La conséquence est qu'en hiver, on a un free-cooling qui permet d'évacuer la chaleur des apports en début et fin de demi saison. Par contre ce renouvellement d'air continu à 6 vol/h en été et en hiver induit réciproquement des consommations d'énergie importantes en froid et en chaud.

L'analyse - Les fondamentaux – Les choix :

Voici de façon résumée les principaux points qui nous ont guidés dans nos choix :

- Le seul endroit pour installer la nouvelle production de froid correspondait au local technique déjà utilisé pour le recyclage d'eau (système VEOLIA),
- Il nous fallait réaliser les installations en site occupé, et ce n'est pas rien. Les ateliers sont occupés 5 jours/7 à raison de 120 h par semaine. Seule une période d'arrêt de la production de 15 jours était accordée en août,
- Le temps de retour brut (TRB) qui ne pouvait être inférieur à 5 ans relevait d'un pari fou.
- Il fallait simplifier la maintenance et sécuriser la production de froid futur,
- Il fallait réaliser un mix énergétique garantissant l'investissement pour longtemps.

4.2.3 Choix de solutions de production de froid

Il nous faut remplacer les différents systèmes de production de froid autonomes contribuant au processus, au rafraîchissement où à la climatisation par une production centralisée plus performante et plus secourable.

Après avoir analysé les besoins actuels et futurs, nous sommes repartis des fondamentaux et avons conçu les installations de la manière suivante :

- Il nous faudra non pas produire de l'eau glacée à 6 ℃ comme par le passé mais à deux températures différentes et adaptées aux besoins à produire : 13 ℃ pour le rafraichissement et 10 ℃ pour la climatisation (et sa déshumidification),
- La production de froid devra utiliser le free-chilling (EnR) au maximum pour couvrir une majeure partie des besoins de froid. Ce qui induit que les remplacements et les nouveaux émetteurs doivent avoir des surfaces d'échange en conséquence.
- On devra sélectionner les groupes de production d'eau glacée de façon à en tirer un maximum de performance. Cela passe par le choix d'une eau de refroidissement à basse température de 35/30 °C, des compresseurs à double vis modulant en puissance de 25 à 100%, etc.
- On devra utiliser la chaleur de réjection des groupes pour préchauffer l'eau chaude sanitaire (quand on n'est pas en période de free-chilling),
- On devra utiliser des auxiliaires à basse consommation d'énergie, les pompes en particulier qui seront de classe IE3 et à débit variable de façon à répondre à la directive ErP de 2015.
- On devra se servir du superviseur de la GTC pour réaliser un bilan frigorifique à partir des comptages d'énergie de façon à optimiser l'efficience énergétique GTC, sortir des indicateurs de performance et répartir la consommation d'énergie par atelier.

4.2.4 Implantation des équipements

Il est apparu dans les réflexions premières, qu'il fallait regrouper les équipements contrairement à ce qui avait été installé et où l'on installait un générateur par besoins sans aucun secours et sans foisonnement avec de faibles performances.

Le positionnement des nouvelles et différentes productions, a été élaboré en tenant compte des emplacements existants des sources d'énergie, des équipements conservés et bien sur de la disponibilité des locaux techniques.



Vue aérienne du site de BBGR1 à Sézanne – Nouvelles installations

Le poste de détente et de comptage gaz est dans une armoire située dans la cour. L'alimentation de la chaufferie, des make-up et des machines à absorption traverse la cour en enterré, puis remonte en pignon du bâtiment haut à l'extérieur.

Le poste de transformation électrique est situé dans un local non loin des nouveaux groupes de froid à compression électrique.

Les deux nouveaux aéroréfrigérants ont été installés en toiture terrasse du bâtiment haut et des barrières de sécurité permettent une maintenance sans risque.

Les toitures terrasses sont restées capteurs solaires photovoltaïques.	libres	de	façon	à	pouvoir	installer	par	la	suite	des

4.2.5 Production future de chaleur et d'eau chaude sanitaire

La production de chaleur existe et donne satisfaction, les chaudières sont à condensation avec des brûleurs modulants en puissance de 25 à 100%, elles seront conservées.

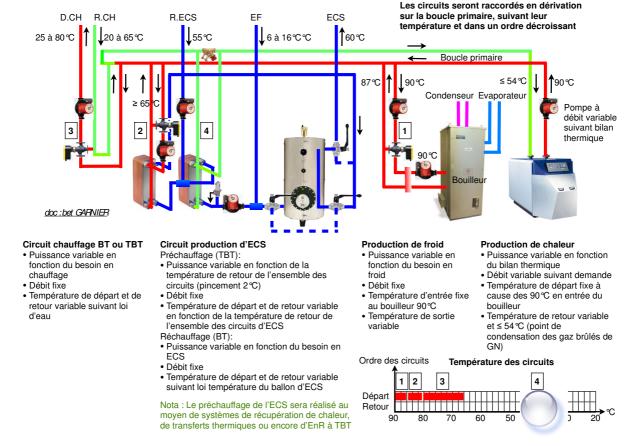
Dans quelques années, elles seront remplacées et entre-temps tout aura été fait pour que la condensation fonctionne au maximum, les émetteurs auront été changés : les batteries des centrales sont passées de 4 à 12 rangs et les ventilo-convecteurs verront leurs deux batteries chaude et froide mises en série pour en augmenter là aussi leur surface d'échange afin de pouvoir fonctionner à basse température et surtout revenir à très basse température.

La solution proposée est de remplacer la distribution d'eau en « étoile » par une en « série », au moyen d'une boucle primaire à débit variable. Les circuits seront branchés dessus en série suivant un ordre décroissant dépendant de leur température d'entrée. Chaque circuit sera branché sur la boucle primaire en dérivation, il comportera une vanne de régulation installée en mélange avec sa propre pompe de façon à obtenir un débit constant avec une température variable dans les émetteurs.

L'autre intérêt d'un tel montage hydraulique sera que l'on pourra même alimenter un circuit HT (à haute température) tel que le bouilleur d'une machine à absorption à réchauffage indirect ou encore un traitement anti-légionnelle par choc thermique. Car, on pourra grâce aux circuits suivants BT ou TBT descendre la température de retour à la chaudière à condensation.

Si les besoins en production d'eau chaude sanitaire sont importants, on pourra même profiter du retour de la boucle primaire en BT pour préchauffer l'eau chaude sanitaire ce qui aura également pour effet de passer le retour de la chaudière en TBT et lui permettre de condenser d'avantage.

Schéma de principe d'un système de production de chaleur où tout est fait pour condenser – Doc A. GARNIER

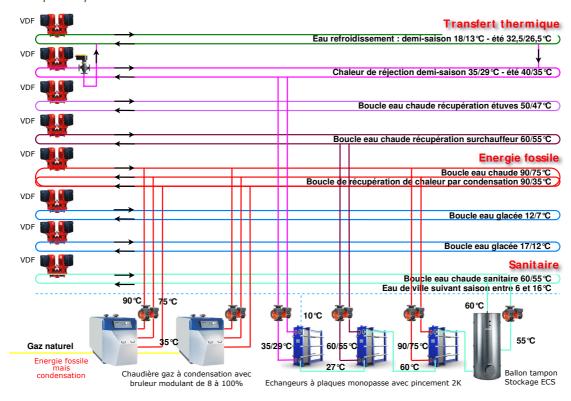


Les chaudières fonctionneront ensemble de façon à moduler en puissance sur une surface d'échangeur maximum.

On espère ainsi passer de 8 à 15% de part apportée par la condensation et de diminuer d'environ 50% l'énergie consacrée à la production d'eau chaude sanitaire.

La production d'eau chaude sanitaire recevra un préchauffage obtenu par la chaleur de réjection des groupes et machines de production de froid.

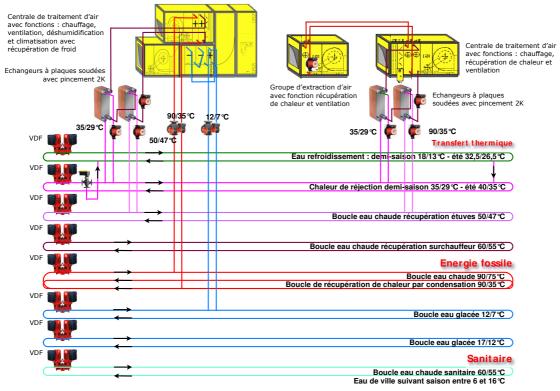
Principe de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire – Doc A. GARNIER



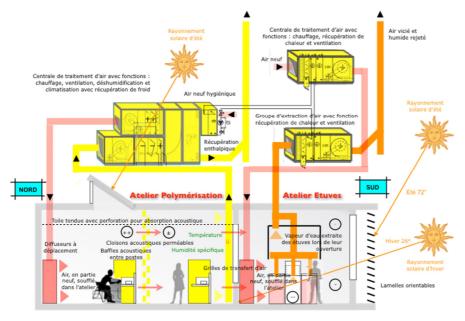
4.2.6 Chauffage, ventilation et climatisation des ateliers de polymérisation

Les deux ateliers de polymérisation ont besoin à la fois d'un fort renouvellement d'air pour la santé de ses occupants, d'une distribution d'air à déplacement des ateliers de polymérisation vers les ateliers des étuves et d'une extraction efficace de la vapeur d'eau au-dessus des étuves.

Principe de chauffage, de ventilation et de climatisation pour les ateliers de polymérisation – Doc A. GARNIER



Principe de ventilation entre ateliers de polymérisation et ateliers des étuves – Doc A. GARNIER



4





Groupe de production de froid et aéroréfrigérants servant au free-chilling et à la réjection de chaleur – Après travaux





Centrale de traitement d'air en toiture pour l'atelier de polymérisation du 1^{ème} étage – Après travaux





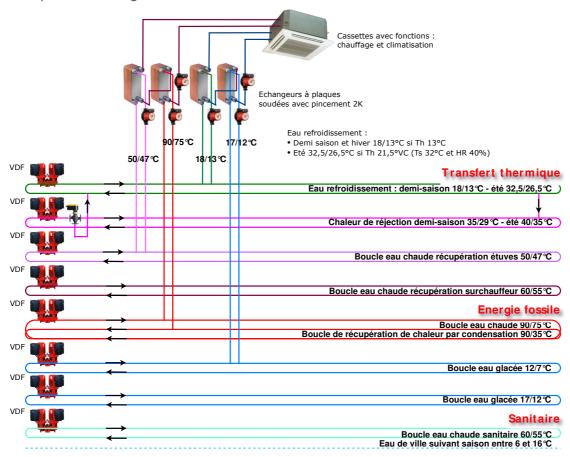
Atelier de polymérisation du 1ème étage – Après travaux

4.2.7 Chauffage et climatisation des ateliers des étuves

Les ateliers où se trouvent les étuves sont peu fréquentés, ils ont besoin à la fois d'un fort renouvellement d'air pour extraire efficacement la vapeur au-dessus des étuves dont les bacs ont des couvercles qui sont ouverts à chaque fin de cycle (environ 4 h).

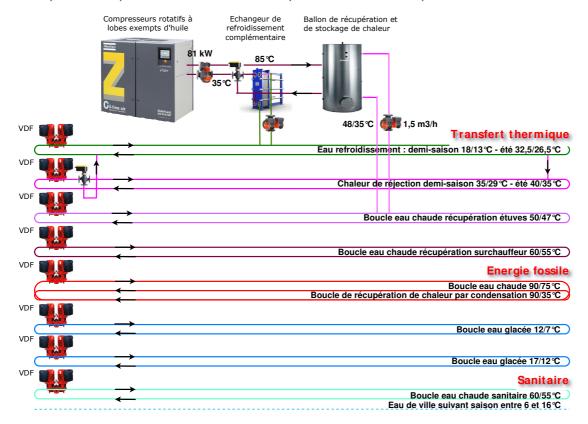
Dans les périodes d'arrêt de l'usine, où la température peut monter en été du fait de l'arrêt de l'extraction d'air, on s'est aperçu que des produits ayant servis à la fabrication des verres pouvaient créer des problèmes d'irritations et de démangeaisons de la peau lors de la reprise du travail. Comme il n'est pas possible de laisser le renouvellement d'air fonctionner, quelques cassettes de chauffage et de climatisation ont été installées pour palier à ce problème et en même temps assurer le hors gel en hiver.

Principe de chauffage et de climatisation des étuves – Doc A. GARNIER



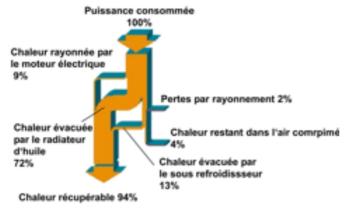
4.2.8 Refroidissement et récupération de chaleur de la production d'air comprimé

Principe de récupération de chaleur sur la production d'air comprimé – Doc A. GARNIER



L'énergie électrique consommée par un compresseur est presque intégralement convertie sous forme de chaleur, qui doit être éliminée par refroidissement. Ce refroidissement est non seulement nécessaire pour ne pas endommager les éléments du compresseur, mais joue également beaucoup sur le rendement énergétique du compresseur. En effet, plus le refroidissement est efficace, plus on se rapproche de la courbe idéale de compression, dite compression isotherme.

Cette courbe idéale est purement théorique au sens où l'action mécanique de comprimer l'air dégage inévitablement de la chaleur, mais démontre bien l'importance capitale du refroidissement sur l'énergie consommée par le compresseur.



Des modèles de compresseur à vis exempts d'huile peuvent produire de l'eau chaude à une température supérieure à 90°C, assurant un refroidissement correct du compresseur tout en récupérant l'énergie par de l'eau à haute température.

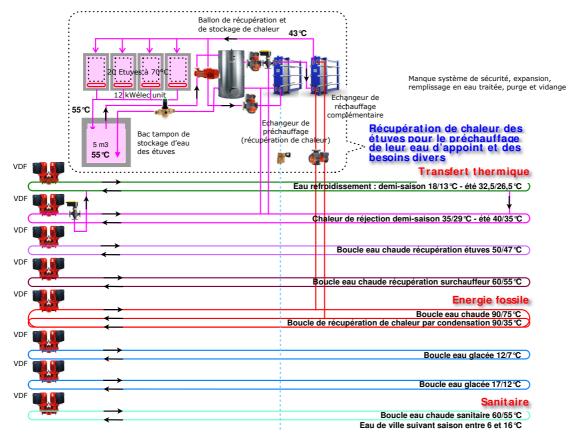
L'apport de chaleur doit être prévu au prorata de la charge du compresseur.

En effet, un compresseur dont le taux de charge atteint par exemple 70%, n'apportera sa chaleur ... que 70% du temps !

Ceci est peut-être une Lapalissade, mais ne doit pas être négligé dans les cas où la chaleur doit être dispensée en continu au procédé (préchauffage de l'eau chaude sanitaire de l'eau des étuves, etc.).

4.2.9 Récupération de la chaleur de l'eau des étuves

Principe de récupération de la chaleur des étuves pour les besoins de préchauffage divers – Doc A. GARNIER



4.2.10 Production de froid pour le processus - rafraîchissement - climatisation

Production de froid centralisée :

A la production d'eau glacée existante semi-centralisée (2 machines à absorption gaz réversibles) il sera ajouté 2 groupes de production de froid à compression électrique pour en faire une production de froid centralisée.

Hormis les avantages de cette réunification que l'on sait, on aura avec les aéroréfrigérants en plus, un mix énergétique qui nous permettra de choisir l'énergie la moins chère actuelle et future et de se mettre en partie à l'abri des fluctuations internationales.

4.2.11 Analyse fonctionnelle de la production de froid

Scénario de fonctionnement de la production de froid

Conditions de fonctionnement	Ts ≤ 8°C	Th ≤ 10 °C	Th ≤ 10 °C avec besoin de 50% en froid	Ts >10 ℃ avec besoin de 50% en froid	Ts >10 ℃ avec besoin de 100% en froid
Free-chilling et free-cooling	Free-chilling sec avec 1 aéroréfrigérant Free-cooling si locaux inoccupés	Free-chilling humide avec 1 aéroréfrigér ant Free-cooling si locaux inoccupés	Free-chilling sec avec 2 aéroréfrigéra nts Free-cooling si locaux inoccupés	Free-chilling humide avec 1 aéroréfrigérant Free-cooling en si locaux inoccupés	Free-cooling si locaux inoccupés
Froid thermodynamique				Thermodynamique avec 1 groupe de froid associé à 1 aéroréfrigérant pour dissiper la	Thermodynamique avec 2 groupes de froid associés à 2 aéroréfrigérants secs ou humides pour dissiper la

			chaleur de réjection	chaleur de réjection
--	--	--	-------------------------	----------------------

Nota:

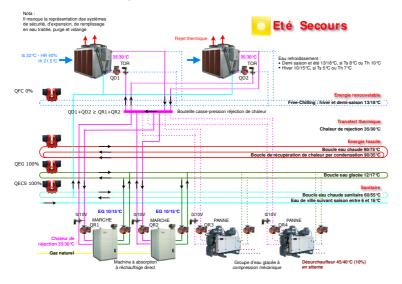
- En hiver, on n'aura pas besoin de déshumidifier puisque l'air est déjà très sec et la température de l'eau glacée pourra être de 15 ℃, cela favorisera encore plus le fonctionnement au free-chilling.
- En été, la température de l'eau glacée pourra être de 13 ℃, et si l'humidité dépasse 55% d'HR on forcera le groupe de froid à produire
- La nuit du fait d'un écart diurne pouvant aller jusqu'à 10 °C, le fonctionnement du freecolling sera utilisé majoritairement.
- Dans ce tableau, on a considéré que l'on pouvait produire grâce au free-chilling, de l'eau glacée à 13 ℃ avec de l'air sec à 8 ℃ (aéroréfrigérant travaillant en sec) ou de l'air humide à 10 ℃ (aéroréfrigérant travaillant en humide : adiabatique).

Saison tarifaire été:

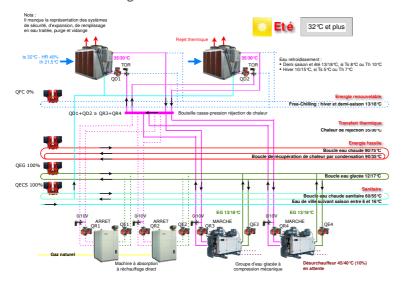
Mode de production de froid en fonction des besoins en été- Doc A. GARNIER



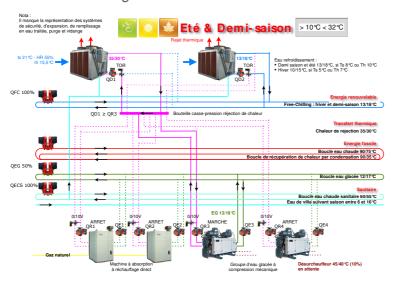
Production d'eau glacée en été - Scénario secours- Doc A. GARNIER



Production d'eau glacée en été- Doc A. GARNIER



Production d'eau glacée en demi-saison et en début et fin d'été- Doc A. GARNIER

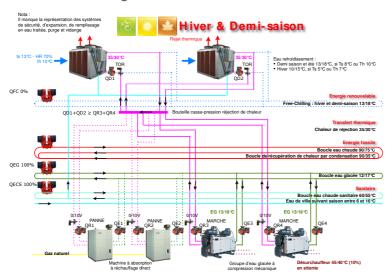


Saison tarifaire hiver:

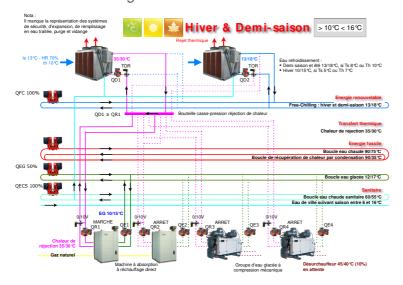
Mode de production de froid en fonction des besoins en hiver- Doc A. GARNIER



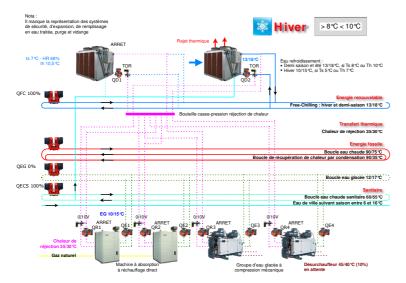
Production d'eau glacée en hiver - Scénario secours- Doc A. GARNIER



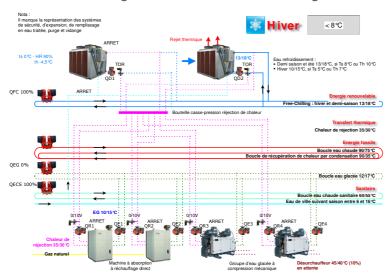
Production d'eau glacée en demi-saison et en début et fin d'hiver- Doc A. GARNIER



Production d'eau glacée en hiver en free-chilling humide (adiabatique) – Doc A. GARNIER



Production d'eau glacée en hiver en free-chilling sec- Doc A. GARNIER



4.2.12 Choix de la température d'eau glacée

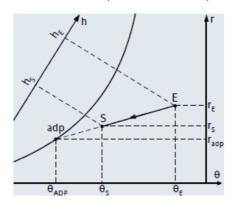
Les ateliers de polymérisation ont besoin à la fois d'un fort renouvellement d'air pour la santé de ses occupants, d'une distribution d'air à déplacement des ateliers de polymérisation vers les ateliers des étuves, et d'une extraction efficace de la vapeur d'eau au-dessus des étuves.

Les ateliers de polymérisation ont besoin également d'un contrôle de l'humidité relative en période d'occupation afin d'éviter des irritations et démangeaisons de peau du personnel.

Ces problèmes semblent se déclencher lors de conditions d'humidité particulières (pluie, brouillard) et le fort taux d'air extérieur introduit rend ce problème très actif. On prévoira donc une déshumidification de l'air introduit en été et en demi-saison dans les ateliers de polymérisation pour protéger les occupants de ce problème, mais pas en hiver où l'air est très sec.

Une loi d'eau glacée été-hiver sera établie, elle se situera entre 10 et 13°C pour le fonctionnement des groupes et des machines de production de froid, l'expérience dira si on peut la remonter.

Cela exigera le recours à des centrales de traitement d'air comportant des batteries froides de grande surface d'échange et dont la température d'eau glacée qui circulera à l'intérieur sera suffisamment basse pour qu'à la fois on puisse refroidir l'air (chaleur sensible) et le déshumidifier (chaleur latente).



Pour obtenir une bonne efficacité thermique, l'eau glacée circulera dans les batteries à contre-courant par rapport à l'air.

L'air se refroidit : la température sèche diminue. La vapeur contenue dans l'air humide se refroidit et se condense sur la surface de la batterie froide dont la température de surface est inférieure à la température de rosée de l'air. L'humidité absolue « r » diminue à la sortie car l'eau est "piégée" sur la batterie et est évacuée sous forme de condensat.

La chaleur correspondant à la condensation de la vapeur d'eau est dite latente. L' « ADP » (Apparatus Dew Point) représente la température moyenne de la batterie qui lui permettra de condenser. Exemple avec un ADP de 10 °C on choisira de produire de l'eau glacée à 7/12 °C.

Comme la déshumidification ne sera utilisée qu'en été, nous produirons l'eau glacée 10 ℃ durant cette période. En hiver ainsi qu'en demi-saison, la température de l'eau glacée sera produite à 13 ℃. Cette « loi glissante » permettra de gagner environ 5 à 6% sur l'année et de recourir plus amplement au free-chilling.

En effet, un groupe semi-hermétique à double vis a un meilleur rendement à charge partiel car le volume de gaz compressé et de liquide du fluide réfrigérant diminue mais les surfaces d'échange du condenseur et de l'évaporateur reste fixe. Pour obtenir une bonne efficience énergétique en froid, il sera préférable de faire fonctionner 4 compresseurs à vis à 50% que d'en faire fonctionner 2 à 100%, le gain d'énergie est de 35%, d'où l'intérêt de réunir les deux sites de production afin de réaliser un tronc commun des groupes de froid.

De façon à optimiser cette efficience énergétique en froid, le superviseur de la GTC réalisera un bilan thermique et c'est lui qui gérera le nombre et la taille du groupe le plus adapté à répondre à la charge en froid et du mix énergétique.

Avantages de cette solution :

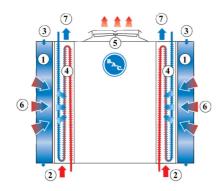
- Les travaux prévus permettront une suppression du R22 (CFC) par son remplacement en R134a (HFC : tétrafluoréthane).
- Le choix de cette solution permettra un secours.
- Ce choix permettra d'avoir en tout : 2 x 2 groupes de 2 compresseurs = 4 compresseurs au lieu de plusieurs groupes et roof-top disséminés sur le site comme c'est le cas actuellement.
- Chaque compresseur à double vis est capable de moduler sa puissance de 25 à 100% et d'avoir un gain sur son EER à petite puissance car sa surface d'échange aussi bien sur l'évaporateur que sur le condenseur est alors décuplé par rapport à la circulation de fluide réfrigérant.
 - Le gain de consommation d'énergie sera d'autant plus intéressant.
- Le choix de cette solution permettra un fonctionnement prioritaire en free-chilling qui apporte un gain d'énergie d'environ 50% sur la production de froid à 13 ℃ et d'environ 23% sur celle à 10 ℃ à plus basse en température et qui fonctionne moins souvent.

La gestion technique des compresseurs à vis sera d'autant plus intéressante.

Performance des aéroréfrigérants adiabatiques

Aéroréfrigérant sec

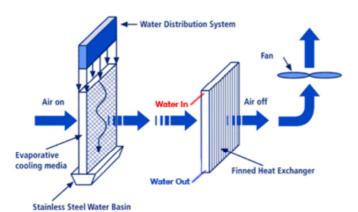
➤ La température de l'air extérieur permet de refroidir l'eau avec un ∆t d'environ 5K avec l'eau à refroidir.



Le gain énergétique par rapport à une tour ouverte sera d'environ de 20% cette différence viendra de la température de condensation choisie en général plus basse (environ 5K) et de la très grande surface d'échange par rapport à une tour.

Aéroréfrigérant adiabatique (humide)

➤ La température de l'air extérieur permettra de refroidir l'eau avec un ∆t d'environ 2,2K entre le "bulbe humide" de cet air et l'eau à refroidir.



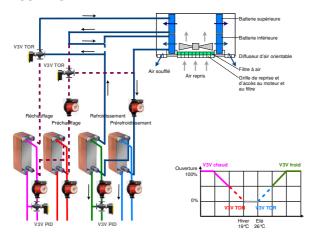
Le gain énergétique par rapport à un aéroréfrigérant sec sera donc d'environ de 6%.

Ce refroidissement supplémentaire sera obtenu grâce à l'évaporation partielle de l'eau en entrée de la batterie de l'aéroréfrigérant.

Performance des émetteurs

Lors du remplacement futur des émetteurs, il faudra sélectionner leur surface d'échange de façon à favoriser le free-chilling tout en ne créant pas de perte de charges supplémentaires qui créeraient une surconsommation électrique des ventilateurs.

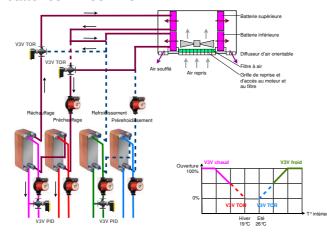
Montage permettant une optimisation en free-chilling au niveau de la surface des batteries – Doc A. GARNIER



L'eau passera successivement sur les échangeurs à plaques de prérefroidissement puis de refroidissement pour aller ensuite alimenter les deux batteries en série.

Schéma en froid : 4 tubes + 2 échangeurs + 1 ou 2 batteries - Doc BET A. GARNIER

Montage permettant une optimisation de la condensation au niveau de la surface des batteries – Doc A. GARNIER

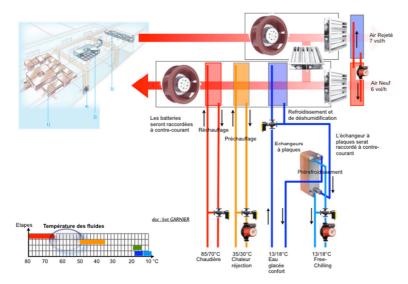


L'eau passera successivement sur les échangeurs à plaques de préchauffage puis de réchauffage pour aller ensuite alimenter les deux batteries en série.

Schéma en chaud : 4 tubes + 2 échangeurs + 1 ou 2 batteries - Doc BET A. GARNIER

Le Δt sur le préchauffage étant faible entre la température de l'eau et celle de l'air, on pourra se contenter d'une régulation agissant en TOR.

Montage permettant une optimisation en free-chilling sans trop de perte de charge sur l'air – Doc A. GARNIER



Pour favoriser le free-chilling on comprend vite qu'il faudra augmenter le nombre de rangs de la batterie et la disposer celle de avant froid thermodynamique. Il ne faut pas tomber dans ce piège, il vaudra mieux installer minimum de batteries sur l'air et disposer des échangeurs sur l'eau de refroidissement et glacée.

Règles de base pour recourir majoritairement au free-chilling

- Avoir des aéroréfrigérants avec de grandes surfaces d'échange et toujours propres,
- Avoir des émetteurs avec de grandes surfaces d'échange et toujours propres,
- Pour ne pas risquer de détruire les générateurs de chaud et de froid, il faudra laisser séparé les circuits chaud et froid,
- Pour ne pas risquer de mélanger l'eau glacée produite en EnR ou en énergie fossile thermique, il faudra les séparer au moyen d'un échangeur de disconnexion,
- Pour substituer au maximum l'énergie fossile par des EnR, on installera en série les échangeurs ou les circuits d'eau suivant leur gradient de température : EnR puis fossile.

Performance des groupes de froid

Une température d'eau glacée adaptée aux besoins, une meilleure performance des matériels de production de froid par des groupes semi-hermétiques à double vis et surtout un recours important au free-chilling indépendamment de la rejection de chaleur, une simultanéité du free-chilling et de la rejection de chaleur qui permet d'utiliser 10% du potentiel de ces deux systèmes.

Des moteurs à classe d'efficacité IE4, ce qui permet un gain d'énergie électrique sur les moteurs et donc un gain sur l'électricité d'environ 35% par rapport à une installation identique à celle d'aujourd'hui et à puissance égale.

Des pompes adaptées aux besoins (débit variable).

De plus, toute la chaleur de réjection venant des productions de froid permettra le préchauffage de la production d'eau chaude sanitaire située non loin :

- La production de froid confort d'une plus grande puissance permettra le préchauffage d'ECS à 30 ℃.
- La production de froid alimentaire avec une température de condensation plus élevée et un fonctionnement toute l'année permettra le préchauffage d'ECS à 38 °C.

Ce choix permet de couvrir plus des 23% des consommations en énergie renouvelable (EnR) demandées en 2020 (engagement de la France - En application de l'article 4 de la directive 2009/28/CE de l'Union européenne).

- Le choix de cette solution permettra qu'en cas de panne grave de l'une des 2 productions de froid, l'une sera capable de venir au secours de l'autre. Il faudra toutefois établir des priorités du côté des besoins et délester les autres.
- Les travaux prévus permettront de supprimer les risques de légionellose. Les tours supprimées seront remplacées par des aéroréfrigérants adiabatiques avec une attestation de non risque remis par l'exploitant via le constructeur.
- Ce choix de solution tient compte des risques de nuisance acoustique.

Les aéroréfrigérants adiabatiques permettent de réduire la consommation de la production de froid par. Ils permettent également de réduire considérablement la consommation d'eau.

En contrepartie, ils sont légèrement plus bruyants que les anciennes tours de refroidissement. Ce bruit est surtout du au nombre de ventilateurs permettant de faire passer de l'air humide au travers d'un média synthétique puis d'une batterie. A priori en sélectionnant des aéroréfrigérants avec des moteurs de ventilateur à 39 Hz plutôt que 50 Hz comme c'est le cas habituellement, on gagnera 6 dB(A) et cela devrait suffire.

4.3 MAITRISE D'ŒUVRE

Les études d'avant projet ont été terminées en 2012 et le résultat a été favorable à la réalisation des travaux.

Les études de projet ont donc suivi et ont permis de choisir l'entreprise début 2013.

La réalisation de la phase 1 qui consistait : à remplacer les productions de froid individuelles par une centralisée au moyen d'un premier groupe, à supprimer le R22, à remplacer le chauffage, la ventilation et la climatisation de l'atelier de polymérisation et des étuves du 1er étage du bâtiment bas est terminée.

Elle est opérationnelle depuis le 1er septembre 2013.

La réalisation des phases 2 et 3 consistant : à ajouter un second groupe, à remplacer le chauffage, la ventilation et la climatisation de l'atelier de polymérisation et des étuves du 2ème étage du bâtiment haut, à compléter de la GTC est en cours, elle a suivi sans discontinuité les travaux de la phase 1.

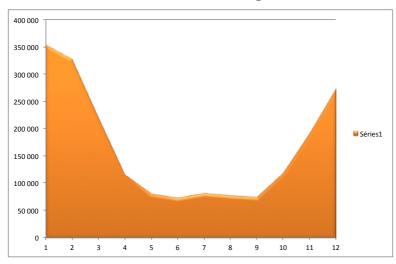
Une campagne de mesure permettant de contrôler les performances et le bon fonctionnement, d'ajuster les réglages et de pérenniser les indicateurs de performance suivra.

5 CONSOMMATION ET GAIN D'ENERGIE

Il n'existe pas actuellement de compteurs de chaleur ou de froid, juste des compteurs d'eau, d'électricité générale et de gaz naturel général et par chaudière. Il est donc difficile d'estimer la consommation avant et après travaux ainsi que le gain en Euros.

5.1 COUT D'ENERGIE EN GAZ NATUREL

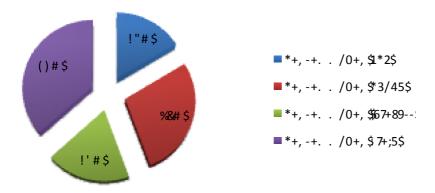
5.1.1 Profil de la consommation en gaz naturel



5.1.2 Equipements alimentés en gaz naturel

- Chaudières à condensation (2) pour chauffage et production d'eau chaude sanitaire
- Make-up (2) pour le chauffage et la ventilation des actuels ateliers de polymérisation
- Machines à absorption réversibles (2)

5.1.3 Répartition des consommations entre besoins

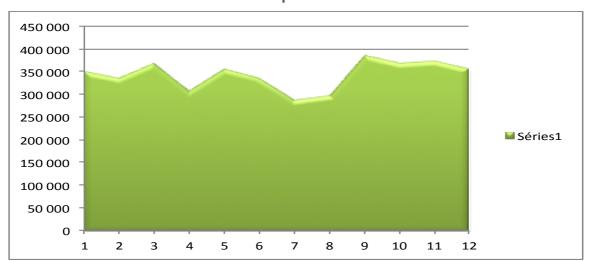


5.2 COUT D'ENERGIE EN ELECTRICITE

5.2.1 Consommation électrique et puissances atteintes

	Р	HPH	нсн	HPE	HCE
Puissances souscrites (kW)	870	870	870	870	870
Puissances atteintes (kW)	864	891	894	900	893
Consommation d'énergie active	173 260	1 018 297	593 039	1 585 374	755 737
Nb d'heures d'utilisation	199	1 170	682	1 822	869

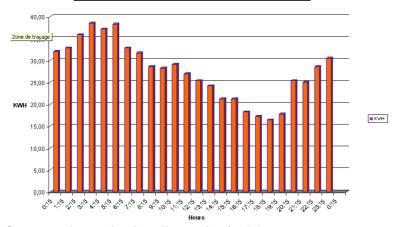
5.2.2 Profil de la consommation électrique



<u>Nota</u>: pour ne pas dépasser la puissance disponible en hiver, le chauffage électrique de locaux de stockage est délesté au profit du processus, ce qui explique que la monotone soit plus ou moins lisse de mois en mois.

5.2.3 Equipements alimentés en électricité

 Etuves : réchauffage par thermoplongeurs de 12 kW <u>consommation electrique de La Zone etuves 1er etage</u>



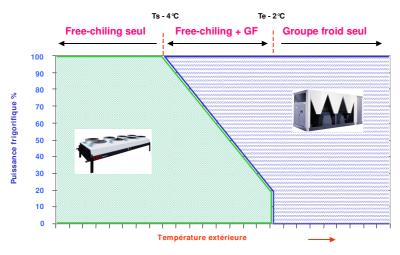
- Groupes de production d'eau glacée (2)
- Roof top chaud et froid (2)
- Climatiseurs individuels (10)
- Production d'air comprimé (1)
- Moteurs processus et ventilateurs

5.3 GAIN SUB LE FROID PRODUIT EN ENR ET ENERGIE FOSSILE

5.3.1 Gain apporté par le free-chilling sec (EnR)

La rentabilité du free-chilling sera d'autant plus élevée que les besoins de refroidissement seront importants en hiver et que l'installation s'y prêtera (surface des aéroréfrigérants et des émetteurs).

A Reims, avec un free-chilling sec, on gagnerait environ 22% d'énergie électrique destinée au froid pour un fonctionnement de jour en bureaux (35 h par semaine) et 42% pour les besoins continus de rafraîchissement ou de climatisation des ateliers fonctionnant 3 x 8 h (120 h par semaine).



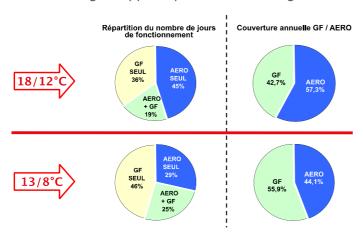
Ce n'est pas le choix qui a été retenu car avec des aéroréfrigérants secs et un fonctionnement alternatif l'efficience énergétique peut encore être améliorée (voir la suite)...

Les constructeurs annonce au travers de leur bilan thermique un gain pouvant aller parfois jusqu'à 62%. Il s'agit en fait d'un « potentiel de rafraîchissement » et non d'un résultat que l'on obtient à tous les coups.

Ils oublient le rendement de distribution et d'échange final et bien souvent les calculs présentés tiennent comptent d'un fonctionnement continu. Il faut tenir compte du nombre d'heures de jour et de nuit dans l'année pendant lesquelles les aéroréfrigérants délivreront une température d'eau refroidie permettant le rafraîchissement.

Tenir compte des heures de nuit dans des chambres d'hôpital c'est normal mais faire de même sur des bureaux qui ne fonctionnent que de jour, c'est fausser le résultat, car la nuit du fait de l'écart diurne la température sèche et dans une moindre mesure de la température humide améliorent le gain d'énergie.

Potentiel de gain apporté par un free-chilling sec



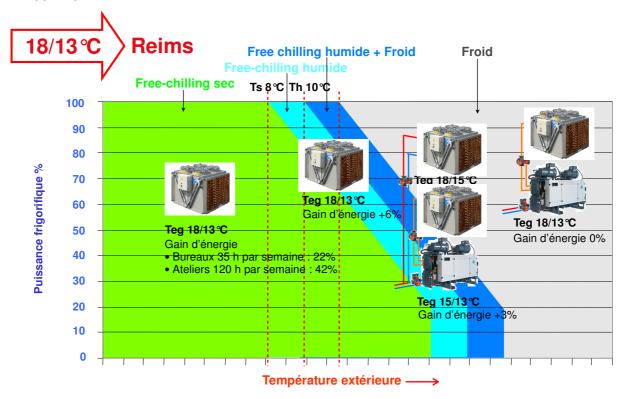
Taux de couverture annoncé par un constructeur avec une installation en free-chilling sec suivant différentes températures d'eau glacée

Si l'on tient compte du lieu, des heures de fonctionnement du froid, du système de free-chilling (alternatif ou bivalent) ainsi que des pertes thermiques, il en est autrement.

5.3.2 Gain apporté par le free-chilling humide (EnR)

Notre solution est de recourir à des aéroréfrigérants adiabatiques pour réaliser une partie du froid et de les faire fonctionner au maximum du potentiel d'économie d'énergie offert par le free-chilling.

Taux de couverture avec un fonctionnement free-chilling couplé à du froid thermodynamique – Doc A. GARNIER



5.3.3 Gain apporté par le froid thermodynamique (énergie fossile)

Le gain d'énergie électrique obtenu sur la production de froid « processus » + « rafraĵchissement et climatisation » sera de 2 ordres :

Un gain grâce à une température d'eau glacée ou d'eau de refroidissement différente :

 $1\,^\circ\!\!\mathrm{C}$ de température d'eau glacée ou d'eau de refroidissement en plus ou en moins génère un écart de consommation de 3%. Ce qui donne :

- -18% pour le remplacement anciens groupes de production d'eau glacée avec un régime à 13 ℃ plutôt que 7 ℃.
- -15% pour le remplacement des anciens roof-top ou des groupes avec une condensation à 35 ℃ plutôt que 40 ℃.

L'efficience énergétique des compresseurs frigorifique quand à elle a évolué considérablement, surtout entre une compression à pistons et celle à double vis proposée ici. On estime le gain à environ 15%. Le gain d'énergie conjugué par des choix de température d'eau et une meilleure technologie des groupes sera d'environ :

- 18% x 15%, soit -27% pour le remplacement anciens groupes de production d'eau glacée.
- 15% x 15%, soit -22,5% pour remplacement des anciens roof-top ou des groupes.

A ce gain il faut ajouter celui apporté par le préchauffage de l'eau au moyen de la chaleur de réjection des machines et des groupes. Mais comme il n'existe pas actuellement de compteurs d'électricité spécifique, il nous est impossible d'estimer la consommation avant et après travaux ainsi que le gain en Euros.

5.3.4 Gain global (toutes énergies confondues)

Il fallait refaire la plupart des installations, dans le calcul du temps de retour brut (TRB) il n'a donc été tenu compte que du surcoût apporté par des équipements plus performants.

De même, ces nouveaux équipements vont devoir à assumer pendant plusieurs décennies une fonction de production dont le coût d'énergie est sans cesse en évolution. Les analystes prédisent une augmentation notable du prix de l'énergie ces prochaines années.

Les prix de l'électricité vont augmenter de 30% d'ici 2016

http://lexpansion.lexpress.fr/economie/les-prix-de-l-electricite-vont-augmenter-de-30-d-ici-2016 279178.html

Une augmentation du prix du gaz de 30 à 40% est attendue à l'horizon 2014 http://www.atkearney.fr/index.php/Actualite/une-augmentation-du-prix-du-gaz-de-30-a-40-est-attendue-a-horizon-2014.html

Un « scénario 2014 », tenant compte à la fois du surcoût de travaux avec des équipements plus performants et de l'augmentation probable du coût des énergies donner le temps de retour brut suivant TRB : 4,1 ans

6 DOCUMENTS ANNEXES

6.1 QU'EST-CE QUE LE FREE-CHILLING?

6.1.1 Définition du free-chilling

Il n'est pas inutile de rappeler en quoi cela consiste, car beaucoup confondent encore le freechilling (chiller: refroidisseur en anglais) et le free-cooling (cooling: rafraichissant en anglais).

- Le free-chilling est obtenu par un aéroréfrigérant ou une tour de refroidissement qui refroidira l'eau à la place du groupe de production d'eau glacée dans les périodes où l'air sec (et humide dans le cas de la tour ou d'un aéroréfrigérant adiabatique) sera suffisamment froid.
- Le free-cooling est obtenu au moyen d'air frais introduit dans le local de façon naturelle ou mécanique qui viendra compenser l'air chaud que l'on évacuera à l'extérieur.

Lorsque l'on a besoin de froid à des températures extérieures particulièrement froides, plutôt que de mettre en service un groupe à compression ou une machine à absorption de production d'eau glacée, on se servira d'un aéroréfrigérant placé à l'extérieur qui dissipera la chaleur récupérée par les émetteurs. Plus le Δt entre la température extérieure et intérieure sera élevé, plus on produira ainsi de froid en EnR.

Les installations de rafraichissement ou de climatisation qui recourent habituellement à de l'eau glacée en hiver pour se climatiser, permettront de bien utiliser le potentiel offert par le free-chilling.

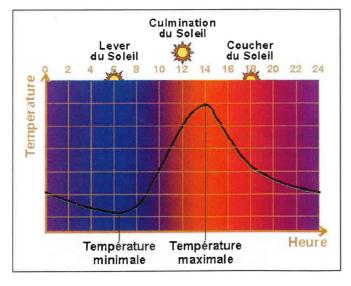
Les installations de climatisation avec des échangeurs ou émetteurs à grande surface d'échange se prêtent bien au free-chilling. Dans l'existant, il faudra étudier la possibilité d'adapter les installations (émetteurs, débit d'air et circuits).

Un échangeur qui reçoit une eau à 10/15 ℃ au lieu de 13/18 ℃ perd environ 36% de sa puissance totale frigorifique (sensible et latente). D'où l'intérêt de surdimensionner les échangeurs thermiques (aéroréfrigérants comme échangeurs à plaques ou encore batteries à air). On pourra aussi augmenter le débit d'air (ventilateur à débit variable sur les aéroréfrigérants) pour augmenter la puissance frigorifique ou encore déclasser l'appareil (aéroréfrigérant).

6.1.2 Jouer avec la météorologie

La température de l'air varie avec l'alternance du jour et de la nuit mais aussi, dans la journée, avec l'ensoleillement. Les bulletins météorologiques indiquent ainsi la température maximale et la température minimale du jour.

Effet des radiations solaires sur la température de l'air



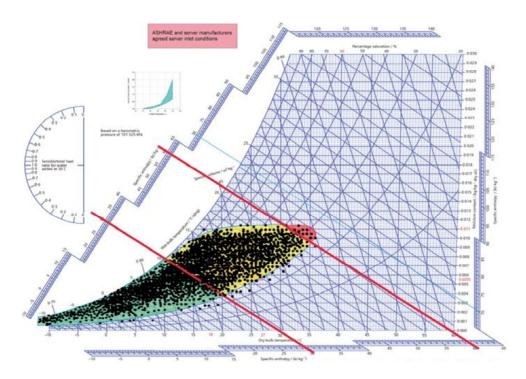
La température est minimale environ 1/2 h après le lever du soleil. Ce décalage est dû au bilan thermique de la terre. La nuit, la terre émet un rayonnement et se refroidit. Lorsque le soleil se lève, la terre reçoit le rayonnement solaire, mais continue à émettre. Ce n'est que 1/2 h après le lever du soleil que le bilan est positif et que la terre commence à se réchauffer.

La température est maximale environ 2 h après la culmination du soleil (moment où le soleil est le plus haut dans le ciel), qui correspond au passage du soleil dans le plan méridien local.

La température extérieure est plus basse la nuit, cette période est propice au free-chilling à cause de l'amplitude diurne et c'est justement dans cette période nocturne que des locaux à

l'aide d'émetteurs à basse température permettront d'extraire la chaleur stockée dans la structure du bâtiment de façon à préparer les bâtiments pour le lendemain. Bien souvent, dans cette période nocturne, les aéroréfrigérants n'auront même pas besoin de fonctionner en adiabatique mais seulement en sec.

Le free-chilling qu'il soit réalisé par des aéroréfrigérants fonctionnant à sec ou en adiabatique (humide), produira une bonne partie de l'année le froid nécessaire au rafraîchissement et à la climatisation, tout dépendra le la température extérieure.

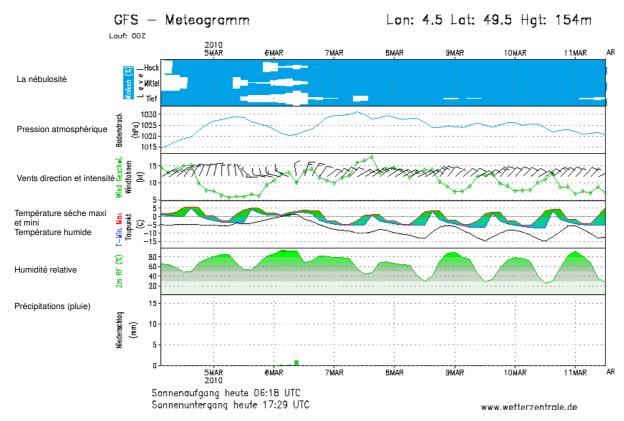


Free chilling sec ou free cooling Free-chilling humide Froid thermodynamique

Comme on le voit sur le diagramme psychométrique ci-dessus, on recourra au freechilling une bonne partie de l'année grâce en partie à la situation de Sézanne (latitude 49 °N) qui offre un climat avec un potentiel plus important que des villes dont la latitude seraient plus basse.

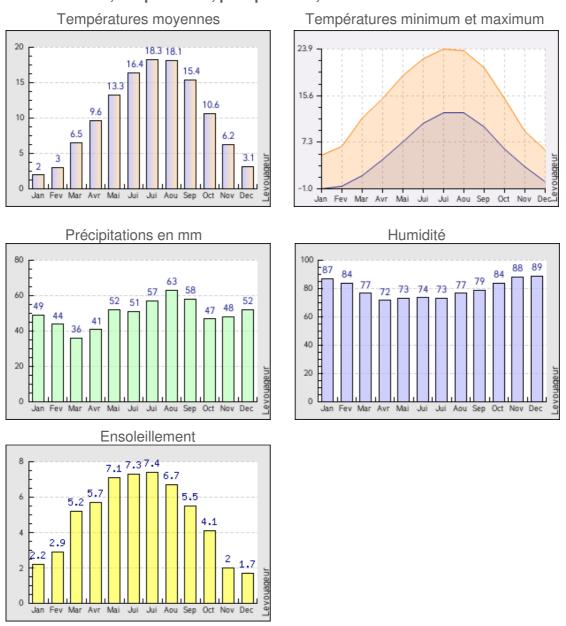
REIMS : Climat, températures, précipitations, ensoleillement en cours de semaine

On voit que dans la semaine du 4 mars au 11 mars 2010, les conditions météorologiques étaient réunies pour recourir au free-cooling ainsi qu'au free chilling.



<u>Nota</u>: C'est ce type de prévision météorologique qui nous permettra dans le futur de bien gérer nos climats intérieurs dans nos bâtiments passifs (BEPAS) et à énergie positive (BEPOS).

REIMS: Climat, températures, précipitations, ensoleillement en cours d'année



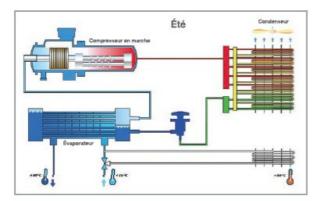
Pour faire de l'eau de refroidissement à 13° C (free-chilling), il faut à l'extérieur une température sèche de 8° C ou une température humide de 10° C.

Lorsque l'on regarde la température extérieure et l'humidité en cours d'année, l'économie d'énergie apportée par le free-chilling est évidente!

6.1.3 Les différents type de free-chilling

Le free-chilling « sec »:

Dans cette solution on fera appel à un groupe de production d'eau glacée à condensation par air avec une batterie de free-chilling incorporée.



Groupe de production d'eau glacée de toiture à condensation par air avec free-chilling sec incorporé - Doc CLIMAVENETA

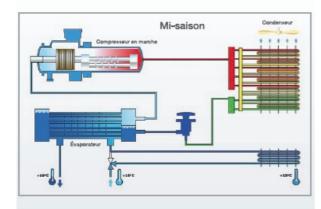


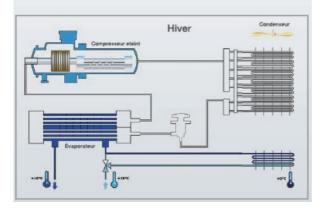
Un aéroréfrigérant sera raccordé sur le circuit d'eau glacée en injection avec l'évaporateur (la température finale sera régulée par le groupe qui ne se mettra en fonctionnement que si la température souhaitée n'est pas atteinte).

Lorsque l'installation travaillera à charge partielle, il sera préférable que la température de l'eau "glacée" soit la plus haute possible de façon à optimiser l'échange de l'aéroréfrigérant avec l'air extérieur.

On recourra à un aéroréfrigérant à débit variable pour augmenter l'écart de température entre départ et retour.

Le free-chilling couvrira la plus grande partie de la saison de rafraîchissement. Celui-ci devra se faire à l'aide d'émetteurs à grande surface d'échange acceptant une température d'eau froide inférieure seulement de quelques degrés de celle de l'ambiance.





Le free-chilling « humide »

Principe de fonctionnement :

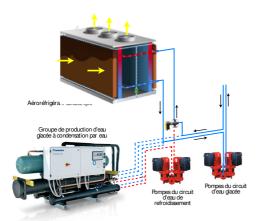
On pourra produire de l'eau froide à une température inférieure de quelques degrés de moins que celle de l'air l'extérieur ou plus exactement celle de sa température humide. L'eau est refroidie à l'intérieur de l'aéroréfrigérant par l'air extérieur et la machine frigorifique n'a pas besoin d'être mise en service.

La température extérieure est plus basse la nuit (écart diurne), cette période est propice au free-chilling à cause de l'écart diurne et c'est justement dans cette période nocturne que des locaux à l'aide d'émetteurs à basse température permettront d'extraire la chaleur stockée dans la structure du bâtiment de façon à préparer les bâtiments pour le lendemain. Bien

souvent, dans cette période nocturne, les aéroréfrigérants n'auront même pas besoin de fonctionner en adiabatique mais seulement en sec.

Le free-chilling qu'il soit réalisé par des aéroréfrigérants fonctionnant à sec ou en adiabatique (humide), produira une bonne partie de l'année le froid nécessaire au rafraîchissement et à la climatisation, tout dépendra de la température extérieure.

L'économie d'énergie est importante et la rentabilité du projet est d'autant plus élevée que les besoins de refroidissement sont importants et que l'installation s'y prête.



La température extérieure étant plus basse la nuit (écart diurne), on pourra d'autant plus recourir au refroidissement nocturne des locaux grâce au frechilling et aux émetteurs à basse température qui extrairont la chaleur stockée dans la structure du bâtiment. Bien souvent, dans cette période, les aéroréfrigérants n'auront même pas besoin de fonctionner en adiabatique.

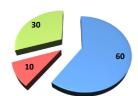
Free-chilling avec fonctionnement alternatif du groupe de production d'eau glacée <u>ou</u> de l'aéroréfrigérant - Doc. A. GARNIER

Niveau de confort à en attendre :

Avec une surface d'émetteurs satisfaisante on est en droit d'espérer pouvoir descendre de 4°C par rapport au pic de la température extérieure qui a lieu environ 1h ½ avant, comptetenu de l'inertie thermique. Soit une température intérieure maintenue à 26°C le jour quand il fait 30°C à l'extérieur, ce qui en fait un excellent moyen de rafraîchissement à basse d'EnR.

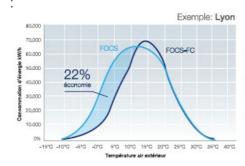
Nous aurons alors le choix entre deux solutions de « free-chilling » :

• Un free-chilling adiabatique avec un fonctionnement bivalent et un fonctionnement continu, ce qui nous permettrait d'arriver au gain d'énergie ci-dessous :



Taux de couverture de 60% du free-chilling adiabatique avec une température d'eau de 13/18 ℃ et un fonctionnement en continu.

- Adiabatique en sec
- Adiabatique en humide
- Groupe de froid
- Un free-chilling sec + <u>fonctionnement alternatif</u>, on pourra espérer arriver au gain d'énergie ci dessous ; ce qui n'est déjà pas si mal par rapport aux installations classiques



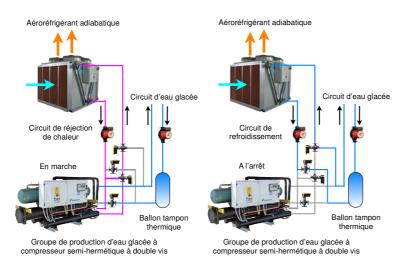


La latitude et le type de climat sont des facteurs importants qui influencent le gain d'énergie.

Fonctionnement alternatif (le seul utilisé actuellement) :

➤ L'aéroréfrigérant permettant le free-chilling sera utilisé une bonne partie de l'hiver et de la demi-saison. A partir du moment où la température extérieure ne le permettra plus, il sera réaffecté à la dissipation de la chaleur de réjection du groupe à compression ou de la machine à absorption de production d'eau glacée.

Froid thermodynamique ou free-chilling – Doc A. GARNIER

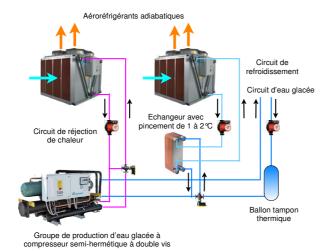


L'économie d'énergie sera importante et la rentabilité du projet sera d'autant plus élevée que les besoins de refroidissement seront importants et que la surface d'échange des émetteurs s'y prêtera.

Fonctionnement bivalent (notre innovation):

➤ L'aéroréfrigérant permettant le free-chilling sera utilisé une bonne partie de l'hiver et de la demi-saison de façon à se servir au maximum de la potentialité du free-chilling. Il n'est donc plus question de « commuter » entre free-chilling et froid thermodynamique. Tous deux sont mis à contribution en même temps avec une priorité free-chilling et un appoint ou pas en froid thermodynamique.

Exemple 1 : Free-chilling avec complément en froid thermodynamique au moyen d'1 seul groupe de production d'eau glacée en demi-saison – Doc A. GARNIER



Dans cette configuration on devra disposer de deux aéroréfrigérants.

Ainsi on pourra être amené à climatiser grâce au free-chilling dans un premier temps puis en froid thermodynamique dans un second.

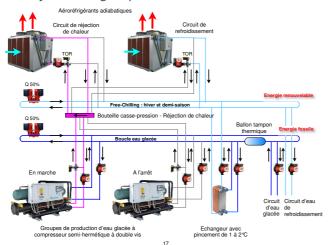
A partir du moment où la température extérieure ne le permettra plus, la dissipation de la chaleur de réjection du groupe à compression ou de la machine à absorption de production d'eau glacée sera effectuée par l'aéroréfrigérant approprié ou mieux encore au moyen des deux aéroréfrigérants ce qui

permettra d'augmenter la surface d'échange et donc d'augmenter l'efficience énergétique de la production de froid.

<u>Nota</u>: Un échangeur à plaques sera nécessaire entre les deux circuits, de réjection d'une part et de free-chilling d'autre part. On devra prévoir un pincement faible de l'ordre de 1 à 2K maximum pour ne pas perdre une partie de l'intérêt de cette solution.

Cette solution de froid EnR est prometteuse et on se demande bien pourquoi on ne l'utilisait pas jusqu'alors ...

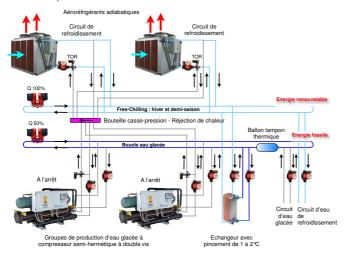
Exemple 2 : Free-chilling avec complément en froid thermodynamique mais cette fois-ci au moyen de 2 groupes dont 1 seul fonctionnera en demi-saison – Doc A. GARNIER



Dans cette configuration on disposera de deux aéroréfrigérants pour 2 groupes.

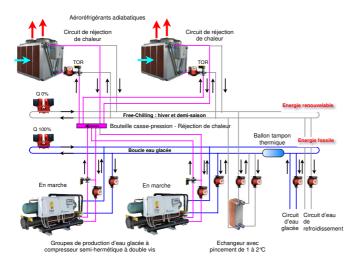
Ainsi on pourra réaliser toutes les combinaisons possibles : free-chilling + froid thermodynamique (schéma), free-chilling seul, froid thermodynamique seul (voir la suite).

Exemple 3 : Free-chilling seul, en hiver et en début de demi-saison (plus de 60% de l'année) – Doc A. GARNIER



La température extérieure étant plus basse la nuit (écart diurne), on pourra d'autant plus recourir au refroidissement nocturne des locaux grâce au free-chilling et aux émetteurs à basse température, lesquels permettront d'extraire la chaleur stockée dans la structure du bâtiment.

Exemple 4 : Froid thermodynamique seul au moyen des 2 groupes d'eau glacée en été – Doc A. GARNIER



Dossier rédigé par Alain GARNIER□

http://www.be-garnier.fr/



Alain Garnier est ingénieur et directeur du bureau d'études GARNIER 20 Rue Chanteraine à Reims.

Lauréat du premier prix de l'Eco-Efficacité catégorie « concepteurs » en 2009 récompense remise lors de l'UCE (Université du confort et de l'eau) de ICO à Lille.

- > Retrouvez les chroniques d'Alain Garnier
- > sur <u>www.xpair.com</u>,
 > le portail expert de la performance énergétique