

1994 724.318 f

# Analyse de la consommation d'énergie

Saisir  
Evaluer  
Représenter  
Agir

## **Résumé**

De quelle quantité d'énergie une entreprise a-t-elle besoin pour fabriquer un produit? Quelle est la quantité d'énergie nécessaire à chacune des étapes de sa fabrication? Comment choisir la meilleure machine pour cette tâche? Ce manuel, réalisé après l'étude de nombreux cas pratiques et construit sur des exemples concrets, montre comment analyser à peu de frais la consommation énergétique de processus de fabrication simples ou compliqués. La méthode préconisée se fonde sur une théorie et des exemples aisément compréhensibles. La diversité des exemples montre qu'elle s'applique à tous les secteurs et qu'elle constitue un outil de choix dans l'étude de l'utilisation rationnelle de l'énergie.

## **Impressum**

Ce manuel s'inscrit dans la collection RAVEL Industrie.  
N° de commande: 724.318.f

## **Editeur**

Office fédéral des questions conjoncturelles, Belpstrasse 53, 3003 Berne

## **Bureau**

RAVEL c/o Coordination romande du programme d'action, M. Daniel Notter, EPFL-LESO, 1005 Lausanne  
Tél. 021 693 45 50, fax 693 27 22

## **Chef de domaine**

Daniel Spreng, EPF-Zurich, ETH-Zentrum/ETL, 8092 Zurich  
tél. 01 256 41 89, fax 01 251 21 72

## **Auteur**

Frieder Wolfart, Ernst Basler und Partner AG, Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon,  
Tél. 01 395 11 11, fax 01 395 12 34

## **Traduction**

Jean-Bernard Billeter, Genève

## **Mise en page et photocomposition**

Consortium DAC/City Comp SA, Lausanne et Morges

## **Impression et diffusion**

Office central fédéral des imprimés et du matériel (OCFIM), 3000 Berne

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, avril 1993  
Reproduction partielle autorisée avec mention de la source.

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>Partie A Exemples et cas pratiques</b>	<b>11</b>
A.1 Premier bilan	11
A.2 Comparaison de la consommation d'énergie d'entreprises du même secteur	17
A.3 Consommation d'énergie en fonction du taux d'utilisation des installations	22
A.4 Evaluation de la consommation d'énergie d'un secteur d'entreprise	26
A.5 Bilan énergétique d'une installation	31
A.6 Economies réalisables par l'amélioration de l'exploitation	35
A.7 Influence du réglage des machines sur la consommation d'énergie	40
A.8 Détermination de la consommation spécifique d'électricité nécessaire à la fabrication d'une pièce de série	45
A.9 Détermination de la consommation spécifique d'électricité d'une machine	49
<b>Partie B Méthode d'analyse énergétique</b>	<b>55</b>
<b>Vue d'ensemble</b>	<b>55</b>
Premier pas : Rédaction du questionnaire	57
Deuxième pas : Fixation des limites de l'analyse	60
Troisième pas : Détermination des grandeurs à mesurer ; conduite des mesures	62
Quatrième pas : Traitement et présentation des résultats sous forme de tableaux et de graphiques ; interprétation des résultats	65
Cinquième pas : Application des conclusions	74
<b>Partie C Check-lists</b>	<b>75</b>
<b>Vue d'ensemble</b>	<b>75</b>
Check-lists de la direction générale de l'entreprise	76
Check-lists de la direction technique de l'entreprise	81
Check-lists de conduite d'une analyse énergétique	85
<b>Unités et formules</b>	<b>91</b>
<b>Références</b>	<b>93</b>
<b>Publication du programme d'impulsions RAVEL</b>	<b>95</b>

# Introduction

## Objectif et structure de ce manuel

Ce manuel s'adresse à toutes les personnes engagées dans la pratique industrielle. Etayé par des exemples précis, il explique comment établir le bilan énergétique d'un atelier sur la base de ses propres statistiques.

Il permet de procéder à l'analyse énergétique

- d'un atelier pris dans son ensemble;
- d'un secteur de fabrication;
- d'une machine particulière;
- d'une installation ou de ses éléments;

et précise à qui cette analyse doit être confiée.

Ce manuel explique au lecteur comment procéder à une première analyse énergétique sur la base de quelques calculs simples, complétés parfois de quelques mesures peu compliquées. Il doit l'inciter à comprendre et évaluer les principaux flux énergétiques de son entreprise. Il lui donne les moyens de :

- formuler les questions et les objectifs de son analyse et d'évaluer son utilité;
- distinguer les paramètres déterminants permettant d'apporter une réponse aux questions posées, et d'écarter les grandeurs peu significatives;
- élaborer une procédure de mesure;
- choisir les bonnes grandeurs de référence;
- choisir les instruments de mesure adéquats;
- préparer les tableaux d'évaluation;
- représenter graphiquement le résultat de ses mesures;
- calculer quelques indices de dépense d'énergie simples;
- représenter graphiquement ces indices;
- interpréter les graphiques et les indices;
- tracer le diagramme des flux énergétiques;
- tirer les enseignements de son analyse;
- appliquer les enseignements de l'analyse.

Ce manuel compte trois parties principales et une annexe :

- la partie A explique, sur la base de quelques exemples pratiques, comment conduire une analyses énergétique pour répondre aux questions qu'on se pose;
- la partie B développe la partie A en précisant les facteurs dont il faut tenir compte à chaque étape du travail;

## A qui ce manuel est-il destiné ?

## Objectif du manuel

## Structure du manuel

- la partie C regroupe les check-lists qui faciliteront tous les travaux de gestion énergétique;
- on trouvera en annexe la liste des unités employées, quelques tables de conversion des grandeurs énergétiques les plus courantes, ainsi qu'une liste d'ouvrages techniques pour les lecteurs désireux d'approfondir leurs connaissances.

La structure et le mode d'emploi des parties A et B sont rapidement présentés dans les pages suivantes. Les check-lists de la partie C se passent de commentaires.

## La partie A en résumé

Les 9 cas pratiques de la première partie montrent comment évaluer la consommation énergétique de différentes entreprises industrielles. On y aborde les questions les plus fréquemment rencontrées dans la pratique. Avec un peu de réflexion et d'imagination, il est possible d'appliquer la méthode proposée à la majorité des problèmes qui se posent lors de l'analyse énergétique en atelier. Il n'est pas nécessaire d'étudier les 9 cas présentés ici ; il suffit en général d'étudier celui qui présente le plus d'analogies avec son propre cas puis de procéder de manière semblable, mutatis mutandis, dans sa propre entreprise.

### Exemples et cas pratiques

Par souci de simplification, tous les exemples sont présentés de la même manière. La démarche illustrée par ces exemples est présentée méthodiquement dans la partie B :

### Structure commune des exemples

#### Présentation du cas

Rapide présentation de l'entreprise et de la problématique.



#### Rédaction du questionnaire (définition de l'objectif)

On formule les questions concrètes auxquelles l'analyse énergétique doit apporter une réponse. Les questions abordées dans les différents exemples sont récapitulées dans le tableau E-1.



#### Fixation des limites de l'analyse

On précise à quelle partie de l'entreprise ou de l'atelier se limite l'enquête.



#### Saisie des données

On décrit la manière dont les données nécessaires sont réunies.



#### Traitement des résultats et calcul des indices

On explique les opérations qui, sur la base des mesures réunies, permettent de trouver les réponses aux questions posées.



### **Présentation graphique**



Pour rendre les résultats plus parlants, on les présente dans la mesure du possible sous forme de graphiques.

### **Interprétation des résultats**



On interprète les résultats en fonction des questions posées en début d'analyse. On se limitera au domaine auquel l'analyse a été circonscrite et on tiendra compte du savoir et de l'expérience des participants.

### **Application des conclusions**



Présentation des conséquences découlant de l'analyse.

### **Autres applications de la méthode**

Quelques exemples de questions du même type que les questions originales, auxquelles on peut répondre par simple adaptation des calculs.

Application des exemples à d'autres cas

Question	Exemple N°								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quels sont énergétiquement les points faibles d'une entreprise ?	*	*		*					
Quels facteurs influencent la consommation d'énergie ?			*				*	*	*
Comment procéder à l'évaluation énergétique d'une installation ou d'une machine ?				*	*				*
Peut-on améliorer le rendement énergétique d'une installation ou d'une machine en en modifiant le plan d'exploitation ?			*		*				*
Peut-on améliorer l'organisation d'un atelier du point de vue énergétique ?			*			*			*
Peut-on inciter le personnel à économiser l'énergie ?						*	*		
Comment répartir correctement les coûts énergétiques ?	*							*	
Notre consommation d'énergie tient-elle la comparaison avec celle d'autres entreprises ?		3							

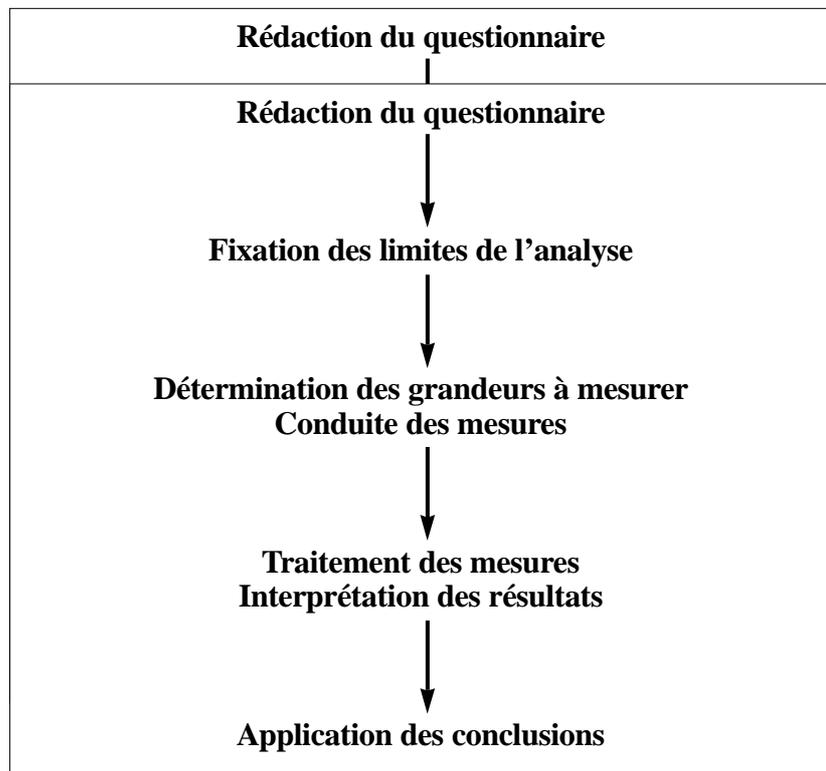
Tableau E-1

Questions auxquelles l'analyse énergétique peut répondre  
Exemples dans lesquels ces questions ont été abordées

## La partie B en résumé

### Présentation de la méthodologie

La méthode d'analyse énergétique présentée ici permet d'évaluer des processus ou sous-processus de fabrication à l'aide d'indices judicieusement choisis. Elle est facile à comprendre et facile à appliquer. On commence par poser les questions auxquelles on s'intéresse puis, pour calculer les indices nécessaires, on procède selon la démarche suivante :



Les différentes étapes de cette démarche sont représentées par des idéogrammes.

### Rédaction du questionnaire



Le premier pas est de formuler clairement les questions auxquelles l'analyse doit répondre. Puis on évalue le bénéfice escomptable de l'opération afin de fixer un plafond à l'effort consacré à ce travail de mesure, de calcul et d'interprétation. L'analyse ne peut être engagée que lorsque ses objectifs ont été clairement formulés.

Le tableau E-1, page 7, présente une série d'objectifs formulés sous forme de questions.

### Fixation des limites de l'analyse

Il s'agit de n'étudier que les éléments permettant de répondre aux questions posées (objectifs); on circonscrit donc soigneusement le champ d'analyse, ce qui implique certaines simplifications.



### Détermination des grandeurs à mesurer, conduite des mesures

On se fixe comme règle de prendre le minimum de mesures. Chaque fois que possible, on dérivera les grandeurs dont on a besoin des données et statistiques déjà disponibles. Comme le choix des points de mesure dépend de l'organisation des ateliers, il est nécessaire de bien connaître les installations de transformation et de distribution de l'énergie. On veillera également à ce que les conditions cadres sont respectées pendant les séances de mesure.



### Traitement des mesures, interprétation des résultats

La procédure d'interprétation des mesures doit avoir été fixée avant le travail de mesure proprement dit. On prépare donc la liste complète des grandeurs à considérer et on vérifie la procédure de calcul envisagée avant de passer aux mesures.



Le résultat des mesures doit être traité de manière à apporter la réponse aux questions posées. Le calcul d'indice de dépense d'énergie et l'utilisation de graphiques sont très utiles à cet égard.



On interprétera les résultats en compagnie des intéressés, c'est-à-dire du personnel de l'entreprise directement concerné. On tirera les conséquences qui s'imposent en commun.



### Application des conclusions

L'analyse permet de tirer des conclusions sur l'utilisation plus rationnelle de l'énergie dans les processus de fabrication. Ces enseignements doivent déboucher sur des actes. On désignera les personnes responsables des mesures qui s'imposent et on précisera les procédures de contrôle à appliquer.



### Echange d'informations

L'échange d'informations entre entreprises engagées dans une analyse énergétique permet de renforcer la démarche, d'en améliorer l'efficacité et de stimuler l'innovation en la matière.

## Comment utiliser ce manuel ?

### **Le manuel comme instrument de travail**

Le lecteur peu au courant des questions de saisie et d'évaluation des flux d'énergie en atelier commencera avec profit par étudier l'exemple A1. La structure générale des exemples et la méthodologie proposée y apparaissent clairement. Après quoi, il choisira comme second exemple le cas qui s'apparente le plus à son entreprise. Nous lui recommandons enfin l'étude des check-lists de l'annexe C.

Au lecteur ayant déjà une première vue d'ensemble de son entreprise, nous recommandons de passer directement aux exemples qui le concernent et d'en vérifier les possibilités d'application à son entreprise. L'étude des check-lists lui sera aussi profitable. Nous le renvoyons à la partie B (méthodologie) pour répondre aux éventuelles questions que soulèverait cette lecture.

Quant au spécialiste rompu à la saisie et à l'évaluation des flux d'énergie, nous lui suggérons de parcourir quelques-uns des cas présentés en exemple puis de passer directement à la partie B (méthodologie). Il étudiera plus particulièrement le chapitre «Rédaction du questionnaire». L'étude des exemples, et particulièrement des passages consacrés au calcul des indices de dépense d'énergie et à la préparation des graphiques, pourront lui donner quelques nouvelles idées et stimuler sa réflexion.

# Partie A Exemples et cas pratiques

## A1 Premier bilan d'ensemble

*Exemple : une entreprise d'impression et de teinture des textiles*

### Présentation du cas

Une entreprise d'impression et de teinture de textiles souhaite se faire une première idée de sa consommation d'énergie. Les principales données doivent être tirées des statistiques d'atelier disponibles. L'entreprise consomme surtout de l'électricité pour faire tourner ses machines ainsi que de l'huile lourde et du gaz pour produire la chaleur nécessaire aux processus de fabrication.



### Rédaction du questionnaire

- Comment la consommation d'énergie de l'entreprise a-t-elle évolué ces dernières années ?
- A combien s'élève la consommation de combustible et d'électricité ?
- Peut-on calculer les indices suivants : consommation rapportée au chiffre d'affaire, consommation par production unitaire ?
- Quelles étaient les consommations spécifiques antérieures ?
- Quels sont les ateliers consommant le plus d'énergie ?
- Où devrait-on approfondir l'analyse énergétique ?



### Fixation des limites de l'analyse

L'objectif est d'évaluer les installations dans leur ensemble. On considère donc la consommation globale d'électricité et de combustible de l'entreprise. On en écarte le carburant consommé par les véhicules de l'entreprise et ceux de ses fournisseurs. Comme il a été convenu de ne pas entreprendre de mesures, on se fonde sur les factures et décomptes d'énergie disponibles. On profite également des points de mesure internes existants. Le premier examen ne doit porter que sur des valeurs annuelles.



### Saisie des données



- La consommation d'électricité, d'huile lourde et de gaz est calculée à partir du relevé des compteurs et de l'étude des factures.
- La consommation en huile lourde est établie à partir des statistiques d'achats et des variations du stock.
- La production est exprimée en mètre courant de tissuapprêté (m.c.), grandeur qui fait l'objet d'une statistique de production.

La saisie s'effectue à l'aide du tableau ci-dessous. Les chiffres y sont reportés dans leurs unités originales (voir tableau A1-1).

Tableau A1-1  
Données réunies

Ligne		Source	Unité	1987	1988	1989	1990
a	Quantité tissu imprimé	statistiques d'entreprise	1000 m.c.	8'900	7'700	8'600	8'300
b	Consommation d'électricité	factures SI	1000 kWh	8'400	7'900	8'300	8'000
c	Facture d'électricité	factures SI	1000 fr.	1'075	1'019	1'071	1'056
d	Consommation d'huile lourde	factures fournisseurs	1000 kg	7'440	7'030	5'410	2'960
e	Facture d'huile lourde	factures fournisseurs	1000 fr.	1'567	1'173	1'148	646
f	Consommation de gaz	factures SI	1000 m <sup>3</sup>	250	260	2'410	4'920
g	Facture de gaz	factures SI	1000 fr.	55	46	412	837

SI = Services industriels

### Traitement des mesures et calcul des indices



La conversion des unités originales en kWh et le calcul des premiers indices de dépense énergétique sont confiés au directeur technique de l'entreprise. En divisant la consommation énergétique annuelle par la production annuelle exprimée en mètres courants de tissuapprêté, on obtient les indices énergétiques souhaitées (voir tableau A1-2).

Ligne		Calcul	Unité	1987	1988	1989	1990
	<b>Conversion énergétique</b>						
<i>h</i>	Consommation d'huile lourde	$d \cdot 11,2$ <i>kWh/kg</i>	1000 kWh	83'300	78'700	60'600	33'200
<i>i</i>	Consommation de gaz	$f \cdot 9,3$ <i>kWh/m<sup>3</sup></i>	1000 kWh	2'300	2'400	22'400	45'800
<i>j</i>	Consommation totale de combustible	$h + i$	1000 kWh	85'600	81'100	83'000	79'000
	<b>Calcul du coût</b>						
<i>k</i>	Coût des combustibles	$e \cdot g$	1000 fr.	1'622	1'219	1'558	1'484
	<b>Calcul des indices</b>						
<i>l</i>	Consommation spécifique de combustible	$j/a \cdot 1000$	kWh/ 1000 m.c.	9618	10500	9700	9500
<i>m</i>	Coût spécifique du combustible	$k/a \cdot 1000$	fr./ 1000 m.c.	182	158	181	179
<i>n</i>	Consommation spécifique d'électricité	$b/a \cdot 1000$	kWh/ 1000 m.c.	944	1026	965	964
<i>o</i>	Coût spécifique de l'électricité	$c/a \cdot 1000$	fr./ 1000 m.c.	121	132	125	127

Tableau A1-2  
Calcul de la consommation absolue et spécifique d'énergie

*m.c.* = mètre courant de tissu apprêté

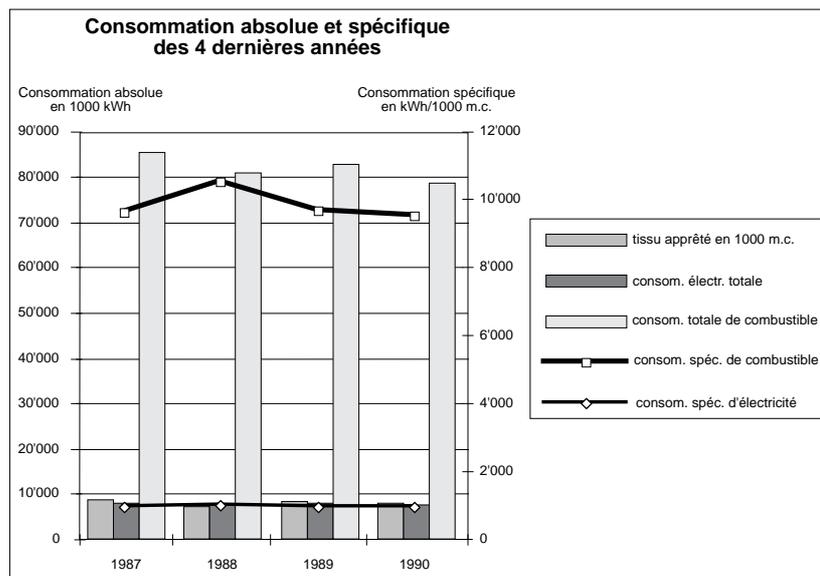
## Présentation graphique

La présentation des valeurs réunies dans les tableaux A1-1 et A1-2 sous forme graphique (voir figures A1-1 et A1-2) en fait mieux apparaître l'évolution au cours du temps. Comme l'énergie électrique est à la fois plus riche de possibilités et plus coûteuse que l'énergie combustible, nous n'additionnons pas ces grandeurs dans les graphiques.



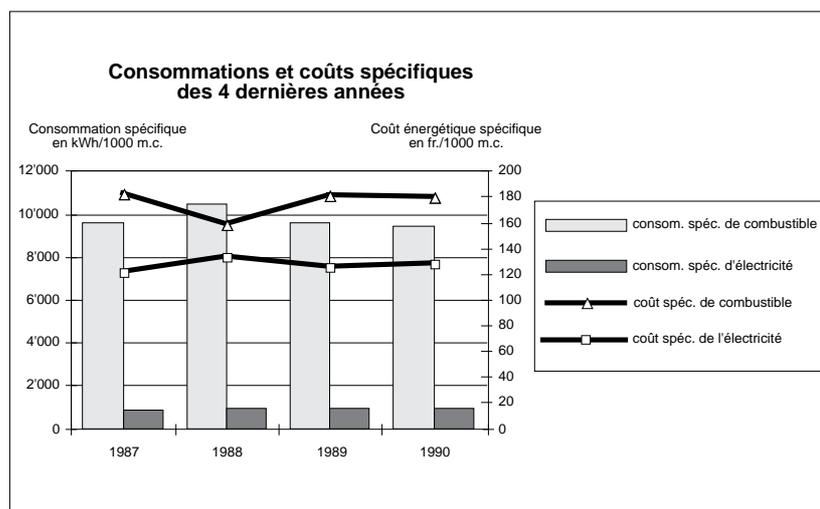
La figure A1-1 représente l'évolution de la consommation absolue et spécifique d'énergie ainsi que la quantité de tissu apprêté exprimée en mètres courants (m. c). L'axe vertical gauche (consommation absolue) mesure les grandeurs représentées sous forme de barres. L'axe vertical droit (consommation spécifique) mesure les grandeurs représentées sous forme de lignes.

Figure A1-1  
 Consommation absolue  
 et spécifique  
 (combustible et électricité)  
 et quantité de tissuapprêté aux cours  
 des 4 dernières années



La figure A1-2 représente le niveau et l'évolution de la consommation absolue et spécifique d'énergie. L'axe vertical gauche (consommation absolue) indique la valeur des grandeurs représentées sous forme de barres. L'axe vertical droit (consommation spécifique en kWh/1000 m.c.) mesure les grandeurs spécifiques représentées sous forme de barres. L'axe vertical droit (coût spécifique en fr./1000 m.c.) mesure les grandeurs représentées sous forme de lignes.

Figure A1-2  
 Consommations et coûts  
 spécifiques  
 (combustible et électricité)  
 des 4 dernières années



Les figures 3 et 4 représentent les indices de dépense en énergie de la production annuelle de tissuapprêté. Les échelles horizontale et verticale ont été étendues, si bien que le point 0 se trouve hors du graphique. Il est ainsi possible d'agrandir la zone intéressante. Les valeurs réelles des différentes années sont représentées sous forme de points. Les lignes qui relient ces points indiquent la tendance de ces 4 années.

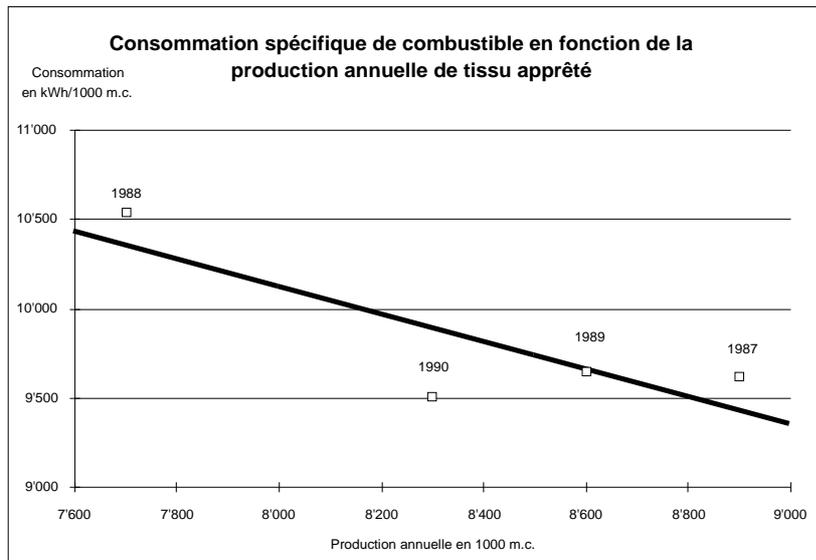


Figure A1-3  
Consommation spécifique de combustible en fonction de la production annuelle de tissu apprêté

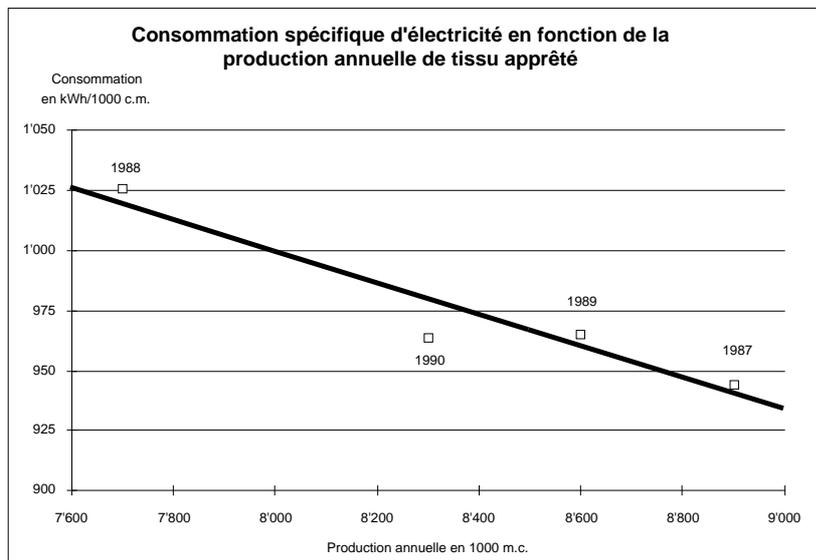


Figure A1-4  
Consommation spécifique d'électricité en fonction de la production annuelle de tissu apprêté

## Interprétation des résultats

La production de 1000 m.c. de tissu apprêté nécessite environ 10000 kWh de combustible et 1000 kWh d'électricité. Mesurée en unités énergétiques, la consommation de l'entreprise en combustible est ainsi environ 10 fois supérieure à sa consommation d'électricité.



Il ressort de l'étude de l'évolution des grandeurs dans le temps (figure A1-1) que la consommation spécifique d'électricité et de combustible n'a que peu varié au cours des quatre dernières années. L'étude de ces fluctuations (figure A1-3 et A1-4) révèle que les consommations spécifiques ont tendance à baisser les années de bonne production, c'est-à-dire lorsque le taux d'utilisation des installations est plus élevé. Les valeurs de l'année 1990 (derniers résultats disponibles) sont cependant inférieures à la tendance générale

– et donc plus favorables – tant pour l'électricité que pour le combustible. Cela est probablement dû aux mesures d'économie d'énergies déjà entreprises.

Le coût spécifique des deux agents énergétiques ne diffère pas beaucoup. Il est d'environ 180 fr./1000 m.c. pour les combustibles, et d'environ 130 fr./1000 m.c. pour l'électricité. Les variations du prix de l'énergie ont visiblement plus d'influence sur les coûts énergétiques spécifiques que les variations de la consommation. Le prix des deux agents énergétiques étant du même ordre de grandeur, il est tout aussi intéressant d'effectuer des économies sur l'un que sur l'autre, bien que les quantités consommées mesurées en kWh diffèrent d'un facteur 10.

### Application des conclusions



Comme la quantité et le coût de l'énergie utilisée sont considérables (environ 90000 MWh et 2,5 mios fr. par année), la direction de l'entreprise a décidé d'approfondir son analyse énergétique. Elle se penchera sur la consommation énergétique de chacune des principales étapes de sa chaîne de fabrication (apprêt, blanchissage, impression, lavage, sérigraphie, gravure, teinture, vaporisation, etc.), en distinguant les besoins en combustible, en électricité et en puissance installée. Objectif : identifier les principaux consommateurs d'énergie. La consommation de ces postes sera alors suivie de manière mensuelle, voire hebdomadaire. La direction établira en parallèle un premier plan d'ensemble précisant les points où l'on peut envisager des économies d'énergie et en indiquant la marche à suivre pour y parvenir.

Il est prévu d'établir les schémas de distribution de la vapeur, de l'huile caloporteuse, du gaz et de l'air comprimé. On en tirera une procédure de mesure permettant à l'entreprise de saisir et d'évaluer régulièrement sa consommation énergétique afin d'en suivre l'évolution et de constater l'effet de ses mesures d'économie.

### Autres applications de la méthode

La méthode ci-dessus peut-être appliquée mutatis mutandis au calcul d'une série d'autres valeurs :

- grandeur de référence : chiffre d'affaires ou création de plus-value ;
- comparaison avec les valeurs caractéristiques d'autres entreprises.

## A2 Comparaison de la consommation d'énergie d'entreprises similaires

*Exemple : huit brasseries*

### Présentation du cas

Huit brasseries souhaitent comparer la quantité d'énergie qu'elles consacrent à leur production de bière et évaluer ainsi les possibilités d'économie. Comme leurs productions annuelles sont très différentes, il ne suffit pas de comparer leur consommation énergétique. Il faut définir des indices permettant d'effectuer des comparaisons indépendamment des volumes brassés.



### Rédaction du questionnaire

- Constate-t-on des différences de rendement dans l'utilisation d'énergie des huit entreprises ?
- Est-il possible de définir le potentiel d'économie des entreprises dont la consommation spécifique d'énergie est élevée ?
- La taille de l'entreprise a-t-elle une influence sur la consommation d'énergie par unité de production ?



### Fixation des limites de l'analyse

Pour répondre à ces questions, il suffit de comparer la consommation énergétique annuelle des entreprises ramenée à leur production de bière. Comme il s'agit de se faire une idée globale, on ne retient que leur consommation totale d'électricité et de combustible. On écarte le carburant consommé par les véhicules de l'entreprise et ceux des fournisseurs. Il n'est pas nécessaire de procéder à des mesures puisque la comparaison ne porte que sur des grandeurs annuelles et que les données pertinentes apparaissent dans les statistiques annuelles.



### Saisie des données

- La consommation d'électricité et de gaz est calculée après lecture des compteurs et des factures des Services industriels.
- La consommation d'huile lourde et de combustible solide est déduite des statistiques d'achat et des variations du stock.
- Pour mesurer la production de bière, on choisit le moût de pompage, produit intermédiaire du brassage qui, après cuisson et houblonnage, est envoyé en cave réfrigérée pour y refroidir et y fermenter. Les brasseries tiennent une statistique très précise de leur production de moût de pompage.



La saisie des données auprès des 8 brasseries est effectuée au moyen d'un questionnaire envoyé peu après la clôture de l'année brassicole. Les chiffres, tous notés dans leurs unités originales, sont regroupés dans le tableau A2-1.

*Tableau A2-1  
Données saisies auprès  
des 8 brasseries*

<i>Ligne</i>	Exercice 1990/91	Source	Unité	Brass. 1	Brass. 2	..... etc.	Brass. 8
<i>a</i>	Moût de pompage	question- naire	hl	1'400'000	240'000		52'000
<i>b</i>	Consomma- tion d'électricité	question- naire	1000 kWh	11'200	3'600		940
<i>c</i>	Consomma- tion d'huile lourde	question- naire	1000 kg	2'000			175
<i>d</i>	Consomma- tion de gaz	question- naire	1000 m <sup>3</sup>	0	1'150		0

### Traitement des mesures et calcul des indices



La conversion en unités énergétiques des grandeurs originales fournies par les huit entreprises et le calcul des indices sont confiés au responsable de l'énergie d'une des sociétés. La consommation de combustible est convertie en kWh. Les consommations spécifiques sont obtenues par division des besoins annuels en énergie par la production annuelle de moût (voir tableau A2-2).

Ligne	Année 1990/91	Calcul	Unité	Brass. 1	Brass. 2	..... etc.	Brass. 8
	<b>Calcul des unités énergétiques</b>	$a \cdot b$					
e	Consommation d'huile lourde	$c \cdot 11,9$ kWh/kg	1000 kWh	23'800	0		2'080
f	Consommation de gaz	$d \cdot 9,3$ kWh/m <sup>3</sup>	1000 kWh	0	10'695		0
g	Consommation totale de combustible	$e + f$	1000 kWh	23'000	10'695		2'080
	<b>Calcul des indices</b>						
h	Consommation spécifique de combustible	$g/a \cdot 1000$	kWh/hl moût	17	45		40
i	Consommation spécifique de courant	$g/a \cdot 1000$	kWh/hl moût	8	15		18

Tableau A2-2  
Conversion de la consommation et calcul des indices

### Présentation graphique

Pour étudier dans quelle mesure la consommation dépend de la taille des brasseries, on reporte en figure A2-1 les consommations spécifiques (axe vertical) en fonction de la production annuelle de moût de pompage (axe horizontal) des huit brasseries. La taille de ces huit brasseries variant d'un facteur 100, on comprime l'axe horizontal (échelle logarithmique). Les indices calculés pour chacune des huit brasseries apparaissent sous forme de point ; les lignes qui relient ces points indiquent une tendance générale.

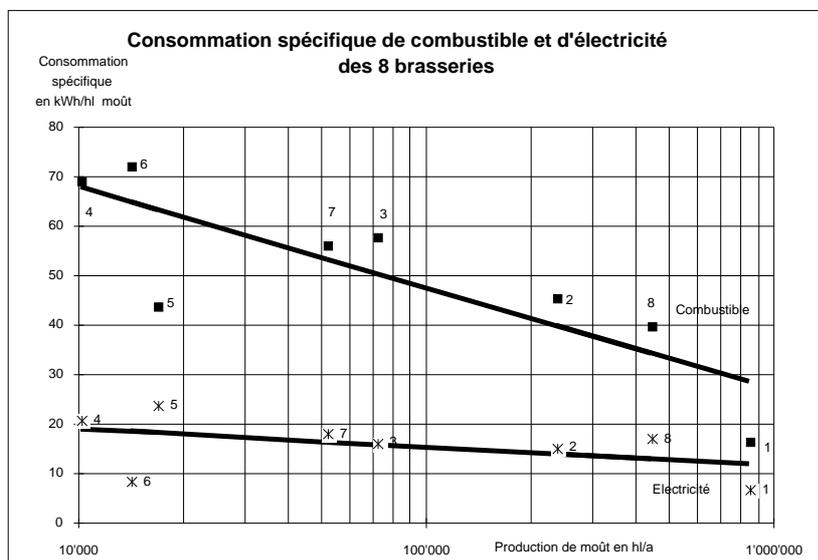


Figure A2-1  
Consommation spécifique de combustible et d'électricité des 8 brasseries

### Interprétation des résultats



Mesurée en unités énergétiques, la consommation de combustible des brasseries est environ trois fois supérieure à leur consommation d'électricité. Pour interpréter ces chiffres, il faut tenir compte du fait que le kWh électrique est plus riche en possibilités d'utilisation mais coûte sensiblement plus cher que le kWh de combustible. On n'additionne donc pas ces deux chiffres.

On constate de très grandes différences d'une brasserie à l'autre. Les indices les plus favorables sont de l'ordre de 8 kWh/hl pour l'électricité et de 27 kWh/hl pour le combustible, les moins favorables respectivement de 24 et 72 kWh/hl.

En se basant sur les indices les plus favorables, on peut conclure qu'il existe dans certaines brasseries un potentiel théorique d'économie d'énergie pouvant atteindre 60%.

Le rendement énergétique des grandes brasseries est plus favorable, en particulier pour le combustible. Les différents indices (électricité et combustible) s'écartent pourtant parfois des « indices escomptés » (représentés par la droite), signalant que d'autres facteurs interviennent dans le rendement énergétique.

L'effet qu'on observe pour les brasseries 5 et 6 est fort probablement un effet de substitution combustible/électricité : l'augmentation de la consommation d'un de ces agents énergétiques correspond à la réduction de la consommation de l'autre.

### Application des conclusions



Ces premiers résultats ont incité certaines de ces brasseries à étudier plus avant leurs possibilités d'économie d'énergie dans les secteurs de la cuisson, des cave réfrigérées et de l'embouteillage, ainsi que dans les circuits de production de froid, de vapeur, etc.

Elles établiront des comparaisons annuelles pour mettre les changements en évidence, en particulier ceux qui résulteraient des mesures d'économie.

### **Autres applications de la méthode**

La méthode ci-dessus peut-être appliquée mutatis mutandis au calcul d'une série d'autres indices :

- grandeur de référence: chiffre d'affaires ou création de plus-values ;
- grandeur de référence : volume de bière mis en bouteille ;
- comparaison avec les chiffres de l'année précédente plutôt qu'avec ceux d'autres entreprises.

### A3 Consommation d'énergie électrique en fonction du taux d'utilisation des installations

*Exemple : la salle de brassage d'une brasserie*

#### Présentation du cas



La consommation spécifique d'énergie dépend souvent du taux d'utilisation des installations. Elle est élevée lorsque le taux d'utilisation est faible et baisse lorsque ce taux s'améliore. Dans certaines brasseries, on observe des variations mensuelles de consommation de combustible sensiblement plus fortes que les variations de production de bière.

#### Rédaction du questionnaire



- Y a-t-il un rapport entre la consommation spécifique de combustible et le taux mensuel d'utilisation des installations ?
- Est-il possible de prévoir la consommation pour un taux d'utilisation donné ?

#### Fixation des limites de l'analyse



Pour répondre aux questions ci-dessus, il faut établir la variation mensuelle de la consommation de combustible en fonction de la production de bière. Comme il s'agit d'étudier l'ensemble de l'installation de production, on prend en considération la consommation totale de combustible de la brasserie.

La majeure partie du combustible consommée par les brasseries est consacrée à la cuisson du moût de pompasse. On choisit donc le moût comme grandeur de référence. C'est un produit intermédiaire du brassage qui, après cuisson et houblonnage, est envoyé en cave pour y refroidir et y fermenter.

### Saisie des données

- L'entreprise procède à la mesure mensuelle des variations de son stock de combustible. Il est donc possible de connaître sa consommation mensuelle sans effectuer de mesures particulières.
- La production de moût de pompage fait l'objet d'une statistique quotidienne, ce qui facilite le calcul des indices mensuels.



La saisie des données est effectuée au moyen d'un questionnaire envoyé au service de la comptabilité peu après la fin de l'année brassicole. Les chiffres, tous notés dans leurs unités d'origine, sont regroupés dans le tableau A3-1

Ligne		Unité	Oct.	Nov.	Déc.	etc.	Sept.
<i>a</i>	Production de moût	hl	24'390	6'754	10'239		24'667
<i>b</i>	Achats d'huile lourde EL	1000 kg	72	71	71		82
<i>c</i>	Etat initial du stock d'huile lourde EL	1000 kg	25	30	22		12
<i>d</i>	Etat final du stock d'huile lourde EL	1000 kg	30	22	8		9

Tableau A3-1  
Données saisies

### Traitement des mesures et calcul des indices

La conversion des variations du stock en consommation mensuelle, la conversion de ce chiffre en kWh et le calcul des indices sont effectués à l'aide du tableau A3-2. Les indices sont obtenus en divisant la consommation d'énergie par la production mensuelle de moût.



Ligne		Calcul	Unité	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars
<i>e</i>	Consommation de combustible	$b + c - d$	1000 kg	67	79	85	86	78	76
<i>f</i>	Consommation de combustible	$e \cdot 11,9$ kWh / kg	1000 kWh	797	940	1'011	1'027	932	903
<i>g</i>	Consommation spécifique de combustible	$f/a$	kWh/hl moût	32	139	99	62	53	46

Tableau A3-2  
Calcul des données et des indices

Pour mettre en évidence la variation de la consommation d'énergie en fonction de la production mensuelle de moût, on commence par réarranger les colonnes du tableau selon la production mensuelle de moût (voir tableau A3-3).

Tableau A3-3  
Réarrangement des chiffres  
en fonction de la production  
mensuelle

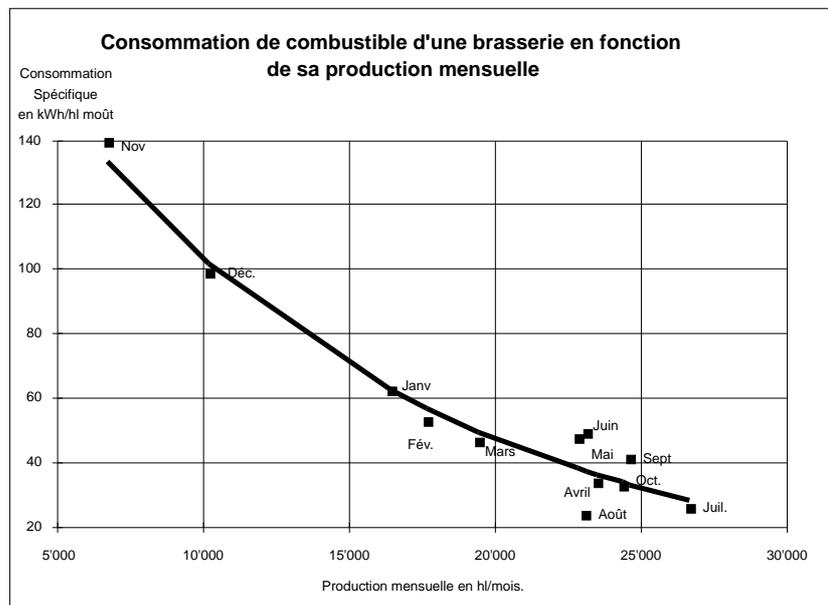
Mois	Unité	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Mai	Août	Juin
Production de moût	hl	6'754	10'239	16'457	17'717	19'477	22'893	23'145	23'154
Consommation spécifique de combustible	kWh/hl moût	139	99	62	53	46	47	24	49

### Présentation graphique des résultats



Pour mettre en évidence le rapport entre la consommation mensuelle de combustible et la production mensuelle de bière, on reporte dans la figure A3-1 les indices calculés (axe vertical) en fonction de la production mensuelle (axe horizontal). Les points représentent les indices calculés, la ligne la tendance générale.

Figure A3-1  
Consommation de combustible  
d'une brasserie en fonction  
de sa production mensuelle



### Interprétation des résultats



La consommation spécifique de cette brasserie varie entre 140 kWh/hl et 24 kWh/hl de moût. Elle diminue les mois de bonne utilisation des installations et augmente lorsque leur taux d'utilisation baisse. Il est intéressant de constater que les indices de gauche correspondent bien à la tendance, alors que ceux de droite sont beaucoup plus dispersés. Ainsi, la consommation spécifique du mois de juin atteint près du double de celle du mois d'août malgré des chiffres de production comparables.

### Application des conclusions

Un fait est patent: la consommation spécifique de combustible dépend du taux mensuel d'utilisation des installations. Les mois de faible production, les pertes d'échauffement et de mise en repos de la salle de brassage ont prépondérantes. Il serait possible de réduire ces pertes par exemple en brassant plusieurs charges à la fois puis en mettant la salle de brassage au repos. La courbe s'aplatirait. Il sera tenu compte de cette observation dans la fixation du prochain plan d'utilisation de la salle de brassage.



La dispersion des indices autour de la ligne de tendance indique qu'il existe un potentiel d'économie dans les mois pour lesquels les points se trouvent au-dessus de la ligne. Pour déterminer les raisons de cette dispersion, il faudra mesurer et interpréter l'évolution des indices en cours de mois. L'objectif est d'obtenir que toutes les indices mensuels soient ramenés au-dessous de la courbe.

### Autres applications de la méthode

La méthode ci-dessus peut-être appliquée mutatis mutandis au calcul d'une série d'autres indices :

- détermination des indices hebdomadaires ;
- prise en compte de la seule consommation de la salle de brassage, éventuellement par lecture du totalisateur d'heures de marche des brûleurs ;
- analyse plus poussée combinant les questions 1 et 2.

## A4 Evaluation de la consommation d'énergie d'un secteur d'activité d'une entreprise

*Exemple : la production de froid dans une brasserie*

### Présentation du cas



Une grande part de l'électricité utilisée par les brasseries est consacrée à la production de froid. Il s'agit de rafraîchir la bière, d'évacuer la chaleur de fermentation et, surtout, de réfrigérer les locaux où la bière mûrit environ 8 semaines. Il n'existe pas à ce jour de méthode systématique d'amélioration ou d'optimisation des caves réfrigérées.

### Rédaction du questionnaire



- Quelle est la quantité d'énergie électrique consacrée à la réfrigération des caves ?
- Quelle est la quantité de froid produite par cette électricité ?
- Quelle est la quantité de froid techniquement nécessaire au procédé de fabrication de la bière, et à combien s'élèvent les pertes de froid ?
- Quelle est la quantité de froid utilisée pour un volume donné de bière ?
- Quelle quantité de froid pourrait-on économiser ?

### Fixation des limites de l'analyse



Pour répondre au questionnaire (analyse énergétique de la production de froid), il suffit d'étudier la consommation d'électricité des compresseurs frigorifiques. On choisit d'ignorer la consommation électrique des groupes auxiliaires (compresseurs d'air, pompes, éclairage, etc.) ainsi que les variations saisonnières des besoins de froid. Il est ainsi possible de se baser sur les chiffres de consommation annuels.

Pour l'analyse des caves réfrigérées, on a pris comme grandeur de référence le volume de bière filtrée (bf) qui en sort, c'est-à-dire de la bière prête à la consommation avant sa mise en fûts ou en bouteilles.

Pour calculer la quantité de froid techniquement nécessaire, on mesure la différence de température de la bière entre son entrée et sa sortie des caves réfrigérées, ainsi que la quantité de malt fermenté. Le « point d'entrée des caves » est défini comme le point à partir duquel le moût de pompage est refroidi à l'eau glacée après

avoir restitué une grande part de sa chaleur dans un échangeur contribuant à la cuisson suivante.

### Saisie des données

La brasserie étudiée dispose de trois groupes frigorifiques. Chacun est équipé d'une totalisateur horaire enregistrant les heures de fonctionnement à pleine charge et à charge partielle. Le nombre d'heures de fonctionnement annuel est noté dans les statistiques de l'entreprise.



On relève les caractéristiques de chaque groupe frigorifique sur leur plaquette signalétique et les diagrammes (qu'on peut se procurer auprès du fabricant) indiquant leur puissance frigorifique en fonction de la puissance électrique, avec, en paramètres, les températures de condensation et d'évaporation.

Le personnel technique de l'entreprise a pu indiquer les températures moyennes d'évaporation et de condensation, ainsi que la température de la bière aux divers moments de sa fabrication.

La saisie des données est effectuée au moyen d'un questionnaire envoyé au service de comptabilité et à la direction technique de l'entreprise peu après la fin de l'année brassicole. Les chiffres sont regroupés dans le tableau A4-1

Ligne		Unité	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Somme 1 +2 +3
a	Puissance électrique					
b	- à pleine charge	kW	59	59	6	124
	- à charge partielle	kW	35	35	0	
c	Puissance frigorifique					
d	- à pleine charge	kW	148	145	15	308
	- à charge partielle	kW	91	82		
e	Durée de fonctionnement					
f	- à pleine charge	h	1'200	7'400	6'200	
	- à charge partielle	h	1'700	1'300	0	
g	Température de condensation	°C	23	23	40	
h	Température d'évaporation	°C	-10	-10	-10	

Tableau A4-1  
Saisie des données  
des groupes frigorifiques

Traitement des mesures et calcul des indices



On calcule l'énergie électrique utilisée par les groupes frigorifiques à partir de leurs caractéristiques et de leur durée de fonctionnement, puis la puissance frigorifique ainsi fournie (voir tableau A4-2).

Tableau A4-2  
Calcul de la consommation électrique et de la production de froid

Ligne		Calcul	Unité	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Somme 1+2+3
<i>i</i>	Consommation électrique - à pleine charge	$a \cdot e / 1000$	1000 kWh	71	437	37	545
<i>k</i>	- à charge partielle	$b \cdot f / 1000$	1000 kWh	61	46	0	107
<i>l</i>	- somme	$i + k$	1000 kWh	132	482	37	651
<i>m</i>	Production de froid - à pleine charge	$c \cdot e / 1000$	1000 kWh	178	1'073	93	1'344
<i>n</i>	- à charge partielle	$d \cdot f / 1000$	1000 kWh	155	107	0	261
<i>o</i>	- somme	$m + n$	1000 kWh	332	1'180	93	1'605

Après quoi, on regroupe dans le tableau A4-3 les valeurs absolues saisies et calculées pour l'ensemble des caves réfrigérées de la brasserie.

Tableau A4-3  
Consommation absolue et volume de bière transitant par les caves réfrigérées

Ligne		Calcul	Unité	Valeur
<i>p</i>	Quantité de bière filtrée	<i>saisie</i>	hl	46'500
<i>q</i>	Température d'entrée dans les caves	<i>saisie</i>	°C	15
<i>r</i>	Température de sortie des caves	<i>saisie</i>	°C	-2
<i>s</i>	Capacité thermique spéc. de l'eau	<i>littérature</i>	kWh/hl · °C	0,116
<i>t</i>	Besoins en froid pour rafraîchir la bière	$p \cdot s \cdot (q-r) / 1000$	1000 kWh	92
<i>u</i>	Extrait de malt	<i>saisie</i>	1000 kg	457
<i>v</i>	Quantité de chaleur de fermentation par kg de malt	<i>littérature</i>	kWh/kg	0,157
<i>w</i>	Chaleur de fermentation à évacuer	$u \cdot v$	1000 kWh	72
<i>x</i>	Froid techniquement nécessaire	$t + w$	1000 kWh	163
<i>y</i>	Pertes de froid	$o-x$	1000 kWh	1'441

Dernière étape : le calcul des indices spécifiques dans le tableau A4-4, quotient des consommations totales par le volume de bière filtrée.

Ligne		Calcul	Unité	Valeur
<i>z</i>	Consommation d'électricité	$1000 \cdot l/p$	kWh/hl	14
<i>aa</i>	Consommation de froid	$1000 \cdot o/p$	kWh/hl	35
<i>bb</i>	Froid techniquement nécessaire	$1000 \cdot x/p$	kWh/hl	4
<i>cc</i>	Pertes de froid	$1000 \cdot y/p$	kWh/hl	31

Tableau A4-4  
Calcul des indices  
des caves réfrigérées

### Interprétation des résultats

La consommation spécifique d'énergie électrique pour l'entreposage à froid de la bière est d'environ 14 kWh/hl, soit environ 2/3 de la consommation totale de la brasserie. Comparé avec celui d'autres brasseries, ce chiffre est très élevé. Le même calcul effectué auprès de 6 autres brasseries a donné des indices s'étageant entre 2,3 et environ 8 kWh/hl. Une différence qui signale un grand potentiel d'économies.



La consommation totale de froid s'élève à environ 35 kWh/hl. Environ 90% de cette production de froid sert à couvrir les pertes subies à la production du froid, à sa distribution et à son utilisation. (Dans la brasserie à cet égard la mieux lotie, les pertes de froids ne s'élèvent qu'à 2,8 kWh/hl!) Il est évident que les pertes de froid sont à l'origine de la forte consommation d'électricité mesurée.

### Application des conclusions

L'analyse du secteur caves réfrigérées a permis de mettre en évidence un intéressant potentiel d'économies et d'en indiquer l'ordre de grandeur. Le fait d'avoir pu chiffrer ces grandeurs est très utile à l'entreprise qui a décidé de se pencher sur ce secteur jusqu'alors négligé.



Première conséquence de l'analyse: une partie des caves réfrigérées (qui avaient été surdimensionnées) a été mise hors de service, ce qui a permis de réduire les pertes de froid. Une analyse plus poussée doit permettre de préciser les mesures susceptibles de poursuivre les économies dans ce sens (amélioration de l'isolation, modification de l'installation de froid, autres mesures d'adaptation de l'exploitation).

### Autres applications de la méthode

La méthode ci-dessus peut-être appliquée mutatis mutandis au calcul d'une série d'autres indices :

- calcul des pertes de froid en fonction du volume des caves réfrigérées pour évaluer la qualité énergétique (pertes de froid) de ces installations indépendamment de leur taux d'exploitation (durée du séjour moyen de la bière en caves réfrigérées).
- analyse fine des indices par processus partiel : refroidissement du moût de pompage, fermentation principale et maturation de la bière, dans la mesure où ces processus sont spatialement distincts.

## A5 Analyse énergétique d'une installation

### *Exemple : la production de froid d'une brasserie*

#### Présentation du cas

La quantité d'électricité consommée par cette brasserie pour sa production de froid semble disproportionnée. Est-ce dû aux pertes d'exploitation ou à l'insuffisance de l'installation frigorifique. Il s'agit donc d'établir le bilan énergétique de l'installation frigorifique.



#### Rédaction du questionnaire

- Quelle est la consommation d'énergie électrique de l'installation frigorifique ?
- Quelles est la quantité de froid produite à partir de l'électricité consommée à cette fin ?
- Le rapport Production de froid/Consommation électrique correspond-il à l'état actuel de la technique, compte tenu des données particulières d'exploitation.



#### Fixation des limites de l'analyse

Pour répondre aux questions posées, on s'en tient à la consommation d'électricité du compresseur de l'installation frigorifique. Comme l'évaluation du rendement de l'installation frigorifique doit tenir compte des fluctuations saisonnières, le calcul peut sans autre se faire sur la base des chiffres de consommation annuelle.



#### Saisie des données

L'alimentation électrique des installations frigorifiques de cette brasserie est déjà équipé d'un compteur. Le groupe frigorifique dispose d'autre part d'un totalisateur horaire enregistrant les durées de pleine charge et de charge partielle. La consommation d'électricité et la durée de fonctionnement des installations au cours de l'exercice précédent peuvent être relevées dans les statistiques de l'entreprise.



On relève les caractéristiques de chaque groupe frigorifique dans le diagramme (qu'on peut se procurer auprès du fabricant) indiquant la puissance frigorifique en fonction de la puissance électrique, avec, en paramètres, les températures de condensation et d'évaporation.

Le personnel technique de l'entreprise connaît les températures moyennes d'évaporation et de condensation.

La saisie des données est effectuée au moyen d'un questionnaire envoyé au service de la comptabilité et à la direction technique de l'entreprise peu après la fin de l'année brassicole. Les chiffres sont regroupés dans le tableau A5-1

Tableau A5-1  
Saisie des données annuelles  
de l'installation frigorifique

Ligne		Unité	Valeur
a	Consommation d'énergie électrique électrique	1000 kWh	544
b	Durée de fonctionnement - à pleine charge	h	5'452
c	- à charge partielle	h	77
d	Puissance frigorifique - à pleine charge	kW	264
e	- à charge partielle	kW	131
f	Température de condensation $t_c$	°C	32,5
g	Température d'évaporation $t_0$	°C	-10

### Traitement des mesures et évaluation de la consommation



On calcule tout d'abord la quantité de froid produite par le groupe frigorifique à partir de ses caractéristiques et de sa durée de fonctionnement (voir tableau A5-2).

Tableau A5-2  
Calcul de la consommation  
électrique et de la production  
de froid

Ligne	Production de froid	Calcul	Unité	Quantité
h	- à pleine charge	$b \cdot d$	1000 kWh	1'439
i	- à charge partielle	$c \cdot e$	1000 kWh	10
j	- somme	$h + i$	1000 kWh	1'449

Après quoi, on calcule le coefficient de performance effective ( $C_e$ ) de l'installation frigorifique en divisant la quantité de froid produite (j) par la quantité d'énergie électrique consommée (a):

$$C_e = j/a = 1'449 \text{ MWh} / 544 \text{ MWh} = 2,7$$

Le coefficient  $C_e = 2,7$  indique que, sur la moyenne d'une année, une unité d'énergie permet de produire 2,7 unités de froid.

Pour juger la qualité de ce coefficient, il faut le comparer au coefficient de performance maximale possible selon Carnot ( $C_c$ ).

Calcul du coefficient maximum possible  $C_c$  selon Carnot :

$$C_c = t_0 / (t_c - t_0) \text{ (températures en } ^\circ\text{Kelvin)}$$

$$C_c = 263 / (305,5 - 263) = 6,2$$

On calcule le rendement ( $R$ ) de l'installation frigorifique en divisant le coefficient effectif ( $C_e$ ) par le coefficient maximum possible ( $C_c$ ):

$$R = C_e / C_c$$

$$R = 2,7 / 6,2 = 0,44$$

### Interprétation des résultats

Le rendement effectif de l'installation frigorifique est de 2,7. Compte tenu des conditions cadres de l'exploitation (températures d'évaporation et de condensation), le rendement théorique pourrait atteindre 6,2. L'installation atteint 44 % de ce rendement théorique (rendement de 0,44)



### Application des conclusions

L'analyse de la production de froid et son évaluation au moyen de coefficients a permis de mettre le doigt sur une déficience technique et d'en chiffrer approximativement les conséquences. Quelques années auparavant, l'entreprise avait augmenté l'espace nuisible du compresseur sans tenir compte de la perte de rendement consécutive. La première mesure prise par l'entreprise à la suite de cette analyse fut de demander au fabricant du groupe frigorifique quelles mesures permettraient d'améliorer l'installation. Il est envisagé de brancher un groupe frigorifique plus moderne en parallèle avec le groupe actuel. Dans tous les cas, on rétablira l'espace nuisible du compresseur dans ses dimensions originales.



D'autres analyses seront entreprises pour étudier les mesures susceptibles de réduire la consommation de froid: amélioration de l'isolation de l'entrepôt frigorifique, des réservoirs et des conduites,

rénovation du réservoir frigorifique (bassin d'eau glacée), mesures d'exploitation, etc.

### **Autres applications de la méthode**

La méthode ci-dessus peut-être appliquée mutatis mutandis à l'évaluation des installations de compression d'air, de chauffage, de production de vapeur, etc., d'autres installations de transformation de l'énergie.

## A6 Economies réalisables par l'amélioration des plans d'exploitation

*Exemple : le moulage par injection de pièces en plastique*

### Présentation du cas

Les quelque 50 presses d'injection d'un atelier de moulage de pièces en plastique consomment une grande quantité d'électricité. Une partie de cette énergie est consommée lors des temps morts : préchauffage, marche à vide et arrêt retardé des machines. Les pointes de puissance liées au mode de fonctionnement des machines posent aussi des problèmes. On peut envisager certaines économies d'énergie électrique et une réduction des pointes de puissance en revoyant les plans d'exploitation sans pour autant procéder à de gros investissements.



### Rédaction du questionnaire

- Peut-on réduire la consommation d'électricité en améliorant les plans d'exploitation des presses d'injection ?
- Peut-on éventuellement réduire les pointes de puissance ?
- A combien s'élèvent ces économies ?



### Fixation des limites de l'analyse

Pour répondre à ces questions, on étudie le fonctionnement d'une machine, en ne retenant que sa consommation de courant (l'air comprimé, l'eau de refroidissement, etc., étant produits électriquement). Pour bien saisir les rapports entre la succession des opérations (plan d'exploitation) et la consommation électrique, on mesure la consommation à intervalles de cinq minutes pendant une dizaine de jours. On est ainsi certain de saisir une fois au moins tous les modes de fonctionnement de la machine : réglage, préchauffage, interruptions provoquées par des perturbations, week-ends, arrivée en fin de série, etc.



### Saisie des données



Le meilleur point de mesure se révèle être l'arrivée du courant dans l'armoire de commande de la machine : les fils électriques sont aisément accessibles, il y a suffisamment de place pour l'appareil de mesure. On y installe donc un appareil programmable et à mémoire relié aux fils d'arrivée par des pinces ampèremétriques. On le programme pour qu'il effectue une mesure de courant toutes les 5 minutes pendant 10 jours, qu'il additionne et enregistre ces valeurs. L'armoire est ensuite refermée. Pour le personnel, il n'y a aucun changement visible. L'installation et la programmation de l'appareil de mesure prennent environ 20 minutes.

On pose à côté de la machine un registre dans lequel, pendant ces 10 jours, le personnel note toutes ses interventions sur la machine, en précisant la date, l'heure et la raison de l'intervention (un simple mot) ainsi que l'état du compteur de cycles. Rien d'autre n'est modifié dans le processus habituel de fabrication.

A l'issue des 10 jours, l'appareil de mesure est démonté et les données enregistrées transcrites sur disquette.

### Traitement des mesures



Les données de la disquette sont chargées dans un programme d'ordinateur (tableur Excel). Première opération sur les chiffres bruts : la copie des mesures prises à intervalles de 5 minutes sur une liste verticale. En regard de chacune de ces valeurs, on reporte la date et l'heure de la mesure, ainsi que la consommation cumulée du jour. A partir de ces chiffres, on calcule la consommation d'électricité des 5 dernières minutes ainsi que la consommation moyenne des tranches de 5 minutes. Enfin, on reporte en dernière colonne les annotations du registre. Le tableau A6-1 présente un extrait de ce travail.

Date	Heure	Consommation		Puissance sur 5 min. kW	Remarques
		Somme kWh	Par 5 min. kWh		
16 juil.	7:05	271,58	0,00	0,0	
16 juil.	7:10	271,58	0,00	0,0	
16 juil.	7:15	272,08	0,50	6,0	Préchauffage
16 juil.	7:20	272,89	0,81	9,7	
16 juil.	7:25	273,73	0,84	10,1	
16 juil.	7:30	274,55	0,82	9,8	
16 juil.	7:35	275,33	0,78	9,3	
16 juil.	7:40	275,33	0,41	4,9	
16 juil.	7:45	276,07	0,33	4,0	
16 juil.	7:50	276,27	0,20	2,5	
16 juil.	7:55	276,44	0,17	2,0	
16 juil.	8:00	276,70	0,26	3,1	
16 juil.	8:05	277,12	0,42	5,0	Début série
16 juil.	8:10	277,55	0,44	5,2	
16 juil.	8:15	278,06	0,51	6,1	
16 juil.	8:20	278,56	0,50	6,0	
16 juil.	8:25	279,05	0,49	5,9	
etc.	etc.	etc.	etc.	etc.	etc.

Tableau A6-1  
Les mesures et les grandeurs dérivées après traitement sur micro-ordinateur

### Présentation graphique

Le tableau ci-dessus compte en gros 2700 lignes. Une présentation graphique s'impose. On n'y reporte que la consommation par tranches de 5 minutes en fonction du temps. L'extrait du graphique pour le 16 juillet entre 7 h 00 et 22 h 00 est présenté en figure A6-1.

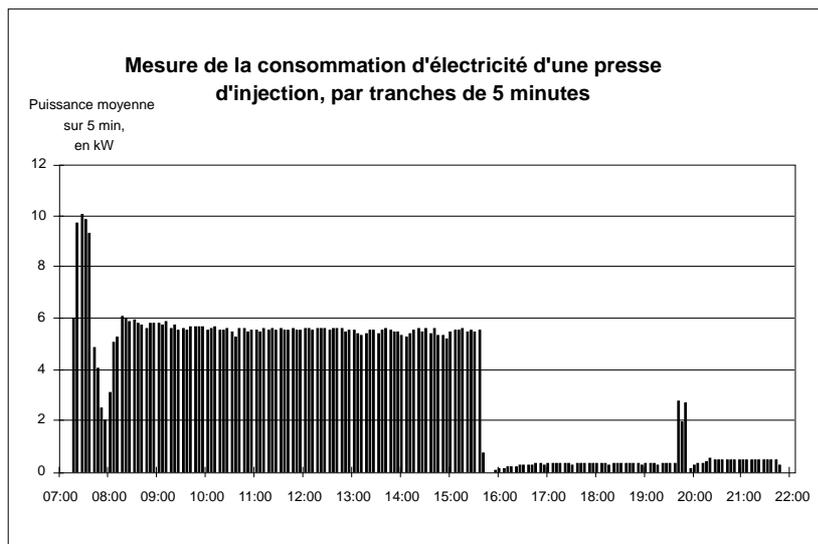


Figure A6-1  
Présentation graphique des moyennes de consommation sur 5 minutes

### Interprétation des résultats



Entre 8 h 15 et 15 h 30, la puissance absorbée par la machine en régime stationnaire de production se maintient autour de 5,8 kW. Cela indique un processus de fabrication régulier, libre de perturbations.

Le plus frappant, dans ce graphique, est la puissance absorbée en cours de préchauffage, entre 7 h 10 et 8 h 00. La pointe de consommation consécutive à la mise en marche de la machine s'élève à 10kW et dure environ 20 minutes. Elle est suivie d'une période de consommation très éduite de même durée. Ce phénomène est typique de ce genre de machine et s'est reproduit à chaque mise en marche tout au long des dix jours. L'irrégularité de cette courbe de charge donne à penser qu'une procédure de préchauffage plus différenciée permettrait d'écarter la pointe de puissance. En fait, lors de la mise en marche, tous les éléments de chauffe de la machine s'enclenchent simultanément à pleine charge, puis se déclenchent en bloc. La consommation ne croît à nouveau que lors du passage à la fabrication et, donc, de la mise en marche de l'hydraulique. Il devrait être possible d'étager le préchauffage de la machine et de supprimer ainsi la pointe de consommation.

Ce jour-là, la fabrication s'interrompt à 15 h 45, après moulage du nombre de pièces programmé. La machine se met alors automatiquement en veilleuse. Elle n'est complètement arrêtée que peu avant 22 h 00, à la main. Pendant tout ce temps, elle continue de consommer du courant car ses pompes restent activées et la température est maintenue à un certain niveau. Si la machine avait été arrêtée en fin de fabrication, on aurait économisé 2,5 kWh.

### Application des conclusions



L'étude du plan d'exploitation de cette presse d'injection montre l'importance de deux des facteurs particuliers dans sa consommation d'électricité : son mode de préchauffage et le retard apporté à son arrêt. En extrapolant les résultats obtenus à l'ensemble des machines sur une période d'une année, on peut évaluer les économies réalisables en puissance et en énergie.

Dans les presses d'injection modernes, la commande du chauffage est assurée par l'électronique et le conducteur ne peut pas intervenir directement sur la mise en marche des différents éléments de chauffe. On a prié le fabricant de la machine de modifier la commande électronique en conséquence.

Pour limiter les pertes provoquées par la mise inutile en mode d'attente, on a donné au personnel la consigne d'arrêter les machines dès que la production du jour est terminée.

### **Autres applications de la méthode**

La procédure utilisée pour mesurer la courbe de charge d'une presse d'injection peut être appliquée de manière analogue à un groupe de machines ou à l'ensemble d'une production particulière.

### A7 Influence du réglage des machines sur la consommation d'énergie

*Exemple : une presse d'injection pour pièces en plastique*

#### Présentation du cas



Un atelier de moulage par injection comptant une cinquantaine de machines produit quelque 2000 pièces différentes au cours de l'année. Chaque nouvelle pièce nécessite le montage d'un nouvel outil et le réglage d'une centaine de paramètres, le tout selon une procédure bien précise. Une grande partie de ces paramètres influencent la consommation en énergie du processus de fabrication, sans qu'on sache exactement dans quelle mesure. Jusqu'à notre visite, les uniques critères retenus lors du réglage des paramètres étaient la qualité du produit fini et la cadence de production ; on ne se préoccupait pas de la consommation de courant.

Il est cependant possible de modifier certains des paramètres sans nuire à la qualité des produits ou à la cadence de la fabrication. Dans notre cas, on se demande si la « pression de verrouillage » n'influe pas sur la consommation électrique. Elle peut être réduite sur bien des outils mais, par commodité, on y renonce. Les conducteurs sont peu disposés à la ramener du maximum à sa valeur techniquement suffisante tant qu'on ne leur démontre pas concrètement les économies d'énergie qui en découleraient.

#### Rédaction du questionnaire



- Est-il possible de diminuer la consommation d'électricité en réduisant les pressions de verrouillage ?
- Quel est le rapport entre cette diminution et la réduction de la pression de verrouillage ?

#### Fixation des limites de l'analyse



Pour répondre à ces questions, on choisit une machine momentanément équipée pour la fabrication de pièces demandant une pression de verrouillage inférieure environ de moitié à la pression maximale. La machine, déjà préchauffée, est suivie pendant environ 3 heures, période pendant laquelle on ramène progressivement la pression de verrouillage de sa valeur habituelle (155 bar) à son minimum technique (80 bar), par étapes de 10 bar environ toutes les 15 minutes. Aucun autre paramètre n'est modifié. On mesure la

consommation d'électricité toutes les 5 minutes. La durée des intervalles de pression constante (15 minutes) garantit la neutralisation des éventuelles fluctuations de la consommation.

### Saisie des données

Le meilleur point de mesure se révèle être l'arrivée du courant dans l'armoire de commande de la machine: les fils électriques sont aisément accessibles, il y a suffisamment de place pour l'appareil de mesure. On y installe donc un appareil programmable et à mémoire relié aux fils d'arrivée par des pinces ampèremétriques. On le programme pour qu'il effectue une mesure de courant toutes les 5 minutes pendant plusieurs heures, qu'il additionne et enregistre ces valeurs. L'armoire est ensuite refermée. Pour le personnel, il n'y a aucun changement visible. L'installation et la programmation de l'appareil de mesure prennent environ 20 minutes.



On pose à côté de la machine un registre dans lequel, pendant ces 10 jours, le personnel note l'heure de chaque modification de la pression de verrouillage ainsi que sa valeur.

A l'issue de cette séance de mesure, l'appareil est démonté et les données enregistrées transcrites sur disquette.

### Traitement des résultats

Les données de la disquette sont chargées dans un programme d'ordinateur (tableur Excel). Première opération sur les chiffres bruts: la copie des mesures prises à intervalles de 5 minutes sur une liste verticale. En regard de chacune de ces valeurs, on reporte l'heure de la mesure et la consommation cumulée. La consommation des tranches de 5 minutes est calculée par soustraction et la puissance moyenne absorbée durant ces laps de temps en multipliant ces chiffres par 12. Les pressions de verrouillage sont reportées dans la dernière colonne.



Tableau A-1  
 Mise en forme par PC des  
 mesures effectuées et des  
 chiffres qu'on en a dérivés

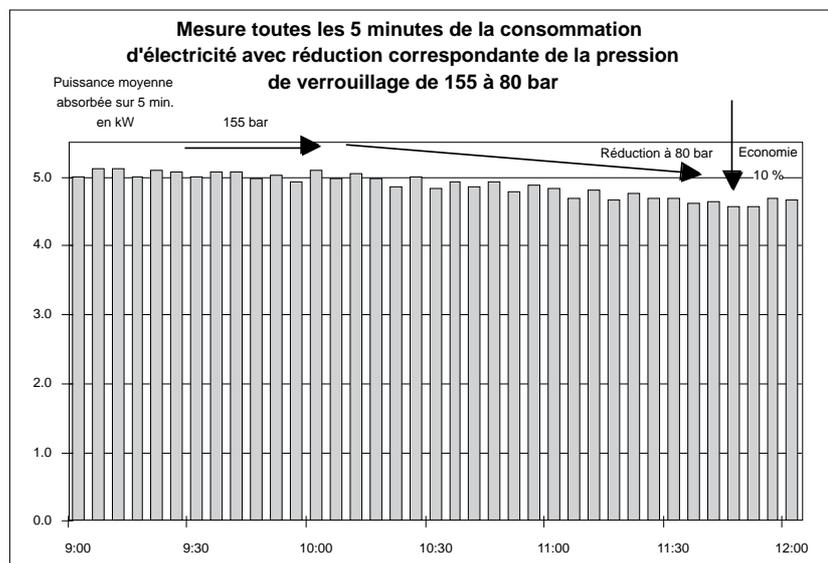
Heure	Consommation		Puissance	Pression de verrouillage bar	
	Somme kWh	Par 5 min. kWh	sur 5 min. kW		
10:00	522,53	0,43	5,1	155	
10:05	522,94	0,42	5,0		
10:10	523,37	0,42	5,1		
10:15	523,78	0,42	5,0		
10:20	524,19	0,41	4,9		
10:25	524,61	0,42	5,0	130	
10:30	525,01	0,40	4,8		
10:35	525,42	0,41	4,9		
10:40	525,83	0,41	4,9		
10:45	526,24	0,41	4,9		
10:50	526,64	0,40	4,8	120	
10:55	527,05	0,41	4,9		
11:00	527,45	0,40	4,9		
11:05	527,84	0,39	4,7		
11:10	528,25	0,40	4,8		100
11:15	528,64	0,39	4,7		
11:20	529,03	0,40	4,8		
11:25	529,42	0,39	4,7	90	
11:30	529,82	0,39	4,7		
11:35	530,20	0,39	4,6		80
11:40	530,59	0,39	4,7		
11:45	530,97	0,38	4,6		
11:50	531,36	0,38	4,6	100	
11:55	531,75	0,39	4,7		
12:00	532,14	0,39	4,7		

Présentation graphique

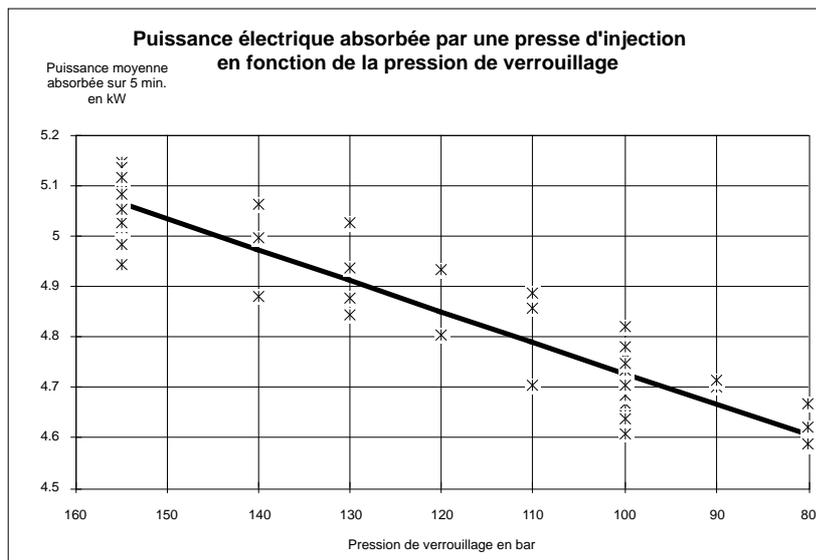


On reporte la puissance moyenne absorbée par tranches de 5 minutes en fonction du temps (figure A7-1). On constate que, à partir de 11 h 45, elle baisse nettement. Ce qui correspond à une réduction de la pression de verrouillage de 155 à 80 bar.

Figure A7-1  
 Mesure toutes les 5 minutes  
 de la consommation d'électricité  
 d'une presse d'injection dont la  
 pression de verrouillage  
 est progressivement ramenée  
 de 155 à 80 bar



Pour mieux faire apparaître le rapport entre les grandeurs étudiées, on présente dans la figure A7-2 la consommation d'électricité en fonction de la pression de verrouillage. Les points de ce graphique correspondent aux consommations mesurées, la droite exprime leur tendance générale.



Au vu de ces résultats et du potentiel d'économies qu'ils indiquent, on a prié les conducteurs de presse de ramener immédiatement les pressions de verrouillage à leur minimum technique.

### **Autres applications de la méthode**

En s'inspirant de l'exemple ci-dessus, on peut étudier l'influence de tous les autres paramètres de réglage sur la consommation électrique des presses d'injection.

## A8 Calcul de la consommation spécifique d'électricité dans la fabrication d'une pièce de série

*Exemple : une pièce en plastique*

### Présentation du cas

Les quelques 50 presses d'injection d'un atelier de moulage de pièces en plastique produisent chaque année environ 2000 pièces différentes. La facture énergétique représente en tout de 2 à 3 % des coûts de production, avec de fortes variations selon le type de pièces produites. Comme la consommation exacte par pièce n'est pas connue, on n'a jamais calculé la facture énergétique exacte de chaque pièce. On s'est contenté de l'évaluer globalement à partir du taux d'utilisation des machines. La facture énergétique des pièces dont la fabrication consomme beaucoup d'énergie a donc été sous-estimée, celle des pièces ne consommant que peu d'énergie surestimée.



En améliorant ce calcul, on peut déterminer le coût énergétique des différentes pièces et le répercuter sur la facture du client. Cela peut l'inciter à choisir des modèles ou des matériaux plus économiques du point de vue énergétique.

On pense que la fabrication de petites pièces consomme relativement plus d'énergie que les autres parce que le rapport entre la carotte (chute) et la pièce finie y est très défavorable.

### Rédaction du questionnaire

- Quelle est l'énergie nécessaire à la fabrication d'une pièce donnée ?
- La consommation spécifique varie-t-elle d'une pièce à l'autre ?
- La consommation spécifique dépend-elle du poids des pièces finies ?



### Fixation des limites de l'analyse

Pour répondre à ces questions, il faut mesurer l'électricité consommée par une machine produisant différentes pièces. La mesure doit être effectuée lorsque la machine est préchauffée et dans des conditions d'exploitation constantes, sans temps mort (réglage, interruptions, arrêt retardé, etc.). Comme la machine est équipée pour une nouvelle production tous les 1 à 3 jours, la consommation d'électricité doit être mesurée sur une période de 10 jours, toutes les 5 minutes.



### Saisie des données



Le meilleur point de mesure se révèle être l'arrivée du courant dans l'armoire de commande de la machine : les fils électriques sont aisément accessibles, il y a suffisamment de place pour l'appareil de mesure. On y installe donc un appareil programmable et à mémoire relié aux fils d'arrivée par des pinces ampèremétriques. On le programme pour qu'il effectue une mesure de courant toutes les 5 minutes pendant 10 jours, qu'il additionne et enregistre ces valeurs. L'armoire est ensuite refermée. Pour le personnel, il n'y a aucun changement visible. L'installation et la programmation de l'appareil de mesure prennent environ 20 minutes.

On pose à côté de la machine un registre dans lequel, pendant ces 10 jours, le personnel note toutes ses interventions sur la machine, en précisant la date, l'heure, l'état du compteur et la raison de l'intervention. Par ailleurs, le chef d'atelier note dans un formulaire préparé à cet effet les principaux paramètres de réglage de la machine pour chaque nouvelle série, ainsi que le type et la quantité de pièces en plastique fabriquées.

A l'issue des 10 jours, l'appareil de mesure est démonté et les données enregistrées transcrites sur disquette.

### Traitement des résultats



Les données de la disquette sont chargées dans un programme d'ordinateur (tableur Excel). Première opération sur les chiffres bruts : la copie des mesures prises à intervalles de 5 minutes sur une liste verticale. En regard de chacune de ces valeurs, on reporte la date, l'heure et la consommation cumulée (voir le tableau A8-1, colonnes 1, 2, 3). Ensuite, en étudiant le protocole de fabrication, on détermine les périodes au cours desquelles la machine était occupée par la fabrication ininterrompue des diverses pièces. On reporte les valeurs initiales et finales du compteur de courant et du compteur de pièces de chacune de ces périodes sur les lignes a à d d'un nouveau tableau (A8-1). Après quoi, on calcule par soustraction et reporte dans les colonnes des lignes e à f de ce tableau le nombre de pièces fabriquées et la consommation correspondant à chacune de ces périodes.

Ligne		Calcul	Unité	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4
a	Compteur électrique début	mesuré	kWh	23	256	303	357
b	Compteur électrique fin	mesuré	kWh	179	294	346	479
c	Compteur pièces début	protocole	pièces	18'778	334	320	2'430
d	Compteur pièces fin	protocole	pièces	122'678	2'294	1'880	36'432
e	Consommation courant	b-a	kWh	156	38	43	122
f	Production pièces	d-c	pièces	103'900	1'960	1'560	34'002
g	Poids des pièces	fiche technique	g	0,10	7,50	11,61	0,73
h	Consommation spécifique par pièce	e/f	Wh/pièce	1,6	19,3	27,6	3,6
i	Consommation spécifique par g de pièce	h/g	Wh/g	15,9	2,6	2,4	4,9

Tableau A-8  
Interprétation des mesures et calcul des consommations absolues et spécifiques

Calcul des indices de dépense d'énergie (lignes h et i) :

La consommation spécifique d'électricité par pièce est le quotient de la consommation d'une tranche de 5 minutes par le nombre de pièces fabriquées pendant ce temps.

La consommation spécifique d'électricité par gramme de pièce est le quotient de la consommation spécifique par pièce par le poids des pièces tel qu'indiqué dans les fiches techniques.

### Présentation graphique

Pour bien mettre en évidence le rapport entre le poids des pièces et la consommation spécifique de courant, on reporte dans la figure A8-1 la quantité d'électricité consommée en fonction du poids des pièces. La courbe exprime la tendance indiquée par les quatre mesures.



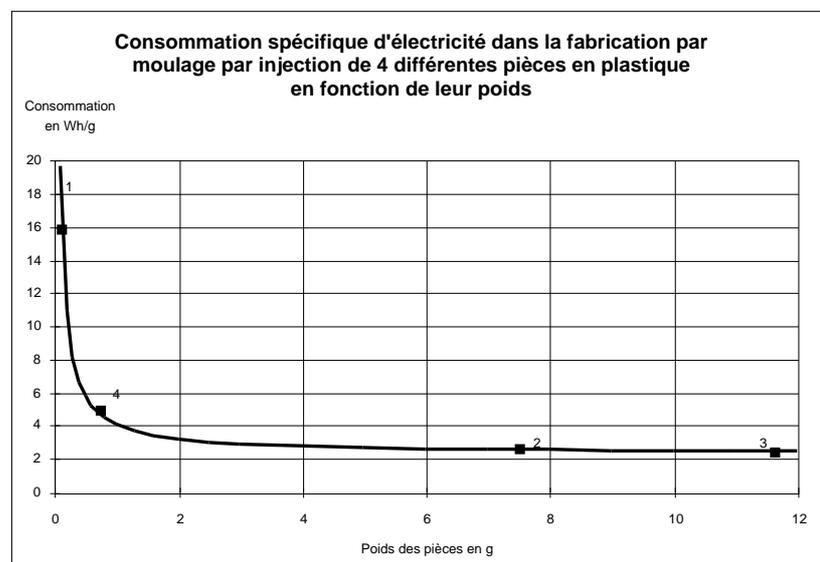
### Interprétation des résultats



La consommation spécifique d'électricité liée à la fabrication des quatre pièces considérées varie, sur la même machine, de 2,4 à 15,9 kWh par gramme de pièce. Soit selon un facteur 6 (voir la figure A8-1). Ce qui démontre, comme on le pensait, que la consommation spécifique des différentes pièces peut énormément varier.

Cela indique également que la consommation spécifique des petites pièces est supérieure aux autres. En raison du petit nombre de pièces étudiées (4), il est difficile d'être plus précis. Il est probable que certains paramètres ignorés dans ces mesures (p. ex. type de plastique, température de transformation, part des chutes, etc.) interviennent également dans cette consommation spécifique.

*Figure A8-1  
Consommation spécifique  
d'électricité dans la fabrication par  
moulage par injection  
de 4 différentes pièces en plastique,  
en fonction de leur poids*



### Application des conclusions



Ces mesures limitées dans le temps montrent qu'il existe une méthode simple de déterminer la consommation spécifique d'électricité du moulage de pièces en plastique par injection. La direction de l'entreprise étudie actuellement la questions suivante : est-il intéressant, lorsqu'on moule les échantillons de nouvelles pièces, de déterminer leur consommation spécifique d'électricité et d'en tenir compte dans le calcul des prix ?

### Autres applications de la méthode

A partir de la consommation spécifique, on peut déterminer le coût énergétique spécifique (fr. d'énergie / pièce, ou fr. d'énergie / g de pièce).

## A9 Calcul de la consommation spécifique d'électricité d'une machine

*Exemple : une presse d'injection*

### Présentation du cas

Les quelques 50 presses d'injection d'un atelier de moulage de pièces en plastique produisent chaque année environ 2000 pièces différentes. Il s'agit de machines de tailles, d'origines et d'âges divers. Lors du choix de la machine convenant le mieux à la fabrication d'une nouvelle série, on ne tient pas compte de sa consommation électrique.



Si l'on connaissait la consommation spécifique des différentes machines, il serait possible d'en tenir compte dans l'organisation du travail et d'utiliser pour chaque type de pièce la machine énergétiquement la plus avantageuse. L'information réunie serait aussi utile lors de l'achat d'une nouvelle machine.

On suppose qu'une part de la consommation d'énergie de chaque machine est constante, c'est-à-dire ne dépend pas des pièces en cours de fabrication mais uniquement des pertes à couvrir. Le reste de la consommation dépendrait (entre autres) de la taille des pièces fabriquées, de l'outil utilisé et du mode de transformation du plastique.

### Rédaction du questionnaire

- Quelle est la consommation énergétique d'une machine donnée ?
- Quelle grandeur de référence faut-il choisir pour caractériser la consommation spécifique d'une machine ?
- Dans quelle mesure la consommation spécifique dépend-elle de la charge de la machine ?



### Fixation des limites de l'analyse

Pour répondre aux questions ci-dessus, il faut mesurer l'électricité consommée par une machine fabriquant successivement différentes pièces. La mesure doit se faire lorsque la machine est préchauffée et dans des conditions d'exploitation constantes, sans temps mort (réglage, interruptions, arrêt retardé, etc.). Comme la machine est équipée pour une nouvelle production tous les 1 à 3 jours, la consommation d'électricité doit être mesurée sur une période de 10



jours, toutes les 5 minutes. Pour déterminer les indices de dépense énergétique de la machine, il faut mettre en rapport la quantité de plastique transformée chaque heure (pièces fabriquées plus chutes) avec sa consommation d'électricité.

### Saisie des données



Le meilleur point de mesure se révèle être l'arrivée du courant dans l'armoire de commande de la machine : les fils électriques sont aisément accessibles, il y a suffisamment de place pour l'appareil de mesure. On y installe donc un appareil programmable et à mémoire relié aux fils d'arrivée par des pinces ampèremétriques. On le programme pour qu'il effectue une mesure de courant toutes les 5 minutes pendant 10 jours, qu'il additionne et enregistre ces valeurs. L'armoire est ensuite refermée. Pour le personnel, il n'y a aucun changement visible. L'installation et la programmation de l'appareil de mesure prennent environ 20 minutes.

On pose à côté de la machine un registre dans lequel, pendant ces 10 jours, le personnel note toutes ses interventions sur la machine, en précisant la date, l'heure et la raison de l'intervention (un simple mot) ainsi que l'état du compteur de cycles. Rien d'autre n'est modifié dans le processus habituel de fabrication.

A l'issue des 10 jours, l'appareil de mesure est démonté et les données enregistrées transcrites sur disquette.

### Traitement des résultats



Les données de la disquette sont chargées dans un programme d'ordinateur (tableur Excel). Première opération sur les chiffres bruts : la copie des mesures prises à intervalles de 5 minutes sur une liste verticale. En regard de chacune de ces valeurs, on reporte la date, l'heure et la consommation cumulée (voir le tableau A6-1, colonnes 1, 2, 3).

Ensuite, en étudiant le protocole de fabrication, on détermine les périodes au cours desquelles la machine était occupée par la fabrication ininterrompue des diverses pièces. On reporte les valeurs initiales et finales de ces périodes (date, heure, état du compteur de courant et du compteur de pièces) dans les lignes a à f d'un nouveau tableau (A9-1). Après quoi, on calcule par soustraction et reporte dans les colonnes des lignes e à f de ce tableau le nombre de pièces fabriquées et la consommation correspondant à chacune de ces périodes (ligne a, h et i). Le poids du plastique utilisé dans chaque moule (poids de la pièce et de ses chutes), indiqué sur les fiches techniques, ont été reportés dans le tableau.

Ligne	Machine 1	Calcul	Unité	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4
<i>a</i>	Date, heure début	<i>protocole</i>	date heure	11.7 07:15	15.7 06:30	17.7 08:15	18.7 07:25
<i>b</i>	Date, heure fin	<i>protocole</i>	date heure	12.7 15:00	15.7 13:25	17.7 16:31	19.7 07:29
<i>c</i>	Compteur él. début	<i>mesuré</i>	kWh	23	256	303	357
<i>d</i>	Compteur él. fin	<i>mesuré</i>	kWh	179	294	346	469
<i>e</i>	Compteur pièces, début	<i>protocole</i>	pièces	18'778	334	320	2'430
<i>f</i>	Compteur pièces, fin	<i>protocole</i>	pièces	122'678	2'294	1'880	36'432
<i>g</i>	Différence temps	<i>b-a</i>	heures	1'905	415	486	1'444
<i>h</i>	Différence courant	<i>d-c</i>	kWh	156	38	43	112
<i>i</i>	Différence pièces	<i>f-e</i>	pièces	103'900	1'960	1'560	34'002
<i>k</i>	Poids par moulage	<i>fiche technique</i>	g	9,58	17,52	14,42	7,23
<i>l</i>	Pièces par moulage	<i>fiche technique</i>	pièces	16	2	1	6
<i>m</i>	Nbre de cycles	<i>i/l</i>	pièces	6'494	980	1'560	5'667
<i>n</i>	Masse de plastique transformée	<i>k · m</i>	kg	62,2	17,26	22,5	41,0

Tableau A-9-1  
Interprétation des mesures et calcul des consommations absolues

L'étape suivante consiste à calculer les indices de dépense d'énergie. Pour cela, on calcule la masse de plastique transformée par heure (puissance de transformation) et la puissance électrique moyenne absorbée par heure. En divisant la puissance électrique par la masse de plastique transformée chaque heure, on obtient la consommation spécifique de courant par kilo de plastique transformé.

Tableau A9-2  
Calcul des indices des quatre séances de mesure

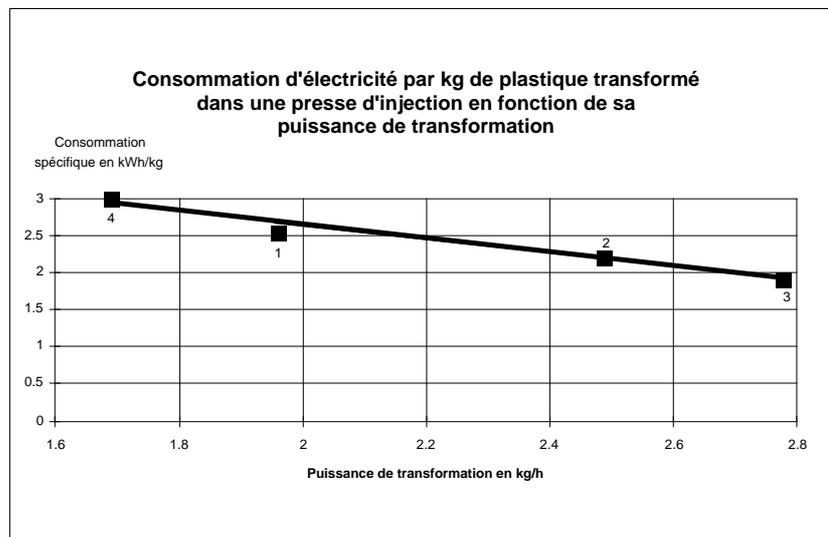
Ligne	Machine 1	Calcul	Unité	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Pièce 4
<i>o</i>	Puissance de transformation	$n/g$	kg/h	1,96	2,50	2,78	1,70
<i>p</i>	Puissance absorbée	$h/g$	kW	4,8	5,5	5,3	5,1
<i>q</i>	Consommation rapportée à la production	$h/n$	kWh/kg	2,5	2,2	1,9	3,0

### Présentation graphique



Pour faire apparaître le rapport entre la puissance de transformation des machines et leur consommation spécifique, on reporte dans la figure A9-1 la consommation d'électricité par kg de plastique transformé en fonction de la puissance de transformation et, dans la figure A9-2, la puissance moyenne absorbée en fonction de la puissance de transformation.

Figure A9-1  
Consommation d'électricité par kg de plastique transformé dans une presse d'injection en fonction de sa puissance de transformation



### Interprétation des résultats



Quatre pièces différentes ont été fabriquées au cours de la séance de mesure. La masse de plastique transformée à l'heure (puissance de transformation) a varié entre 1,7 et 2,8 kg par heure.

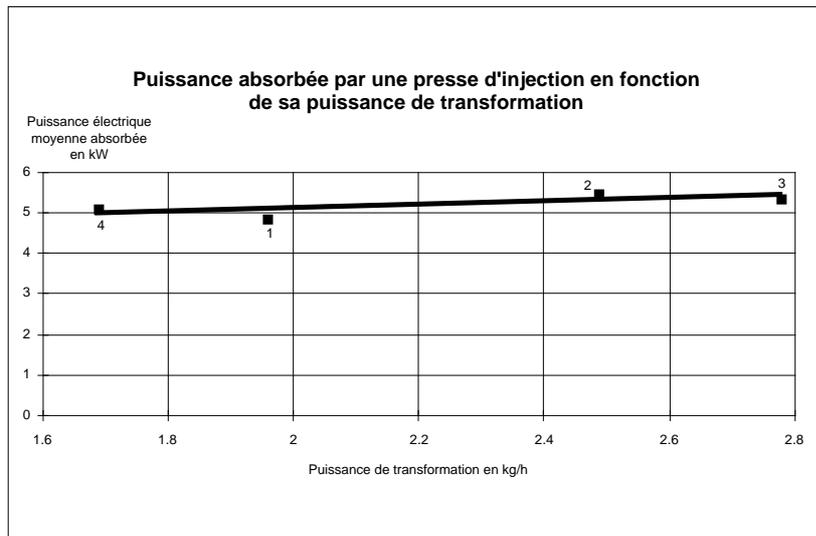


Figure A9-2  
Puissance absorbée par une presse d'injection en fonction de sa puissance de transformation

Les mesures portent sur une gamme de pièces trop restreinte pour qu'on en tire des conclusions définitives. On constate toutefois :

La consommation spécifique de courant ramenée à la masse de plastique transformée varie entre 1,9 et 3,0 kWh. On constate clairement sur la figure A9-1 que la consommation spécifique diminue lorsqu'augmente la puissance de transformation : la machine travaille alors plus efficacement.

On constate sur la figure A9-2 que la puissance électrique moyenne absorbée varie entre 4,8 et 5,5 kW. La droite de tendance est presque horizontale, ce qui indique que la puissance absorbée est presque indépendante de la puissance de transformation et sert donc surtout à couvrir les pertes à l'intérieur de la machine.

### Application des conclusions

Ces mesures limitées dans le temps montrent qu'il existe une méthode simple pour déterminer la consommation spécifique d'une machine. La direction de l'entreprise étudiée actuellement l'intérêt qu'il y aurait à déterminer la consommation spécifique des autres machines.



Les mesures effectuées sur cette unique machine permettent déjà de constater que :

- les pièces devraient être fabriquées sur les plus petites machines capables de les produire, de manière à en exploiter optimalement la capacité de transformation,
- il convient de bien exploiter la capacité de la machine, c'est-à-dire de prévoir autant de cavités que possible dans le moule,
- lors de l'achat d'une nouvelle machine, on choisira la plus petite de celles qui conviennent.

## Partie B Méthode d'analyse énergétique

### Vue d'ensemble

A première vue, il peut paraître difficile et compliqué de se lancer dans une analyse énergétique. En effet :

- les entreprises utilisent plusieurs formes d'énergie, et l'énergie utilisée est souvent convertie d'une forme sous une autre. C'est pourquoi on parle de flux d'énergie ;
- les différents flux s'influencent les uns les autres, si bien qu'il faut toujours garder l'ensemble à l'esprit ;
- les différents circuits d'alimentation en énergie ont souvent été installés au fil des années, ce qui complique singulièrement leur appréhension globale ;
- l'énergie consommée n'est pas l'unique grandeur à retenir, il y a aussi la puissance absorbée. Distinguer entre ces deux grandeurs pose souvent des problèmes.

La méthode présentée ci-dessous montre comment, par des moyens légers, en procédant à des simplifications judicieuses et en suivant une démarche systématique, il est souvent possible d'obtenir des résultats très utiles et de procéder à une évaluation énergétique de toute l'entreprise, des différentes chaînes de fabrication, des installations ou des machines.

La méthode d'analyse énergétique en question repose sur les bases suivantes :

- l'analyse doit être menée aussi près du processus de fabrication que possible. Chaque processus doit être étudié de manière aussi isolée que possible ;
- l'analyse doit se limiter au plus petit nombre de grandeurs possible. Seuls les principaux inputs et outputs devraient être considérés (matières premières, produits fabriqués, principaux flux énergétiques) ;
- les simplifications sont décidées de manière explicite et on en tient compte dans l'interprétation des résultats ;
- on limite le plus possible le nombre de mesures et la précision qu'on leur impose ;
- les calculs auxquels les mesures donneront lieu et leur interprétation doivent être explicités avant chaque mesure ;
- effectuer des mesures n'a de sens que si l'on a clairement décidé de les analyser puis d'appliquer les conclusions de cette analyse dans les ateliers.

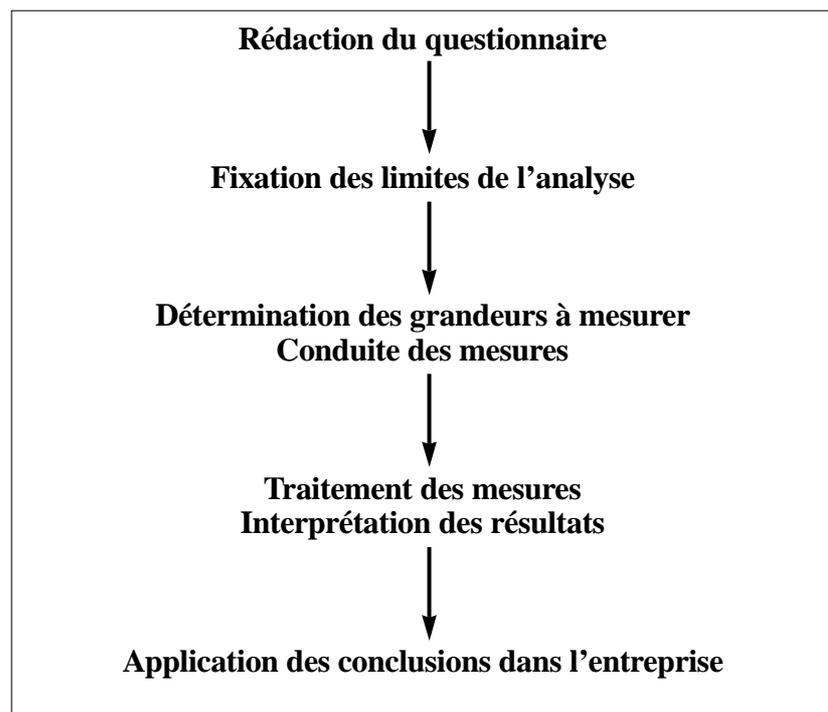
### A quoi sert l'analyse énergétique ?

### Principes de base

- L'analyse énergétique et l'application de ses résultats à la fabrication présuppose un personnel ouvert aux échanges d'expériences, disposé à se perfectionner, à appliquer de nouvelles techniques et à revoir ses priorités. Ce qui implique une certaine souplesse d'esprit et la volonté d'agir.

**Démarche** Il est souvent avantageux de procéder en deux temps. Dans le premier, on se fait une idée générale des flux d'énergie et de coûts pour réfléchir aux principales possibilités d'amélioration. Cette réflexion permet de localiser les endroits où il vaut la peine de poursuivre l'analyse. Ce n'est qu'après avoir fait la part entre ce qui est déterminant et ce qui est négligeable que l'on passera au second temps, celui de l'analyse détaillée.

La démarche que nous recommandons est la suivante :



Les cinq grands pas de cette démarche s'enchaînent logiquement, mais on peut les parcourir plusieurs fois car les questions qu'on se pose (pas 1) doivent souvent être reformulées en fonction des mesures effectivement réalisables et selon les résultats qu'on aura obtenus (pas 4).



## Premier pas : Rédaction du questionnaire

Le premier pas de l'analyse énergétique, et le plus important, consiste à formuler les questions concrètes auxquelles l'analyse doit répondre. On évaluera aussi le bénéfice qu'on attend de ces réponses afin de mieux orienter le travail de mesure, de traitement et d'interprétation des résultats. Le questionnaire sert également à préciser et à circonscrire les flux énergétiques soumis à l'analyse et à fixer la précision des mesures.

L'exemple ci-dessous permet de préciser ce qu'on entend par « rédiger le questionnaire ».

Dans un premier temps, le questionnaire permet de préciser ce qu'on attend en gros de l'analyse. Dans un second temps, il permet d'étudier plus à fond les points faibles qui auront été relevés. L'analyse des points faibles nécessite une méthode systématique de mesure de l'énergie consommée et d'évaluation des principales installations consommatrices. L'objectif fixé à l'analyse des points faibles est, en termes généraux :

- la détermination des principaux flux d'énergie ;
- la détermination des flux de pertes énergétiques ;
- l'évaluation du potentiel d'amélioration ;
- la localisation des possibilités de récupération de chaleur, de couplage chaleur-force, etc. ;
- le choix des priorités dans les mesures d'amélioration, compte tenu des économies énergétiques à en attendre, des investissements prévus à long et à moyen terme et des rénovations ou transformations envisagées.

L'objectif de l'analyse est ici de mettre en évidence les facteurs qui, dans la chaîne de fabrication, influencent la consommation d'énergie. De nombreux facteurs peuvent être modifiés dans certaines limites : température, pauses, matériaux, régime, vitesse, pression, etc. On n'a souvent qu'une idée imprécise de leur influence sur la consommation si bien qu'on n'en tient pas particulièrement compte lors du réglage des installations. Une meilleure connaissance des rapports entre ces différentes variables permet souvent de réaliser des économies non négligeables.

Lors de l'étude de la rénovation d'une installation, du choix du mode de production d'un article particulier ou de l'achat d'une nouvelle machine, on ne compare souvent que les investissements directs en négligeant les frais d'exploitation. D'ailleurs, les informations permettant d'évaluer la consommation d'énergie dans des conditions d'exploitation données ne sont pas disponibles.

**A quoi peut nous servir une analyse énergétique ?**

**Quels sont les points énergétiquement faibles d'une entreprise ?**

**Quels facteurs influencent la consommation d'énergie ?**

**Comment procéder à l'évaluation énergétique d'une installation ou d'une machine ?**

L'objectif de l'analyse énergétique, dans ce cas, est de trouver l'indice permettant de comparer les options selon leur consommation en énergie et des dépenses qui en découlent.

La consommation absolue en énergie (p. ex. en kWh/année) n'a d'utilité que lorsque les options sont équivalentes du point de vue de la production et de l'insertion dans les ateliers. Lorsque ce n'est pas le cas, il faut définir des indices de dépense d'énergie du type kWh/pièce ou kWh/tonne. Ces indices permettent également d'établir des comparaisons entre ateliers. Dans les installations dont la charge varie avec le temps, il est recommandé de déterminer la variation de ces indices avec la charge de travail.

**Peut-on améliorer le rendement énergétique d'une installation ou d'une machine en en modifiant le plan d'exploitation ?**

Lorsque qu'un atelier est équipé d'installations ou de machines qui ne fonctionnent pas toujours à pleine charge, on peut se demander quel en est le mode d'exploitation optimal sous l'angle énergétique. Les problèmes suivants peuvent se présenter :

- Une pièce peut être fabriquée sur différentes machines. Quelle est la machine énergétiquement la plus avantageuse ?
- Est-il plus avantageux d'exploiter une machine 24 heures ou 3 machines pendant 8 heures ?
- Est-il plus avantageux de faire tourner une installation à pleine charge pendant un certain temps puis de l'arrêter, ou de la faire fonctionner plus longtemps à charge partielle ?

**Peut-on améliorer l'organisation d'un atelier du point de vue énergétique ?**

Il est parfois possible de réduire les pertes d'énergie en limitant les temps de marche à vide, d'arrêt ou de préchauffage des installations, ou encore en améliorant l'organisation même du travail. Il échoit à l'analyse énergétique de localiser ces potentiels d'économie. A partir de là, il sera possible d'étudier le rapport coûts/économies des mesures envisageables. On peut, p. ex., se poser les questions suivantes :

- Faut-il arrêter une machine qui tourne à vide ou vaut-il mieux la laisser tourner entre deux mises en charge ?
- A quel moment faut-il, au plus tard, enclencher une installation pour qu'elle soit prête à fonctionner à l'heure voulue ?
- Est-il parfois indiqué ne pas enclencher telle partie d'une installation que plus tard ?
- A combien s'élèvent les pertes de marche à vide ? Y a-t-il moyen de les réduire (p. ex. en isolant temporairement un organe) ?
- Est-il indiqué d'arrêter une installation pendant le week-end ?

**Comment inciter le personnel à économiser l'énergie ?**

Le personnel peut, dans une certaine mesure, réduire la consommation d'énergie des ateliers, p. ex. en réglant correctement les installations, en veillant à leur bon fonctionnement, en détectant toutes les défaillances. Il est souvent possible de limiter le gaspillage en attirant l'attention du personnel sur les pertes d'énergie les plus fréquentes. Il peut donc être indiqué de mesurer périodiquement la



consommation d'énergie (quotidiennement, hebdomadairement ou mensuellement) et de la communiquer aux intéressés. En tenant compte des points suivants :

- on ne citera pas dans ce cadre les perturbations dues, p. ex., aux variations de charge, aux changements de fabrication, etc. Ces événements sont pris en compte par les indices spécifiques ;
- dans la mesure du possible, on ne présentera aux différents employés que les flux d'énergie sur lesquels ils ont une influence ;
- ces informations doivent être présentées de manière particulièrement claire et parlante.

Le mode de répartition des coûts en usage dans les entreprises est souvent sans aucune utilité pour l'analyse des coûts énergétiques parce qu'il ignore bien des informations pertinentes à cet égard. Il est pourtant souhaitable de pouvoir répartir la consommation réelle d'énergie. En effet :

- cela permet de conscientiser le personnel occupé aux points de production consommant le plus d'énergie ;
- en répercutant les coûts énergétiques sur le prix des éléments qui les occasionnent, on contribue à clarifier les prix, ce qui est salubre du point économique.

En intégrant le coût réel de l'énergie dans le calcul des prix, on favorise la fabrication d'articles consommant moins d'énergie.

Les entreprises fabriquant des articles du même type ou exploitant des procédés semblables ont tout intérêt à échanger leurs expériences, qu'il s'agisse de la gestion énergétique de leurs procédés de fabrication, des possibilités d'économiser l'énergie ou des nouvelles techniques. Ces échanges renforcent leur position sur le marché. Mais pour se livrer à des comparaisons, il faut définir des indices communs et préciser dans quelles conditions les mesures ont été effectuées.

On trouvera dans la partie C de ce manuel une check-list consacrée au questionnaire. Il est recommandé de la copier, de la remplir et de la joindre au dossier préliminaire de l'analyse. La tâche des personnes chargées de l'analyse en sera facilitée.

**Comment répartir correctement les dépenses énergétiques ?**

**Notre consommation d'énergie tient-elle la comparaison avec celle d'autres entreprises**

**Check-list Questionnaire**

## Deuxième pas : Fixation des limites de l'analyse

Pour que l'analyse des flux débouche sur des résultats clairs, il est nécessaire d'en circonscrire le champ. On n'étudie que ce qui sert à répondre aux questions posées (objectifs). En rapprochant le plus possible les points de mesure des installations étudiées, on réduit les perturbations possibles, ce qui facilite l'interprétation des résultats. Il faut simplifier le problème en écartant les variables non cruciales, tout en gardant ces simplifications à l'esprit.

Les points essentiels à retenir lorsqu'on circonscrit l'analyse sont les suivants :

### **Sur quelles parties de l'entreprise l'analyse porte-t-elle ?**

Faut-il chercher tous les points faibles de l'entreprise ou se cantonner à la production, voire à certains secteurs de la production ? Selon les questions posées, on étudiera les flux énergétiques dans leur ensemble ou l'on ne considérera que les flux intervenant dans un processus particulier. Lorsqu'on souhaite procéder à l'évaluation énergétique d'un produit, il faut parfois également considérer l'énergie nécessaire à la préparation de ses matériaux, à son transport et à son élimination.

Dans le travail de circonscription de l'analyse et de répartition des coûts énergétiques, on tiendra compte dans la mesure du possible des entités existantes que sont les bâtiments, les divisions de l'entreprise, sa comptabilité, les modes de calcul, les méthodes de préparation du travail, etc.

### **Faut-il décomposer le processus étudié ?**

La décomposition d'un processus de fabrication en ses différentes étapes et l'analyse séparée de ces étapes permet d'aboutir à des conclusions plus ciblées et concrètes, mais augmente le travail de mesure et d'interprétation des différents flux d'énergie. Il n'est d'autre part possible de procéder à une telle décomposition que lorsque les différentes étapes sont spatialement distinctes. Il est parfois indiqué de procéder en deux temps : une analyse grossière du processus global, puis l'analyse détaillée des étapes énergétiquement critiques.

### **Quelles énergies doit-on considérer ?**

Il est facile de calculer les quantités d'énergie utilisées à partir, p. ex., des factures de fournisseurs et des variations de stock. L'énergie n'est toutefois pas toujours utilisée sous sa forme originale mais d'abord convertie sous forme de vapeur, de froid, d'air comprimé, etc. En principe, on la mesurera sous sa forme finale. Faute de quoi, on pourrait, p. ex., imputer les pertes de transformation au faux organe. Ainsi, lorsque qu'une installation utilise de la vapeur, on s'efforcera de mesurer la quantité de vapeur absorbée par le processus et non pas la consommation de combustible du générateur



de vapeur. Il arrive cependant qu'on ignore cette consigne lorsqu'il est beaucoup plus simple de mesurer l'énergie sous sa forme première.

L'analyse énergétique doit d'autre part se concentrer sur les énergies les plus importantes. Lorsqu'un processus utilise plusieurs formes d'énergie, p. ex. l'électricité, l'air comprimé et le froid, il est fréquent que l'une d'elles soit prédominante ou qu'un flux dépende d'un autre (la quantité de froid nécessaire peut dépendre de la chaleur dégagée par les appareils électriques) et puisse donc en être dérivée. On calculera toujours de manière distincte la puissance absorbée et l'énergie consommée. Cette dernière est l'objet principal de l'analyse énergétique, mais l'étude de la puissance absorbée permet souvent de la compléter et de réaliser d'intéressantes économies.

Selon les questions posées, l'installation (ou la machine) sera étudiée en régime stable (préchauffée et dans des conditions constantes de fabrication), en charge partielle, en marche à vide, en phase de préchauffage ou sous tout autre régime. Il faut parfois définir les « conditions normales » sous lesquelles la consommation d'énergie doit être mesurée. Ces conditions peuvent varier selon les secteurs, les ateliers ou les cas particuliers.

Lorsqu'il s'agit de déterminer les indices de dépense d'énergie de machines ou d'installations, une séance est généralement suffisante ; il arrive aussi qu'on doive la répéter. Lorsqu'il s'agit de déterminer la consommation énergétique par produit, il faudra procéder à une série de mesures pour chacun des produits. Et si le produit en question peut être fabriqué sur plusieurs machines, il faudra répéter les mesures sur chacune d'elles.

Lorsqu'on suit de près la consommation d'une machine pour en surveiller le fonctionnement ou pour motiver le personnel, il faut effectuer les mesures périodiquement (annuellement, mensuellement, hebdomadairement, quotidiennement ou en continu), et toujours au même moment.

On trouvera dans la partie C de ce manuel une check-list consacrée à la circonscription de l'analyse. Il est recommandé de la copier, de la remplir et de la joindre au dossier préliminaire de l'analyse. La tâche des personnes chargées de l'analyse en sera facilitée.

**En quel mode de fonctionnement les installations doivent-elles être analysées ?**

**Combien de séances de mesure faut-il envisager ?**

**Check-list  
Limites de l'analyse**

### Troisième pas : Détermination des grandeurs à mesurer, conduite des mesures

Le principe de base est de mesurer le moins possible. Les valeurs dont on a besoin peuvent souvent être dérivées de variables déjà mesurées, moyennant un peu de réflexion et quelques calculs.

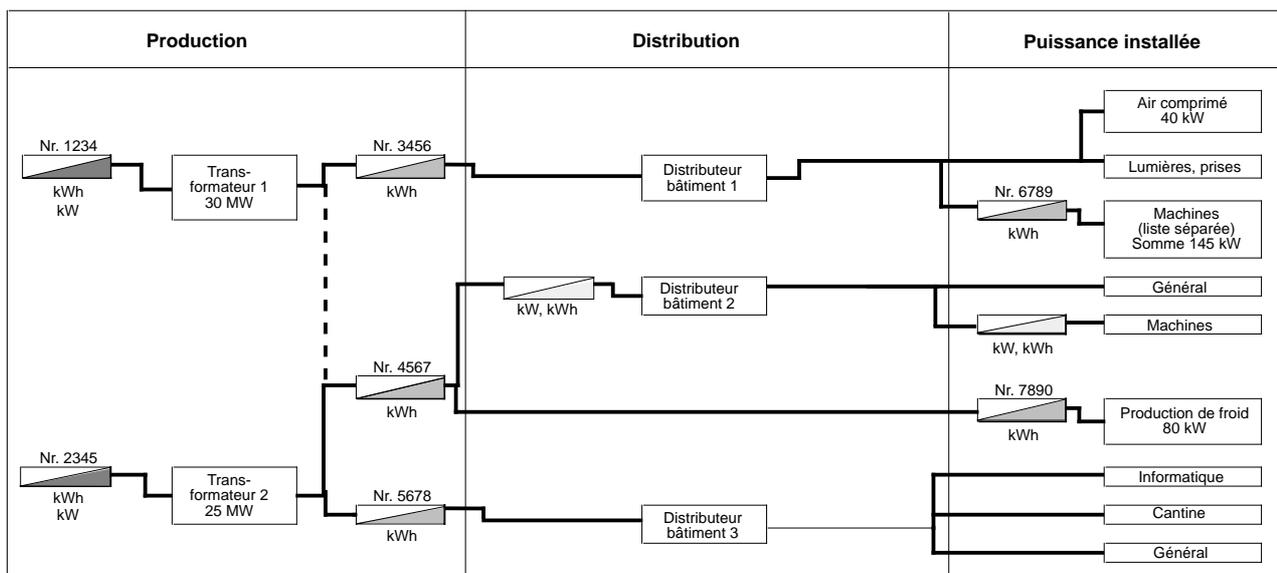
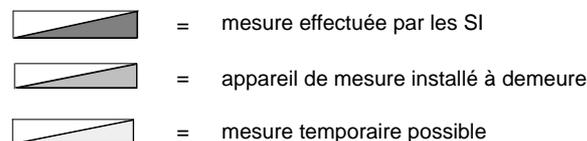
#### Où mesurer ?

On choisira les points de mesure en fonction de la disposition des installations. Il est donc nécessaire de bien connaître toutes les installations de conversion et de distribution de l'énergie. Il sera parfois nécessaire de commencer par en dresser le plan. L'illustration B-1 présente un exemple de schéma de distribution de l'énergie.

Le choix des points de mesures doit obéir aux critères suivants :

- les points de mesure doivent être aussi proches que possible de l'installation analysée ;
- on réduira au minimum les frais d'installation des appareils de mesure ;
- lorsqu'une lecture périodique s'impose, la saisie et la transmission des mesures devraient être automatisées.

Figure B-1  
Exemple de schéma de la distribution d'électricité dans une industrie





Avant chaque mesure, on se demandera si les moyens engagés sont en rapport avec le résultat escompté. Selon les circonstances, on renoncera à telle mesure ou l'on déterminera la valeur du flux d'énergie étudié par calculs. Ainsi, la consommation d'air comprimé peut être dérivée de la consommation d'électricité ou du temps de fonctionnement du compresseur (tenir compte du rendement du compresseur). Les frais occasionnés par la mesure de différents flux d'énergie peuvent être très variables; ils dépendent aussi de la précision exigée. Les appareils de mesure ne devraient pas être plus précis que nécessaire; ils doivent être choisis de manière à pouvoir saisir en toute sécurité les fluctuations de la consommation qu'on souhaite mettre en évidence. Le tableau B-1 présente le coût, la précision, et les risques d'erreur des appareils utilisés pour mesurer les formes d'énergie les plus fréquentes :

## Moyens engagés

Grandeur mesurée	Coût des mesures	Précision d'erreur	Risques
Electricité	faible	élevée	limités
Vapeur	élevé	moyenne	élevés
Froid	élevé	moyenne	moyens
Air comprimé	élevé	moyenne	moyens
Eau surchauffée	moyen	élevée	limités
Eau chaude	faible	moyenne	limités

*Tableau B-1  
Coût, précision et risques  
d'erreur des principales  
techniques de mesure*

On choisira la durée des séances de mesure de manière à permettre aux fluctuations statistiques de se compenser tout en laissant apparaître les fluctuations d'exploitation. Le moment de la lecture des mesures isolées doit être adapté au processus étudié. La lecture des mesures périodiques doit toujours être effectuée selon le même schéma.

Lorsqu'on procède à des mesures isolées, on notera avec beaucoup de soin les principaux paramètres de réglage du processus ainsi que les conditions aux limites prévalant au moment de la mesure, de manière à pouvoir par la suite interpréter correctement les mesures effectuées. On préparera les protocoles nécessaires à cette tâche avant chaque mesure.

## A ne pas oublier !

Les mesures et les valeurs qui en sont dérivées doivent être accompagnées d'un calcul d'erreur.

On choisira de préférence des appareils capables d'enregistrer automatiquement les mesures puis de les transmettre à un ordinateur.

## Quels appareils de mesure utiliser ?

Le manuel RAVEL « Mesure de la puissance et de l'énergie » présente les méthodes et les techniques de mesure les plus utiles ainsi qu'un aperçu des appareils disponibles sur le marché.

**Check-list**  
**Détermination des grandeurs**  
**à mesurer et conduite des**  
**mesures**

On trouvera dans la partie C de ce manuel une check-list consacrée à la détermination des grandeurs à mesurer et à la conduite des mesures. Il est recommandé de la copier, de la remplir et de la joindre au dossier préliminaire de l'analyse. La tâche des personnes chargées de l'analyse en sera facilitée.



## Quatrième pas : Traitement et présentation des résultats sous forme de tableaux et de graphiques ; interprétation des résultats

Il s'agit maintenant de traiter le résultat des mesures pour obtenir la réponse aux questions posées. En règle générale, on regroupe d'abord les résultats bruts sous forme de tableau. Il est souvent utile de présenter ces chiffres et ceux qu'on en dérive par calcul sous forme graphique : c'est plus parlant.

### Conseils pour la présentation des résultats sous forme de tableaux



En dressant le tableau des chiffres bruts, prendre garde aux points suivants :

- n'y reporter que les chiffres nécessaires à l'évaluation (interprétation et calculs subséquents) ;
- le cas échéant, prévoir plusieurs tableaux bien lisibles plutôt qu'un seul tableau confus ;
- arrondir les chiffres (deux décimales, trois au plus) ;
- intituler judicieusement chaque ligne et chaque colonne ;
- toujours préciser les unités utilisées ;
- signaler l'origine des chiffres, indiquer le calcul appliqué ;
- doter chaque tableau d'un titre parlant, indiquer la date de la dernière modification et le nom de son auteur ;
- lorsque le tableau est imprimé par ordinateur, indiquer le nom du fichier utilisé.

Le manuel RAVEL « Saisie de la consommation d'électricité » présente plusieurs exemples de tableaux de saisie de la consommation destinés aux entreprises, accompagnés d'explications détaillées.

**Conseils pour la présentation graphique des résultats**

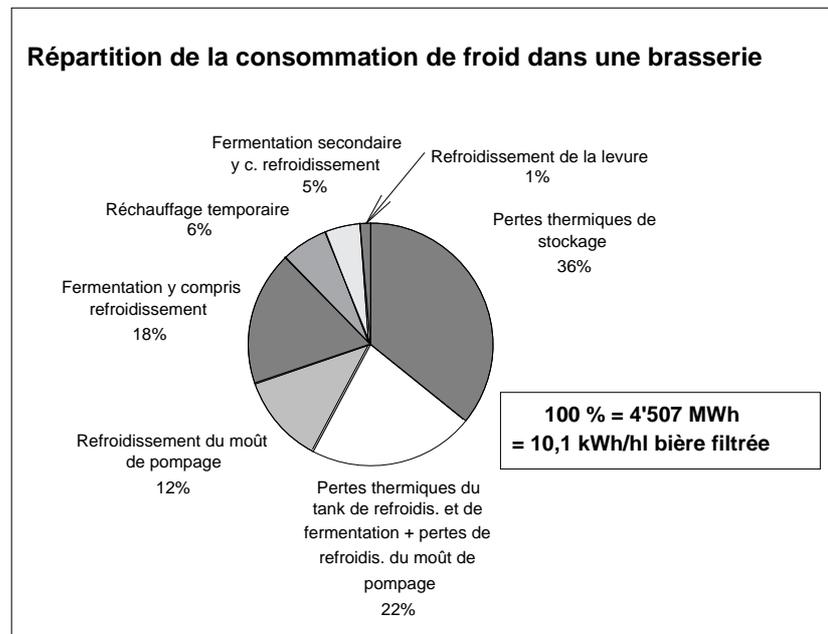


Il existe bien des modes de présentation graphique des résultats. On choisira celui qui met le mieux en évidence la réponse aux questions posées. Ne pas surcharger les graphiques. Il est souvent préférable d'en prévoir plusieurs plutôt que de tasser les résultats sur une seule illustration. On tiendra compte des points suivants :

- ne reporter que l'essentiel ;
- intituler **chaque** axe **et** en indiquer les unités ;
- formuler les titres de manière qu'ils s'expliquent d'eux-mêmes ;
- ne pas oublier d'indiquer l'auteur, la date et le fichier.

On trouve plusieurs exemples de graphiques dans la partie A de ce manuel. En voici quelques autres pour illustrer la variété des possibilités.

Figure B-2  
Répartition de la consommation de froid d'une brasserie



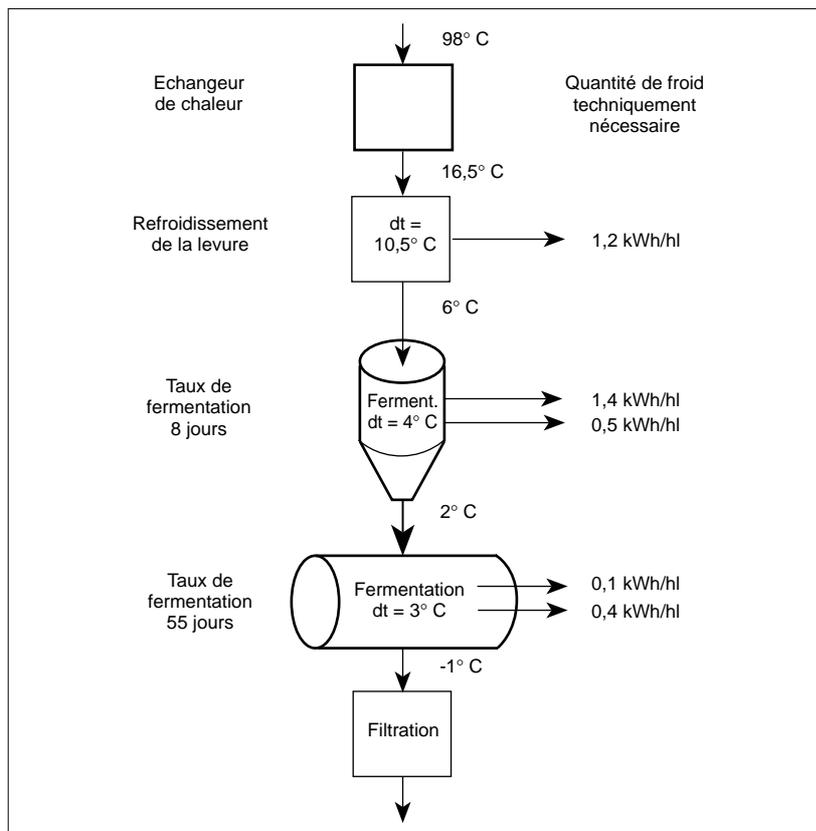


Figure B-3  
Consommation de froid d'une brasserie (schéma de production simplifié)

Les diagrammes de flux énergétiques permettent de visualiser le cheminement des différentes formes d'énergie au sein d'une entreprise, d'un atelier ou d'une installation. Ils montrent non seulement la répartition de l'énergie entre les différents consommateurs, mais aussi ses points de déperdition. Ils illustrent la loi de conservation de l'énergie : l'énergie ne disparaît pas, elle se convertit. Leur étude permet de rapidement visualiser les principaux flux d'énergie, les principaux consommateurs, les points faibles et les possibilités d'amélioration. On y inclura toutes les formes d'énergie afin de ne négliger aucun facteur important.

### Les diagrammes de flux énergétiques



Marche à suivre : on suit toutes les formes d'énergie depuis leur entrée dans le système jusqu'au point où elles le quittent. Lors de chaque conversion, l'équation Energie en input = Energie en output est respectée. Toutes les énergies doivent être mesurées dans les mêmes unités, p. ex., en kWh, MJ, ou % de la consommation totale, ou encore par des indices spécifiques (kWh/pièce, kWh/kg, etc.).

Ces diagrammes ne représentent les flux énergétiques qu'en un moment précis. En les interprétant, on prendra donc garde aux points suivants :

- les fluctuations de la puissance absorbée par les différents consommateurs n'y figurent pas. Dans certains cas, les flux d'énergie peuvent changer avec le temps : pertes thermiques d'une installation frigorifique ou besoins en calories pour le chauffage des locaux ;

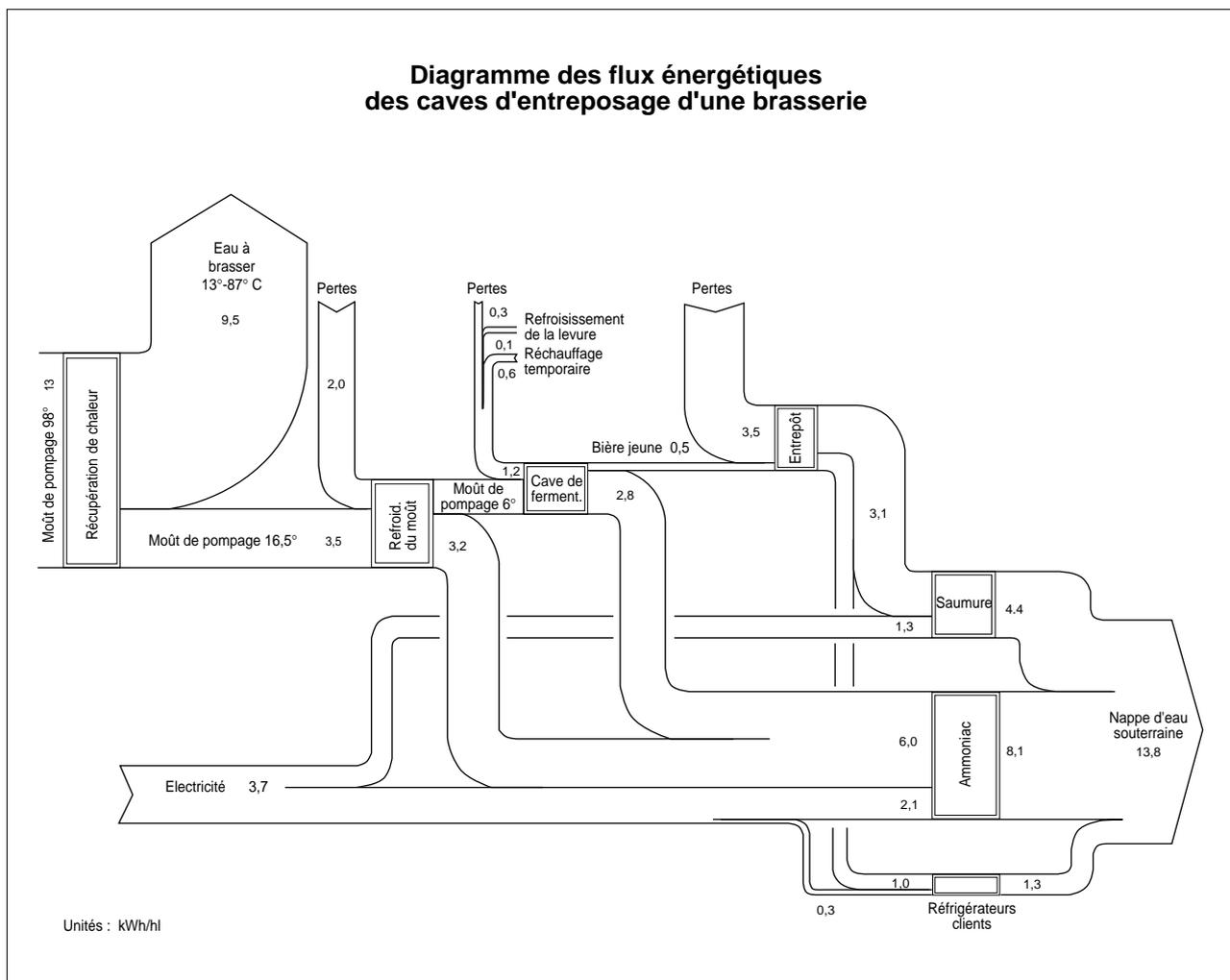
- la qualité énergétique des flux d'énergie n'est pas représentée. La température de certains courants thermiques peut être trop basse pour permettre toute réutilisation.

La valeur des flux énergétiques n'est pas représentée, alors que, par exemple, l'unité d'énergie électrique est beaucoup plus coûteuse que l'unité d'énergie sous forme de combustible.



Comme les diagrammes de flux énergétiques servent en général à donner une première idée de l'ensemble d'un système, ils ne doivent pas être trop détaillés. On y trouve beaucoup de chiffres, mais leur précision est limitée : il ne s'agit souvent que d'estimations.

Figure B-4  
Diagramme des flux énergétiques des caves d'entreposage d'une brasserie



Lorsqu'on veut comparer plusieurs installations ou machines, il faut définir des indices de dépense d'énergie permettant de comparer :

- des installations de différentes capacités ;
- des installations de différentes technologies ;
- des processus différents de fabrication du même produit ;
- la même installation sous différentes charges ou dans différentes conditions d'exploitation.

## Détermination des indices



Les indices s'expriment sous forme d'une mesure rapportée à une grandeur de référence. Exemples : indice de dépense d'énergie de chauffage = consommation annuelle d'énergie de chauffage par surface brute chauffée (kWh/m<sup>2</sup>) ; consommation spécifique de carburant = consommation d'essence par unité de déplacement (litres/100 km), etc.

Les indices peuvent décrire la situation de toute une entreprise, d'un atelier, d'une installation ou d'une machine. Pour être réellement utiles, il faut que leurs grandeurs de référence soient précisément définies. Ils doivent :

- être directement liés à la consommation d'énergie de manière que le quotient Consommation/Grandeur de référence puisse se faire sans détour ;
- être mesurables sans grands frais (p. ex. nombre de pièces fabriquées, masse de matière première utilisée, poids ou volume des produits finis ou des produits intermédiaires, etc.) ;
- correspondre si possible à la grandeur utilisée pour mesurer l'output de l'installation étudiée (p. ex. nombre de pièces fabriquées, kg de produit, etc.).

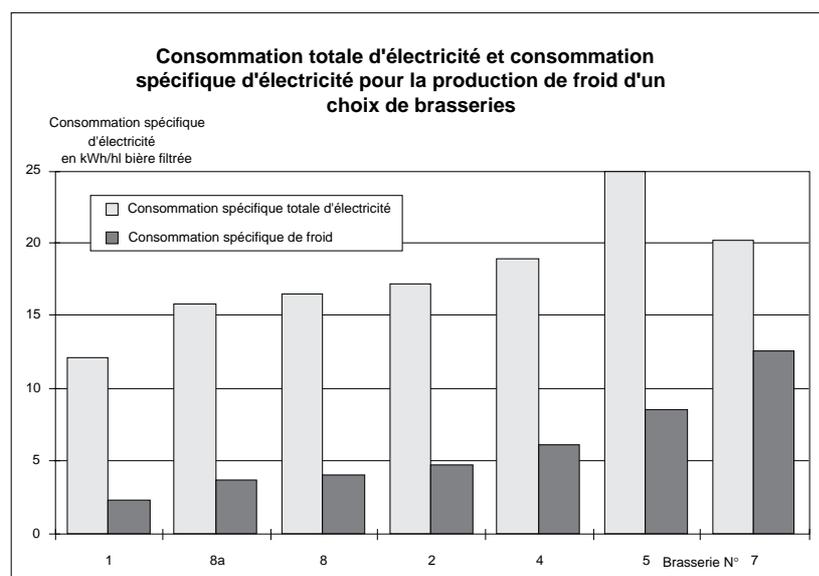
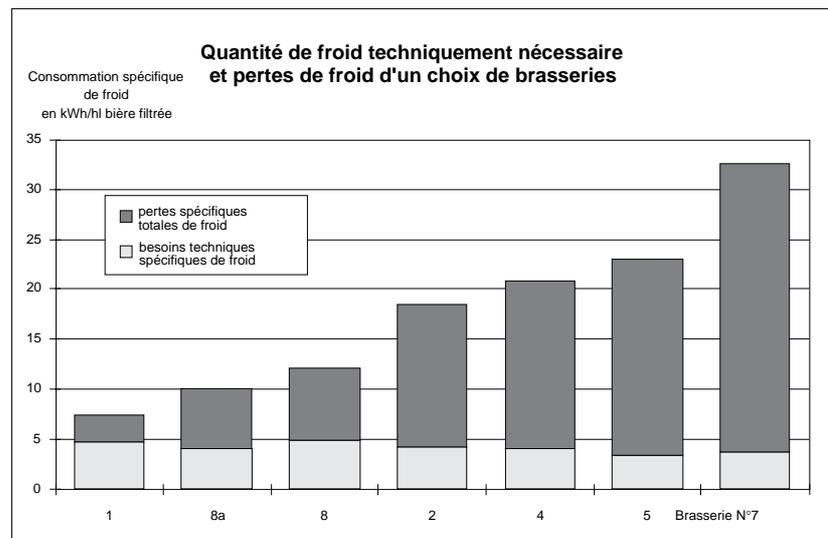


Figure B-5  
Consommation totale d'électricité et consommation spécifique d'électricité pour la production de froid d'un choix de brasseries

Figure B-6  
Quantité de froid techniquement  
nécessaire et pertes de froid  
d'un choix de brasseries



### Comparaison de plusieurs indices



La consommation d'énergie d'un système dépend en général de plusieurs facteurs. L'indice calculé peut donc dépendre des conditions d'exploitation du système étudié : la consommation spécifique d'électricité d'une machine donnée peut dépendre de la qualité des matériaux utilisés, de la qualité exigée du produit final, de la cadence choisie, de la production horaire possible, de la température ambiante, etc. Il est important de déterminer l'influence de ces différents facteurs pour pouvoir ramener la situation à une norme et permettre ainsi les comparaisons.

Pour déterminer l'influence d'un facteur donné sur la consommation spécifique d'énergie, on mesure la consommation de l'installation en ne modifiant que ce facteur, tous les autres restant constants. Les indices ainsi obtenus peuvent être évalués graphiquement ou statistiquement. On trouvera en annexe F quelques exemples d'évaluation graphique avec mise en évidence du rapport entre une consommation spécifique et un paramètre.

Il n'est pas toujours possible de préciser l'influence d'un facteur donné sur la consommation énergétique : les mesures manquent où sont trop dispersées. Cependant, la représentation graphique de ce type de résultats permet souvent de faire apparaître, ne serait-ce que qualitativement, le rapport entre un indice et un facteur. (On n'abordera pas ici les méthodes d'évaluation statistique de mesures dispersées.)

Lorsque l'influence d'un facteur particulier sur un indice donné est connu, on peut corriger l'indice et le ramener à une valeur normalisée (Exemple : correction de l'énergie spécifique de chauffage d'une certaine année à l'aide du nombre annuel moyen de degrés-jours chauffés). La normalisation des indices permet d'éliminer l'influence de certains facteurs, ce qui augmente l'utilité des indices.

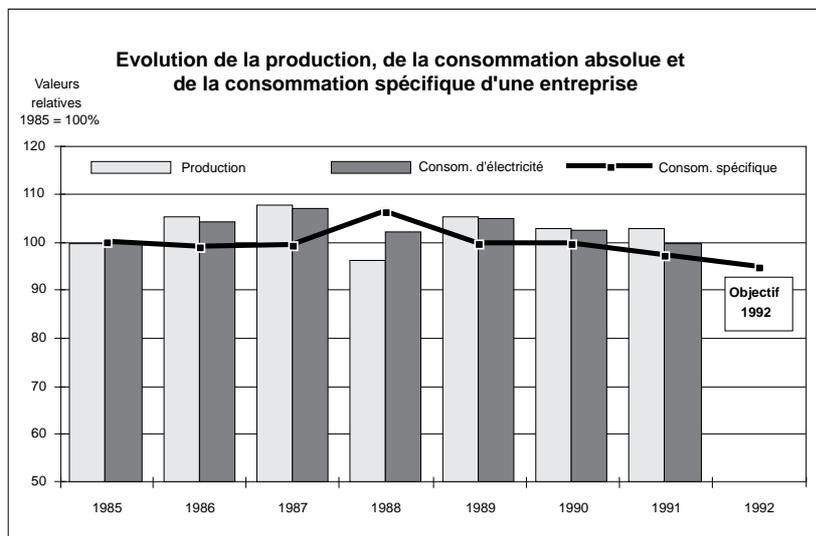
Exemples tirés de la partie A : figures A3-1 ; A7-2 ; A8-1.

Les séries temporelles se prêtent fort bien à la présentation de certaines grandeurs évoluant au cours du temps. Les tendances et autres modifications y apparaissent clairement. Elles permettent la comparaison de consommations absolues ou d'indices (corrigés ou non) par rapprochement avec les valeurs de périodes précédentes. Elles permettent aussi la comparaison avec les valeurs cibles. Lors du calcul des valeurs représentées, on veillera à toujours suivre les mêmes procédures et à garder les intervalles entre mesures constants.

## Séries temporelles

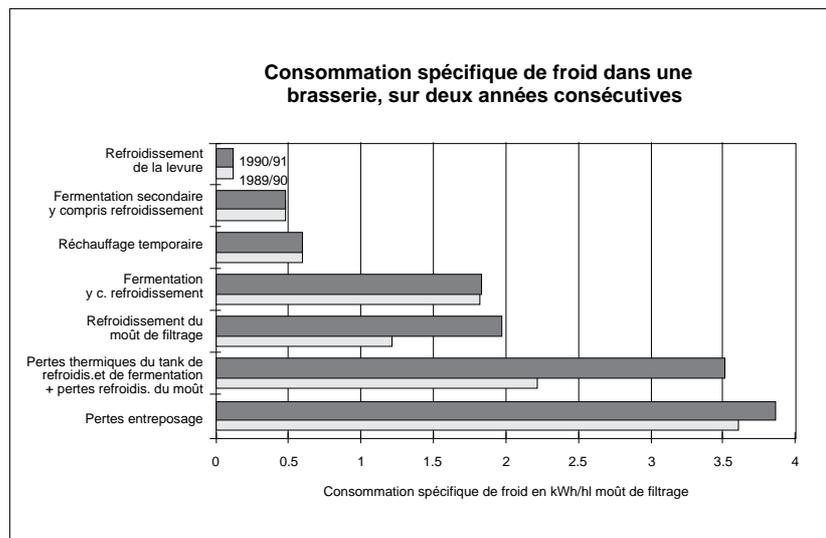


Les séries temporelles sont très faciles à comprendre. Comme on les remet périodiquement à jour, il est recommandé d'en mémoriser les données et de les faire dessiner par ordinateur. Le personnel devrait toujours avoir sous les yeux la présentation sous cette forme de la consommation d'énergie de son atelier.



*Figure B-7*  
*Evolution de la production, de la consommation absolue et de la consommation spécifique d'une entreprise*

Figure B-8  
Consommation spécifique de froid dans une brasserie, sur deux années consécutives



### Les rapports entre l'énergie et la puissance

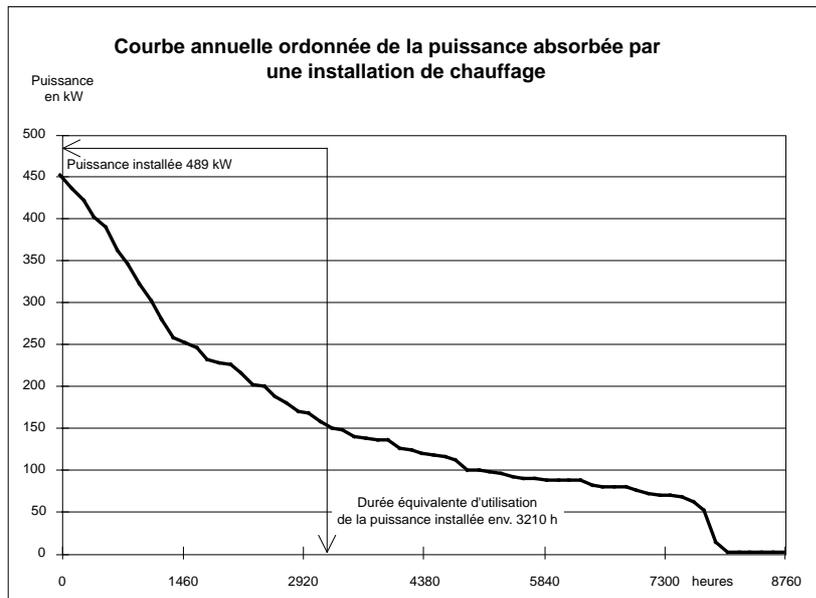


Il est rare que la puissance installée soit entièrement sollicitée. En général, les installations ne fonctionnent qu'à charge partielle ou en cadence (marche/arrêt). Elles sont souvent surdimensionnées, ce qui alourdit les investissements, nuit au rendement et accélère parfois l'usure.

La durée d'utilisation annuelle de la puissance installée permet d'évaluer le dimensionnement d'une installation. Ce chiffre indique le nombre d'heures pendant lequel l'installation doit être utilisée à pleine charge pour produire l'énergie totale qu'on en attend en une année. On l'obtient en divisant l'énergie fournie dans l'année (kWh) par la puissance installée (kW).

La présentation graphique de la charge d'une installation au cours du temps met encore mieux en évidence le rapport entre l'énergie et la puissance. On peut ainsi mesurer la puissance absorbée par une installation frigorifique tous les quarts d'heure pendant une année, puis ordonner ces mesures en ordre décroissant, ce qui donne la **courbe annuelle ordonnée de la puissance absorbée**.

Elle fait clairement apparaître la charge d'une installation et ses caractéristiques temporelles. Elle facilite souvent la réflexion sur les questions d'agrandissement, de transformation ou de mode d'exploitation des installations. Par ailleurs, la surface qu'elle délimite avec les axes est proportionnelle à l'énergie utilisée. Dans les installations comprenant plusieurs éléments, cette représentation facilite la ventilation de la production d'énergie par élément.



*Figure B-9*  
*Courbe annuelle ordonnée de la puissance absorbée par une installation de chauffage*

On trouvera dans la partie C de ce manuel une check-list consacrée au traitement et à l'interprétation des résultats. Il est recommandé de la copier, de la remplir et de la joindre au dossier préliminaire de l'analyse. La tâche des personnes chargées de l'analyse en sera facilitée.

**Check-list**  
**Traitement et**  
**interprétation des résultats**

## Cinquième pas : Application des conclusions



La dernière étape de l'analyse énergétique, c'est l'application de ses conclusions. Il s'agit de traduire concrètement les possibilités d'utilisation rationnelle de l'énergie mises en évidence. Un travail dont la responsabilité doit être confiée à des personnes compétentes. Il faut également prévoir les instruments et méthodes de contrôle qui, par la suite, permettront de s'assurer du succès des mesures adoptées.

L'entreprise se dotera d'une cellule de gestion de l'énergie dont l'organisation dépendra, bien entendu, de sa taille et de son organisation. Son rôle dépendra en bonne partie du choix suivant : s'occupera-t-on de la gestion rationnelle de l'énergie au coup à coup, c'est-à-dire par projets successifs, ou s'agit-il d'une tâche à conduire de manière continue ? Comme les questions d'énergie touchent à tous les domaines de l'entreprise et demandent en général une capacité de réflexion et d'action globales, la gestion de l'énergie ne devrait pas dépendre d'un département particulier mais directement de la direction ou d'un préposé à l'énergie.

Nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage « Les structures d'organisation » publié sur cette question par RAVEL.

### **Check-list Application des conclusions**

On trouvera dans la partie C de ce manuel une check-list consacrée à l'application des conclusions. Il est recommandé de la copier, de la remplir et de la joindre au dossier préliminaire de l'analyse. La tâche des personnes chargées de l'analyse en sera facilitée.

## Partie C Les check-lists

### Vue d'ensemble

On trouvera dans ce chapitre une série de check-lists correspondant aux diverses étapes de la saisie et de l'interprétation des flux d'énergie. Leur champ est plus large que celui des chapitres A et B. On y aborde entre autres les tâches de la direction de l'entreprise et présente quelques propositions pour la constitution d'une documentation d'entreprise sur l'énergie. Les dernières check-lists servent d'auxiliaire à la méthode présentée dans la partie B de ce manuel.

Le but de ces check-lists est de stimuler l'utilisateur. On peut les compléter ou les modifier, ou alors les copier et les remplir tel quel. Le principal est de procéder de manière systématique et cohérente ; ces check-lists ont pour objectif de vous y aider.

### En quoi consiste la gestion de l'énergie ?

- La gestion de l'énergie est-elle un élément explicite de la politique de votre entreprise ?

Si oui, où est-elle formulée ? .....

.....

- Votre entreprise s'est-elle fixé des objectifs précis en matière de gestion de l'énergie ? (par exemple : utilisation rationnelle, respect de l'environnement, réduction des coûts, sécurité de l'approvisionnement)

Si oui, lesquels ? .....

.....

- Ces objectifs de bonne gestion de l'énergie ont-ils été communiqués à l'ensemble du personnel sous une forme réellement compréhensible ?

Si oui, quand ? .....

.....

Comment ? .....

.....

- A-t-on prévu les moyens nécessaires en personnel pour atteindre ces objectifs ?

Si oui, lesquels ? .....

.....

- A-t-on prévu les moyens financiers nécessaires pour atteindre ces objectifs ?

Si oui, lesquels ? .....

.....

- A-t-on précisé les responsabilités en la matière ?

Si oui, lesquelles ? .....

.....

- Les conditions organisationnelles ont-elles été réunies ?

Si oui, lesquelles .....

.....

**Personne dans l'entreprise ne doit ignorer l'importance que la direction attache à l'utilisation rationnelle de l'énergie. Le soutien qu'elle lui accorde doit être visible.**

### Les tâches de la direction

- Regrouper les statistiques et les bilans de l'entreprise en matière d'énergie et les analyser. Les chiffres comparatifs provenant d'un même atelier et les prescriptions internes sur l'emploi de l'énergie sont particulièrement précieux.

Existe-t-il des statistiques sur l'énergie ? .....

Ont-elles été analysées ? .....

Avec qui a-t-on établi des comparaisons ? .....

A-t-on fixé des normes d'atelier ? .....

Si oui, lesquelles ? .....

- Réunir une documentation sur les installations, les sous-installations ou les machines consommant le plus d'énergie.

La documentation a-t-elle été réunie ? .....

- Contrôler de manière continue les principaux flux d'énergie.

Comment le contrôle est-il assuré ? .....

- Tenir une comptabilité énergétique précise.

A-t-on introduit une comptabilité énergétique ? .....

- Formuler des stratégies d'économie d'énergie.

Les stratégies ont-elles été formulées ? .....

A court terme .....

A moyen terme .....

A long terme .....

- Maintenir la sensibilité aux questions d'énergie et d'économie d'énergie, entretenir la motivation.

Mesures et activités prévues ?.....

- S'assurer que la formation du personnel suive scrupuleusement le programme.

Formation prévue ? .....

- S'assurer que les objectifs de la gestion de l'énergie seront atteints.

Comment s'assure-t-on que les objectifs sont atteints ? .....

Contrôle du résultat des mesures prévues ? .....

### Environnement/Energie

- Votre entreprise libère-t-elle directement des produits polluants dans l'atmosphère ?

Indiquez-en l'importance annuelle :

SO<sub>2</sub> : .....

NO<sub>x</sub> : .....

Poussières : .....

Substances organiques : .....

Gaz : .....

Métaux lourds : .....

Autres polluants : .....

- Rejets de CO<sub>2</sub> de votre entreprise

en tonnes/an : .....

- Eau : consommation et pollution

Consommation (m<sup>3</sup>/an) : .....

polluée par : .....

- Pollution des sols par des déchets solides

Quantité de déchets (tonnes/an) : .....

dont les substances problématiques suivantes : .....

- Pollution thermique de l'environnement par des rejets thermiques

Quantité de chaleur rejetée (MJ/an) : .....

Milieu dans lequel la chaleur est déversée : .....

- Bruit et vibrations

Provoqués par : .....

**La majeure partie de ces nuisances sont liées à l'utilisation d'énergie. En utilisant l'énergie de manière rationnelle, on en réduit l'importance.**

## Premier aperçu énergétique

- A combien s'élève la consommation d'énergie de votre entreprise ? Quelle quantité de combustible et d'électricité y consomme-t-on par année ?

Consommation de combustible .....

Consommation d'électricité (1'000 kWh/an) .....

- Quelle est la puissance nécessaire au fonctionnement de votre entreprise ?

Puissance nécessaire (kW) .....

- Combien payez-vous l'électricité ? Connaissez-vous votre contrat de fourniture d'électricité ?

Tarif haut (ct/kWh) .....

Tarif bas (ct/kWh) .....

Prime de puissance (fr./kWh. mois) .....

- A combien s'élève votre facture mensuelle et annuelle d'énergie ? Que vous coûtent les pointes de puissance ?

Combustible (fr./mois ou an) .....

Electricité (fr./mois ou an) .....

- Que représentent les frais d'énergie de votre entreprise en pour cent

des coûts de production ? .....

du chiffre d'affaires ? .....

du bénéfice ? .....

- Comment mesurez-vous votre consommation d'énergie ? Que faites-vous de ces chiffres ?

Mesure de la consommation ? .....

Utilisation des chiffres ? .....

- Quel secteur de votre entreprise consomme le plus d'énergie ?

Quel secteur ? .....

A combien s'élève sa facture énergétique ? .....

*Suite à la prochaine page*

**Premier aperçu énergétique (suite)**

- Subissez-vous parfois des ruptures de courant ? Pouvez-vous chiffrer les pertes entraînées par les ruptures de courant et de combustible ?

Subissez-vous des ruptures ? .....

Quelles en sont les conséquences ? .....

- A-t-on déjà entrepris des économies d'énergie dans votre entreprise ?

Si oui, lesquelles ? .....

- Pourquoi certaines mesures précises n'ont-elles pas été appliquées ?

Lesquelles, et pourquoi ? .....

- Qui est responsable dans votre entreprise de l'approvisionnement en énergie et de son utilisation rationnelle ?

Qui ? .....

A qui cette personne rend-elle compte ? .....

## Réunir une documentation sur l'énergie : premiers pas

Constituez un Classeur Energie articulé comme suit :

- Ensemble des données disponibles sur votre consommation d'énergie avec, dans la mesure du possible, la consommation des différents agents énergétiques durant les cinq dernières années.

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Présentation graphique des consommations absolues et relatives.

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Détermination des coûts énergétiques de l'année passée et comparaison avec les autres coûts d'exploitation (personnel, matières premières, etc.).

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Mise en perspective des coûts énergétiques par le calcul d'indices tels que : coûts et consommation énergétiques annuels rapportés au volume de la production, aux coûts de production, au nombre d'employés ou à tout autre grandeur caractéristique de l'entreprise.

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Etablissement du diagramme des flux énergétiques de l'entreprise.

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Identification des secteurs dans lesquels les pertes énergétiques sont visibles et importantes

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Rédaction d'une première liste des possibilités et des potentiels d'économie d'énergie.

Fait le/à faire jusqu'au .....

### Comment poursuivre ?

Complétez systématiquement votre Classeur Energie en tenant compte des points suivants :

- Inventaire des principaux consommateurs d'énergie selon les critères suivants :  
Agent énergétique (électricité, gaz, huile lourde, vapeur, air comprimé, froid, etc.)  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Fonction générale (fabrication, production auxiliaire d'énergie, climatisation, chauffage, etc.)  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Puissance (s) installée (s), durées de fonctionnement  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Détermination des potentiels d'économie dans les secteur suivants :  
Conversion de l'énergie  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Distribution de l'énergie  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Consommation de l'énergie  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Détermination des mesures possibles d'économie compte tenu  
de leur faisabilité technique  
des leurs possibilités pratiques d'application dans l'entreprise  
des coûts d'entretien prévisibles  
de leur impact sur l'environnement  
Fait le/à faire jusqu'au .....
- Evaluation des possibilités d'économie identifiées et des frais qu'elles entraîneraient  
Fait le/à faire jusqu'au .....

*Suite à la prochaine page*

**Comment poursuivre? (suite)**

- Etablissement d'une liste de priorités selon les critères suivants:

Mesures immédiates

Fait le/à faire jusqu'au .....

Mesures à moyen terme (forte rentabilité mais nécessitant des investissements)

Fait le/à faire jusqu'au .....

Mesures à long terme (à appliquer lors de l'achat de nouvelles machines ou à l'occasion de transformations)

Fait le/à faire jusqu'au .....

- Prise des mesures nécessaire pour évaluer le résultat des mesures adoptées et préparer ainsi de nouvelles mesures d'utilisation rationnelle de l'énergie.

Fait le/à faire jusqu'au .....

## Réduction des pertes d'énergie

Cherchez systématiquement les sources possibles de perte et confiez à une personne la responsabilité de les réduire.

- Eviter de faire fonctionner inutilement les

moteurs .....

transformateurs de soudage .....

compresseurs d'air .....

installations frigorifiques .....

installations de ventilation .....

éclairage .....

chauffage .....

Personne responsable: .....

- Tenir les portes et les fenêtres fermées (en particulier pendant la période de chauffage et dans les pièces climatisées).

Responsable: .....

- Eviter de trop utiliser la climatisation.

Responsable: .....

- Réparer et compléter les isolations insuffisantes ou endommagées.

Responsable: .....

- N'utiliser l'air comprimé que là où il est indispensable. Réduire la pression de l'installation. Si possible, la débrancher pendant la nuit et les week-ends.

Responsable: .....

- Contrôler régulièrement l'installation d'air comprimé, en détecter les fuites et les réparer immédiatement (également valable pour la distribution de vapeur)

Responsable: .....

- Réparation ou remplacement des dispositifs de contrôle hors service.

Responsable: .....

- Autres points:

Responsable: .....

## **Check-lists à utiliser dans une analyse énergétique**

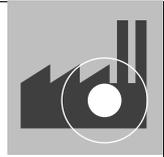
Les check-lists suivantes doivent faciliter la conduite méthodique d'une analyse énergétique. Pour mieux comprendre les notions et les rapports qui y sont présentés, on consultera les chapitres correspondants de la partie B de ce manuel intitulée « Méthode d'analyse énergétique ».

## Rédiger le questionnaire



- Faut-il identifier les points faibles ?  
Si oui, lesquels ? .....
- Faut-il quantifier les facteurs qui influencent la consommation d'énergie ?  
Si oui, lesquels ? .....
- Faut-il procéder à une évaluation énergétique lors de l'achat de nouveaux équipements ou de la modification d'installations ou de machines ?  
Si oui, lors de quel achat, de quelle modification ? .....
- Faut-il optimiser les plans d'exploitation des installations et des machines selon des critères d'économie d'énergie ?  
Si oui, lesquels ? .....
- Faut-il améliorer l'organisation de l'entreprise sous l'angle énergétique ?  
Si oui, où cela ? .....
- Faut-il inciter le personnel à se montrer économe avec l'énergie ?  
Si oui, dans quels secteurs ? .....
- Faut-il répartir la facture énergétique sur les départements, installations, machines ou produits qui en sont à l'origine ?  
Si oui, comment la répartir ? .....
- Faut-il comparer la consommation d'énergie de l'entreprise avec celle d'autres entreprises de la branche ?  
Si oui, avec lesquelles ? .....

### Fixation des limites de l'analyse



- Sur quelles parties de l'entreprise l'analyse doit-elle porter ?

.....  
.....

- Faut-il décomposer le processus étudié en sous-processus ?

Si oui, lesquels ? .....

- Quelles formes d'énergie faut-il analyser ?

.....  
.....

- Quel doit être le régime ou le mode d'exploitation de l'unité analysée ?

.....  
.....

- Combien de mesures faut-il envisager ? A quelle fréquence ?

.....  
.....

**Détermination des grandeurs à mesurer**  
**Conduite des mesures**



- En quel point est-il le plus aisé d'effectuer les mesures ?

.....  
.....

- Comment faut-il enregistrer les grandeurs mesurées ?

.....  
.....

- Quelles grandeurs caractéristiques du fonctionnement des installations faut-il noter lors des séances de mesure ?

.....  
.....

- Les protocoles de mesure ont-ils été rédigés et testés avant les séances de mesure ?

.....  
.....

- Quels appareils de mesure utilisera-t-on ?

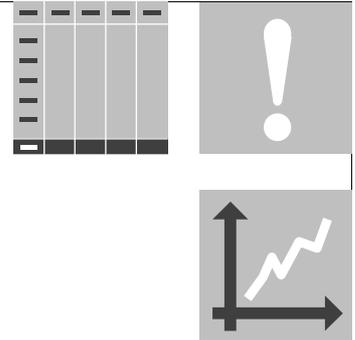
Nom, modèle: .....

.....  
.....

- Qui est chargé de les installer ?

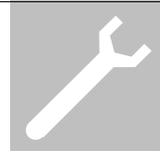
.....  
.....

## Traitement et interprétation des résultats



- Faut-il présenter les mesures sous forme de diagramme des flux d'énergie ?  
oui/non
- Faut-il calculer des indices de dépense d'énergie ?  
oui/non
- Faut-il comparer plusieurs indices ?  
oui/non
- Faut-il former des séries temporelles en donc prévoir la répétition périodique des mesures ?  
oui/non
- Faut-il également étudier la puissance absorbée ?  
oui/non

### Application des conclusions



- Est-il certain que l'entreprise tiendra pratiquement compte des conclusions de l'analyse énergétique ?  
Dans quel délai ? .....  
Comment ? .....
- Comment faut-il présenter le résultat de l'analyse ?  
.....
- Les personnes intéressées ont-elles toutes été informées de l'analyse et de ses résultats ?  
Qui a été informé ? .....  
Quand ? .....
- Est-il prévu de vérifier ultérieurement l'effet des mesures adoptées ?  
Qui en a été chargé ? .....  
Quand la vérification aura-t-elle lieu ? .....

## Unités, facteurs de conversion et formules

Grandeur	Symbole	Remarque	Unités d'énergie et de travail
Joule	J	1J = 1 Ws = 1 Nm	
Wattseconde	Ws		
Newtonmètre	Nm		
Kilowattheure	kWh		
Kilocalorie	kcal		
CVheure	CVh		
Kilopoundmètre	kpm		

### Facteurs de conversion entre unités de mesure de l'énergie

	J	kJ	MJ	kWh	MWh	kcal	CVh	kpm
<b>1J =</b>	1	0,001	0,000 0001	0,000 000 278	0,000 000 000 278	0,000 239	0,000 000 377	0,102
<b>1kJ =</b>	1 000	1	0,001	0,000 278	0,000 000 278	0,239	0,000 377	102
<b>1 MJ =</b>	1 000 000	1 000	1	0,278	0,000 278	239	0,377	102 000
<b>1 kWh =</b>	3 600 000	3 600	3,60	1	0,001	860	1,36	367 000
<b>1 MWh =</b>	3 600 000 000	3 590 000	3 600	1 000	1	856 000	1 360	367 000 000
<b>1 kcal =</b>	4 200	4,20	0,004 20	0,001 16	0,000 001 16	1	0,001 58	427
<b>1 CV =</b>	2 650 000	2 650	2,65	0,736	0,000 736	632	1	270 000
<b>1 kpm =</b>	9,81	0,009 81	0,000 009 81	0,000 002 72	0,000 000 002 72	0,002 34	0,000 003 70	1

Grandeur	Symbole	Remarque	Unités de puissance
Watt	W	1 W = 1 Nm/s = 1 J/s	
Cheval-vapeur	CV		
Kilocalorie par heure	kcal/h		

	W	kW	MW	kcal/s	kcal/h	kpm/s	CV
<b>1 W =</b>	1	0,001	0,000 001	0,000 239	0,860	0,102	0,001 36
<b>1 kW =</b>	1 000	1	0,001	0,239	860	102	1,36
<b>1 MW =</b>	1 000 000	1 000	1	239	860 000	102 000	1 360
<b>1 kcal/s =</b>	4 190	4,19	0,004 19	1	3 600	427	5,69
<b>1 kcal/h =</b>	1,16	0,001 16	0,000 001 16	0,000 278	1	0,119	0,001 58
<b>1 kpm/s =</b>	9,81	0,009 81	0,000 009 81	0,002 34	8,43	1	0,013 3
<b>1 CV =</b>	736	0,736	0,000 736	0,176	632	75	1

### Facteurs de conversion entre unités de mesure de la puissance

**Facteurs décimaux**

m	=	milli	0,001	=	millième
c	=	centi	0,01	=	centième
d	=	déci	0,1	=	dixième
da	=	déca	10	=	dix
h	=	hecto	100	=	cent
k	=	kilo	1'000	=	mille
M	=	méga	1'000'000	=	million
G	=	giga	1'000'000'000	=	milliard
T	=	téra	1'000'000'000'000	=	billion

**Pouvoir calorifique net  
de divers agents  
énergétiques**

Agent énergétique	Quantité	Pouvoir calorifique par unité, arrondi			
		Unité	kWh	MJ	kcal
Mazout extra léger	kg		11,9	42,7	10 200
(1 litre = 0,84 kg)	l		10,0	36,0	8 600
Mazout lourd	kg		11,2	40,2	9 600
Essence	l		10	36	8 600
Gaz naturel H 1)	m <sup>3</sup>		10	36	8 600
Gaz naturel L 1)	m <sup>3</sup>		8,81	31,7	7 600
Gaz liquide (propane, butane)	kg		12,8	46	11 000
Charbon 1)	kg		8,2	30	7 000
Courant électrique	kWh		1	3,6	860
Chauffage à distance par °C de refroidissement	m <sup>3</sup>		1,16	4,18	1000

*1) Attention, valeurs sujettes à d'importantes fluctuations!*

## Références utiles sur la consommation d'énergie dans les entreprises

Borch, G., Fürböck, M., Mansfeld, L., Winje, D.: Energie-  
management  
Springer Verlag Berlin 1986

Ebersbach, K.F. et al.: Energieanalyse im mittelständischen  
Unternehmen, Teil I/II Landesgewerbeamt Baden-Württemberg  
Stuttgart 1990

Energy Efficiency Office, Energy Technology Support Unit:  
Computer-aided Monitoring and Targeting for Industry  
Didcot (GB) 1991

Funk, M.: Industrielle Energieversorgung als betriebswirtschaft-  
liches Planungsproblem  
(Physika Schriften zur Betriebswirtschaftslehre 32)  
Heidelberg 1990

Gruber, E., Brand M.: Rationnelle Energienutzung in der mittel-  
ständischen Wirtschaft  
Verlag TÜV Rheinland Köln 1990

Lutz, W.F., Deutsche Gesellschaft für Technische  
Zusammenarbeit (GTZ): Energy Management in Industry  
D-6236 Eschborn, Jan. 1991

RWE Essen: Energiebedarfsanalysen – Versorgungskonzepte,  
Schlüssel zum sinnvollen und sparsamen Energieeinsatz 210/1984

Schäfer, H., Dollinger, J.: Gewinnen und Verarbeiten energie-  
tischer Daten  
Schriftenreihe IFE, Heft 5  
Herausgegeben von Lehrstuhl und Laboratorium für Energie-  
wirtschaft und Kraftwerkstechnik Technische Universität  
München, 1982.

Schmitt, D., Heck, H.: Handbuch Energie  
Verlag Günther Neske, Pfullingen 1990

Wohinz, J.W., Moor, M.: Betrieblicher Energiemanagement  
Springer Verlag Wien 1989

**L'utilisation rationnelle de l'énergie présuppose une série de choix opérés en connaissance de cause. Où est-il possible d'économiser de l'énergie ? Quel volume d'économies peut-on escompter ? La méthode d'analyse présentée dans ce manuel permet de répondre à ces questions. Les exemples présentés montrent que les économies ne se limitent pas à la consommation d'électricité. La mise en évidence et l'évaluation des points faibles permettent d'améliorer les processus de fabrication en réduisant les ressources utilisées. RAVEL, un programme d'action pour l'industrie.**