

Adresses:

Editeur: Office fédéral des questions
conjoncturelles (OFQC)
Belpstrasse 53
3003 Berne
Tél.: 031/61 21 39
Fax: 031/46 41 02

Direction: RAVEL
c/o Amstein+Walthert AG
Leutschenbachstrasse 45
8050 Zürich
Tél.: 01/305 91 11
Fax: 01/305 92 14

Responsable Charles Weinmann
romand: Weinmann-Energies SA
Route d'Yverdon 4
1040 Echallens
Tél.: 021/881 47 13
Fax: 021/881 10 82

Chef du domaine: Jürg Nipkow
ARENA
Schaffhauserstrasse 34
8006 Zürich
Tél.: 01/362 91 83
Fax: 01/363 38 50

Auteurs: Gabriel Mamame
Jianhua Zhou
Bernard Giovannini
Université de Genève
Centre Universitaire d'Etude
des Problèmes de l'Energie
Chemin des Conches 4
1231 Chonches-Genève
Tél.: 022/789 13 11
Fax: 022/789 25 38

Cette étude appartient à l'ensemble des projets d'étude effectués par des diers dans le cadre du programme d'impulsion RAVEL. L'Office fédéral des questions conjoncturelles et la Direction du programme autorisent la publication de ce rapport, sous la responsabilité des auteurs et des chefs des domaines concernés.

Copyright Office fédéral des questions conjoncturelles
3003 Berne, juin 1993
Reproduction autorisée, avec mention de la source.
Commande auprès de l'Office fédéral central des imprimés et du matériel, Berne (No de com. 724.397.21.56 F)

Form. 724.397.21.56 F 6.93 300

RAVEL - Publications RAVEL

Publications RAVEL

Analyse processus industriels sélectionnés: utilisation de force dans une entreprises chimique

Gabriel Mamane



Jianhua Zhou
Bernard Giovannini

RAVEL - Publications RAVEL

Office fédéral des questions conjoncturelles

Table des matières

| | page |
|--|------|
| Résumé | II |
| Zusammenfassung | III |
| Introduction | 1 |
| 1. Relevé des consommations par les "SIG" | 2 |
| le schéma électrique de principe | 2 |
| la distribution | 3 |
| les relevés | 3 |
| la répartition de la consommation | 4 |
| rappel technique | 5 |
| analyse des mesures | 6 |
| interprétation | 13 |
| conclusions | 13 |
| II. La " STEP" (station d'épuration) | 16 |
| III. Un atelier de rectification comme unité de production | 24 |
| IV. Les installations d'infrastructure | 26 |
| V. Conclusions | 31 |
| VI. Le futur: extrapolation pour l'industrie chimique | 32 |
| la méthodologie | 33 |
| remerciements | 33 |
| bibliographie | 34 |

Résumé

La motivation de cette étude est d'évaluer le potentiel d'économie d'énergie électrique finale du secteur "FORCE" dans une entreprise de l'industrie chimique. Notre objectif est de définir et de proposer une méthodologie applicable à l'ensemble des secteurs d'une entreprise et éventuellement à d'autres industries chimiques.

La méthodologie suivante est la synthèse d'une analyse préliminaire du réseau électrique et d'une analyse poussée du secteur force. Elle comprend:

1. Une analyse grossière des secteurs eau, vapeur, froid et air comprimé, qui dans notre cas comptent pour 1/3 de la consommation totale d'électricité. C'est aussi dans ces secteurs que l'on trouve les plus gros moteurs.
2. Une analyse préliminaire du réseau électrique par une campagne de relevés des puissances, des courants et $\cos(\phi)$. Cela permet d'établir les courbes de charge globale et par secteurs.
3. Etablir un bilan détaillé de la consommation d'énergie électrique "force" pour chaque secteur présentant des irrégularités ou anomalies.

La mise en application de la méthodologie dans l'entreprise considérée nous a permis de faire des propositions pertinentes concernant l'évaluation du potentiel d'économie d'énergie électrique du secteur "force". Dans notre exemple ce potentiel est de 1204MWh/an. En plus, différentes mesures pratiques sont proposées. Par exemple:

- la vitesse variable en continue
- le dimensionnement plus précis des moteurs en évitant l'addition des réserves ou sécurités
- le couplage de différents réseaux de distribution aussi bien pour le froid, que de la vapeur et de l'air comprimé
- l'augmentation de certaines capacités de stockage permettant la production aussi pendant la nuit à tarif réduit
- la conduite manuelle de l'aération des bassins de la station d'épuration -le meilleur choix des modes d'exploitation générale des installations -l'application de la cogénération

L'extrapolation des résultats de notre étude à l'ensemble de l'industrie chimique devrait situer le potentiel d'économie d'énergie électrique finale du secteur 'FORCE' à la valeur de 890TJ/an ou 247GWh/an.

Zusammenfassung

Das Untersuchungsprojekt befasst sich mit Verbesserungen des Wirkungsgrades von Kraftanwendungen in einem Industriebetrieb der Chemiebranche. Als Ziel wird ein methodisches Vorgehen angestrebt, welches auch in anderen Bereichen des Betriebs und evtl. der chemischen Industrie anzuwenden ist.

In der Untersuchung wurde das folgende methodische Vorgehen entwickelt, welches eine Synthese aus einer Voruntersuchung des Stromverteilnetzes und einer Detailuntersuchung von Kraftanwendungen besteht:

- (i) Erster Schritt ist eine Grobanalyse der Bereiche Wasser, Dampf, Druckluft, welche im vorliegenden Fall 1/3 des gesamten Stromverbrauches verursachen und wo die grössten Motoren zu finden sind.
- (ii) Zweiter Schritt ist eine messtechnische Analyse des Stromverteilnetzes mittels Messungen von Leistungen, Strömen und Spannungen aller Verteiltransformatoren im Betrieb, um die charakteristischen Lastverläufe festzuhalten.
- (iii) Die in der Voruntersuchung erkannten Probleme rufen nach einer Prüfung der Verhältnisse sekundärseitig der Verteiltransformatoren, d.h. nach detaillierten Bilanzen des Kraftverbrauchs der problematischen Bereiche.

Die Voruntersuchung erlaubte einerseits, den Gesamt-Stromverbrauch auf .7% genau zu bestimmen; und andererseits, eine korrelierte Verteilung auf alle Verbrauchseinheiten des Betriebes zu erstellen und Probleme in Bereichen aufzudecken, welche einen auffallenden Lastverlauf aufwiesen.

Antriebe mit variabler Drehzahl entsprechen den vielfältigen Anforderungen der Kraftanwendung in der chemischen Industrie. Typische Beispiele sind etwa die Pumpstation für das Betriebwasser, wo ein moderner Umrichterantrieb die bestehende Drehzahlregeleinrichtung mit Schleifwiderstand ersetzen könnte, oder zwei der Dampfkessel-Oelbrenner, wo drehzahlgeregelte Ventilatoren anstelle der bestehenden Drosselklappen zur Luftmengenregelung eingesetzt werden könnten.

* Ein Beispiel für die verbreitete Ueberdimensionierung ist der Motor des Kältekompressors für die Klimatisierung des Verwaltungstrakts mit 225 kW Leistung, wo 90 kW ausreichen würden.

* Ein Zusammenschliessen von Kälte- oder Druckluft-Verteilnetzen könnte Vorteile bringen, indem die Zahl der Kompressorstarts vermindert, Energie gespart und alte Anlagen ausser Betrieb gesetzt würden. Komplementär sollte in weit von den Zentralen entfernten Produktionsstätten Kälte lokal erzeugt werden. Eine Erhöhung der KälteSpeicherkapazität könnte die häufigen Kompressoranläufe und damit Leistungsspitzen reduzieren; Kälte könnte zudem nachts mit tieferem Stromtarif erzeugt und gespeichert werden.

* In der Kläranlage bringt die manuelle Schaltung der Belüftungskompressoren (anstelle einer unzweckmässigen automatischen eine Verlustminderung der Motoren und durch gleichmässigeren Leistungsaufnahme eine Abnahme der Störungen im Netz. Von prioritärer Bedeutung sind hier die optimale Klärschlamm-Eindickung und -Rückführung.

* Für die Destillationskolonnen ist die Beherrschung des Vakuums ausschlaggebend. Daraus ergeben sich Einsparungen aller anderen Energien.

* Schon eine optimierte Betriebsweise der verschiedenen technischen Installationen bedeutet Energieeinsparungen.

* Die Wärme-Kraft-Kopplung, welche heute ab 100 kW wirtschaftlich ist, sollte in anbetracht des Wärme- und Kraftbedarfs der Chemie ins Auge gefasst werden.

Eine Schätzung, welche das Potential sicher nicht ausschöpft, zeigt im untersuchten Betrieb Einsparmöglichkeiten von 1'204 MWh, d.h. 6.3% des Gesamt-Stromverbrauches von 19'901 MWh (1990). Das Kapitel 5 stellt die Schlussfolgerungen detailliert dar.

Anschliessend an diese Studie wäre eine Hochrechnung für die schweizerische chemische Industrie wünschenswert. Ein konservativ - geschätztes Sparpotential von 20% des Stromverbrauchs für Kraftanwendungen in der Chemiebranche ergäbe etwa 890 TJ (247 GWh) Jahreseinsparung.

Selon des études générales faites en Suisse et à l'étranger, il apparaît qu'il existe un potentiel intéressant d'économie d'électricité dans le secteur FORCE de l'industrie et en particulier de l'industrie de transformation et de processus non particulièrement gourmande en énergie. Bien que l'on ait publié un certain nombre d'estimations de ce potentiel d'économie, il existe peu, surtout en Suisse d'études détaillées allant de l'analyse fine jusqu'à la réalisation d'améliorations énergétiques et de leur mesures.

Le CENTRE UNIVERSITAIRE D'ETUDE DES PROBLEMES DE L'ENERGIE (CUEPE) à Genève a établi depuis plusieurs années une collaboration dans le domaine de l'énergie avec une grande entreprise chimique de la région genevoise. Cette collaboration a abouti à l'établissement d'un premier bilan énergétique de l'entreprise basé sur les données de 1986. On a mis en évidence que la consommation d'électricité finale représentait 16,5% de la consommation totale d'énergie. Cette consommation représente un coût de Frs 1'455 kFrs et une part de 38,8% des dépenses totales d'énergie. En 1991 le même bilan donnait pour l'électricité finale une part de 19,7% de la consommation totale de l'énergie de 371 TJ et un coût de 2'300 kFrs pour la consommation électrique. Cette consommation est en augmentation et continuera à croître dû entre autre, à la mise en service de plusieurs nouvelles installations de production chimique et de production d'énergie.

Bien que le coût de l'énergie finale (mazout, gaz et électricité) représente une faible part (environ 5%) du coût des matières premières, elle prend néanmoins toute son importance pour l'entreprise dans sa recherche d'indépendance face au problème d'approvisionnement et aussi dans son effort de respect de l'environnement.

La motivation de cette étude d'analyse énergétique de processus industriels sélectionnés est d'évaluer les améliorations résultant de l'utilisation rationnelle de l'électricité finale dans une entreprise chimique. Le but est de définir une méthodologie d'analyse applicable à d'autres secteurs d'une entreprise et aussi à d'autres entreprises de l'industrie chimique.

Pour l'entreprise considérée la consommation de l'électricité finale au cours des dernières années est la suivante:

| année | consommation(MWh) | puissance de pointe (kW) |
|-------|-------------------|--------------------------|
| 88 | 14650 | 3132 |
| 89 | 16164 | 3492 |
| 90 | 17743 | 3888 |
| 91 | 20295 | 4176 |

Le nombre de moteurs installés dans l'entreprise est de 2200. Leur répartition en fonction de la puissance est la suivante:

1835 moteurs de 1 OOW à 4kW
 299 moteurs de 4,5 kW à 15kW
 28 moteurs de 15,5kW à 30kW
 50 moteurs de 30,5kW à 100kW et
 8 moteurs de plus de 100kW

La puissance installée et le nombre des moteurs chiffre entre parenthèse, des installations dites d'infrastructure sont:

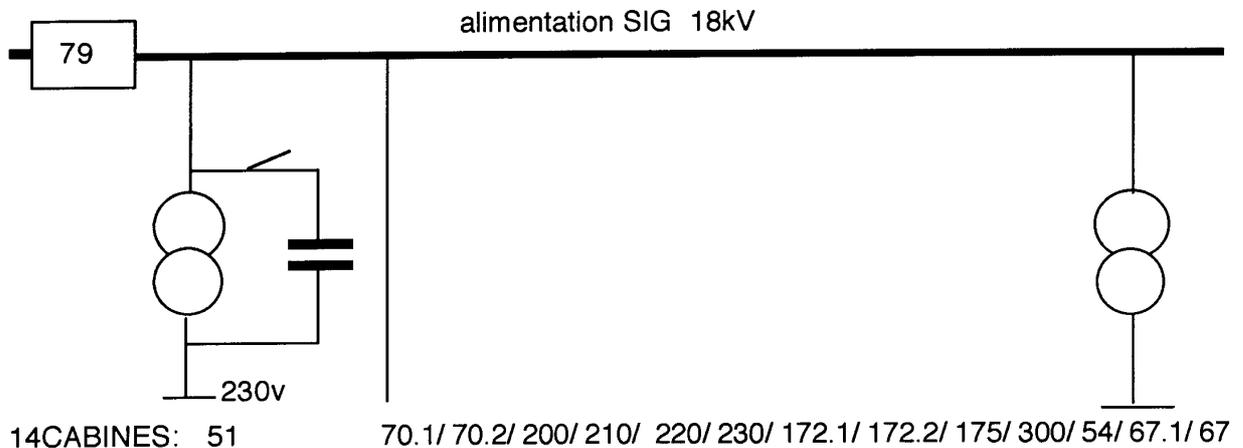
| | |
|---------------------|-------------|
| pompage eau | 1065kW (19) |
| production vapeur | 390 kW (19) |
| production froid | 1197kW (49) |
| air comprimé | 518 kW (14) |
| station d'épuration | 463 kW (62) |

Au départ notre étude devait se limiter à l'analyse d'une unité de production. En pratique étant donné la quantité de moteurs et la diversité des installations, souvent polyvalentes, il nous a paru logique de faire tout d'abord un bilan de la consommation électrique globale de l'entreprise. Pour ce faire, les Services Industriels de Genève (SIG) ont fait des mesures que nous avons analysées. C'est le chapitre 1 du rapport.

Le résultat de cette analyse et l'accumulation des connaissances sur le terrain nous ont permis de passer à la 2^{ème} phase qui a consisté à l'analyse détaillée d'un secteur particulier, dans ce cas la station d'épuration (STEP). C'est le chapitre 2 du rapport. Le chapitre 3 consiste à l'investigation d'un atelier de production (la Rectification). Le chapitre 4 présente les installations indispensables au fonctionnement de la chimie. Les chapitres 5 et 6 sont respectivement les conclusions et une proposition pour une suite de cette étude.

I.Relevé des consommations par les 'SIG'

-Le schéma électrique de principe de l'installation est le suivant:



La puissance installée est de 9722kVA

La pointe de puissance maximale mesurée est de 3528kW

-Principe des relevés de la consommation:

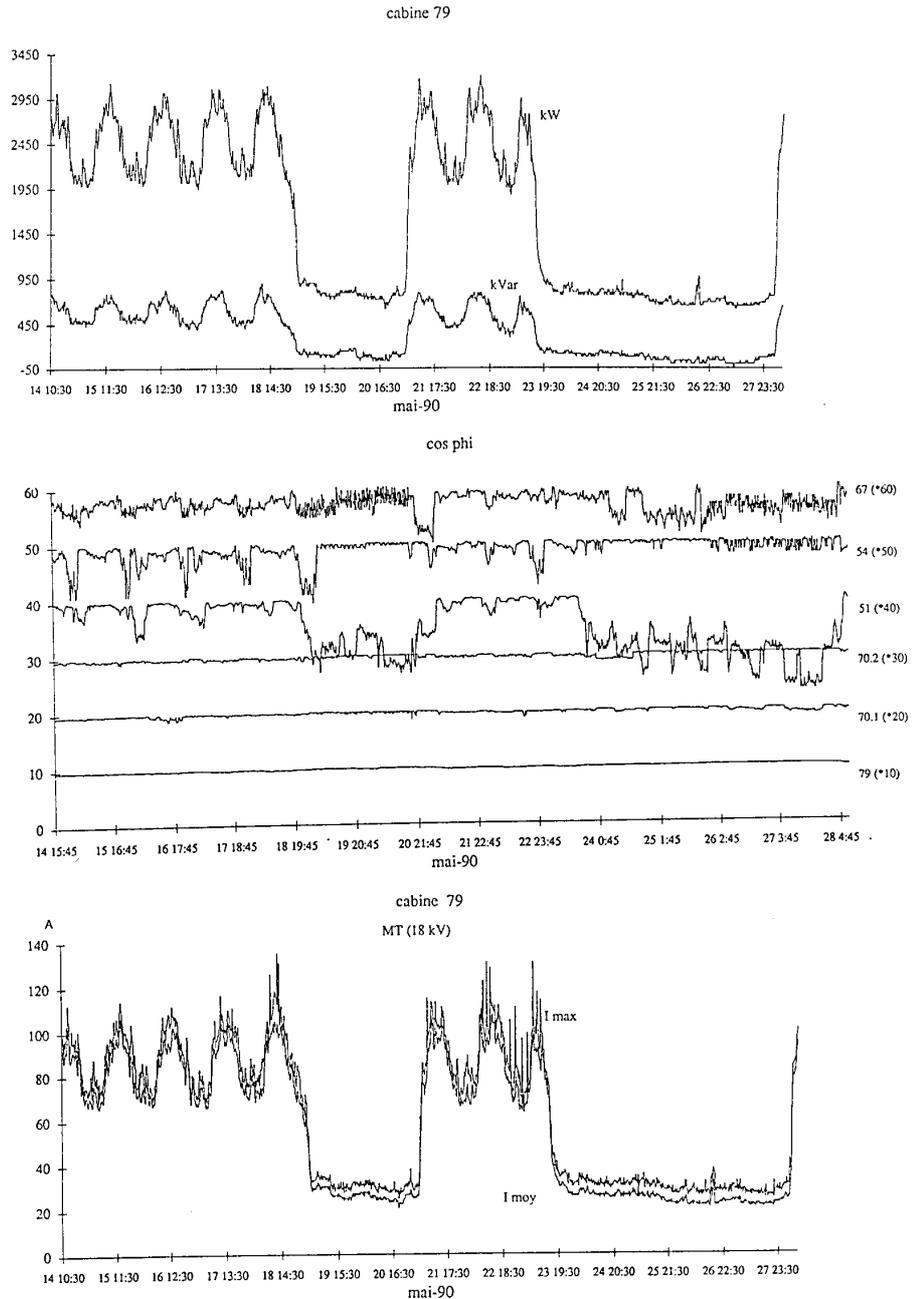
Les relevés des consommations ont été faites du 14 mai au 25 juin 1990. Ces relevés permettent d'établir une vision quasi exhaustive de la consommation des différents secteurs de l'entreprise. Le recoupement des données des 6 semaines a permis de reconstituer la consommation totale à mieux de 1,7% près et donc de pouvoir établir des distributions corrélées de tous les consommateurs d'énergie de l'entreprise.

L'alimentation de l'entreprise se fait en moyenne tension(MT) triphasée de 18kvolts.Cette "MTe" alimente 14 cabines de couplage qui transforment cette tension en basse tension(BT) triphasée de 230volts. Toutes les cabines de couplage possèdent des transformateurs du type ONAN à huile à l'exception d'une cabine récente qui est équipée de transformateurs du type AN sec. De plus 5 des 14 cabines sont équipées de 2 transformateurs. La puissance totale installée est de 9722kVA.

Toutes les cabines possèdent des batteries de condensateurs de compensation de $\cos(\phi)$ de 150 à 300 kvar par transformateur. Ces condensateurs s'enclenchent ou se déclenchent en fonction de la valeur du facteur de puissance $\cos(\phi)$ des consommateurs en aval. L'objectif est de tenir le $\cos(\phi)$ aussi voisin del que possible.

-Les relevés des puissances actives et réactives,des courants et des $\cos(\phi)$ sont les suivants:

cabine 79 (MT)



La figure 36 montre la part des différentes cabines de couplage durant 3 périodes de la semaine. L'énergie totale est mentionnée pour chaque période:

journée de 8h à 7h 27354 kWh
 soirée de 21 h à 5h 1820 kWh
 samedi de 0h à lundi 0h 38358 kWh

Il est à remarquer que les cabines 54 (cantine) et 67.1 (administration) consomment beaucoup durant les week-end. Les mêmes résultats figurent aussi sur le tableau I. La consommation sur 24h pour le mercredi et le dimanche est également indiquée. La figure 37 représente la consommation journalière typique de l'ensemble de l'entreprise.

Les installations d'eau, de vapeur, de froid et d'air comprimé comptent pour environ 1/3 de la consommation totale.

Tableau I. Répartition de la consommation électrique

| CABINE | JOURNEE 8-17h kWh | % | SOIREE 21-5h kWh | % | WEEKEND 00-48h kWh | % |
|--------|-------------------------|--------|------------------------|--------|--------------------------|-------|
| 51 | 2467 | 9.52 | 1082 | 6.19 | 3391 | 8.37 |
| 70.1 | 3678 | 14.20 | 2363 | 13.53 | 3347 | 8.26 |
| 70.2 | 2583 | 9.97 | 2012 | 11.52 | 5096 | 12.57 |
| 200 | 1094 | 4.11 | 929 | 5.20 | 980 | 2.74 |
| 210 | 1436 | 5.39 | 1277 | 7.15 | 1774 | 4.96 |
| 220 | 524 | 1.78 | 258 | 1.34 | 1688 | 4.35 |
| 230 | 2045 | 6.92 | 1837 | 9.52 | 4637 | 11.96 |
| 172.1 | 2291 | 8.60 | 1215 | 6.80 | 4043 | 11.30 |
| 172.2 | 1214 | 4.56 | 1282 | 7.18 | 2282 | 6.38 |
| 175 | 3103 | 10.51 | 2519 | 13.06 | 1157 | 2.98 |
| 300 | 2351 | 7.96 | 1886 | 9.78 | 4720 | 12.17 |
| 54 | 1900 | 7.33 | 376 | 2.15 | 1359 | 3.35 |
| 67.1 | 2537 | 9.80 | 971 | 5.56 | 3581 | 8.83 |
| 67.2 | 298 | 1.12 | 258 | 1.44 | 226 | 0.63 |
| TOTAL | 27517 | 101.76 | 18262 | 100.44 | 38280 | 98.87 |

| CABINE | Mercredi 00-24h kWh | % | Dimanche 00-24h kWh | % |
|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| 51 | 4568 | 7.35 | 1639 | 8.95 |
| 70.1 | 8620 | 13.88 | 1415 | 7.73 |
| 70.2 | 6327 | 10.18 | 2365 | 12.91 |
| 200 | 2754 | 4.43 | 407 | 2.22 |
| 210 | 3682 | 5.93 | 1179 | 6.44 |
| 220 | 1032 | 1.66 | 591 | 3.23 |
| 230 | 5179 | 8.34 | 2160 | 11.79 |
| 172.1 | 4569 | 7.35 | 1882 | 10.27 |
| 172.2 | 3530 | 5.68 | 1046 | 5.71 |
| 175 | 7695 | 12.39 | 1180 | 6.44 |
| 300 | 5721 | 9.21 | 2239 | 12.22 |
| 54 | 2978 | 4.79 | 589 | 3.27 |
| 67.1 | 4709 | 7.58 | 1566 | 8.55 |
| 67.2 | 761 | 1.22 | 48 | 0.26 |
| TOTAL | 62123 | 100.00 | 18315 | 100.00 |

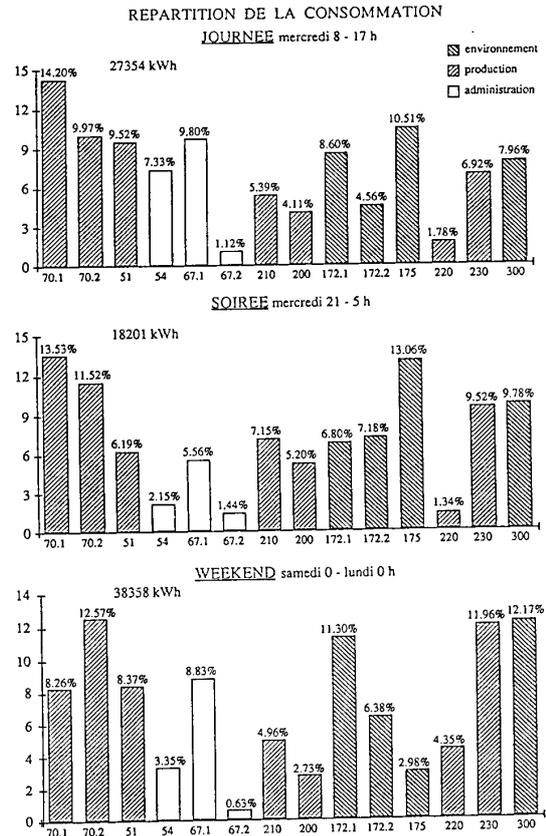


Fig. 36

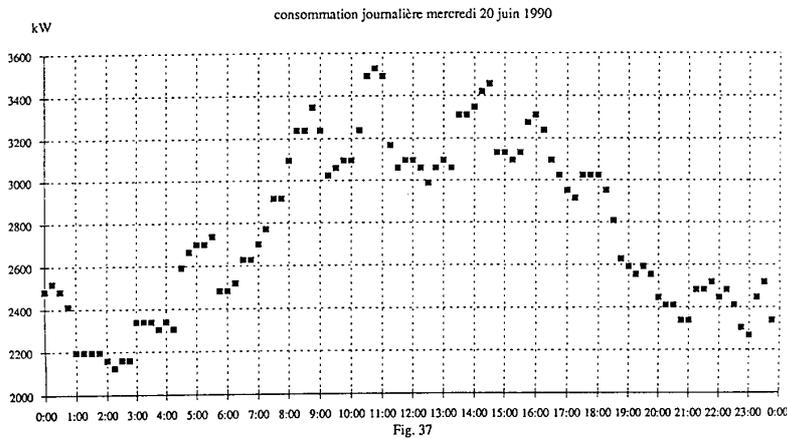


Fig. 37

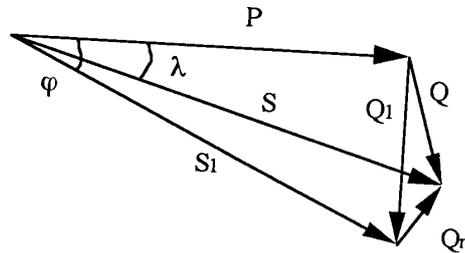
1. Dans les systèmes de transport d'énergie électrique triphasée on a les relations suivantes:

Puissance active P en W (watt)

Puissance réactive fondamentale Q₁ en var (volt ampère réactif)

Puissance réactive harmonique Q_n en var

Puissance apparente S, S_i en VA (volt ampère)



$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \quad P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$$

$$S = \sqrt{S_1^2 + Q_n^2} \quad Q_1 = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi$$

$$Q = \sqrt{Q_1^2 + Q_n^2} \quad Q_n = \sqrt{U^2 \cdot (I_2^2 + I_3^2 + \dots)}$$

où U est la valeur efficace de la tension simple d'une phase, I_i la valeur efficace du courant dans le conducteur de phase i et φ l'avance de phase de la tension U sur le courant I_i.

Pour des questions tarifaires on utilise la notion d'énergie réactive définie par la relation

$$W_q = \int_{t_1}^{t_2} Q \, dt \text{ en varh (var * heure). L'énergie active est définie comme } W = \int_{t_1}^{t_2} P \, dt \text{ en Wh}$$

(wattheure) et l'on introduit ainsi le facteur de puissance: $\cos \phi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + W_q^2}}$.

Il faut exploiter une ligne ou un réseau de distribution en maintenant constantes les tensions efficaces à tous les noeuds. Toutes les machines asynchrones, e.g. moteur, 2200 dans l'entreprise considéré, sont consommateurs de puissance réactive. Cela est aussi une des principales causes des chutes de tension dans un réseau. De plus, le comportement d'un moteur asynchrone varie en fonction de son régime et de sa charge.

2. La tarification de la MT (1 8kV) des SIG comprend une prime mensuelle de puissance qui s'élève à 5 Frs par kW de la puissance maximale enregistrée en heures pleines (période d'intégration de 15 minutes). Lorsque le facteur de puissance moyen est supérieur à 0,85, les montants correspondant à la prime de puissance et à l'énergie consommée sont réduits de 1/2% par centième d'écart entre le cos(φ) moyen et la valeur de 0,85. A juste titre cette tarification incite les utilisateurs à couper leurs pointes de puissance et à améliorer le rendement de leur propre réseau. A fin 1990 le prix de l'énergie électrique consommée en heures pleines (6-22h) est de 1,8ct/kWh et le prix en heures creuses (22h à 6h) est de 7ct/kWh.

Analyse des mesures

Pour chaque transformateur des cabines de couplage, les courbes montrent l'évolution dans le temps des grandeurs mesurées : puissance active et réactive, courant maximal et moyen d'une phase et le $\cos(\phi)$. Chaque courbe est faite d'environ 1300 valeurs, d'où la possibilité de discerner des phénomènes relativement rapides et singuliers qui apparaissent dans chaque secteur du réseau de l'entreprise.

1. Les puissances actives

Les figures de la page 3 montrent les courbes de la charge totale, mesurée à l'entrée de la cabine MT

79. Les valeurs moyennes significatives de la charge sont:

| | |
|-------------------------------|--------|
| moyenne de la semaine | 2696kW |
| journée de 8h à 17h | 3192kW |
| soirée de 21h à 5h | 2338kW |
| week-end samedi 0h à lundi 0h | 0674kW |

et la puissance maximale de pointe est de 3528kW

En 1991 la puissance maximale de pointe a augmentée à 41 76kW

7 transformateurs sur 15 montrent des pointes aiguës et certains (voir figures) une consommation assez erratique.

2. Les puissances réactives

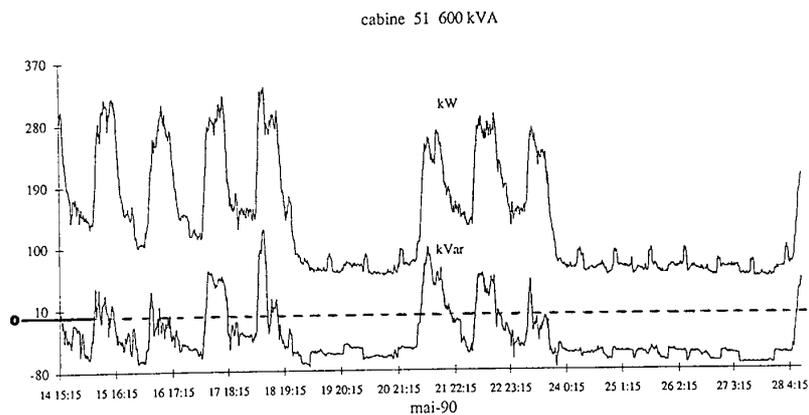
Il est à remarquer que certaines cabines ont des valeurs négatives, elles sont donc productrices d'énergie réactive (condensateurs).

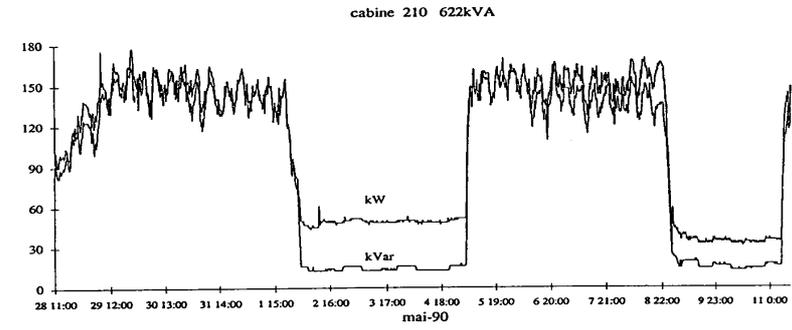
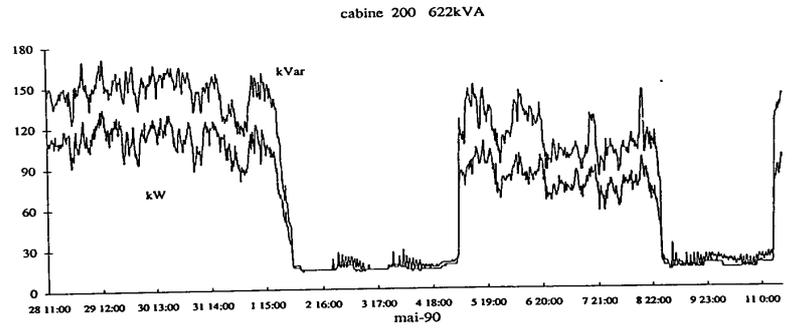
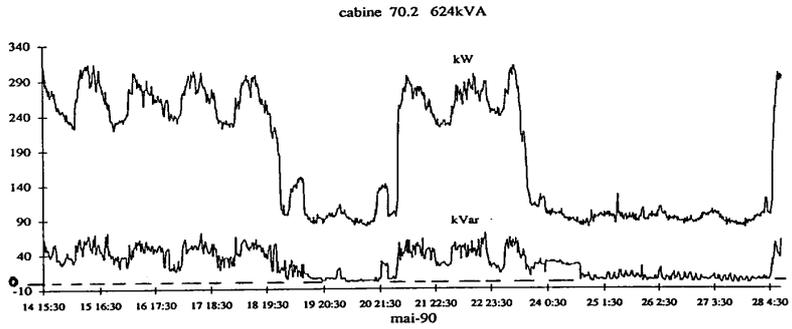
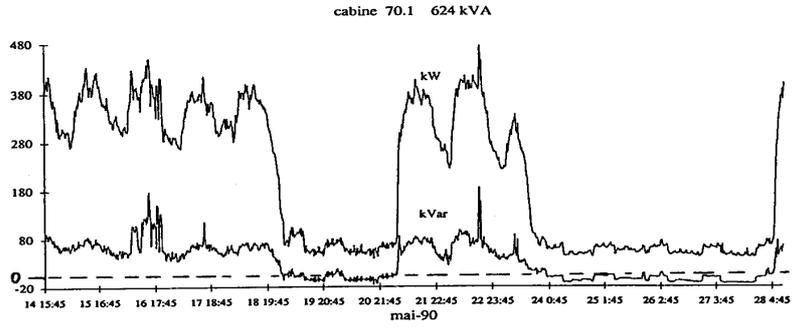
La cabine 51 est plutôt négative.

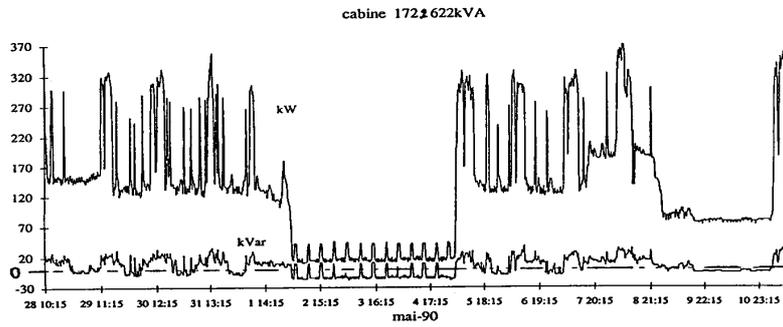
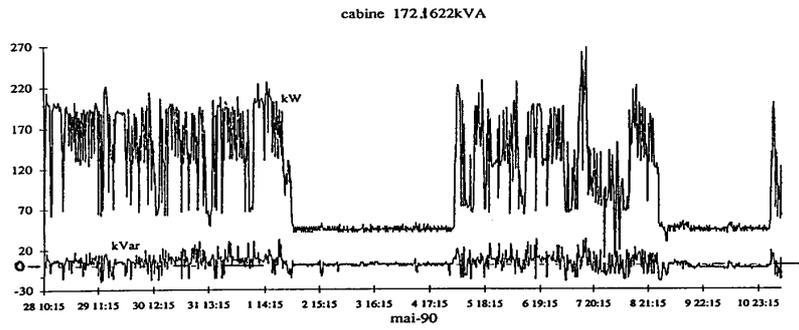
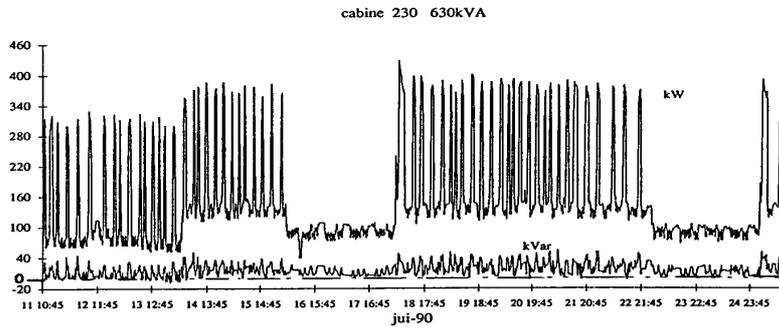
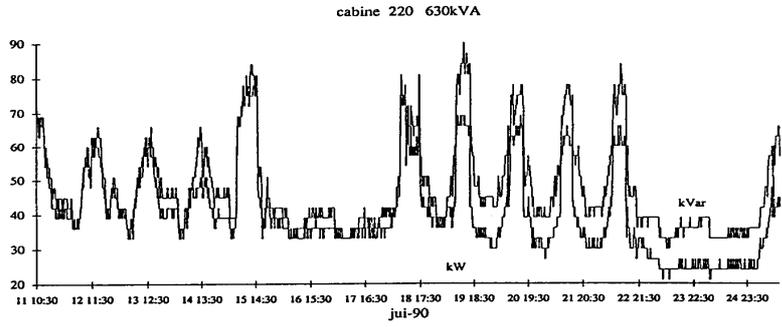
La cabine 210 ne compense pas bien.

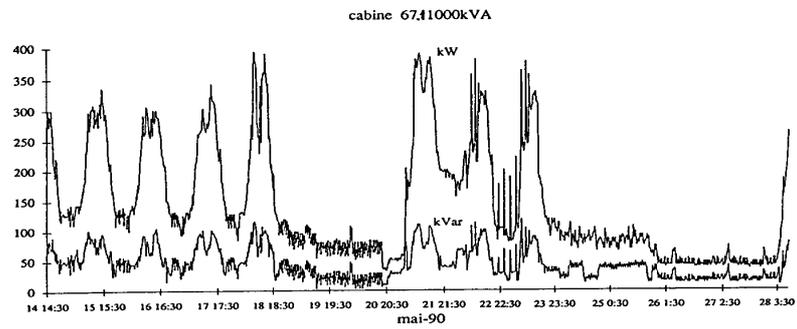
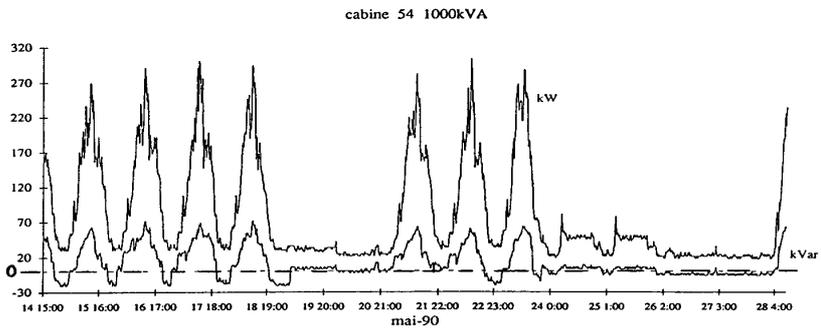
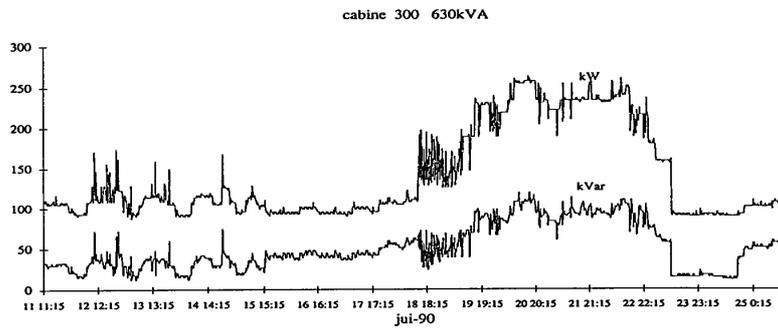
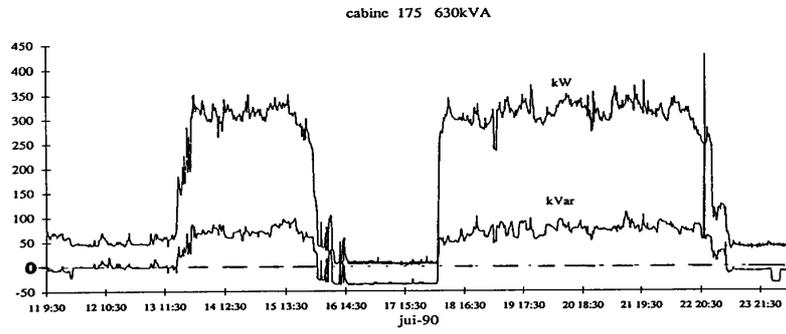
Les cabines 200 et 220 sont réactives (kvar kW).

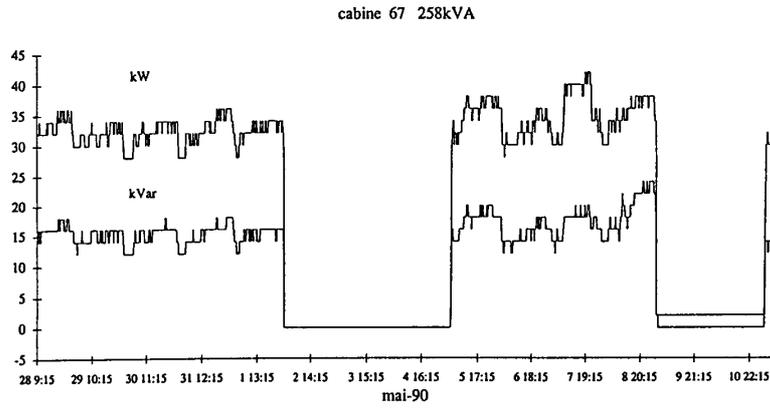
CABINES











A titre d'exemple, un réglage de la compensation de la cabine 300 permet de réduire la puissance réactive transportée et ainsi augmenter le $\cos(\phi)$. La figure 44 montre le résultat d'un tel exercice. Ceci pourrait être appliqué à toutes les batteries de condensateurs de compensation des autres cabines.

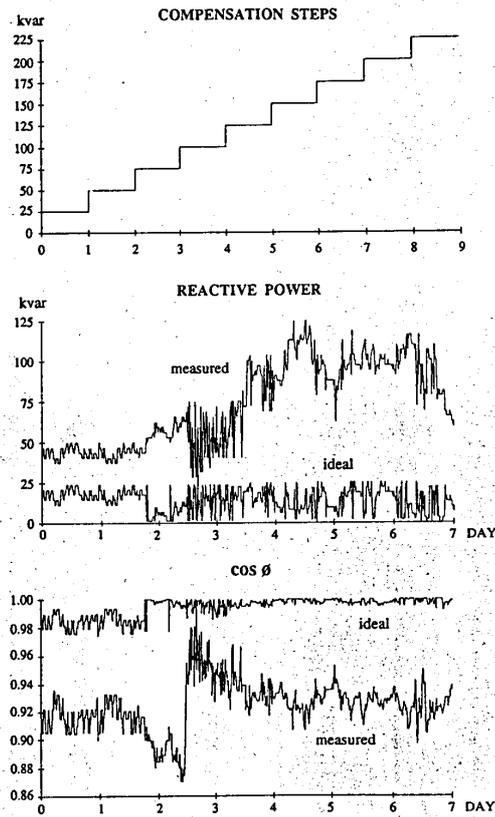


Fig. 44

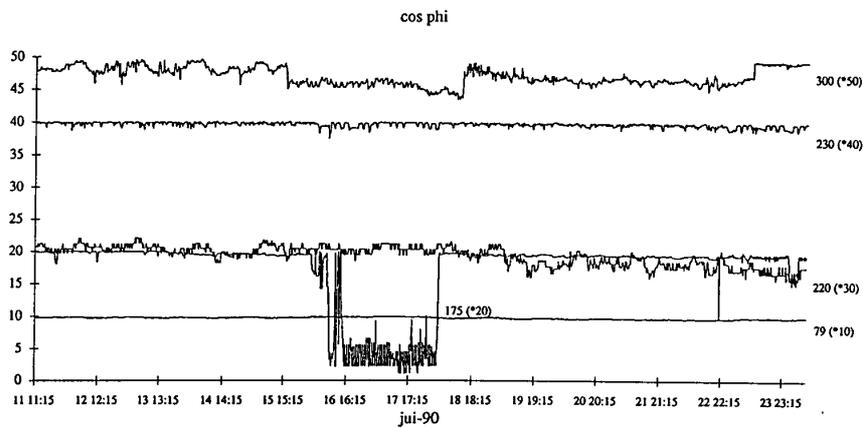
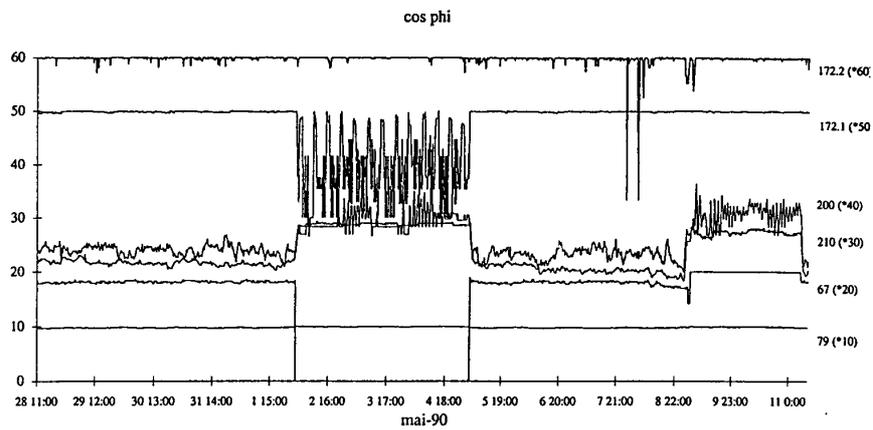
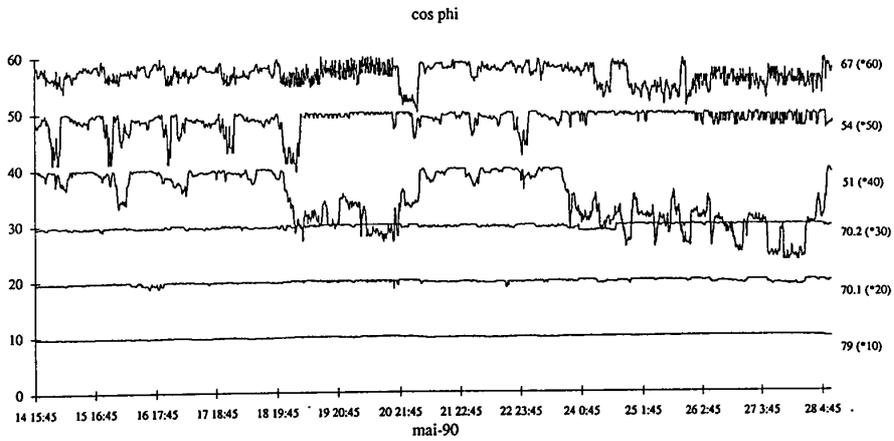
3. Le cos (phi)

1 1

La valeur moyenne du cos(phi) à l'entrée de l'entreprise est de 0,981.

Les figures ci-dessous montrent les courbes de chaque cabine de couplage. La courbe de la cabine 79(MT) figure pour chaque période de mesures.

Les batteries de condensateurs des cabines 70.1, 70.2, 172.2, 172.1 (excepté 3 jours), 175 (excepté 2 jours) et 230 compensent correctement.

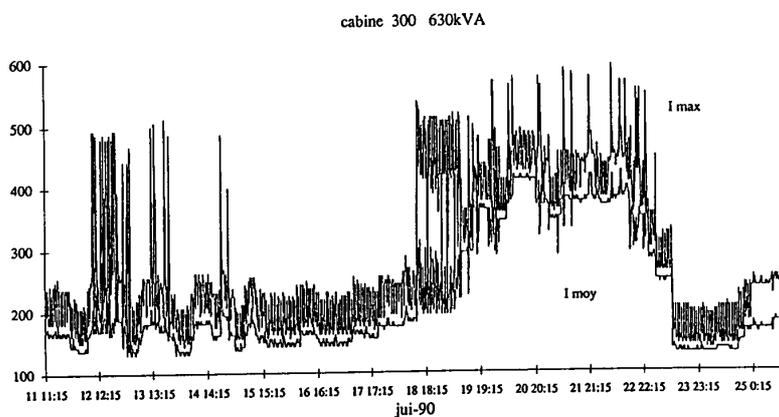
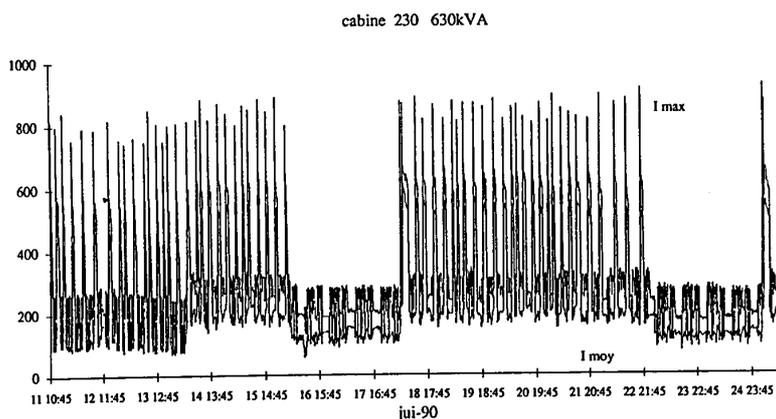
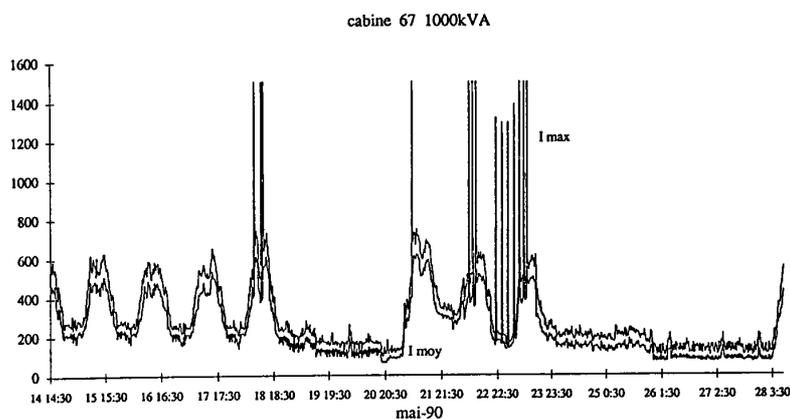


Seuls les courants d'une phase (BT) sont représentés sur les figures ci-dessous. Les courants maxima et moyens permettent de déceler la présence de consommateurs aberrants ou irréguliers

qui chargent le réseau.

A noter par exemple la cabine 67 (1000kVA) avec des pointes de courant dépassant 1 500A , valeur maximale de l'échelle de mesure.

Des enregistrements ultérieurs ont montré que ces pointes sont de l'ordre de 2300A et sont dues au démarrage direct de l'UNITURBO utilisé pour la climatisation. Cette cabine qui représente environ 1 0% de la charge totale a malgré tout une contribution considérable à la pointe de courant (MT).



Interprétation

Il est fort probable que les pointes de courants dues aux démarrages des gros moteurs perturbent le réseau. Ce réseau alimente aussi des appareils de contrôle et l'ensemble de l'informatique. Ces équipements exigent des tolérances de perturbations relativement faibles. Une analyse harmonique du réseau permettrait de mieux appréhender cette situation.

La courbe de charge totale (cabine 79) reflète les pointes dont la plus haute détermine le coût de la prime mensuelle. Aujourd'hui, celle-ci s'est réduite de quelque Frs 15 000.- d'un total de Frs 200 000.- grâce au $\cos(\phi)$ moyen qui est de 0,981. Une amélioration est encore possible.

La répartition de la consommation indique quelle est la charge de chaque cabine ou secteur durant la semaine.

Un point important concernant le réseau est sa fiabilité. Le tableau 2 (page suivante) représente un relevé des coupures et des microcoupures depuis 1986.

Le réseau de secours choisi par l'entreprise comprend un groupe électrogène de 560kVA. Ce groupe assure principalement l'alimentation d'unités pour le refroidissement des réacteurs chimiques et la prévention de la pollution en cas de panne du réseau principal. La mise en parallèle de ce groupe sur le réseau des SIG requiert une autorisation spéciale. Ainsi son utilisation pour écrêter la pointe de charge dépassant les 3500kW, peu avant la demi-journée, est limitée.

Conclusions

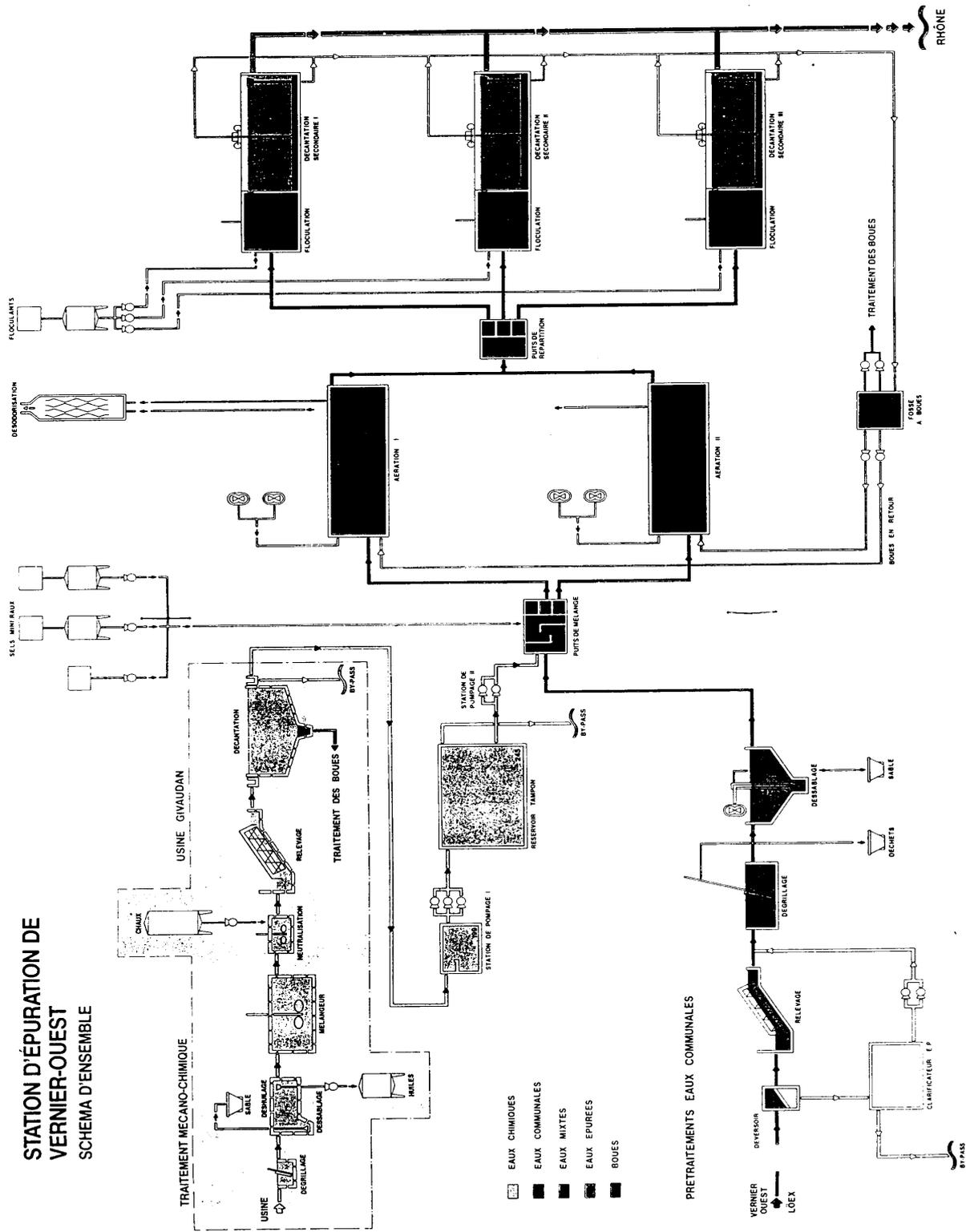
Les mesures d'intensités et de puissances enregistrées pendant les 6 semaines ont permis d'obtenir le profil de la consommation électrique de l'entreprise. Les points suivants ont conduit à des examens plus détaillés.

1. Les courbes de la cabine 300 nous ont incité à approfondir les connaissances d'un secteur relativement irrégulier, la STEP (station d'épuration).
2. La puissance de l'UNITURBO pour la climatisation de l'administration est de 225kW et il fonctionne environ 1 000h/an. En été 1991 des mesures de consommation ont confirmé cette moyenne de fonctionnement et ont montré de plus que 16% du temps de marche était en heures creuses (22h à 5h) alors que le bâtiment est inoccupé. La puissance installée est beaucoup trop grande et par conséquent les démarrages sont très fréquents. Cette installation a été faite il y a 25 ans en tenant compte d'une réserve pour des besoins futurs.
3. Les surcharges de démarrage peuvent être limitées par un appareillage électronique ou un démarrage étoile-triangle. Le premier a démontré une réduction du courant de démarrage de l'ordre de 2,5 fois, soit un courant de 920A au lieu de 2300A. La seconde solution coûterait dans ce cas environ 3 à 4 fois moins cher avec presque les mêmes résultats.
3. La courbe de la cabine 230 indique des démarrages fréquents. Il s'agit de la production d'air comprimé. Il s'agit de deux installations identiques comprenant un compresseur de 75kW produisant 576m³/h d'air à 9 bars.
4. Les différentes courbes de charge et le fait que les plus gros moteurs se trouvent aux installations d'eau, de vapeur, de froid et d'air comprimé qui comptent ensemble pour 1/3 de la consommation d'électricité, nous ont incité à regarder ces installations en détail (chapitre 4).
5. Pour évaluer l'importance des perturbations du réseau électrique il est recommandé de procéder à des analyses d'harmoniques et des régimes transitoires.
6. Un nouveau centre de production avec une puissance installée de 2000kVA est en cours de mise en service. Son exploitation future amènera les pointes de puissance à varier entre 4200 et 5600kW. Il serait possible d'atténuer les plus fortes charges en exploitant ces installations à pleine charge durant la nuit et à charge réduite la journée.
7. Seuls 150kVA installées de moteurs disposent d'un réglage continu de la vitesse. Cela paraît vraiment peu pour ce type d'installation. Une étude complémentaire serait probablement utile et apporterait des solutions intéressantes à la consommation en générale.

Tableau 2. Stabilité du réseau électrique

| Année | μcoupures x temps (sec) | coupures (min) | Observations |
|-------|-------------------------|----------------|------------------------------------|
| 1986 | Pas d'enregistrement | 45 | Orage |
| | " | 67 | Chantier autoroute |
| | " | < 1 | Orage |
| | " | < 1 | Réseau interne |
| | " | 7 | Réseau interne |
| | " | 25 | Réseau interne |
| 1987 | " | 29 | Transfo Verbois |
| | " | < 1 | Orage |
| | " | < 1 | Accident chantier autoroute |
| 1988 | " | < 1 | Réseau S.I.G. (Dimanche) |
| | " | < 1 | Réseau S.I.G. |
| | " | < 1 | Réseau S.I.G. |
| 1989 | < 1 | | Réseau S.I.G. (Fausse manoeuvre) |
| | | 16 | Réseau S.I.G. |
| | | 95 | Réseau S.I.G. (Chantier autoroute) |
| | | 50 | Réseau S.I.G. |
| 1990 | 24 x 0 < t < 0.1 | | |
| | 13 x 0.11 < t < 0.2 | | |
| | 4 x 0.21 < t < 0.3 | | |
| | 2 x 0.31 < t < 0.4 | | |
| | 2 x 0.81 < t < 0.9 | | |
| | 81 x 0 < t < 0.6 | | |
| | 1 x 0.87 | | |
| 1991 | 1 | 51 | Panne générale usine |
| | 42 x t < 0.2 | | |
| | 1 x 0.2 < t < 1 | | |

**STATION D'ÉPURATION DE
VERNIER-OUEST
SCHEMA D'ENSEMBLE**



L'entreprise dispose depuis 10 ans d'une station d'épuration biologique d'une capacité correspondant aux besoins d'une population de 50 000 habitants. Elle a été conçue pour traiter les eaux industrielles prétraitées (par neutralisation des eaux acides, par déshuilage et par dessablage), mélangées avec les eaux usées provenant de deux communes genevoises situées des deux côtés du Rhône.

Le schéma de principe de l'ensemble des installations est représenté à la page 15.

L'impact de la STEP sur la consommation électrique de l'entreprise est important. En 1990 environ 8,5% de la consommation électrique provenait de ce secteur. Le fonctionnement de la STEP est assuré sans interruption cela en conformité avec la législation en vigueur.

Des spécialistes de l'entreprise nous ont orienté sur les différents modes d'exploitation et les améliorations techniques planifiées. En 1990-1991, la forte charge polluante en DBOS (demande biologique en oxygène sur 5 jours) a influencé défavorablement la consommation électrique ainsi que le fonctionnement des moteurs. En mars 1992, suite à différentes améliorations techniques du prétraitement des eaux chimiques et des procédés de fabrication il a été possible de régulariser le traitement biologique dans la STEP. Les économies de la consommation d'électricité qui en ont résulté sont non négligeables.

Très irrégulière, la courbe de charge de la STEP (fig. 31) nous a incité à l'investigation.

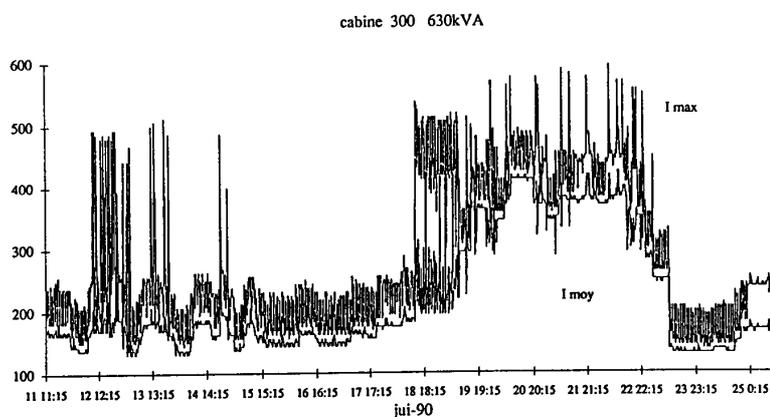


Fig. 31

Nous avons d'abord établi un bilan détaillé des consommateurs se référant aux tableaux 3 et 4 des pages 17, 18, 19 et 20.

STATION D'EPURATION - bilan force

| processus | nom | marque / type | quantité | capacité kW | pourcentage | cos Ø | fonction et caractéristique | mode | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------|----------------|-------------|--------|---|-----------------|--------------|---|---|
| | | | | | | | | Journée | Nuit Weekend | | |
| Prétraitement | Vis de relevage | ETR | 1 | 6/4 | 1.30/1.16 | .91/85 | eaux communales charge très variable | x | x | x | |
| | | M 160 MR4/4 | | | | | | | | | |
| | | | 1 | 0.25 | .05/07 | 0.70 | graissage pour vis de relevage | x | x | x | |
| | Dégrilleur | AEG | 1 | 1.1 | .24/32 | 0.80 | filtre les gros objets d'eaux communales, automatique | séquentiel | x | x | |
| | Déssableur | | 1 | 0.35 | .08/1 | - | extrait gravier et sable | x | x | x | |
| Suppresseur m3/h pour déssablage | RKR+BBC | 1 | 4 | .86/1.16 | 0.83 | | 2 x 10min/j | x | x | x | |
| | QU 112 N4 AAT | | | | | | | | | | |
| Préleveur d'échantillons d'eau | | 1 | 0.55 | .12/16 | 0.70 | | 3min/h | x | x | x | |
| Traitement chimique | Amonium (urée) | Bauknecht PF 2.2/4 -75 | 1 | 2.2 | .48/64 | 0.83 | dosage en poudre, cuve de 5m3 | séquentiel 50% | x | x | x |
| | | Siemens 1 LAS083-6AA99-Z | 1 | 0.37 | .08/11 | .76/79 | pompe doseuse | 1/4h | x | x | x |
| | Floculants (sulfate d'aluminium) | PF 2.2/4 -75 | 1 | 2.2 | .48/64 | 0.83 | dosage en poudre, cuve de 5m3 | séquentiel 50% | x | x | x |
| | | Bauknecht RFD 55/4-7 | 3 | 3 x 0.55 | .36/48 | 0.78 | pompe doseuse | au besoin (50%) | x | x | x |
| | Phosphate | PF 2.2/4 -75 | 1 | 2.2 | .48/64 | 0.83 | dosage en poudre, cuve de 5m3 plus utilisé depuis 01.01.91 | séquentiel | x | x | x |

| | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---|---------------|-------------|---------|--|---------------------------|-------|---|
| | Siemens 1 LA5083-6AA99-Z | 1 | 0.37 | .08/.11 | .76/.79 | pompe doseuse plus utilisé depuis 01.01.91 | 1/4h x x x | x | x |
| Dosage homéopathique dilution 30 CH | | 3 | 3 x 0.55 | .36/.48 | .72/.74 | | séquentiel 1/4h / 1.5h | | |
| | | 1 | 0.12 | .03/.03 | 0.62 | | x x x | | |
| Traitement biologique | | | | | | | | | |
| Soufflantes à 2 vitesses | BBC QUXY 280 M6-4 CG | 4 | 4x80/54 | 69.14/62.66 | .90/.88 | aération des 2 bassins en fonction de la charge polluante (DBO) | x x x | x | x |
| Ventilateurs | STÄFA VENTILATOR AG AXV 10.24-50.8 | 2 | 2 x 0.5 | .22/.29 | | salle des soufflantes sur thermostat 30 C, 1 en hiver, 2 en été | x x x | x | x |
| Floculateur entre bassins d'aération et décanteurs | | 3 | 3x0.75 | .49/.65 | | hélice de 2.5m | x x x | x | x |
| Traitement des boues | | | | | | | | | |
| Floculants pour décanteurs | STEPHAN-WERKE-HAMELN FD 71 N 13-4 | 3 | 3 x 0.37 | .24/.32 | 0.74 | plus utilisé depuis 01.01.91 | | | |
| Floculants de flottation | Siemens 1 LA5083-6AA99-Z | | 0.37 | .08/.11 | .76/.79 | plus utilisé cause centrifugeuse depuis jui.90 | | | |
| Décanteurs | BBC QU 132 M4 AAT | 6 | 6 x 0.37 | .48/.64 | | 3 ponts | x x x | x | x |
| enrouleur de câble | | 3 | 3x0.39 / 0.36 | .25/.31 | 0.69 | durée de vie des roulements = 6mois | x x x | x | x |
| | ETR | 3 | 3 x 0.25 | .16/.22 | 0.56 | rateau au milieu du décanteur | 30s/10min | | |
| Boues recyclées | BBC VQUXY 160 M6-4 AD | 2 | 2 x 9 / 3 | 3.89/1.74 | .7/.8 | 1h marche 1h arrêt | 50% | x x x | x |
| Boues en excès | Bauknecht | 1 | 7.5 | 1.62/2.18 | 0.85 | pour centrifugeuse, 12h/j | x x x | x | x |
| | ERFY 4/4-75 | 1 | 3.6 | .78/1.04 | 0.80 | excès | 10h/mois | | |
| Centrifugeuse | D4LP 30HB SB | 1 | 30 | 6.48/8.7 | 0.86 | boues denses pour décharge, 12h/j | x x x | x | x |
| | | 1 | 2.2 | .48/.64 | 0.9/79 | 12h/j | x x x | x | x |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----|--------------|-----------|------|--|-------------------------|---|---|
| | | | 1 | 0.75 | .16/22 | 0.76 | 12h/j | x | x | x |
| Désodorisation | Ventilateurs | QU 132 S2 CZ | 4 | 4 x 7.5 | 6.48/8.7 | 0.89 | pilotés électriquement en fonction des soufflantes | x | x | x |
| | Laveur chimie I | VANTON PUMPEN AG SGH-PY-1200 6.2 | 2 | 2 x 1.5 | .65/87 | 0.78 | Polyprop Vanton 25 m3/h | x | x | x |
| | Laveur chimie II idem I | VANTON PUMPEN AG SGH-PY-1200 6.2 | 2 | 2 x 1.5 | .65/87 | 0.78 | Polyprop Vanton 25 m3/h | x | x | x |
| Neutralisation | Dosage base | RF 00.06/4-71 | 2 | 2 x 0.06 | .03/03 | 0.64 | | séquentiel 5min/2h x | x | x |
| | Dosage acide | RF 00.06/4-71 | 2 | 2 x 6 | 2.59/3.48 | 0.64 | | séquentiel 5min/2h x | x | x |
| | Evacuation liquide neutralisé | Bauknecht RO.75/4-7 | 1 | 0.75 | .16/22 | 0.80 | retour au pied de vis | x | x | x |
| Total | | | 62 | 462.8/344.21 | 100/100 | | | 1/2h : 2h (25%) | | |

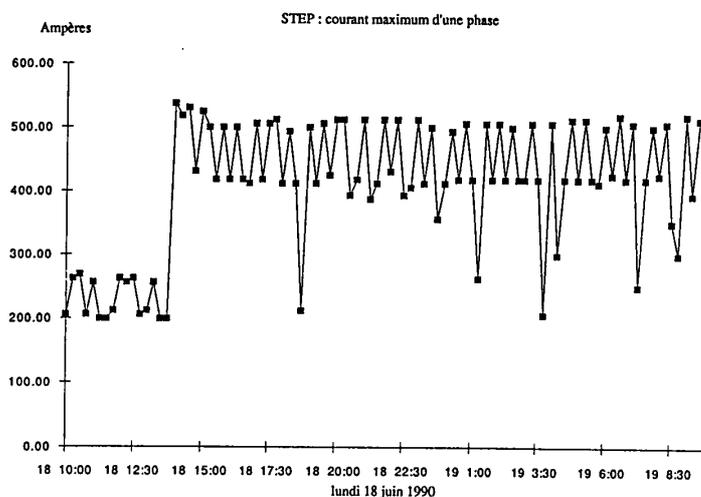
| STEP biologique - force (1990) | | puissance kW | nombre | utilisation | consommation kWh | possibilité d'amélioration | % d'économie | économie kWh | coût c/kWh |
|--------------------------------|--------------|-----------------|---|-------------|---------------------|-------------------------------|--------------|-----------------|---------------|
| | | | | | | | | | |
| Vis de relevage | 6 / 4 | 1 | eaux communales, charge variable | | | | | | |
| | 0.25 | 1 | graisage vis | | | | | | |
| Dégrilleur | 1.1 | 1 | d'eaux communales, automatique | | | | | | |
| Déssableur | 0.35 | 1 | extraction gravier et sable | | | | | | |
| Surpresseur | 4 | 1 | pour déssablage | | | | | | |
| Préleveur échantillons H2O | 0.55 | 1 | | | | | | | |
| Amonium (urée) | 2.2 | 1 | dosage en poudre, cuve de 5m3 | | | | | | |
| | 0.37 | 1 | pompe doseuse | | | | | | |
| Floculants (sulfate d'Al) | 2.2 | 1 | dosage en poudre, cuve de 5m3 | | | | | | |
| | 0.55 | 3 | pompe doseuse | | | | | | |
| Phosphate | 2.2 | 1 | dosage en poudre, cuve de 5m3 | | | | | | |
| | | | plus utilisé depuis 01.01.91 | | | | | | |
| | 0.37 | 1 | pompe doseuse, désaffectée dès 01.01.91 | | | | | | |
| Dosage homéopathique | 0.55 | 3 | | | | | | | |
| dilution 30 CH | 0.12 | 1 | | | | | | | |
| Soufflantes à 2 vitesses | 80/54 | 4 | aération des 2 bassins, 1 sonde d'O2/bassin | | 1477404 | mode manuel | 40 | 590962 | 0 |
| Ventilateurs | 0.5 | 2 | salle des soufflantes sur thermostat | | | | | | |
| | | | 30 C, 1 en hiver, 2 en été | | | | | | |
| Floculateur entre bassins | 0.75 | 3 | hélice de 2.5m | | | | | | |
| d'aération et décanteurs | | | | | | | | | |
| Floculants pour décanteurs | 0.37 | 3 | désaffectée dès 01.01.91 | | | | | | |
| Floculants de flottation | 0.37 | | désaffectée dès jui 90 cause centrifuge | | | | | | |
| Décanteurs | 0.37 | 6 | 3 ponts | | | | | | |
| | 0.39 / 0.36 | 3 | durée de vie des roulements = 6mois | | | | | | |
| enrouleur de câble | | | | | | | | | |
| | 0.25 | 3 | râteau au milieu du décanteur | | | | | | |
| Boues recyclées | 10 | 2 | 1h marche 1h arrêt | | | | | | |
| Boues en excès | 7.5 | 1 | pour centrifugeuse, 12h/j | | | | | | |
| | 3.6 | 1 | excès | | | | | | |
| Centrifuge | 30 | 1 | boues denses pour décharge, 12h/j | | | | | | |
| | 2.2 | 1 | 12h/j | | | | | | |
| | 0.75 | 1 | 12h/j | | | | | | |
| Ventilateurs | 7.5 | 4 | fonctionnement avec soufflantes | | | | | | |
| Laveur chimie I | 1.5 | 2 | Polyprop Vantou 25 m3/h | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Laveur chimie II | 1.5 | 2 | Polyprop Vantou 25 m3/h, idem I | | | | | | |
| Dosage base | 0.06 | 2 | | | | | | | |
| Dosage acide | 6 | 2 | | | | | | | |
| Evacuation liquide neutralisé | 0.75 | 1 | retour au pied de vis | | | | | | |
| Total | 462.8/344.21 | 62 | | | 1641560 | | 36.0 | 590962 | |
| | | | consommation soufflantes=90% * consommation totale, rendement moteur = 92%, rendement compresseur = 69% | | | | | | |
| | | | rendement soufflante =64% | | | | | | |

Tableau 4

De part son mode d'exploitation, la STEP est un consommateur d'électricité en continu. Ses consommateurs les plus importants sont les soufflantes 4x80kW, qui fournissent l'apport en oxygène (air) aux boues biologiques dans deux bassins aérateurs. Il est important d'assurer la demande en O₂ qui est une fonction de la charge polluante, de l'épaississement et du recyclage des boues. L'étude de cet apport en oxygène, ainsi que les courbes de charge ponctuelles et sur de longues périodes, nous ont permis de tester différents modes d'exploitation des soufflantes.

-L'aération consiste à fournir de l'air aux boues activées dans les deux bassins de 1500 m³ chacun. Le principe est de maintenir une concentration élevée en bactéries aérobies qui se nourrissent de la matière organique présente dans l'eau à épurer. Deux soufflantes alimentent chaque bassin. Chaque soufflante est entraînée par un moteur à 2 vitesses d'une puissance de 54kW et 80kW. La puissance des 4 moteurs représentent entre 63% et 69% de la puissance totale de la STEP. Ces moteurs représentent aussi le 86% de la consommation électrique totale de la STEP. Leur consommation hebdomadaire 7x24h est de 30300kWh à fin octobre 1990 et de 25700kWh la première semaine de mars 1991. Ceci en conformité avec les remarques précédentes.

Jusqu'en 1990 une sonde d'oxygène pilotait les moteurs en mode automatique. Le résultat a été des démarrages très fréquents. Voir la figure ci-dessous :



En 1991 nous avons recommandé une exploitation en mode manuel. Elle consistait à tourner en petite vitesse en fin de semaine quand la charge polluante est faible, en petite et en grande vitesse en début de semaine quand la charge est moyenne et en grande vitesse le reste de la semaine lorsque la charge polluante est grande. Cette proposition a été mise à l'essai avec les résultats suivants:

- une diminution marquée des démarrages des 4 moteurs
- un réseau électrique moins perturbé
- une baisse des pertes des moteurs (les pertes des moteurs pour petite et grande vitesses sont respectivement de 2,1 kW et 3,8kW)
- des besoins d'entretien moins fréquents

Dans un bassin, suite à un calcul d'aération et à titre d'essai les diffuseurs ont été remplacés par des neufs et leur nombre réduit de moitié. La consommation électrique a baissée de 48%. Dans l'autre bassin, sans changement, la consommation a augmentée de 8% parce que les diffuseurs d'air s'encrassent et il en est résulté un colmatage qui à fait baisser le rendement d'oxygénation. En janvier 1992, la vidange des 2 bassins a montré que la quasi totalité des diffuseurs de chaque bassin était en bon état mécanique. Le nombre de diffuseurs dans le deuxième bassin, a été réduit de moitié pour avoir la même configuration qu'au 1 er bassin.

-L'épaississement et le recyclage des boues sont primordiaux au bon fonctionnement d'une STEP. Lorsqu'une surcharge de l'installation intervient elle est un facteur limitatif des deux fonctions parce que les débit sont trop grands.

Des mesures de démarrage d'un des 4 moteurs ont été effectuées en mai 1991. La tension et le courant d'une phase ont été enregistrées chaque milliseconde pendant 20 à 25 secondes. La figure 40 montre l'évolution du courant lors d'un démarrage à grande vitesse. Le passage étoile -triangle se fait après 5,5 secondes. La figure 41 présente un démarrage à petite vitesse. Pour un bon démarrage étoile-triangle la montée en vitesse du moteur doit se poursuivre jusqu'à ce que la valeur du courant de commutation étoile-triangle ne puisse dépasser celle du courant d'enclenchement en étoile.

Les figures 42 et 43 montrent les valeurs mesurées des puissances. Les pointes de puissance durant le démarrage provoquent des perturbation sur le réseau et elles devraient être limitées autant que peut se faire.

L'analyse du système d'aération de la STEP a montré que le rendement d'une soufflante est de 64% (moteur 92% et ven-

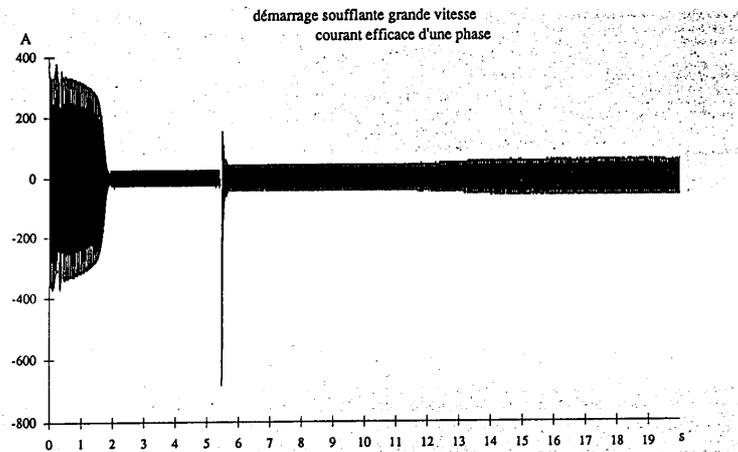


Fig.40

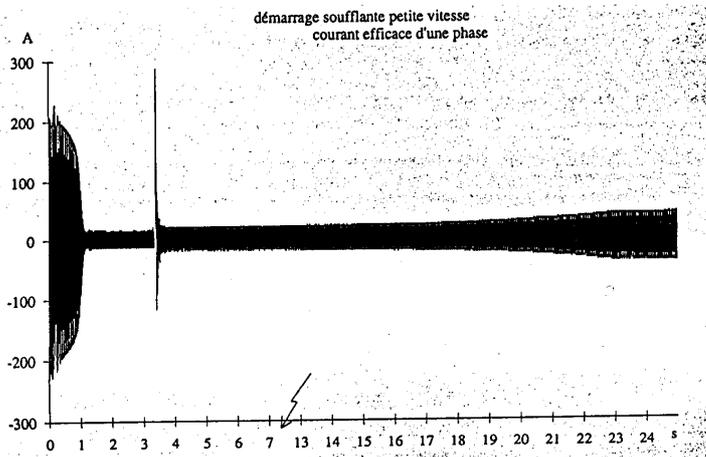


Fig.41

tilateur & 69%).

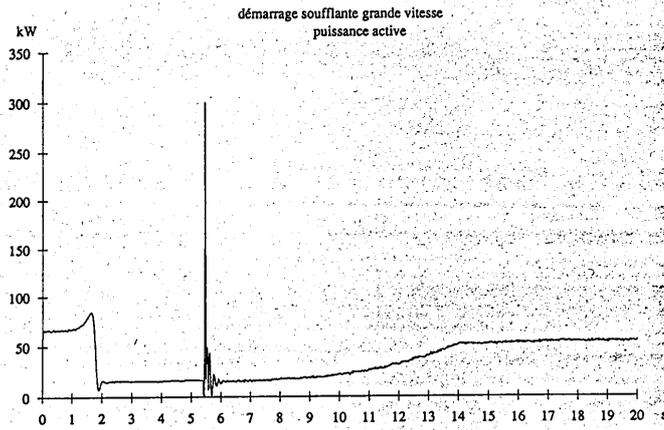


Fig. 42

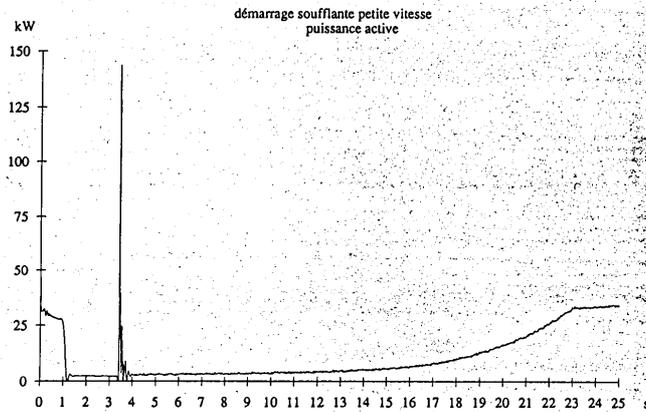


Fig. 43

Interprétation

Il est probablement moins coûteux d'adopter le mode d'exploitation manuel pour la commande des moteurs. Etant donnée la quantité de la charge polluante il est nécessaire de faire cette opération que 3 à 4 fois par semaine. (une horloge pourrait être réglée en conséquence et éviter l'intervention humaine).

Les autres consommateurs de la STEP sont par ordre d'importance; les ventilateurs pour la désodorisation et la centrifuge pour épaisir les boues avant leur expédition pour l'incinération. L'aération des bassins biologiques est de loin l'élément le plus important à améliorer dans une STEP. Nous avons également constaté à la suite d'un entretien des diffuseurs d'air que leur consommation avait diminuée de 70A à 65A en petite vitesse et de 117A à 105A en grande vitesse.

III. Un atelier de rectification comme unité de production

La rectification (rectification = purifier par distillation) permet de séparer les constituants d'un mélange par distillation fractionnée dans une colonne. Une vapeur ascendante abandonne au liquide qui retombe une partie des constituants. Le mélange doit être composé de substances de volatilités différentes. Le liquide qui retombe s'enrichit des constituants les moins volatils. La pression de vapeur d'un liquide monte avec l'augmentation de la température. Lorsque cette pression est égale à la pression atmosphérique l'ébullition a lieu et la température à cette pression détermine le point d'ébullition. Puisque ce dernier dépend de la pression, la température nécessaire à la distillation peut être réduite si l'on abaisse la pression à l'aide d'une pompe. Ceci permet de distiller des substances qui se fractionnent avant d'atteindre le point d'ébullition à pression normale (1 013 mbar).

Une colonne fractionne bien que pour autant qu'elle soit à l'équilibre. Cet équilibre est long à atteindre, de l'ordre de 0,5 à 1,5 h. Il faut éviter de détruire cet équilibre par des manoeuvres trop rapides du reflux, du vide et de la puissance de chauffage. Une charge de rectification dans ce type d'appareil dure environ 15 h.

Le pompage pour atteindre le vide de 1 mbar est délicat. Il arrive parfois que le produit chimique se fractionne spontanément et crée une modification du vide qu'il faut absorber rapidement. Ceci exige une pompe puissante et des trappes refroidies en permanence pour piéger les gaz. Cela stabilise ainsi tout le système et permet aussi d'éviter une pollution atmosphérique.

On distingue trois phases dans la réalisation du vide : phase de dégazage = mauvais vide, phase d'équilibrage = vide primaire et phase de rectification = bon vide. Les deux premières phases se font à l'aide de 2 pompes à anneau liquide de 3,6 et 1,85 kW. La 3^{ème} phase s'obtient à l'aide d'une pompe ROOTS de 3,6 kW. La pompe à vide qui dessert tout l'atelier est entraînée par un moteur de 33 kW. Associées sont également une pompe à anneau liquide de 5,5 kW et une pompe d'aspiration de 3,3 kW.

En plus de l'électricité, d'autres énergies et des produits sont utilisés dans cette unité de production, ce sont : la vapeur à 6,12 et 20 bars, l'eau environ 40 000 m³/mois, l'azote environ 1000 m³/mois et la saumure utilisée pour la création du vide de 1 mbar dans les appareils et l'air comprimé. Depuis leur stockage les différents produits sont chargés à l'aide de 6 pompes de 4 kW entraînées par des moteurs de 7,5 kW. (en principe 5,5 kW devrait suffire)

L'ensemble de l'unité de production comprend 8 rectificateurs. La puissance installée est de 25,4 kVA pour chaque rectificateur, elle est répertoriée sur le tableau 9 de la page 25.

Interprétation

Le rectificateur est un exemple intéressant pour lequel une étude globale et détaillée incluant tous les agents permettrait de ce faire une idée précise du bilan énergétique/exergétique et conduirait très probablement de faire d'utiles propositions.

Tableau 9

| 1 rectificateur - force (1990) | | nombre utilisation | remarques |
|--|-------|--|--|
| puissance kW | | | |
| bât. 170 | 10 | 1 pompe de circulation | |
| | 1.38 | 1 pompe de soutirage | |
| | 3.6 | 1 pompe à vide | |
| | 1.85 | 1 pompe à vide | |
| | 1.1 | 1 pompe colonne | |
| | 1.85 | 2 pompe échangeur de chaleur | |
| | 1.85 | 1 pompe circuit eau chaude, en marche que pour produit cristallisant | |
| | 1.9 | 1 brassage réservoir 600 l, ~1 fois/an | |
| total | 25.38 | 9 | |
| | 33 | 1 pompe à vide pour tout l'atelier | |
| | 5.5 | 1 pompe anneau liquide | |
| | 3.3 | 1 pompe aspiration | |
| bât. 169 | 7.5 | 6 moteurs pour pompes de 4 kW, associées au 170 | moteur max mentionné sur pompe = 5.5 kW |
| | | | positionnées verticalement, problèmes résolus par invest=20kSF/pompe pour éviter poche d'air |
| | 2.5 | 1 pompe pour chauffage de conduites, 24h/24 | |
| électricité bât. 170(8 rectificateurs) + 171(étuves+bureaux+salle à manger+vestiàre) | | | 936500 |
| | | consommation eau 170 = 559'000 m3 | |
| | | consommation azote 170 = 15'763 m3, rectificateur = (total*6300/24000) ~4'140 m3 | |
| | | consommation vapeur 170 = 7'500 t | |

IV Les installations eau, vapeur, froid et air comprimé

Ces installations d'infrastructure sont les suivantes:

- la station de pompage de l'eau du Rhône avec 1065 kW
- 3 chaudières pour la production de vapeur avec 395 kW
- 4 unités de production de froid avec 1 197 kW
- 3 unités de production d'air comprimé avec 518 kW

Les tableaux 5,6,7 et 8 des pages suivantes répertorient l'ensemble des équipements considérés. Ils donnent également des informations concernant les modifications à prévoir pour diminuer la consommation d'électricité.

Les consommations des autres agents énergétiques et des divers produits sont pour l'année 1990 les suivantes:

| | |
|--------------|--------------------------|
| eau | 4,8x10E6 m ³ |
| vapeur | 10,2x10E4 tonnes |
| froid | 2,2x10E6 kWh |
| air comprimé | 8,5x10E6 Nm ³ |

Interprétation

1. Pour la station de pompage la commande des moteurs des pompes pourrait être un static Kramer drive si la plage de vitesse est de 50% à 100% de la vitesse nominale, ou un static Scerbius drive pour des vitesses qui peuvent aussi dépasser la vitesse nominale. Aujourd'hui on utilise un système à rhéostat de démarrage ou de glissement pour cette fonction. Dans les cas d'applications où le couple varie avec le carré de la vitesse (ventilateurs, compresseurs, pompes, etc.) ce mode de réglage, simple et peu coûteux, est utilisé pour des plages de réglage comprises entre 0,5 et 1 de la vitesse nominale. Il va sans dire que du point de vue énergétique cette dernière solution est mauvaise et pas recommandable. La seule possibilité de réglage continu de la vitesse consiste à modifier la vitesse de rotation du champ tournant, donc la fréquence statorique au moyen d'un convertisseur statique de fréquence.

2. Pour la production de vapeur, la variation continue de la vitesse des ventilateurs permettrait de supprimer le système de réglage actuel par étranglement. Le réglage par clapet est de point de vue énergétique à éviter.

3. Pour la production du froid, il serait avantageux:

-de coupler les réseaux de 3 centres de production 230,210 et 197 -d'alimenter la production locale de froid par une installation de production centralisée

Ainsi une augmentation de la capacité de stockage diminuerait les démarrages fréquents et couperait aussi les pointes de puissance. Ce choix permettrait également de produire et stocker le froid la nuit à tarif réduit.

4. Pour l'air comprimé, dans l'unité bâtiment 230, deux compresseurs identiques peuvent être couplés réduisant ainsi les enclenchements multiples et économisant de l'énergie. En plus, en modifiant et couplant les réseaux on pourrait supprimer une ancienne unité bâtiment 155. A titre d'information la production centralisée à l'aide d'un gros moteur synchrone pourrait réduire la puissance réactive consommée sur l'ensemble du réseau. 5. La demande en chaleur et en force devrait conduire à envisager la cogénération pour des unités supérieures à 100kW.

Tableau 6

| Vapeur à 20 bar - force (1990) | | puissance (kW) | nombre | utilisation | remarques | consommation kWh | possibilité d'amélioration | % d'économie | économie kWh | coût c/kWh |
|--------------------------------|--------|-------------------------|--------|--|--------------------|------------------|----------------------------|--------------|--------------|------------|
| chaudière 1 | 12 t/h | 0.027 - 28 | 1 | ventilateur, vitesse variable | nouvelle, dès 7.91 | | | | | |
| | | 34.5 | 2 | pompe eau, à 14 étages | 1 secours | | | | | |
| | | 5.5 | 1 | brûleur | | | | | | |
| | | 1.1 | 2 | pompe mazout | 1 secours | | | | | |
| | | 0.63 | 1 | nettoyage opacimètre | | 0 | | | | |
| chaudière 4 | 20 t/h | 55 | 1 | ventilateur, étranglement à clapet | | | v variable, comme chaud.1 | 21 | 44900 | 8.75 |
| | | 38 | 2 | pompe eau -20m ³ /h à 35-40 bar, 12 ét. | 1 secours | | v variable, à étudier | | | |
| | | 1.1 | 2 | pompe mazout | 1 secours | | | | | |
| chaudière 5 | 20 t/h | 45 | 1 | ventilateur, étranglement à clapet | | 326500 | | | | |
| | | 38 | 2 | pompe eau -20m ³ /h à 35-40 bar, 12 ét. | 1 secours | | v variable, comme chaud.1 | 17 | 36700 | 10.70 |
| | | 4 | 2 | pompe mazout | 1 secours | | v variable, à étudier | | | |
| | | 12 | | surchauffeur vapeur | pas force | | | | | |
| | | 11.19 | 2 | ramonage et lavage filtres | compresseur | 326500 | | | | |
| chaudière 3 | 25 t/h | | | désaffectée en 1991, a fonctionné 2 mois en 1990 | | 60000 | | | | |
| total | | 390 | 19 | 101611 tonnes à 20 bar | | 713000 | | 11.4 | 81600 | |
| | | | | 71'000 t usine | | | | | | |
| | | | | 18'906 t chauffage bâtiments | | | | | | |
| | | | | 11'705 t pertes | | | | | | |
| | | | | 713'000 kWh élec | ~7.02 kWh/t_vapeur | | | | | |
| | | 4 = x = 326565 | | | | | | | | |
| | | 5 = x = 326565 | | | | | | | | |
| | | 3 = 1.1x * 2/12 = 59870 | | | | | | | | |
| | | | | pompe eau = Sulzer HCP 15 61/2 12 étages (1971); débit minimum assuré --> v variable probablement pas nécessaire | | | | | | |
| | | | | moteur BBC QU 200 L2B 50 CV no. 192568/569/570/571 | | | | | | |
| | | | | ventilos 4+5=100kW=38.2% P-total (=274.02kW) --> consom.=272. MWh | | | | | | |
| | | | | économies=-30% * 272MWh=81.6 MWh | | | | | | |
| | | | | coût en c/kWh = C*/S[1-(1+i)**-n] ob | | | | | | |
| | | | | C=invest en c, i=intérêt annuel en %, S=économie en kWh/an, durée de vie en années | | | | | | |
| | | | | C=17k\$Fr pour convertisseur SAMIministar 65 MB 4-M2 sans main d'oeuvre | | | | | | |

Tableau 7

| Froid à -22C - force (1990) | | utilisation | remarques | consommation kWh | possibilité d'amélioration | % d'économie | économie MWh | coût c/kWh |
|-----------------------------|--------|--------------------------------|----------------------------|------------------|---|--------------|--------------|------------|
| puissance (kW) | nombre | | | | | | | |
| bât. 155 | 126.82 | 1 compresseur | | | | | | |
| | 3.3 | 2 pompe circulation | externe | | | | | |
| | 3.3 | 2 pompe circulation | interne | 35000 | surdimensionné depuis qq années, annuler car transport sur longue distance pour bât.110, à produire sur place, 35 MWh de consommation | | | |
| bât. 230 | 250 | 1 compresseur | | | | | | |
| | 19 | 3 pompe circulation | externe | | coupler les réseaux 230, 197, 210 | | | |
| | 15 | 2 pompe saumure | interne | | | | | |
| | 5.5 | 1 pompe huile | | | | | | |
| | 5.5 | 1 pompe eau | | | | | | |
| | 1.5 | 1 pompe eau refroidissement | | | | | | |
| | 2.5 | 3 ventilateur cond. évaporatif | | | | | | |
| | 2.5 | 1 chauffage bassin, cas de gel | pas force | 687600 | | | | |
| bât. 197 | 200 | 1 compresseur | | | | | | |
| | 75 | 2 compresseur | | | | | | |
| | 45 | 1 pompe saumure | grand débit, externe | | | | | |
| | 15 | 2 pompe saumure | petit débit, externe | | | | | |
| | 7.5 | 3 pompe saumure | interne | | | | | |
| | 4 | 1 pompe huile | compresseur 3 | | | | | |
| | 2.2 | 2 pompe huile | compresseur 1,2 | | | | | |
| | 1.5 | 2 pompe eau refroidissement | | | | | | |
| | 2.5 | 6 ventilateur cond. évaporatif | | 843000 | | | | |
| bât. 210 | 55 | 2 compresseur | 6 cylindres | | | | | |
| | 21.3 | 4 compresseur | liquifrigor | | | | | |
| | 7.5 | 3 pompe saumure | externe | | | | | |
| | 2.7 | 3 pompe saumure | interne | 35000 | | | | |
| total | 1197 | 50 2190 MWh froid | | 1600600 | | | | |
| | | 72'000 m3 eau | | | | | | |
| | | 50 t saumure | | | | | | |
| | | 1'600'600 kWh élec. | | | | | | |
| | | | 1.368 kWh frig./ kWh élec. | | | | | |
| | | | 0.731 kWh élec./ kWh frig | | | | | |

V. Conclusions

Nous résumons les points susmentionnés dans les chapitres précédents et présentons à la fin de ce chapitre une liste non exhaustive du potentiel d'économie d'énergie électrique finale.

1. L'étude des courbes de charge s'est avérée fructueuse. Elle a permis d'obtenir une vue d'ensemble de la consommation électrique de tous les secteurs de l'entreprise et la possibilité de déceler les problèmes dans les secteurs présentant un profil de charge irrégulier. Une telle campagne de mesures est certainement profitable et devrait être effectuée tous les 4 à 5 ans dans les entreprises de cette taille .

2. L'évaluation de la consommation théorique minimale de chaque procédé ou opération de fabrication donnerait des indications importantes sur l'efficacité énergétique des installations. Elle permettrait également d'établir un ordre de priorité des interventions énergétiques.

3. Le mode d'exploitation devrait être reconsidéré sur la base des mesures effectuées. La mise en valeur du potentiel d'utilisation rationnelle de l'énergie électrique finale conduirait certainement à des économies sans aucun investissement immédiat.

4. La régulation des débits par la variation continue des vitesses des différents moteurs devrait être immédiatement mise en place dans les secteurs les plus sensibles.

5. Le potentiel d'économie d'énergie électrique finale est selon nos estimations de 1204MWh/an (valeur se réfèrent à l'installation de 1990)

Il s'établit de la manière suivante:

| | |
|----------------|---|
| -POMPAGE EAU | 2 moteurs à vitesse variable pour les 2 pompes,385 000kWh/an (21%) |
| -VAPEUR | 2 ventilateurs à vitesse variable, 81 600kWh/an (11,4%) |
| -FROID | coupler les réseaux de 3 centres produire localement dans un petit atelier et supprimer 1 centre de 35 000kWh/an |
| -AIR COMPRIME | coupler 2 compresseurs dans une des 3 installations, industriel-21 100kWh/an instrumentation-36 200kWh/an (3,6 %) |
| -STEP | puissance réactive - 500 000kvarh/an extrapolation au réseau - 1 1 50 000kvarh/an pour une consommation totale de 19 090 600kWh/an |
| ADMINISTRATION | nouveaux diffuseurs+mode manuel des soufflantes-630 000kWh/an (36%) un moteur de 90kW au lieu de 225kW pour la climatisation devrait être déclenché la nuit de 22h à 6h -15 000kWh/an |

VI Le FUTUR : extrapolation pour l'industrie chimique suisse

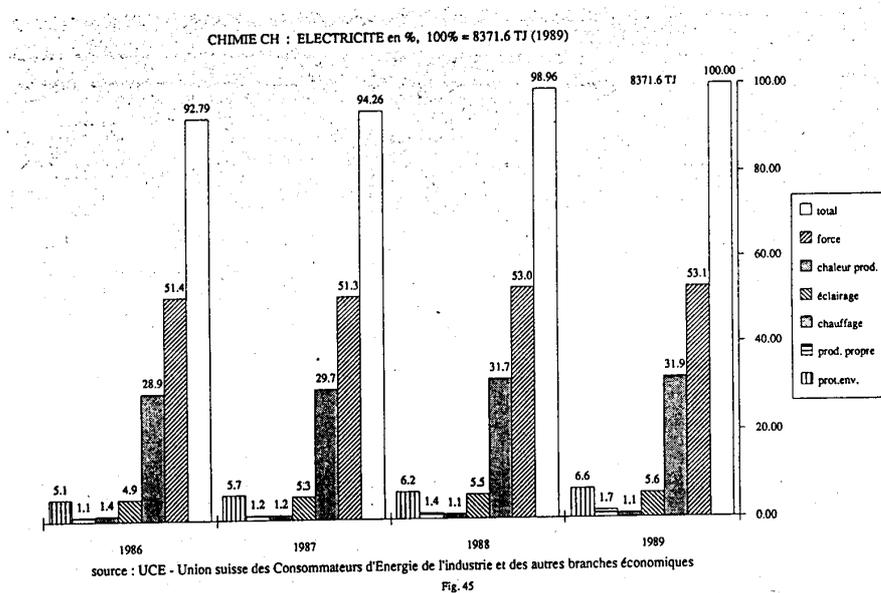
L'utilisation rationnelle de l'énergie est une réponse concrète nécessaire pour atteindre les objectifs du programme "énergie 2000" lancé par la Confédération suite à la votation du 23 septembre 1990. Elle est aussi une des réponses à divers problèmes et conjectures sur l'avenir de notre planète tels que le CO₂, l'effet de serre, le stockage des déchets, l'approvisionnement en matière première naturelle et en énergie et le respect de l'environnement.

En 1980, l'industrie chimique a consommé 25'296TJ dont 6'557TJ d'électricité, ce qui représente une part de 26% de la consommation totale. En 1990 pour une consommation totale presque la même de 25405TJ, la part de l'électricité était de 33,2% soit 8'435 TJ. Pendant ce même laps de temps la production a fortement progressée.

Le chiffre de 1990 représente une part de 3,3% de la consommation totale du pays en agent énergétique direct.

Cette croissance est modeste et indique que ce secteur n'est pas énergivore malgré la mise en service d'installations nouvelles de protection de l'environnement (stations d'épuration, lavages des gaz, etc)

La partie "force" compte pour 53.1% de la consommation électrique finale. Elle présente une faible tendance à la hausse. voir figure 45 ci-dessous.



Pour évaluer le potentiel d'économie d'énergie électrique il paraît raisonnable de le rechercher dans ce secteur de consommation. Se basant sur notre étude, il apparaît que c'est d'abord la méthodologie proposée qui peut répondre à ce défi d'économie d'énergie, souvent simple à réaliser, mais difficile à faire accepter dans les milieux concernés. Il y a lieu de faire comprendre que les ressources naturelles et énergétiques sont des biens publics, non régis seulement par l'économie.

- 1. Basé sur le schéma général de l'alimentation électrique, définir les différents secteurs principaux et faire l'inventaire des équipements installés et des modes de fonctionnement.
- 2. Définir pour chaque secteurs les différents procédés physiques mis en oeuvre et définir pour chacun l'énergie théorique minimale en fonction des quantités produites.
- 3. Relever les courbes de charge du réseau principal d'alimentation ainsi que pour chacun des secteurs. Indiquer les modes de fonctionnement et les paramètres caractéristiques de la production.
- 4. Pour chaque secteur, avec un profil de charge particulier et dont la consommation énergétique est d'un facteur trop grand par rapport au résultat théorique minimal, établir un bilan complet très détaillé afin de pouvoir faire une analyse en conséquence. Utiliser les valeurs des pertes et non les valeurs des rendements.
- 5. Les gros moteurs (50kW) sont parfois à l'origine d'une consommation anormale, alors il faudrait vérifier les point suivants:
 - la commande du moteur, par exemple, est-ce que la sonde qui le pilote fonctionne correctement ? et évaluer un mode de fonctionnement différent qui réduirait le nombre des démarrages -pour le dimensionnement du moteur, faire le bilan des pertes et si nécessaire corriger
 - examiner et évaluer la chaîne d'appareillage reliée au moteur
- 6. La règle la plus importante est de faire une optimisation de l'ensemble des éléments constituant un secteur ou un procédé de fabrication sans oublier la vision globale de l'installation à l'examen.
- 7. Vérification de la qualité "électrique" du réseau.

Notre étude de cas dans une entreprise particulière a montré que le potentiel d'économie d'énergie électrique (force) existe et est souvent réalisable sans modifications importantes des installations en cause. Nous avons tout lieu de croire qu'un même potentiel existe dans chaque entreprise chimique et que c'est le fait de se pencher sur le problème des pertes qui est le premier pas à franchir.

Concernant l'évaluation du potentiel de l'ensemble de l'industrie chimique, une estimation de 20% est conservatrice et alors il en résulterait une économie énergétique en électricité finale de 890TJ (247GWh)

Remerciements

Nous remercions la Direction Générale de l'entreprise qui a autorisé le CUEPE à effectuer cette étude . Le support des ingénieurs et techniciens de l'entreprise est à relever et apporte à cette étude une contribution majeure. Les enquêtes effectuées dans plusieurs installations étaient très enrichissantes et ont permis de récolter des données d'une entreprise pionnière de la chimie fine en Suisse. Cette étude nous l'espérons, contribuera à la connaissance des économies d'énergie électrique finale dans un domaine appliqué relativement moderne.

BIBLIOGRAPHIE

1. A.B. Lovins, The State of the Art Drivepower, COMPETITEK, Rocky Mountain Institute, Colorado 1989
2. S. Nadel, M. Shepard; S. Greenberg, G. Katz, A. T. de Almeida, Energy-Efficient Motor Systems, American Council for Energy-Efficient Economy, Washington, DC., and Berkeley, California, 1991
3. W.W. Eckenfelder Jr, Industrial Water Pollution Control, McGraw-Hill, 1989
4. Mémento technique de l'eau, Editeur Degrémont, 1978
5. I. I. Ionel, Pumps and Pumping, Publisher Elsevier, 1986
6. B. J. Chalmers, Electric Motor Handbook Editor Butterworths, 1988
7. B. Eck, Fans, Pergamon Press, 1973
8. Motor Application and Maintenance Handbook, Editor R. W. Smeaton, McGraw-Hill, 1987
9. Electricity: Efficient End-Use and New Generation Technologies and their Planning Implications, T. B. Johanson, B. Bodlung, R. H. Williams, Editors, Lund University Press, 1989
10. A. T. de Almeida, S. Greenberg, C. Blumstein, Demand-side Management Opportunities Through the Use of Energy-Efficient Motor Systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 3, 1990
11. La rectification, document interne de l'entreprise, non publié