



L'audit énergétique dans l'industrie

Jean-Marie SEYNHAEVE

Procédure de l'audit énergétique.
Ordre de priorité des mesures à prendre.
Mémento de l'audit énergétique industriel

Cas d'étude :

Réfrigérant atmosphérique



1. Procédure de l'audit énergétique

Étape 1 : Planification de l'audit

- ⇒ *Définition des objectifs*
- ⇒ *Diviser l'équipement de production en unités (volumes de contrôle)*
- ⇒ *Définition des tâches d'analyse et de surveillance*
- ⇒ *Attribution des responsabilités*

Étape 2 : Collecte des données

- ⇒ *Données de production par produit*
- ⇒ *Données de consommation par type d'énergie*
- ⇒ *Évolution temporelle de la production - consommation (jour, semaine, mois...)*
- ⇒ *Éviter les doubles comptages (Auto-production d'électricité...)*

Étape 3 : Réalisation des mesures

- ⇒ *Définition des campagnes et des matrices d'essais.*
- ⇒ *Inventaire des mesures disponibles sur site.*
- ⇒ *Inventaire des mesures complémentaire à effectuer*
- ⇒ *Préparation de l'instrumentation*
- ⇒ *Réalisation des mesures*



Étape 4 : Traitement des données - Bilans d'énergie - Rendements ...

- ⇒ *Traitement des résultats de mesure*
- ⇒ *Évaluation de consommations spécifiques - comparaisons avec les « standards »*
- ⇒ *Contrôle des bilans d'énergie - Évaluation des pertes*
- ⇒ *Interprétation des différences éventuelles - Corrections*

Étape 5 : Identification des améliorations possible dans la gestion énergétique

- ⇒ *Dans le traitement des données.*
- ⇒ *Dans le suivi des mesures d'économie...*

Étape 6 : Identification des améliorations relatives à la maintenance

- ⇒ *Sensibilisation du personnel.*
- ⇒ *Évaluation des économies possibles*
- ⇒ *Définition des responsabilités pour la réalisation*

Étape 7 : Identification des améliorations demandant peu d'investissement

- ⇒ *Isolation thermique*
- ⇒ *Équilibre électrique ($\cos\varphi$, quart-horaire) ...*



Étape 8 : Identification des améliorations demandant de gros investissements

- ⇒ *Évaluation des économies annuelles nettes.*
- ⇒ *Évaluation des coût d'investissement.*
- ⇒ *Analyse de la rentabilité économique et du risque.*
- ⇒ *Moyens de financement.*

Étape 9 : Réparation du rapport

- ⇒ *Clarté et concision*
- ⇒ *Conclusions : rappel des mesures par ordre de priorité.*



2. Type de mesures d'économie - Temps de mise en oeuvre

Immédiat : Psychologique

- ⇒ *Comportement du personnel*
- ⇒ *Planification de la production*
- ⇒ *Procédure de fabrication ...*

Court terme : Maintenance

- ⇒ *Entretien : chaudières, échangeurs ...*
- ⇒ *Pertes d'énergie à l'ambiance : fuites de vapeur, isolation thermique...*
- ⇒ *Électricité...*

Moyen terme : Réseau de distribution et d'utilisation de la chaleur

- ⇒ *URE : Réduire la consommation d'énergie noble : électricité, thermique HT.*
- ⇒ *URE : Accroître l'utilisation d'énergie BT.*
- ⇒ *Contrôle automatique et optimisé des unités de production et d'utilisation.*
- ⇒ *Récupération des pertes HT aux moyen d'économiseurs.*
- ⇒ *etc.*



UCL

Université
catholique
de Louvain

Moyen terme : ingénierie de process (gros investissements)

- ⇒ *Procédé discontinu* ⇒ *procédé continu*
- ⇒ *Chauffage par effet Joule* ⇒ *chauffage par induction*
- ⇒ *Chauffage thermique* ⇒ *chauffage par micro-ondes*
- ⇒ *etc.*

Long terme : changement du principe de fabrication

Long terme : Process integration

- ⇒ *Modification des flux énergétiques, optimisation.*
- ⇒ *Symbiose avec d'autres entreprises.*
- ⇒ *etc..*

Très long terme : Objectifs sociaux et techniques

- ⇒ *Modification des habitudes de consommations*





3. Exemple de sommaire de rapport d'audit

Introduction : Description de l'entreprise

1. *Résumé des activités de l'entreprise : produits et process*
2. *Consommation d'énergie et coûts*
3. *Principales sources d'approvisionnement en énergie, principaux consommateurs*
4. *Objectifs de l'audit, description claire de la mission*

1. Gestion de l'énergie dans l'entreprise

- 1.1 *Type de gestion, responsabilité, intégration dans l'entreprise*
- 1.2 *Monitoring des consommations énergétiques et de la production*
- 1.3 *Évolution passée des consommations spécifiques*
- 1.4 *Revue des améliorations passées*
- 1.5 *Recommandations d'amélioration*

2. Amélioration des systèmes énergétiques

- 2.1 *Description des systèmes*
- 2.2 *Résultats des campagnes d'essais*
- 2.3 *Proposition d'améliorations*
- 2.4 *Évaluation des économies et impact sur la production*
- 2.5 *Rentabilité économique*



UCL

Université
catholique
de Louvain

4. Amélioration dans l'utilisation de l'électricité

4.1 Description du système

4.2 Résultats des campagnes de mesure

4.3 Proposition d'améliorations, évaluation des économies

4.4 Évaluation de la rentabilité économique

5. Conclusions : résumé des recommandations

5.1 Actions à court terme : maintenance

5.2 Améliorations à moyen et long terme - coût des investissements

5.3 Évaluation économique et ordre de priorité des améliorations possibles

5.4 Recommandations concernant l'implantation dans l'entreprise





4. Mémento de l'audit énergétique industriel

A. Identification de l'entreprise

- ⇒ *Nom et adresse*
- ⇒ *Personnes contactées : position dans l'entreprise*
- ⇒ *Type d'entreprise :*
- ⇒ *Nombre d'employés :*
- ⇒ *Date de l'audit :*

B. Activité - production

- ⇒ *Flow sheet général indiquant les principales opérations de fabrication*
- ⇒ *Flow sheet des unités de fabrication (étapes de fabrication)*
- ⇒ *Listes des unités de production d'énergie (chaudières, air comprimé etc.)*

C. Matières premières et produits

- ⇒ *Consommation en matières premières : type, quantité, source, transport*
- ⇒ *Recyclage des sous-produits ?*
- ⇒ *Utilisation des déchets dans l'entreprise ou ailleurs.*
- ⇒ *Principaux produits :*
liste, type, production, capacité de production, chiffre d'affaires



UCL

Université
catholique
de Louvain

D. Approvisionnement en énergie - Consommation

⇒ *Liste des consommations d'énergie*

<i>Type</i>	<i>PCI - PCS unité</i>	<i>Quantité par an</i>	<i>Energie/an</i>	<i>Prix / GJ</i>	<i>Coût annuel</i>	<i>Source</i>
Electricité						
Gaz naturel						
Charbon						
Coke						
Bois						
GPL						
Fuel léger						
Fuel lourd						
Autres						
...						

⇒ *Auto-production d'électricité ? Si oui*

⇒ *Type de générateur : diesel, turbine vapeur, turbine gaz, autres*

⇒ *Puissance installée d'auto-production*

⇒ *Production annuelle d'auto-production*

⇒ *Combustible utilisé : type, consommation annuelle, coût annuel*

⇒ *Peut-on augmenter la capacité ?*





E. Système de cogénération : production combinée de chaleur et d'électricité

⇒ *Description :*

- *Source d'énergie primaire : type, consommation, coût*
- *Production de chaleur : quantité en GJ, températures*
- *Production d'électricité : quantité en kWh/an*
- *Utilisation : type d'équipements, consommation annuelle*

⇒ *Depuis quand l'installation de cogénération fonctionne ? Anomalie éventuelles*

⇒ *Prévoit-on d'installer un système de cogénération ou d'accroître la capacité d'un système existant ?*

F. Consommation d'électricité

⇒ *Capacité totale installée*

⇒ *Tension d'alimentation*

⇒ *Consommation annuelle : achat, auto-production*

⇒ *Diagramme de charge : journalier, hebdomadaire, saisonnier, ...*

⇒ *Facteur de puissance moyenne, quart-horaire*

⇒ *Répartition des consommations par type*

<i>Type</i>	<i>Quantité annuelle</i>	<i>Proportion</i>
Moteurs		
Chauffage - Conditionnement		
Eclairage		
Autres		
TOTAL		

G. Production de chaleur : Chaudières - Fours ...

- ⇒ *Nombre d'unités de production :*
- ⇒ *Perspective d'avenir : accroissement, changement ...*
- ⇒ *Caractéristiques des chaudières*

<i>Caractéristiques</i>	<i>Unités</i>	<i>Chaudière 1</i>	<i>Chaudière 2</i>	<i>Chaudière i</i>
Type - modèle	-			
Puissance	kW			
Débit de vapeur	t/h			
Pression vapeur	bar			
Température vapeur	°C			
Type de combustible	-			
Consommation	?			
Production de vapeur	?			
Rendement estimé				

- ⇒ *Source d'alimentation en eau*
- ⇒ *Type de traitement de l'eau*
- ⇒ *Qualité de l'eau après traitement*
- ⇒ *Consommation en eau*
- ⇒ *Recyclage de la vapeur condensée : quantité, température, etc.*
- ⇒ *Puissance de pointe demandée et puissance moyenne*
- ⇒ *Utilisation annuelle*
- ⇒ *Entretien, maintenance, réglage (automatique ou non)*

H. Utilisation de l'énergie

⇒ *Principaux équipements de consommation d'énergie*

<i>Equipement</i>	<i>Type d'énergie</i>	<i>Consommation d'énergie</i>	<i>Coût annuel</i>	<i>S.E.C</i>	<i>Efficacité</i>	<i>Alternative possible</i>

⇒ *Énergie utilisée au chauffage et/ou au conditionnement d'air des bâtiments*

⇒ *Énergie utilisée pour la manutention et le transport dans l'entreprise*

⇒ *Préchauffage des combustibles : moyen et contrôle ?*

⇒ *Autre remarques*

I. Gestion de l'énergie

⇒ *Gestionnaire « énergie » : nom, position, full ou part-time, qualification ...*

⇒ *« Énergie » team, commission « énergie » : membres, titre, qualification...*

⇒ *Responsabilités de la commission « énergie ».*



I. Gestion de l'énergie (suite)

- ⇒ *Contrôle et inventaire des consommations d'énergie :*
 - *par le gestionnaire « énergie »*
 - *au niveau des unités d'utilisation*
 - *de temps en temps...*
 - *dernier inventaire complet des consommation ?*
- ⇒ *Type d'analyse des consommation énergétiques*
 - *par département*
 - *au niveau des principaux équipements*
 - *par ligne de production*
 - *par produit*
 - *consommation totale mensuelle*
- ⇒ *Analyse de consommation en adéquation avec la production ?*
- ⇒ *Analyse critique des résultats au cours du temps :*
- ⇒ *Objectifs définis en matière de consommation d'énergie et résultats*
 - *au niveau de la consommation globale*
 - *au niveau du SEC*
 - *au niveau des améliorations spécifiques apportées dans des process*
- ⇒ *Actions de formation du personnel en matière d'économie d'énergie*
- ⇒ *Contrôle de la maintenance des équipements de production et d'utilisation*



UCL

Université
catholique
de Louvain

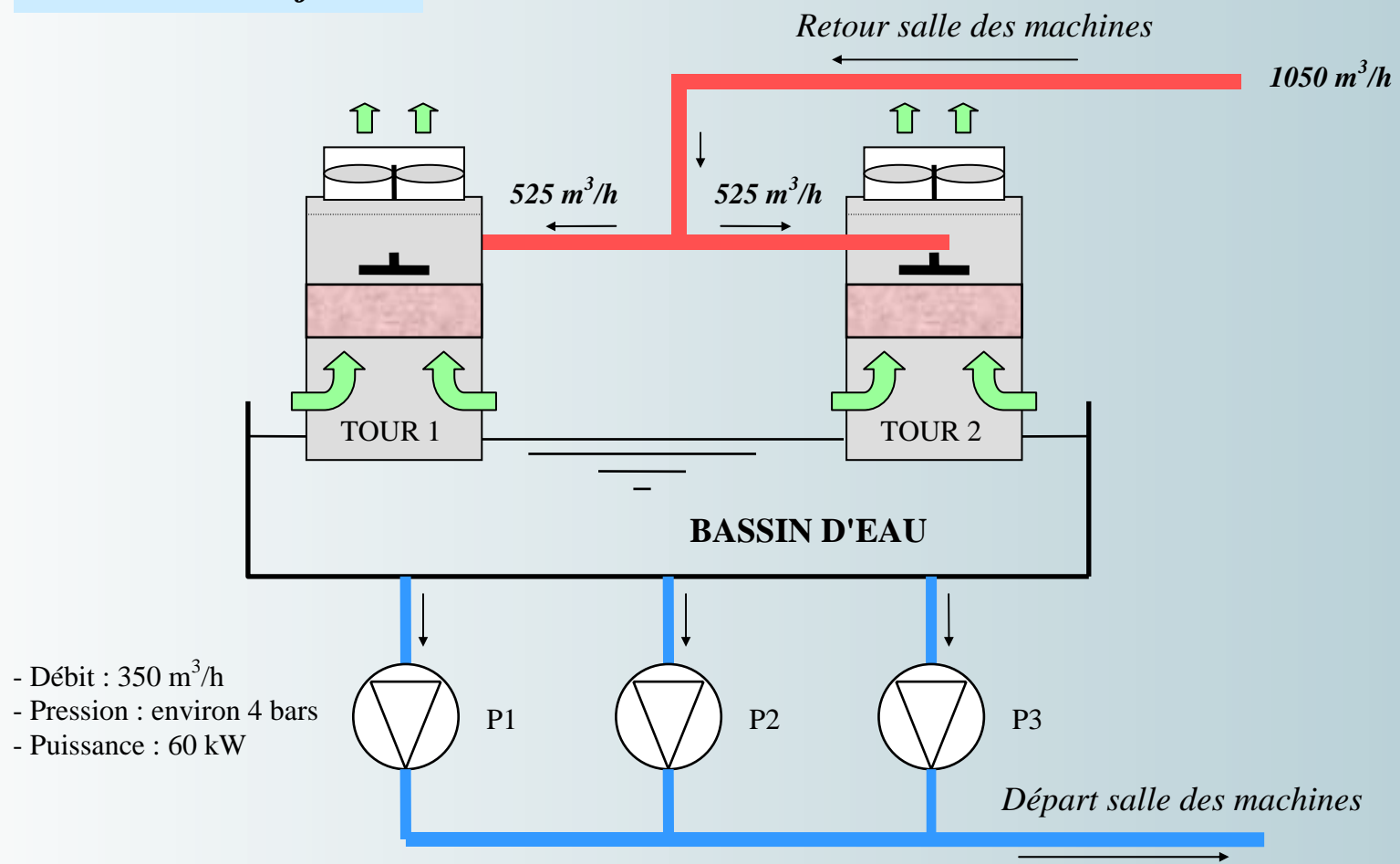
J. Problèmes liés à la conservation de l'énergie dans l'entreprise

- ⇒ *Résumé des principaux problèmes rencontrés en ce qui concerne la consommation d'énergie du point de vue des gestionnaires de l'entreprise.*
- ⇒ *Existence éventuelle de mesures en faveur de l'amélioration des efficacités énergétiques des différents process.*
- ⇒ *Études réalisées en faveur de l'amélioration des efficacités énergétiques*
- ⇒ *Résumé des principales activités relatives aux économies d'énergie dans l'entreprise.*
- ⇒ *Possibilités d'utilisation d'énergie alternative :
bois, solaire, éolien, biomasse, bio gaz ...*



Cas d'étude : Audit énergétique industriel sur des tours de refroidissement

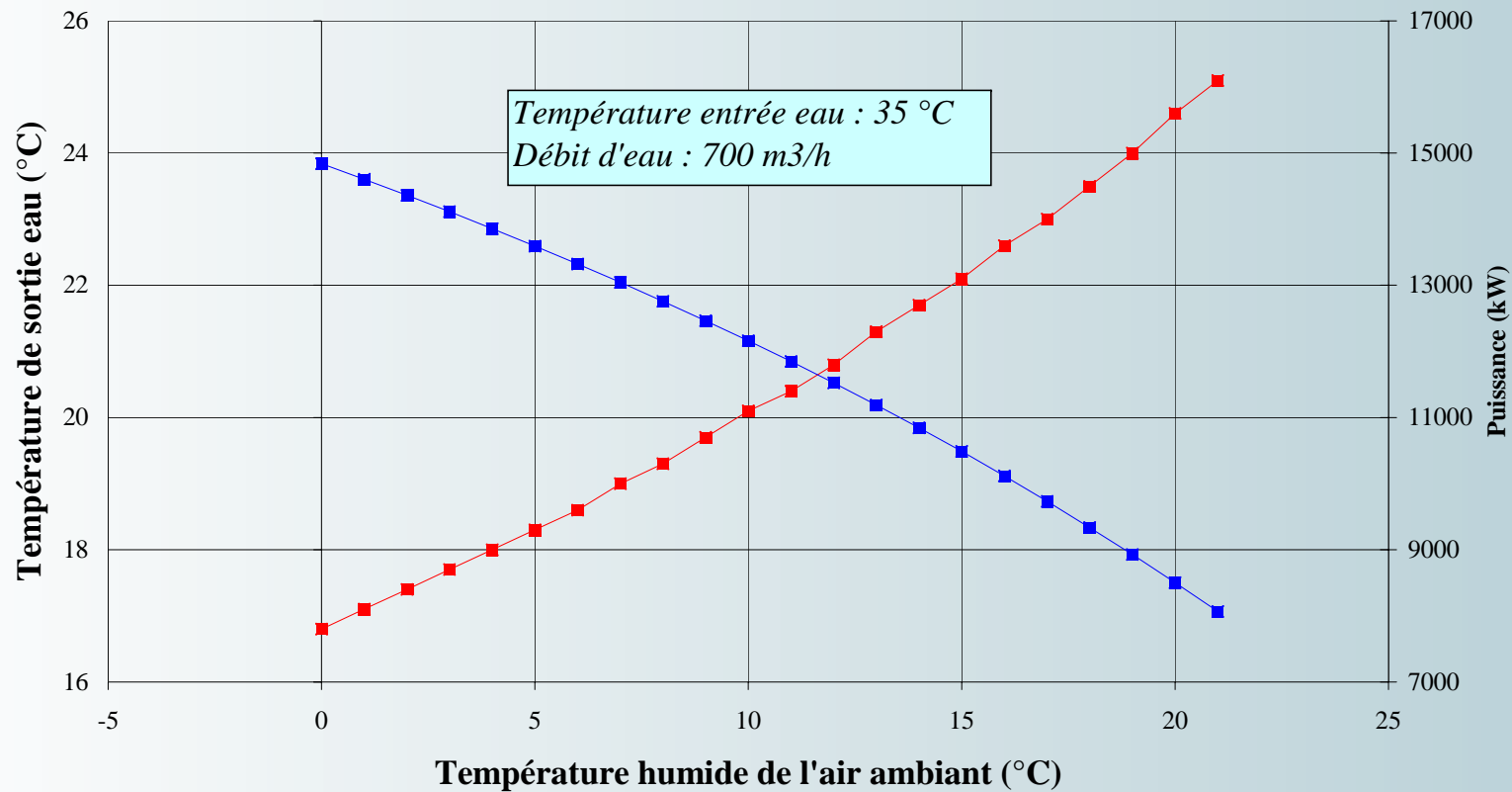
Production du froid





Tours de refroidissement : Caractéristique constructeur

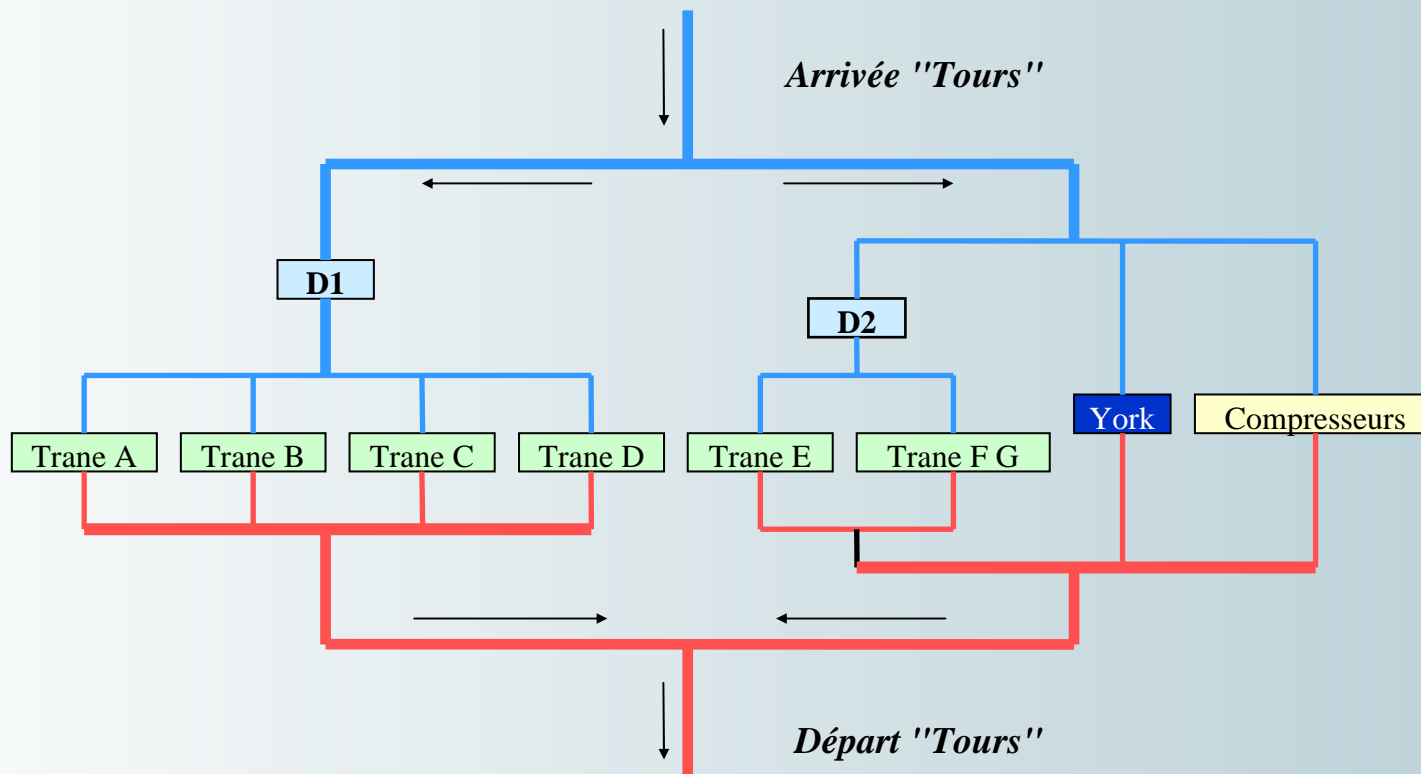
Caractéristique d'une tour de réfrigération





Utilisation du froid

- Trois compresseurs munis chacun d'un "intercooler".
- Six machines frigorifiques Trane (2 °C, -8 °C, -27 °C).
- Une machine frigorifique à double étage du type York (-70 °C).
- Quelques petits consommateurs « marginaux ».





Relevé des puissances frigorifiques in situ

	Caractéristiques nominales					Données relevées in situ				
	Qm (kg/s)	DT (°C)	Pr (kW)	Pc (kW)	Effic.	Qm (kg/s)	DT (°C)	Pr (kW)	Pc (kW)	Effic.
MACHINES TRANE										
- Trane A (450 HE)	47.50	8.00	1591	232	5.85	65.94	2.80	773	128	5.05
- Trane B (450 HE)	47.50	8.00	1591	232	5.85	64.80	2.30	624	142	3.39
- Trane C (300 HE)	32.50	8.00	1089	152	6.16	43.53	2.30	419	83	4.05
- Trane D (300 HE)	32.50	8.00	1089	152	6.16	45.90	2.30	442	91	3.87
- Trane E (380 HE) *	36.80	8.00	1233	200	5.16	60.78	2.20	560	?	?
* à l'arrêt										
MACHINES YORK	11.11	5.00	233			?	?	?		
COMPRESSEUR										
- Compresseur A			50	100				50.00		
- Compresseur B			50	100				50.00		
- Compresseur C			50	100				50.00		
TOTAL			6974					2968		

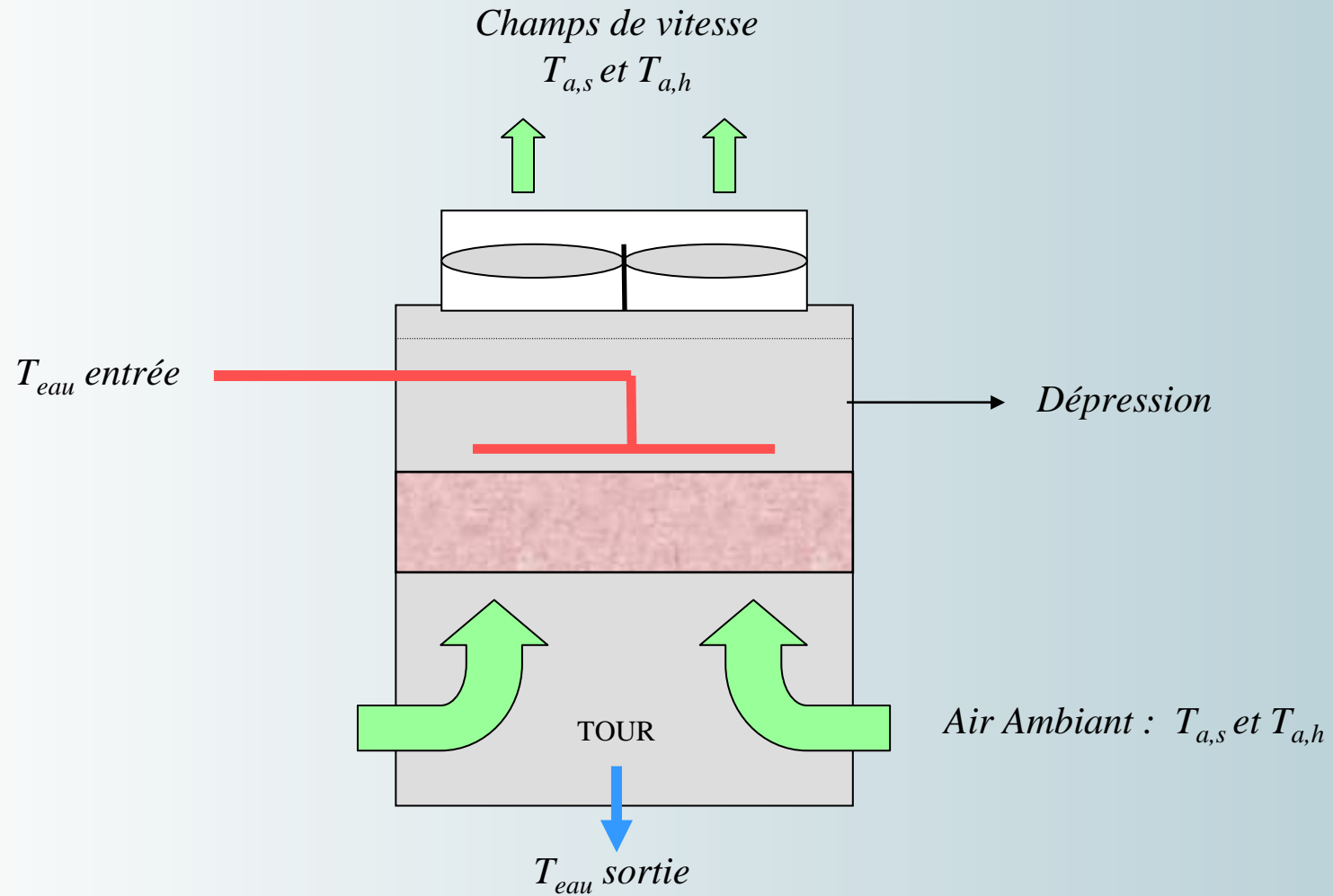
- Le débit d'eau de refroidissement au condenseur : Qm en kg/s
- La différence de température entre sortie et entrée : DT en °C
- La puissance au condenseur : Pr en kW
- La puissance au compresseur : Pc en kW
- L'efficacité de la machine frigorifique.

Problème :

- ΔT aux condenseurs trop faibles, car la température de l'eau entrée trop élevée
- Débit d'eau de refroidissement « hors design »

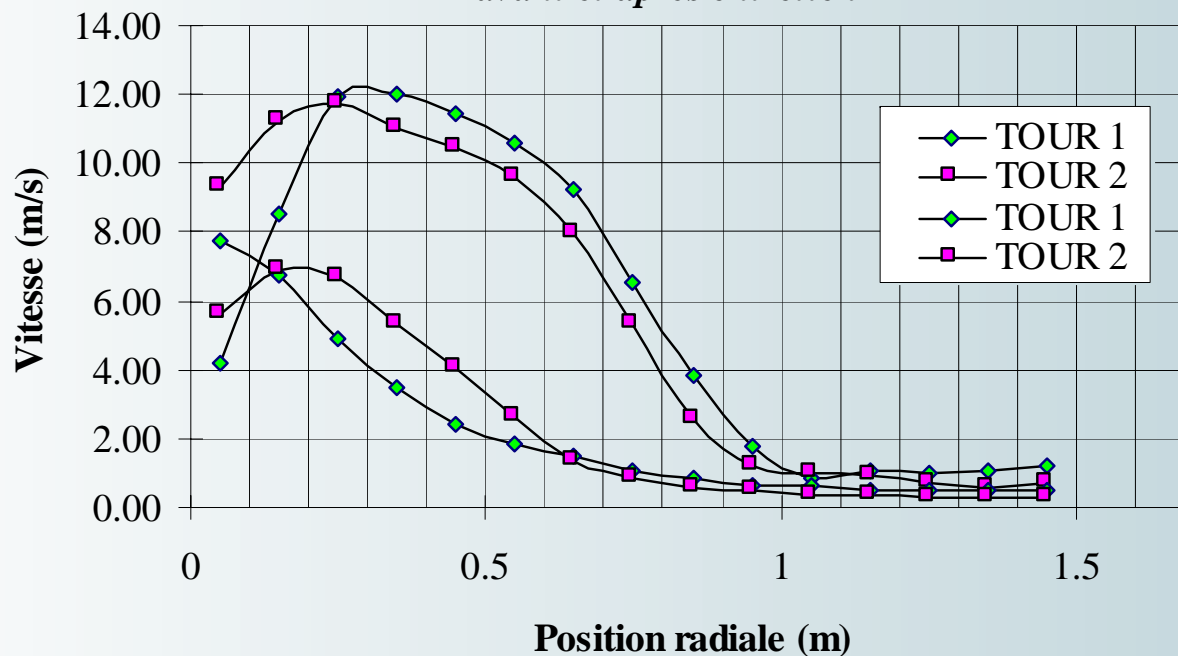


Mesures effectuées in situ sur les tours de réfrigération



Résultats de mesure

PROFIL RADIAL DE VITESSE Comparaison Ventilateurs TOUR 1 et TOUR 2 avant et après entretien



	TOUR 1 avant entretien	TOUR 1 après entretien	TOUR 2 avant entretien	TOUR 2 après entretien
- Débit volume après intégration (m ³ /h)	28.48	64.78	30.58	67.32
- Débit masse (kg/h)	34.99	80.24	37.52	83.16
- Dépression à l'aspiration (Pa)	320.	200.	270.	200.



Résultats de mesure

	TOUR 1			TOUR 2		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 1	Essai 2	Essai 3
COTE AIR						
- Température sèche IN (°C)	20.29	14.97	18.96	25.3	15.4	21.96
- Température humide IN (°C)	14.06	12.85	14.23	16.14	12.49	14.90
- Température sèche OUT (°C)	22.24	19.79	21.64	24.94	22.00	23.17
- Température humide OUT (°C)	21.11	19.50	20.36	24.23	21.84	21.26
- Dépression à l'aspiration du ventilateur (Pa)	320.		200.	270.		200.
- Débit volume à la sortie (m3/h)	28.48		64.78	30.58		67.32
- Débit masse sortie (kg/s)	34.99		80.24	37.52		83.16
- X à l'entrée (kg d'eau / kg d'air sec)	0.00745	0.00844	0.00820	0.00764	0.00789	0.00766
- X à la sortie (kg d'eau / kg d'air sec)	0.01538	0.0142	0.01458	0.019	0.01655	0.01519
- Débit masse d'air sec (kg/s)	34.460	34.500	79.087	36.820	36.909	81.916
- Enthalpie IN (kJ/kg d'air sec)	39.39	36.45	39.93	45.01	35.5	41.63
- Enthalpie OUT (kJ/kg d'air sec)	61.55	56.02	58.89	73.58	64.28	62.03
- Différence d'enthalpie (kJ/kg d'air sec)	22.16	19.57	18.96	28.57	28.78	20.40
- Puissance (kW)	763.6	675.2	1499.5	1052.0	1062.2	1671.1
COTE EAU						
- Température entrée (°C)	22.83	21.7	20.62	24.31	22.01	20.69
- Température sortie (°C)	21.68	20.46	17.89	22.16	20.12	18.29
- Différence de température	1.15	1.24	2.73	2.15	1.89	2.40
- Débit d'eau (m3/h) **	571	468	472	421	483	599
** valeur résultant du bilan thermique						
EFFICACITE (%)	13.1	14.0	42.7	26.3	19.9	41.5

NB : Efficacité

$$\varepsilon = \frac{T_{eau,in} - T_{out}}{T_{eau,in} - T_{air,h}}$$



Conclusions

1. En ce qui concerne l'adéquation entre la production et l'utilisation d'eau froide.

La puissance de refroidissement des tours est largement suffisante pour couvrir les besoins de l'usine.

- *Puissance installée de refroidissement des tours : 2 x 8000 kW à Th 21 °C*
- *Puissance totale nominale : 7000 kW*
- *Puissance relevée sur site : 3000 kW*

2. En ce qui concerne le fonctionnement des tours après entretien.

- Une efficacité et une capacité de refroidissement bien meilleure qu'avant entretien.
- Un écart important entre les débits d'air en fonctionnement nominal et ceux relevés in situ.

Débit d'air : 120 kg/s nominal par rapport à 80 kg/s mesuré

Recommandations :

- *Contrôle permanent de la qualité de l'eau pour éviter l'encrassement des échangeurs*
- *Contrôle de fonctionnement : dépression aux tours de réfrigération*



3. En ce qui concerne la régulation des tours de refroidissement.

La température de l'eau de refroidissement ainsi que la différence de température entré-sortie des tours sont fixés par trois facteurs :

- Les conditions atmosphériques et plus particulièrement la température humide de l'air.
- Le besoin en puissance de refroidissement des diverses machines utilisatrices.
- Le débit d'eau dans les tours.

Paramètre déterminant : Température humide de l'air ambiant

Paramètre secondaire et prévisible : La charge de refroidissement demandée

Recommandations :

Mise en route ou à l'arrêt des tours en fonction des besoins et des conditions atmosphériques

Conséquence : Réduction des consommations des pompes de circulation