

1994 724.370 f

# **RAVEL**

## **Manuel de l'industrie**

Notions et données  
d'économie énergétique



Collection  
**RAVEL**  
**INDUSTRIE**

Office fédéral des questions conjoncturelles

---

## A propos de ce manuel

Ce manuel offre à ceux qui souhaitent conserver la maîtrise de l'énergie dans leur entreprise une quantité d'informations utiles, allant des formules et tableaux de conversion jusqu'aux listes des divers aspects de la connaissance du marché, en passant par les descriptions des principales fonctions techniques. En plus des informations de validité permanente, ce livre contient également de nombreux renvois à des sources d'informations complémentaires, disponibles au moment de la rédaction, en juin 1993, et mis à jour lors de la traduction française, en septembre 1994. Leur validité ne peut évidemment pas être garantie par la suite, mais la présentation espacée du présent manuel laisse suffisamment d'espace pour des notes personnelles. Le Manuel de l'industrie RAVEL est non seulement un ouvrage de référence fondé, mais encore un outil de travail. La présentation sous forme de classeur à anneaux ouvert offre la possibilité d'ajouter en tout temps des pages supplémentaires. Les auteurs, la rédaction et l'éditeur souhaitent à tous les utilisateurs beaucoup de succès dans les mesures et investissements d'ordre énergétique qu'ils auront à réaliser.

## Impressum

Editeur	Office fédéral des questions conjoncturelles
Direction RAVEL	c/o Amstein & Walthert SA, Zurich Dr Charles Weinmann, Echallens
Chef du domaine Industrie	Prof. Dr Daniel Spreng, EPF Zurich
Auteurs	Alois Huser, INFEL, Zurich Dr Adalbert Huber, von Roll SA, Gerlafingen Geri Huser, IFTA, Schinznach-Dorf
Dessins et graphiques	Artpage SA, Zurich Atelier Blaser, Erlenbach
Rédaction	Christian Bachmann, pcb Pressebüro, Zurich
Version française	
Rédaction	Jean-Philippe Borel, Cully
Mise en page et composition	Consortium DAC/City Comp Lausanne et Morges
Impression et diffusion	OCFIM, Berne © Office fédéral des questions conjoncturelles Berne, septembre 1994
Reproduction autorisée avec	mention de la source.
Numéro de commande	724.370 f ISBN 3-905233-74-6 ISBN Edition originale 3-905233-20-7 Form. 724.370 f 3.95 500 U22608

<b>1</b>	<b>Notions générales concernant l'énergie</b>	
<b>1.1</b>	<b>Energie</b>	
<b>1.2</b>	<b>Contenu énergétique</b>	
<b>1.3</b>	<b>Agents énergétiques, formes d'énergie</b>	
<b>1.2</b>	<b>Transformation d'énergie, pertes d'énergie, rendement</b>	
<b>1.5</b>	<b>Notions de temps et de puissance</b>	
<b>1.6</b>	<b>Grandeurs caractéristiques d'utilisation</b>	
<b>2</b>	<b>Rentabilité</b>	
<b>2.1</b>	<b>Coûts, tarifs, prix</b>	
<b>2.2</b>	<b>Notions de valeur</b>	
<b>2.3</b>	<b>Preuve de rentabilité</b>	
<b>2.4</b>	<b>Evaluation de rentabilité</b>	
<b>2.5</b>	<b>Critères de rentabilité</b>	
<b>3</b>	<b>Approvisionnement énergétique</b>	
<b>3.1</b>	<b>Vue d'ensemble sur les agents énergétiques</b>	
<b>3.2</b>	<b>Electricité</b>	
	Production d'électricité	3.2/1
	L'électricité en Suisse	3.2/14
	Lois, adresses	3.2/18
<b>3.3</b>	<b>Produits pétroliers</b>	
	Gisements	3.3/1
	Composition	3.3/2
	Raffinage du pétrole	3.3/3
	Le pétrole en Suisse	3.3/4
	Transport et stockage	3.3/6
	Stockage réglementaire	3.3/8
	Propriétés de divers produits pétroliers	3.3/9
	Lois, adresses	3.3/10
<b>3.4</b>	<b>Gaz naturel</b>	
	Gisements	3.4/1
	Composition	3.4/2
	Le gaz naturel en Suisse	3.4/3
	Transport et stockage	3.4/5
	Mesure des quantités de gaz	3.4/6
	Propriétés du gaz naturel en Suisse	3.4/7
	Lois, adresses	3.4/8
<b>3.5</b>	<b>Charbon</b>	
	Gisements	3.5/1
	Composition (valeurs moyennes)	3.5/2
	Préparation du charbon	3.5/3
	Le charbon en Suisse	3.5/4
	Propriétés du charbon	3.5/4
	Lois, adresses	3.5/5
<b>3.6</b>	<b>Chaleur à distance</b>	
<b>3.7</b>	<b>Bois</b>	
<b>3.8</b>	<b>Energie solaire</b>	
	Rayonnement	3.8/1
	Utilisation	3.8/2

<b>4</b>	<b>Utilisation de l'énergie dans l'entreprise</b>	
<b>4.1</b>	<b>Gestion de l'énergie</b>	
	Les flux énergétiques dans l'entreprise	4.1/1
	Saisie de la consommation de l'énergie et des coûts	4.1/3
	Mesure de puissance et d'énergie	4.1/4
	Analyse et évaluation	4.1/6
	Stockage et distribution d'énergie dans l'entreprise	4.1/11
	Besoins en puissance thermique d'un bâtiment	4.1/13
	Commande et régulation	4.1/15
	Perturbations de réseau	4.1/19
	Installations de compensation	4.1/23
<b>4.2</b>	<b>Techniques énergétiques de base</b>	
	Transformateur	4.2/1
	Convertisseur de courant	4.2/3
	Alimentation de courant sans coupure (ASC)	4.2/5
	Batteries	4.2/7
	Production d'air comprimé	4.2/9
	Pompes à chaleur (ou thermopompes)	4.2/11
	Production de froid	4.2/15
	Brûleurs, chaudières	4.2/19
	Entraînements électriques	4.2/23
	Pompes	4.2/33
	Ventilateurs	4.2/37
	Eclairage	4.2/43
	Chaleur de production	4.2/47
	Utilisation de rejets thermiques et récupération de chaleur	4.2/49
<b>5</b>	<b>Environnement</b>	
<b>5.1</b>	<b>Polluants</b>	
<b>5.2</b>	<b>Combustion d'agents énergétiques fossiles</b>	
<b>5.3</b>	<b>Bruit</b>	
<b>5.4</b>	<b>Législation suisse sur la protection de l'environnement</b>	
<b>6</b>	<b>Centres d'informations sur l'énergie</b>	
<b>7</b>	<b>Unités de mesure et facteurs de conversion</b>	
<b>8</b>	<b>Liste des mots clés</b>	
<b>9</b>	<b>Publications du programme d'impulsions RAVEL</b>	

# **1 Notions générales concernant l'énergie**

**1.1 Energie**

**1.2 Contenu énergétique**

**1.3 Agents énergétiques, formes d'énergie**

**1.4 Transformation d'énergie, pertes  
d'énergie, rendement**

**1.5 Notions de temps et de puissance**

**1.6 Grandeurs caractéristiques d'utilisation**

# 1 Notions générales concernant l'énergie

## 1.1 Energie

L'énergie est la capacité d'un système de fournir un travail. Elle peut se rencontrer sous les formes suivantes :

- énergie mécanique
- énergie thermique
- énergie de liaison chimique
- énergie de rayonnement électromagnétique
- énergie électrique
- etc.

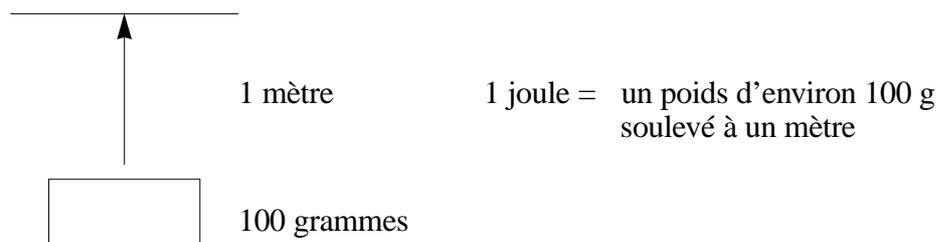
### Formes d'énergie

Les notions d'énergie et de travail sont équivalentes. On parle souvent de travail pour désigner l'énergie consommée dans un processus industriel. La puissance est le travail fourni par unité de temps.

### Travail

L'unité internationale valable pour l'énergie est le joule (J). 1 joule correspond à l'énergie contenue dans un poids de 100 g soulevé à une hauteur de 1 m.

### Joule



$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ Ws}$$

**Exemples de différentes formes d'énergie :****Energie potentielle**

Energie potentielle:  $E_p = m \cdot g \cdot h$  [kg · (m/s<sup>2</sup>) · m]  
m: masse [kg]  
g: attraction terrestre [m/s<sup>2</sup>]  
h: hauteur [m]

**Energie cinétique**

Energie cinétique:  $E_c = m \cdot v^2 / 2$  [kg · m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]  
v: vitesse du corps [m/s]

**Energie électrique**

Energie électrique:  $E_{el} = U \cdot I \cdot t$  [V · A · s]  
U: tension [V]  
I: courant [A]  
t: temps [s]

Pour d'autres unités de mesure,  
voir le chapitre 7: «Unités de  
mesure et facteurs de  
conversion».

## 1.2 Contenu énergétique

L'énergie grise est définie comme la quantité d'énergie globale utilisée de façon directe ou indirecte lors de la manufacture d'un produit. Elle comprend la consommation d'énergie ainsi que le contenu énergétique des matières utilisées lors du procédé de production.

### Energie grise

Une liste des valeurs typiques adoptées sur le plan international a été dressée au chapitre 7.

$$FU = E_N / E_G$$

### Fraction utile

FU: Fraction utile

$E_N$ : production nette d'énergie d'une installation pendant sa durée de vie

$E_G$ : quantité d'énergie cumulée dans la fabrication de l'installation (énergie grise, contenu énergétique de l'installation), dans les moyens d'exploitation et dans les matières consommables d'exploitation

$$E_{\text{spec}} = E / X$$

### Consommation spécifique d'énergie

$E_{\text{spec}}$ : consommation spécifique d'énergie d'un système énergétique ou d'un procédé

E: consommation d'énergie

X: grandeur caractéristique de référence du système ou du procédé, par exemple énergie utile fournie, quantité ou poids des biens produits, etc.)

#### Exemples :

Consommation spécifique de courant électrique dans la production de ciment	(kWh/t)
Consommation spécifique de courant électrique dans une chambre froide	(kWh/m <sup>3</sup> par 24 h)
Consommation spécifique d'essence par une voiture	(l/100 km)

Le pouvoir calorifique inférieur PCI est la quantité de chaleur libérée par la combustion d'une unité de quantité d'un combustible (kg, m<sup>3</sup>), lorsque l'eau formée durant la combustion subsiste à l'état de vapeur, et que les gaz de combustion sont refroidis à la température de référence de 25°C. Les pouvoirs calorifiques varient selon le type et la qualité du combustible.

### Pouvoir calorifique inférieur

Diverses valeurs moyennes du pouvoir calorifique se trouvent au chapitre 7: «Unités de mesure et facteurs de conversion».

Le pouvoir calorifique supérieur PCS est la quantité de chaleur équivalente, définie pour le cas où l'eau formée est à l'état liquide. Les pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur diffèrent de la valeur de la chaleur de vaporisation de la vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion.

### Pouvoir calorifique supérieur

## 1.3 Agents énergétiques

Les agents énergétiques peuvent être par exemple :

- le pétrole
- le gaz naturel
- le charbon
- l'uranium
- le mazout
- l'essence
- l'électricité
- la vapeur, etc.

**Agents énergétiques**

Les fluides caloporteurs sont des vecteurs d'énergie particulièrement appropriés pour transporter ou transférer de l'énergie sous forme de chaleur, comme par exemple :

- l'eau chaude
- la vapeur
- l'huile thermique, etc.

**Fluides caloporteurs**

Les sources d'énergie renouvelable se régénèrent naturellement, de manière continue ou cyclique (cycle annuel, de quelques générations, etc.). Parmi elles citons :

- l'énergie hydraulique
- l'énergie solaire (rayonnement solaire)
- la chaleur de l'environnement (énergie de l'environnement)
- la biomasse (bois, biogaz)
- l'énergie éolienne
- l'énergie géothermique
- l'énergie marémotrice (= houille bleue)

**Sources d'énergie renouvelable**

Par chaleur de l'environnement, on entend l'énergie thermique dégagée par le soleil et emmagasinée dans l'air, les eaux souterraines et de surface ainsi que dans le sol – y compris les rejets thermiques de l'industrie et des ménages.

**Chaleur de l'environnement**

## 1.4 Transformation d'énergie, pertes d'énergie, rendement

Lors de la transformation d'une forme d'énergie en une autre, il y a toujours des pertes.

$$EP = E1 - E2$$

EP : énergie perdue      E1 : énergie mise en jeu      E2 : énergie utile

**Pertes d'énergie**

Pour évaluer correctement les pertes, il faut désigner par une même unité les quantités d'énergies mises en jeu et utiles.

### Exemple

Dans une chaudière à gaz, on obtient une quantité de chaleur de 8 MWh pour une quantité de gaz de 1000 m<sup>3</sup>. Le pouvoir calorifique du gaz est de 36,6 MJ/Nm<sup>3</sup> (PCS).

$$36,6 \text{ MJ/m}^3 \text{ (PCS)} = 33 \text{ MJ/m}^3 \text{ (PCI)} = 9,2 \text{ kWh/m}^3$$

$$\text{Contenu énergétique de } 1000 \text{ m}^3 \text{ de gaz} = 9,2 \text{ MWh}$$

$$\text{Pertes dues à la transformation} = 9,2 - 8 = 1,2 \text{ MWh (13 \%)}$$

$$\eta = P1 / P2 \text{ [\%]}$$

$\eta$  rendement      P1 : puissance utile délivrée      P2 : puissance absorbée

**Rendement**

Le rendement est valable pour des conditions définies de fonctionnement et d'environnement. Il change si, par exemple, on passe de la charge totale à la charge partielle.

$$\eta_g = \eta_A \cdot \eta_B \cdot \eta_C \text{ [\%]}$$

$\eta_g$  : rendement du système global

$\eta_B$  : rendement du système partiel B

$\eta_A$  : rendement du système partiel A

$\eta_C$  : rendement du système partiel C

**Rendement du système global**

La fraction utile est le rendement moyen sur une longue durée (par exemple une année).

**Fraction utile**

### Exemple

Transformateur	énergie absorbée annuellement :	100 MWh
	énergie délivrée annuellement :	90 MWh
	rendement moyen annuel :	90/100 = 0,9
	en comparaison : rendement à charge nominale :	0,98

Démarche pour la détermination du rendement :

1. Fixer les conditions d'exploitation et d'environnement.
2. Mesure des puissances absorbées et délivrées.
3. Calcul du rendement.

**Les étapes de la transformation de l'énergie**

**Energies exploitées.** Pétrole, gaz naturel, charbon, uranium, eau courante, biomasse, rayonnement solaire, vent, etc.

**Energie primaire**

Stockage  
Transport  
Transformation

Pertes de transformation et de transport, consommation propre

**Energies produites.** Huile de chauffage, essence, diesel, gaz liquide, électricité, chauffage à distance, etc.

**Energie secondaire**

Stockage  
Transport  
Distribution

Produits non énergétiques (matières premières pour la chimie)  
Pertes de transport et de distribution, consommation propre

**Energie achetée** par l'utilisateur final.

**Energie finale**  
(Entreprise, ménage)

Exploitation interne  
Stockage  
Transformation  
Distribution

Pertes de transformation et de distribution

**Energie mise à disposition** de l'utilisateur pour sa transformation en énergie utile: par exemple courant pour un moteur électrique.

**Energie mise en œuvre**

Utilisation de l'énergie

Pertes de transformation

Plusieurs modes de répartition sont possibles:

par exemple:  
Type d'énergie utile  
– chaleur  
– force  
– lumière, etc.

**Prestations énergétiques**  
(différentes énergies utiles)

Chaleur délivrée

Type de prestation énergétique  
– Entraînement mécanique  
– éclairage  
– climatisation, etc.

# 1.5 Notions de temps et de puissance

## Notion de temps

Le nombre d'heures s'écoulant durant un certain laps de temps est désigné par le terme de durée calendaire. **Durée calendaire**

### Exemple

Une année a 8760 heures.

Une installation technique utilise ou produit de l'énergie pendant sa durée de fonctionnement. Pendant la durée d'utilisation, une prestation énergétique est effectivement fournie. La durée d'enclenchement et la durée d'utilisation diffèrent généralement. **Durée d'enclenchement**

### Exemple

Photocopieur :	durée d'enclenchement :	3000 heures/an
	durée d'utilisation :	500 heures/an

Pendant le temps de maintien en attente, une installation technique est prête à fonctionner (mais pas en fonctionnement). Durant cette période de maintien en attente, elle doit pouvoir démarrer dans son temps normal de démarrage. **Durée de maintien en attente**

Le temps de démarrage est le laps de temps que nécessite une installation (par exemple moteur, chaudière) pour passer de l'état de maintien en attente à l'état de fonctionnement normal (vitesse nominale, puissance nominale). **Temps de démarrage**

$$t_d = t_e + t_{ma}$$

$t_d$ : durée de disponibilité (heures de disponibilité)  
 $t_e$ : durée d'enclenchement (heures d'enclenchement)  
 $t_{ma}$ : temps de maintien en attente (heures de maintien en attente) **Durée de disponibilité**

Pendant la durée d'indisponibilité, une installation est hors d'état de fonctionner à l'intérieur d'une période de rapport. Pendant la durée de révision (durée de réparation, durée d'arrêt planifié), une installation est hors service pour révision planifiée jusqu'au rétablissement de l'aptitude au fonctionnement. Durant la période de mise hors service (durée d'interruption), une installation est hors service par suite d'un dérangement imprévu jusqu'au rétablissement de l'aptitude au fonctionnement. **Durée d'indisponibilité**  
**Durée de révision**  
**Temps de réparation**  
**Temps d'arrêt**  
**Durée de mise hors service**

**Degrés-jours de chauffage** Le nombre de degrés-jours (DJ) de chauffage est calculé sur un mois ou une année et correspond à la somme des différences journalières entre la température ambiante intérieure (normalement 20°C) et la température moyenne journalière extérieure de tous les jours de chauffage de cette période. Les jours de chauffage d'une période donnée sont ceux pour lesquels la température moyenne journalière (sur 24 h) est inférieure à la température limite de chauffage. La limite de chauffage correspond à la température moyenne journalière de l'air extérieur au-dessus de laquelle il n'est plus nécessaire de chauffer (en règle générale 12°C). Le calcul des degrés-jours de chauffage est nécessaire pour juger de la consommation d'énergie de chauffage : plus le nombre de degrés-jours est élevé, plus froide est la température extérieure.

### Notion de puissance

**Watt** L'unité de puissance du système international est le watt (W). Puissance et énergie sont reliées par la relation suivante :

**Puissance**  $P = E / t$  [W]

P: puissance

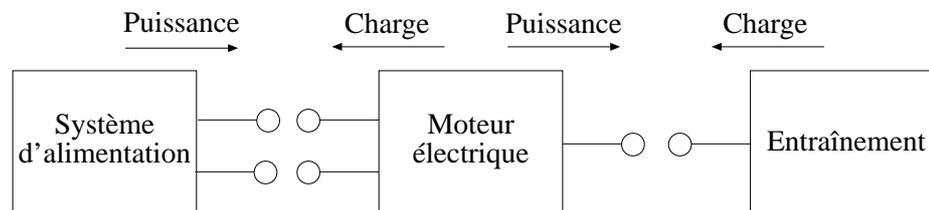
E: quantité d'énergie transformée (travail accompli)

t: temps (moyen) nécessaire

**Charge** En principe, dans la pratique, on différencie la puissance de la charge. La puissance représente la capacité d'un système énergétique ou d'un appareil (puissance produite, délivrée, installée, etc.) à fournir un travail (travail fourni par unité de temps).

La charge est définie comme la puissance absorbée ou requise en un point donné.

Exemple :



**Puissance nominale** La puissance nominale d'une installation ou d'un appareil (par exemple puissance nominale d'un moteur électrique) est la capacité pour laquelle l'installation a été dimensionnée et construite. Elle figure sur la plaquette signalétique, dans les spécifications, ou dans le protocole de livraison. La puissance nominale est définie pour des conditions ambiantes déterminées.

**Puissance continue** La puissance continue est la puissance que peut fournir une installation conformément au cahier des charges, sans restriction de durée et sans préjudice pour sa longévité et pour sa sécurité de fonctionnement.

<p>La puissance installée d'un système est la somme de toutes les puissances nominales des installations et appareils du système. Dans un système de consommateurs, la notion de puissance installée est souvent équivalente à la puissance raccordée.</p>	<b>Puissance installée</b>
<p>La puissance brute est la puissance aux bornes du générateur : elle comprend la consommation propre du générateur. La puissance nette est la puissance mise à disposition du réseau par l'installation de production et utilisable (puissance brute moins les besoins propres, même s'ils sont prélevés au réseau).</p>	<b>Puissance brute</b>
<p>La puissance disponible d'un appareil de production (par exemple production de courant ou de chaleur) est la puissance pouvant être atteinte à un moment donné, lorsque toutes les conditions techniques et d'exploitation sont remplies (y compris les unités de puissance en réserve).</p>	<b>Puissance disponible</b>
<p>La puissance de réserve nécessaire à un système de production doit être au moins disponible au-delà de la puissance attendue du système, afin de maintenir le risque de restrictions d'approvisionnement inférieur à une valeur considérée comme tolérable.</p>	<b>Puissance de réserve</b>
<p>La puissance assurée d'un système d'alimentation est la puissance restante lorsque l'on soustrait la puissance de réserve de la puissance disponible. Pour maintenir la sécurité exigée d'un système d'alimentation, il faut qu'en tout temps la puissance garantie soit au moins égale à la puissance nécessaire au système.</p>	<b>Puissance assurée</b>
<p>La puissance de fonctionnement est la puissance effectivement produite ou consommée à un moment donné par un système énergétique (installation de production ou de consommation).</p>	<b>Puissance de fonctionnement</b>
<p>La puissance de maintien en attente est la puissance consommée par un système énergétique durant le temps de maintien en attente (stand-by) dans le but de conserver les fonctions auxiliaires opérantes.</p>	<b>Puissance de maintien en attente</b>
<p>La puissance de pointe est la plus grande puissance de fonctionnement produite ou mise à disposition au cours d'un laps de temps défini (par exemple puissance thermique ou électrique de pointe). La puissance électrique de pointe est une valeur instantanée mesurée ou une moyenne sur une courte période (un quart d'heure par exemple).</p>	<b>Puissance de pointe</b>
$P_m = E / t \text{ [W]}$	<b>Puissance moyenne</b>
<p><math>P_m</math>: puissance moyenne pour une période donnée  <math>E</math>: quantité d'énergie fournie  <math>t</math>: durée du laps de temps (durée de référence)</p>	
<p>La puissance appelée est la charge la plus élevée attendue au cours d'une période déterminée (jour, mois, année) en un certain point (par exemple demande de puissance thermique ou électrique).</p>	<b>Puissance appelée</b>
<p>La puissance à mettre à disposition (électrique, thermique) fait l'objet d'un accord entre un client et un fournisseur, qui s'engage à tenir à disposition au moins une puissance égale à celle convenue.</p>	<b>Puissance à mettre à disposition</b>

**Puissance abonnée** La puissance abonnée est la puissance maximale qu'un client peut utiliser d'après son contrat de livraison et pour laquelle il paie (taxe de puissance convenue). Si la puissance requise par le client dépasse la puissance abonnée, ce dernier devra généralement s'acquitter d'une surtaxe pour la puissance supplémentaire. Des dispositifs techniques (limiteurs de puissance, fusibles) peuvent limiter l'appel de puissance à la valeur de l'abonnement.

**Taux de charge**  $A = P_m / P_n$

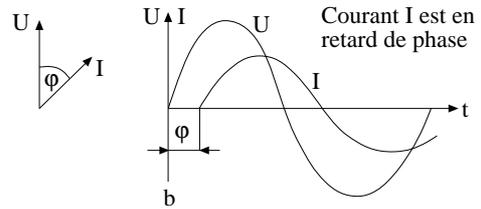
- A: taux de charge
- $P_m$ : puissance moyenne
- $P_n$ : puissance nominale

<b>Exemple</b>	
Moteurs électriques pour:	puissance moyenne absorbée / puissance nominale
installations aérauliques	0,7
pompes et compresseurs	0,63
machines-outils	0,2

**Puissance apparente, puissance active, puissance réactive**

**Puissance apparente**  $P_a = U \cdot I$  [V · A]

- $P_a$ : puissance apparente
- U: tension
- I: intensité de courant

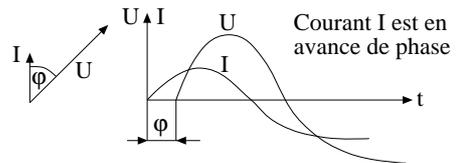


$$P_a = \sqrt{(P^2 + P_r^2)}$$

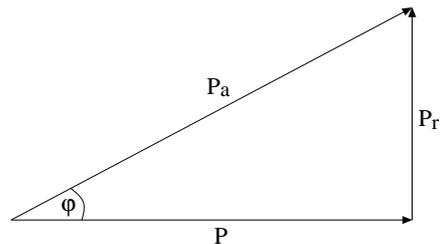
**Puissance active**  
**Puissance réactive**

$P = P_a \cdot \cos \varphi$  [W]  
 $P_r = P_a \cdot \sin \varphi$  [V Ar]

- P : puissance active
- $P_r$  : puissance réactive
- $\varphi$  : angle de phase
- $\cos \varphi$  : facteur de puissance



On mesure P et  $P_r$ :  
 $\text{tg } \varphi = P_r / P$   
 $\varphi = \text{arc tg } (P_r / P)$   
 $\cos \varphi = \cos [\text{arc tg } (P_r / P)]$



**Exemple**

$$\cos \varphi = 0,9$$

$$P_r = 0,5 \cdot P$$

**Exemple**

Dans les spécifications d'un moteur électrique on trouve :  
 $U = 220 \text{ V}$ , puissance nominale  $P_N = 2,5 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,85$ .  
Pour un rendement  $\eta$  donné de 80%, on obtient :

Puissance active  $P = P_N / \eta = 3125 \text{ [W]}$

Puissance apparente  $P_a = P / \cos \varphi = 3676 \text{ [V A]}$

Puissance réactive  $P_r = \sqrt{P_a^2 - P^2} = 1937 \text{ [V Ar]}$

## 1.6 Grandeurs caractéristiques d'utilisation

En règle générale, le mode de fonctionnement caractérise l'évolution dans le temps du fonctionnement d'une installation, par exemple d'un moteur électrique. Le mode de fonctionnement est un facteur d'influence important pour la consommation d'énergie et le rendement. Parmi les modes les plus typiques, notons le fonctionnement en continu, le fonctionnement de courte durée, le fonctionnement à pleine charge, le fonctionnement intermittent, etc.

**Mode de fonctionnement**

$$t_p = E / P_p$$

**Durée d'utilisation**

$t_p$ : durée d'utilisation de la charge de pointe (heures à pleine charge)  
 $E$ : quantité d'énergie  
 $P_p$ : charge de pointe

**Heures à pleine charge**

Les données se réfèrent toujours à une période déterminée (par exemple durée d'utilisation annuelle de la pleine charge). On désigne sous le terme d'heures à pleine charge les heures correspondant à la durée d'utilisation de la pleine charge.

### Exemple

Consommation de courant	15 000 kWh/a
Charge de pointe	5 kW
Durée d'utilisation annuelle de la charge de pointe = 15 000 kWh/5 kW =	3000 h par an (3000 heures à pleine charge)

$$\tau = t_u / t$$

**Taux d'utilisation – Fraction utile**

$\tau$ : taux d'utilisation d'une puissance caractéristique (par exemple charge de pointe, puissance abonnée, etc.)  
 $t_u$ : durée d'utilisation de la puissance caractéristique  
 $t$ : durée correspondante

ou aussi :

$$\tau = P_m / P$$

$\tau$ : taux d'utilisation  
 $P_m$ : puissance moyenne durant la période considérée  
 $P$ : puissance caractéristique

En recourant à cette notion, il faut toujours préciser le type de puissance ainsi que la période considérée.

**Exemple**

Période considérée :	année (= 8760 h)
Puissance abonnée :	400 kW
Consommation d'énergie :	1500 MWh/a
Puissance moyenne :	1 500 000 kWh/8760 h = 171,2 kW
Taux d'utilisation de la puissance abonnée : $\tau$	= 171,2 kW/400 kW = 0,43

**Charge de pointe** On utilise cette notion généralement en rapport avec la charge de pointe ; à la place du taux d'utilisation, on utilise alors le concept particulier de facteur de charge.

**Facteur de charge**  $FC = t_p / t$

FC: facteur de charge  
 $t_p$ : durée d'utilisation de la charge de pointe  
 t: période considérée

**Facteur de charge annuel, mensuel** Le facteur de charge est aussi donné par le rapport entre la puissance moyenne et la puissance maximale (charge de pointe) d'un système énergétique sur un temps défini (par exemple année, mois) ; on parle alors d'un facteur de charge annuel ou mensuel.

**Exemple**

Période considérée :	année (= 8760 h)
Consommation d'énergie :	1500 MWh/a
Charge de pointe annuelle :	300 kW
Durée d'utilisation de la charge de pointe :	1 500 000 kWh/300 kW = 5000 h
Puissance moyenne (de l'année) :	1 500 000 kWh/8760 h = 171,2 kW
Facteur de charge (annuel)	= 5000 h/8760 h = 0,57 ou = 171,2 kW/300 kW = 0,57

**Facteur de puissance** Le facteur de puissance  $\cos \varphi$  d'un système électrique indique dans quelle mesure le système consomme de la puissance réactive  $P_r$  (voir aussi puissance apparente) en plus de la puissance active P. Le facteur de puissance mesure le déphasage existant entre tension et courant (respectivement entre puissance active et puissance apparente). Les fournisseurs d'électricité peuvent prescrire des valeurs-limites pour le facteur de puissance. Des dispositifs intégrés de compensation du courant réactif (par exemple condensateurs) peuvent assurer la correction du facteur de puissance.

**Rapport de puissance**  $RP = P_{\min} / P_{\max}$

RP: rapport de puissance (de charge)  
 $P_{\min}$ : puissance (charge) minimale  
 $P_{\max}$  puissance (charge) de pointe

**Taux d'utilisation**  $\tau = t_F / t_N$

$\tau_i$ : taux d'utilisation  
 $t_F$ : temps de fonctionnement  
 $t_N$ : temps nominal (durée considérée, par exemple une année)

**Exemple**

Temps de fonctionnement: 6400 h (par année civile)

Taux d'utilisation = 6400 h / 8760 h = 0,73

Taux d'utilisation types (annuel) pour:

des moteurs électriques dans	Taux de fonctionnement
– des installations aérauliques	0,12
– des pompes et des compresseurs	0,52
– des machines-outils	0,45

$$T_D = (t_F + t_{ma}) / t_N$$

**Taux de disponibilité**

$T_D$ : taux de disponibilité

$t_F$ : temps de fonctionnement

$t_{ma}$ : temps de maintien en attente

$t_N$ : temps nominal

$$FS = P_P / S (P_1, \dots, P_n)$$

**Facteur de  
simultanéité**

$FS$ : facteur de simultanéité

$P_P$ : charge de pointe conjointe (simultanée) de plusieurs consommateurs

$\Sigma(P_1, \dots, P_n)$ : somme des charges de pointe (ne se produisant en général pas au même moment) de chacun des consommateurs

Le facteur de simultanéité se calcule sur une période déterminée.

## **2 Rentabilité**

**2.1 Coûts, tarifs, prix**

**2.2 Notions de valeur**

**2.3 Preuve de rentabilité**

**2.4 Evaluations de rentabilité**

**2.5 Critères de rentabilité**

## 2 Rentabilité

### 2.1 Coûts, tarifs, prix

#### Coûts

Les coûts varient dans le temps et d'un lieu à l'autre; une indication de coûts doit donc toujours comporter des précisions sur le moment et le lieu où elle a été établie.

Classification des coûts dans la comptabilité :

• Caisse	recettes	↔	dépenses	circulation d'argent
• Comptabilité d'entreprise	recettes calcul des prix de revient par produit	↔	dépenses	établissement des coûts internes
• Comptabilité financière	revenus	↔	dépenses	trafic de paiement avec des partenaires extérieurs (clients, fournisseurs, banques, etc.)
• Compte de pertes et profits	profit	↔	pertes	
• Bilan	actif	↔	passif	
• Frais d'achats	= montants facturés par les fournisseurs (pour les agents énergétiques finaux) (franco entreprise)			
• Coûts d'utilisation	= coûts d'achats + coûts supplémentaires internes (pour les agents énergétiques consommés)			

### Dépenses annexes internes pour l’approvisionnement en énergie

Agents énergétiques	Energie électrique	Gaz naturel	Combustibles liquides	Combustibles solides
Coûts et pertes de transformation/de stockage	■		■	■
Consommation d’énergie pour le pompage et le transport			■	■
Entretien et surveillance des installations d’approvisionnement (coûts de personnel inclus)	■	■	■	■
Frais de capital pour les quantités d’énergie stockées			■	■
Frais de capital pour les installations d’alimentation	■	■	■	■
Coûts pour la sécurité et l’environnement	■	■	■	■

**Frais d’investissement  
Frais d’exploitation** Le montant de ces frais annexes dépend des investissements consentis pour les installations d’approvisionnement énergétique, des frais d’exploitation et de consommation annuels d’énergie. Suivant le type d’exploitation, les frais annexes peuvent représenter 5 à 30 %, ou même davantage, des frais d’achat.

**Détermination des frais annexes** La détermination des frais annexes internes: le détail des dépenses sera établi à partir des décomptes par types de dépenses des centres de charges concernés. Et cela sur toute l’étendue du flux d’approvisionnement interne, du poste de livraison de l’énergie au consommateur final.

**Comparaison de la rentabilité** Avertissement: les comparaisons de rentabilité entre agents énergétiques sur la base de leur prix à la livraison ne tiennent pas compte des frais annexes internes et conduisent ainsi à des appréciations et décisions erronées. De telles comparaisons et analyses de rentabilité devraient toujours se baser sur les frais réels de consommation.

**Plan comptable** Le plan comptable classe les dépenses en divers groupes. Il comprend les principaux groupes de frais suivants :

- frais d’achat du matériel et de l’énergie
- frais de personnel (salaires, appointements, allocations et charges sociales inclus)
- frais des services externes (services de tiers)
- frais des brevets, licences, locations, leasings, assurances
- frais administratifs (matériel de bureau, PTT, frais divers, etc.)
- frais de capital (amortissements, intérêts)
- répartitions

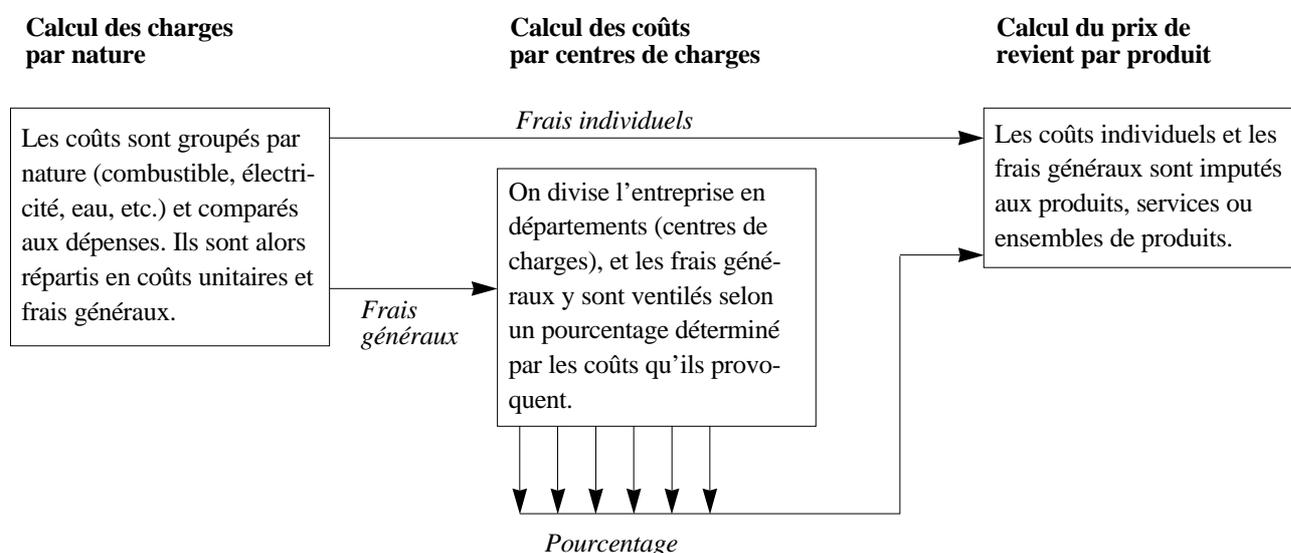
**Budget des centres de charges** Le plan comptable sert aussi à l’élaboration du budget des centres de charges et des décomptes de centres de charges. Les plans comptables sont actuellement largement normalisés et sont aussi disponibles sur le marché sous forme de logiciels informatiques.

Le plan comptable par postes indique l'origine des coûts (en quel point de l'entreprise ils ont été provoqués). On peut différencier les postes importants, liés à la production et au marché, des postes auxiliaires, qui leur délèguent leurs prestations, tels les services d'entretien ou d'alimentation en énergie. Les charges afférentes à ces postes auxiliaires sont souvent réparties entre les centres principaux, selon un mode de répartition convenu qu'il faudra périodiquement examiner et ajuster.

**Centres de charges principaux**  
**Centre de charges auxiliaires**

La liste des produits donne en même temps l'origine de ces derniers (tel produit porte tels coûts). Ces coûts engendrés, répercutés sur les marchandises ou les services, doivent être un apport pour l'entreprise.

**Liste des produits**



## Tarifs

La livraison d'agents énergétiques est facturée directement en fonction des prix du marché (par exemple mazout en Fr./t ou en Fr./100 litres) ou sur la base de tarifs des fournisseurs d'énergie (pour les énergies de réseau comme l'électricité et le gaz).

**Prix du marché  
Tarifs**

Les énergies de réseau présentent une structure de prix pluridimensionnelle. Le fournisseur mesure et facture sur la base de tarifs contractuels, non seulement l'énergie consommée, mais également la puissance appelée et, pour l'énergie électrique, l'énergie réactive consommée.

**Structure de prix**

Dans ce cas, la fourniture totale d'énergie est constituée de plusieurs composantes (travail, puissance, énergie réactive, etc.), qui elles-mêmes peuvent être subdivisées selon le moment où a lieu la fourniture et la quantité fournie (par exemple fourniture à haut et bas tarif).

**Composantes  
de fourniture**

Le tarif de livraison comporte une composante tarifaire pour chaque composante de fourniture.

**Tarif de livraison**

$$FA = \sum (TF_1 \cdot BC_1, \dots, TF_n \cdot BC_n) + T$$

**Frais d'achat**

FA : frais d'achat

TF: composante de fourniture (quantité mesurée d'énergie ou de puissance)

BC: composante tarifaire correspondante (selon tarif contractuel)

T: taxes (selon tarif contractuel)

Pour des énergies ne provenant pas d'un réseau, cette expression se réduit à:

$$FA = QL \cdot PL + T$$

**Frais d'achat**

FA: frais d'achat

QL: quantité livrée

PL: prix de livraison

T: taxes

Un tarif comportant plusieurs composantes nécessite des appareillages de mesure capables d'enregistrer les différentes composantes de fourniture durant la période de décompte fixée contractuellement.

### Tarifs d'électricité

<b>Conditions de livraison</b>	Le prix dépend de la quantité, des caractéristiques de fourniture et du niveau de tension. S'il n'y a pas de contrat individuel, ce sont les conditions de livraison (tarifs inclus) des entreprises électriques qui prévalent. Les tarifs sont soumis au contrôle par le surveillant des prix. L'Union des centrales suisses d'électricité (UCS) et le Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie ont publié conjointement une recommandation sur les conditions de reprise des livraisons d'énergie dans les réseaux publics.
<b>Double tarif</b>	Le double tarif est un tarif largement répandu comportant des prix différents pour la fourniture d'énergie à haut ou bas tarif (HT, BT).
<b>Tarif saisonnier</b>	Le tarif saisonnier comporte des prix différents pour la fourniture d'énergie en période estivale ou hivernale, et éventuellement aussi durant certains mois de transition.
<b>Tarif binôme</b>	Un tarif binôme comporte deux composantes; exemples : <ul style="list-style-type: none"><li>• la taxe de base et le tarif d'énergie</li><li>• la taxe de puissance et le tarif de consommation</li></ul>
<b>Tarif trinôme</b>	Un tarif trinôme comporte trois composantes: la taxe de base, le tarif de puissance et le tarif d'énergie.
<b>Taxe de puissance</b>	La taxe de puissance comprend les éléments suivants : <ul style="list-style-type: none"><li>• Puissance : sur la base de la puissance maximale mesurée ou calculée pour une période déterminée, par exemple Fr./kW par mois.</li><li>• Une ou plusieurs composantes tarifaires relatives à l'énergie (par exemple différenciées selon périodes de haut et bas tarif, ainsi que différentes saisons).</li></ul>

**Exemples**

Tarifs d'électricité	hiver (octobre-mars)	été (avril-septembre)
Haut-tarif (HT)	150 Fr./MWh	120 Fr./MWh
Bas-tarif (BT)	100 Fr./MWh	70 Fr./MWh
Taxe de puissance	13 francs par kW du maximum du mois	

**Exemple 1 :**

Consommation d'électricité durant le mois de janvier :

HT	61 MWh
BT	32 MWh
Puissance max. du mois	297 kW

Frais d'électricité pour le mois de janvier :

$$61 \cdot 150 + 32 \cdot 100 + 297 \cdot 13 = \text{Fr. } 16\,211.-$$

Durée d'utilisation mensuelle :

$$93\,000 \text{ kWh} / 297 \text{ kW} = 313 \text{ heures}$$

Prix moyen :

$$\text{Fr. } 16\,211 / 93 \text{ MWh} = \text{Fr. } 174 / \text{MWh}$$

**Exemple 2 :**

HT	87 MWh
BT	76 MWh
Puissance max. du mois	321 kW

Frais d'électricité pour le mois de janvier :

$$87 \cdot 150 + 76 \cdot 100 + 321 \cdot 13 = \text{Fr. } 24\,823.-$$

Durée d'utilisation mensuelle :

$$163\,000 \text{ kWh} / 321 \text{ kW} = 508 \text{ heures}$$

Prix moyen :

$$\text{Fr. } 24\,823 / 163 \text{ MWh} = \text{Fr. } 152 / \text{MWh}$$

Dans le cas d'un tarif modulant ou interruptible, le fournisseur mesure et facture la fourniture de courant en période critique de surcharge du réseau. Ce tarif présente un avantage lorsque le client peut interrompre ou réduire fortement son prélèvement de puissance durant une ou plusieurs heures de forte charge du réseau.

**Tarif de délestage  
Tarif interruptible**

Dans le cas d'un abonnement à une puissance, le fournisseur facture une demande maximale de puissance appelée par l'abonné durant une période déterminée (par exemple le matin en hiver de 7.00 heures à 12.00 heures). Durant le temps restant, le client peut faire appel comme convenu à des puissances plus élevées, sans conséquence financière. Ce mode tarifaire est avantageux pour un client qui utilise des puissances élevées durant les périodes de faible demande sur le réseau.

**Puissance abonnée**

En cas de forte consommation de courant, le fournisseur facture souvent le prix de l'énergie réactive (Kvar), lorsque la demande d'énergie réactive resp. le  $\cos \varphi$  (facteur de puissance) dépasse une valeur limite durant une période déterminée. La limite se situe généralement à  $\cos \varphi = 0,9$ . Chaque Kvar supplémentaire consommé sera ensuite facturé au tarif unitaire (ct./Kvar). Le

**Prix de l'énergie  
réactive**

client peut réduire sa demande d'énergie réactive en installant des appareils de compensation (par exemple des condensateurs). (Voir aussi les termes énergie et puissance réactive.)

### Taxes

**Taxe de base**  
**Prix de base**

La taxe de base (ou prix de base) est un montant fixe dû pour une période déterminée (par exemple Fr. par mois). Le prix de base peut aussi être échelonné, par exemple en fonction de l'importance de la consommation (prix de base fonction de la quantité consommée ; importance d'une composante de la puissance). Le prix de base permet aussi de couvrir les frais fixes et spécifiques à chaque client (location de compteur, relevé de compteur) et qui sont indépendants de sa consommation.

**Taxe de raccordement**

La taxe de raccordement est une participation unique qu'un consommateur d'énergie de réseau (courant, gaz, chauffage à distance) doit payer pour son raccordement au réseau. Cette taxe peut comporter une contribution pour le raccordement du bâtiment, une pour le réseau, et une pour les coûts d'installation. Dans certains cas, la taxe de raccordement est facturée en plusieurs tranches ou reportée sur des contributions annuelles pour sollicitation du réseau en fonction de la consommation réelle.

### Tarifs du gaz

**Tarif de base**  
**Tarif de consommation**

Les tarifs de base et de consommation peuvent être échelonnés, en fonction de la quantité demandée. Le gaz consommé est mesuré en m<sup>3</sup> et, d'après son pouvoir calorifique supérieur (PCS) moyen, facturé en unités d'énergie respectivement de puissance.

**Puissance horaire moyenne**

Du point de vue de l'économie gazière, la puissance d'une fourniture de gaz est définie en règle générale comme la puissance moyenne horaire ou journalière. Avant d'effectuer des comparaisons d'ordre énergétique, il faut convertir les valeurs au pouvoir calorifique inférieur (PCI) :

**Pouvoir calorifique inférieur**

1 Fr./kWh (PCS) = 1,11 Fr./kWh (PCI) (PCI = 0,9 PCS)

**Contrat interruptible**

Les consommateurs de gaz qui sont prêts à interrompre leur consommation pendant les heures de pointe peuvent conclure des contrats interruptibles et obtenir ainsi de meilleurs tarifs.

**Exemple**

Non interruptible		
Tarif de base:	< 70 kW de puissance	300 Fr./an
	> 70 kW de puissance	250 Fr./an
Tarif de consommation:	4,2 ct./kWh	

## Interruptible (contrat d'interruptibilité)

Tarif de base:	250 Fr./an
Tarif de consommation:	3,6 ct./kWh

## Exemple de calcul (non interruptible):

Consommation annuelle:	40 000 kWh PCS; non interruptible
Période de pleine utilisation:	2100 h
Puissance:	$40\,000/2100 = 19\text{ kW}$ (< 70 kW !)
Facturation:	$300\text{ Fr.} + 40\,000 \cdot 0,042\text{ Fr.} = 1980\text{ Fr.}$

## Prix moyen par MWh:

$$1980\text{ Fr.}/40\text{ MWh} = 49,5\text{ Fr./MWh PCS} = 53,8\text{ Fr./MWh PCI}$$

**Tarifs de chauffage à distance**

Les prix du chauffage à distance sont en règle générale définis par des tarifs binômes, comportant une taxe de puissance et un tarif de consommation.

**Taxe de puissance**  
**Tarif de consommation**

**Exemple**

Taxe de puissance:	$5500 \cdot \sqrt{L}$	Fr./an
L = puissance abonnée en MW		
Tarif de consommation:	$1,12 P_{\text{mazout}}$	Fr./MWh

$P_{\text{mazout}}$  = prix du mazout en Fr./100 kg (moyenne pour l'année de référence, pour des livraisons en quantités de 6000 à 9000 l).

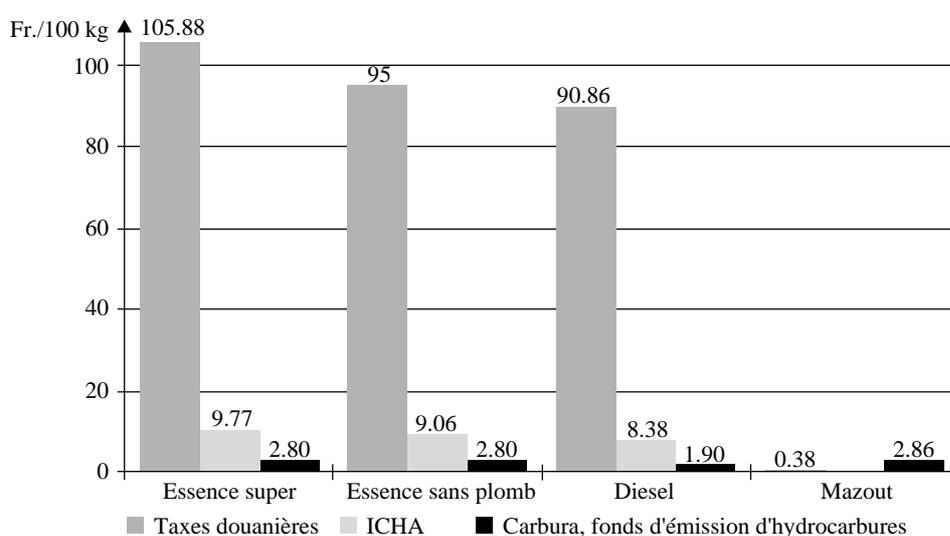
## Prix

Les prix sont la rémunération par unité de marchandise ou d'énergie et varient ainsi comme les coûts en fonction du moment et du lieu.

Le prix à la livraison est le prix net convenu avec le fournisseur, dont la facture peut encore comporter des éléments annexes (frais de douane, impôt sur le chiffre d'affaires, coûts de transport, taxes de raccordement, location de compteur, etc.) ou des déductions (escomptes, rabais), éléments qui ne sont pas compris dans le prix à la livraison.

Exemples de produits dérivés du pétrole (1993):

Coûts annexes



Coûts supplémentaires par litre:

	Essence super	Essence sans plomb	Diesel	Mazout
Densité	0,744	0,744	0,835	0,824
ct./l	88	79	84	2,6

$$\text{Prix d'achat} = \frac{\text{montant de la facture du fournisseur}}{\text{quantité facturée}}$$

et, de manière analogue pour le prix à la consommation :

$$\text{Prix à la consommation} = \frac{\text{coûts de consommation}}{\text{quantité consommée}}$$

Remarques :

Le prix à la consommation concerne le palier Energie mise en jeu (voir page 1.4/2).

Le calcul du prix d'achat est valable en particulier pour les fournitures d'énergie facturées sur la base de tarifs.

Le prix d'achat d'électricité se rapporte à la consommation d'énergie active, comme cela ressort de l'unité Fr./MWh (ct./kWh).

Le prix d'achat du gaz naturel s'exprime en Fr./MWh PCI ou en Fr./1000 m³.

### Définition du prix

### Prix à la livraison Prix net

### Prix d'achat

### Prix à la consommation

**Exemple**

Prix d'achat et prix à la consommation pour divers agents énergétiques

- Electricité

Consommation annuelle de l'entreprise		30 GWh
Puissance max. prélevée		12 MW
Tarif (à partir de 50 kV)	90 Fr./MWh	2700 kFr.
Taxe de puissance annuelle	132 Fr./kW	1584 kFr.
Pertes de transformation/transport	7%	189 kFr.
Entretien (département électricité)		600 kFr.
Investissements	5000 kFr.	
Annuité des investissements (7,5 %/20 a)	10 %	500 kFr.
Frais totaux		5573 kFr.
Prix moyen de l'électricité (basse tension 400 V)		186 Fr./MWh

- Mazout

Consommation annuelle de l'entreprise		3000 t
Quantité moyenne en stock		1500 t
Prix de livraison en wagon-citerne (44 t)	320 Fr./t	960 kFr.
Consommation des pompes	30 kWh/t	18 kFr.
Entretien des installations		60 kFr.
Coûts de stockage (intérêt 7,5 %)		36 kFr.
Investissements	1500 kFr.	
Annuité des investissements (7,5 %/20 a)	10 %	150 kFr.
Frais totaux		1224 kFr.
Prix moyen du mazout	11,8 MWh PCI/t	35 Fr./MWh PCI
Capital immobilisé pour stockage		480 kFr.

- Gaz naturel

Consommation annuelle de l'entreprise		3,4 Mio m <sup>3</sup>
Puissance max. consommée		12 MW PCS
Tarif	22 Fr./MWh PCS	748 kFr.
Taxe annuelle de puissance	37 Fr./kW PCS	444 kFr. s
Entretien des installations		10 kFr.
Investissements	500 kFr.	
Annuité des investissements (7,5 %/20 a)	10 %	50 kFr.
Frais totaux		1252 kFr.
Prix moyen du gaz naturel	10 kWh PCI/Nm <sup>3</sup>	37 Fr./MWh PCI

Gaz avec contrat interruptible

Puissance max. consommée 50%		6 MW PCS
	1252 – 222 kFr.	1030 kFr.

Coût de l'installation de propane

(énergie de remplacement en cas de coupure):

Consommation de propane = 5 % de la consommation de gaz		
Prix du propane = 120 % du prix du gaz – frais supplémentaires		7 kFr.
Stock de propane 100 t à 350 Fr./t (liq.), intérêt 7,5 %		2 kFr.
Entretien de l'installation de propane		15 kFr.
Investissements	600 kFr.	
Annuité des investissements (7,5 %/20a)	10 %	60 kFr.

Frais totaux		1114 kFr.
Prix moyen du gaz	10 kWh PCI/Nm <sup>3</sup>	33 Fr./MWh PCI
Capital immobilisé pour stockage de propane		35 kFr.

### Prix de livraison dans le commerce de gros

Un prix CIF (Cost Insurance, Freight) est valable en un endroit déterminé et comprend les frais de transport et d'assurance.

**Prix CIF**

Un prix FOB (Free on Board) est valable jusqu'à la livraison à bord d'un navire (fret maritime et assurance non compris).

**Prix FOB**

Un prix FOR (Free on Railway) s'applique en un lieu déterminé et comprend le chargement sur le wagon (fret par chemin de fer et assurance non compris).

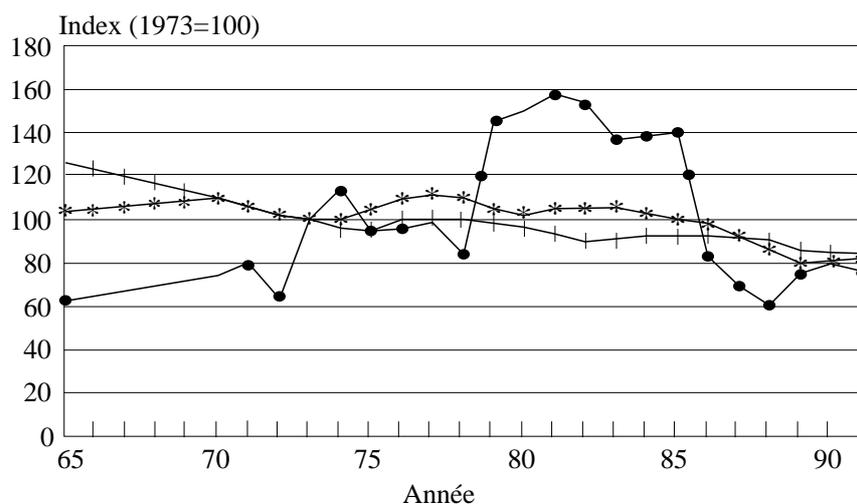
**Prix FOR**

Le prix spot a cours sur le marché spot pour des quantités occasionnelles et des excédents à court terme. Les prix spot reflètent la situation momentanée du marché et sont par conséquent susceptibles de fortes variations.

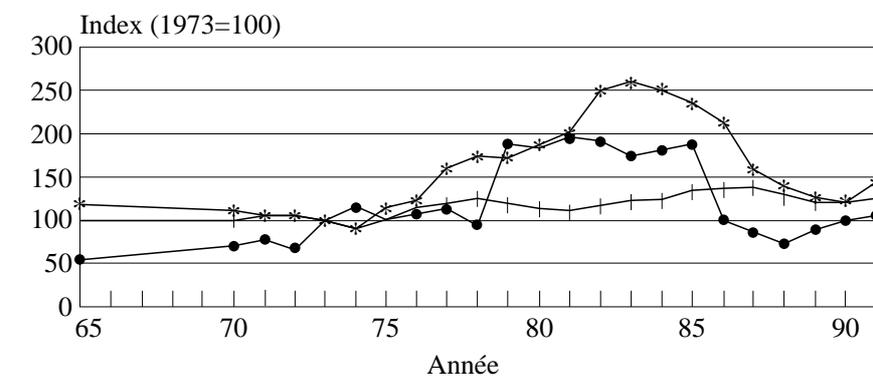
**Prix spot**

### Statistique nationale des prix

En Suisse les prix à la consommation et de commerce de gros sont relevés mensuellement par l'OFIAMT (Office fédéral de l'industrie, des arts, des métiers et du travail, Berne) selon une procédure fixe appliquée pour les marchandises et les agents énergétiques.



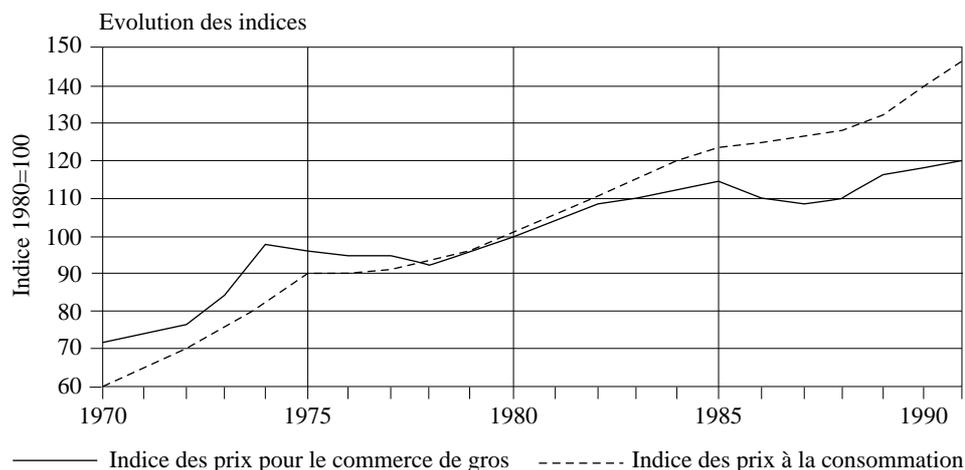
**Prix à la consommation**



**Prix du commerce de gros**

### Indice national des prix à la consommation

L'indice national des prix à la consommation montre l'évolution du prix des denrées et des prestations de services significatives pour les ménages privés. Il est un indicateur de l'ampleur des variations qui affectent le niveau de vie, suite à des hausses ou des baisses de prix, indépendamment des changements de comportement des consommateurs ou de la modification de la qualité des marchandises. L'indice des prix du commerce de gros reflète les prix à la production nationale et ceux des biens importés, après leur dédouanement aux frontières.



### Indice du coût de la vie

L'indice du coût de la vie se rapporte aux prix à la consommation du panier de la ménagère, représentation des besoins d'une moyenne de la population suisse.

### Renchérissement

Le renchérissement est la hausse relative des prix (ou indice) exprimé en pourcentage par mois ou par année. Le renchérissement relatif est la différence entre le taux de renchérissement d'un produit et le renchérissement général.

Sources pour les indices des prix :  
 Indices des prix à la consommation et de commerce de gros :  
 • Annuaire statistique de la Suisse  
 • Die Volkswirtschaft  
 Indices des prix de l'énergie :  
 • Statistique globale de l'énergie en Suisse

	1970	1990	Renchérissement 1970-1991
Indice des prix à la consommation pour l'électricité (1973 = 100)*	89,1	162,3	82,2 % (= (162,3/89,1) -1)
Indice des prix à la consommation (1982 = 100)**	53,6	128,7	140,1 % (= (128,7/53,6) -1)

\* d'après la Statistique globale d'énergie 1991

\*\* Annuaire statistique de la Suisse 1993

## 2.2 Notions de valeur

Le coût d'achat (valeur d'acquisition) est le coût global consenti pour l'acquisition d'un bien. Pour des biens d'investissement, la notion de coût d'achat est équivalente à celle de coût d'investissement.

**Valeur d'acquisition**

Dans un bilan d'entreprise, la valeur nette d'une installation est sa valeur comptable (valeur comptable restante). Celle-ci correspond à la valeur d'acquisition diminuée de la totalité des amortissements déjà réalisés.

**Valeur nette**

La valeur de renouvellement d'une installation ou de tout autre bien acquis par investissement doit se calculer au moment du remplacement en tenant compte des récents développements techniques et de l'évolution des prix. La valeur de renouvellement est en règle générale bien plus élevée que la valeur initiale d'acquisition.

**Valeur de renouvellement**

Au terme de la vie économique d'une installation (investissement) subsiste la valeur de liquidation (ou valeur restante).

**Valeur de liquidation**  
**Valeur restante**

## 2.3 Preuve de rentabilité

Les investissements doivent présenter un bénéfice optimal doublé d'une prise de risque minimale. Les projets d'investissement doivent faire l'objet, au stade de la conception, d'une analyse de rentabilité. On y distingue les formes d'investissement suivantes :

- Les investissements d'entreprise concernent la participation à d'autres entreprises, l'élargissement de la gamme de produits ou l'augmentation substantielle de la production. De tels stratégies d'investissements nécessitent une décision d'entreprise ne relevant que partiellement d'une l'analyse de rentabilité.
- Les investissements de productivité destinés à améliorer la productivité ou la qualité du produit. De tels investissements opérationnels doivent être décidés sur la base de démonstrations de rentabilité.

**Analyse de rentabilité**

**Investissements d'entreprise**

**Investissements de productivité**

La nécessité et les conditions d'une analyse de rentabilité pour l'entreprise dépendent du type d'investissement prévu. Exemples :

- Les investissements de remplacement sont nécessaires pour des machines et appareils indispensables à l'exploitation, et qui sont défectueux ou usés. Si aucune amélioration technique ou d'exploitation n'en résulte, les analyses de rentabilité ne servent qu'à déterminer l'offre la meilleur marché.
- Les investissements obligatoires résultant de prescriptions légales ou d'exigences des autorités, comme par exemple le raccordement à une station d'épuration, la réduction d'émissions polluantes, des mesures de sécurité, etc. Dans ce cas, les analyses de rentabilité peuvent contribuer à identifier les solutions économiquement les plus favorables.
- Les investissements de rationalisation servent à réduire les coûts sans réduire la production, comme par exemple en diminuant les pertes de production, la consommation d'énergie ou en automatisant des processus de fabrication. Ces investissements sont des cas classiques pour les analyses de rentabilité.
- Les investissements de renouvellement permettent l'introduction de procédés et de techniques nouvelles ou améliorées. Leur rentabilité sera toujours soigneusement examinée.
- Les investissements d'extension : l'augmentation de la production ou l'introduction de nouveaux produits nécessitent une décision d'entreprise. Dans ce cas les analyses de rentabilité se limitent à la comparaison entre divers procédés ou entre des variantes d'exécution.

**Une justification de rentabilité d'un investissement est une comparaison entre les coûts des investissement obligatoires et les avantages attendus par l'entreprise.**

**Analyse coût - bénéfice**

## Détermination des coûts d'investissement

Les coûts d'investissement seront évalués de façon très complète sur la base de cahiers de charges, de dossiers d'offres, de valeurs d'expérience et de planings.

Aide-mémoire :

### Planification :

- coût des travaux internes de conception (temps de travail, débours, etc.)
- frais des services externes de conseil et de conception
- coûts des procédures d'autorisation du projet, etc.

### Exécution :

- frais internes de travail et de matériel
- livraisons externes de matériel, d'équipements, de prestations
- réorganisations internes et pertes de production
- démarrage et rodage des installations
- frais de réception et de contrôle, etc.

### Exploitation :

- frais d'exploitation de l'investissement
- frais d'entretien et de maintenance, service externe
- approvisionnement énergétique et protection de l'environnement
- sécurité et diminution des risques
- taxes, licences, autorisations, assurances, etc.

### Finances :

- valeurs comptables restantes et produits de liquidation d'installations n'étant plus utiles
- amortissement et intérêt des capitaux investis
- modifications des fonds de roulement
- réserves pour risques d'exploitation, etc.

## Opportunité d'un investissement

En matière d'investissements d'entreprises, le bénéfice est déterminé par la différence entre les coûts effectifs et les coûts prévisionnels, une fois les investissements réalisés :

**Coûts effectifs**  
**Coûts prévisionnels**

$\text{Bénéfice (annuel)} = \text{Coûts effectifs} - \text{Coûts prévisionnels}$

Lors de l'analyse coûts-bénéfice, il faut tenir compte de quelques principes de base :

**Analyse coûts-bénéfice**

Une analyse des coûts suppose une connaissance aussi précise que possible des coûts effectifs, qui peuvent être tirés du compte d'exploitation.

**Analyse des coûts**

Pour les coûts prévisionnels doit être posée la question de savoir quels coûts seront modifiés par l'investissement, et dans quelle mesure.

**Coûts prévisionnels**

Des économies sous forme d'heures de travail des collaborateurs ne peuvent être considérées comme des économies de coûts que si elles provoquent des économies réelles de salaires ou si des heures de travail libérées peuvent être transférées à d'autres postes. Exemple : la mise en service d'une régulation moderne de chauffage permet de réduire les frais d'entretien d'environ 100 heures par an ; le collaborateur précédemment responsable de ce travail, au lieu d'être congédié, sera engagé dans un autre secteur de l'entreprise.

**Economie de coûts**

Des facteurs de coûts importants tels que les prix du marché, le renchérissement, les taux d'intérêt, les prix de l'énergie, etc., changent constamment et sont imprévisibles à long terme. La détermination des coûts futurs devient d'autant plus compliquée et incertaine que l'évaluation porte sur une plus longue période. Pour une entreprise, il est par conséquent plus fiable d'effectuer des évaluations réfléchies et plausibles de coûts ainsi que de rentabilité sur une durée d'utilisation prévisible plutôt que des calculs complexes à très long terme.

**Facteurs de coûts**

## Durée de vie d'un investissement

La rentabilité d'un investissement dépend également de sa durée de vie, une durée liée à la nature de cet d'investissement :

### Investissements d'infrastructure

- Les investissements d'infrastructure, comme par exemple les installations pour l'alimentation en énergie ou en fluides, les installations de transport et de circulation, etc., sont normalement planifiés pour durer aussi longtemps que l'installation et ses composants. La rentabilité de tels investissements n'est pas déterminée uniquement par les coûts directs d'investissement. Il faut aussi tenir compte des coûts d'entretien des installations dont la durée effective d'utilisation doit être évaluée avec les fournisseurs.

### Investissements de production

- Lors d'investissements de production, effectués dans des installations de production pour améliorer la productivité et la qualité, il ne faut pas considérer la durée de vie probable des composants, mais la durée d'utilisation escomptée, laquelle dépend :
  - du développement technologique: des installations en bon état de marche doivent être changées parce qu'elles sont dépassées techniquement (c'est-à-dire trop coûteuses);
  - de la durée d'utilisation de l'installation de production.

### Frais d'entretien

Dans toute estimation de rentabilité, les frais d'entretien et de maintenance doivent naturellement être pris en considération pour l'ensemble de la durée de fonctionnement.

## 2.4 Evaluations de rentabilité

Règles pratiques pour des évaluations de rentabilité, en sept étapes :

### Première étape : établir le cahier de charges

#### Cahier de charges

- Il faut d'abord définir dans un cahier des charges les buts, les exigences, les conditions d'exploitation ainsi que les conditions de mise en service, et cela même pour de petits projets.
- Des projets mal définis peuvent coûter cher. Il est important d'attribuer à tous les paramètres d'exploitation des valeurs réalistes, qui devront être constamment examinées et ajustées au cours des études.

### Deuxième étape : fixer la procédure

#### Procédure de décision

Les coûts internes pour la planification et les études (P, salaires inclus), les frais externes d'acquisition (F) et les bénéfices annuels (B) des projets d'investissement seront estimés sommairement selon les prix actuels. La décision s'ensuivra en fonction des paramètres suivants :

- $P + F \ll B$  à réaliser aussi vite que possible
- $P < B$  et  $F \geq B$  analyser la rentabilité
- $P + F \gg B$  à oublier au fond du tiroir

### Troisième étape : déterminer les coûts d'investissement

- Etablir une check-list (voir p. 2.3/2).
- Evaluer les dépenses aux prix actuels d'après des valeurs d'expérience et des offres.
- Prendre en considération les risques possibles (points névralgiques ?).
- Prendre en compte l'infrastructure nécessaire (par exemple moyen de transport, alimentation en fluides, protection de l'environnement).
- Il vaut la peine de rester réaliste dans l'évaluation des coûts.
- Un montant de réserve pour « imprévus », pouvant atteindre 10 % de la somme globale est admissible (un pourcentage plus important donne à penser que la planification est insuffisante).

### Quatrième étape : déterminer les frais annuels d'exploitation

#### Frais d'exploitation

- Déterminer au moyen des dépenses d'exploitation comptabilisées les coûts relatifs au projet d'investissement.
- Définir quelle partie de ces coûts est directement ou indirectement déterminante pour le projet.
- Ne pas oublier, lors de la prise en compte de coûts spécifiques (par exemple Fr./l, Fr./pièce), qu'ils sont susceptibles de varier durant le projet.
- Contrôler tous les frais pour voir si et de combien ils peuvent être modifiés par le projet d'investissement.
- Etre de bonne foi lors de l'évaluation du bénéfice.
- Pour des investissements à longue échéance (par exemple équipement d'infrastructure), calculer les frais annuels d'exploitation avec un taux d'accroissement (voir facteurs de valeur moyenne).

**Dépenses pendant la durée d'utilisation****Cinquième étape : évaluer les dépenses pendant la durée d'utilisation**

- Déterminer une durée réaliste d'utilisation des équipements.
- Calculer les frais totaux, c'est-à-dire les frais d'investissement plus la somme des frais annuels (maintenance et entretien, etc.) pendant la durée d'utilisation, afin de disposer d'offres techniquement comparables. L'offre la plus rentable est celle représentant les coûts totaux les moins élevés.
- Lorsque l'investissement est de longue durée (par exemple investissements d'infrastructure d'une durée minimum de cinq ans), les frais annuels du capital investi devraient être calculés selon la méthode des annuités.

**Analyse de sensibilité**

Littérature: Müller A., Walter F.,  
«RAVEL, un investissement  
futé!»

Office fédéral des questions  
conjoncturelles, OCFIM,  
3000 Berne,

N° de com. : 724.397.42.01 f

**Sixième étape : analyse de sensibilité**

Dans le cas où la durée d'utilisation est plutôt longue, il faut soumettre les hypothèses adoptées à une analyse de sensibilité. La demande est décrite plus en détail dans la brochure indiquée (voir citation bibliographique).

**Contrôle d'investissement****Septième étape : contrôle d'investissement**

- Après la réalisation de chaque investissement, il faut examiner si les exigences techniques fixées sont remplies, si les frais d'investissement sont respectés et si la rentabilité espérée est atteinte.
- Les contrôles d'investissement n'ont pas pour but de rechercher des coupables, mais de faire ressortir les mauvaises estimations, de donner des indications sur des possibilités d'amélioration et d'augmenter le « know-how » de l'entreprise.

## 2.5 Critères de rentabilité

La méthode du pay-back est la méthode la plus simple et la plus utilisée dans l'industrie pour déterminer la rentabilité d'un investissement.

$$\text{Pay-back} = \frac{\text{frais d'investissement}}{\text{profit annuel}} \text{ [en mois, années]}$$

**Pay-back  
Durée  
d'amortissement**

La durée de pay-back indique en combien d'années les frais d'investissements seront remboursés par les économies réalisées au travers des investissements consentis. Les économies de coûts annuels (profit annuel) sont calculées aux prix actuels, sans tenir compte du renchérissement (méthode statique).

### Exemple

Coûts d'investissement	=	45 800 Fr.
Economie de dépenses	=	17 600 Fr./an (profit annuel)
Durée de pay-back	=	2,6 ans

La rentabilité ou le «return of investment» (ROI) est le rapport entre le bénéfice et les capitaux investis :

$$\text{ROI} = \frac{\text{bénéfice annuel}}{\text{capitaux investis annuellement}}$$

**Taux de retour  
Return of investment**

Le recours à un capital pour un investissement est rentable si le bénéfice annuel est plus élevé que les frais annuels de capital (intérêts et amortissement) du capital investi.

La méthode des annuités convient avant tout pour des investissements de longue durée. Les frais annuels du capital peuvent être calculés comme une annuité au montant annuel constant.

**Méthode des annuités**

Lors de l'investissement d'un capital C (Fr.) à un taux d'intérêt i (%) échelonné sur n (années), on obtient l'annuité  $A_n$ .

$$A_n = a_n \cdot C$$

**Annuité**

Le facteur d'annuité  $a_n$  peut être lu sur une table ou, pour des calculs approximatifs et rapides, déterminé par la formule approximative suivante :

$$a_n = (i/2) + (100/n) (\%)$$

**Facteur d'annuité**

Dans l'évaluation de rentabilité, les frais, qui vont probablement croître, seront pourvus d'un facteur moyen (voir tableau des facteurs moyens).

Si le bénéfice annuel est plus grand que les frais annuels, on peut en déduire que le projet d'investissement est rentable.

**Tableau A : facteurs d'annuité**

Durée d'utilisation en années	Taux d'intérêt											
	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%	10.0%	15.0%	20.0%
1	1.010	1.020	1.030	1.040	1.050	1.060	1.070	1.080	1.090	1.100	1.150	1.200
2	0.508	0.515	0.523	0.530	0.538	0.545	0.553	0.561	0.568	0.576	0.615	0.655
3	0.340	0.347	0.354	0.360	0.367	0.374	0.381	0.388	0.395	0.402	0.438	0.475
4	0.256	0.263	0.269	0.275	0.282	0.289	0.295	0.302	0.309	0.315	0.350	0.386
5	0.206	0.212	0.218	0.225	0.231	0.237	0.244	0.250	0.257	0.264	0.298	0.334
6	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.203	0.210	0.216	0.223	0.230	0.264	0.301
7	0.149	0.155	0.161	0.167	0.173	0.179	0.186	0.192	0.199	0.205	0.240	0.277
8	0.131	0.137	0.142	0.149	0.155	0.161	0.167	0.174	0.181	0.187	0.223	0.261
9	0.117	0.123	0.128	0.134	0.141	0.147	0.153	0.160	0.167	0.174	0.210	0.248
10	0.106	0.111	0.117	0.123	0.130	0.136	0.142	0.149	0.156	0.163	0.199	0.239
11	0.096	0.102	0.108	0.114	0.120	0.127	0.133	0.140	0.147	0.154	0.191	0.231
12	0.089	0.095	0.100	0.107	0.113	0.119	0.126	0.133	0.140	0.147	0.184	0.225
13	0.082	0.088	0.094	0.100	0.106	0.113	0.120	0.127	0.134	0.141	0.179	0.221
14	0.077	0.083	0.089	0.095	0.101	0.108	0.114	0.121	0.128	0.136	0.175	0.217
15	0.072	0.078	0.084	0.090	0.096	0.103	0.110	0.117	0.124	0.131	0.171	0.214
16	0.068	0.074	0.080	0.086	0.092	0.099	0.106	0.113	0.120	0.128	0.168	0.211
17	0.064	0.070	0.076	0.082	0.089	0.095	0.102	0.110	0.117	0.125	0.165	0.209
18	0.061	0.067	0.073	0.079	0.086	0.092	0.099	0.107	0.114	0.122	0.163	0.208
19	0.058	0.064	0.070	0.076	0.083	0.090	0.097	0.104	0.112	0.120	0.161	0.206
20	0.055	0.061	0.067	0.074	0.080	0.087	0.094	0.102	0.110	0.117	0.160	0.205
25	0.045	0.051	0.057	0.064	0.071	0.078	0.086	0.094	0.102	0.110	0.155	0.202
30	0.039	0.045	0.051	0.058	0.065	0.073	0.081	0.089	0.097	0.106	0.152	0.201
35	0.034	0.040	0.047	0.054	0.061	0.069	0.077	0.086	0.095	0.104	0.151	0.200
40	0.030	0.037	0.043	0.051	0.058	0.066	0.075	0.084	0.093	0.102	0.151	0.200
50	0.026	0.032	0.039	0.047	0.055	0.063	0.072	0.082	0.091	0.101	0.150	0.200

**Tableau B : facteurs moyens****Taux d'intérêt appliqué: 1 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	-2.0%	-1.0%	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%
5	0.942	0.971	1.000	1.030	1.061	1.093	1.126	1.159	1.194
10	0.898	0.947	1.000	1.056	1.115	1.178	1.245	1.315	1.391
15	0.857	0.925	1.000	1.082	1.172	1.270	1.378	1.497	1.627
20	0.810	0.904	1.000	1.108	1.231	1.370	1.529	1.708	1.913
25	0.785	0.884	1.000	1.135	1.294	1.479	1.698	1.955	2.259
30	0.754	0.865	1.000	1.162	1.359	1.598	1.889	2.244	2.679

**Taux d'intérêt appliqué: 2 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	-1.0%	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%
5	0.971	1.000	1.030	1.061	1.092	1.125	1.158	1.192	1.227
10	0.948	1.000	1.055	1.113	1.175	1.241	1.310	1.384	1.462
15	0.927	1.000	1.080	1.167	1.263	1.368	1.484	1.610	1.749
20	0.907	1.000	1.105	1.223	1.357	1.509	1.682	1.877	2.099
25	0.889	1.000	1.129	1.281	1.457	1.664	1.908	2.194	2.530
30	0.872	1.000	1.154	1.339	1.564	1.836	2.166	2.569	3.060

**Taux d'intérêt appliqué: 3 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	0.0%	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%
5	1.000	1.030	1.060	1.092	1.124	1.157	1.191	1.226	1.261
10	1.000	1.054	1.111	1.172	1.237	1.305	1.378	1.454	1.536
15	1.000	1.078	1.163	1.256	1.359	1.471	1.593	1.727	1.875
20	1.000	1.101	1.215	1.344	1.490	1.655	1.842	2.054	2.295
25	1.000	1.124	1.268	1.436	1.632	1.861	2.130	2.446	2.817
30	1.000	1.146	1.320	1.531	1.784	2.091	2.463	2.915	3.467

**Taux d'intérêt appliqué: 4 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	1.0%	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%
5	1.030	1.060	1.091	1.123	1.156	1.190	1.224	1.260	1.296
10	1.053	1.110	1.170	1.233	1.300	1.371	1.446	1.526	1.611
15	1.076	1.159	1.250	1.349	1.458	1.577	1.707	1.849	2.005
20	1.098	1.208	1.332	1.472	1.630	1.808	2.010	2.239	2.499
25	1.118	1.256	1.415	1.600	1.817	2.069	2.365	2.712	3.118
30	1.138	1.302	1.499	1.735	2.019	2.363	2.778	3.283	3.896

**Taux d'intérêt appliqué: 5 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	2.0%	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%	10.0%
5	1.060	1.091	1.122	1.155	1.180	1.223	1.258	1.294	1.331
10	1.108	1.167	1.229	1.295	1.365	1.439	1.517	1.600	1.688
15	1.155	1.243	1.340	1.445	1.560	1.686	1.824	1.974	2.139
20	1.200	1.319	1.454	1.605	1.775	1.968	2.186	2.432	2.711
25	1.244	1.395	1.570	1.774	2.011	2.288	2.611	2.990	3.433
30	1.285	1.469	1.688	1.952	2.268	2.650	3.111	3.669	4.347

**Taux d'intérêt appliqué: 6 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	3.0%	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%	10.0%	11.0%
5	1.090	1.121	1.154	1.187	1.221	1.256	1.292	1.328	1.366
10	1.164	1.225	1.290	1.359	1.431	1.508	1.589	1.675	1.766
15	1.237	1.331	1.433	1.544	1.666	1.799	1.945	2.104	2.278
20	1.308	1.436	1.581	1.744	1.927	2.134	2.368	2.632	2.930
25	1.376	1.541	1.733	1.956	2.215	2.516	2.868	3.279	3.760
30	1.440	1.644	1.888	2.179	2.529	2.950	3.458	4.072	4.815

**Taux d'intérêt appliqué: 7 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	4.0%	5.0%	6.0%	5.0%	8.0%	9.0%	10.0%	11.0%	12.0%
5	1.121	1.153	1.186	1.219	1.254	1.290	1.326	1.363	1.401
10	1.222	1.285	1.353	1.424	1.499	1.579	1.663	1.752	1.846
15	1.322	1.421	1.529	1.647	1.776	1.916	2.069	2.237	2.420
20	1.419	1.558	1.713	1.888	2.085	2.306	2.559	2.838	3.156
25	1.514	1.694	1.903	2.145	2.426	2.754	3.135	3.579	4.099
30	1.603	1.829	2.097	2.418	2.802	3.263	3.818	4.489	5.299

**Taux d'intérêt appliqué: 8 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%	10.0%	11.0%	12.0%
5	1.120	1.152	1.184	1.218	1.252	1.288	1.324	1.361	1.398
10	1.218	1.281	1.347	1.416	1.490	1.568	1.651	1.738	1.830
15	1.313	1.409	1.514	1.628	1.752	1.888	2.036	2.197	2.373
20	1.403	1.536	1.684	1.850	2.037	2.247	2.484	2.750	3.050
25	1.488	1.658	1.853	2.080	2.342	2.646	2.999	3.410	3.888
30	1.565	1.774	2.021	2.314	2.665	3.084	3.586	4.190	4.918

**Taux d'intérêt appliqué: 10 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%	10.0%	11.0%	12.0%
5	1.118	1.150	1.182	1.215	1.249	1.283	1.319	1.355	1.393
10	1.211	1.271	1.335	1.402	1.473	1.548	1.627	1.711	1.799
15	1.296	1.387	1.485	1.592	1.708	1.835	1.972	2.122	2.285
20	1.373	1.494	1.629	1.780	1.948	2.137	2.349	2.587	2.854
25	1.440	1.590	1.763	1.961	2.189	2.451	2.754	3.105	3.511
30	1.497	1.676	1.886	2.122	2.425	2.771	3.182	3.673	4.259

**Taux d'intérêt appliqué: 15 %**

Durée d'utilisation en années	Augmentation de prix								
	4.0%	5.0%	6.0%	7.0%	8.0%	9.0%	10.0%	11.0%	12.0%
5	1.114	1.145	1.176	1.208	1.240	1.274	1.308	1.343	1.379
10	1.195	1.250	1.308	1.369	1.434	1.502	1.573	1.648	1.728
15	1.259	1.337	1.421	1.512	1.610	1.716	1.831	1.955	2.090
20	1.308	1.406	1.513	1.632	1.763	1.908	2.070	2.249	2.449
25	1.344	1.457	1.584	1.738	1.890	2.074	2.283	2.521	2.793
30	1.369	1.495	1.638	1.803	1.993	2.212	2.468	2.765	3.113

**Exemple**

Installation de récupération de chaleur (RC)

Hypothèses :

Investissement :	60 kFr.
Taux d'intérêt :	6 %
Durée d'utilisation :	10 ans
Augmentation moyenne annuelle du prix de l'énergie :	5 %

Facteur d'annuité  $a_n = 6/2 + 100/10 = 13 \%$  ou : 0,136  
(valeur donnée par le tableau)

Frais annuels :

Frais de capital :	$0,13 \cdot 60 = 7,8$ kFr.
Frais supplémentaires d'exploitation :	3 kFr.
Frais supplémentaires d'électricité :	$11 \cdot 1,3$ (facteur moyen) = 14,3 kFr.

Total : 25,1 kFr.

Bénéfice annuel :

Economie de frais de mazout :	$30 \text{ kFr.} \cdot 1,3$ (facteur moyen) = 39 kFr.
Total :	39 kFr.

Le bénéfice annuel (39 kFr.) est plus élevé que les frais annuels (25,1 kFr.).  
L'investissement est donc rentable.

**Notions d'intérêt**

L'intérêt est le prix à payer pour la sollicitation du capital. Suivant sa provenance (capital emprunté ou propre), on parle d'intérêt du capital emprunté ou du capital propre.

On désigne par intérêt imputé les coûts d'intérêts appliqués dans le cadre de calculs d'investissements ou de rentabilité. Ils se différencient en règle générale des taux d'intérêt apparaissant dans les comptes de résultats d'exploitation. Le capital déterminant pour le calcul de l'intérêt comprend non seulement le capital emprunté, mais aussi la part de l'investissement financée par le capital propre. Le capital immobilisé est égal au montant de l'investissement (coût d'acquisition) moins la somme des amortissements déjà réalisés.

Le taux d'intérêt des capitaux engagés correspond au taux unitaire pratiqué pour les calculs d'investissement ou de rentabilité. En principe, le taux d'intérêt des capitaux engagés est le taux d'intérêt minimal attendu d'un investissement projeté. Si le rendement effectif du capital investi est plus élevé, on considère alors que le projet d'investissement est rentable. Dans le cas contraire, il est considéré comme non rentable.

Les entreprises ont souvent recours au taux d'intérêt des capitaux engagés pour la calculation lors de mesures spécifiques de production. En pratique, la plupart des entreprises travaillent avec un taux résultant d'un mélange entre les taux d'intérêt du capital propre et celui du capital emprunté. Pour le capital propre, on choisit un taux d'intérêt plus élevé, tenant compte du risque d'entreprise, de sorte que le taux d'intérêt utilisé est supérieur à l'intérêt hypothécaire (en 1991 environ  $8\frac{1}{2} \% + 1$  à  $2 \%$ , ou davantage, lors de projets à très haut risque).

**Intérêt****Intérêt imputé****Taux d'intérêt des capitaux engagés**

**Intérêt réel**

L'intérêt réel représente le taux englobant l'influence du renchérissement (inflation). Il équivaut approximativement à la différence entre le taux d'intérêt (intérêt nominal) et le taux de renchérissement général (taux d'inflation).

Bibliographie complémentaire :

- Müller A., Walter F., « RAVEL, un investissement futé », Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM, 3000 Berne, N° de com. : 724.397.42.01 f

- R. Leemann, « L'électricité à bon escient », appendice : Rentabilité, pp. 303-321, Office fédéral des questions conjoncturelles, (1993), OCFIM, 3000 Berne, N° de com. : 724.302 f

- Les installations techniques dans la planification intégrale, Vol. A, chapitre 7 : rentabilité, Office fédéral des questions conjoncturelles, (1987), OCFIM, 3000 Berne, N° de com. : 724.608 f/1

- Winje D., Witt D., (1991) « Energiewirtschaft » Handbuchreihe Energieberatung/ Energiemanagement, Vol. II, Verlag TÜV, Rheinland GmbH, Cologne

Exemple : pour un taux d'intérêt de 7 % et un taux d'inflation de 5 %, l'intérêt réel est de 2 %.



# 3 Approvisionnement énergétique

## 3.1 Vue d'ensemble sur les agents énergétiques

## 3.2 Electricité

Production d'électricité	3.2/1
L'électricité en Suisse	3.2/14
Lois, adresses	3.2/18

## 3.3 Produits pétroliers

Gisements	3.3/1
Composition	3.3/2
Raffinage du pétrole	3.3/3
Le pétrole en Suisse	3.3/4
Transport et stockage	3.3/6
Stockage réglementaire	3.3/8
Propriétés de divers produits pétroliers	3.3/9
Lois, adresses	3.3/10

## 3.4 Gaz naturel

Gisements	3.4/1
Composition	3.4/2
Le gaz naturel en Suisse	3.4/3
Transport et stockage	3.4/5
Mesure des quantités de gaz	3.4/6
Propriétés du gaz naturel en Suisse	3.4/7
Lois, adresses	3.4/8

## 3.5 Charbon

Gisements	3.5/1
Composition (valeurs moyennes)	3.5/2
Préparation du charbon	3.5/3
Le charbon en Suisse	3.5/4
Propriétés du charbon	3.5/4
Lois, adresses	3.5/5

## 3.6 Chaleur à distance

## 3.7 Bois

## 3.8 Energie solaire

Rayonnement	3.8/1
Utilisation	3.8/2

## 3 Approvisionnement énergétique

### 3.1 Vue d'ensemble sur les agents énergétiques

Les chapitres 3.2 à 3.8 concernent les agents énergétiques les plus importants en Suisse, à savoir :

- les produits pétroliers
- l'électricité
- le gaz naturel
- le charbon
- la chaleur à distance
- le bois
- l'énergie solaire

Informations supplémentaires :  
«L'énergie, son importance pour l'économie»,  
RAVEL -Industrie,  
N° de com. : 724.316 f;  
OCFIM, 3000 Berne

Les chaînes de transformation de l'énergie sont présentées dans la suite de l'ouvrage (voir aussi le chapitre 1.4: Pertes de transformation). La transformation et l'utilisation de l'énergie dans l'entreprise font l'objet du chapitre 4: Emploi de l'énergie dans l'entreprise.

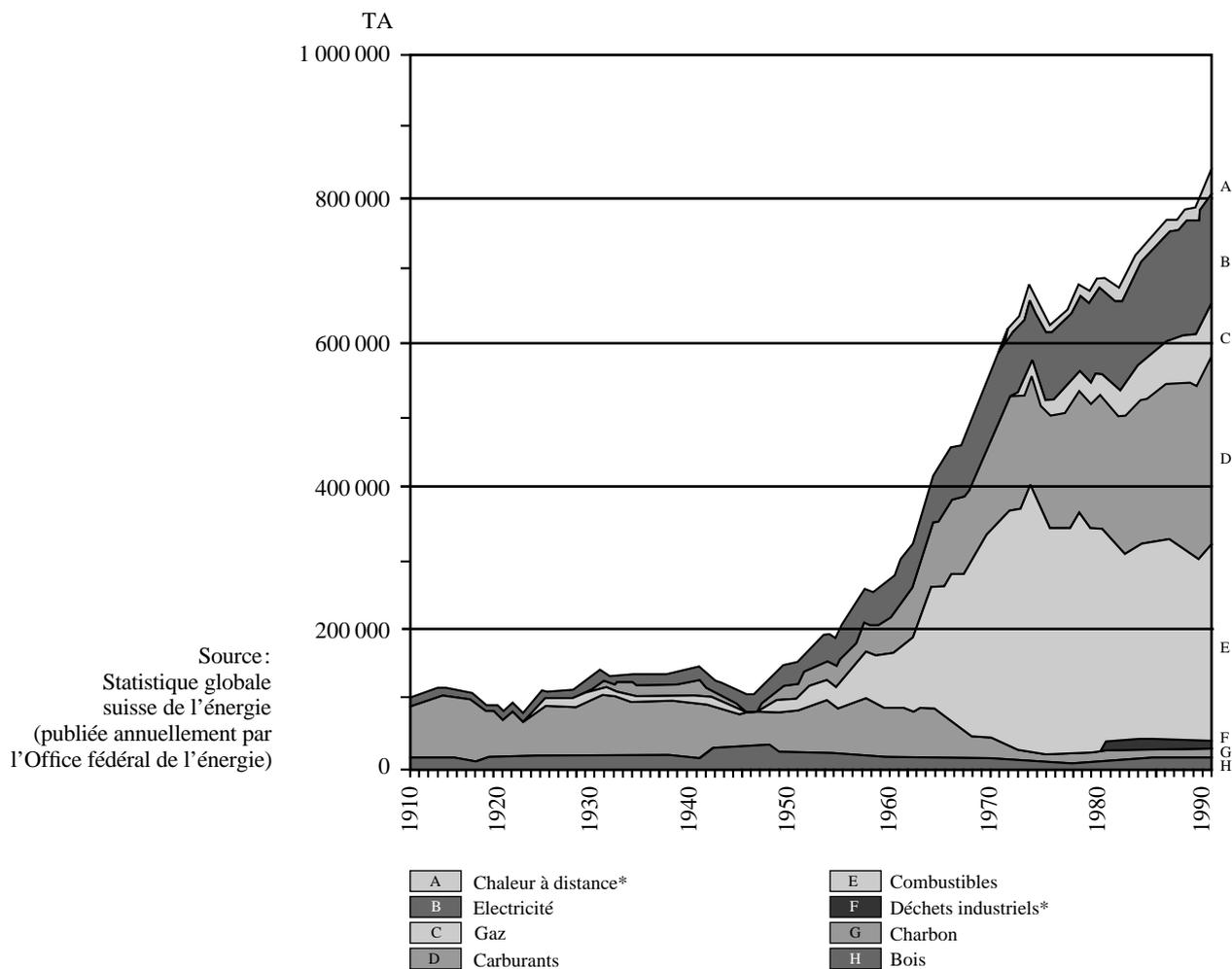
#### Répartition mondiale de la consommation des agents énergétiques primaires, de 1925 à 1990

	Monde 1925	1950	1970	1990	CH 1990
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Pétrole	13	27	44	38	64
Gaz naturel	3	10	18	22	9
Charbon	83	61	32	27	2
Force hydraulique	1	2	6	7	12
Energie nucléaire	—	—	0	6	9
	100	100	100	100	96 *

\* plus bois (1,5%), chaleur à distance (1,5%), déchets industriels (1%)

Source :  
BP Statistical Review of  
World Energy 1991

### Evolution de la consommation d'énergie finale en Suisse de 1910 à 1991 par agent énergétique



\* Relevé pour la première fois en 1978

### Consommation d'énergie finale en Suisse en 1991 selon les secteurs

	Total			Ménages [%]*	Industrie [%]*	Artisanat Agriculture Services [%]*	Transports [%]*	Total [%]*
	[div.]	[TJ]	[%]					
Produits pétroliers	12,7 Mio. t	530 370	64,2	29	8	16	47	100
Electricité	47,6 TWh	171 310	20,7	29	32	34	5	100
Gaz	22,1 TWh	79 620	9,6	41	39	20	—	100
Charbon	452 000 t	12 560	1,5	6	94	—	—	100
Bois	1,49 Mio. t	13 060	1,6	67	23	10	—	100
Chaleur à distance	3360 GWh	12 090	1,5	43	19	38	—	100
Déchets industriels		7 850	0,9	—	100	—	—	100
<b>Total</b>		<b>826 860</b>	<b>100</b>	<b>31</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>31</b>	<b>100</b>

Source :  
Statistique globale suisse de l'énergie  
(publiée annuellement par l'Office fédéral de l'énergie)

\* Les pourcentages se rapportent à la part de l'agent correspondant à l'énergie consommée dans un secteur donné.

**Répartition de la demande d'électricité en Suisse selon les secteurs et le type d'utilisation en 1990**

	Total	Chaleur	Force	Lumière	Appareils	Divers
Total	100 %	37 %	33 %	11 %	14 %	5 %
Installations du bâtiment	25 %	7 %	8 %	10 %		
Production industrielle	30 %	8 %	19 %			3 %
Prestations de services	14 %	8 %	2 %		2 %	2 %
Installations domestiques	24 %	12 %			12 %	
Transports	7 %	2 %	4 %	1 %		

Source: RAVEL

## 3.2 Electricité

L'électricité est un agent énergétique secondaire, produit par des agents énergétiques primaires (force hydraulique, combustibles nucléaires ou fossiles, vent, biomasse, énergie solaire, etc.)

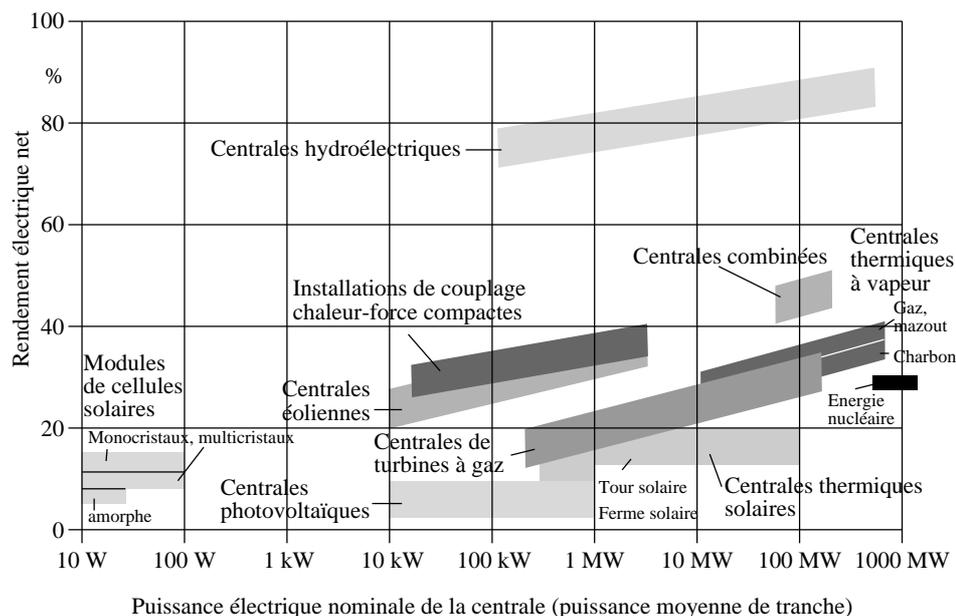
### Production d'électricité

Eau	Centrales hydroélectriques	<b>Electricité</b>
Pétrole	Agents énergétiques fossiles	
Gaz naturel		
Charbon		
Energie nucléaire	Centrales thermiques	
Déchets		
Biogaz		
Bois		
Energie solaire		
Vent	Centrales éoliennes	
Energie solaire	Photopiles	

Des pertes ont lieu lors de la production d'électricité. Le rendement dépend du type de production et de la taille des installations.

**Pertes de transformation**

## Rendement net des installations de production de courant (Etat 1991)



Source:  
VDI-GET Jahrestagung 90,  
Darmstadt

Pour différents besoins spécifiques (charge de base ou de pointe) et tailles d'installations correspondent des techniques de coûts d'investissement et d'exploitation variables.

## Données caractéristiques des divers types de centrales (Etat 1991)

Type d'installation	Investissement spécifique [Fr./kW]	Durée de construction nette (sans planification ni procédures d'autorisation) [années]	Rendement de l'installation [%]	Combustible	Adapté pour	Temps de démarrage à froid jusqu'à pleine charge [heures]
Centrale hydro-électrique	2500-3500	3-5	(environ 80)	«soleil»	charge de base ou de pointe	$1/10$ - $1/4$
Centrale nucléaire avec réacteur à eau sous pression ou à eau bouillante	3000-4000	6-8	30-40	uranium	charge de base	30-50
Centrale thermique à vapeur avec installation de désulfuration des gaz	1500-2200	4 (à 6)	37	charbon	charge de base à moyenne	5-8
Centrale thermique à vapeur sans installation de désulfuration des gaz	1200-1800	3 (à 5)	40			
Centrale de turbines à gaz	450-750	1-2	28-32	gaz naturel, combustible liquide	charge de pointe	$1/4$
Centrale combinée	700-1200	2-3	45-52	gaz naturel, combustible liquide	charge de base à moyenne	$1/2$ - $2 1/2$
Centrale thermique à vapeur avec couplage chaleur-force et installation de désulfuration des gaz	1600-2300	2-4	70-85	charbon, bois, gaz naturel, combustibles liquides	charge de base	5-8
Centrale combinée	730-1250	2-3				
Gazéification du charbon avec centrale combinée	1750-2500	3-4	38,5	charbon	charge de base	70

Source: ABB

### Centrales hydroélectriques

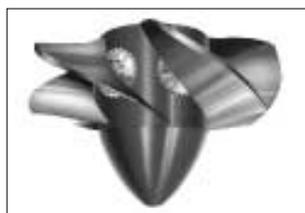
Dans les centrales hydroélectriques on utilise des turbines pour transformer l'énergie potentielle ou cinétique de l'eau en énergie mécanique pour actionner des générateurs.

La puissance dépend du débit d'eau et de la hauteur de chute. Les rendements sont généralement situés entre 80 et 90%.

### Turbines



Turbine Francis



Turbine Kaplan



Turbine Pelton

### Turbine Francis Turbine Kaplan Turbine Pelton

### Types de turbines : caractéristiques et domaines d'utilisation

Système	Quantité d'eau	Hauteur de chute [m]	Application
Turbine Pelton	petite	100 à 1800	Centrales haute pression
Turbine Francis	moyenne	50 à 700	Centrales haute et moyenne pression
Turbine Kaplan	grande	2 à 50	Centrales basse pression
Turbine bulbe	grande	2 à 30	Centrales basse pression

La turbine bulbe est une turbine Kaplan horizontale.

Les centrales hydroélectriques au fil-de-l'eau n'ont pas ou peu de réserves d'eau. Leur production de courant dépend donc du débit momentané de l'eau. Des centrales au fil-de-l'eau typiques sont les centrales de rivières.

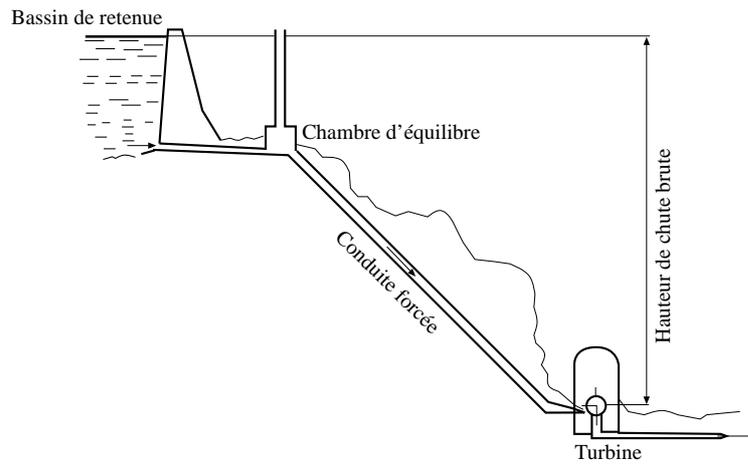
### Turbine bulbe

### Centrales au fil-de-l'eau Centrales de rivières

Les barrages à accumulation (haute pression) servent avant tout à couvrir les pointes de charge. L'eau est conduite, au moyen d'une conduite forcée, d'un bassin de retenue à la turbine. L'élimination des coups de bélier qui se produisent lors de l'arrêt brusque des turbines est assurée par une chambre d'équilibre.

### Barrages hydroélectriques

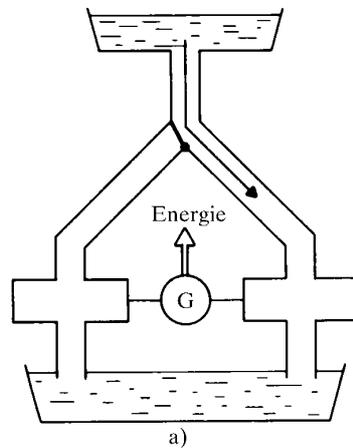
### Centrale à haute-pression



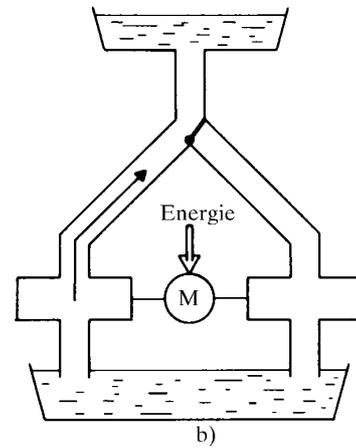
### Centrale électrique de pompage à accumulation

Dans une centrale hydroélectrique de pompage à accumulation, c'est surtout pendant les périodes de faible demande (la nuit) que de l'eau est pompée, d'un cours d'eau ou d'un bassin d'accumulation dans un réservoir surélevé. Cette énergie est alors disponible le jour comme énergie de pointe.

#### Fonctionnement en turbinage

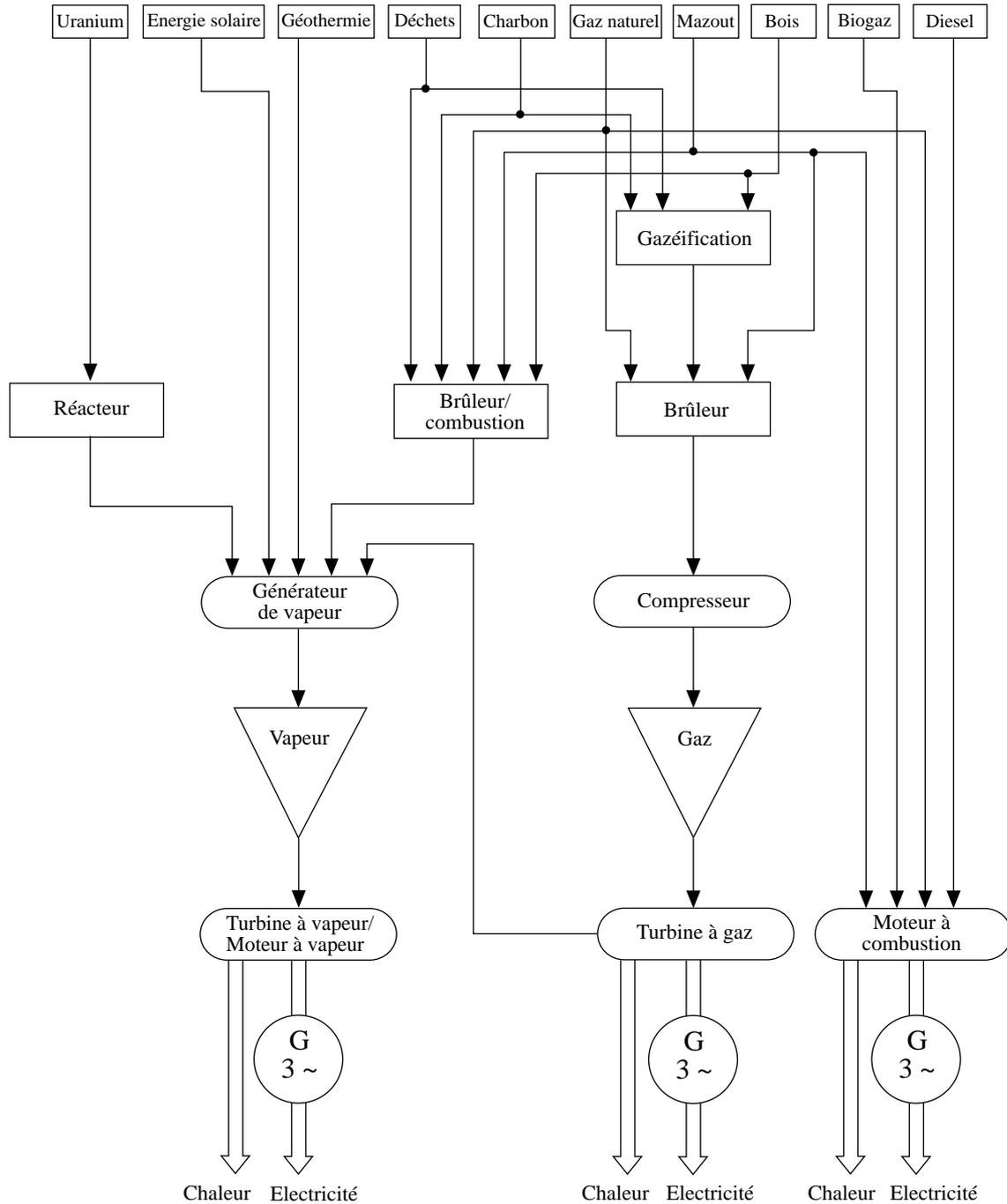


#### Fonctionnement en pompage



### Centrales thermiques

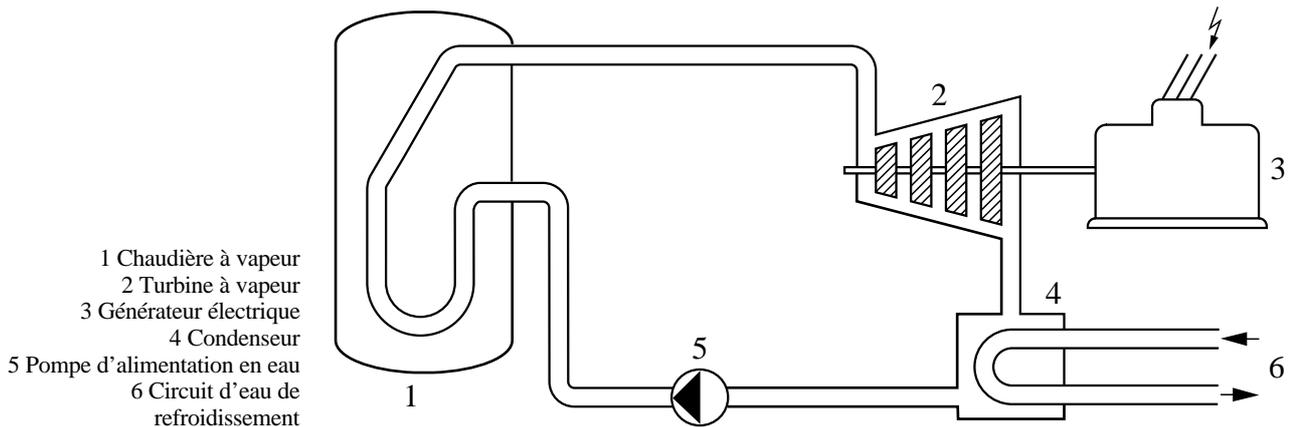
Dans les centrales thermiques, l'énergie investie est d'abord transformée en énergie calorifique puis ensuite, par des machines thermiques, en énergie mécanique de rotation pour l'entraînement de générateurs électriques.



## Centrales thermiques à vapeur

La vapeur alimentant une turbine provient de la chaleur fournie par diverses sources, telles que combustibles fossiles, fission nucléaire ou biomasse.

### Centrale thermique à vapeur



#### Etages de pression

La plupart des turbines sont divisées en plusieurs étages de pression. Pour une turbine à vapeur à trois étages, on parle de partie à haute, moyenne et basse pression.

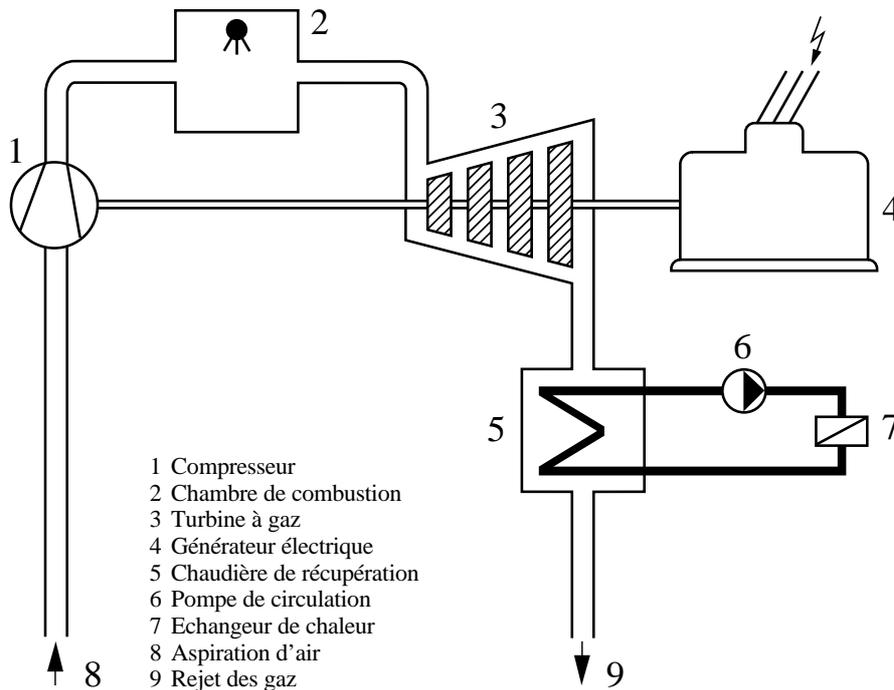
#### Rendement global

Les centrales thermiques à vapeur atteignent un rendement global de 40%.

#### Centrale nucléaire

Les centrales nucléaires sont des centrales thermiques dans lesquelles le générateur de vapeur est chauffé par un réacteur nucléaire.

**Centrales à turbines à gaz**



- 1 Compresseur
- 2 Chambre de combustion
- 3 Turbine à gaz
- 4 Générateur électrique
- 5 Chaudière de récupération
- 6 Pompe de circulation
- 7 Echangeur de chaleur
- 8 Aspiration d'air
- 9 Rejet des gaz

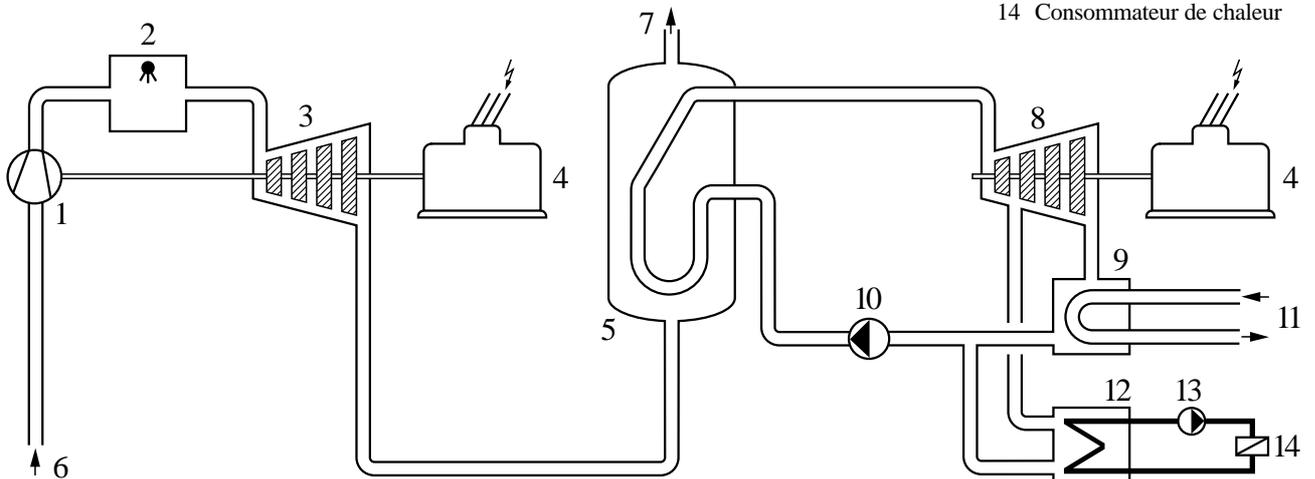
Le rendement global d'installations de turbines à gaz atteint 25 à 35 %.

**Centrales combinées**

Les centrales combinées sont constituées d'une unité génératrice à turbine à gaz combinée avec une unité génératrice à turbine à vapeur. Les gaz de combustion à température élevée de la première unité servent à la production de la vapeur utilisée dans la deuxième. Le rendement global atteint 52%. Gaz naturel, fuel léger ou charbon gazéifié servent de combustible.

- 1 Compresseur
- 2 Chambre de combustion
- 3 Turbine à gaz
- 4 Générateur électrique
- 5 Chaudière de récupération
- 6 Aspiration d'air
- 7 Evacuation des gaz d'échappement
- 8 Turbine à vapeur
- 9 Condenseur
- 10 Pompe d'alimentation en eau
- 11 Circuit d'eau de refroidissement
- 12 Condenseur avec échangeur de chaleur
- 13 Pompe de circulation
- 14 Consommateur de chaleur

**Centrale combinée**



### Installations de couplage chaleur-force (CCF)

#### Installations de couplage chaleur-force Production prioritaire de chaleur

Les installations de couplage chaleur-force produisent de façon combinée de la chaleur et du courant électrique.

- Les installations à production prioritaire de chaleur servent avant tout à la production de chaleur. Le régime de fonctionnement est dicté par les besoins de la production de chaleur (en fonction de la température extérieure).

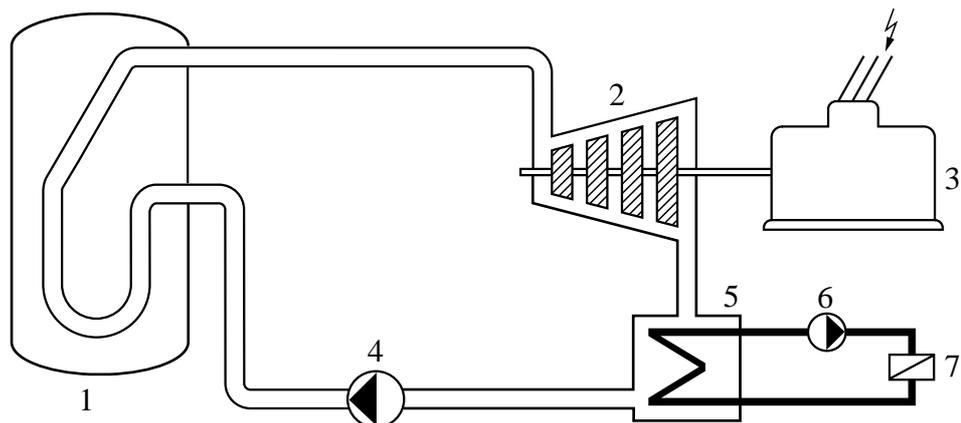
#### Production prioritaire d'électricité

- Les installations à production prioritaire d'électricité servent avant tout à la production d'électricité. Le régime de fonctionnement est dicté par les besoins d'électricité.

#### Rendement global

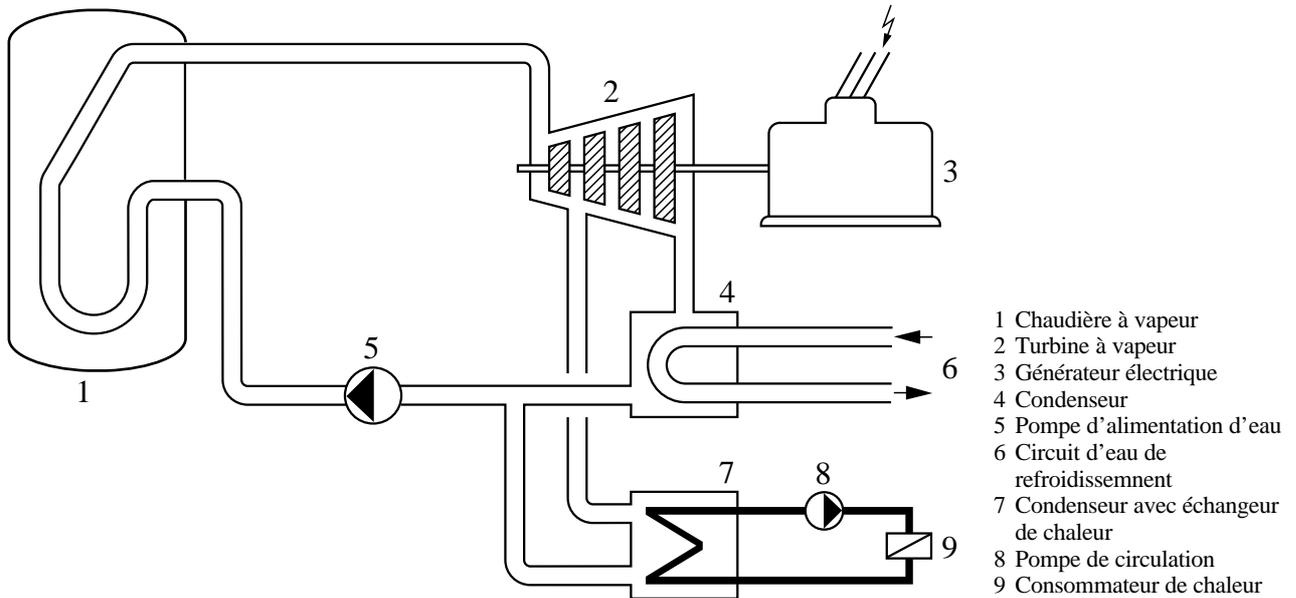
Les rendements globaux calculés pour ces types d'installations partent de l'hypothèse que l'électricité et la chaleur sont utilisées en même temps. Les installations de couplage chaleur-force sont d'autant plus rentables que la durée d'utilisation atteinte est élevée. La durée minimale d'utilisation ne devrait pas descendre en dessous de 4000 h/an.

### Installation de turbine à vapeur à contre-pression



- 1 Générateur de vapeur
- 2 Turbine à vapeur
- 3 Générateur électrique
- 4 Pompe d'alimentation
- 5 Condenseur avec échangeur de chaleur
- 6 Pompe de circulation
- 7 Echangeur de chaleur

**Installation de turbine à vapeur à soutirage/condensation**



- 1 Chaudière à vapeur
- 2 Turbine à vapeur
- 3 Générateur électrique
- 4 Condenseur
- 5 Pompe d'alimentation d'eau
- 6 Circuit d'eau de refroidissement
- 7 Condenseur avec échangeur de chaleur
- 8 Pompe de circulation
- 9 Consommateur de chaleur

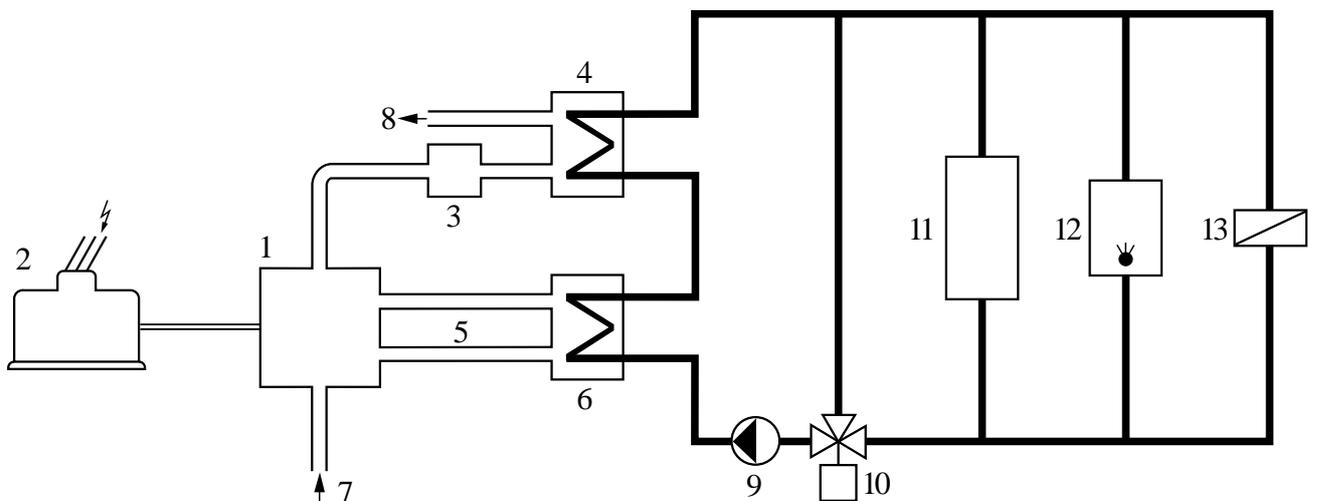
Les moteurs à combustion (moteurs diesel ou à gaz) sont les principaux agrégats utilisés pour des installations CCF de faible puissance. La récupération de chaleur permet de faire passer le rendement d'utilisation du combustible d'environ 30-40% en production d'électricité seule à environ 80-90% en production combinée.

**Moteurs diesel/à gaz**

Une installation de couplage chaleur-force compacte (CCFC) travaille selon le principe décrit ci-dessus. Les composants moteur/turbine, générateur et échangeur de chaleur sont assemblés en un « bloc » compact. Autres termes pour CCFC: TOTEM (Total Energy Module).

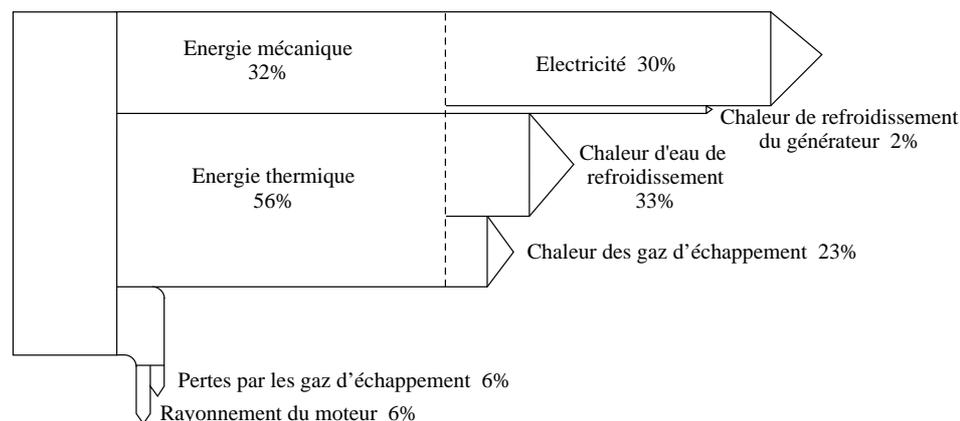
**Installation de couplage chaleur-force compacte Installation à énergie totale TOTEM**

**Installation CCFC**



- 1 Moteur diesel ou à gaz
- 2 Générateur électrique
- 3 Catalyseur
- 4 Echangeur de chaleur sur les gaz d'échappement
- 5 Circuit d'eau de refroidissement
- 6 Echangeur de chaleur d'eau de refroidissement
- 7 Entrée d'air
- 8 Evacuation des gaz d'échappement
- 9 Pompe de circulation
- 10 Vanne à 3 voies
- 11 Accumulateur de chaleur
- 12 Chaudière
- 13 Consommateur de chaleur

## Diagramme des flux d'énergie dans une installation CCFC

**Centrale chaleur-force**

Une centrale chaleur-force est une installation de production combinée de chaleur et d'énergie électrique de grande puissance, qui sert avant tout à la production de chaleur avec production auxiliaire de courant. La chaleur alimente un réseau de chauffage à distance. Une centrale de chauffage, alimentée en combustibles conventionnels (gaz naturel, mazout, ordures, etc.) sert exclusivement à la production de chaleur et ne produit donc pas de courant électrique.

**Données techniques des installations CCF**

Système	Pour puissances électriques de [MW]	Facteur électrique $\alpha$	Combustible	Rendement global
«TOTEM»	0,015-0,2	0,5-0,8	gaz, mazout	0,5-0,9
Centrale chaleur-force compacte	0,1-1,2	0,5-0,8	gaz, mazout	0,5-0,9
Moteur Diesel industriel	1,1-30	0,9-1,1	gaz, mazout	0,7-0,8
Turbine à gaz et chaudière de récupération	0,5-80	0,4-0,8	gaz, mazout	0,7-0,8
Turbine à vapeur à contre-pression	0,5-50	0,3-0,6	uranium, charbon, mazout, gaz, gaz d'échappement, biogaz	0,8-0,9
Turbine à soutirage/condensation	20-1000	0,35-0,6	uranium, charbon, mazout, gaz, gaz d'échappement, biogaz	0,4-0,8
Installation combinée gaz-vapeur	0,5-50	0,3-1,1	gaz, mazout	0,7-0,9

\*  $\alpha$  rapport entre la production d'énergie électrique et l'énergie de chauffage.  
Dépend du type d'application (installation CCF à production prioritaire de courant ou de chaleur).

### Centrales éoliennes

Pour que l'énergie éolienne puisse être utilisée, il est nécessaire que le vent ait une vitesse d'au moins 4 à 5 m/s. C'est pourquoi les éoliennes s'implantent plutôt sur les côtes, les îles et les hauteurs de l'arrière-pays.

**Vitesse du vent**

Les convertisseurs d'énergie éolienne sont souvent installés en rangées, ou alors rassemblés dans ce qu'on appelle des « fermes ».

**Convertisseur d'énergie éolienne**

Les éoliennes modernes transforment 20 à 25 % de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Une installation éolienne de grandeur moyenne, on nécessite une surface d'environ 4 m<sup>2</sup> balayée par l'hélice pour générer 1 kW.

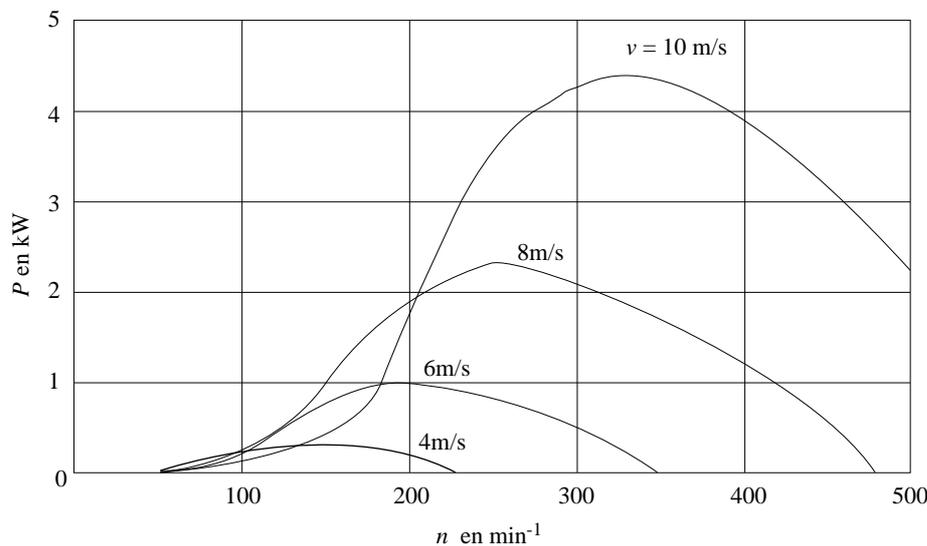
**Rendement**

La puissance d'une centrale éolienne dépend :

- de la vitesse du vent, dans une proportion qui varie avec le cube de cette vitesse ;
- du diamètre de l'hélice, dans une proportion qui varie avec le carré de ce diamètre.

**Puissance**

### Courbes caractéristiques de puissance d'un convertisseur d'énergie éolienne (exemple)



*P* : puissance électrique  
*n* : nombre de tours  
*v* : vitesse du vent

## Piles à combustible

Une pile à combustible peut être utilisée via un reformeur avec des combustibles solides, liquides ou gazeux. La pile transforme l'énergie chimique du combustible directement en énergie électrique. Le rendement est situé entre 35 et 65 %.

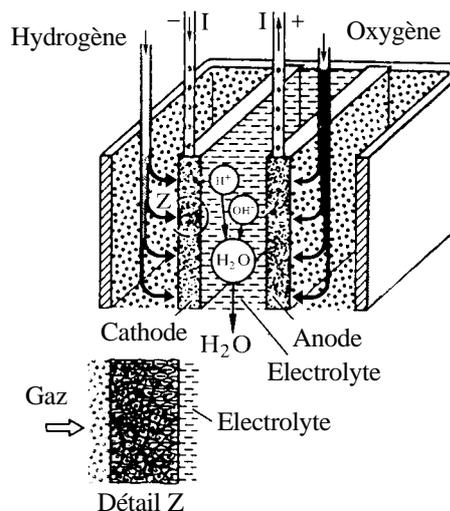
### Exemple

Cathode: nickel fritté

Anode: charbon poreux

Electrolyte: potasse caustique concentrée

Tension: 1,23 V



### Différents types de piles à combustible

Procédé	Electrolyte	Combustible	Temp. °C	Avancement
AFC (alcalin)	potasse caustique	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	80	prêt
SPFC (Solid Polymer)	corps solide	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> /air	80	prêt, en test
PAFC (Phosphor Acid)	acide phosphorique	gaz/air	200	prêt, en test
MCFC (Molten Carbon)	carbonate de potassium	gaz/air	650	en développement
SOFC (Solid Oxide)	oxyde de zirconium	gaz/air	1000	en développement

## Cellules photovoltaïques

Pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique on utilise des cellules solaires. Elles se composent de couches semi-conductrices, généralement du silicium, dans lesquelles la lumière solaire libère des électrons, porteurs de charge électrique. La puissance utile par m<sup>2</sup> de cellule solaire s'élève à environ 100 W pour un rayonnement solaire maximal. En Suisse on peut compter sur environ 1000 heures par année de plein rayonnement.

## Cellules solaires

### Propriétés des cellules photovoltaïques utilisées actuellement

Type de cellules	Grandeur des cellules	Epaisseur du silicium	Rendement [%]	Surface des cellules	Prix de l'installation
Monocristallin	~ 1 dm <sup>2</sup>	100 µm	13	~ 10 m <sup>2</sup> /kW	16 kFr/kW
Polycristallin	~ 1 dm <sup>2</sup>	100 µm	11	~ 11 m <sup>2</sup> /kW	14 kFr/kW
Amorphe	> 1 m <sup>2</sup> !	0,5 µm!	6 –14 ?	10 –20 m <sup>2</sup> /kW	< 8Fr/kW ?

Au sujet du rayonnement solaire et de l'utilisation de l'énergie solaire, voir chapitre 3.8: Energie solaire.

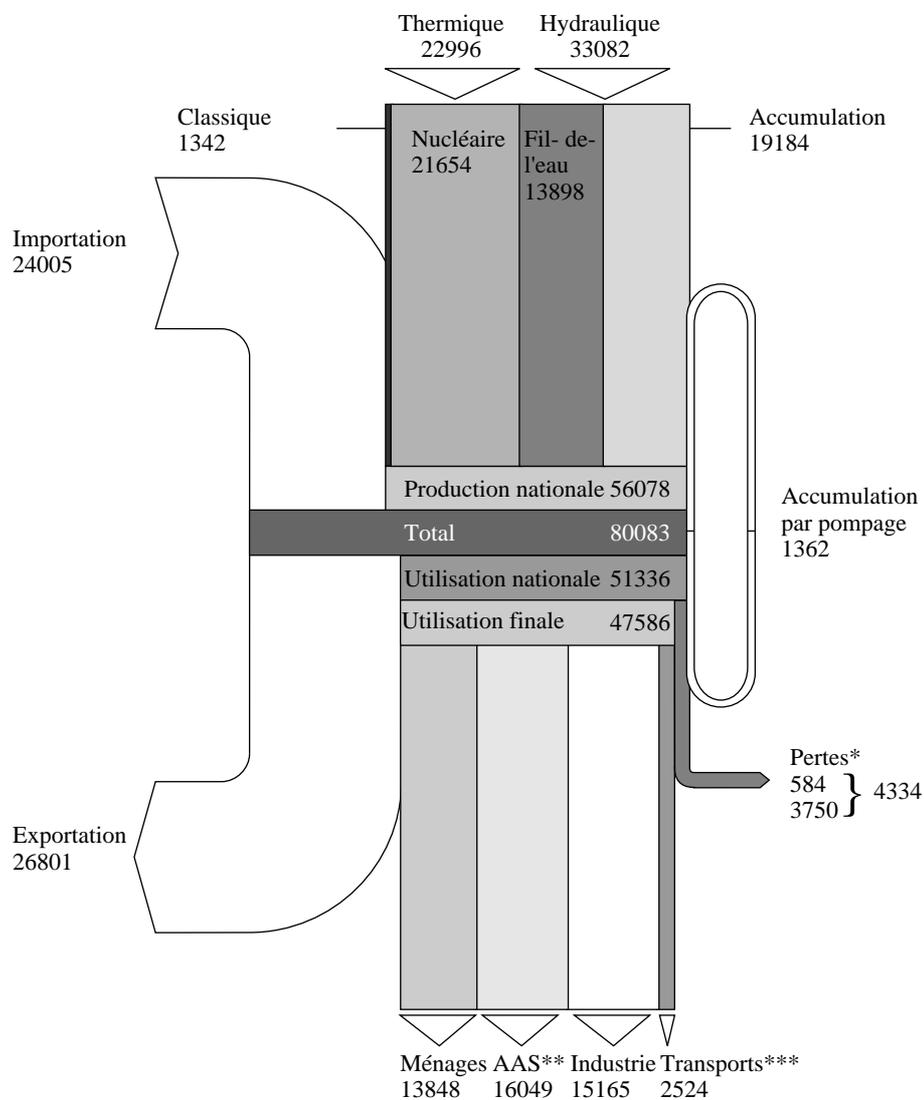
Informations supplémentaires :

- Office fédéral des questions conjoncturelles: Programme d'impulsion PACER

- SOFAS, Association suisse des spécialistes de l'énergie solaire. Secrétariat: Edisonstr. 22, 8050 Zurich, tél. 01/311 90 40

## L'électricité en Suisse

### Bilan suisse de l'électricité en 1991 (en GWh)



Source :  
Bulletin UCS 08/92

\*Pertes de pompage, transport et distribution

\*\*Artisanat, agriculture et services

\*\*\*Chemins de fer

Remarque : importation et exportation sont fonction de la demande et peuvent intervenir à des moments différents (jour, nuit, été, hiver).

### Approvisionnement en électricité

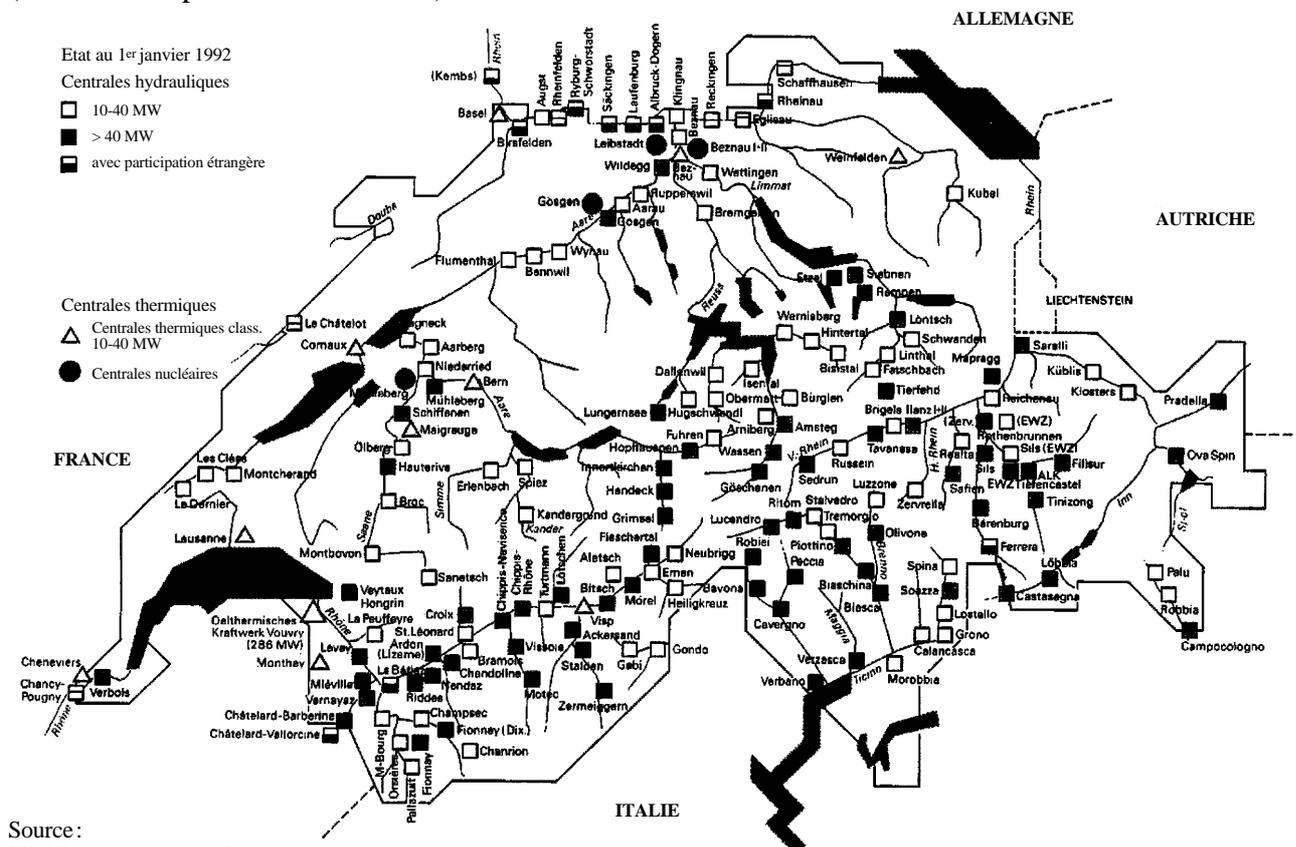
L'approvisionnement en électricité de la Suisse est assuré par plus de 1200 entreprises distributrices. La majeure partie de l'électricité est fournie par les dix plus grandes entreprises («dix grandes sociétés»).

«Dix grandes sociétés»

- 6 sociétés interrégionales
  - Aare-Tessin AG für Elektrizität (Atel) / Aar et Tessin S.A. d'Electricité
  - Bernische Kraftwerke (BKW) / Forces motrices bernoises S.A.
  - Centralschweizerische Kraftwerke (CKW) / Centrales électriques de la Suisse centrale S.A.
  - Elektrizitätsgesellschaft Laufenburg AG (EGL) / Electricité de Laufenburg S.A.
  - L'Energie de l'Ouest-Suisse S.A. (EOS)
  - Nordostschweizerische Kraftwerke (NOK) / Forces motrices du Nord-est de la Suisse S.A.
- 3 services électriques urbains
  - Bâle (IWB)
  - Berne (EWB)
  - Zurich (EWZ)
- Les Chemins de fer fédéraux suisses (CFF)

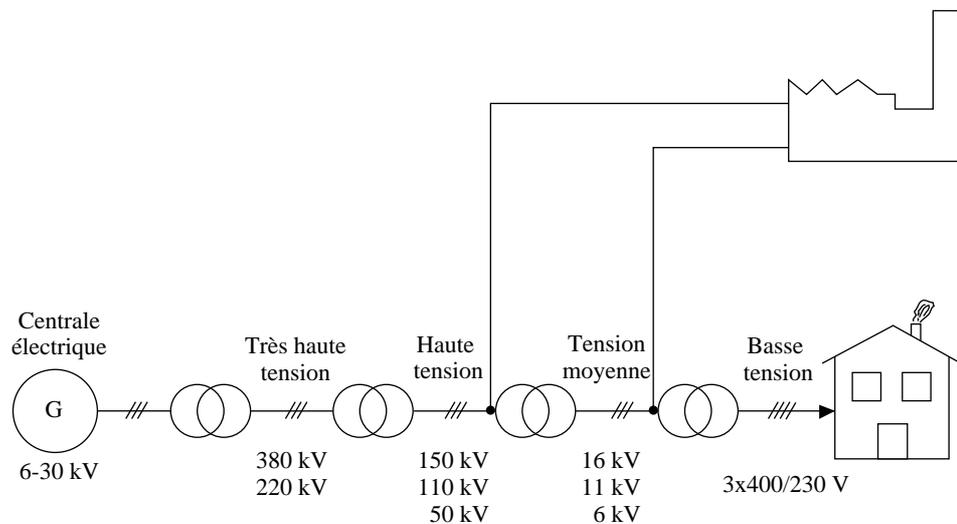
Les pouvoirs publics participent à raison de 73% au capital-action des entreprises et les 27% restants proviennent de l'économie privée. Le secteur privé est surtout actif dans les domaines de la production et du transport, les pouvoirs publics avant tout de la distribution.

### Production d'électricité en Suisse (Centrales de puissance > 10 MW)



Source: UCS Rapport annuel 1991

## Distribution d'électricité



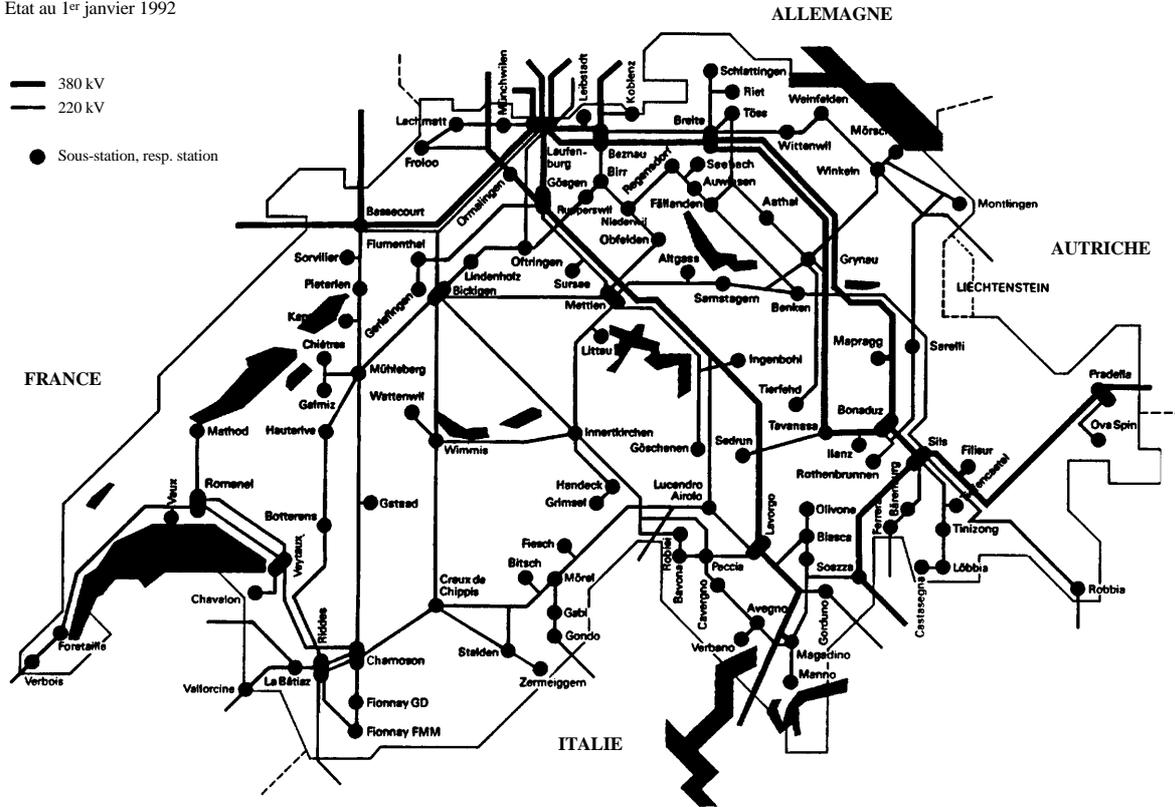
**Très haute tension**  
**Haute tension**  
**Moyenne tension**  
**Basse tension**

Le transport de l'électricité à différents niveaux de tension et de capacités de transport peut être comparé à un réseau routier. **Les lignes à très haute tension correspondent aux autoroutes pour le trafic à longue distance**; les lignes à haute, moyenne ou basse tension, qui s'y raccordent, correspondent aux routes cantonales et communales qui servent au trafic régional et à la distribution fine.

La Suisse est reliée au réseau électrique européen interconnecté. Château d'eau au milieu de l'Europe, elle a un rôle important de plaque tournante à jouer.

### Lignes à très haute tension en Suisse

Etat au 1<sup>er</sup> janvier 1992



Source:  
UCS Rapport annuel 1991

## Lois

- Loi sur l'utilisation des forces hydrauliques (délivrance des concessions dans la domaine de l'eau)
- Loi sur l'énergie atomique
- Loi sur les installations électriques et ordonnance sur le courant fort et faible
- Loi sur la protection des eaux
- Ordonnance sur la protection de l'air (OPAIR)

**Référence:** OCFIM, 3000 Berne

## Adresses

- Association suisse des électriciens (ASE), Seefeldstr. 301, case postale, 8034 Zurich, tél. 01/384 91 11 (responsable des normes)
- Inspectorat fédéral du courant fort, Seefeldstr. 301, case postale, 8034 Zurich, tél. 01/384 91 11 (responsable de la sécurité et du contrôle des installations)
- Union des centrales suisses d'électricité (UCS), Gerbergasse 5, case postale, 8023 Zurich, tél. 01/211 51 91 (qualifiée pour des recommandations de tarifs)
- Centre d'information pour l'utilisation de l'électricité (INFEL), Lagerstr. 1, 8021 Zurich, tél. 01/291 01 02

## 3.3 Produits pétroliers

### Gisements (état en 1991)

Réserves mondiales de pétrole (prouvées), extraction et consommation

Pays	Réserves prouvées		Extraction		Consommation	
	[mio. t]	[%]	[mio. t/an]	[%]	[mio. t/an]	[%]
Arabie saoudite	35 210	26	410	13		
Iraq	13 417	10	*	*		
Koweït	13 024	10	*	*		
Emirats Arabes Unis	12 892	10	118	3,7		
Iran	12 695	9	166	5,3		
Libye			74	2,4		
Algérie			58	1,8		
Nigeria			96	3,0		
Venezuela	8 266	6	122	3,9		
Mexique	6 979	5	155	4,9	74	2,4
USA	3 359	3	419	13,3	770	24,8
Canada			92	2,9	75	2,4
CEI	7 755	6	515	16,4	410	13,2
Chine	3 288	2	139	4,4	100	3,2
Indonésie			79	2,5		
Japon					243	7,8
Norvège			93	3,0		
Grande-Bretagne			92	2,9	83	2,7
Allemagne					133	4,3
Italie					93	3,0
France					89	2,9
Monde	134 604	100	3149	100	3108	100

\* guerre du Golfe

Source : Shell, Esso

### Classement par continents

La mesure commerciale utilisée est généralement le baril. 1 baril = 1 bbl = 159 l.

## Composition du pétrole

**Pétrole brut** Le pétrole brut extrait se présente généralement comme un mélange de pétrole, de gaz naturel, de saumure et de boue. Par un traitement adapté on obtient du pétrole purifié, exempt des sel, eau, gaz et corps solides.

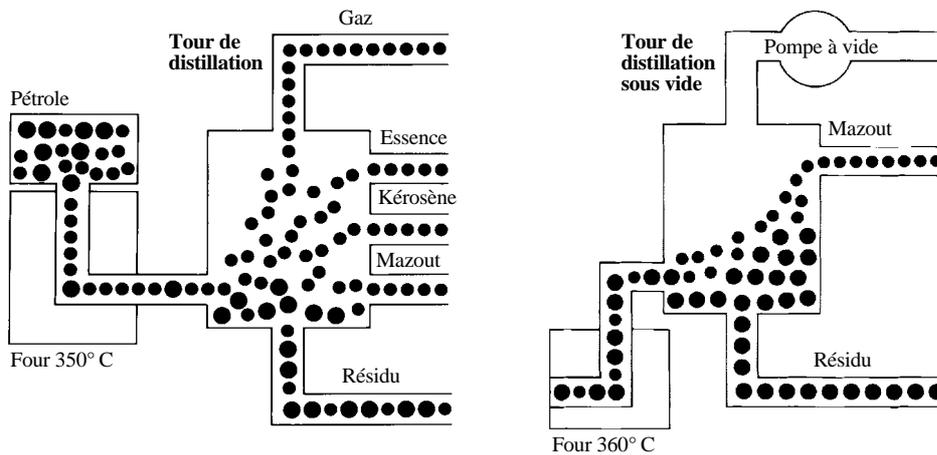
**Pétrole** Le pétrole contient surtout des hydrocarbures (qui sont des composés ne comportant que des atomes de carbone et d'hydrogène,  $C_nH_x$ ). Les constituants principaux en sont :

le carbone	80 –87 %
l'hydrogène	10 –14 %
le soufre	0 –5 %
l'oxygène	0 –3 %
l'azote	0 –2 %

## Raffinage du pétrole

Divers produits peuvent être obtenus à partir du pétrole par distillation fractionnée. Le procédé de distillation consiste à chauffer un liquide jusqu'à son point d'ébullition ; les vapeurs formées sont refroidies, afin de les liquéfier et de les récupérer. Le traitement du pétrole brut commence par une distillation à pression atmosphérique. On le chauffe à 350° C et l'on condense les vapeurs formées à diverses températures.

**Distillation fractionnée**  
**Distillation atmosphérique**



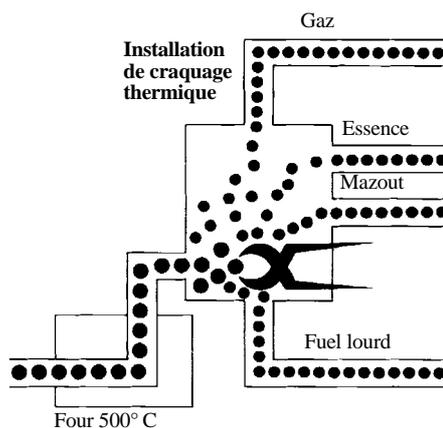
Source :  
Pétrole et produits du pétrole,  
Shell, Suisse

Une distillation sous-vide des résidus suit la distillation atmosphérique afin d'en retirer du mazout supplémentaire.

**Distillation sous vide**

Le craquage thermique dissocie les molécules des produits pétroliers lourds, comme par exemple le fuel lourd, et les recompose en molécules de produits plus légers. Exemple : le craquage d'un distillat lourd (à 20 bar et 500° C) donne par exemple de la benzine.

**Craquage thermique**



Le gaz de pétrole (gaz de raffinerie) est un produit secondaire du traitement des huiles minérales, contenant une grande proportion de propane ( $C_3H_8$ ) et de butane ( $C_4H_{10}$ ).

Gaz liquide de pétrole : Liquefied Petroleum Gas (LPG)

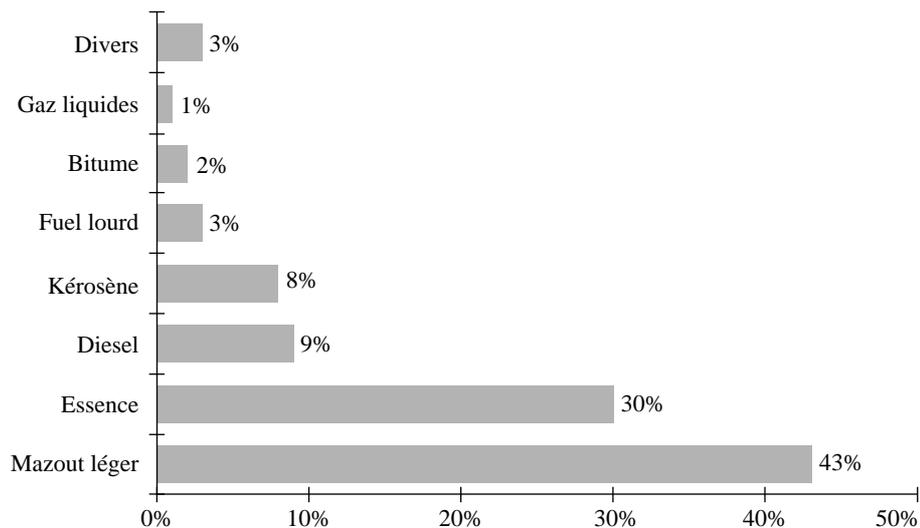
**Liquefied Petroleum Gas, LPG**

## Le pétrole en Suisse

### Consommation de pétrole

Consommation de pétrole en Suisse en 1991 : 13 millions de tonnes (pétrole brut transformé + produits pétroliers importés).

### Proportion des divers produits pétroliers à la consommation globale de 1991

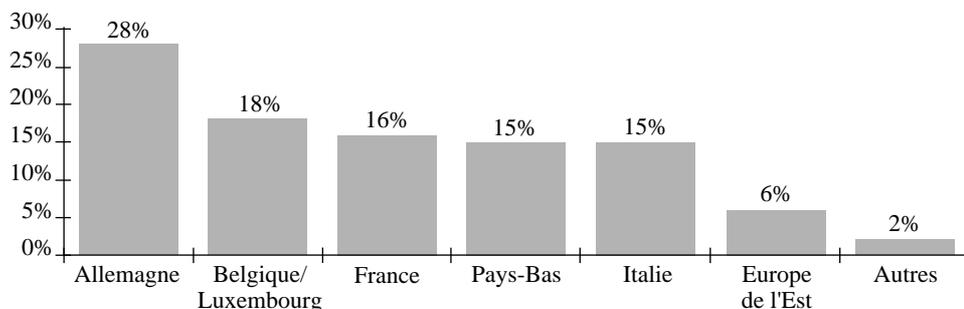


Source : Shell

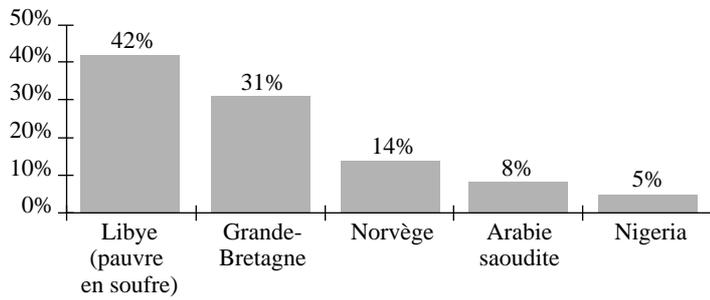
### Importation de pétrole

Les importations pétrolières concernent deux groupes de produits : les produits pétroliers et le pétrole brut, transformé en produits pétroliers dans les deux raffineries suisses : la raffinerie de Cressier SA (Shell) et la raffinerie du Sud-Ouest SA (Tamoil) à Collombey (VS). Les deux ont une capacité d'environ 3 millions de tonnes annuelles.

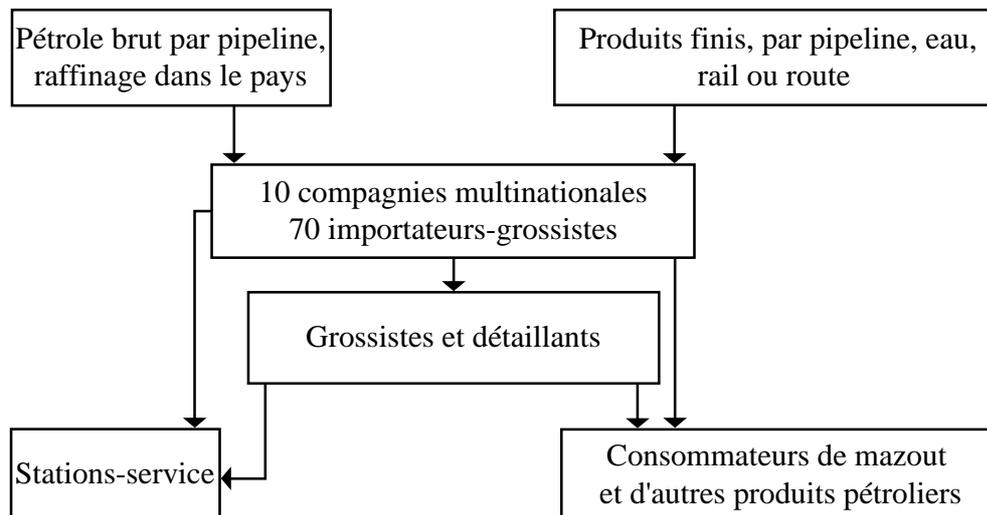
### Importation de produits pétroliers en 1991, selon la provenance



**Importation de pétrole brut en 1991, selon la provenance  
(total 4,53 mio. t)**



**Distribution du pétrole en Suisse**



## Transport et entreposage

### Transport de mazout

Mazout :

- camion
- rail

Attention :

CH, max. 22 t/camion

44 t/wagon (wagons noirs)

le mazout lourd doit être préchauffé pour le pompage et la combustion.

pour le pompage: > 80° C

pour la combustion: > 130° C

### LPG (propane/butane)

LPG (propane/butane):

Wagons blancs avec ligne orange

### Pétrole brut

Importation de pétrole brut :

100% par oléoducs

### Produits pétroliers

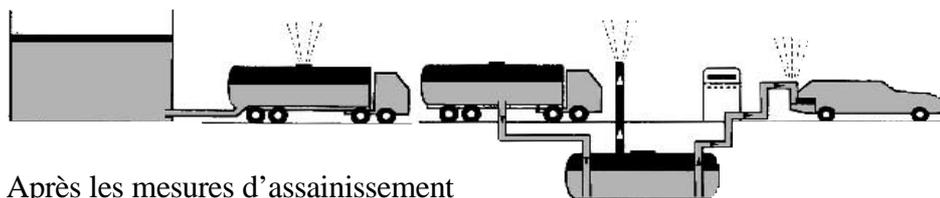
Importation de produits pétroliers :

47% par le Rhin, 26% par le rail, 15% par oléoduc et 12% par la route.

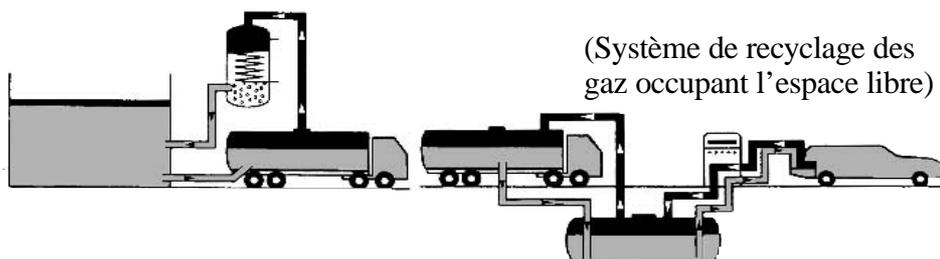
Pour les prescriptions sur le transport, voir le chapitre 3.4: Gaz naturel.

## Diminution des émissions d'hydrocarbures (Volatile Organic Compounds VOC) lors du transbordement du carburant

Avant les mesures d'assainissement



Après les mesures d'assainissement



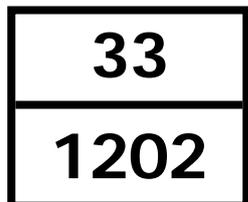
## L'entreposage dans les entreprises

Voir dans le chapitre 4.1: Gestion de l'énergie, le sous-chapitre: Stockage d'énergie et distribution.

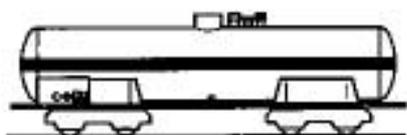
**Marques distinctives pour le transport de marchandises dangereuses sur la route et dans des wagons-citernes**

**Marques distinctives :**

**Plaque orange munies de deux numéros d'identification placés l'un sous l'autre**  
**Exemple :**



Bandes oranges



Obligatoire pour les wagons-citernes

**Signification :**

**Numéro de danger**  
**33 = liquide très facilement inflammable**

**Numéro ONU (Numéro de matière)**  
**Désigne un chargement particulier**

**1202 = mazout**

**Gaz liquides**

Source et informations supplémentaires :

- Prescriptions sur le transport: Office fédéral de la police, Transports de marchandises dangereuses par la route et le rail
- Recommandations pour la prévention des accidents chimiques et la protection contre les radiations

Référence: OCFIM, 3000 Berne



Solide inflammable rouge-blanc



Liquide inflammable rouge



Produit auto-inflammable rouge-blanc



Produit inflammable actif ou peroxyde organique jaune



Gaz combustibles par mélange avec de l'eau bleu



Corrosif noir-blanc



Danger d'explosion orange

## Stockage réglementaire

**Organisation Carbura** Carbura est une organisation d'importateurs de carburants et de combustibles liquides. La base légale réglant son organisation et ses buts se trouve dans la Loi sur l'approvisionnement du pays du 8 octobre 1982. Le but de Carbura est le stockage obligatoire de carburants et de combustibles liquides. Le Conseil fédéral, dans son arrêté sur le stockage obligatoire, a décrété que l'importation de certains produits pétroliers n'est admise qu'avec l'autorisation de Carbura. Ce décret ajoute que l'octroi d'une autorisation d'importation dépend de la conclusion de la mise en pratique d'un contrat de stockage. Aux termes de ce contrat, l'importateur s'engage, vis-à-vis de l'Office fédéral pour l'approvisionnement économique du pays, à devenir membre de Carbura.

**Taxes d'importation** La fixation annuelle des redevances d'importation sur les produits du pétrole dûment stockés, servant à couvrir les frais de stockage obligatoire, est soumise à l'approbation du Département fédéral de l'économie publique. Les frais collectifs de stockage sont répartis entre les importateurs, en proportion de leur part aux importations. Les responsables de l'entreposage sont indemnisés par les fonds de garantie pour les coûts du stockage (frais d'installation des réservoirs, administratifs, d'achat).

**Membres de Carbura** Carbura compte en ce moment 92 membres, dont 36 importaient en 1987 seulement du mazout, 5 uniquement des carburants (dont 4 uniquement du kérosène) et 51 aussi bien des carburants que des combustibles.

## Stockage obligatoire dans une entreprise

**Contribution pour stockage obligatoire** Des entreprises peuvent prendre part au stockage obligatoire. Dans ce cas, elles obtiennent de Carbura une contribution pour stockage obligatoire. Mais, si elles n'atteignent pas une limite inférieure fixée, elles doivent payer une amende contractuelle.

Loi:  
Loi fédérale sur  
l'approvisionnement  
économique du pays  
du 8.10.1982

**Propriétés de différents produits pétroliers (valeurs moyennes pour 1991)**

Propriété	Unité	Mazout extra-léger	Mazout lourd	Diesel	Essence super	Essence sans plomb	Propane	Butane
Densité liquide à 15° C (gaz : densité à l'état normal)	[kg/l]	0,84	0,973	0,829	0,739	0,743	0,51	0,58
Viscosité à 20° C	[mm <sup>2</sup> /s]	4,75		3,55				
Viscosité à 100° C	[mm <sup>2</sup> /s]		36,5					
Point d'inflammation	[° C]	71	127	67				
Teneur en cendres	[g/100 g]	<0,001	0,014	<0,001	-	-	-	-
Teneur en soufre	[g/100 g]	0,16	0,81	0,11	-	-	-	-
Pouvoir calorifique inférieur	[MJ/kg]	42,7	41,0	42,9	42,0	42,0	46,0	46,0
Pouvoir calorifique supérieur	[MJ/kg]	45,5	42,7	45,9	46,7	46,7	50,0	50,0
Teneur en azote	[g/100 g]	184	0,35	-	-	-	-	-
Teneur en eau	[g/100 g]	-	<0,1	-	-	-	-	-
Teneur en plomb	[g/l]	-	-	-	0,14	0,0024	-	-
Point d'ébullition	[° C]			-			-42	-1
Chaleur spécifique	[kJ/kg K]						1,60	1,66
Chaleur d'évaporation spécifique	[kJ/kg]						426	385
Constante des gaz	[kJ/kg K]						189	143
Quantité minimale d'air pour la combustion	[m <sup>3</sup> /kg]	11	11	11,1	11,5	11,5		
Température d'inflammation dans l'air	[° C]	230-240	220	230-260			460	365

Source: EMPA, 8600 Dübendorf, 01/824 55 11

## Lois

- Ordonnance sur la protection de l'air (OPAIR)
- Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement
- Loi sur la protection des eaux contre la pollution
- Ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer (OPEL)
- Prescriptions relatives au transport : Office fédéral de la police, Protection des eaux dans le transport de marchandises dangereuses par la route

**Référence:** OCFIM, 3000 Berne

## Adresses

- EV : Erdöl – Vereinigung<sup>1</sup>, Löwenstrasse 1, 8001 Zurich, 01/2212 19 77
- Swisspetrol Holding AG, Claridenstr. 36, 8002 Zurich, 01/202 31 51 (s'occupe de la recherche sur le pétrole et le gaz naturel en Suisse, entre autres, le gaz naturel à Finsterwald)
- Carbura : Office central suisse pour l'importation des carburants et combustibles liquides, Löwenstrasse 3, Case postale, 8021 Zurich, 01/217 41 11 (stockage réglementaire, permis d'importation)

1 (Union pétrolière)

## 3.4 Gaz naturel

### Gisements (état en 1991)

#### Gisements mondiaux de gaz naturel (prouvés), extraction et consommation

Pays	Réserves prouvées		Extraction	
	[mia. m <sup>3</sup> ]	[%]	[mia. m <sup>3</sup> ]	[%]
Iran	17 000	14	109	5,4
Emirats arabes	5 600	4,5		
Arabie saoudite	5 200	4,2	30	1,5
Qatar	4 600	3,7		
Algérie	3 300	2,7	50	2,5
Nigeria	3 000	2,4		
Venezuela	3 100	2,5		
Mexique	2 000	1,6		
USA	4 800	3,9	506	25,3
Canada	2 800	2,3	106	5,3
CEI	49 500	40	725	36,3
Indonésie	1 800	1,5	43	2,2
Pays-Bas	2 000	1,6	69	3,0
Norvège	1 700	1,4	27	1,4
Grande-Bretagne	500	0,4		
Divers	16 600	12,9	285	14,6
Monde	123 000	100	1715	100

Source: «Daten und Fakten», Association Suisse de l'Industrie Gazière (ASIG)

#### Consommation :

La consommation mondiale se répartit de la façon suivante :

CEI	32 %
USA	29 %
Europe de l'Ouest	14 %
Japon	3 %
Divers	22 %

Le gaz naturel est séché durant son extraction et, si nécessaire, débarrassé des corps étrangers (sable, pierres, etc.).

## Composition du gaz naturel

	Swissgas		Gasversorgung Süddeutschland (via Höchst, Fallentor)		Gasversorgung Süddeutschland		Gaz de France	
	[vol. %]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[vol. %]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[vol. %]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[vol. %]	[mg/m <sup>3</sup> ]
Méthane (CH <sub>4</sub> )	91,2		98,0		91,4		97,3	
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	3,6		0,6		3,6		0,8	
Azote (N <sub>2</sub> )	2,8		0,9		2,8		1,4	
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	1,1		0,15		1,1		0,2	
Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0,85		0,25		0,8		0,25	
Soufre (S)								
dans gaz non odorisé		1,6		< 2		< 3		< 3
dans gaz odorisé		8,9		8,8		6,9		7,3

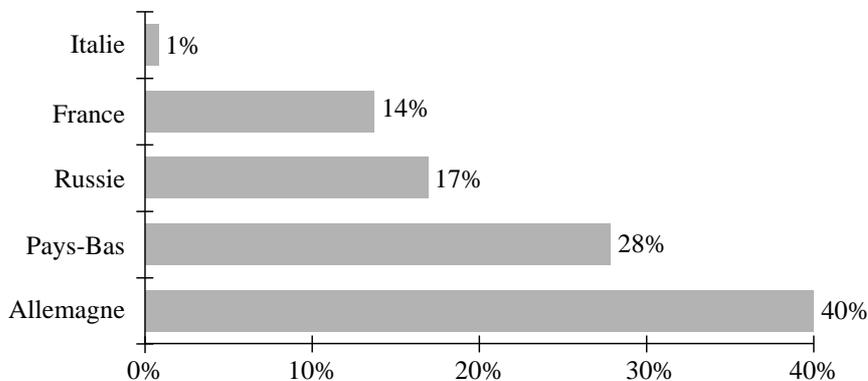
Source: Gazverbund Ostschweiz AG

### Remarques :

- 1) En Suisse on distribue le gaz-H.
- 2) Gaz-H: gaz naturel humide contenant une grande proportion d'hydrocarbures lourds (pouvoir calorifique d'environ 12 kWh/m<sup>3</sup>).
- 3) Gaz-L: gaz naturel sec ne contenant qu'une petite proportion d'hydrocarbures lourds (pouvoir calorifique d'environ 10 kWh/m<sup>3</sup>).
- 4) Le gaz naturel devient liquide à une température de -161 °C: Liquefied Natural Gas (LNG).
- 5) Le gaz naturel synthétique (Synthetic Natural Gas (SNG)) est un gaz produit artificiellement à partir de houille ou de lignite. Son pouvoir calorifique dépend du procédé et de la composition du charbon. Le gaz de synthèse est un gaz similaire au gaz naturel.

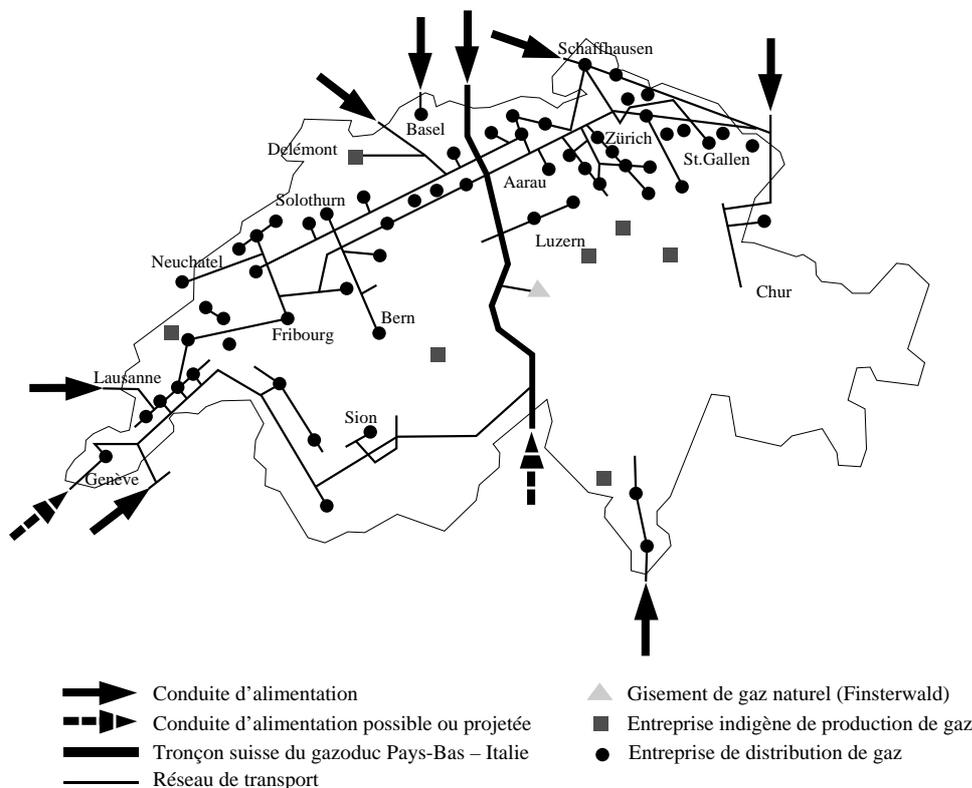
## Le gaz naturel en Suisse

### Importation nette de gaz naturel en 1991 par pays de provenance (2,34 milliards de m<sup>3</sup>, 85 100 TJ H<sub>i</sub>)



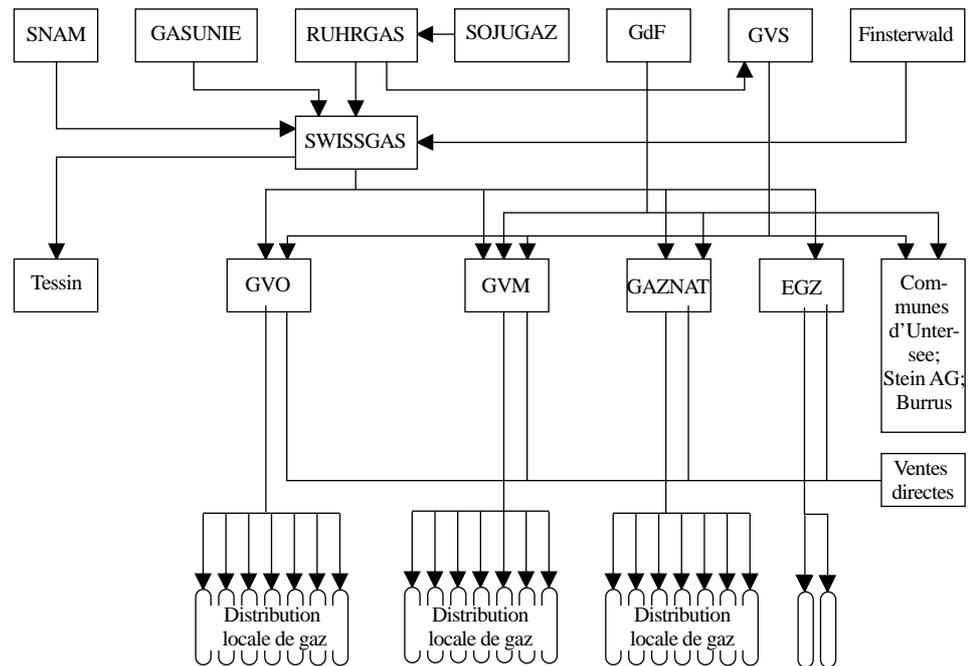
Source :  
«Daten und Fakten»,  
Association Suisse de  
l'Industrie Gazière

### Réseau principal d'approvisionnement suisse en gaz



Source :  
«Daten und Fakten»,  
Association Suisse de  
l'Industrie Gazière

## Flux de gaz et structure de l'industrie suisse du gaz



- SWISSGAS : Schweizerische Aktiengesellschaft für Erdgas, St-Gall/Zurich  
 GVO : Gasverbund Ostschweiz AG, Zurich  
 GVM : Gasverbund Mittelland AG, Arlesheim  
 GAZNAT : Société pour l'approvisionnement et le transport du gaz naturel en Suisse romande, Lausanne/Vevey  
 EGZ : Erdgas Zentralschweiz AG, Lucerne  
 GASUNIE : NV Nederlandse Gasunie, Groningen  
 RUHRGAS : Ruhrgas AG, Essen  
 SOJUGAS : Sojugasexport, Moscou  
 GdF : Gaz de France, Paris  
 GVS : Gasversorgung Süddeutschland GmbH, Stuttgart  
 SNAM : Società nazionale azienda metanodotti, Milan

Source :  
 «Daten und Fakten»,  
 Association Suisse  
 de l'Industrie Gazière

## Transport et stockage

Normalement le gaz naturel est transporté sous forme gazeuse. Si le transport par gazoducs est difficile ou trop coûteux, on liquéfie le gaz en le refroidissant (-161° C). Les plus gros bateaux-citerne contiennent environ 125 000 m<sup>3</sup> de LNG. En 1991, 24% du commerce mondial de gaz naturel s'est fait sous forme de LNG.

**Gazoducs**  
**Bateaux-citerne**

Le gaz naturel est stocké soit sous forme liquide dans des réservoirs bien isolés (compliqué), soit dans des formations géologiques appropriées (couches de sel, gisements de gaz naturel ou de pétrole épuisés, mines abandonnées, etc.)

**Stockage**  
**de gaz naturel**

Sur le marché suisse, le gaz naturel est transporté principalement par gazoduc. La pression du gaz est très variable d'un réseau de transport à l'autre :

**Conduites**  
**de gaz naturel**

### Pression du gaz dans les conduites :

Gazoduc international Hollande – Italie : (stations suisses d'importation : Zeinigen AG, Däniken SO, Staffelbach AG, Ruswil LU, Obergesteln VS)	50 – 70 bar
Réseaux régionaux à haute pression + toutes les conduites principales de Suisse :	20 – 25 bar
Réseaux régionaux et locaux :	1 – 5 bar
Distribution locale :	20 – 100 mbar

L'approvisionnement en gaz naturel est assuré par des contrats de livraison à long terme, conclus en général pour 20 à 25 ans.

**Contrats de livraison**

L'Inspection Technique de l'Industrie Gazière Suisse (ITIGS) est responsable de la mise en service et du contrôle des installations de plus de 5 bar. (Celles allant jusqu'à 5 bar dépendent de l'inspecteur technique des offices cantonaux responsables).

**Contrôle**  
**des installations**

## Mesure des quantités de gaz naturel

**Pouvoir calorifique supérieur**  
**Mètre cube normal**  
**Mètre cube standard**  
**Convertisseur de quantité**

L'énergie fournie par le gaz naturel est convertie en pouvoir calorifique supérieur (PCS) et l'énergie facturée en kWh. Pour déterminer la puissance appelée (kW), on a recours aux m<sup>3</sup> normaux ou standards (voir les définitions au chapitre 7 : Unités et facteurs de conversion). Les postes de mesure de grande taille sont munis de convertisseurs de quantités qui convertissent les volumes mesurés en volumes à pression normale et à température de 0° C. Les pouvoirs calorifiques moyens mesurés chaque jour servent de valeurs de base pour la facturation. La marge d'erreur admise officiellement est de 2 % pour la mesure du volume et de 1 % pour les convertisseurs. En pratique la précision est dix fois meilleure. Lors de la mesure de petites quantités, la dépense pour un convertisseur étant trop onéreuse, les calculs se font sur la base d'une température moyenne du gaz et de sa pression maintenue constante par un régulateur.

## Propriétés du gaz distribué en Suisse

Propriété du gaz	Unité	Swissgas	Gasversorgung Süddeutschland (via Höchst, Fallentor)	Gasversorgung Süddeutschland	Gaz de France
Densité normale	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,789	0,734	0,788	0,739
Pouvoir calorifique supérieur	[kWh/m <sup>3</sup> ]	11,19	11,08	11,18	11,04
Pouvoir calorifique inférieur	[kWh/m <sup>3</sup> ]	10,10	9,99	10,09	9,95
Température d'inflammation dans l'air	°C	~ 600	~ 600	~ 600	~ 600
<b>Combustion stœchiométrique</b>					
Quantité requise d'air	[vol./vol. gaz]	9,61	9,53	9,61	9,50
Quantité de gaz de combustion		10,64	10,54	10,64	10,51
Analyse des gaz produits					
– H <sub>2</sub> O	[vol. %]	18,7	18,9	18,7	18,9
– CO <sub>2</sub>	[vol. %]	9,7	9,5	9,7	9,6
– N <sub>2</sub>	[vol. %]	71,6	71,5	71,6	71,5
Point de rosée	°C	59	59	59	59
Teneur en soufre					
– gaz odorisé	[mg/m <sup>3</sup> ]	2,1	2,1	1,6	1,7
– gaz inodore	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,4	<0,5	<0,7	0,7
<b>LNG</b>					
Point d'ébullition à :					
1 bar	°C	–161			
5 bar	°C	–138			
15 bar	°C	–115			
25 bar	°C	–101			
Réduction du volume à la liquéfaction		1/600			

Source: Gasverbund Ostschweiz AG

### Remarque :

Point de rosée : température pour laquelle la vapeur contenue dans le gaz devient saturante (humidité de 100%). Si la température du gaz continue de baisser, il y a alors condensation.

### **Lois**

- Ordonnance sur la protection de l'air (OPAIR)
- Lois, ordonnances, prescriptions concernant les installations : SVGW

### **Adresses**

- ASIG: Association Suisse de l'Industrie Gazière, Grütlistrasse 44, 8027 Zurich, tél. 01/288 31 31 (domaines politique et économique)
- Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux, Grütlistrasse 44, 8027 Zurich, tél. 01/288 33 33 (domaines scientifique et technique)
- ASIG: Association Suisse de l'Industrie Gazière, rue Pichard 12, 1003 Lausanne, tél. (021) 312 93 35.

## 3.5 Charbon

### Gisements

#### Gisements mondiaux de charbon (prouvés), extraction et consommation (1991)

Pays	Réserves prouvées		Extraction		Consommation	
	[tep]	[%]	[tep]	[%]	[tep]	[%]
USA	121 900	23	550	25	481	22
Canada	4 240	0,8	40	1,8	24	1,1
CEI	121 900	23	286	13	262	12
Chine	58 300	11	506	23	547	25
Inde	31 800	6	114	5,2	109	5
Australie	47 700	9	114	5,2	44	2
Afrique du Sud	26 500	5	101	4,6	79	3,6
Allemagne	42 400	8	106	4,8	109	5
Pologne	21 200	4	95	4,3	79	3,6
Grande-Bretagne	2 120	0,4	59	2,7	63	2,7
Divers	51 940	9,8	229	10,4	389	18
Monde	530 000	100	2200	100	2186	100

Source: BP Statistical Review of World Energy, June 1992

tep: tonne équivalent pétrole (tons of oil equivalent); 1 tep = 41,87 GJ

**Composition (valeurs moyennes)**

Houille		Lignite
78 – 93 %	carbone	68 – 74 %
2 – 10 %	oxygène	17,5 – 23 %
3 – 5,5 %	hydrogène	5 – 6 %
1 – 1,5 %	soufre	1,5 – 2,5 %
1 – 1,5 %	azote	1 – 1,5 %

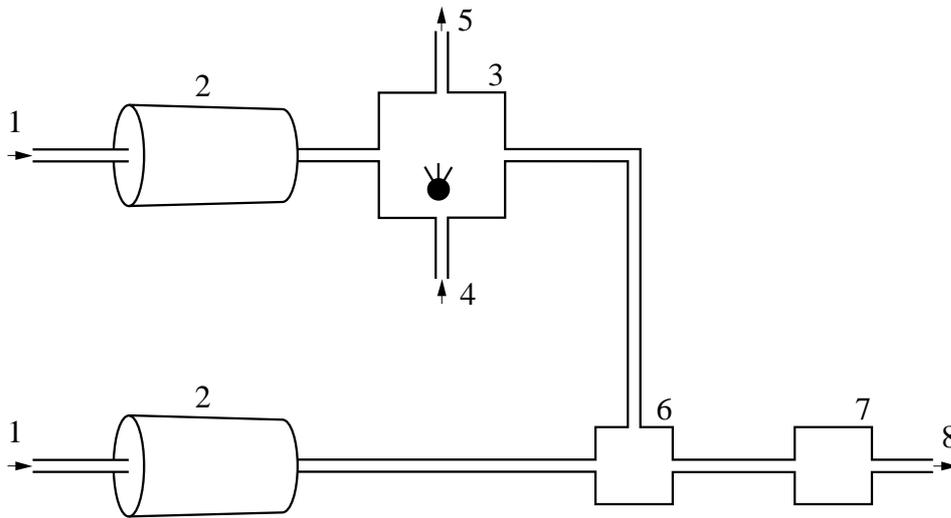
**Traces de métaux** On trouve également dans le charbon des traces des métaux suivants (par exemple dans les gisements de houille de la région de la Ruhr):

vanadium	33	[mg/kg]
nickel	30	[mg/kg]
zinc	22	[mg/kg]
cuiivre	20	[mg/kg]
chrome	17	[mg/kg]
plomb	15	[mg/kg]
cobalt	12	[mg/kg]
arsenic	3,5	[mg/kg]
antimoine	1,5	[mg/kg]
béryllium	1,3	[mg/kg]
sélénium	1,0	[mg/kg]
uranium	0,7	[mg/kg]

## Traitement du charbon

Il y a différents procédés de traitement du charbon, telle la cokéfaction : le charbon est chauffé dans un four à l'abri de l'air, à haute température (1000° C environ), transformé en gaz et en coke. Auparavant, le gaz de ville était produit selon ce principe.

### Cokéfaction



- 1 Introduction du charbon
- 2 Broyeur à charbon
- 3 Four à lit fluidisé
- 4 Entrée d'air
- 5 Sortie des gaz d'échappement
- 6 Mélangeur
- 7 Presse
- 8 Briquettes de coke

## Le charbon en Suisse

### Importations de charbon

Importations en 1991 : 413 000 tonnes. L'industrie du ciment en utilise environ les 80%. La proportion de charbon dans la consommation globale suisse d'énergie finale s'est élevée à 1,5% en 1991. Environ 41% du charbon provient d'Allemagne et 52% d'Afrique du Sud.

### Propriétés du charbon

	Houille Charbon flambant	Charbon gras	Charbon demi-gras	Charbon maigre	Anthracite	Lignite Rhénane	En briquettes
Pouvoir calorifique inférieur [MJ/kg]	29,3	31,0	31,8	31,4	31,0	8,0	19,7
Pouvoir calorifique supérieur [MJ/kg]	31,0	32,2	32,7	32,7	31,8	9,9	20,9
Température d'inflammation [°C]	214-230	243-248	260	339	485	135-240	135-240
Quantité d'air de combustion [m <sup>3</sup> /kg]	7,7	7,9	7,9	8,0	8,2	2,7	5,3
Cendres (moyenne) [%]	6	6,5	8	7,5	6	3,5	7
Eau (moyenne) [%]	5	5	3	4,5	3	59	13

## Lois

- Ordonnance sur la protection de l'air (OPAIR)
- Ordonnance sur les substances
- Loi sur la protection des eaux

## Adresses

- KOLKO, Association pour l'économie charbonnière suisse,  
Talstrasse 45, 4144 Arlesheim, tél. 061/705 12 12
- ZK, Centrale suisse pour l'importation du charbon,  
Gartenstrasse 85, case postale, 4002 Bâle, tél. 061/272 83 23

## 3.6 Chaleur à distance

La chaleur à distance est une énergie de réseau. La chaleur est produite dans une centrale sous forme d'eau chaude ou de vapeur. Elle est ensuite amenée au consommateur par un réseau de distribution sur le domaine public. Il y a en Suisse aujourd'hui environ 35 centrales de chauffage, respectivement chaleur-force, dont la part à la consommation globale d'énergie utile est d'environ 1,5 %. Le chauffage à distance en Suisse concerne à 90 % environ le chauffage de locaux et la production d'eau chaude sanitaire.

Les entreprises de chauffage à distance sont en général en mains publiques (services communaux et groupements intercommunaux). La plupart des entreprises suisses de chauffage à distance sont regroupées en une Association suisse des producteurs et distributeurs de chauffage à distance (VSF).

La chaleur rejetée par des exploitations industrielles peut alimenter un réseau de chauffage de quartier dans le but d'approvisionner des immeubles généralement de grande taille. Toutefois, les frais de réseau sont souvent élevés et les preneurs exigent généralement des garanties de livraison à long terme en freinent le développement.

**Centrales de chauffage à distance**  
**Centrales thermiques pour chauffage à distance**

**Association suisse des producteurs et distributeurs de chauffage à distance**

**Chaleur rejetée par les équipements de production**  
**Réseau de chauffage de quartier**

Adresse :  
VSF  
Association suisse des producteurs et distributeurs de chauffage à distance  
Margarethenstrasse 40  
4008 Bâle  
Tél.: 061/275 51 05  
Fax: 061/275 51 11

## 3.7 Bois

La forêt, qui recouvre 25 % de la surface de la Suisse, joue un rôle amortisseur important dans notre écosystème.

### Surface forestière

La capacité annuelle d'utilisation du bois de nos forêts est d'environ 7 millions de m<sup>3</sup>. Actuellement (1990), seulement environ 60% en sont exploités. 2,5 millions de m<sup>3</sup> de ce potentiel annuel pourraient être utilisés uniquement comme source d'énergie. Dans les années 1983-1987, une moyenne annuelle de 0,8 mio de m<sup>3</sup> de bois de feu provenant des forêts suisses a été valorisée.

### Potentiel d'utilisation du bois

### Composition moyenne du bois sec

	[% en poids]
carbone :	50
oxygène :	44
hydrogène :	6
azote :	0,05-0,1

On obtient du bois sec en le stockant une année et demie à deux ans environ à l'air libre, mais à l'abri de l'humidité. Du bois séché à l'air contient encore durant les mois d'été secs 8 à 15 % d'humidité, celle-ci étant en équilibre avec l'humidité naturelle de l'air. Si l'humidité de l'air est élevée, le bois peut contenir jusqu'à 25 % d'eau. En moyenne, la proportion d'eau est d'environ 15 %.

### Bois séché à l'air

**Table de conversion de différentes unités et formes d'énergie pour l'épicéa (ép), le sapin (sa) et le hêtre (hê), pour une humidité du bois de 15 % (séché à l'air).**

Unité	Agent énergétique	Unité énergétique	Copeaux de bois	Bûches de bois	Masse de bois	Bois séché à l'air	Substance du bois séché à l'air	Energie (pouvoir calorifique inférieur Hi)	
			[m <sup>3</sup> ]*	[stère]	[m <sup>3</sup> **]	[t]	[a.s.-t]***	[GJ]	[MWh]
1 m <sup>3</sup> *	copeaux	ép/sa	1	0,57	0,40	0,20	0,17	3,18	0,88
		hê	1	0,57	0,40	0,29	0,24	4,13	1,15
1 stère	bûches	ép/sa	1,75	1	0,70	0,35	0,30	5,57	1,55
		hê	1,75		0,70	0,50	0,42	7,22	2,01
1 m <sup>3</sup> **	masse	ép/sa	2,50	1,43	1	0,50	0,42	7,95	2,21
		hê	2,50	1,43	1	0,71	0,60	10,32	2,87
1 t	séché à l'air	ép/sa	5,0	2,86	2	1	0,85	15,90	4,42
		hê	3,5	2	1,40	1	0,85	14,40	4,01
1 t***	substance de bois sec	ép/sa	5,92	3,39	2,37	1,19	1	19	5,28
		hê	4,18	2,39	1,67	1,19	1	17,40	4,83
1	GJ (10 <sup>9</sup> )	ép/sa	0,31	0,18	0,126	0,063	0,052	1	0,278
		hê	0,24	0,14	0,097	0,069	0,057	1	0,278
1	MWh (1000 kWh)	ép/sa	1,13	0,65	0,45	0,226	0,188	3,6	1
		hê	0,87	0,50	0,35	0,249	0,206	3,6	1

## Adresses :

- ASEB, Association suisse pour l'énergie du bois, Falkenstrasse 26, 8008 Zurich, tél. 01/252 30 70
- ASIB, Association suisse des scieries et de l'industrie du bois, Service d'information sur l'énergie Mottarstrasse 9, 3000 Berne 6, tél. 031/352 75 21

## Littérature :

- Vademecum Holzenergie, B. Holenstein, VHe, 1989
  - Wärme aus Holz, Impulsprogramm Holz, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1987
- Künftige Rundholzversorgung aus dem Schweizer Wald, Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1991

## Remarques :

- m<sup>3</sup>\* = m<sup>3</sup> de copeaux.  
Mesure de volume en mètre cube pour les copeaux, air inclus.
- m<sup>3</sup>\*\* = volume réel.  
Un m<sup>3</sup> de masse de bois solide.
- 1 t\*\*\* = absolument sec (masse de bois pure sans trace d'eau).

## 3.8 Energie solaire

### Rayonnement

Sur la surface extérieure de l'atmosphère terrestre, l'intensité du rayonnement (constante solaire) est en moyenne de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Lors de son passage à travers l'atmosphère terrestre, il est affaibli par réflexion, absorption et dispersion. En Suisse lors de journées très belles et sans brume, on peut, vers midi, mesurer sur une surface horizontale une intensité de rayonnement d'environ  $1000 \text{ W/m}^2$ . Le rayonnement solaire qui atteint la terre est défini comme le rayonnement global.

**Intensité du rayonnement**  
**Constante solaire**  
**Réflexion**  
**Absorption**  
**Diffusion**

$$RG = R_{\text{dir}} + R_{\text{diff}}$$

RG: rayonnement global  
 R<sub>dir</sub>: rayonnement direct  
 R<sub>diff</sub>: rayonnement diffus

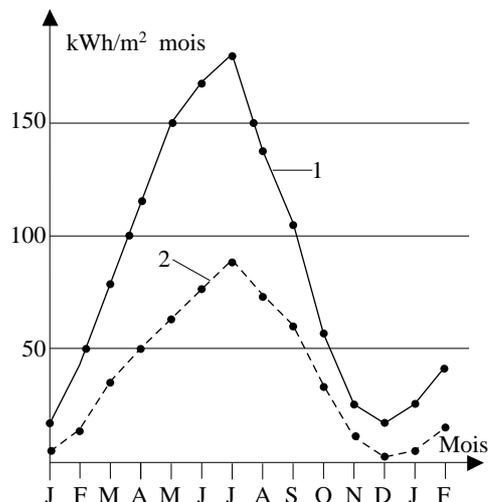
**Rayonnement global**

### RG pour différentes conditions atmosphériques :

Ciel bleu et clair :	$1000 \text{ W/m}^2$
Le soleil perce :	$600 \text{ W/m}^2$
Le soleil est un disque blanc dans la brume :	$300 \text{ W/m}^2$
Jour d'hiver brumeux :	$100 \text{ W/m}^2$

**Conditions atmosphériques**

### Rayonnement global annuel moyen sur une surface horizontale, en Suisse, en kWh/m<sup>2</sup> par mois :



1: Valeurs mesurées à Kloten.

2: Energie utilisable brute d'un capteur solaire (gain thermique disponible aux bornes du capteur, sans les pertes dans les conduites et l'accumulateur).

Remarque: L'énergie fournie par les installations solaires dépend des conditions atmosphériques, elle n'est donc pas assurée à tout moment.

## Utilisation

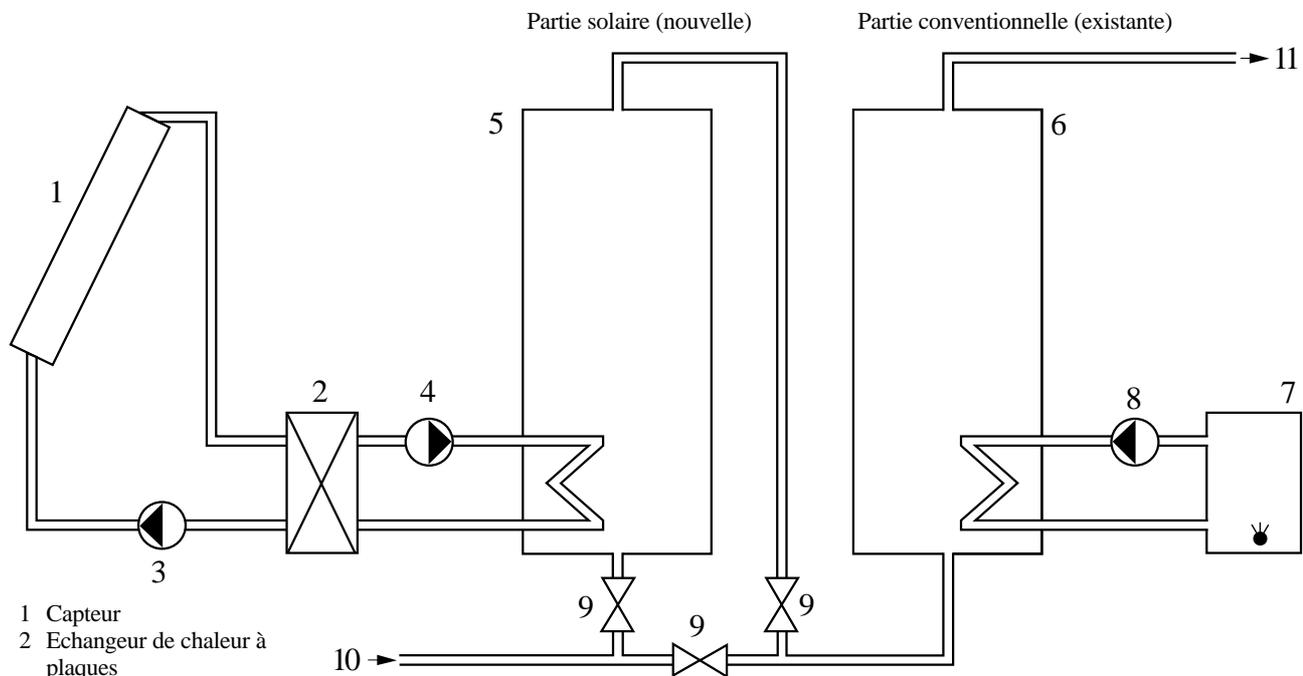
On distingue deux formes d'utilisation de l'énergie solaire :

- les capteurs solaires thermiques ;
- les cellules photovoltaïques (voir chap. 3.2).

**Capteur solaire** Les capteurs solaires servent en premier lieu au chauffage de l'eau et d'autres liquides (installations solaires à basse température).

**Préchauffage solaire de l'eau** Si, pendant les mois d'été, la consommation d'eau chaude est suffisamment élevée, l'installation solaire se trouve proche de la rentabilité.

## Composantes d'une installation solaire de préchauffage de l'eau



- 1 Capteur
- 2 Echangeur de chaleur à plaques
- 3 Pompe de circulation du circuit primaire
- 4 Pompe de circulation du circuit secondaire
- 5 Accumulateur solaire
- 6 Chauffe-eau
- 7 Chaudière
- 8 Pompe de circulation du circuit de chauffage
- 9 Vannes
- 10 Eau froide

L'accumulateur de l'installation solaire de préchauffage d'ECS est branché en série avec les producteurs d'eau chaude existants. Pour des installations neuves, le chauffe-eau peut être intégré dans l'accumulateur.

En 1993, les frais d'investissement pour le préchauffage solaire de l'eau oscillent entre 1300 et 2000 francs par m<sup>2</sup> de capteur.

Le taux de couverture solaire correspond à la proportion de l'énergie solaire dans la couverture des besoins totaux annuels. Il dépend du rayonnement solaire, de la température de l'eau froide, de la consommation d'eau chaude et de la surface du capteur. Pour le préchauffage de l'eau dans l'habitat, par exemple, on dimensionne l'installation de manière à ce que le taux annuel s'élève à 25 – 35 %.

Adresses :  
 • SOFAS,  
 Association suisse des  
 spécialistes de l'énergie solaire,  
 secrétariat national,  
 Edisonstrasse 22, 8050 Zurich,  
 tél. 01/311 90 40

# 4 Utilisation de l'énergie dans l'entreprise

## 4.1 Gestion de l'énergie

Les flux énergétiques dans l'entreprise	4.1/1
Saisie de la consommation d'énergie et des coûts	4.1/3
Mesure de puissance et d'énergie	4.1/4
Analyse et évaluation	4.1/6
Stockage et distribution d'énergie dans l'entreprise	4.1/11
Besoins en puissance thermique d'un bâtiment	4.1/13
Commande et régulation	4.1/15
Perturbations de réseau	4.1/19
Installations de compensation	4.1/23

## 4.2 Techniques énergétiques de base

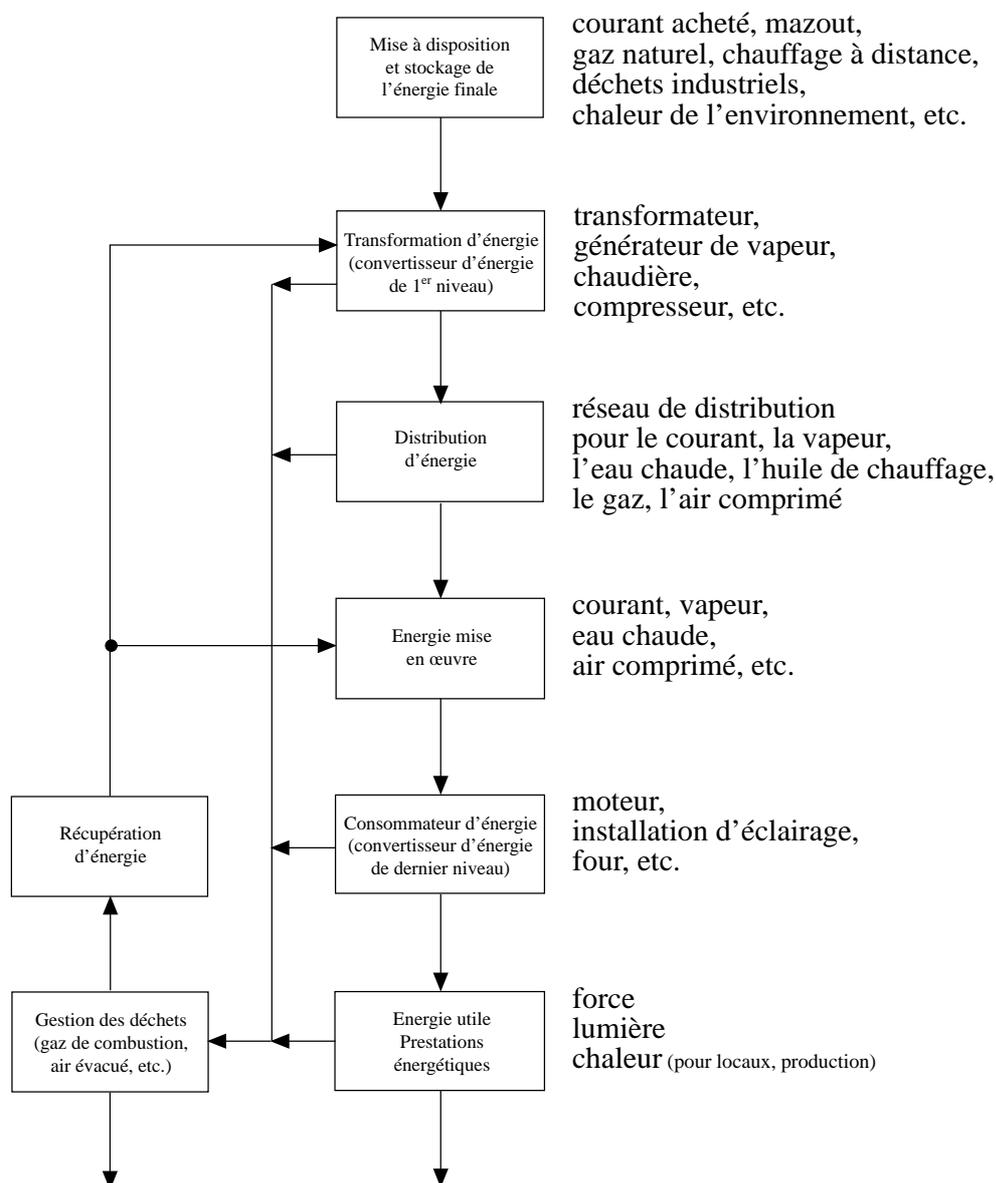
Transformateur	4.2/1
Convertisseur de courant	4.2/3
Alimentation de courant sans coupure (ASC)	4.2/5
Batteries	4.2/7
Production d'air comprimé	4.2/9
Pompes à chaleur (ou thermopompes)	4.2/11
Production de froid	4.2/15
Brûleurs, chaudières	4.2/19
Entraînements électriques	4.2/23
Pompes	4.2/33
Ventilateurs	4.2/37
Eclairage	4.2/43
Chaleur de production	4.2/47
Utilisation de rejets thermiques et récupération de chaleur	4.2/49

## 4 Utilisation de l'énergie dans l'entreprise

### 4.1 Gestion de l'énergie

#### Les flux énergétiques dans l'entreprise

L'énergie est tour à tour produite, installée, utilisée, retransmise. On peut représenter le flux énergétique s'écoulant en étapes successives de la manière suivante :



**Flux énergétique**  
**Efficacité énergétique**  
**Impact sur**  
**l'environnement**

La gestion de l'énergie doit prendre en compte les tâches et exigences suivantes :

- flux énergétiques
- efficacité énergétique
- impact sur l'environnement

L'utilisation rationnelle de l'énergie n'est pas uniquement l'affaire de la production et de la technique. A tous les postes de l'exploitation, il est possible de prendre consciemment des mesures qui augmentent l'efficacité énergétique.

Informations supplémentaires :

- Organisation und Energiemanagement, documentation RAVEL N° 724. 374 d

Référence: OCFIM, 3000 Berne

## Saisie de la consommation d'énergie et des coûts

Une utilisation rationnelle de l'énergie suppose que la consommation d'énergie ainsi que les coûts d'exploitation et leurs composantes soient régulièrement recensés et contrôlés.

Une marche à suivre systématique se révèle des plus utiles :

- définition des objectifs
- délimitation du système
- mise en valeur des données disponibles, définition des points de mesure et des grandeurs à mesurer, réalisation des mesures
- traitement des données de mesures, interprétation des résultats
- stratégie d'entreprise

La consommation ainsi que les coûts d'énergie peuvent être déterminés à plusieurs niveaux :

- pour toute l'entreprise
- pour tels bâtiments ou telles chaînes de production
- pour des installations seules, des procédés, des machines, etc.

Informations supplémentaires :

- Saisie des données de consommation d'énergie. RAVEL-Industrie N° 724.371.1 f (comprend des exemples de formulaires sur papier et un programme sur tableur Lotus, version 2.2 et sv., ou sur Excel version 4.0)
  - Analyse de la consommation d'énergie - Saisir, évaluer, représenter, agir. RAVEL-Industrie N° 724. 318 f
- Référence: OCFIM, 3000 Berne

## Mesure de puissance et d'énergie

<b>Précision de mesure</b>	Mesurer n'a de sens que si les valeurs mesurées sont utilisables dans l'exploitation. L'étendue de ces mesures et leur précision doivent être adaptées au résultat attendu. Des appareils de mesure de précision ne sont que rarement nécessaires pour l'énergie.
<b>Enregistreur de mesure</b>	Les mesures peuvent être effectuées de temps en temps ou en continu, à l'aide d'enregistreurs de mesure mobiles ou fixes. Lors de transformations, on devrait si possible prévoir des prises de mesure ou des convertisseurs de mesure aux endroits névralgiques.
<b>Prise de mesure</b>	
<b>Convertisseur de mesure</b>	

### Déroulement des opérations de mesure

Enregistrement des valeurs	p. ex. sonde de température, pinces ampèremétriques
Conversion	p. ex. conversion du courant en impulsions
Affichage	p. ex. compteur, affichage analogique ou digital
Transmission	p. ex. courant, tension, impulsion
Enregistrement	p. ex. à la main, (protocole de mesure), enregistreur, mémoire électronique, disquette
Exploitation	p. ex. informatisée ou non

### Instruments de mesure pour l'huile de chauffage

- Jauge de niveau de citerne
- Compteurs volumétriques
- Compteur d'heures d'exploitation pour des consommateurs à débit constant

### Instruments de mesure pour le gaz

- Compteur à gaz (compteur volumétrique)
- Diaphragmes, tubes de Venturi, sondes Annubar, etc. combinés avec des appareils de mesure de pression différentielle
- Débitmètre à flotteur
- Compteur d'heures d'exploitation pour des consommateurs à débit constant
- Appareils de mesure gravimétrique (à poids) pour le gaz liquide
- Odatachymètres à courant de Foucault

Remarque : le flux de gaz dépend de la température et de la pression.

### Instruments de mesure pour l'énergie électrique

- Compteur de courant actif et réactif
- Compteur de charge de pointe
- Analyseurs de réseaux mobiles ou fixes (V, A,  $\cos \varphi$ , kW, kVA, kVAr, Hz, kW de pointe)
- Compteur d'heures de fonctionnement pour des consommateurs à débit constant (détermination de puissance par des mesures isolées, par exemple au moyen d'un ampèremètre et d'un voltmètre)

### Instruments de mesure pour l'eau

- Compteur d'eau (compteur volumétrique)
- Débitmètre inductif
- Débitmètre à ultrasons
- Diaphragmes, tubes de Venturi
- Sondes Annubar
- Débitmètre à corps flottant
- Divers obstacles placés dans des canaux à écoulement libre
- Compteur d'heures de fonctionnement pour les consommateurs à débit constant
- Compteur d'heures sur des pompes

### Instruments de mesure pour le froid

- Systèmes pour réseaux d'eau glacée et de saumure
  - Compteur de froid avec débitmètre volumétrique, inductif, à ultrasons ou à pression différentielle (voir aussi sous «eau»)
  - Compteur d'heures de fonctionnement des compresseurs frigorifiques
- Systèmes à détente directe
  - Compteur d'heures de fonctionnement
  - Compteur de courant actif et de courant réactif

### Instruments de mesure pour la vapeur

- Diaphragmes, tubes de Venturi avec convertisseur de mesure de pression différentielle et correction de pression et de température
- Instrument de mesure des consommateurs d'énergie primaire des générateurs de vapeur (fioul, gaz, courant électrique, etc.)
- Instruments de mesure de la quantité d'eau d'alimentation
- Odatachymètre à courant de Foucault
- Compteurs à turbine

### Instruments de mesure pour l'air comprimé

- Sondes Annubar, diaphragmes, odatachymètre à courant de Foucault, turbines de mesure, tubes de Venturi avec convertisseur de mesure à pression différentielle et avec ou sans correction de pression et de température
- Compteurs volumétriques (seulement pour de faibles variations de pression, température et débit)
- Compteur d'heures de fonctionnement et de charge pour la durée de fonctionnement des compresseurs

Informations supplémentaires :  
• Messen von Leistungen und Energien,  
documentation RAVEL  
N° 724.377 d  
Référence: OCFIM, 3000 Berne

## Analyse et évaluation

### Diagramme de Sankey Bilans d'énergie

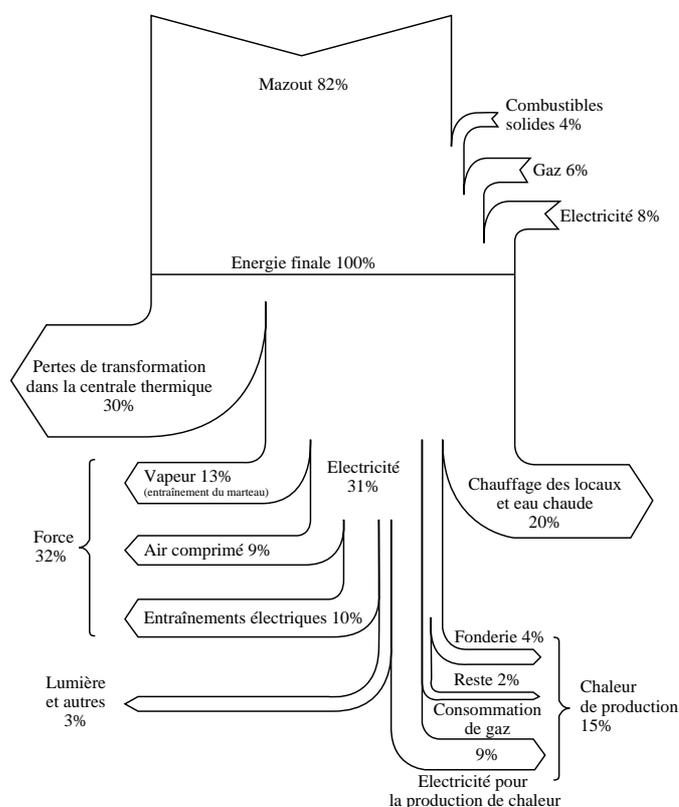
Un diagramme de flux d'énergie (diagramme de Sankey) représente les flux d'énergie entrant et sortant d'un système pendant une durée déterminée. Comme il ne peut y avoir d'énergie perdue, les quantités entrantes et sortantes sont identiques, comme dans un bilan comptable. Les bilans énergétiques peuvent être dressés pour des limites spatiales et temporelles différentes, par exemple pour un procédé particulier, pour toute une entreprise ou pour l'ensemble de l'économie publique. Les bilans annuels sont utilisés couramment; dans certains cas, des bilans journaliers, mensuels ou trimestriels peuvent être intéressants.

Il est d'usage de convertir les quantités de combustibles mesurées pour différents vecteurs énergétiques en unités d'énergie communes. L'unité usuelle est le joule (MJ, GJ, TJ, etc.). Les bilans d'énergie électrique sont généralement représentés en kWh (MWh, GWh). Des pourcentages ou des grandeurs spécifiques sont également susceptibles d'être utilisés.

### Limites de bilan Grandeurs caractéristiques

Un choix clair et précis des limites de bilan est indispensable à une interprétation correcte d'un bilan énergétique et des grandeurs caractéristiques qui en découlent (par exemple rendement moyen, grandeurs caractéristiques).

### Diagramme de flux d'énergie d'une exploitation industrielle (électronique)



### Indices de dépense d'énergie

Pour pouvoir comparer différentes entreprises, installations, machines, etc., il faut connaître les consommations spécifiques d'énergie, c'est-à-dire qu'il faut déterminer des indices, calculés à partir d'une grandeur mesurée et d'une grandeur de référence.

**Exemples :**

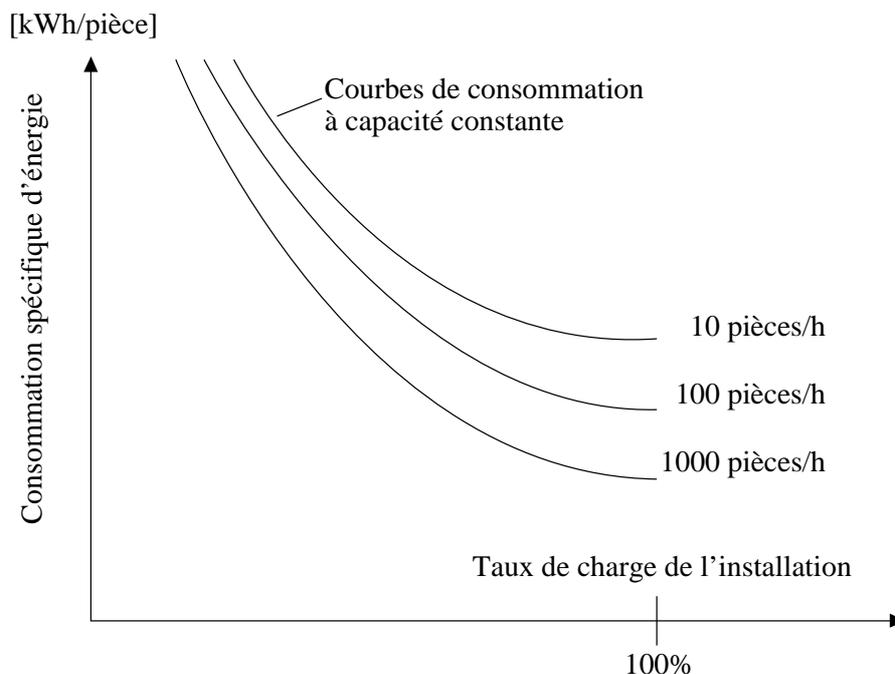
Indice de dépense d'énergie de chauffage	=	consommation annuelle d'énergie de chauffage par unité de surface brute chauffée (kWh/m <sup>2</sup> /an)
Consommation spécifique de carburant	=	consommation d'essence par unité de distance (litres/100 km)

Les indices peuvent se rapporter à l'ensemble de l'entreprise, à des installations particulières ou à certaines de leurs parties. Le choix de valeurs de référence, en plus des conditions-cadres définies, détermine de degré de pertinence d'une comparaison :

- La valeur de référence sera reliée directement à la consommation d'énergie, de telle manière qu'on puisse simplement obtenir un quotient entre elle et la consommation.
- Elle doit pouvoir être saisie sans grands frais (par exemple nombre de pièces produites, quantité de matière première utilisée, poids ou volume du produit final ou intermédiaire, etc.).

La signature énergétique (signature de demande d'énergie) est une représentation graphique de l'énergie investie ou de la consommation spécifique d'énergie en fonction d'un paramètre caractéristique d'exploitation ou de production (par exemple la consommation spécifique de carburant (l/100 km) en fonction de la vitesse de marche; la consommation spécifique de courant d'une installation de production (kWh/pièce) en fonction du taux de charge de l'installation, etc.).

Exemple :

**Consommation spécifique d'énergie en fonction du taux de charge**

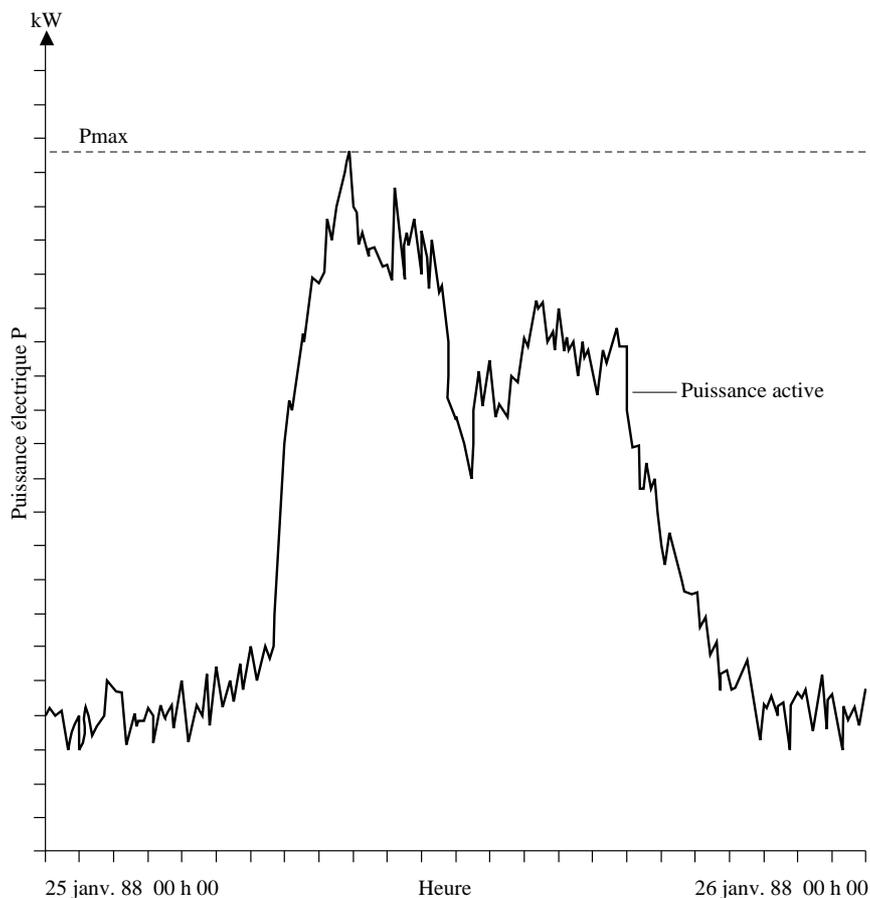
Si l'on mesure en continu pendant un jour (ou une semaine) la puissance demandée d'une exploitation ou d'une installation, on obtient la courbe de charge journalière (ou la courbe de charge hebdomadaire).

**Grandeurs de référence**

**Signature énergétique**

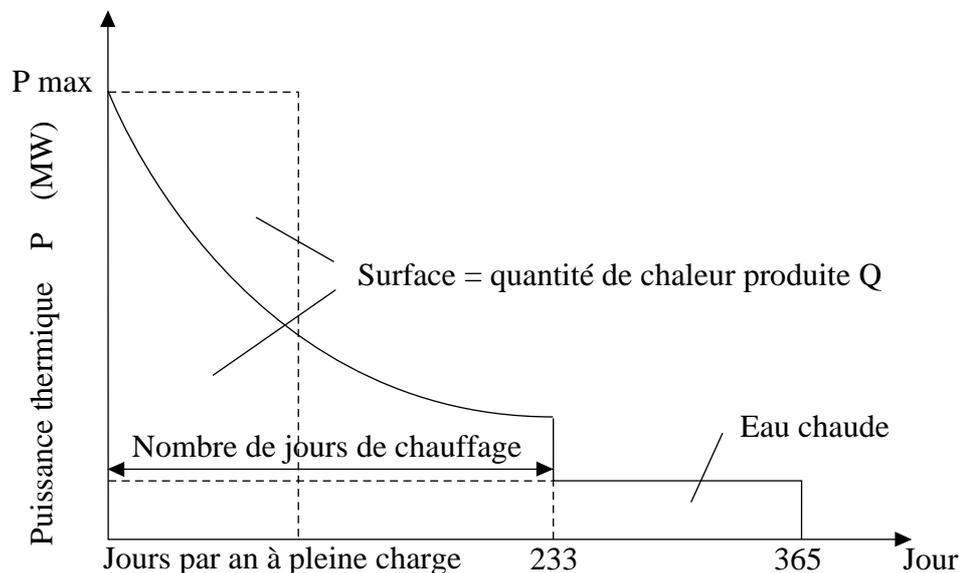
**Courbe de charge journalière**  
**Courbe de charge hebdomadaire**

### Courbe de charge électrique journalière d'une exploitation



### Courbe des puissances classées annuelle

Si l'on mesure, par exemple, dans une installation de chauffage, la moyenne journalière de la puissance thermique requise, et cela pendant une année, et qu'ensuite on classe ces valeurs par ordre décroissant (en commençant à gauche avec la valeur la plus élevée), on obtient la courbe des puissances classées annuelle.



Cette courbe représente le niveau de charge d'une installation et illustre ses caractéristiques temporelles. Elle permet souvent de détecter et d'évaluer les améliorations à envisager pour telle installation (agrandissements, transformations, mode d'exploitation, etc). L'intérêt de cette représentation tient au fait que la surface sous la courbe est proportionnelle à la quantité d'énergie. Elle permet également de représenter la répartition de la production d'énergie entre différents composants d'une installation.

Informations supplémentaires:  
• Analyse de la consommation d'énergie - Saisir, évaluer, représenter, agir.  
RAVEL-Industrie N° 724.318 f  
Référence: OCFIM, 3000 Berne

## Stockage et distribution d'énergie dans l'entreprise

Pour que les brûleurs puissent être réglés avec précision, il faut contrôler la qualité du combustible livré.

La quantité stockée dépend de divers facteurs :

- de la demande annuelle
- de la stratégie d'entreprise vis-à-vis des coûts des capitaux immobilisés dans le stockage

**Quantité stockée**

Le mazout extraléger subit un processus d'altération. Après quelques années, la qualité nécessaire ne peut plus être garantie. Dans des citernes à mazout à l'air libre, il faut veiller au fait que le mazout peut se séparer de la paraffine, lorsque la température est inférieure à 5° C.

**Altération du mazout**

Chercher activement le contact avec les autorités cantonales :

- Office cantonal de l'industrie, de l'artisanat et du travail

**Prescriptions**

Il faut tenir compte des prescriptions techniques sur les installations d'entreposage et de transvasement des liquides (Prescriptions techniques sur les réservoirs, PEL, 21 juin 1990), ainsi que des prescriptions des assurances-incendie.

**Prescriptions techniques sur les réservoirs**

A l'intérieur d'une entreprise, les matières liquides et gazeuses sont distribuées par des réseaux de conduites. On distingue les réseaux suivants :

- le réseau d'alimentation de mazout
- le réseau d'alimentation de gaz
- les réseaux d'alimentation en eau : eau chaude, froide et de refroidissement, eau industrielle, eau potable, etc.
- le réseau de vapeur
- le réseau d'air comprimé, etc.

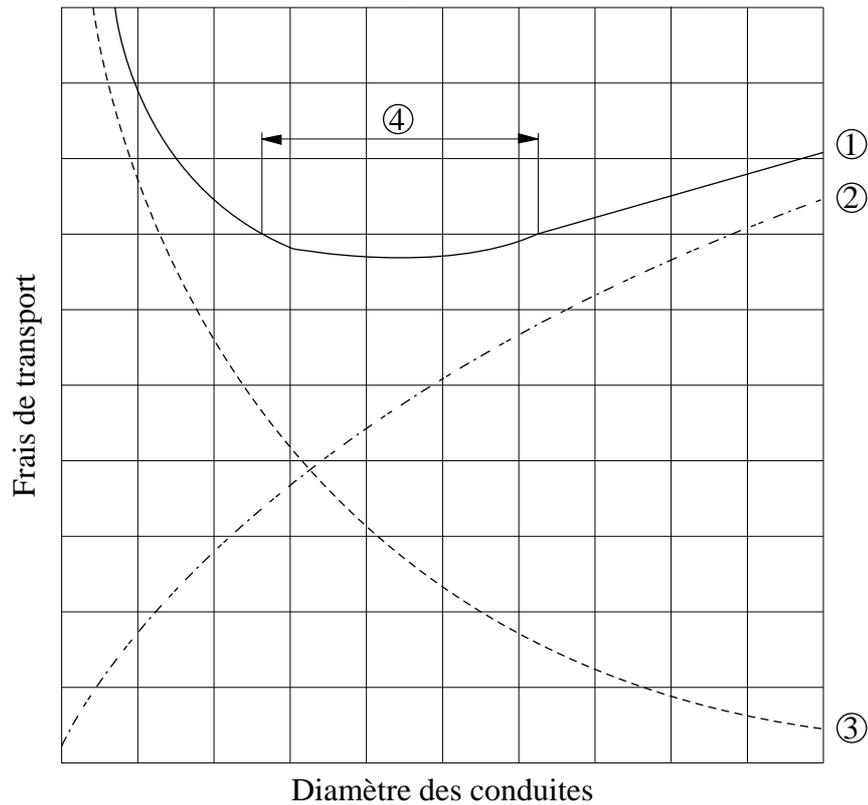
**Réseaux de conduites**

Concernant la récupération de chaleur lors de la production d'air comprimé, voir le chapitre 4.2 : « Production d'air comprimé ».

**Récupération de chaleur**

Pour dimensionner un réseau de distribution de chaleur, il faut en premier lieu connaître avec précision la demande de chaleur de tous les consommateurs. D'autre part, il faut savoir quel est le vecteur de chaleur, son état et les pressions internes maximales, respectivement de service du réseau de conduites. Le diamètre le plus favorable économiquement est déterminé par optimisation des coûts : coûts de construction (frais de capitaux) et coûts de l'énergie d'entraînement des pompes de circulation.

**Réseau de distribution de chaleur**



- 1 Frais de transport totaux
- 2 Frais de capitaux
- 3 Coûts de l'énergie
- 4 Zone des coûts optimaux

**Pertes de distribution de chaleur**  
**Epaisseur d'isolation**  
**Matériau d'isolation**

Les pertes thermiques des réseaux de distribution et les coûts qui en résultent diminuent à épaisseur d'isolation croissante. L'épaisseur économiquement optimale dépend des frais du capital investi et des coûts d'énergie épargnés. Le choix du matériau d'isolation est déterminé par son prix, sa capacité à diffuser la vapeur, la stabilité requise, sa résistance au feu et sa facilité d'installation.

**Matériaux d'isolation**

Les matériaux d'isolation les plus répandus sont les suivants :

- le PUR (= polyuréthane)
- les fibres minérales (par exemple laine de verre, laine de pierre)
- la mousse synthétique flexible
- les granulés de liège (comme isolation tampon)

**Prescriptions pour l'isolation thermique**

Il faut tenir compte des prescriptions cantonales en matière d'isolation thermique (des informations supplémentaires peuvent être obtenues auprès des services cantonaux de l'énergie).

## Besoins en puissance thermique d'un bâtiment

Les besoins en puissance thermique découlent de la demande de chaleur d'un objet à des températures ambiante et extérieure données. Elle se compose des pertes thermiques par transmission à travers l'enveloppe du bâtiment et des pertes par renouvellement d'air.

Calcul:

$$Q = Q_t + Q_a \quad [\text{W}]$$

Q = besoins en puissance thermique

$Q_t$  = pertes thermiques par transmission

$Q_a$  = pertes thermiques par renouvellement d'air

$$Q_t = k \cdot S_e \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

k = coefficient k moyen pour la totalité de l'enveloppe du bâtiment  
[W/m<sup>2</sup> · K]

$S_e$  = surface extérieure (enveloppe du bâtiment) [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  = différence entre la température ambiante désirée et la température extérieure

$$Q_a = 0,32 \cdot V \cdot n \cdot \Delta T \quad [\text{W}]$$

V = volume chauffé du bâtiment [m<sup>3</sup>]

n = taux de renouvellement de l'air

**Besoins en puissance thermique**

**Pertes thermiques par transmission**

**Pertes thermiques par renouvellement**

### Exemple:

Bâtiment de bureaux sur le plateau suisse:	V	=	10 000	m <sup>3</sup>
	$S_e$	=	3 200	m <sup>2</sup>
	k	=	0,7	W/m <sup>2</sup> K
	n	=	0,6	/h
	$\Delta T$	=	25	K
	Q	=	104	kW

Le coefficient k est une mesure du niveau d'isolation thermique d'une paroi: c'est le flux thermique qui traverse une paroi de 1 m<sup>2</sup>, lorsque la différence de température entre les couches d'air intérieure et extérieure est de 1 Kelvin [K].

**Coefficient k**

### Exemples de valeurs du coefficient k:

Fenêtre à double vitrage:	2,7 W/m <sup>2</sup> K
Fenêtre à verre isolant	1,3 W/m <sup>2</sup> K
Maçonnerie à double paroi de brique et 10 cm d'épaisseur de fibre de verre	0,3 W/m <sup>2</sup> K

Informations supplémentaires:  
Recommandation SIA 384/2  
«Puissance thermique à installer dans les bâtiments».

Référence:

Secrétariat général de la SIA,  
case postale, 8039 Zurich,  
tél.: 01/285 15 60

**Taux de renouvellement d'air** Le taux de renouvellement d'air indique la proportion du volume d'air total remplacé chaque heure par de l'air frais. Calcul :

$$n = l / h$$

n = taux de renouvellement d'air

h = nombre d'heures nécessaires pour remplacer le volume total d'air

**Pertes par renouvellement** Les pertes par aération doivent être limitées autant que possible. Mais un bâtiment (pour des raisons de physique du bâtiment, par exemple d'humidité) et ses occupants ont besoin d'un minimum d'air frais.

**Renouvellement minimal** Le taux minimum de renouvellement d'air dépend fortement du genre d'utilisation du bâtiment.

Immeuble d'habitation      n = environ 0,3

Locaux de fabrication      n = 15 à 25

**Valeurs VME** Les valeurs limites d'exposition aux postes de travail (valeurs VME) doivent être prises en considération pour des raisons de santé. Nouvelle dénomination : valeurs admissibles aux postes de travail.

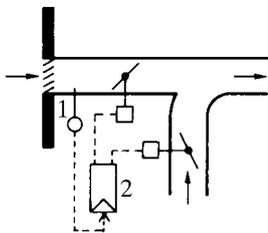
Référence :  
CNA, Lucerne.  
N° de com. 1903.f

## Commande et régulation

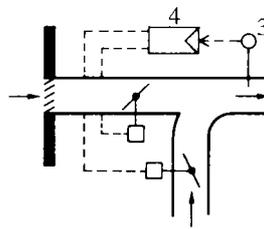
La commande est un processus qui influence les grandeurs de sortie d'un système délimité par une grandeur d'entrée choisie, sur la base de règles propres à ce système. La commande ne réagit pas à des variations non prévues des grandeurs de sortie.

La régulation est un processus qui mesure en continu une ou plusieurs grandeurs d'un processus (les grandeurs de réglage), les compare à une ou plusieurs autres grandeurs (de commande) et effectue une correction dès qu'il constate un écart. Ceci est effectué grâce à des variables réglantes, qui agissent à l'intérieur du processus (système asservi).

La différence entre commande et réglage, à l'exemple d'un dispositif de mélange d'air neuf et d'air recyclé :



a) Commande avec une sonde de température (1) dans le circuit d'air neuf. A chaque température extérieure correspond une certaine position des clapets, telle que définie par le dispositif de commande (2). La température de l'air pulsé s'adapte en conséquence.



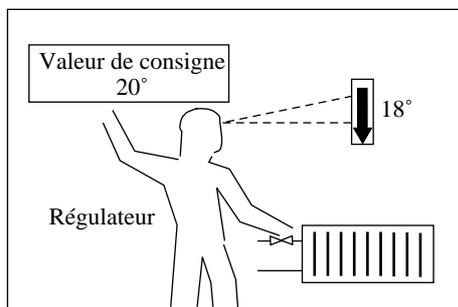
b) Régulation: la sonde placée dans le flux d'air pulsé (3) transmet la valeur de la température au dispositif de commande, qui envoie les commandes de position aux moteurs des clapets. La température de l'air pulsé s'adapte en conséquence, mais, à la différence du dispositif de commande, elle est mesurée et communiquée en retour au dispositif de régulation.

## Commande

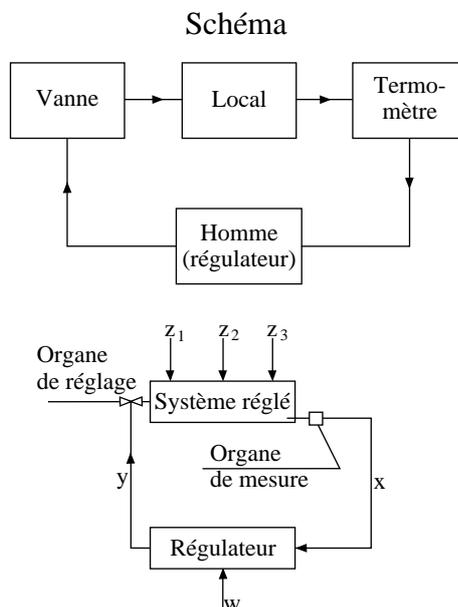
## Régulation

Informations supplémentaires :  
« Gestion technique des bâtiments - Mise en service et réception »,  
documentation RAVEL  
N° de com. 724. 363 f,  
Référence : OCFIM, 3000 Berne

## Représentation schématique d'un circuit de réglage



La grandeur réglée (valeur effective)  $x$   
 La grandeur de commande (valeur de consigne)  $w$   
 Les grandeurs d'influence  $z$   
 Les variables réglantes  $y$



## Circuit de régulation

## Grandeurs

<b>Grandeur réglée</b>	La grandeur réglée $x$ doit être gardée constante (température, pression, etc.).
<b>Variable réglante</b>	La variable réglante $y$ doit influencer la grandeur réglée de façon convenue.
<b>Grandeur d'influence</b>	La grandeur d'influence $z$ modifie de l'extérieur et de façon indésirable la grandeur réglée.
<b>Valeur effective</b>	La valeur effective $x_e$ est la valeur instantanée d'une grandeur réglée.
<b>Valeur de consigne</b>	La valeur de consigne $x_c$ est la grandeur de commande constante.
<b>Grandeur de commande</b>	La grandeur réglée devrait être ajustée à la grandeur de commande. $x_w = x - w$ $x_w$ : écart de réglage $x$ : grandeur réglée $w$ : grandeur de commande
<b>Ecart de réglage</b>	Si l'écart de réglage est négatif, on parle alors de différence de réglage.

## Instruments

<b>Sonde</b>	La sonde mesure la grandeur réglée ou d'influence et transmet un signal correspondant au régulateur. Le régulateur compare la valeur instantanée de la grandeur réglée avec la valeur de la grandeur de commande, respectivement de la valeur de consigne, et communique la sortie réponse (ou variable réglante) qui en découle à l'organe correcteur. Ce dernier actionne le servomoteur (moteur, aimant, membrane) qui modifie la sortie réponse (robinet, vanne, clapet). Organe correcteur et servomoteur forment ensemble l'appareil de régulation.
<b>Signal</b>	
<b>Organe correcteur</b>	
<b>Servomoteur</b>	
<b>Appareil de régulation</b>	

## Technique MCR Notions supplémentaires

Technique MCR: technique de mesure, commande et régulation.

<b>Régulateur proportionnel</b>	Avec un régulateur proportionnel (régulateur P), la variable réglante est proportionnelle à l'écart de réglage. Avec un régulateur intégral (régulateur I), la variable réglante est proportionnelle à l'intégrale de l'écart de réglage. Le régulateur intégral corrige mieux les petits écarts que le régulateur proportionnel. Ce système ne se rencontre pas seul. Pour le régulateur différentiel (régulateur D), la variable réglante est proportionnelle à la différentielle en fonction du temps de la grandeur réglée. Le régulateur différentiel renforce la correction d'un saut d'écart et ne s'utilise également jamais seul. Pour obtenir un réglage optimal, et stable, on combine les régulateurs P, I, et D en un régulateur appelé PID.
<b>Régulateur intégral</b>	
<b>Régulateur différentiel</b>	
<b>Régulateur PID</b>	

<b>Temps mort</b>	Le comportement dans le temps d'un système asservi est tout aussi déterminant que les relations statiques entre les grandeurs. Ce qui est particulièrement gênant, ce sont les grands laps de temps entre le changement d'une variable réglante et l'a mesure de la grandeur réglée. Plus ces temps morts sont longs, plus il devient difficile d'obtenir une régulation stable.
-------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>DDC</b>	Direct Digital Control (DDC) ou commande digitale directe: les grandeurs non numériques sont numérisées et les grandeurs réglées sont calculées par un algorithme. Ceci est effectué la plupart du temps à l'aide de matériel approprié et de calcul par microprocesseur, et directement dans le système réglé.
------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Le régulateur analogique règle en continu l'amplification, l'intégration et la différenciation (en valeurs non numériques). Les algorithmes de régulation peuvent aussi être calculés par des ordinateurs ou des commandes programmables. Pour tous les algorithmes dépendant du temps, un cycle fixe doit tout de même être garanti. Le Fuzzy-Control travaille avec des évaluations qualitatives (non exactes) au lieu de grandeurs quantifiées.

**Régulateur analogique**  
**Commande**  
**programmable**  
**Fuzzy-Control**

Les circuits de commande et de régulation sont combinés hiérarchiquement dans ce que l'on appelle une commande en cascade.

**Commande**  
**en cascade**

Exemple :

Un simple pilote automatique garde constante la position d'un avion par rapport aux trois axes. Par combinaison (superposition) avec un instrument d'orientation (par exemple compas) et comparaison avec le cap de consigne à tenir, le système de régulation parvient à maintenir un cap déterminé.

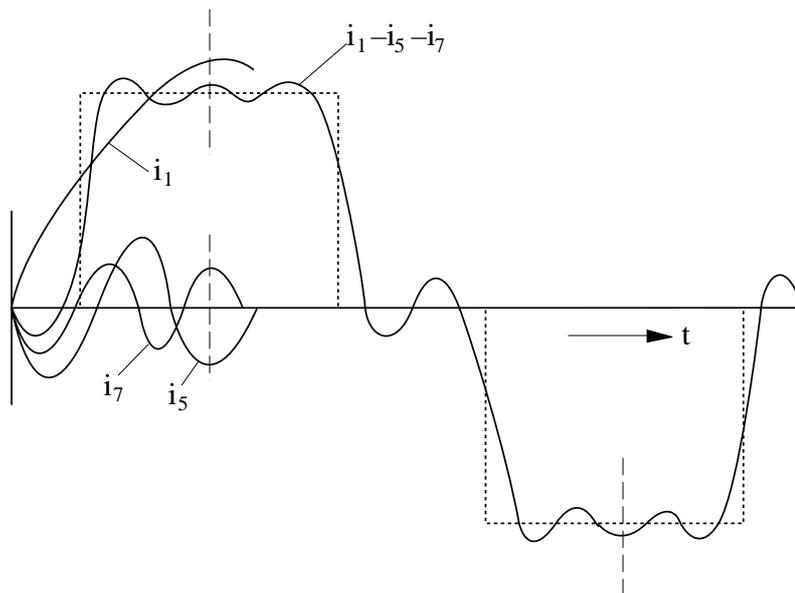
## Perturbations de réseau

Par suite de l'utilisation d'équipements électriques à caractéristiques de fonctionnement non linéaires (par exemple convertisseur de courant, commande par coupure de phase), des perturbations sont constatées sur la tension des réseaux d'alimentations. En principe, on devrait utiliser les instruments et appareils de telle manière qu'il soit exclu qu'ils gênent le fonctionnement d'installations ou d'équipements des distributeurs d'électricité. Les perturbations des réseaux sont réparties en :

- oscillations harmoniques (leur fréquence est un multiple de la fréquence du réseau de 50 Hz)
- oscillations interharmoniques (fréquences situées entre celles harmoniques)
- fluctuations brèves de tension (provoquées par l'enclenchement et le déclenchement de charges)

On désigne par scintillement des effets de fluctuations assez rapides de la tension sur d'autres consommateurs (par exemple variations d'intensité lumineuse d'une lampe à incandescence ou fluctuations du couple de machines électriques).

Les courants harmoniques produits par une installation provoquent des chutes de tension, qui se superposent à la tension du réseau et altèrent sa forme sinusoïdale.



$i_1$  = courant sinusoïdal 50 Hz ;  $i_5$  = courant sinusoïdal 250 Hz, etc.

Le facteur de distorsion harmonique (anglais: THD, Total Harmonic Distortion) est une mesure de la distorsion globale de la tension. On peut le calculer selon la formule

$$k = \frac{\sqrt{\sum I_n^2}}{I_{\text{eff}}}$$

$n$ : numéro d'ordre de l'harmonique

$I_n$ :  $n^{\text{ième}}$  harmonique de courant

$I_{\text{eff}}$ : valeur effective du courant

**Oscillations  
harmoniques  
Fluctuations de tension**

**Scintillement**

**Courants  
harmoniques**

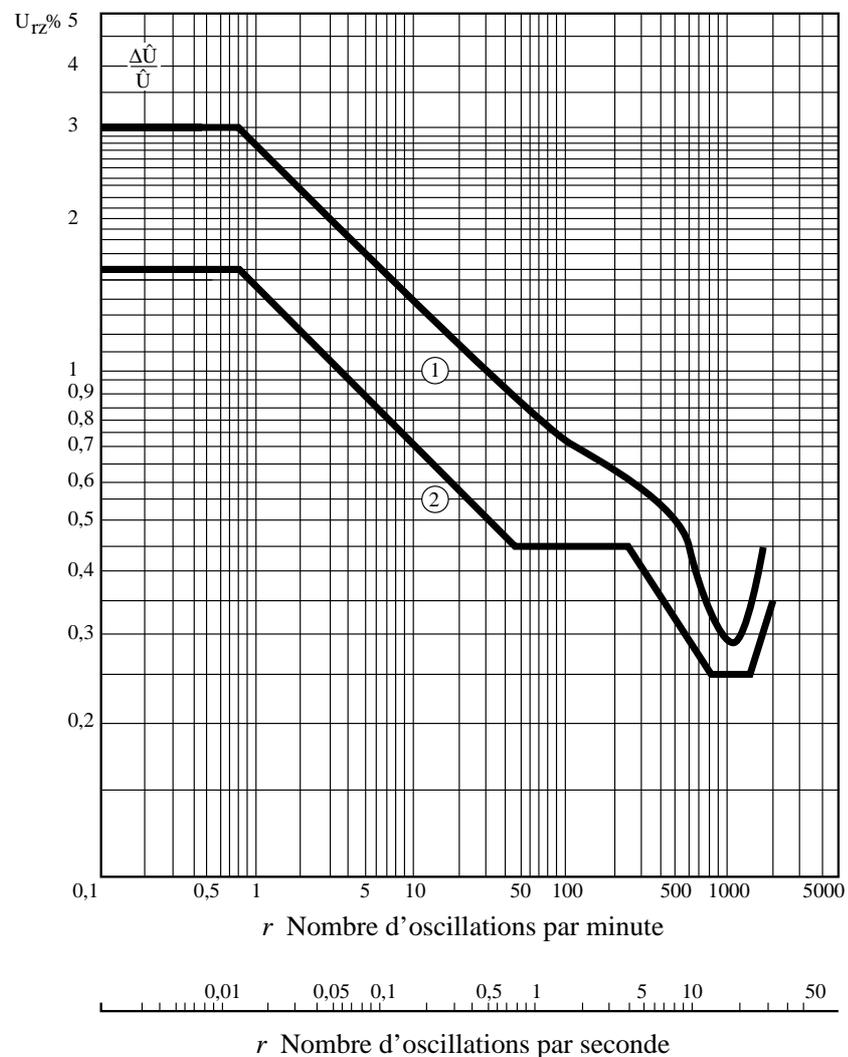
**Facteur de distorsion  
harmonique  
Total Harmonic  
Distortion THD**

### Conséquences des perturbations de réseau

- En gros, on peut dire que les distorsions harmoniques de tension supérieures à 10% de la THD sont des causes potentielles de perturbation.
- Des pointes ou des chutes de tensions de courte durée peuvent gêner le fonctionnement des appareils électroniques sensibles à la qualité de la tension.
- Les signaux de télécommande émanant du distributeur d'électricité peuvent être perturbés.
- Des courants électriques additionnels prenant naissance dans les appareils de compensation provoquent des pertes supplémentaires.

**Valeurs limites** Lors du raccordement au réseau d'alimentation électrique d'instruments et d'appareils, il faut tenir compte des limites fixées concernant la production d'oscillations harmoniques :

**Valeurs normales** **Valeurs normales des harmoniques de tension pour les réseaux à basse tension, selon SEV 3600-1 (Norme SN 413600 «Limitation des influences dans les réseaux d'alimentation de courant»).**



① - Valeurs maximales attendues dans le réseau

② - Contributions autorisées pour chaque utilisateur du réseau

Valeur de référence: tension nominale

Ne sont pris en compte que les numéros d'ordre typiques aux convertisseurs

$U_n$  : tension d'harmoniques (rapportée à la tension nominale)

$n$  : numéro d'ordre de l'harmonique

Avant de raccorder des appareils et des installations susceptibles de provoquer des perturbations sur le réseau (par exemple moteurs alimentés par des convertisseurs de courant) ou s'ils dépassent une puissance déterminée, il faut adresser une demande de raccordement au distributeur d'électricité (formulaire VSE 1.18).

### **Demande de raccordement**

Des circuits absorbants installés près du producteur d'harmoniques peuvent empêcher la plupart des courants harmoniques de passer sur le réseau. La norme SN 413724 contient les dispositions sur l'exécution d'appareils de compensation et d'absorption afin d'éviter que ne se développent sur le réseau des points de résonance incontrôlés. Elle indique également la façon de réduire les tensions d'oscillation à des valeurs autorisées à l'aide de circuits absorbants.

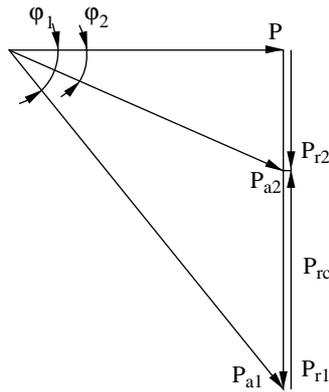
### **Installations de circuits absorbants**

Source des références des normes :  
Association Suisse des Electriciens (ASE)  
Seefeldstrasse 301  
Postfach  
8034 Zurich  
Tél. 01/956 91 11  
Fax 01/956 11 22

## Installations de compensation

Dans les installations recourant au phénomène de l'induction, et comportant des bobines, moteurs, transformateurs, etc., de l'énergie supplémentaire sous forme d'énergie réactive doit être produite. Afin que cette énergie ne doive pas constamment faire l'aller et retour entre le producteur et le consommateur, on insère des batteries de condensateurs dans le circuit.

Les notions de puissance réactive, puissance apparente et facteur de puissance sont définies au chapitre 1.5 : «Notions de temps et de puissance».



- P : puissance active
- $P_{r1}$  : puissance réactive sans compensation
- $P_{a1}$  : puissance apparente sans compensation
- $\varphi$  : facteur de puissance sans compensation
- $P_{r2}$  : puissance réactive avec compensation
- $P_{a2}$  : puissance apparente avec compensation
- $\varphi$  : facteur de puissance avec compensation
- $P_{rc}$  : puissance réactive de compensation

Les transformateurs et réseaux de conduites doivent être dimensionnés en tenant compte de la puissance apparente. On peut diminuer cette puissance apparente en installant un appareil de compensation.

En général, les distributeurs d'électricité ne facturent que l'énergie réactive qui dépasse une certaine valeur. On fixe comme limite un déphasage maximal, respectivement un  $\cos \varphi$  minimal (par exemple  $\cos \varphi = 0,9$ ).

Calcul de la puissance réactive :

$$P_{rc} = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi) \quad [\text{kVAr}]$$

Afin de ne pas perturber ou affaiblir les signaux de télécommande du distributeur d'électricité, les appareils de compensation de puissance supérieure à 25 kVAr par consommateur doivent avoir une bobine de self placée en amont. Celle-ci empêche aussi que la fréquence de résonance des condensateurs de compensation et du réseau inductif (circuit oscillateur parallèle) ne coïncide avec une harmonique existante du courant, occasionnant des distorsions inadmissibles de tension du réseau.

### Energie réactive

### Déphasage maximal

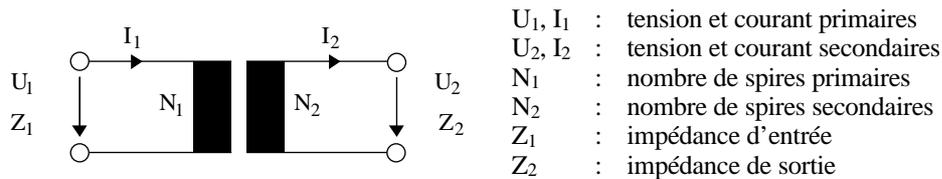
### Puissance réactive

### Appareil de compensation Bobine de self

## 4.2 Techniques énergétiques de base

### Transformateur

Les transformateurs convertissent, à l'aide de champs alternatifs, l'énergie électrique d'une certaine tension en une énergie électrique de tension différente.



$$T = U_1 / U_2 = N_1 / N_2 = I_1 / I_2 \text{ et } T^2 = Z_1 / Z_2$$

T: rapport de transformation

**Rapport de transformation**

### Pertes

Pertes en marche à vide :

$$P_{Fe} = P_H + P_F$$

$P_{Fe}$  = pertes – fer

$P_H$  = pertes par hystérèse

$P_F$  = pertes par courants de Foucault

**Pertes en marche à vide**

Pertes en charge :

$$P_{Cu} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2$$

$P_{Cu}$  = pertes – cuivre

$I_1$  = courant primaire

$I_2$  = courant secondaire

$R_1$  = résistance du bobinage d'entrée

$R_2$  = résistance du bobinage de sortie

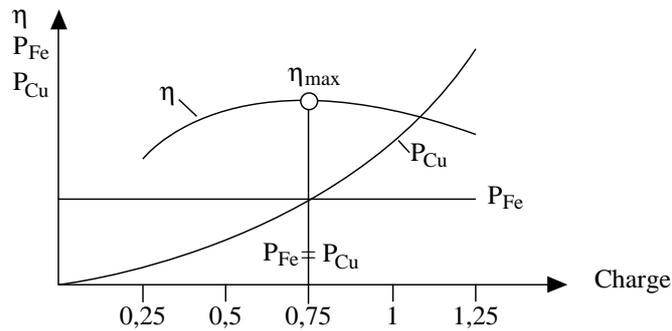
**Pertes en charge**

Pertes totales :

$$P_T = P_{Fe} + P_{Cu}$$

**Pertes totales**

### Pertes en fonction de la charge



Source:  
H. R. Ris:  
Elektrotechnik für Praktiker,  
AT Verlag

Rendement :

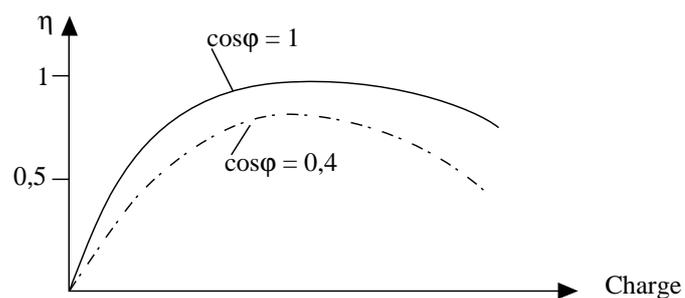
**Rendement** 
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_{Cu} + P_{Fe})}$$

$$P_1 = P_2 + P_T$$

### Rendement à charge nominale des transformateurs

Puissance	100 VA	1 kVA	10 kVA	100 kVA	1 MVA	10 MVA
Rendement $\eta$	0,88	0,9	0,96	0,97	0,98	0,99

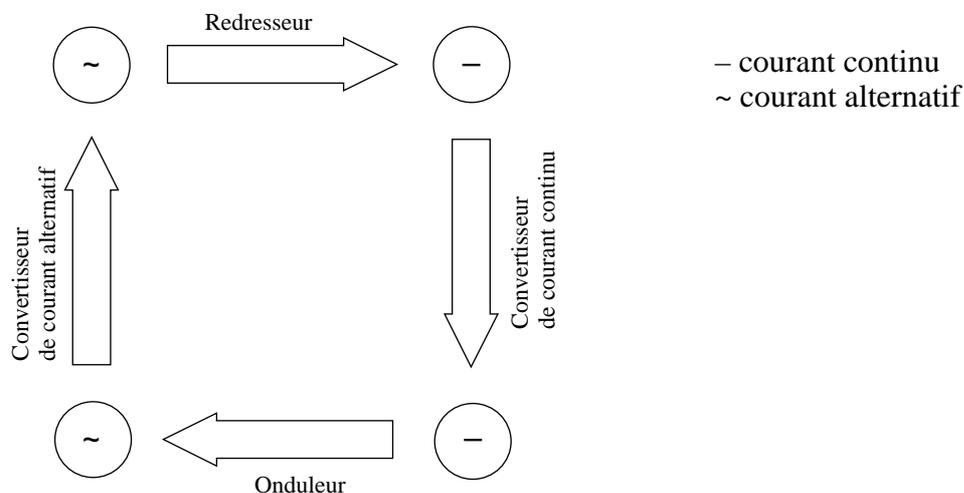
### Rendement en fonction de la charge



Le transformateur devrait être choisi de manière que le rendement optimum se trouve à une charge proche de la charge moyenne.

### Convertisseur de courant

Les convertisseurs de courant transforment le courant électrique en différentes formes, comme par exemple en courant continu ou alternatif de différentes fréquences.



Un convertisseur statique transforme un courant à l'aide de commutateurs électroniques (transistors, thyristors). **Convertisseur statique**

### Schéma de principe d'un convertisseur de circuit intermédiaire pour l'alimentation d'un moteur

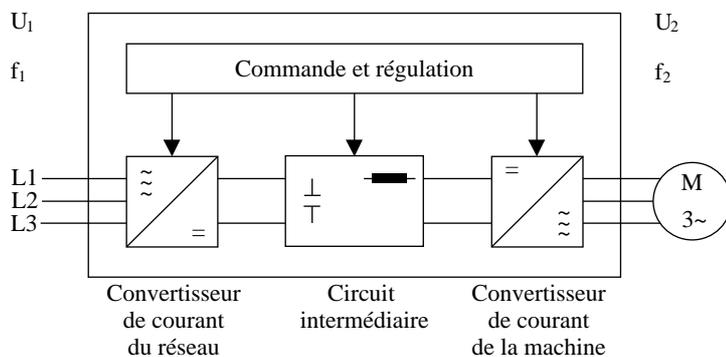


Schéma-bloc d'un convertisseur de circuit intermédiaire

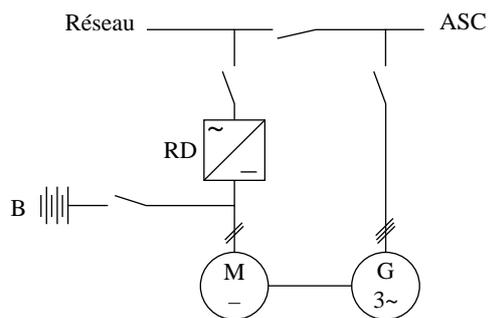
### Convertisseur de circuit intermédiaire

U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> : tensions  
 f<sub>1</sub>, f<sub>2</sub> : fréquences

## Alimentation de courant sans coupure (ASC)

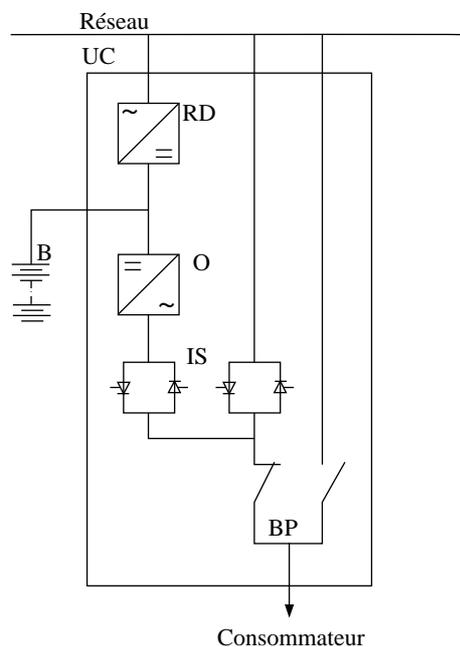
Utilisée pour des consommateurs de courant qui ne supportent ni interruption de courant ni fluctuation de tension du réseau (par exemple informatique, commandes électroniques).

### Appareil ASC rotatif

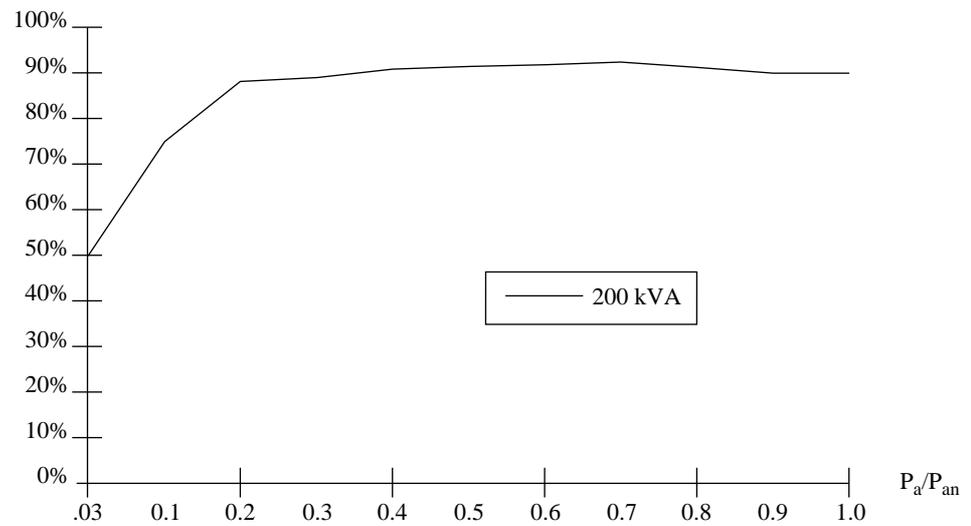


- G: générateur
- M: machine à courant continu
- RD: redresseur
- B: batterie

### Appareil ASC statique



- UC : unité de conversion
- RD : redresseur
- O : onduleur
- IS : interrupteur de réseau statique
- BP : «by-pass» d'entretien
- B : batterie

**Variation du rendement d'un appareil ASC statique**

$P_a$  : puissance apparente

$P_{an}$  : puissance apparente nominale

## Batteries

### Aperçu des différentes cellules primaires (non rechargeables)

Type	Tension [V]	Capacité $Q_N$ [Ah]	Durée de stockage jusqu'à 80% de $Q_N$ [Mois]	Densité énergétique mWh/cm <sup>3</sup>	Température de fonctionnement [°C]
Zinc – charbon	1,5	selon	6-18	140	-05- +20° C
Alcali – manganèse	1,5	-10	30	220	-20- +20° C
Oxyde de mercure- Zinc	1.35- 1,4	-18	30	390	-10- +65° C
Oxyde d'argent – zinc	1,5	-0,25	18	480	-10- +65° C
Lithium	environ 3	-10	120	530	-50- 150° C

Source : H. R. Ris, Elektrotechnik für den Praktiker, AT Verlag

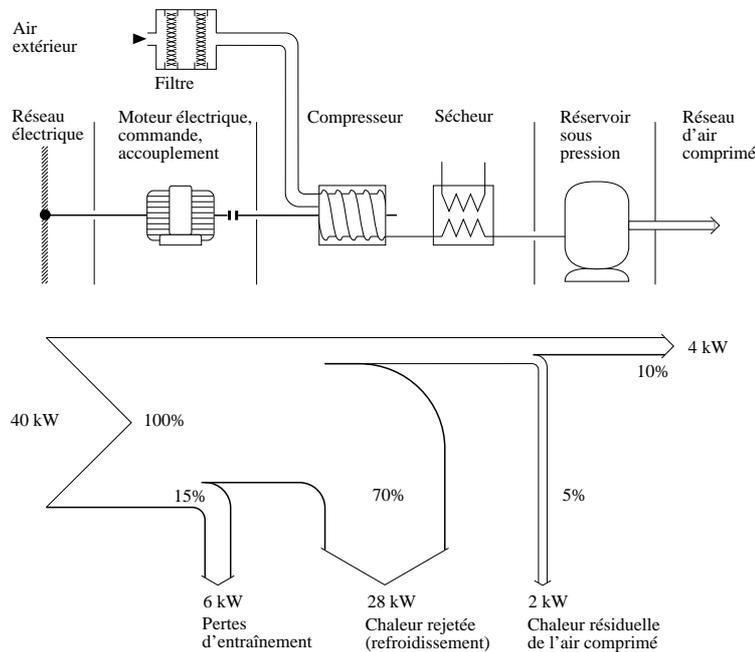
### Comparaison des divers types d'accumulateurs (rechargeables)

Caractéristiques principales	Accumulateurs au plomb			Accumulateurs nickel – cadmium	
	Batterie de démarrage	Batteries de traction	Batteries stationnaires	Batteries Ni-Cd ouvertes	Batteries Ni-Cd étanches au gaz
Type de construction	ouvert  plaque à grille	ouvert  plaques à tubes positives	fermé  plaque à grille	ouvert  panneau de fibres/plateau	étanches au gaz  électrodes frittées/ de masse
Electrolyte	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	KOH	KOH
Capacité indiquée [Ah]	20h	5h	10h	5h	5/10h
Tension au repos [V]	2,12	2,12	2,12	1,3	1,3
Tension en fin de recharge [V]	2,7	2,7	2,35	1,7	1,7
Tension en fin de décharge [V]	1,8	1,8	1,6 (10') à 1,82(10h)	1	1
Résistance interne [mΩ/100Ah]	0,6 à 2,0	1 à 5,0	0,15 à 1,5	0,1 à 0,3	0,1 à 0,3
Facteur de charge	1,2	1,2	1,1	1,2 à 1,3	1,4
Comportement en température [C <sub>n</sub> /°C]	-1 %	-1 %	-1 %	-0,50 %	-0,50 %
Autodécharge à 20°C	1 %/jour	1 %/jour	0,1 %/jour	1 à 2 %/jour	0,5 à 1 %/jour
Rendement en Ah	85 %	80 %	90 %	75 %	70 à 80 %
Rendement en Wh	70 %	70 %	80 %	55 %	60 à 73 %
Densité énergétique [Wh/l]	50 à 75	60 à 80	~ 60	30 à 70	40 à 80
Densité énergétique [Wh/kg]	25 à 35	25 à 40	~ 25	15 à 30	20 à 30
Durée de vie [an/cycle]	2 à 5 ans	4 à 6 ans/1500 cycles	5 à 10 ans	15 à 20 ans	6a/500-1000 cy.
Remarques générales	pas pour charge cyclique	optimisé pour charge cyclique	adapté sous condition à une exploitation cyclique	grande résistance aux cycles résiste aux décharges profondes	totalément sans entretien résiste aux décharges profondes
	à utiliser comme bloc de batteries 6/12 V	à utiliser comme bloc de batteries ou cellule unique 2V	sans entretien utilisable en toute position		utilisable en toute position
Application	véhicules	tracteur électrique gerbeur	groupes électrogènes de secours unités ACS	installations électriques stationnaires, véhicules	instruments portables aéronautique astronautique

Source : Communication de la fabrique d'accumulateurs Oerlikon

## Production d'air comprimé

### Installation de production d'air comprimé



Lorsque la pression dans le réservoir s'abaisse au-dessous d'une certaine valeur minimale, le compresseur se met en marche. L'air extérieur aspiré est filtré, comprimé puis séché. Le processus de compression s'interrompt dès que la pression dans le réservoir atteint la valeur désirée. La plus grande partie de l'électricité consommée est transformée en chaleur, que l'on peut récupérer pour le chauffage de halles ou d'eau. L'air comprimé, en tant qu'agent énergétique, est environ 20 fois plus cher que le courant électrique.

**Compresseur**  
**Utilisation de la chaleur dégagée**  
**Prix**

### Nouvelle installation de compresseurs à rendement énergétique optimal

- **Taille** : s'efforcer d'atteindre un taux d'utilisation du compresseur aussi élevé que possible. Calculer avec précision la demande d'air comprimé afin de déterminer la puissance. Lors de remplacements, mesurer la consommation sur l'ancienne installation. Éviter d'installer une capacité de réserve destinée à tranquilliser le concepteur. Lorsque la consommation est très variable, par exemple exploitation de jour et de nuit, prévoir deux compresseurs : un petit pour couvrir les besoins de base, et un grand pour les charges de pointe.
- **Pressions d'enclenchement et de déclenchement** : dans la mesure du possible éviter les pressions élevées car la dépense énergétique augmente fortement avec la pression.
- **Type de compresseur** : à déterminer en fonction des besoins. Les critères de choix sont : la puissance et le domaine de pression ainsi que la qualité de l'air comprimé (par exemple air comprimé exempt d'huile).

**Taille**

**Pression**

**Type de compresseur**

## Pompes à chaleur (ou thermopompes)

Les pompes à chaleur (PAC) sont des machines frigorifiques qui utilisent des sources de chaleur à basse température pour produire de la chaleur utile à température plus élevée.

**Machines frigorifiques**

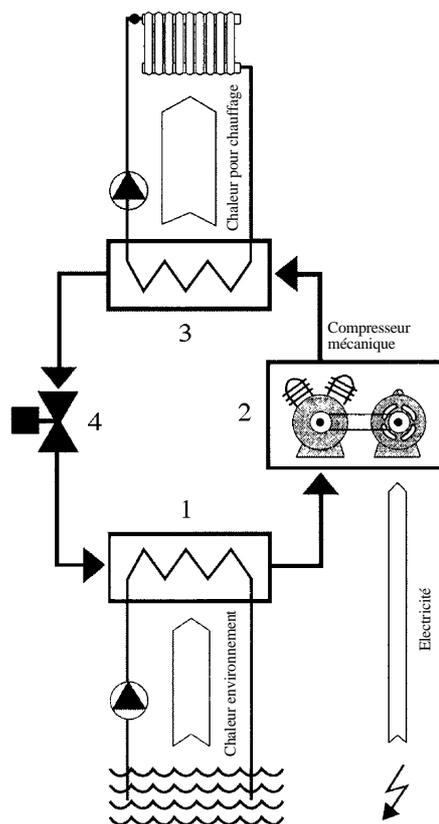
### Types de pompes à chaleur :

- Pompe à chaleur eau/eau
- Pompe à chaleur air/eau
- Pompe à chaleur air/air
- Pompe à chaleur eau/air

A la place de l'eau, on utilise aussi de la saumure, comme fluide caloporteur (mélange d'eau et de glycol) pour extraire de la chaleur de l'environnement.

**Saumure**

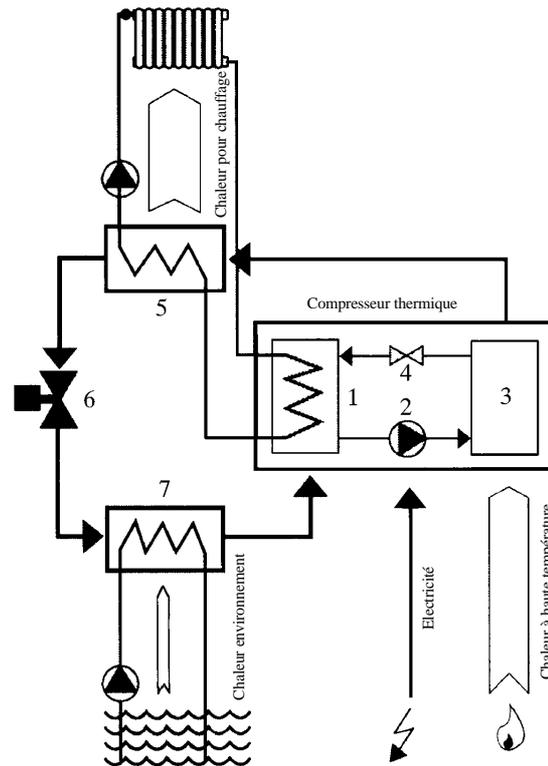
### Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à compression



La source de chaleur met le fluide frigorigène en ébullition, à basse température, dans l'évaporateur (1). La vapeur produite est ensuite comprimée dans le compresseur (2). La température s'élève fortement et la chaleur peut maintenant être remise – à un niveau de température plus élevé – à l'eau du chauffage dans le condenseur (3). Le fluide frigorigène retourne alors à l'état liquide. Il se détend dans le détendeur (4) à la pression finale, se refroidit à cette occasion, et le cycle thermodynamique peut recommencer.

**Processus de fonctionnement par compression**

## Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à absorption



### Fonctionnement du processus à absorption

Dans l'absorbant (1), le réfrigérant est absorbé par un fluide absorbant. La chaleur d'absorption est prélevée pour être valorisée. Ensuite, la pompe de solution (2) amène sous pression le fluide au bouilleur où, grâce à un apport de chaleur, le réfrigérant est séparé par évaporation. Le fluide absorbant a ainsi accompli sa mission de « compresseur thermique » et retourne alors au travers d'une vanne de détente dans l'absorbant (1). La suite du cycle du fluide thermodynamique est similaire à celui de la pompe à chaleur à compression : transmission de chaleur au réseau de chauffage dans le condenseur (5), expansion dans le détendeur (6) et captage de chaleur à basse température dans l'évaporateur (7)...

### Compression de vapeurs

Dans la compression de vapeur, la vapeur rejetée, telle qu'elle apparaît dans un processus de concentration par évaporation, est amenée à pression et température plus élevées par un compresseur. Ces vapeurs peuvent ainsi être utilisées pour le chauffage du même procédé. L'élévation de température nécessaire n'est souvent que de quelques degrés Kelvin; cela représente approximativement la différence de température entre l'échangeur de chaleur et l'agent thermodynamique à évaporer. Avec cette faible différence de température de moins de 10 Kelvin, on obtient des coefficients de performance correspondants de plus de 15.

Les sources de chaleur possibles pour les pompes à chaleur sont :

- les rejets thermiques
- l'air extérieur
- la géothermie
- les lacs, les cours d'eau
- les nappes phréatiques

### Sources de chaleur

En exploitation de type monovalent, on utilise la pompe à chaleur sans production supplémentaire de chaleur, contrairement à ce qui se passe lors d'un fonctionnement de type bivalent, où on utilise un deuxième producteur de chaleur.

### Exploitation monovalente

$$E_{PC} = \frac{Q_C}{P_{AE}}$$

### Coefficient de performance en production de chaleur

$E_{PC}$ : coefficient de performance en production de chaleur  
(en anglais : coefficient of performance COP)

$Q_C$ : puissance de chauffage

$P_{AE}$ : puissance absorbée effective

$$E_{PR} = \frac{Q_R}{P_{AE}}$$

### Coefficient de performance en production de froid

$E_{PR}$ : coefficient de performance en production de froid  
(en anglais : energy efficiency ratio EER)

$Q_R$ : puissance de refroidissement

$P_{AE}$ : puissance absorbée effective

$$E_{PR} = E_{PC} - 1$$

Le rendement annuel correspond à la chaleur dégagée divisée par l'énergie facturée, fournie au procédé pendant une année.

### Rendement annuel

Coefficients de performance réels atteints par les pompes à chaleur électriques :

Type	Coef. de performance*	Rendement annuel
Eau – eau (monovalent)	3,5 – 4,0	3,0 – 3,5
Saumure – eau (monovalent)	3,0 – 3,5	2,5 – 3,0
Air – eau (bivalent)	2,9 – 3,4	2,4 – 2,9

\* Pour une température de départ de 35° C et une température de la source de chaleur de 2 à 10° C (eau), -5 à 5° C (saumure), 0 à 10° C (air)

On peut considérer comme réalistes des coefficients de performance annuels d'environ 1,5 pour les pompes à chaleur à moteur à gaz et de 1,3 pour celles à absorption.

Informations supplémentaires :  
Publication RAVEL  
« Wärmepumpen »,  
N° de com. : 724.356.d,  
OCFIM, 3000 Berne

## Production de froid

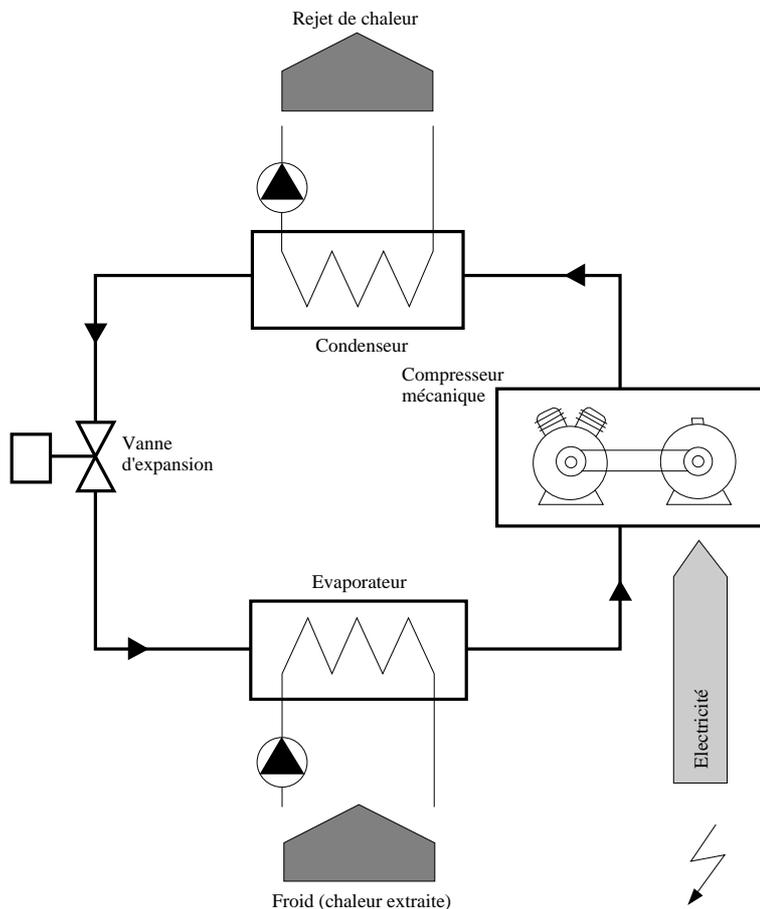
La réfrigération est un processus dans lequel on extrait de la chaleur d'un système – ou d'une matière – ce qui l'amène à une température plus basse que celle de l'environnement.

## Réfrigération

Il est possible de produire du froid

- directement avec de l'air
- avec un circuit d'eau et l'air extérieur (tour de refroidissement ouverte ou fermée)
- directement avec de l'eau de surface
- avec des machines frigorifiques à compression (éventuellement source chaude pour pompe à chaleur)
- avec des machines frigorifiques à absorption entraînées par une source de chaleur

**Machine frigorifique à compression** (explications en page 4.2/8)



**Machine frigorifique à absorption** (explications en page 4.2/9)

Les fluides frigorigènes sont des matières capables d'absorber de la chaleur par évaporation et d'en dégager par condensation, propriétés mises à profit pour la production de froid.

## Fluide frigorigène

## Comparaison de divers fluides frigorigènes

Groupe	Symbole	Formule	RGWP	RODP	Valeur VME
CFC	R 11	CFCl <sub>3</sub>	1,0	1,0	1000
	R 12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	3,0	1,0	1000
	R 500	26% R152 a/74% R 12	2,3	0,74	—
	R 502	48.8% R 22/51.2% R 12	2,7	0,33	—
H-CFC	R 22	CHF <sub>2</sub> Cl	0,34	0,05	500
	R 123		0,02	0,018	100
H-FC	R 134 a	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	0,28	0	—
	R 152 a	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	0,03	0	—
	R 717	ammoniaque	0	0	50
	R 270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (cyclopropane)	—	—	—
	R 290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (propane)	—	—	—

RGWP	Relative Global Warming Potential (relativement à R 11) = relatif au potentiel d'effet de serre
RODP	Relative Ozone Depletion Potential (relativement à R 11) = relatif au potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone
VME	Valeurs limites d'exposition aux postes de travail en ppm (> 8 h)
CFC	Chlorofluorocarbones (fluides frigorigènes)
H-CFC	Hydrochlorofluorocarbones
H-FC	Hydrofluorocarbones

A partir de 1994, les CFC, très nocifs pour la couche d'ozone, seront interdits. Le R22 continue à être autorisé à titre provisoire.

## Utilisation des fluides frigorigènes disponibles actuellement et leurs alternatives possibles

Utilisation	Frigorigènes en usage aujourd'hui	Alternatives possibles
Froid domestique	R 12	principale R 134 a secondaire R 512 a mélanges
Froid artisanal	R 12, R 22, R 502	principale R 22 secondaire R 134 a, R 512 a mélanges
Froid industriel	NH <sub>3</sub> , R 22, R 13, R 12	principale NH <sub>3</sub> , R 22 secondaire R 134 a
Climatisation	R 22, R 11, R 12	principale R 22 secondaire R 123, R 134 a
Pompes à chaleur	R 22, R 12, R 114, R 502	principale R 22 (t <sub>k</sub> < 60 °C) secondaire R 134 a (t <sub>k</sub> < 80 °C)

Source : Sulzer

Informations supplémentaires:  
Office fédéral de  
l'environnement, des forêts et  
du paysage (OFEFP):  
Ersatz von FCKW in  
der Industrie, Schriftreihe  
Umwelt, BUWAL,  
Service de la documentation,  
3003 Berne, 1990

**Principes d'exploitation optimale (critère économique)**

- Installer pour chaque cas le générateur qui présente le meilleur coefficient de performance (COP coefficient of performance, respectivement EER, energy efficiency ratio). **Coefficient de performance**
- Plus petite est l'élévation de température entre l'évaporation et la condensation, meilleur est le coefficient de performance. **Elévation de température**
- Une installation hydraulique parfaitement équilibrée et un fonctionnement optimal sont les conditions principales en vue d'une exploitation énergétiquement efficace. **Equilibrage hydraulique**
- Lors de la production d'eau froide dans un système passif, il faut optimiser la puissance du ventilateur en fonction de l'humidité et de la température de l'air extérieur. **Production d'eau froide**
- Abaissement de la température de condensation en éliminant à temps l'air et les gaz inertes du circuit frigorigène. **Température de condensation**
- Amélioration des transferts de chaleur en nettoyant souvent et soigneusement les surface d'échangeurs de chaleur, et en évitant la formation de mucosités dans l'eau de refroidissement. **Transferts de chaleur**
- Ajustement parfait des générateurs de froid, afin que les écarts de réglage et oscillations restent faibles. **Ecarts de réglage**
- Modification éventuelle des grandes pompes et des ventilateurs en les équipant d'entraînements à vitesse variable. **Entraînement**
- Examiner si la chaleur soutirée au système refroidi peut être réutilisée dans un autre procédé (par exemple production d'eau chaude). **Utilisation des rejets thermiques**

## Brûleurs, chaudières

Types de brûleurs pour combustibles solides :

- combustion sur grille mécanique
- combustion de charbon pulvérisé
- combustion en lit fluidisé

**Combustibles solides**

Types de brûleurs pour combustibles liquides :

- brûleur à pulvérisation sous pression
- brûleur rotatif à pulvérisation
- brûleur à injection
- brûleur à vaporisation

**Combustibles liquides**

Types de brûleurs pour combustibles gazeux :

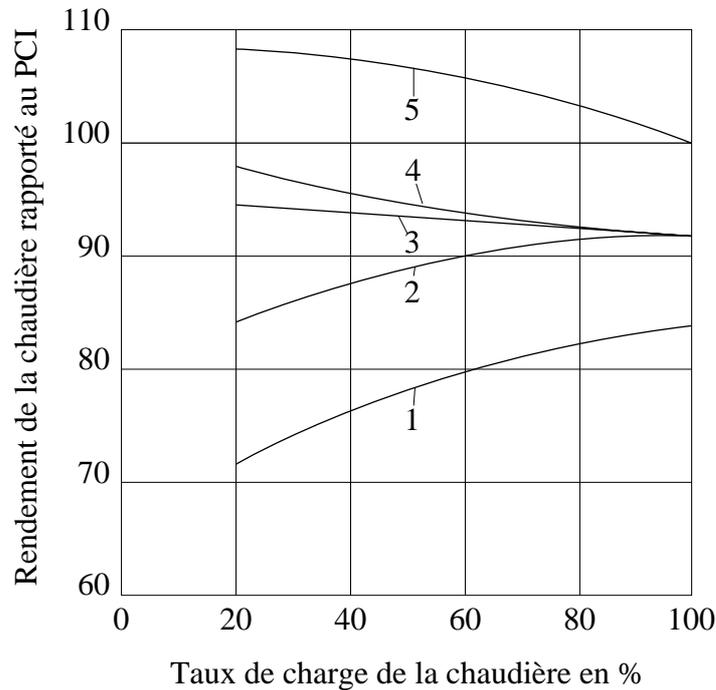
- brûleurs à basse pression (10-50 mbar)
- brûleurs à haute pression (jusqu'à 3 bar)
- brûleurs atmosphériques
- brûleurs à prémélange

**Combustibles gazeux**

Avec la technique de combustion Low-Nox (voir aussi le chapitre « Environnement »), les brûleurs à combustibles liquides et gazeux peuvent être exploités avec recirculation (interne ou externe) des gaz d'échappement.

**Low-Nox**

### Taux d'utilisation de diverses chaudières de chauffages centraux

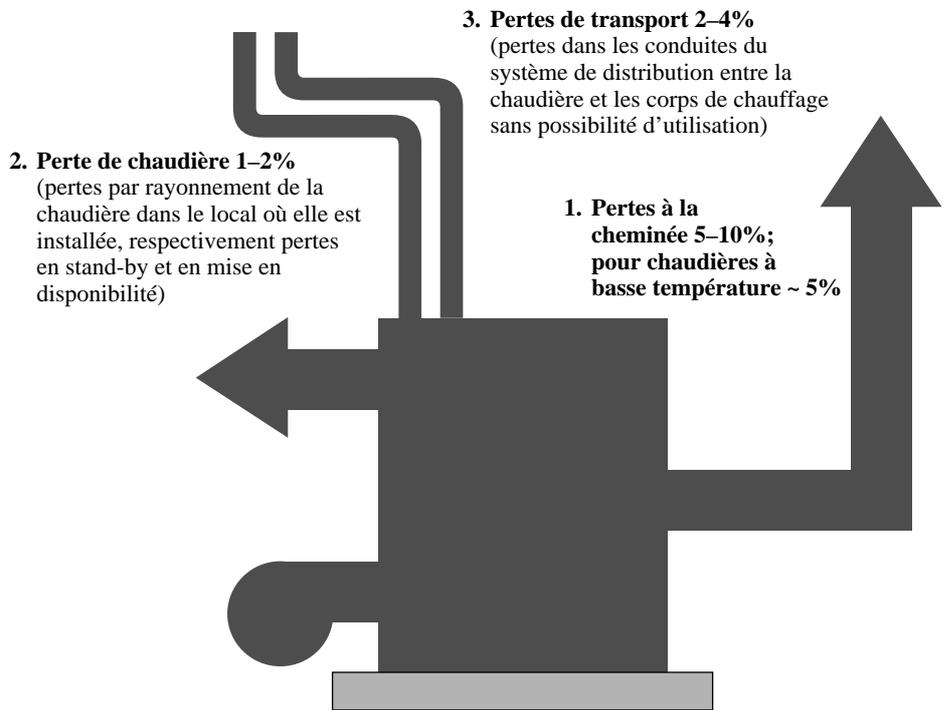


1. Ancienne chaudière (1967) avec  $\eta = 84\%$ , température de l'eau dans la chaudière constante, à environ  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , fonctionnement à une allure.
2. Nouvelle chaudière (1988) avec  $\eta = 92\%$ , température de l'eau dans la chaudière constante, à environ  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , fonctionnement à une allure.
3. Nouvelle chaudière à basse température,  $\eta = 92\%$ , température de l'eau dans la chaudière fonction de la température externe, fonctionnement à une allure.
4. Nouvelle chaudière à basse température,  $\eta = 92\%$ , température de l'eau dans la chaudière fonction de la température externe, combustion modulante.
5. Nouvelle chaudière à condensation  $\eta = 99\%$ , température de l'eau dans la chaudière fonction de la température externe, combustion modulante, système de chauffage totalement adapté à la condensation.

Remarque :

Le rendement est mesuré par rapport au pouvoir calorifique inférieur; si l'énergie de la vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion peut être récupérée, les rendements peuvent être supérieurs à  $100\%$ .

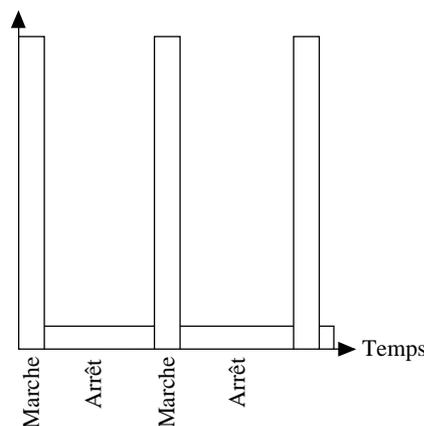
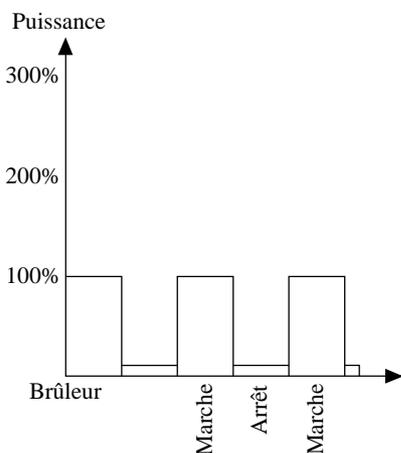
**Pertes dans les installations de chauffage  
(valeurs favorables d'installations neuves)**



Le rendement de combustion est déterminé par la différence entre l'énergie mise en jeu et les pertes à la cheminée.

Le taux de charge du brûleur est le rapport entre la durée de fonctionnement du brûleur et la durée totale d'enclenchement de l'installation de chauffage. Sa valeur s'élève à environ 0,4 en moyenne pour la période de chauffage pour une production de chaleur correctement dimensionnée avec un brûleur à une seule allure. Cela signifie que, pendant la période de chauffage, le brûleur reste en moyenne deux fois plus longtemps à l'arrêt qu'en marche.

**Taux de charge du brûleur**



a) Taux de charge du brûleur 0,5

b) Taux de charge du brûleur 0,17

**Pertes de maintien** Les pertes de maintien (en stand-by) des brûleurs, rapportées à la consommation totale de fioul (valeurs favorables pour de nouvelles installations)

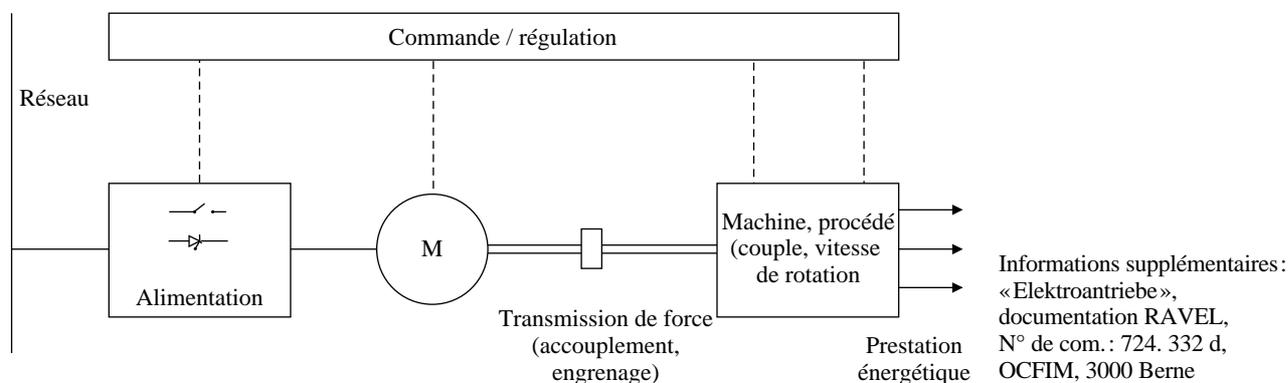
- Chaudière correctement dimensionnée 2 à 3 %
- Chaudière surdimensionnée (200 %) 4 à 8 %
- Chaudière surdimensionnée (300 %) 5 à 10 %

**Rendement de chaudière** Le rendement d'une chaudière est normalement indiqué par le fournisseur. Mais il ne concerne que la durée de fonctionnement du brûleur (en règle générale moins d'un tiers de la durée totale d'exploitation de la chaudière). Ce rendement ne peut donc pas être utilisé directement pour effectuer un calcul d'économie d'énergie. Ce qu'il faut, c'est le rendement annuel, c'est-à-dire la quantité totale de combustible consommée par unité de chaleur utile fournie.

**Rendement annuel** Pour des chaudières modernes installées de façon conventionnelle dans des habitations n'assurant pas la production de l'eau sanitaire, le rendement annuel s'élève à environ 80%, un peu plus pour de grandes installations. Pour des chaudières modernes à basse température, il dépasse 90%.

## Entraînements électriques

### Systèmes à entraînement électrique



### Rendement de systèmes d'entraînement électrique

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{alimentation}} \cdot \eta_{\text{moteur}} \cdot \eta_{\text{organe de transmission}} \cdot \eta_{\text{machine}}$$

$\eta_{\text{alimentation}}$	=	90 - 98 %	$(= \frac{P_{\text{méc}}}{P_{\text{él}}})$
$\eta_{\text{moteur}}$	=	30 - 98 %	
$\eta_{\text{engrenage}}$	=	60 - 98 %	
$\eta_{\text{machine}}$	=	0 - 100 %	

#### Exemple :

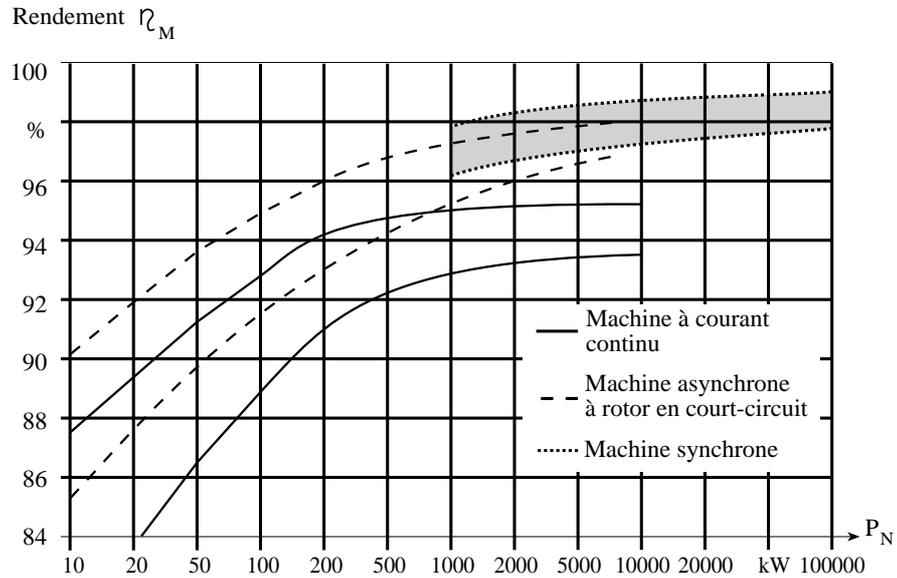
Entraînement de ventilation  
 $\eta_{\text{global}} = 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,75 = 55 \%$

Informations supplémentaires :  
R. Reichert, ETH Zurich,  
« Elektrische Antriebe -  
Auslegung und  
Betrieboptimierung »,  
documentation RAVEL,  
N° de com. : 724.331 d,  
OCFIM, 3000 Berne

### Rendement de moteurs électriques

Type de moteur	10 – 100 W	100 – 1000 W	1 – 10 kW	> 10 kW
A pôles fendus	15-25 %	—	—	—
A collecteur (moteur universel)	25-40 %	40-50 %	—	—
Monophasé	30-55 %	55-72 %	72-80 %	—
Asynchrone à rotor en court-circuit	—	70-80 %	80-86 %	84-98 %
Triphasé (à réglage de vitesse électronique)	70-80 %	80-90 %	88-92 %	92-95 %
Synchrone (triphase)	—	—	—	96-98 %
A courant continu	60-70 %	70-80 %	80-90 %	90-95 %
A courant continu à aimant permanent	75-80 %	85-90 %	90-93 %	—

**Variation du rendement de machines électriques d'une puissance > 10 kW**

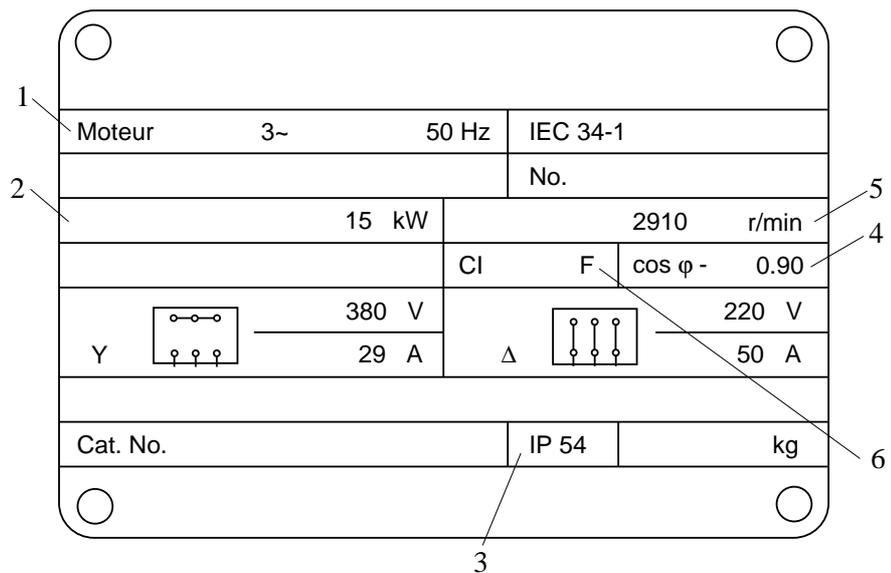


Plusieurs types de moteurs peuvent convenir à chaque application. Le rendement dépend du type de moteur et de sa taille.

**Plaque signalétique**

La plaque signalétique donne : le type de moteur, la tension, la consommation de courant, la fréquence, la puissance à l'arbre, le type de protection, cos φ la vitesse de rotation nominale et la classe d'isolation.

**Plaque signalétique: exemple pour un moteur de 15 kW (à 2 pôles)**



- 1. Moteur triphasé pour 50 Hz
- 2. Puissance à l'arbre nominale

Le couple nominal  $M$  peut être calculé à l'aide de la vitesse de rotation nominale  $n$  et de la puissance mécanique  $P_{\text{méc}}$  :

$$P_{\text{méc}} = M \cdot n / 9,55$$

$$M = P_{\text{méc}} \cdot 9,55 / n = 15\,000 \cdot 9,55 / 2910 = 49 \text{ Nm}$$

Le couple nominal figure également dans le catalogue.

3. Type de protection selon la Norme IEC 34-5.

IP 54 : étanche à la poussière et résistant aux éclaboussures d'eau.

IP 55 : étanche à la poussière et résistant aux projections d'eau.

4. Le  $\cos \varphi$  indique la proportion (ici 9/10) du courant du moteur qui est efficace. On peut donc calculer la puissance électrique absorbée à charge nominale :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 29 \cdot 0,9 = 17\,170 \text{ W} = 17,17 \text{ kW}$$

Le numéro 2 indique la puissance mécanique nominale à l'arbre (ici 15 kW), ce qui permet de déterminer le rendement du moteur :

$$\eta(\text{rendement}) = \text{puissance (délivrée)} / \text{puissance (absorbée)} \\ = P_{\text{méc}} / P_{\text{élec}} = 15 / 17,17 = 0,87$$

5. La vitesse de rotation nominale du moteur est valable pour un moteur chaud, à tension, fréquence et puissance nominales.

Pour une vitesse de rotation nominale d'un moteur de 2910 t/min, on peut déduire qu'il s'agit d'un moteur à 2 pôles. La vitesse de rotation synchrone se monte donc à 3000 t/min. Le glissement équivaut à  $3000 - 2910 = 90$  t/min, typiquement avec une tolérance de  $\pm 10\%$  :

$$90 \pm 10\% = 90 \pm 9 \text{ t/min}$$

$$\text{Le glissement relatif vaut : } n_{\text{gliss}}/n_{\text{synchron}} = 90/3000 = 0,03 = 3\%$$

6. Classes d'isolation :

	Température en service continu maximale	Echauffement limite
	[°C]	[K]
A	105	65
E	120	80
B	130	90
F	150	110
H	175	135

Remarque: l'élévation de température maximale tolérée relativement à une température ambiante de  $40^\circ\text{C}$  est désignée par le terme d'échauffement limite.

**Puissance mécanique**

**Type de protection**

**Puissance électrique**

**Vitesse de rotation nominale**

**Glissement**

**Classes d'isolation**

**Eléments du moteur électrique**

**Stator** Le stator est la partie fixe du moteur; la partie mobile est le rotor. L'induit  
**Rotor** représente l'ensemble des éléments destinés à produire le couple dans le  
**Induit** moteur. L'enroulement d'excitation produit le flux magnétique.

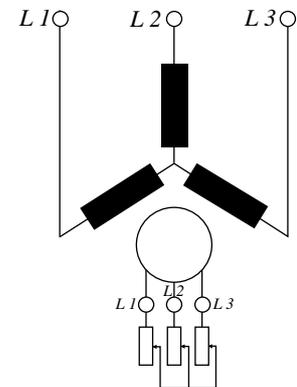
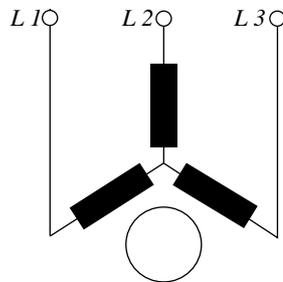
**Machine asynchrone triphasée** Le moteur asynchrone triphasé (appelé aussi moteur à induction) est le moteur électrique le plus utilisé.

Configurations :

**Moteur à cage d'écureuil**  
**Moteur à bagues**

Moteur à cage d'écureuil (rotor à barres en court-circuit)

Le moteur à bagues (à rotor bobiné) permet de réduire le courant rotorique, surtout au démarrage.



Dans les moteurs asynchrones, le rotor est en retard par rapport au champ magnétique du stator. Cette différence de vitesse de rotation est appelée glissement :

**Glissement**  $s = \frac{(n_s - n)}{n_c} \cdot 100 \text{ [%]}$  ou  $s = \frac{n}{n_c} \cdot 100 \text{ [%]}$

$n_s$ : vitesse de rotation synchrone  
 $n$ : vitesse de rotation en charge  
 $s = 2-5 \%$

**Courant rotorique** Un glissement plus élevé augmente la tension induite et par conséquent le courant de rotor. Le couple moteur augmente donc avec le glissement.

Les moteurs asynchrones ont, à la fréquence de réseau  $f$ , leur plage de fonctionnement nominal proche de la vitesse de rotation synchrone  $n$  :

**Vitesse de rotation synchrone**  $n = 60 \cdot (f/p) \text{ [1/min]}$

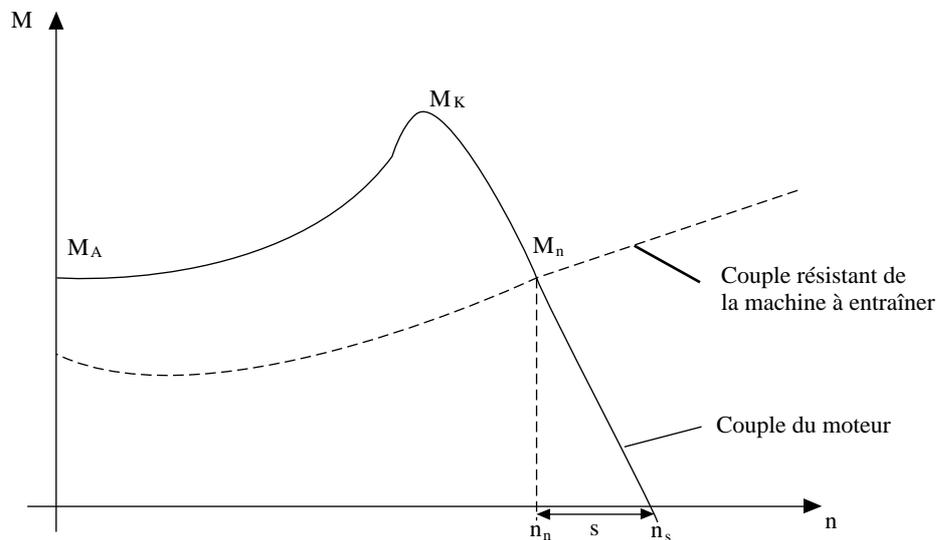
$p$ : nombre de paires de pôles  
 $f$ : fréquence du réseau [Hz]

Nombre de pôles	Vitesse de rotation synchrone pour une fréquence de 50 Hz [1/min]
2	3000
4	1500
6	1000
8	750
12	500

Le couple de rotation d'une machine à entraîner devrait toujours être plus petit que celui du moteur électrique (en particulier à vitesse de rotation nulle). Leur différence est une mesure de l'accélération à la montée en régime.

### Couple de rotation

### Courbes caractéristiques des couples

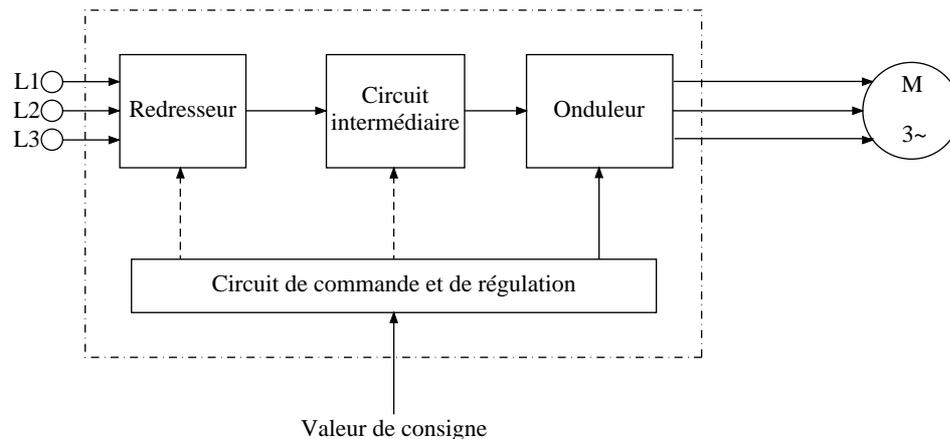


$M_k$  : couple de décrochage  
 $M_n$  : couple nominal  
 $M_A$  : couple de démarrage

$n_s$  : vitesse de rotation synchrone  
 $n_n$  : vitesse de rotation nominale  
 $s$  : glissement



### Schéma de principe d'un convertisseur de fréquences avec circuit intermédiaire



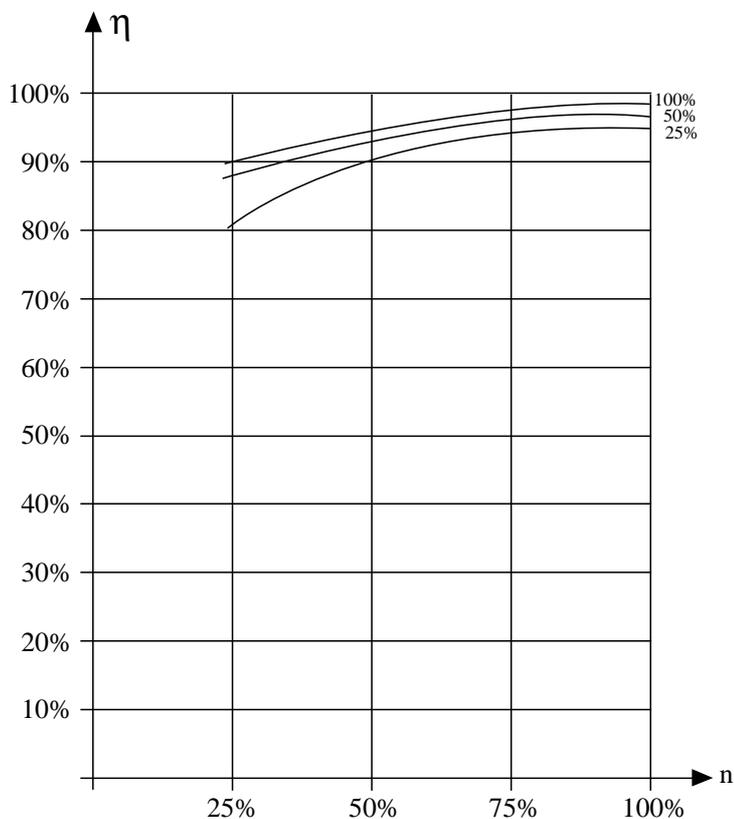
$$\eta_{\text{global}} = \eta_F \cdot \eta_M$$

### Rendement

$\eta_F$ : rendement du convertisseur de fréquence

$\eta_M$ : rendement du moteur (est un peu plus petit que sans convertisseur raccordé, à cause de la présence d'harmoniques)

### Rendement d'un convertisseur de fréquences en fonction de la vitesse de rotation avec une charge de 100, 50 et 25 %



$\eta$  rendement

n: vitesse de rotation du moteur

**Système d'entraînement**

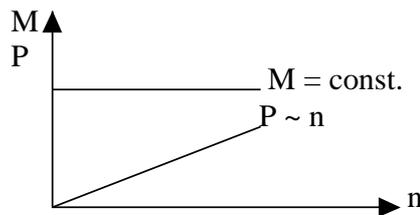
Le principe de base d'une conception énergétiquement efficace est le suivant : toujours analyser et optimiser le système complet, et pas seulement tel ou tel moteur électrique. Il y a lieu de respecter les priorités suivantes :

1. Ajuster la durée d'exploitation aux besoins (éviter la marche à vide).
2. Réduire l'appel de puissance (débit, pression, vitesse, vitesse de rotation, etc.) au strict nécessaire.
3. Améliorer le rendement des composants.
4. Améliorer le processus de production sur le plan énergétique.

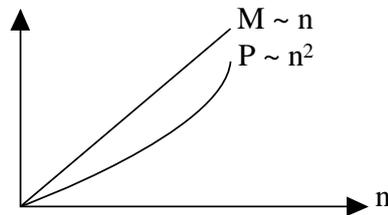
A chaque vitesse de rotation de rotation  $n$  [mir<sup>-1</sup>] correspond un couple  $M$  [Nm] donné à fournir. La puissance  $P$  est calculée de façon suivante :

**Puissance**  $P = 2\pi \cdot M \cdot n/60$  [W]

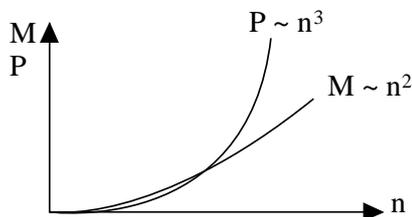
Chaque entraînement électrique doit entraîner une charge donnée (machine entraînée) avec un couple de charge  $M$  déterminé, fonction de la vitesse de rotation  $n$ . La plupart des entraînements peuvent être répartis en quatre types suivants d'utilisation :



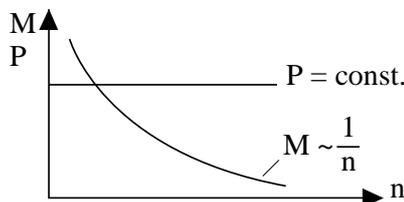
Transporteurs à courroies, engins de levage, grues, élévateurs, machines-outils



Freins à courant de Foucault



Pompes, ventilateurs, véhicules rapides, utilisations qui nécessitent de surmonter les résistances de l'air ou de liquides

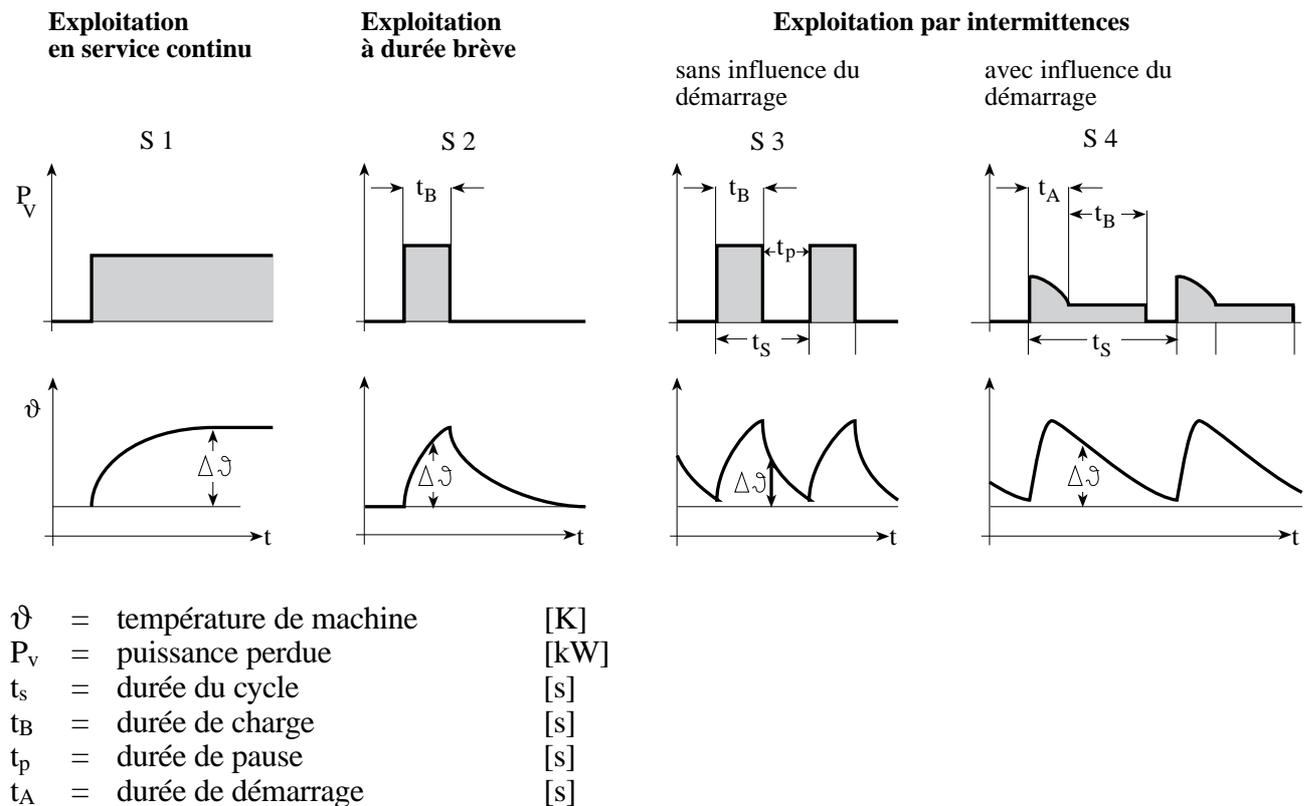


Tours ou bobineuses

Lors du choix d'un moteur électrique doit être pris en considération, à part la puissance et le couple, également le type d'exploitation. Un moteur s'échauffe moins à charge de courte durée qu'à charge continue, et peut donc être choisi de plus petite taille. Pour décrire le type de sollicitation ont été définies différentes classes d'exploitation :

### Types d'exploitation

- S1 = service continu
- S2 = service de courte durée
- S3, S4, S5 = service à charge intermittente
- S6 = service ininterrompu à charge intermittente



Durée d'enclenchement DE [%]:

$$DE = \frac{1}{T} \cdot 100$$

**Durée  
d'enclenchement**

Conversion de la puissance en surcharge tolérée (valeur indicative) lors de diverses formes d'exploitation :

$$P_1^2 \cdot ED_1 = P_2^2 \cdot ED_2$$

**Puissance  
de surcharge**

- Commande par groupe** Dans la commande par groupe, un moteur électrique actionne plusieurs machines de production à l'aide d'organes de transmission. Ce qui peut se révéler efficace, puisque le rendement d'un moteur augmente avec la puissance. Par contre les entraînements individuels présentent des avantages en fonctionnement à puissance variable.
- Engrenages** Pour un nombre de tours de la machine à entraîner inférieur à 500 min<sup>-1</sup>, des engrenages peuvent devenir nécessaires. Des engrenages à un seul étage atteignent des rendements d'environ 98 %.

### Rendement d'engrenages à plusieurs étages

Type de transmission	Rendement [%]	Remarque
Couplage direct	99	
Engrenages		
– droits	94 – 97	3 étages (1 à 2 % de pertes par étage)
– coniques	94 – 97	3 étages (1 à 2 % de pertes par étage)
– à vis sans fin	30 – 90	dépend de la démultiplication (240:1 – 9:1)
Courroies		
– trapézoïdales	88 – 93	
– synthétiques	81 – 85	
– caoutchouc	81 – 85	
– plates	97 – 99	
– crantées	97 – 99	
Chaînes	90 – 96	
Câble métallique	91 – 95	

## Pompes

Dans une pompe centrifuge, une roue en rotation provoque une augmentation de la pression de sortie et entraîne le fluide à circuler.

**Pompe centrifuge**

Dans les pompes volumétriques à piston, un piston en mouvement aspire un fluide puis le refoule.

**Pompe à piston**

Pour les circulateurs à rotor noyé, on utilise un moteur à gaine. Dans ce type spécial de moteur asynchrone, la gaine sépare mécaniquement le stator du rotor. La gaine et le fluide situés entre le stator et le rotor diminuent le rendement du moteur. Dans les plages de faibles puissances, les moteurs de pompes sont soit des moteurs asynchrones triphasés (3 x 400 V), soit des moteurs monophasés à condensateur (1 x 230 V).

**Circulateur à rotor noyé**  
**Moteur à gaine**

Pour les pompes à moteur ventilé, on utilise comme moteur d'entraînement des moteurs triphasés conventionnels. On utilise les pompes à moteur ventilé avant tout pour des puissances installées de plus de 200 W. Pour des puissances plus élevées, (pompes sur socle), le choix du moteur est indifférent.

**Pompe à moteur ventilé**

Les résistances hydrauliques déterminent la demande d'énergie des pompes. On peut diminuer les pertes en choisissant des diamètres de conduites suffisamment grands.

**Résistance hydraulique**

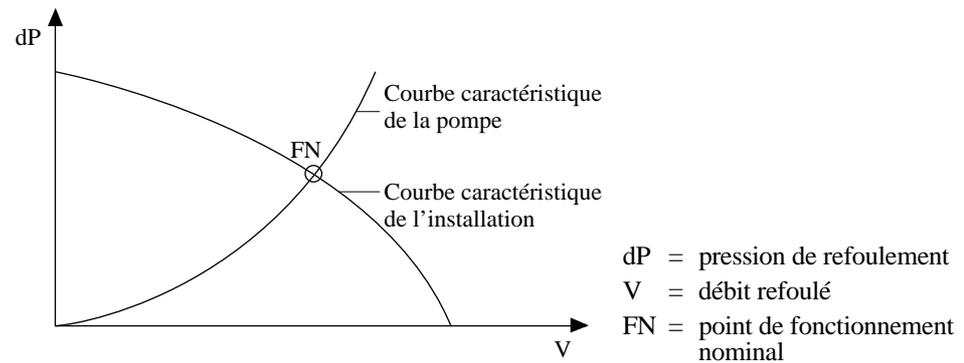
Pour choisir une pompe, il faut procéder comme suit : commencer par déterminer la courbe caractéristique du réseau de conduites de l'installation, avec ses grandeurs caractéristiques du pompage, telles que le débit et la hauteur de refoulement. Le point d'intersection entre la courbe caractéristique du réseau hydraulique et celle de la pompe à son rendement maximum détermine le point de fonctionnement nominal.

**Choix d'une pompe**

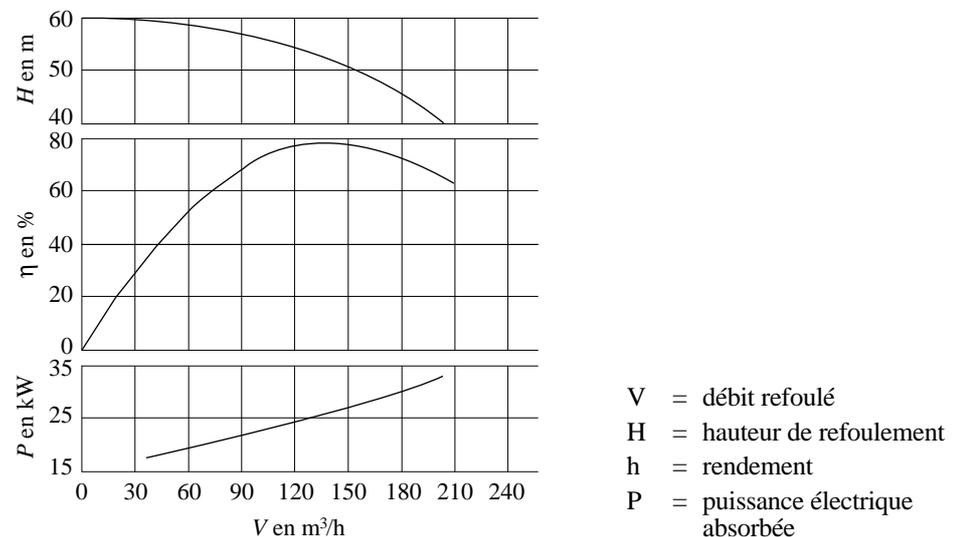
Informations supplémentaires :  
« Dimensionnement et exploitation optimale des circulateurs »,  
documentation RAVEL  
N° de com. 724.330 f,  
OCFIM, 3000 Berne

**Point de fonctionnement**

Point de fonctionnement = point d'intersection des courbes caractéristiques de l'installation et de la pompe.



Hauteur de refoulement H, rendement h et puissance absorbée électrique P d'une pompe à une vitesse de rotation de 1450 t/min.

**Rendement**

$$\text{Rendement } \eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance électrique absorbée}}$$

puissance utile = hauteur de refoulement · débit refoulé

**Système en circuit fermé**

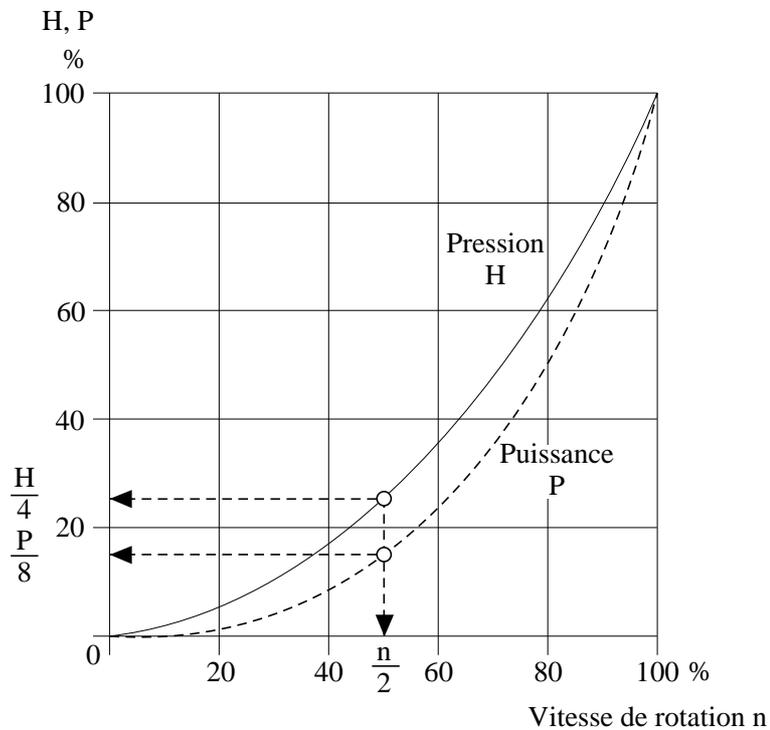
Dans des systèmes en circuit fermé :

- Le débit varie proportionnellement à la vitesse de rotation.
- La pression de refoulement varie avec le carré de la vitesse de rotation.
- La puissance électrique absorbée varie avec le cube de la vitesse de rotation.

**Exemple :**

Lorsqu'on double le débit, la puissance d'entraînement devient huit fois plus grande.

**Valeur de la hauteur de refoulement  $H$  et de la puissance d'entraînement  $P$  en fonction de la vitesse de rotation  $n$  pour une pompe centrifuge**



Source:  
Bull. SEV/VSE 4/1987

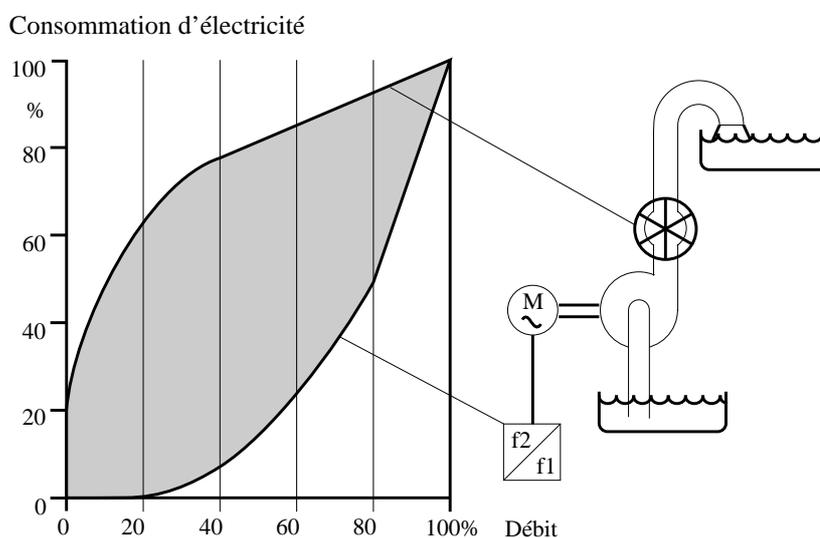
Le débit peut être contrôlé de différentes façons :

- par un clapet d'étranglement
- par une dérivation sur la pompe au moyen d'un « by-pass »
- par un réglage à aubes mobiles
- par un réglage de la vitesse de rotation de l'entraînement

**Débit**

Exemple :

Consommation de courant d'une pompe centrifuge en fonction du débit, avec régulation du débit par étranglement (courbe supérieure) et par vitesse de rotation variable (courbe inférieure).

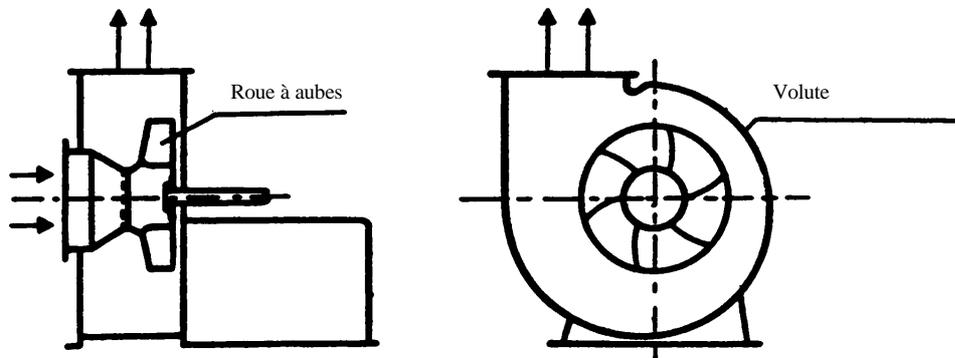


Source:  
«L'Electricité à bon escient»,  
Manuel RAVEL, Office fédéral  
des questions conjoncturelles

## Ventilateurs

Le ventilateur radial aspire l'air axialement et le refoule radialement. Le dispositif de guidage est le boîtier en forme de spirale.

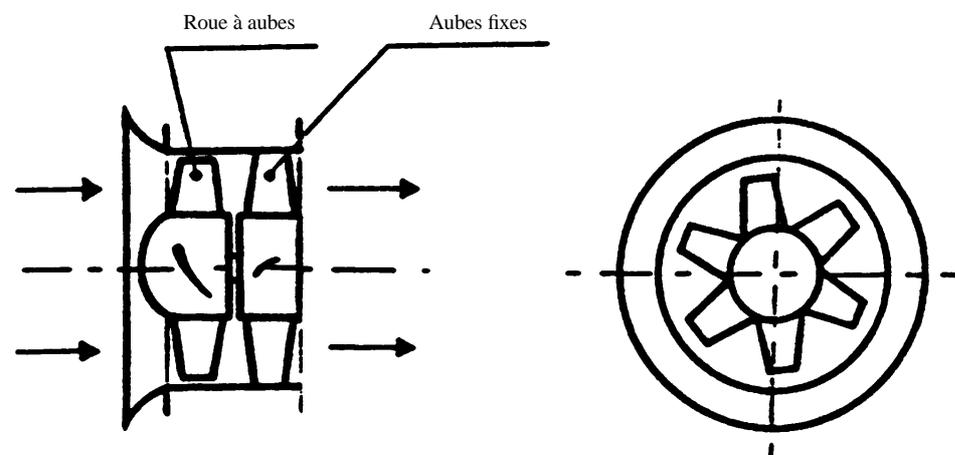
### Ventilateur radial



Source et informations supplémentaires :  
Lüftungstechnik – Aktuelles Wissen aus Theorie und Praxis

Le ventilateur axial aspire l'air axialement et le refoule axialement. Dans les ventilateurs d'exécution soignée et plus puissants, le tourbillonnement de l'air à la sortie du rotor est supprimé par un stator muni d'aubes.

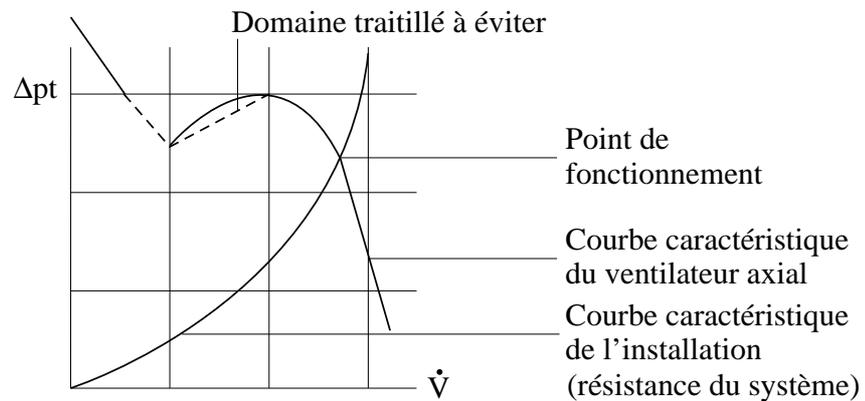
### Ventilateur axial



La puissance du ventilateur est déterminée par le débit d'air ou de gaz et par la différence de pression.

### Puissance du ventilateur

### Caractéristique pression – débit – volume

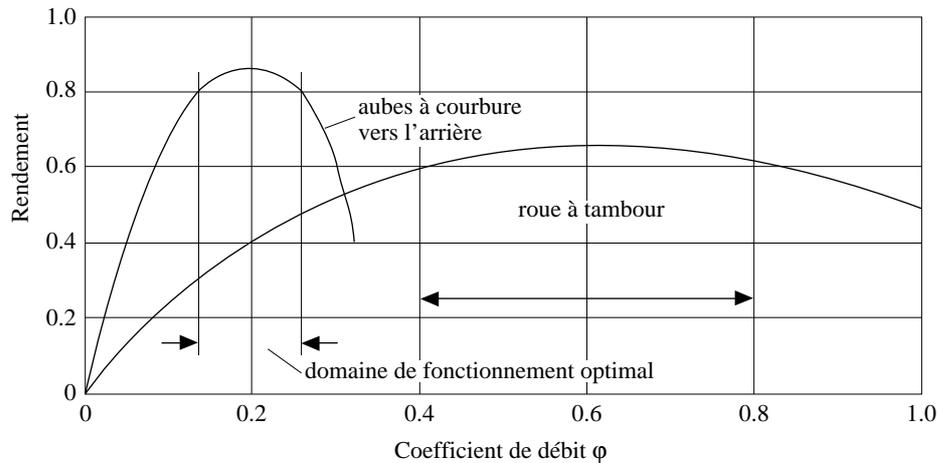


$\dot{V}$ : quantité de gaz transportée par unité de temps

$\Delta p_t$ : différence de pression

**Section du canal** Pour un débit donné, l'influence de la section de conduite sur les pertes de charge est surproportionnelle, et encore plus forte sur la puissance d'entraînement nécessaire; par exemple, une augmentation de 10% du diamètre entraîne une réduction de 38% des pertes de charge et ainsi une réduction de plus de 60% de la puissance d'entraînement.

## Variation du rendement d'un ventilateur radial



$$\varphi = \frac{\dot{V}}{S \cdot v}$$

Coefficient de débit

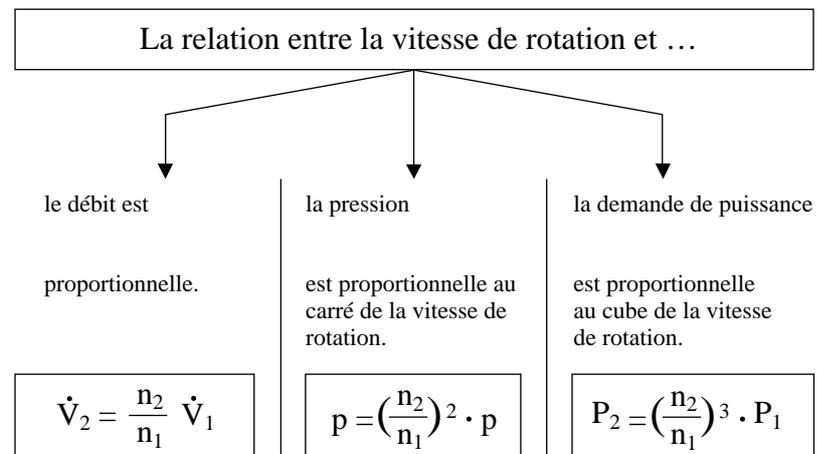
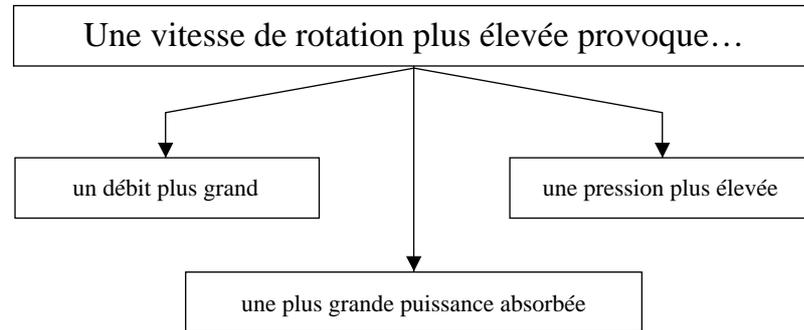
- $\varphi$  : coefficient de débit  
 $\dot{V}$  : débit [m<sup>3</sup>/s]  
 $S$  : surface définie par le diamètre extérieur de l'aubage [m<sup>2</sup>]  
 $v$  : vitesse périphérique de l'aubage [m/s]

Pour assurer une exploitation optimale du point de vue de l'énergie, il faut veiller aux points suivants (classés par ordre de priorité) :

1. Ajuster la durée de fonctionnement à la durée d'utilisation effective.
2. Réduire le débit d'air.
3. Réduire les pertes de charge dans les gaines de ventilation.
4. Maximiser le rendement des composants.

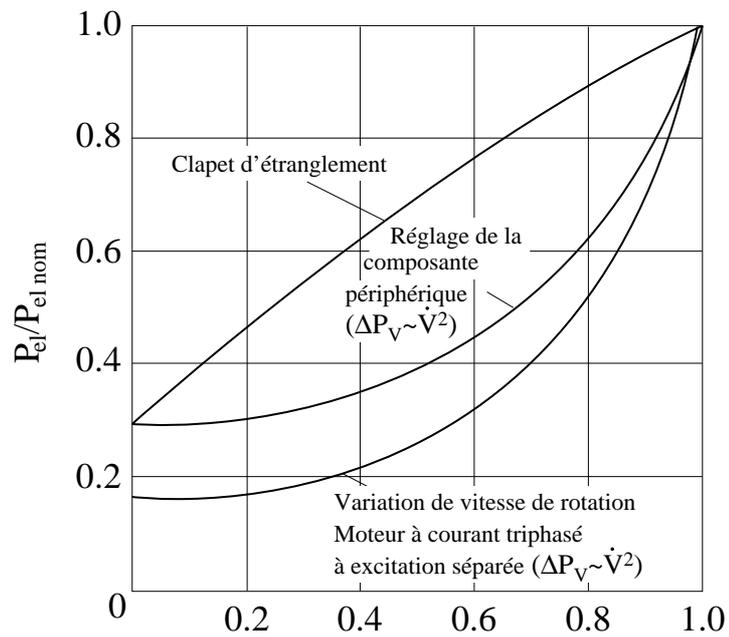
**Exploitation  
énergétiquement  
optimale**

### Valeur du débit, de la pression et de la puissance électrique absorbée en fonction de la vitesse de rotation



Le débit peut être contrôlé de différentes manières :

- au moyen d'une vanne d'étranglement
- par une modification de la composante périphérique du ventilateur (réglage des aubes)
- en variant la vitesse de rotation du ventilateur

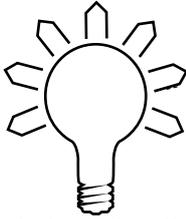
**Puissance électrique absorbée pour différents modes de contrôle du débit**

Informations supplémentaires :  
«Energie – effiziente lüftungstechnische Anlagen in der Haustechnik»,  
documentation RAVEL,  
N° de com. 724.307 d,  
référence. : OCFIM, 3000 Berne

## Eclairage

### Notions de base :

### Flux lumineux Luminance



Quantité globale de lumière émise par une source lumineuse  
[lumen]  
[lm]

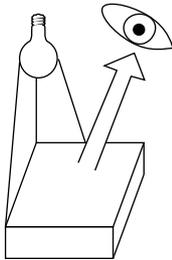


Rayonnement lumineux dans une direction déterminée  
[candela]  
[cd]

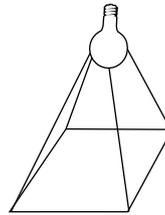
Intensité lumineuse ( $\phi_{sr}$ ; sr = stéradian [unité de mesure d'angle solide])

Eclairement (E)

### Intensité lumineuse Eclairement



Intensité lumineuse réfléchiée par une surface donnée  
[candela/m<sup>2</sup>]  
[cd/m<sup>2</sup>]

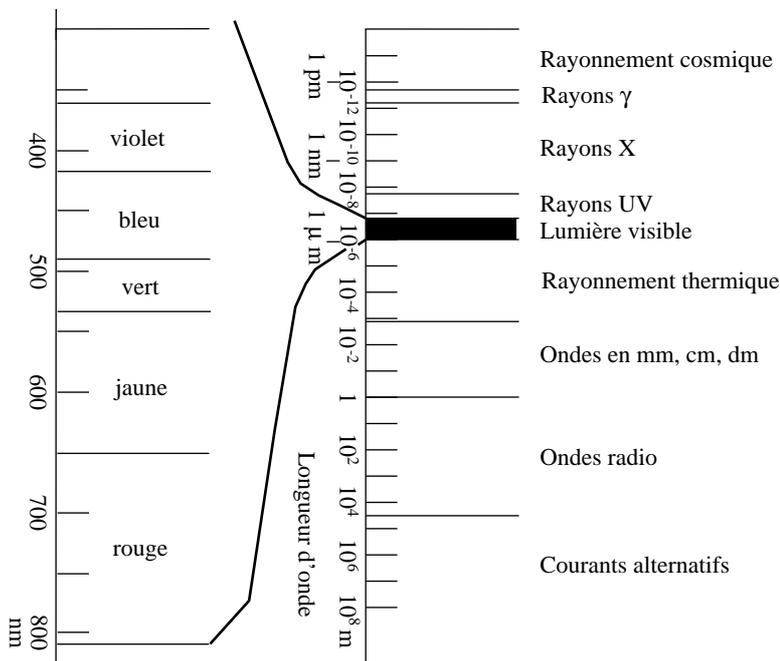


Flux de lumière tombant sur une surface éclairée  
[lux = lumen/m<sup>2</sup>]  
[lx]

L'efficacité lumineuse représente la puissance d'une source de lumière par rapport à la puissance électrique absorbée [lm/W].

### Rendement lumineux

### Longueurs d'ondes et couleurs de lumière



**Intensité lumineuse nominale pour divers types d'activités**

Type de local / genre d'activité	Intensité lumineuse nominale [lx]	Couleur de la lumière	Propriétés de rendu des couleurs : degrés	Classe de qualité de la limitation de l'éblouissement
<b>Couloirs de circulation dans les bâtiments</b>				
pour personnes	50		3	3
pour personnes et véhicules	100		3	3
escaliers, escaliers mécaniques, rampes de chargement	100	bc, bn	3	2
transporteurs autom., tapis roulants, dans la zone de circulation	100		3	3
<b>Bureaux avec places de travail</b>				
seulement à proximité immédiate des fenêtres	300		2	1
locaux de bureaux	500		2	1
bureaux - jardins – réflexion élevée	750		2	1
– réflexion moyenne	1000		2	1
dessin technique	750	bc, bn	2	1
salles de séances et conférences	300		2	1
locaux informatiques	500		2	1
espaces de circulation du public	200		2	1
<b>Industrie chimique, du plastique et du caoutchouc</b>				
installations de production avec commande à distance	50		3	3
installations de production avec interventions manuelles occasionnelles	100		3	3
places de travail occupées en permanence dans les installations de production	200	bc, bn	3	3
cabines de mesures, pupitres de commande, laboratoires	300		2	1
travaux exigeants pour la vue	500		2	1
contrôle des couleurs	1000	bn, bl	1	1
<b>Sidérurgie, aciérie, laminoirs, fonderies de grosses pièces</b>				
installations de production sans intervention manuelle	50		3	3
installations de production avec interventions manuelles occasionnelles	100		3	3
places de travail occupées en permanence dans des installations de production	200		3	3
places d'examen et de contrôle	500	bc, bn, bl	2	1
<b>Travail et usinage du métal</b>				
forgeage libre de petites pièces	200		3	2
travaux plus ou moins fins sur machines : tournage, fraisage, rabotage (tolérance > 0,1 mm)	300		3	2
soudure				
travaux fins sur machine (tolérance < 0,1 mm)	500	bc, bn	3	1
postes de traçage et de contrôle, postes de mesure	750		3	1
trains de laminage à froid	200		3	3
tréfileries, étrépages de tubes, fabrication de profils de feuillards laminés à froid	300		3	2
façonnage de tôles lourdes (> 5 mm)	200		3	2
façonnage de tôles légères (< 5 mm)	300		3	2

Type de local et genre d'activité	Intensité lumineuse nominale [lx]	Couleur de la lumière	Propriété de rendu des couleurs : degrés	Classe de qualité de la limitation de l'éblouissement
production d'outils et de matériel de coutellerie	500		3	1
montage grossier	200		3	2
montage moyennement fin	300		3	1
montage fin	500		3	1
préparation du sable	200	bc, bn	3	1
atelier d'ébarbage, au cubilot, au mélangeur, halles de coulée, postes de vidange, moulage mécanique	200		3	2
moulage manuel, noyautage	300		3	2
fabrication de modèles	500		3	1
galvanisation	300		3	2
masticage, peinture, laquage	300		3	1
fabrication d'outillage, de calibres et de gabarits, mécanique fine, montage très fin	1000		3	1
construction grossière de carrosserie travail de la surface	500	bc, bn, bl	3	2
cabine de laquage au pistolet	750		3	-
places de polissage après laquage	750		3	1
retouchage du laquage	1000		3	1
inspection	750		3	1

## Abréviations :

bc : blanc chaud

bn : blanc neutre

bl : blanc lumière du jour

Source :

Elektrotechnik Nr. 12-1987

**Propriétés de rendu des couleurs d'une source de lumière**

La norme DIN 5035 définit quatre classes de qualité de limitation d'éblouissement :

Classe A	très hautes exigences
Classe 1	hautes exigences
Classe 2	exigences moyennes
Classe 3	faibles exigences

Les propriétés de rendu des couleurs d'une source lumineuse doivent indiquer si la couleur d'un corps éclairé par cette source apparaît correctement à un observateur. Les propriétés sont réparties en diverses classes : plus le rang de la classe est élevé, plus les différences de couleurs par éclairage avec la source étudiée sont fortes.

Des informations supplémentaires sur la définition de l'éblouissement et du rendu des couleurs se trouvent dans le « Handbuch für Beleuchtung ».

**Limitation d'éblouissement****Couleur d'un corps**

Informations supplémentaires :  
« Handbuch für Beleuchtung »  
de la SLG  
Association suisse de l'éclairage,  
Postgasse 17, 3011 Berne,  
tél. : 031/312 22 51,  
fax : 031/312 12 50

Documentation RAVEL  
« Beleuchtung »

### Caractéristiques des lampes d'éclairage industriel et artisanal

Propriétés	Halogène à incandescence	Fluorescente	Fluorescente compacte	Luminescente à vapeur de mercure à haute pression	A vapeur d'halogénure métallique	A vapeur de sodium à basse pression	A vapeur de sodium à haute pression
Flux lumineux [lm]	10 000 à 45 000	150 à 5000	400 à 2900	2000 à 130 000	30 000 à 190 000	4650 à 32 000	10 000 à 130 000
Rendement lumineux [lm/W]							
(y compris ballast)	22	40 à 100	40 à 80	34 à 63	75 à 95	85 à 145	80 à 130
Puissances [W]	500 à 2000	18 à 58	7 à 36	50 à 2000	400 à 2000	18 à 180	100 à 1000
Couleurs de la lumière	bc	bc, bn, bl	bc, bn, bl	bn, bl	bl	bc	bc
Classe de rendu des couleurs	1	1, 2, 3	1	4, 4	1, 2	4	4
Durée de vie utile [h]	1000 à 2000	7500	6000	6000	2000 à 6000	6000	6000
Ballast	aucun	ballast inductif BE	ballast inductif BE	ballast inductif	ballast inductif	transformateur à fuites magnétiques	ballast inductif
Dispositif d'amorçage	aucun	démarrreur	démarrreur	aucun	amorçeur	aucun	amorçeur
Durée d'amorçage [min]	aucune	aucune	<1	3	3	10	5
Temps de réamorçage [min]	immédiat	immédiat	immédiat	5	10	2	<1

Source:  
Elektrotechnik N° 12-1987

Informations supplémentaires:  
«Handbuch für Beleuchtung»  
de la SLG  
Association suisse de  
l'éclairage,  
Postgasse 17, 3011 Berne,  
tél.: 031/312 22 51  
fax: 031/312 12 50

Documentation RAVEL  
«Beleuchtung»

#### Abréviations:

bc: blanc chaud

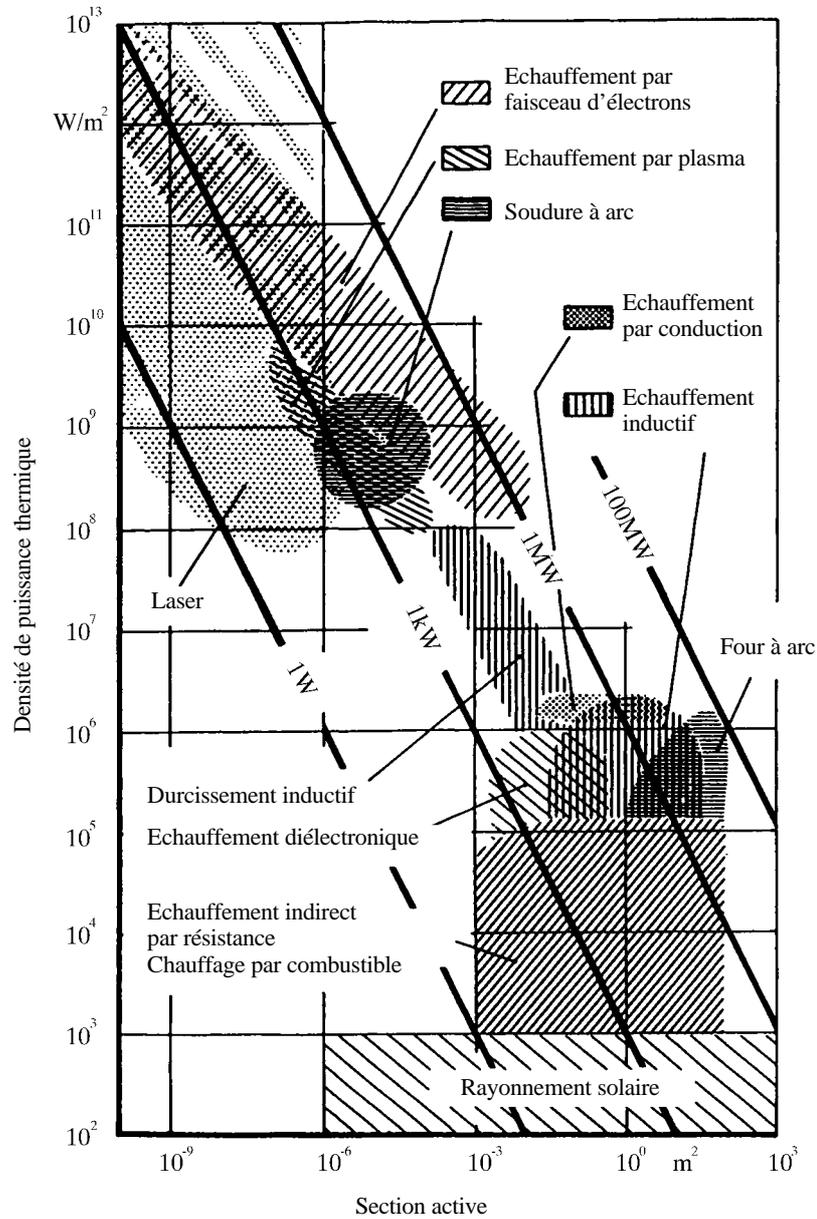
bn: blanc neutre

bl: blanc lumière du jour

BE: ballast électronique des luminaires

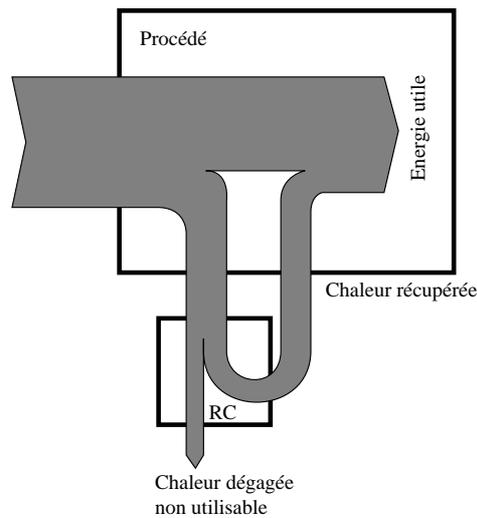
## Chaleur de production

### Densité de puissance thermique et section active de divers types d'échauffements



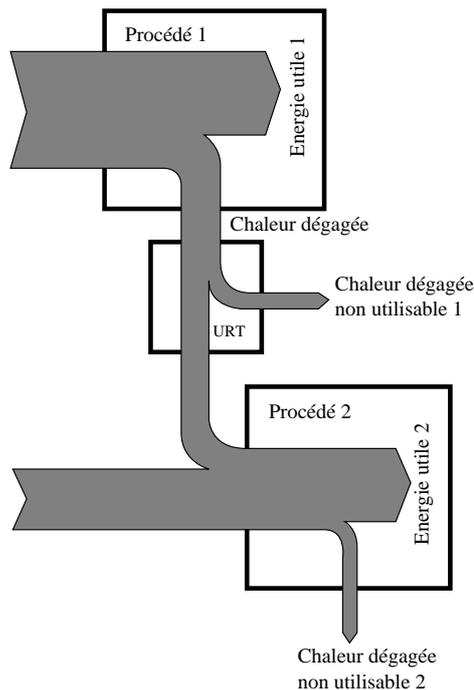
Source: RWE

## Utilisation de rejets thermiques et récupération de chaleur



Avec la récupération de chaleur (RC), la chaleur produite en excédent par un procédé ou une installation est réutilisée dans le même processus ou la même installation, sans décalage dans le temps. De cette façon, on obtient un rendement de l'installation plus élevé. L'idéal en cette occurrence serait que la quantité de chaleur produite et le moment où elle est produite correspondent en gros.

### Récupération de chaleur RC



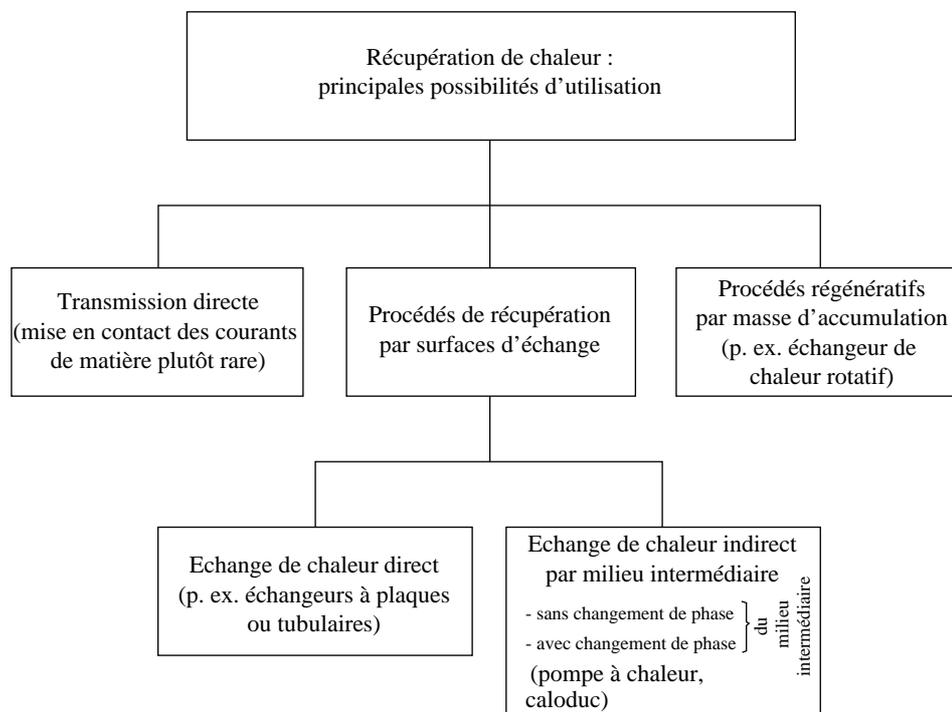
On parle d'utilisation des rejets thermiques (URT), quand la chaleur produite en excédent par un procédé ou une installation est réutilisée dans un autre procédé ou installation, simultanément ou avec retard. De cette façon on n'améliore pas le taux d'utilisation de l'installation considérée, mais on optimise l'utilisation d'énergie de l'ensemble des installations liées entre elles. L'utilisation de rejets thermiques requiert que l'offre de chaleur et la demande externe se recouvrent dans le temps, ou en cas de demande différée, que ces décalages soient compensés par un accumulateur thermique. Il faut également considérer que la source de chaleur doit être disponible pendant toute la durée de la demande de chaleur, afin que les investissements soient profitables.

### Utilisation des rejets thermiques URT

Pour l'utilisation des rejets thermiques, certains critères doivent être observés :

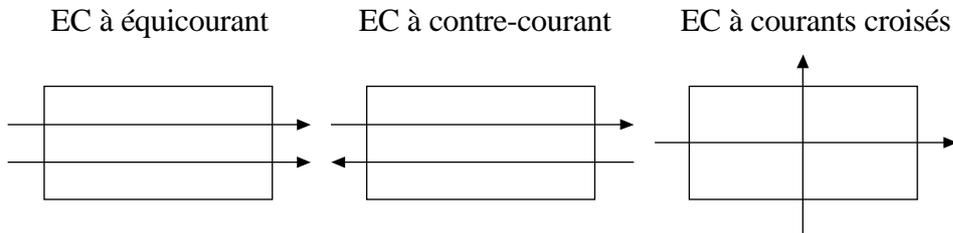
- |                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Température</b>                    | 1. Niveau de température<br>plus de 400 °C pour la production de courant électrique<br>plus de 100 °C pour certains procédés de production<br>plus de 60 °C pour l'eau chaude<br>plus de 40 - 55 °C pour le chauffage à basse température<br>plus de 25 °C pour le chauffage à air<br>plus de 10 - 15 °C pour l'utilisation par des pompes à chaleur |
| <b>Offre – Demande</b>                | 2. Concordance entre l'offre et la demande sur le plan temporel et quantitatif.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Impuretés</b>                      | 3. Impuretés ; air pollué par poussière, fibres, odeurs, vapeurs ; liquides corrosifs.                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Consommateur</b>                   | 4. Présence d'un consommateur adéquat dans la propre entreprise ou dans les environs immédiats (par exemple chauffage à distance pour un quartier d'habitations).                                                                                                                                                                                    |
| <b>Durée de vie de l'installation</b> | 5. Correspondance des durées des installations en présence.                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

### Procédés de récupération de chaleur



Un échangeur de chaleur (EC) sert à transférer de la chaleur d'un milieu dans un autre, sans qu'ils n'entrent en contact direct. En général le flux de chaleur est transféré à travers une paroi de séparation. Suivant la direction des flux des deux milieux, on distingue :

**Echangeur de chaleur EC**



**EC à éqicourant  
EC à contre-courant  
EC à courants croisés**

Formes typiques d'échangeurs de chaleur (en fonction de l'état des deux milieux):

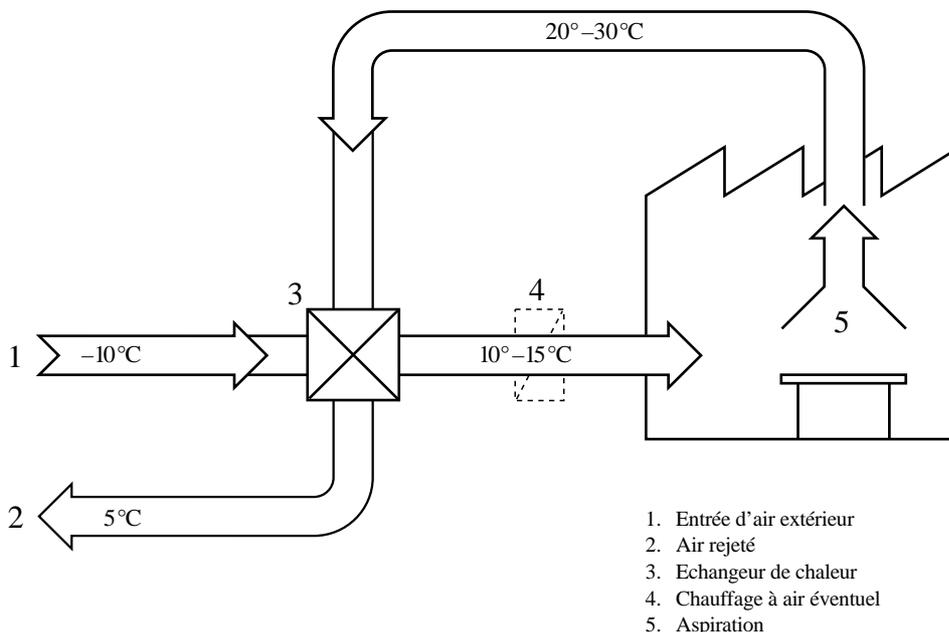
**Types d'EC**

- liquide/liquide
  - EC à plaques
  - EC à calandre
  - EC à double tube
- gaz/gaz
  - EC à plaques
  - EC à tube de verre
  - Caloduc
  - EC rotatif
- gaz/liquide
  - EC à lamelles

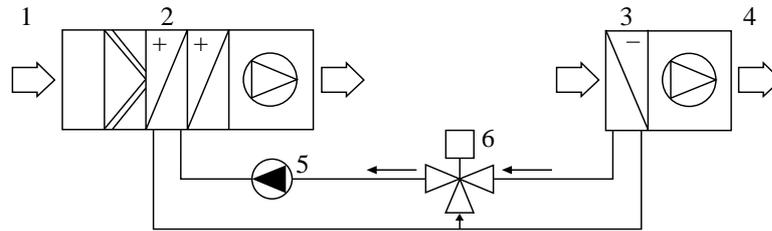
Dans un procédé de l'échange de chaleur à récupération, la chaleur est transférée d'un flux d'air à un autre au travers de parois d'échange fixes.

**Echange de chaleur à récupération**

- Echange de chaleur direct assuré par une surface d'échange



- Echange de chaleur indirect assuré par un milieu intermédiaire (sans changement de phase)

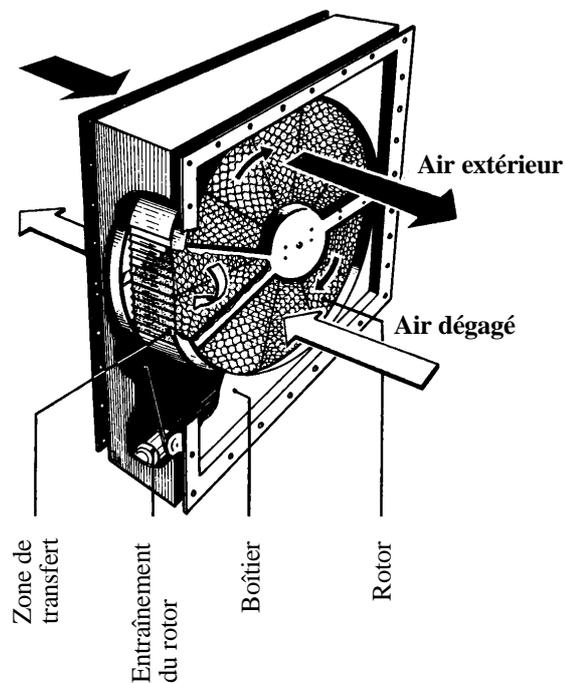


- |                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| 1 Air extérieur | 5 Pompe de circulation |
| 2 Préchauffeur  | 2 Eau, glycol          |
| 3 Refroidisseur | 6 Vanne de réglage     |
| 4 Air rejeté    |                        |

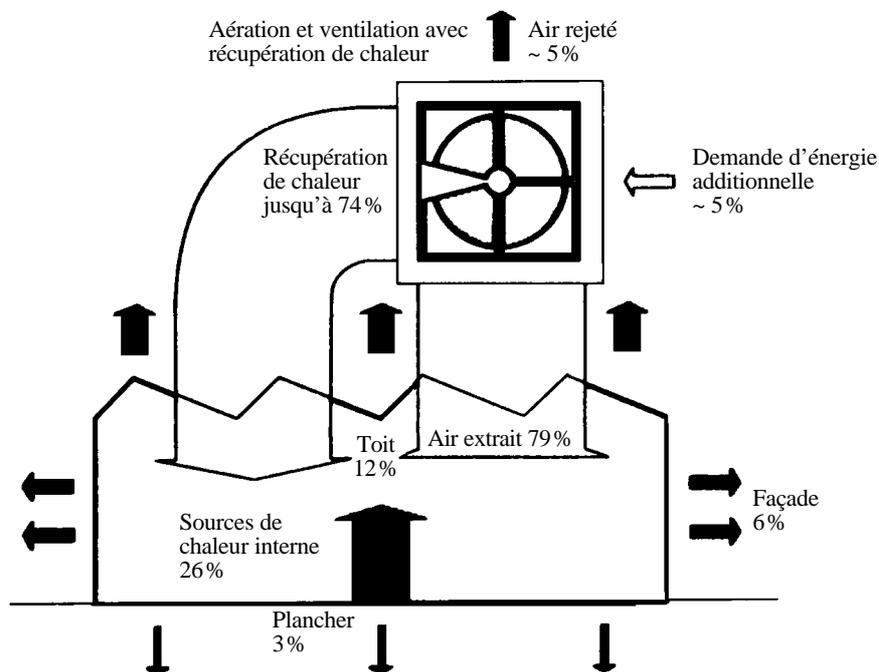
- Echange de chaleur indirect assuré par un milieu intermédiaire (avec changement de phase) : par exemple une pompe à chaleur au lieu d'une tour de refroidissement pour la production d'eau glacée (utilisation de chaleur récupérée et disponible à un certain niveau de température pour le préchauffage de matière dans un procédé ou pour le chauffage des locaux).

### RC par régénération

Dans un procédé RC par régénération, la chaleur est transférée d'un flux d'air à un autre par une matière accumulatrice qui, en plus de la chaleur, peut aussi transférer l'humidité.



### Flux d'énergie dans une installation de récupération de chaleur pour la ventilation d'une halle industrielle



Source :

Elektrowärme international,  
50 (déc. 1992)

Informations supplémentaires :  
Série de publications «RAVEL  
im Wärmesektor»,  
cahier 1 :  
Elektrizität und Wärme –  
Grundlagen und  
Zusammenhänge  
(N° de commande : 724.357 d);  
cahier 2 :  
Wärmerückgewinnung und  
Abwärmenutzung  
(N° de commande : 724.355 d);  
cahier 3 :  
Wärmepumpen  
(N° de commande : 724.356 d);  
cahier 4 :  
Wärme kraftkopplung  
(N° de commande : 724.358 d)

Commande : OCFIM, 3000 Berne

# **5 Environnement**

## **5.1 Polluants**

## **5.2 Combustion d'agents énergétiques fossiles**

## **5.3 Bruit**

## **5.4 Législation suisse sur la protection de l'environnement**

## 5 Environnement

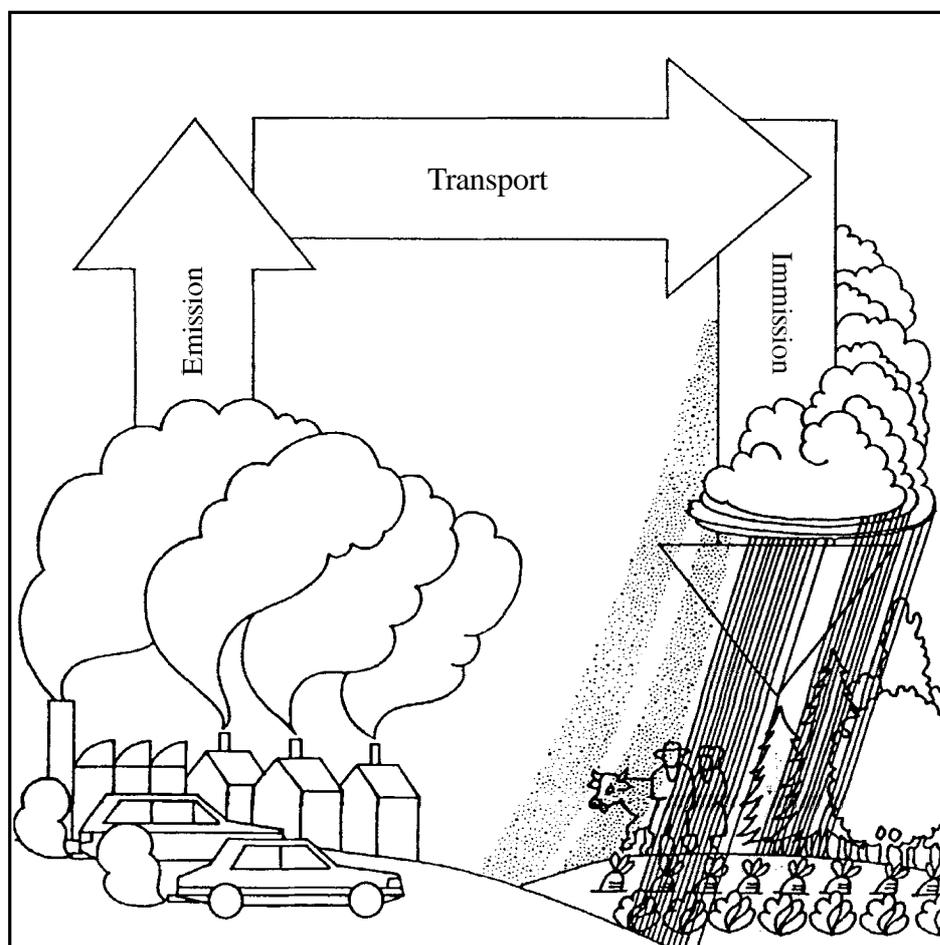
### 5.1 Polluants

Par émissions on désigne le rejet de substances et d'énergies d'une source vers l'environnement. Exemples d'émissions : bruit, vibrations, rayonnements, gaz de combustion, poussière, chaleur, déchets. Pour les mesurer, on recourt à des grandeurs caractéristiques, à des facteurs et degrés d'émission. Une d'entre elles est par exemple la concentration, qui correspond à la quantité de substances émises par rapport au volume de gaz dégagé (en  $\text{mg}/\text{m}^3$  par exemple). Le facteur d'émission exprime le rapport quantitatif entre les substances émises et les produits fabriqués ou transformés (en  $\text{kg}/\text{t}$  par exemple). Le degré d'émission représente le rapport entre la masse émise d'un polluant et la masse de cette substance introduite initialement avec le combustible dans l'installation (en %).

#### Emissions

Les immissions apparaissent sous forme de substances et d'énergies en un lieu donné et exercent leurs effets sur les conditions environnementales de l'homme, de l'animal, des plantes et des matériaux. Tels sont par exemple le bruit, les vibrations, le rayonnement, la chaleur, les polluants, la poussière.

#### Immissions



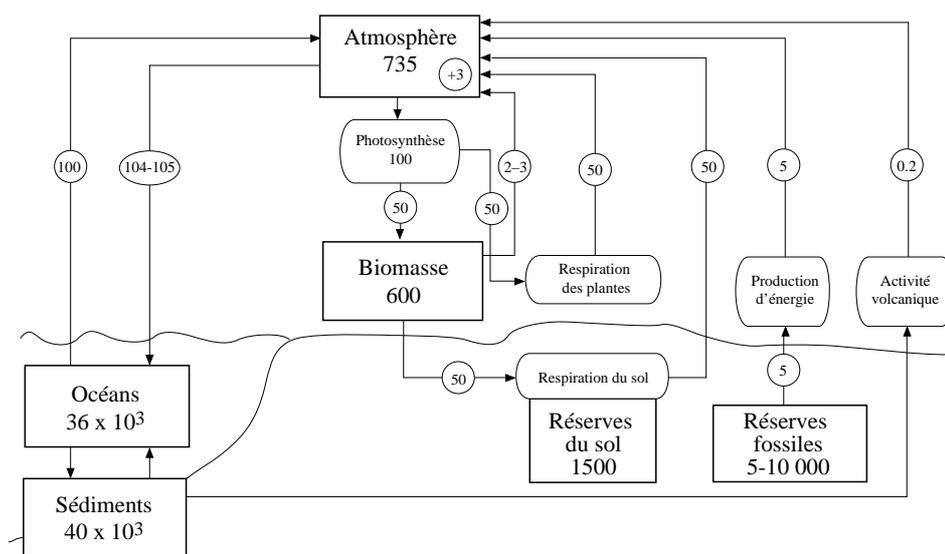
Source :  
Umweltbericht  
des Kantons Zürich

**Dioxyde de soufre**  
**SO<sub>2</sub>** Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) apparaît principalement lors de la combustion de combustibles fossiles contenant du soufre, en particulier le charbon et le fioul. Le dioxyde de soufre est un gaz incolore et fortement odorant, et qui, à haute concentration, peut provoquer des problèmes respiratoires. Le SO<sub>2</sub> est responsable, en liaison avec l'humidité de l'air, des pluies acides.

**Monoxyde de carbone**  
**CO** Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz inodore, incolore et toxique. Une grande partie du CO présent dans l'atmosphère provient de la combustion incomplète de matières carbonées.

**Dioxyde de carbone**  
**CO<sub>2</sub>** Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est un gaz non toxique, incolore, non combustible, d'odeur légèrement acide. Il se forme partout où du charbon et des substances carbonées (par exemple pétrole, gaz naturel) sont chauffés ou brûlés. Par sa capacité à absorber les rayons infrarouges de la lumière solaire, il joue un rôle de premier plan dans l'équilibre de la température terrestre et, entre autres, dans l'effet de serre.

Cycle du carbone (données en milliards de tonnes de carbone):



### Emissions de CO<sub>2</sub> par les agents énergétiques fossiles

Combustible/agent énergétique	kg CO <sub>2</sub> /GJ
Houille de la Ruhr	93
Lignite	110
Pétrole brut	75
Essence pour moteurs	72
Essence pour avions	72
Diesel	74
Mazout léger	74
Mazout lourd	79
Gaz liquide	66
Gaz naturel	56

Les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) se dégagent lors de combustions, surtout à hautes températures, et lors de certains procédés chimiques comme la production d'acide nitrique. Les  $\text{NO}_x$  (monoxyde, dioxyde) se forment par oxydation de l'azote atmosphérique et, en partie, par transformation de l'azote éventuellement présent dans les combustibles. Les oxydes ainsi libérés influencent les réactions photochimiques dans l'atmosphère et contribuent également à la formation des pluies acides. De plus ces gaz ont des effets sur la santé par le fait qu'ils irritent les muqueuses et les voies respiratoires et provoquent des allergies.

**Oxyde d'azote**  
 **$\text{NO}_x$**

Les composés organiques volatils (en anglais: volatile organic compounds, VOC) sont des composés d'hydrocarbures. Les VOC proviennent de solvants, colorants, laques, colles, produits de nettoyage, fluides frigorigènes, transbordements de combustibles et carburants, etc. Sous l'action du rayonnement solaire, ces hydrocarbures produisent avec les oxydes d'azote de l'ozone.

**Composés organiques volatils**  
**Hydrocarbures**  
**HC**  
**VOC**

Les hydrocarbures halogénés (CFC) sont diverses combinaisons d'hydrocarbures, dans lesquels l'hydrogène est remplacé, totalement ou en partie, par des halogènes (fluor, chlore, etc.). On les utilise comme gaz propulseurs, fluides frigorigènes, solvants. Les CFC contribuent à modifier la couche d'ozone de la stratosphère, rendant possible un accroissement du rayonnement UV nocif à la surface de la terre. Les CFC contribuent en outre de manière importante à l'effet de serre.

**Hydrocarbures halogénés**  
**CFC**

L'ozone ( $\text{O}_3$ ) est une liaison sous forme gazeuse d'oxygène sous forme atomique et moléculaire. Dans de l'air pollué par des oxydes d'azote et des hydrocarbures, il peut y avoir, par fort ensoleillement, formation de concentrations élevées d'ozone (smog d'été). L'ozone peut avoir des effets très nocifs sur les plantes et sur la santé des êtres vivants.

**Ozone**  
 **$\text{O}_3$**

La concentration naturelle d'ozone dans les hautes couches atmosphériques (20 à 30 km) est élevée et protège la vie terrestre des dangereux rayons UV. Cette couche d'ozone est affaiblie par les CFC (le chlore issu d'hydrocarbures halogénés détruit l'ozone).

**Trou dans la couche d'ozone**

### Potentiel d'effet de serre de divers gaz

L'incidence est indiquée par rapport à celle du  $\text{CO}_2$  et sur trois périodes: les calculs sont effectués sur la base des poids des corps en présence.

Exemple: une tonne de  $\text{CH}_4$  émise a la même action que 63 tonnes de  $\text{CO}_2$ .

Gaz à effet de serre	Horizon temporal		
	20 ans	100 ans	500 ans
Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )	1	1	1
Gaz naturel ( $\text{CH}_4$ )	63	21	9
Gaz hilarant ( $\text{N}_2\text{O}$ )	270	290	190
Frigorigène (R11)	4500	3500	1500
Frigorigène (R12)	7100	7300	4500
Frigorigène (R22)	4100	1500	510

### **Charge de l'air en polluants aux postes de travail**

Les valeurs limites d'exposition aux postes de travail (VME = valeur moyenne d'exposition) représentent la concentration moyenne la plus élevée d'une substance sous forme de gaz, vapeur ou autre à la place de travail. Cette limite est définie comme une concentration n'ayant aucun effet négatif sur la santé lors d'exposition journalière et continue pendant huit heures de l'organisme humain. Les valeurs sont une partie des prescriptions présentées sous forme de liste de la CNA et dans le formulaire 1903.f de la CNA.

Référence:  
CNA, Lucerne,  
N° de commande 1903.f

## 5.2 Combustion d'agents énergétiques fossiles

Lorsque la combustion est stœchiométrique, la concentration d'oxygène dans les gaz dégagés est nulle (0%, alors qu'elle est de 21% dans l'air). La quantité de gaz dégagés pour différents combustibles est la suivante :

### Combustion stœchiométrique

Combustible	Gaz de combustion sec dégagé ( $V_{\text{stœ}}$ ) lors de la combustion stœchiométrique en m <sup>3</sup> de gaz normaux par unité de contenu énergétique	
Gaz naturel	8,05 Nm <sup>3</sup>	de gaz dégagé/Nm <sup>3</sup> de gaz naturel
Mazout léger, diesel	10,20 Nm <sup>3</sup>	de gaz dégagé/kg de mazout léger
Mazout lourd	10,10 Nm <sup>3</sup>	de gaz dégagé/kg de mazout lourd
Lignite	6,00 Nm <sup>3</sup>	de gaz dégagé/kg de lignite
Bois séché à l'air	4,80 Nm <sup>3</sup>	de gaz dégagé/kg de bois

Dans la pratique on doit toujours, lors d'une combustion, introduire plus d'oxygène qu'il n'en faut théoriquement.

On calcule le volume de gaz dégagé  $V$  par unité d'énergie de la manière suivante :

### Volume de gaz dégagé

$$V = V_{\text{stœ}} \cdot \lambda$$

$\lambda$  : coefficient d'air

$$\lambda = 21\% / (21\% - C_o)$$

$C_o$  = concentration d'oxygène dans les gaz dégagés en % (% volume)

#### Exemple :

Combustion de mazout	$\lambda = 1,1 - 1,3$
de bois	$\lambda = 1,5 - 2,0$

Lors de la combustion de combustibles fossiles, on trouve les éléments suivants :

### Combustion de combustibles fossiles

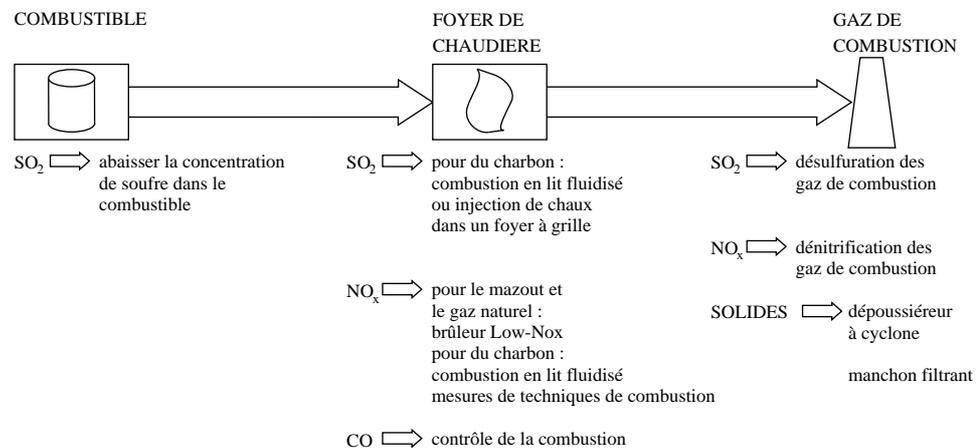
combustible ( $C_xH_y$ ) + oxygène ( $O_2$ ) =  
eau ( $H_2O$ ) + dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) + chaleur

Comme ni le processus de combustion, ni l'air utilisé pour la combustion, ni la composition des combustibles ne sont idéaux, il y a formation de résidus de combustion supplémentaires ou de polluants.

**Polluants** En principe, on peut classer ces produits additionnels résultant d'une combustion réelle, polluants ou émissions, de la manière suivante :

1. Emissions causées par une combustion incomplète :
  - $C_xH_y$ , hydrocarbures imbrûlés
  - suie
2. Emissions dues au processus de combustion :
  - oxydes d'azote  $NO_x$
  - produits de combinaison entre l'air et le combustible
3. Emissions dues à la composition du combustible :
  - oxydes de soufre  $SO_2$ ,  $SO_3$  (presque aucun pour le gaz naturel) ;
  - poussières dues à des fractions non combustibles (presque aucune pour le gaz naturel)
  - produits secondaires de réaction (comme par exemple le furane, la dioxine, à cause de la présence de chlore dans les ordures ménagères)
4. Emissions dues à l'air utilisé pour la combustion (impuretés, composition) :
  - poussières
  - dioxyde d'azote (azote dans l'air)
  - produits secondaires de réaction

### Aperçu des procédés permettant de diminuer les émissions lors de combustion



**Procédé Low-Nox** La production d'oxyde d'azote dépend fortement de la température dans la chambre de combustion. C'est pourquoi il existe un moyen direct primaire de réduire la concentration d'oxyde d'azote dans les gaz de combustion, qui est la réduction de la température de combustion (procédé Low-Nox).

**Dénitrification des gaz de combustion**  
**Procédé DENOX** Pour dénitrifier les gaz de combustion (dénitrification secondaire), on ajoute de l'ammoniacque ( $NH_3$ ). La présence d'un catalyseur (en céramique ou métallique) permet de diminuer la concentration d'oxydes d'azote.

La désulfuration des gaz de combustion réduit la concentration des oxydes de soufre, qui sont produits lors de la combustion de matières contenant du soufre (mazout lourd, charbon), avant que ces gaz ne soient relâchés dans l'atmosphère. La désulfuration est dite «humide» ou «sèche» selon le procédé utilisé; elle permet de retenir également d'autres substances des gaz de combustion, comme le fluor ou le chlore.

### **Désulfuration des gaz de combustion DGC**

Il existe différents procédés de dépolluage :

- dépolluage sec (principe de l'aspirateur)
- dépolluage humide (arrosage/lavage avec de l'eau)
- électrique (la poussière est ionisée dans un filtre électrique)

### **Dépolluage des gaz de combustion**

Dans le procédé électrique, les électrodes sont mises sous une tension continue de 20 à 70 kV. La poussière se fixe aux électrodes de précipitation; des dispositifs vibrants la séparent ensuite des électrodes.

Un catalyseur est une substance qui ralentit ou accélère une réaction chimique, sans subir lui-même de transformation chimique durable. Employé pour la «postcombustion» des gaz dégagés par des véhicules à moteur, il réduit les concentrations d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone ou d'oxydes d'azote.

### **Catalyseur**

## 5.3 Bruit

$$N_s = 10 \log (P / P_s)^2 = 20 \log (P / P_s)$$

**Niveau sonore**

$N_s$ : niveau sonore  
 $P$ : pression sonore  
 $P_s$ : pression sonore de référence (seuil d'audition)

Unité:

dB = décibel

1 B = 1 Bel est d'une manière générale le logarithme du quotient de deux grandeurs physiques de même nature.

A chaque doublement de l'intensité sonore correspond une hausse de 6 dB. L'intensité sonore perçue par l'homme dépend de la fréquence acoustique. Ce phénomène est pris en compte au moyen de niveaux sonores pondérés, dans lesquels les contributions de diverses fréquences sont pondérées en fonction de la perception humaine. En technique, la pondération A s'est imposée, désignée par dB (A).

**Intensité sonore perçue**

### Niveau sonore et perception de bruit

Bruit	Sensation	Niveau dB (A)
Tic-tac de montre	très faible	20
Quartier résidentiel sans circulation	faible	40
Ruisseau tranquille	faible	50
Discussion paisible	modérément fort	60
Discussion animée	fort	70
Orchestre (forte), à 20 m	fort	80
Camion à 5 m	très fort	90
Klaxon de voiture à 5 m	extrêmement fort	100
Marteau à air comprimé à 5 m	insupportable	120

Le bruit ne doit pas dépasser les limites fixées dans l'Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB).

Degré de tolérance au bruit	Valeur de projet [dB (A)]		Limite d'immission [dB (A)]		Valeur d'alarme [dB (A)]	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Degrés de tolérance au bruit :

- I : zones à besoins élevés de protection contre le bruit, notamment les zones de détente
- II : zones dans lesquelles des exploitations qui dérangent ne sont pas admises, notamment les zones d'habitation et les zones comprenant des installations et des bâtiments publics
- III : zones dans lesquelles sont admises des exploitations qui dérangent modérément, notamment les zones d'habitation et d'artisanat (zones mixtes) ainsi que les exploitations agricoles
- IV : zones dans lesquelles sont admises des exploitations très bruyantes, notamment les zones industrielles

## 5.4 Législation suisse sur la protection de l'environnement

Loi fédérale sur la protection des eaux contre la pollution	du 24.01.1991	<b>Loi fédérale sur la protection des eaux</b>
• Ordonnance générale sur la protection des eaux	du 19.06.1972	
• Ordonnance sur le déversement des eaux usées	du 08.12.1975	
• Ordonnance sur les boues d'épuration	du 08.04.1981	
• Ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer (OPEL)	du 28.09.1981	
• Ordonnance sur la classification des liquides pouvant altérer les eaux	du 28.09.1981	
• Prescriptions techniques sur les réservoirs /PEL)	du 21.06.1990	
Loi sur la protection de l'environnement (LPE)	du 07.10.1983	<b>Loi sur la protection de l'environnement</b>
• Ordonnance sur la protection de l'air (OPair	du 16.12.1985 20.11.1991	
• Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement (Osubst)	du 09.06.1986	
• Ordonnance sur les polluants du sol	du 09.06.1986	
• Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB)	du 15.12.1986	
• Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement	du 19.10.1988	
• Ordonnance sur les emballages pour boissons (OEB)	du 22.08.1990	
• Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD)	du 10.12.1990	
• Ordonnance pour la protection contre les accidents majeurs (OPAM)	du 27.02.1991	

### Principales valeurs limites d'émissions selon l'Ordonnance sur la protection de l'air (2<sup>e</sup> version du 20.11. 1991)

#### Chauffage au mazout

– Grandeur de référence: Les valeurs limites pour les polluants gazeux se réfèrent à une teneur en oxygène dans les gaz de combustion de		3 % vol
– Teneur en suie		
a. foyers avec brûleurs à soufflante		1
b. foyers avec brûleurs à vaporisation		2
– Monoxyde de carbone (CO)		
a. foyers avec brûleurs à soufflante		80 mg/m <sup>3</sup>
b. foyers avec brûleurs à vaporisation avec ventilateur		150 mg/m <sup>3</sup>
– Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ), désignés par dioxyde d'azote		
a. installations construites selon l'article 20		120 mg/m <sup>3</sup>
b. combustion avec puissance thermique de plus de 350 kW :		
• pour une température du caloporteur inférieure à 110°C		120 mg/m <sup>3</sup>
• pour une température du caloporteur supérieure à 110°C		150 mg/m <sup>3</sup>
– Ammoniac et composés d'ammonium, désignés sous le terme d'ammoniac <sup>1)</sup>		30 mg/m <sup>3</sup>

		Puissance thermique de foyer			
		de 5 MW à 50 MW	de 50 MW à 100 MW	supérieure à 100 MW	
Mazout moyen et lourd					
– Grandeur de référence: Les valeurs limites se réfèrent à une teneur en oxygène dans les gaz dégagés de		% vol	3	3	3
– Matières solides (totale):					
mazout de qualité A	mg/m <sup>3</sup>	80	50	50	
mazout de qualité B	mg/m <sup>3</sup>	50	50	50	
– Monoxyde de carbone (CO)		mg/m <sup>3</sup>	170	170	170
– Oxydes de soufre (SO <sub>x</sub> ), désignés par dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )		mg/m <sup>3</sup>	1700	1700	400
– Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ), désignés par dioxyde d'azote		mg/m <sup>3</sup>	450	300	150
– Ammoniac et composés d'ammonium, désignés par ammoniac <sup>1)</sup>		mg/m <sup>3</sup>	30	30	30

#### Foyers pour combustibles gazeux

– Grandeurs de référence Les valeurs limites se réfèrent à une teneur en oxygène dans les gaz dégagés de		3 % vol
– Monoxyde de carbone (CO)		100 mg/m <sup>3</sup>
– Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> ), désignés par dioxyde d'azote (NO <sub>2</sub> ):		
a. pour des installations construites selon les lettres a–d du § 1 de l'article 20		
• brûleurs atmosphériques avec une puissance thermique inférieure à 12 kW		120 mg/m <sup>3</sup>
• autres installations		80 mg/m <sup>3</sup>
b. pour des foyers d'une puissance thermique de plus de 350 kW		
• température du caloporteur inférieure à 110°C		80 mg/m <sup>3</sup>
• température du caloporteur supérieure à 110°C		110 mg/m <sup>3</sup>
– Ammoniac et composés de l'ammonium, désignés par ammoniac <sup>1)</sup>		30 mg/m <sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Indication: Cette limite d'émission n'a de signification que pour des installations de combustion ayant un dispositif de dénitrification.

## 6 Centres d'informations sur l'énergie

### Conseils sur l'énergie en Suisse

- **Services de conseils de l'Etat**

Confédération : Centres de conseil Infoénergie  
Tänikon c/o FAT, 8356 Tänikon  
Windisch, Kindergartenstr. 1, 5200 Windisch  
Bellinzona, c/o Dipart. del territorio,  
6500 Bellinzona

Cantons : **Services cantonaux de l'énergie**  
Neuchâtel :  
Infoénergie  
Tivoli 16 – 2003 Neuchâtel  
Tél. 038 39 47 46  
Fax 038 39 60 60

Autres adresses dans  
«Schweizer Energiefachbuch»

Commande auprès de :  
Künzler-Bachmann AG  
9001 St-Gall  
Tél. 071/23 55 55  
Fax. 071/23 67 45

Régions/Communes : Centres de conseil

- **Service-conseil des entreprises électriques suisses**
- **Conseillers privés en énergie ou bureaux d'ingénieurs**

### Associations faïtières industrie-énergie

Union suisse des consommateurs d'énergie de l'industrie  
et des autres branches économiques

Pfluggässlein 2  
4001 Bâle  
Tél. 061/262 04 44  
Fax 061/262 04 45

Association professionnelle suisse des préposés  
à l'énergie dans l'entreprise (APE)

Postfach  
3000 Berne 7  
Tél. 031/312 07 70  
Fax 031/311 64 32

Energiefachleute Schweiz (EFS)

c/o Infoenergie FAT  
8356 Tänikon  
Tél. 052/62 34 85  
Fax 052/62 34 89

**Centres d'informations de données globales sur l'énergie**

Comité national suisse de la Conférence Mondiale sur l'Energie  
c/o Elektrowatt AG, Bellerivestrasse 36, 8022 Zürich

Central Office of the World Energy Conference  
34 St. James Street, London SW1A 1 HD

Agence internationale pour l'énergie de l'OCDE  
2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France

## 7 Unités de mesure et facteurs de conversion

### Unités

Signe	Dénomination	Puissance de 10	Nombre décimal	Dénomination
E	Eta	1E +18	1 000 000 000 000 000 000	trillion
P	Peta	1E +15	1 000 000 000 000 000	mille billions
T	Tera	1E +12	1 000 000 000 000	billion*
G	Giga	1E +09	1 000 000 000	milliard
M	Mega	1E +06	1 000 000	million
k	Kilo	1E +03	1 000	mille
h	Hecto	1E +02	100	cent
da	Deca	1E +01	10	dix
		1E +00	1	un
d	Déci	1E-01	0,1	dixième
c	Centi	1E-02	0,01	centième
m	Milli	1E-03	0,001	millième
μ	Micro	1E-06	0,000 001	millionième
n	Nano	1E-09	0,000 000 001	milliardième
p	Pico	1E-12	0,000 000 000 001	billionième
t	Femto	1E-15	0,000 000 000 000 001	millionième de milliardième
a	Atto	1E-18	0,000 000 000 000 000 001	trillionième
* USA: billion =		1E +09		

En 1954, les unités ont été définies sur le plan international :  
Système International d'unités (SI).

### Unités de base du SI

Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Intensité du courant électrique	ampère	A
Température	Kelvin	K
Quantité de matière	mole	mole
Intensité lumineuse	candela	cd

## Unités dérivées des unités SI et autres unités admises

Grandeur	Unité	Abréviation	Conversion
Force	Newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ J/m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
Moment d'une force		N · m	
Pression	Pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
	Bar	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Energie, travail	Joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$
			$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
Puissance, courant thermique	Watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m/s}$
Fréquence	Hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$
Charge électrique	Coulomb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
Tension électrique	Volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ W/A} = 1 \text{ A} \cdot \text{Ohm}$
Résistance électrique	Ohm	Ohm	$1 \text{ Ohm} = 1 \text{ V/A} = 1/\text{S}$
Conductance électrique	Siemens	S	$1 \text{ S} = 1 \text{ A/V} = 1/\text{Ohm}$
Capacité électrique	Farad	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ A} \cdot \text{s/V} = 1 \text{ C/V}$
Induction électrique	Henry	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A} = 1 \text{ Wb/A} = 1 \text{ Ohm} \cdot \text{s}$
Flux lumineux	Lumen	lm	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr}$
Eclairement	Lux	lx	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$
Luminance		cd/m <sup>2</sup>	
Température	degré Celsius	°C	$\text{C temp.} = \text{K. temp.} - 273.15$
			différence de 1°C = différence de 1 K
Capacité thermique		J/K	
Conductibilité thermique		W/(m · K)	
Coefficient de transfert de chaleur		W/(m <sup>2</sup> · K)	
Angle plan	Radian	rad	
	Grad	°	$1^\circ = \pi/180 \text{ rad}$
	Min	'	$1' = 1^\circ/60$
Volume	litre	l	$1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$
Densité		kg/m <sup>3</sup>	

## Tables de conversion d'anciennes unités ou d'unités étrangères dans le système international SI

## Longueur L

1 in	=	1 inch	=	1 Zoll	=	1''	=	25,4 mm
1 ft	=	1 foot	=	12 in	=	1 yd/3	=	0,3048 m
1 mi	=	1 mile	=	1 statut mile	=		=	1,609 km

## Surface A

in <sup>2</sup>	=	1 sq in	=	6,4516 cm <sup>2</sup>
ft <sup>2</sup>	=	1 sq ft	=	9,2903 dm <sup>2</sup>
acre	=	4 roods	=	4046,9 m <sup>2</sup>
mi l	=	1 sq mi	=	2,590 km <sup>2</sup>

Angle  $\alpha/\beta$ 

1°	=	17,453 $\mu$ rad
1'	=	290,89 $\mu$ rad
1''	=	4,8481 $\mu$ rad
1 rad	=	57,2958°

## Volume V

in <sup>3</sup>	=	1 cu in	=	16,39 ml	=	16,39 cm <sup>3</sup>
ft <sup>3</sup>	=	1 cu ft	=	28,32 l	=	28,32 dm <sup>3</sup>
UK gal	=	1 UK gallon	=	8 pint	=	4,546 l
US gal	=	1 US gallon	=	8 liq pt	=	3,785 l
US bbl	=	1 US petr. barrel	=	1 US bl	=	159,0 l

## Masse m (correspond au poids m)

t	=	1 tonne	=	1 Mg	=	1000 kg
dbm approximatif	=	1 pound mass	=	1 lb	=	0,4536 kg
UK ton	=	1 UK lg ton	=	2240 lbm	=	1,0160 t
US ton	=	1 US sh ton	=	2000 lbm	=	0,9072 t

Conductibilité thermique  $\lambda$ 

kcal/(h · m · °C)	=	1,163 W/(K · m)
Btu/(h · ft · °F)	=	1,731 W/(K · m)

## Grandeurs magnétiques

B: 1 GS	=	0,1 mT
H: 1 Oe	=	79,577 A/m

Echelles usuelles de température, points à température  $t, T$ 

Point de congélation: $0\text{ }^{\circ}\text{C}$	=	273,15 K	=	$32\text{ }^{\circ}\text{F}$	=	491,67 R
$t_{\text{C}}$	=	$5/9 (t_{\text{F}}-32); T_{\text{K}}$	=	$t_{\text{C}} + 273,15$		
			=	$5/9 \cdot t_{\text{F}} + 255,37$		

## Force F (kp = kilo-poids)

1 kp	=	1 kg	=	1 kgf	=	$9,807 \cdot 10^5 \text{ dyn}$	=	9,807 N
1 lbf	=	1 pound-force	=	4,448 N				
1 US tonf	=	2 kip	=	2 Kilopound-force (!)	=		=	8,896 kN

Pression p, surpression  $p_e$ , pression atmosphérique  $p_{\text{atm}}$ 

1 $\text{kp}/\text{cm}^2$ - 1 at	=		=	0,9807 bar	=	98,07 kPa		
1 mmHg	=	1 Torr	=	$1333,2 \text{ dyn}/\text{cm}^2$	=	133,32 Pa		
1 m H <sub>2</sub> O	=	1 m WS	=	1 $\text{Mp}/\text{m}^2$	=	$1 \text{ t}/\text{m}^2$	=	9,807 kPa
1 atm	=	760 Torr	=	$1,033 \text{ kp}/\text{cm}^2$	=	101,325 kPa		
1 psi	=	1 $\text{lbf}/\text{in}^2$	=	68,95 mbar	=	6,895 kPa		
1 in Hg			=		=	3,386 kPa		
1 ft H <sub>2</sub> O			=		=	2,989 kPa		
1 $\text{lbf}/\text{ft}^2$			=		=	47,88 Pa		
1 sh ton/ $\text{in}^2$			=		=	13,79 MPa		

## Energie E, W; travail A; quantité de chaleur Q

1 Kcal	=	$10^3 \text{ cal}$	=	$1,163 \text{ W} \cdot \text{h}$	=	4,1868 kJ		
1 $\text{kW} \cdot \text{h}$	=	$3,6 \cdot 10^{13} \text{ erg}$	=	3,6 MJ				
1 Btu	=	1,055 kJ;	1 MM Btu	=	$10^6 \text{ Btu}$	=	1,055 GJ	
1 $\text{kp} \cdot \text{m}$	=	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}$	=	$1 \text{ kgf} \cdot \text{m}$	=	$9,807 \text{ N} \cdot \text{m}$	=	9,807 J
1 $\text{ft} \cdot \text{lbf}$	=	$1,356 \text{ N} \cdot \text{m}$	=	1,356 J				

Puissance P, puissance thermique  $\Phi$ 

1 PS	=	$75 \text{ kp} \cdot \text{m}/\text{s}$	=	0,9863 hp	=	0,7355 kW
1 kcal/h	=	$10^3 \text{ cal}/\text{h}$	=	1,163 J/s	=	1,163 W
1 Btu/h	=	0,2931 W;		1 MM BTU/h	=	293,1 kW
859,8 kcal/h	=	3412 Btu/h	=	1 kW		

## Facteurs de conversion pour des agents énergétiques (valeurs moyenne)

Agent énergétique	Unité de mesure	Poids spécifique ME/m <sup>3</sup>	Facteurs de conversion pour le pouvoir calorifique inférieur PCI	
			MWh/ME	GJ/ME
Electricité	MWh		1,0	3,6
Pétrole	1 baril = 159 litres		1,6	5,8
	1 tonne équivalent pétrole (tep)		11,7	42,6
Mazout lourd	t	0,98	11,2	40,2
Mazout moyen	t	0,92	11,6	41,9
Mazout léger	t	0,84	11,9	42,7
	1000 l		10,0	36,0
Diesel	t	0,84	11,9	42,7
	1000 l		9,0	32,2
Essence	t	0,76	11,9	43,0
	1000 l		9,0	32,2
Propane (liq) (gaz)	t	0,50	12,8	46,0
	1000 Nm <sup>3</sup>		25,6	92,1
Acétylène	t	1,17	13,5	48,6
Gaz naturel PCI/PCS = 0,9)	1 MWh		1,0	3,6
	1000 Nm <sup>3</sup>		9,3	33,5
	1000 [Th] (Thermie)		1,2	4,2
Houille	t	1,2 - 1,5	8,0	29,0
Coke de fonderie	t	1,6 - 1,8	8,0	28,9
Charbon de bois	t	~ 0,4	8,0	28,9
Bois (sec)	t	0,60	4,3	15,5
	m <sup>3</sup>		2,6	9,2
Bois de chauffage	stère		1,4	5,0
Vapeur, 15 bar et 270°C	t		0,83	2,97
Vapeur, 145 bar et 540°C	t		0,95	3,43

1 Nm = 1 J = 1 Ws; 1 erg = 10<sup>-7</sup> J; 1 cal = 4,187 J

## Remarque:

- Gaz naturel:  
1MWh = 99 Nm<sup>3</sup>  
1000 Nm<sup>3</sup> = 0,81 t
- Propane:  
1000 Nm<sup>3</sup> = 2 t
- Uranium:  
1 kg U-235 contient environ 24 000 MWh (84 000 GJ)

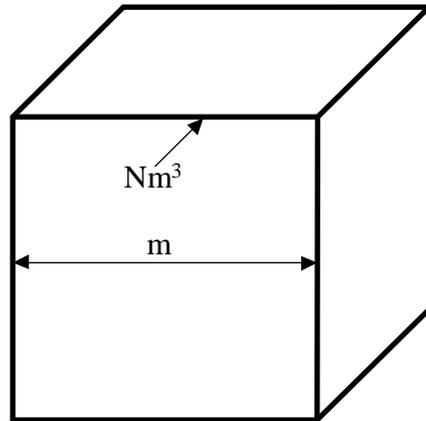
Les pouvoirs calorifiques sont des moyennes annuelles dépendant de la qualité.

## Référence:

EMPA  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf

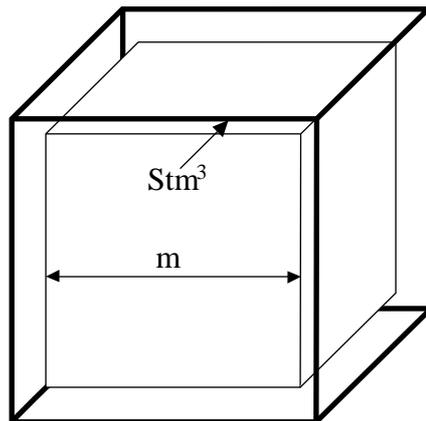
### Unités de quantité pour le gaz

Mètre cube normal [Nm<sup>3</sup>]



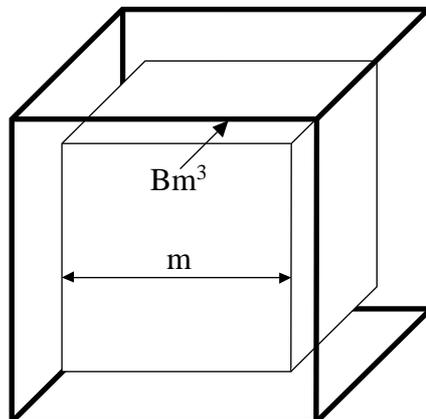
Un m<sup>3</sup> normal de gaz naturel est un cube de 1 m de côté, mesuré à une température de 0° C (= 273 K), et à une pression atmosphérique de 1013 hPa (niveau de la mer).  
Le pouvoir calorifique inférieur PCI = 11,15 kWh/m<sup>3</sup>.

Mètre cube standard [Stm<sup>3</sup>]



Mesuré à une température de 15° C (= 288 K), et à une pression atmosphérique de 1013 hPa (niveau de la mer).  
 $V_2 = V_1 \cdot 288/273 = V_1 \cdot 1,055$ .  
Pouvoir calorifique =  $11,15/1,055$   
= 10,6 kWh/m<sup>3</sup>.

Mètre cube d'exploitation [Em<sup>3</sup>]



Mesuré à une température de 15° C (= 288 K), et à une pression de 962 hPa (par exemple Lucerne).  
Pouvoir calorifique :  $10,6 \cdot 962/1013$   
= 10,07 kWh/m<sup>3</sup>

### Dépense d'énergie pour la production de quelques matériaux (valeurs indicatives)

Dépense d'énergie pour la production de quelques matériaux à partir de leurs matières brutes

Fonte	14 MJ/kg
Tôle d'acier	24 MJ/kg
Fer blanc	27 MJ/kg
Fil de cuivre	100 MJ/kg
Tôle d'aluminium	250 MJ/kg
Titane	800 MJ/kg
Chaux (brûlée)	10 MJ/kg
Ciment	4 MJ/kg
Bouteilles de verre (neuves)	10 MJ/kg
Bouteilles de verre avec 50% de verre recyclé	7 MJ/kg
Carton	27 MJ/kg
Papier, blanchi	79 MJ/kg
Papier avec 20% de vieux papier	60 MJ/kg
Papier avec 100% de vieux papier	16 MJ/kg
Polyéthylène-HD	79 MJ/kg
Polyéthylène-LD	60 MJ/kg
PVC	60 MJ/kg
Polystyrène, résistant aux chocs	82 MJ/kg
Nylon	140 MJ/kg

(Valeurs choisies dans la collection «Umweltschutz» N° 24, ainsi que dans Boustead and Hancock

Consommation d'énergie spécifique (énergie grise) estimée pour des «produits moyens» de quelques secteurs économiques (pour 1986)

Agriculture	14 MJ/Fr.
Fer et acier	39 MJ/Fr.
Aluminium	54 MJ/Fr.
Ciment, gypse	20 MJ/Fr.
Chimie	17 MJ/Fr.
Machines	6 MJ/Fr.
Véhicules	8 MJ/Fr.
Denrées alimentaires	8 MJ/Fr.
Textiles	7 MJ/Fr.
Cellulose, papier	20 MJ/Fr.
Articles en papier, impression	7 MJ/Fr.
Caoutchouc, matières synthétiques	9 MJ/Fr.
Construction, génie civil	7 MJ/Fr.
Commerce, restauration, hôtellerie	4 MJ/Fr.
Services	2 MJ/Fr.

Remarque: En utilisant ce tableau, il faut tenir compte du fait qu'il se réfère à des produits dont le prix moyen est valable pour un secteur donné. Ces prix moyens sont rarement connus; ils sont évalués, ici, pour l'Allemagne, sur la base des travaux de Beutel et Mürdter (pour 1975).

Source:  
D. Spreng: «Wieviel Energie braucht die Industrie»,  
Vdf-Verlag, Zurich

## 8 Liste des mots clés

### A

Absorption	3.8/1
Accumulateurs	4.2/7
Agent (s) énergétique (s)	1.3/1
– facteur de conversion des	7/5
– primaires	3.1/1
– secondaires	3.2/1
Alimentation de courant sous coupure (ASC)	4.2/5
Analyse	2.3/1
– coût-bénéfice	2.3/1
	2.3/3
– de rentabilité	2.3/1
– de sensibilité	2.4/2
Annuité (s)	2.5/1
– facteur d’	2.5/1
– méthode des	2.5/1
Appareil	4.1/16
Appareil de compensation	4.1/23
Appareil de régulation	4.1/16

### B

Bateaux-citerne	3.4/5
Barrages hydroélectriques	3.2/3
Besoins en puissance thermique	4.1/13
Bilan	2.1/1
– suisse de l’électricité	3.2/14
Bobine de self	4.1/23
Bois	3.7/1
– pouvoir calorifique de	3.7/2
Bruit	5.3/1
Brûleur	4.2/19
Budget des centres de charges	2.1/2
Butane	3.3/6

### C

Cahier des charges	2.4/1
Caisse	2.1/1
Capteur solaire	3.8/2
Caractéristiques des lampes	4.2/46
Carbura	3.3/8
Catalyseur	5.2/3
Cellules	3.2/13
– photovoltaïques	3.2/13
– primaires	4.2/7
– solaires	3.2/13
Centrale (s)	3.2/2
– de chauffage à distance	3.6/1
– combinée	3.2/7

– électrique de pompage à accumulation	3.2/4
– éoliennes	3.2/11
– au fil-de-l’eau	3.2/3
– à haute pression	3.2/4
– nucléaire	3.2/6
– de rivières	3.2/3
– thermiques	3.2/5
– thermiques pour chauffage à distance	3.6/1
– thermiques à vapeur	3.2/6
– à turbines à gaz	3.2/7
– types de	3.2/2
Centres d’informations sur l’énergie	6/1
Chaleur	1.3/1
– à distance	3.6/1
– de l’environnement	1.3/1
– de production	4.2/47
– récupération de	4.2/49
– rejetée par les équipements de production	3.6/1
Chaîne de transformation	3.1/1
Charbon	3.5/1
– composition du	3.5/2
– gisements de	3.5/1
– importations de	3.5/4
– propriétés du	3.5/4
– traitement du	3.5/3
Charge	1.5/2
– de pointe	1.6/2
Chaudière	4.2/19
	4.2/20
Circulateur à rotor noyé	4.2/33
Coefficient de performance COP	4.2/17
– en production de chaleur	4.2/13
– en production de froid	4.2/13
Coefficient K	4.1/13
Cokéfaction	3.5/3
Combustibles	4.2/19
– gazeux	4.2/19
– liquides	4.2/19
– solides	4.2/19
Combustion	5.2/1
– stœchiométrique	5.2/1
– de combustibles fossiles	5.2/1
Commande	4.1/15
– en cascade	4.1/17
– par groupe	4.2/32
– programmable	4.1/17
Comparaison de la rentabilité	2.1/2
Composantes de fourniture	2.1/5

Composés organiques volatils (volatile organic compounds VOC)	5.1/3	Densité de puissance thermique	4.2/47
Compresseur	4.2/9	Dépenses	2.1/1
– type de	4.2/9	– pendant la durée d'utilisation	2.4/2
Comptabilité	2.1/1	Déphasage maximal	4.1/23
– d'entreprise	2.1/1	Dépoussiérage des gaz de combustion	5.2/3
– financière	2.1/1	Désulfuration des gaz de combustion (DGC)	5.2/3
Compte de pertes et profits	2.1/1	Détermination des frais annexes	2.1/2
Conditions	2.1/6	Diagramme de Sankey	4.1/6
– de livraison	2.1/6	Diffusion	3.8/1
Conditions atmosphériques	3.8/1	Dioxyde de soufre SO <sub>2</sub>	5.1/2
Consommateur	4.2/50	Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	5.1/2
Consommation d'énergie finale	3.1/2	Distillation	3.3/3
Constante solaire	3.8/1	– atmosphérique	3.3/3
Contrat interruptible	2.1/8	– fractionnée	3.3/3
Contrats de livraison	3.4/5	– sous vide	3.3/3
Contrôle des installations	3.4/5	«Dix grandes sociétés»	3.2/15
Convertisseur	3.2/11	Durée	1.5/1
	4.2/28	– d'amortissement	2.5/1
– de circuit intermédiaire	4.2/3	– calendaire	1.5/1
– de courant	4.2/3	– de disponibilité	1.5/1
– d'énergie éolienne	3.2/11	– d'enclenchement	1.5/1
– de fréquences	4.2/29		4.2/21
– de quantité	3.4/6	– de fonctionnement du brûleur	4.2/21
– statique	4.2/3	– d'indisponibilité	1.5/1
Couleur	4.2/43	– de maintien en attente	1.5/1
– d'un corps	4.2/45	– de mise hors service	1.5/1
– de lumière	4.2/43	– de révision	1.5/1
Couple de rotation	4.2/27	– d'utilisation	1.6/1
Couplage chaleur-force (CCF)	3.2/8	– de vie de l'installation	4.2/50
Courants harmoniques	4.1/19		
Courbe	4.1/7	<b>E</b>	
– de charge journalière	4.1/7	Ecart de réglage	4.1/16
	4.1/8	Echange de chaleur à récupération	4.2/51
– de charge hebdomadaire	4.1/7	Echangeur de chaleur (EC)	4.2/51
– des puissances classées annuelle	4.1/8	– à contre-courant	4.2/51
Coûts	2.1/1	– à courants croisés	4.2/51
– analyse des	2.3/3	– à équicourant	4.2/51
– économie de	2.3/3	– types d'	4.2/51
– effectifs	2.3/3	Eclairage	4.2/43
– facteurs de	2.3/3	Eclairage	4.2/43
– prévisionnels	2.3/3	Effet de serre	5.1/3
– d'utilisation	2.1/1	Efficacité énergétique	4.1/2
Craquage thermique	3.3/3	Electricité	3.2/1
		– distribution d'	3.2/16
<b>D</b>		– production d'	3.2/1
DDC (Direct Digital Control)		Elévation de température	4.2/17
Déchets	4.1/1	Emissions	5.1/1
– gestion des	4.1/1	– valeurs limites d'	5.4/2
Degrés-jours	1.5/2	Energie	1.1/1
Demande d'électricité en Suisse	3.1/3	– bilan d'	4.1/6
Demande de raccordement	4.1/21	– cinétique	1.1/2
Dénitrification des gaz de combustion	5.2/2	– consommation d'	1.2/1
			4.1/1

– distribution d'	4.1/1
– distribution dans l'entreprise	4.1/11
– électrique	1.1/2
– finale	1.4/2
– grise	1.2/1
– mise à disposition d'	4.1/1
– mise en œuvre d'	2.4/2
	4.1/1
– pertes d'	1.4/1
– potentielle	1.1/2
– réactive	4.1/23
– récupération d'	4.1/1
– rendement d'	1.4/1
– stockage dans l'entreprise	4.1/11
– transformation d'	4.1/1
– utile	1.4/2
	4.1/1
Engrenages	4.2/32
Entraînement	4.2/23
– commandé	4.2/28
– électrique	4.2/23
– réglé	4.2/28
Epaisseur d'isolation	4.1/12
Etages de pression	3.2/6
Exploitation monovalente	4.2/13

**F**

Facteur	1.6/2
– de charge	1.6/2
– de charge annuel	1.6/2
– de charge mensuel	1.6/2
– de coût	2.3/3
– de distorsion harmonique	4.1/19
– moyens	2.5/3
– de puissance	1.6/2
– de simultanéité	1.6/3
Fluides caloporteurs	1.3/1
Fluides frigorigènes	4.2/15
	4.2/16
Flux	4.1/1
– énergétique	4.1/1
	4.1/2
– lumineux	4.2/43
Fraction utile	1.2/1
	1.6/1
Frais	2.1/1
– d'achats	2.1/1
	2.1/5
– d'entretien	2.3/4
– d'exploitation	2.1/2
	2.4/1
– d'investissement	2.1/2
Fuzzy-Control	4.1/17

**G**

Gaz	3.4/4
– industrie suisse du	3.4/4
– unités de quantité pour le	7/6
Gaz naturel	3.4/1
– composition du	3.4/2
– conduites de	3.4/5
– consommation de	3.4/1
– extraction de	3.4/1
– gisements de	3.4/1
– importation de	3.4/3
– mesures des quantités de	3.4/6
– propriétés du	3.4/7
– réseau principal de	3.4/3
– stockage du	3.4/5
– transport du	3.4/5
Gazoducs	3.4/5
Grandeur (s)	4.1/16
– caractéristiques	4.1/6
– de commande	4.1/16
– d'influence	4.1/16
– de référence	4.1/7
– réglée	4.1/16

**H**

Harmoniques de tension	4.1/20
Heures à pleine charge	1.6/1
Hydrocarbures (HC)	5.1/3
– halogénés (CFC)	5.1/3

**I**

Immissions	5.1/1
Impact sur l'environnement	4.1/2
Impuretés	4.2/50
Indice	2.1/14
– national des prix à la consommation	2.1/14
– du coût de la vie	2.1/14
– de dépense d'énergie	4.1/6
Installation (s)	
– de circuits absorbants	4.1/21
– de chauffage	4.2/21
– de couplage chaleur-force (CCF)	3.2/8
	3.2/10
– de couplage chaleur-force compacte (CCFC)	3.2/9
	3.2/10
– à énergie totale TOTEM	3.2/9
– de turbine à vapeur à condensation	3.2/8
– de turbine à vapeur à soutirage	3.2/9
Instruments	4.1/4
Instruments de mesure pour l'air comprimé	4.1/5
Instruments de mesure pour l'eau	4.2/5
Instruments de mesure pour l'énergie électrique	4.1/4

Instruments de mesure pour le froid	4.1/5	– diesel	3.2/9
Instruments de mesure pour le gaz	4.1/4	– à gaine	4.2/33
Instruments de mesure pour l'huile de chauffage	4.1/4	– à gaz	3.2/9
Instruments de mesure pour la vapeur	4.1/5	Moteur électrique	4.2/23
Intensité lumineuse nominale	4.2/44	– commande de	4.2/28
Intensité sonore perçue	5.3/1	– couple nominal de	4.2/2
Intérêt (s)	2.5/5	– courant rotorique de	4.2/26
– imputé	2.5/5	– durée d'enclenchement de	4.2/31
Investissement (s)	2.3/3	– glissement de	4.2/25
– contrôle des	2.4/2		4.2/26
– coûts des	2.3/2	– induit de	4.2/26
	2.4/1	– puissance du	4.2/25
– durée de vie des	2.3/4	– puissance de surcharge du	4.2/31
– d'entreprise	2.3/1	– rendement du	4.2/23
– d'infrastructure	2.3/4		4.2/24
– opportunité d'	2.3/3	– stator du	4.2/26
– de production	2.3/4	– rotor du	4.2/26
– de productivité	2.3/1	– types d'exploitation du	4.2/31
		– vitesse de rotation nominale du	4.2/25
		– vitesse de rotation synchrone du	4.2/26
<b>L</b>		<b>N</b>	
Lignes à très haute tension	3.2/17	Niveau sonore	5.3/1
Limites de bilan	4.1/6		
Liquefield Petroleum Gas (LPG)	3.3/3		
	3.3/6	<b>O</b>	
Loi fédérale sur la protection des eaux	5.4/1	Ordonnance sur la protection de l'air	5.4/2
Loi sur la protection de l'environnement	5.4/1	Organe correcteur	4.1/16
Longueur d'onde	4.2/43	Oscillations harmoniques	4.1/19
Low-Nox	4.2/19	Oxyde d'azote NO <sub>x</sub>	5.1/3
– procédé	5.2/2	Ozone (O <sub>3</sub> )	5.1/3
Luminance	4.2/43		
<b>M</b>		<b>P</b>	
Machine asynchrone triphasée	4.2/26	Pertes	3.2/1
Machine frigorifique	4.2/11	– de distribution de chaleur	4.1/12
Matériau d'isolation	4.1/12	– de maintien	4.2/22
Mazout	4.1/11	– par renouvellement	4.1/14
– altération du	4.1/11	– de transformation	3.2/1
Mesure	4.1/4	– thermiques par transmission	4.1/13
– convertisseur de	4.1/4	– thermiques par renouvellement	4.1/13
– déroulement des opération de	4.1/4	Perturbations de réseau	4.1/19
– enregistreur de	4.1/4		4.1/20
– précision de	4.1/4		
– prise de	4.1/4	Pétrole	3.3/1
Mètre cube	3.4/6	– brut	3.3/3
– d'exploitation	7/6		3.3/5
– normal	3.4/6		3.3/6
	7/6	– composition du	3.3/2
– standard	3.4/6	– consommation de	3.3/4
	7/6	– distribution du	3.3/5
Mode de fonctionnement	1.6/1	– entreposage du	3.3/6
Monoxyde de carbone CO <sub>2</sub>	5.1/2	– gisements de	3.3/1
Moteur	3.2/9	– importation de	3.3/4
– à bagues	4.2/26	– raffinage du	3.3/3
– à cage d'écureuil	4.2/26	– stockage du	3.3/8

Piles à combustible	3.2/12	Puissance	4.2/30
Plan comptable	2.1/2	abonnée	1.5/4
Plaques signalétiques	4.2/24		2.1/7
Point de fonctionnement	4.2/34	– active	1.5/4
Polluants	5.2/3	– apparente	1.5/4
Pompe	4.2/33	– appelée	1.5/3
– centrifuge	4.2/33	– assurée	1.5/3
– choix de	4.2/33	– brute	1.5/3
– débit de	4.2/35	– caractéristique	1.6/1
	4.2/41	– continue	1.5/2
– à moteur ventilé	4.2/33	– disponible	1.5/3
– à piston	4.2/33	– de fonctionnement	1.5/3
– rendement de	4.2/34	– horaire moyenne	2.1/8
Pompe à chaleur	4.2.11	– installée	1.5/3
– à absorption	4.2/12	– journalière moyenne	2.1/8
– à compression	4.2/11	– de maintien en attente	1.5/3
Pouvoir calorifique	1.2/1	– à mettre à disposition	1.5/3
– inférieur	1.2/1	– moyenne	1.5/3
	2.1/8		1.6/1
– supérieur	1.2/1	– nominale	1.5/2
	3.4/6	– de pointe	1.5/3
Préchauffage solaire de l'eau	3.8/2	– rapport de	1.6/2
Prescriptions pour l'isolation thermique	4.1/12	– réactive	1.5/4
Prescriptions techniques sur les réservoirs	4.1/11		4.1/23
Pression	4.2/9	– de réserve	1.5/3
Prestations énergétiques	1.4/2		
Prix	2.1/5	<b>R</b>	
– d'achat	2.1/11	Rayonnement	3.8/1
– de base	2.1/8	– global	3.8/1
– CIF	2.1/13	– intensité du	3.8/1
– du commerce de gros	2.1/13	Récupération de chaleur	4.1/11
– à la consommation	2.1/11	– par régénération	4.2/52
	2.1/13	Réflexion	3.8/1
– définition du	2.1/11	Reformeur	3.2.12
– de l'énergie réactive	2.1/7	Réfrigération	4.2/15
– FOB	2.1/13	Régulateur	4.1/16
– FOR	2.1/13	– analogique	4.1/17
– à la livraison	2.1/11	– différentiel	4.1/16
– du marché	2.1/5	– intégral	4.1/16
– net	2.1/11	– PID	4.1/16
– spot	2.1/13	– proportionnel	4.1/16
Procédé DENOX	5.2/2	Régulation	4.1/15
Procédé Low-Nox	5.2/2	– circuit de	4.1/15
Procédé de récupération de chaleur	4.2/50	Renchérissement	2.1/14
Production	3.2/8	Rendement de chaudière	4.2/22
– d'air comprimé	4.2/9	Rendement lumineux	4.2/43
– de froid	4.2/15	Rendement annuel	4.2/13
– prioritaire de chaleur	3.2/8		4.2/22
– prioritaire d'électricité	3.2/8	Rendement global	3.2/6
Produits pétroliers	3.3/6		3.2/8
	3.3/9		3.2/10
Propane	3.3/6	Renouvellement minimal	4.1/14
Propriétés de rendu des couleurs	4.2/45	Réseau de chauffage de quartier	3.6/1
Puissance	1.5/2	Réseau de conduites	4.1/11

Réseau de distribution de chaleur	4.1/11	Tension	3.2/16
Réseau électrique interconnecté	3.2/16	– basse	3.2/16
Résistance hydraulique	4.2/33	– fluctuations de	4.1/19
<b>S</b>		– haute	3.2/16
Saumure	4.2/11	– moyenne	3.2/16
Scintillement	4.1/19	– très haute	3.2/16
Servomoteur	4.1/16	THD Total Harmonic Distortion	4.1/19
Signal	4.1/16	Transformateur	4.2/1
Signature énergétique	4.1/7	– pertes en charge	4.2/1
Sonde	4.1/16	– pertes en marche à vide	4.2/1
Sources de chaleur	4.2/13	– pertes totales	4.2/1
Sources d'énergie renouvelable	1.3/1	– rapport de transformation	4.2/1
Structure de prix	2.1/5	– rendement	4.2/2
Surface forestière	3.7/1	– rendement à charge nominale	4.2/2
Système	4.2/30	Transport de marchandises dangereuses	3.3/7
– en circuit fermé	4.2/34	Trou dans la couche d'ozone	5.1/3
– d'entraînement	4.2/30	Turbine bulbe	3.2/3
<b>T</b>		Turbine Francis/Kaplan/Pelton	3.2/3
Tarif (s)	2.1/5	<b>U</b>	
– de base	2.1/8	Unités	7/1
– binômes	2.1/6	– anciennes	7/3
– de chauffage à distance	2.1/9	– de base du SI	7/1
– de consommation	2.1/8	– dérivées des unités SI	7/2
	2.1/9	– étrangères	7/3
– de délestage	2.1/7	Utilisation	4.2/9
– double	2.1/6	– de la chaleur dégagée	4.2/9
– d'électricité	2.1/6	– de rejets thermiques	4.2/49
– du gaz	2.1/8	<b>V</b>	
– interruptible	2.1/7	Valeur (s)	2.2/1
– de livraison	2.1/5	– d'acquisition	2.2/1
– saisonnier	2.1/6	– de consigne	4.1/16
– trinôme	2.1/6	– effective	4.1/16
Taux	1.5/4	– limites	4.1/20
– de charge	1.5/4	– de liquidation	2.2/1
– de charge du brûleur	4.2/21	– moyenne d'exposition (VME)	5.1/4
– de disponibilité	1.6/3	– nette	2.2/1
– d'intérêt des capitaux engagés	2.5/5	– de renouvellement	2.2/1
– de renouvellement d'air	4.1/14	– restante	2.2/1
– de retour	2.5/1	Variable réglante	4.1/16
– d'utilisation	1.6/1	Ventilateur	4.2/37
	1.6/2	– axial	4.2/37
Taxe (s)	2.1/8	– caractéristique pression-débit-volume du	4.2/38
– de base	2.1/8	– exploitation du	4.2/39
– d'importation	3.3/8	– puissance du	4.2/37
– de puissance	2.1/9	– radial	4.2/37
– de raccordement	2.1/8		4.2/39
Technique MCR	4.1/16	Vitesse du vent	3.2/11
Température	4.2/50	Volume de gaz dégagé	5.2/1
Temps	1.5/1	VME valeurs	4.1/14
– d'arrêt	1.5/1	<b>W</b>	
– de démarrage	1.5/1	Watt	1.5/2
– mort	4.1/16		
– de réparation	1.5/1		