



Méthode et exemples pour la répartition des énergies dans le cadre d'un audit énergétique pour l'industrie

REV 0 du 28/09/2015



1. OBJET	3
2. ELECTRICITE	3
2.1. Unités	3
2.2. Répartition de la consommation d'électricité	3
2.2.1. Répartition sur base d'une mesure du courant	4
2.2.2. Répartition sur base de l'estimation de la puissance utile	6
2.2.3. Répartition suivant la puissance installée	7
2.2.4. Exemple de répartition	8
2.3. Répartition de l'air comprimé	9
2.4. Répartition du froid	10
2.5. Exemples de calcul sur différents équipements	12
2.5.1. Exemple sur une résistance électrique chauffante	12
2.5.2. Exemple sur un compresseur	12
2.5.3. Exemple sur une pompe	13
2.5.4. Exemple sur l'éclairage	14
2.6. Conciliation	15
3. GAZ NATUREL / GASOIL	16
3.1. Unités	16
3.2. Pouvoir calorifique	17
3.3. Chauffage bâtiments	17
3.4. Eau chaude sanitaire	19
3.5. Vapeur	19
3.6. Four de réchauffage de produits	21



1. Objet

Le présent document reprend les principales méthodes de calcul et d'estimation pour répartir les vecteurs énergétiques dans une matrice ECA (*Energy Consumption Analysis*).

La présente copie a été réalisée comme support à l'encadrement technique du volet « audit énergétique » du projet *Energy Pooling* dans le cadre de la prise en charge de l'animation des groupes « audits énergétiques » mis en place par le réseau des CCI de Wallonie.

2. Electricité

2.1. Unités

La puissance électrique est conventionnellement exprimée en Watt. Il s'agit d'une quantité d'énergie consommée ou dissipée par seconde

$$1 \text{ Watt} = 1\text{W} = 1 \text{ Joule (J) / seconde}$$

$$1 \text{ 000 Watt} = 1\text{kW}$$

$$1 \text{ 000 kW} = 1 \text{ MW}$$

$$1000 \text{ MW} = 1 \text{ GW}$$

La consommation d'énergie électrique correspond à une puissance consommée durant un temps donnée.

Son unité est donc le **kWh** (et non pas le kW/h), exprimé sur une durée de 1 an, 1 jour, 1 heure, etc.

2.2. Répartition de la consommation d'électricité

Dans la suite, différentes méthodes de répartition sont proposées. Ces méthodes sont classées et présentées suivant leur degré de pertinence, de la méthode préférée jusqu'à la méthode la moins précise.



2.2.1. Répartition sur base d'une mesure du courant

Une mesure de la consommation électrique peut être réalisée au moyen d'une pince ampérimétrique. Idéalement la mesure sera réalisée au moyen d'un enregistreur sur une période suffisamment longue et significative.

☐ Mesures du courant I en Ampère

■ Si tension = 230 V : $P \text{ (kW)} = I * 230 / 1000 * \cos \phi$

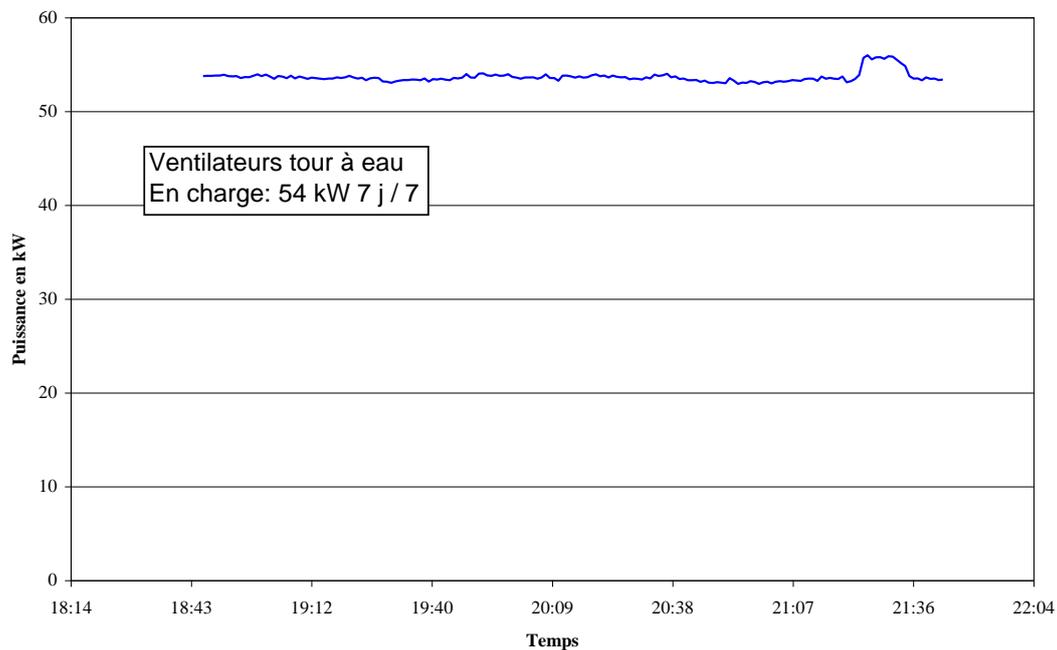
■ Si tension = 400 V : $P \text{ (kW)} = I * 693 / 1000 * \cos \phi$

Le coefficient $\cos \phi$ correspond à la génération d'électricité réactive des moteurs, compresseurs etc. Cette puissance réactive est compensée au niveau de l'usine par les batteries de condensateurs.

En pratique, $\cos \phi = 0.7 \dots 0.9$ (localement à l'intérieur de l'usine)

MESURES ELECTRIQUES DES MOTEURS

"tour a eau" Créé par JBV le 12/12/02



On calcule alors la consommation électrique annuelle en multipliant la puissance absorbée par le temps de fonctionnement :

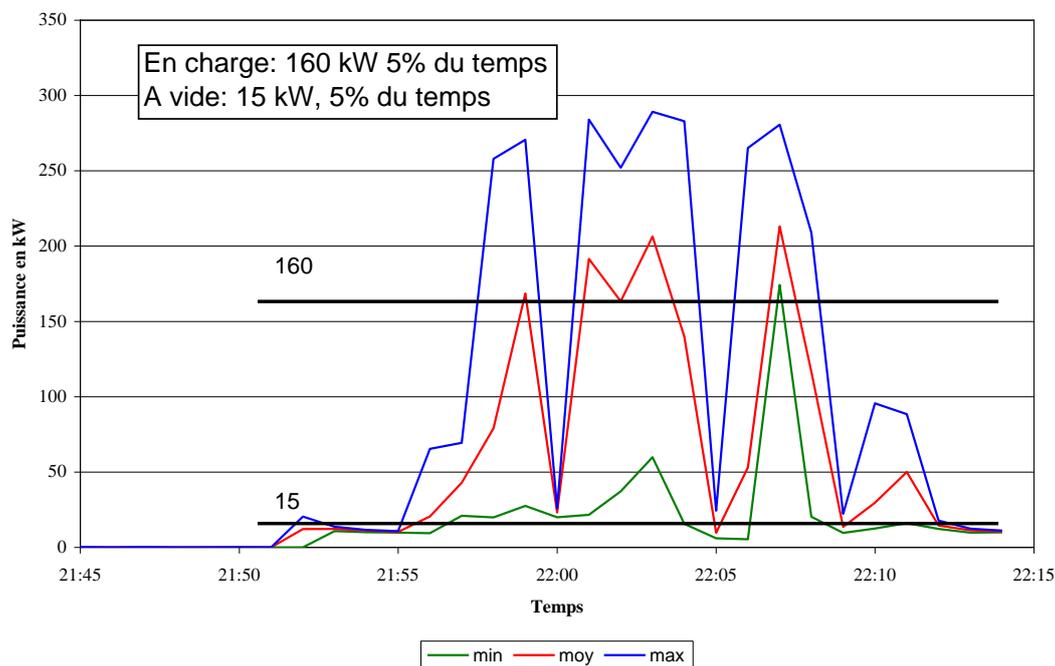
$$\text{Cons élec} = 54 \text{ (kW)} * 365 \text{ (jour/an)} * 24 \text{ (h/jour)} = 473040 \text{ kWh / an}$$



Ce temps peut être évidemment, comme dans l'exemple qui suit, la somme de 2 situations, l'une en charge, l'autre à vide :

$$\text{Cons (kWh/an)} = P \text{ charge (kW)} * \text{heures charge/an} \\ + P \text{ vide (kW)} * \text{heures vide/an}$$

MESURES ELECTRIQUES DES MOTEURS "Broyeurdr" Créé par JBV le 20/11/02



Dans cet exemple, la moyenne des puissances en charge est estimée à 160 kW et la moyenne des puissances à vide est de 7,5 kW. Si on suppose 5% du temps en charge et 5% du temps à vide, on calcule une consommation annuelle de 153300 kWh (il y a 2 broyeurs).

Fonction	Nbre	kW	kW tot	P(util)				Pcons (kW)	Pcons (kWh/an)	
				en charge	à vide	% util	% util			
Moteur étoile	2	4.0	8.0	8.0	8.0	5%	8.0	5%	0.8	7,008
Broyeur	2	160.0	320.0	320.0	320.0	5%	30.0	5%	17.5	153,300
Alimentations broyeurs	1	1.5	1.5	1.5	1.5	5%	1.5	5%	0.2	1,314
Sortie broyeur	2	1.5	3.0	3.0	3.0	5%	3.0	5%	0.3	2,628

Nous recommandons d'effectuer la répartition de la consommation sur base des mesures des plus gros moteurs uniquement.



2.2.2. Répartition sur base de l'estimation de la puissance utile

Pour les autres moteurs, nous suggérons de procéder comme suit :

$$\text{Puissance utile (kW)} = \text{Puissance nominale} * f$$

$$\text{Puiss absorbée} = \text{Putile (kW)} * \text{heures fonctionnement}$$

L'estimation du coefficient f , coefficient de foisonnement, se base sur le type d'équipement et la connaissance de cet équipement par l'exploitant, compte tenu des remarques faites au sujet de la liste des forces motrices. Il tient compte essentiellement du surdimensionnement de l'équipement par rapport au travail moteur à fournir.

On peut néanmoins établir quelques ordres de grandeur à titre indicatif :

Equipement	f	Equipement	f	Equipement	f
Aérotherme	0.85	Encartonneuse	0.60	Pompe Doseuse	0.69
Autoclave	0.85	Evaporateur	0.87	Pompe Eau Brute	0.85
Balance	0.73	Extracteur	0.85	Pompes à vide	0.68
Banderolleuse	0.85	Foreuse	0.85	Réfrigérateur	0.85
Broyeur	0.97	fraiseuse	0.85	Robot Palletiseur	0.09
Centrale d'air	0.85	Générateur Vapeur	0.85	Scelleuse sous vide	0.83
Chaudière	0.85	Ligne vide	0.45	Scie à ruban	0.85
Chiller	0.52	Meule	0.85	Surgélateur	0.85
Compresseur	0.63	Osmoseur	0.85	Surpresseur	0.50
convoyeur	0.61	Peseuse linéaire	0.58	Tour sèche	0.85
Convoyeur à godets	0.38	Pompe	0.81	Tour à eau	0.85
Elévateur	0.86	Pompe à vide	0.53	Ventilateur	0.85
Empileur	0.85				

f peut également être obtenu indirectement par le calcul à partir de la mesure de la puissance mesurée :

$$f = \text{Puissance mesurée} / \text{Puissance nominale}$$

Ligne	Fonction	Nbre	kW	kW tot	f	P(util)	P(util)		% util	
							en charge	à vide		
Ligne B	Moteur chaine supérieure	1	5.50	5.5	0.73	4.0	4.0	60%	0.0	0%
Ligne B	Elévateur à bennes	1	0.55	0.6	0.73	0.4	0.4	12%	0.4	0%
Ligne B	Ventilateur	2	0.55	1.1	0.73	0.8	0.8	12%	0.8	0%
Ligne B	Pompe	2	7.50	15.0	0.73	10.9	10.9	12%	10.9	0%



Ainsi dans l'exemple ci-dessus : $f = 4/5.5 = 0.73$, valeur qui sera reprise pour tous les équipements de la ligne de production « B ».

2.2.3. Répartition suivant la puissance installée

La méthode la plus simple mais aussi la moins fiable pour répartir la consommation d'un site est de se baser sur les puissances installées. Celles-ci sont souvent reprises, pour des raisons fiscales, dans une liste appelée « Liste des forces motrices ». Cette liste à l'avantage d'être souvent disponible.

Se baser uniquement sur cette liste comporte plusieurs risques :

- La liste inclut également des moteurs placés en back up d'une installation, qu'il faut éviter de comptabiliser
- La liste ne contient pas les puissances installées ni pour l'éclairage ni pour le chauffage (résistance électrique)
- Les moteurs sont souvent surdimensionnés par sécurité ou évolution attendue de l'usine
- La puissance d'un nouveau moteur sera souvent adaptée à la puissance d'autres moteurs, plus puissants mais plus fréquents sur le site, ce qui en facilite la maintenance et la gestion des pièces de rechange.
- Le nombre d'heure de fonctionnement de différentes lignes est rarement identique lorsque ces lignes travaillent en parallèle.

Dans l'exemple ci-dessous, les données sont en bleu :

	Puissance	Temps	Cons	
	kW	heures	kWh	
Moteur 1	10	1500	15000	23%
Moteur 2	20	2500	50000	77%
			65000	

		Facture	
		kWh	
Moteur 1	23%	12231	kWh
Moteur 2	77%	40769	kWh
	Facture	53000	



2.2.4. Exemple de répartition

Fonction	Nbre	kW	kW tot	f	P(util) en charge	% util	P(util) à vide	% util	Pcons (kW)	Pcons (kWh/an)
Chiller 1	1	145.8	145.8	0.52	76.4	57.1%		0.0%	43.6	382,000
Pompes 1	2	7.50	15.0	0.52	7.9	57.1%		0.0%	4.5	39,300
Chiller 2	1	30.00	30.0	0.52	15.7	80.0%		0.0%	12.6	110,167
Pompes 2	4	0.97	3.9	0.52	2.0	80.0%		0.0%	1.6	14,230
Tour refroid 1	2	18.50	37.0	0.25	9.3	80.0%		0.0%	7.4	64,824
Tour refroid 2	3	2.20	6.6	0.20	1.3	80.0%		0.0%	1.1	9,251
Tour refroid 3	2	4.80	9.6	0.52	5.0	40.0%		0.0%	2.0	17,627
Groupe Climatisation 1	1	25.6	25.6	0.52	13.4	40.0%		0.0%	5.4	46,913
Groupe Climatisation 2	1	17.2	17.2	0.52	9.0	40.0%		0.0%	3.6	31,581
Groupe Sécheur	1	8.8	8.8	0.52	4.6	40.0%		0.0%	1.8	16,121
Moteur chaine inf	2	5.50	11.0	0.73	8.0	12.0%	4.0	60.0%	3.4	29,434
Moteur chaine sup	1	5.50	5.5	0.73	4.0	60.1%		0.0%	2.4	21,056
Elévateur	1	0.55	0.6	0.73	0.4	12.0%	0.4	0.0%	0.0	420
Ventilateur	2	0.55	1.1	0.73	0.8	12.0%	0.8	0.0%	0.1	841
Pompe 3	2	7.50	15.0	0.73	10.9	12.0%	10.9	0.0%	1.3	11,468

Dans l'exemple ci-dessus Chiller 1:

- 145.8 kW nominal est mesuré (76,4 kW)
- coefficient $f = 0.52$ ($=76.4/145.8$) qui est repris pour les équipements similaires (travaillant dans le même environnement)
- taux d'utilisation est estimé à 57% ($=5000/8760$)

La même démarche est réalisée pour les autres lignes ou équipements : mesures Moteur chaîne inf et sup ainsi que les taux d'utilisation



2.3. Répartition de l'air comprimé

La compression de l'air est très énergivore. Le tableau suivant reprend quelques valeurs :

Pression bar	1 étage	2 étage	3 étage
	# Nm ³ pour 1 kWh		
0.5	91		
1	48		
2.5	24	26	
5	15	18	18
7	13	15	16
10	11	13	13
14	9	11	12

Comme ce tableau donne le nombre de Nm³ théorique qu'on a pu produire avec 1 kWh, on peut estimer la consommation en charge si on connaît le nombre de Nm³ produits.

Par ailleurs, la répartition de l'air comprimé entre les différents utilisateurs peut être estimée en tenant compte du débit passant à travers une section donnée :

Pression relative en bar	Diamètres des orifices en mm						
	0,5	1	2	3	5	10	12,5
0,5	0,2	0,8	3,3	7,4	20,6	82	128
1	0,3	1,2	4,8	10,9	30,2	121	189
2,5	0,5	2,1	8,4	19,8	52,6	211	329
5	0,9	3,5	14,1	31,6	87,7	351	548
7	1,2	4,7	18,7	41,9	117	466	729

Source Spirax Sarco

Il est inutile de rappeler que les fuites sur un réseau d'air comprimé sont rarement négligeables car elles sont difficilement identifiables dans le bruit général de l'usine. On estime qu'elles représentent entre 25 et 50% de la consommation des compresseurs. Une méthode facile pour les évaluer est de mesurer la consommation des compresseurs pour maintenir le réseau sous pression lors des arrêts (WE par exemple).

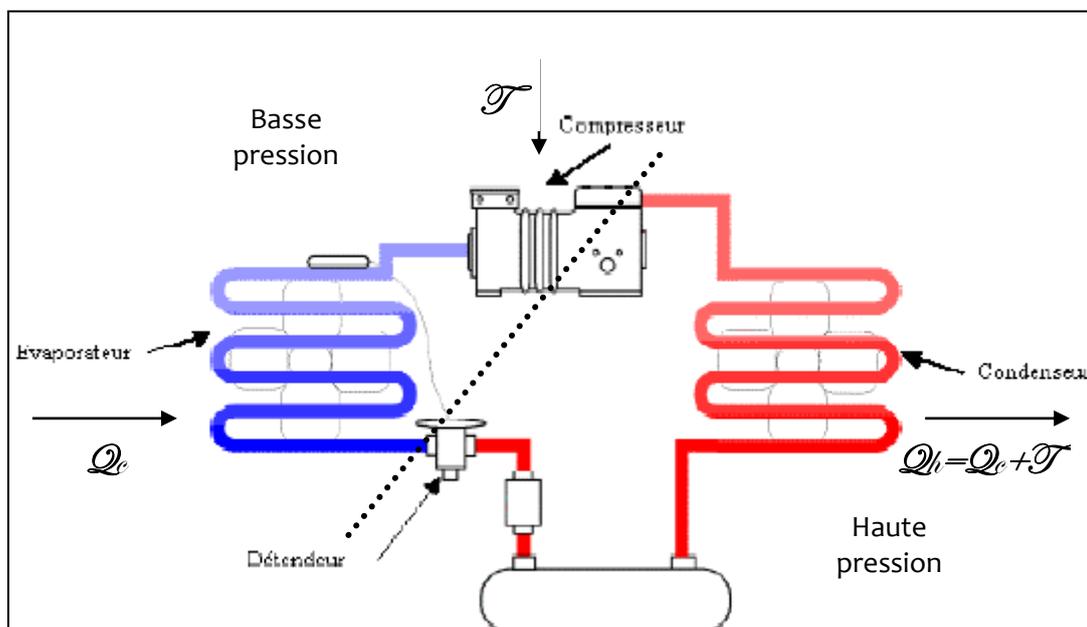
Enfin il est primordial de ne pas oublier qu'un compresseur (à vis, les plus répandus) a une consommation à vide non négligeable (voir [Exemple sur un compresseur](#)).

2.4. Répartition du froid

Le troisième énoncé qui résulte des équations de Carnot est celui qui concerne la possibilité d'inverser le fonctionnement de la machine thermique pour "remonter" de la chaleur d'une source froide vers une source chaude en fournissant du travail.

Le fait qu'il faille fournir du travail pour obtenir un effet de refroidissement ("une action frigorifique") est à nouveau une observation fondamentale. Un nouvel énoncé peut donc être formalisé pour exprimer autrement le second principe de la thermodynamique :

"Il est possible de construire une machine thermique qui, parcourant un cycle de transformation, se borne à transférer de la chaleur d'une source froide à une source chaude".



Ceci introduit la notion de coefficient de performance d'une machine frigorifique, d'un climatiseur ou d'une pompe à chaleur :

$$\text{Coefficient de performance} = \text{"COP"} = Q_c / \mathcal{T} = T_c / (T_h - T_c)$$

Où \mathcal{T} est le travail mécanique de compression (W)

Q_c est la quantité de chaleur pour l'évaporation

T_c est la température de la source froide

T_h est la température de la source chaude



Par exemple, une climatisation qui fonctionne en été doit "remonter" la chaleur d'un local à 20°C jusqu'à la température extérieure soit 30°C. Pour cela, un compresseur fait tourner un fluide frigorigène (anciennement l'ammoniac ou un "fréon") dans l'évaporateur qui "prend" la chaleur à la source froide à 20°C et la "cède" dans un condenseur en contact avec la source chaude à 32°C. Pour "prendre" et "céder" de la chaleur, il faut des écarts de température. C'est pourquoi le liquide frigorigène sera évaporé par exemple à 17°C (290 K) et sera condensé par exemple à 37°C (310 K). Pour maintenir ces températures des 17°C et 37°C le compresseur et le détendeur réalisent ensemble des pressions différentes côté évaporateur et côté condenseur. On peut alors calculer le coefficient de performance théorique maximum de la climatisation :

$$\text{COP} = 290 / (310 - 290) = 20.$$

Ce qui exprime que la climatisation pourrait théoriquement produire 20 fois plus de froid qu'elle ne consomme d'énergie électrique pour faire tourner le compresseur. En réalité, compte tenu des autres rendements (moteur électrique, compression, transports fluide, propriétés thermodynamiques du fluide frigorigène réel, etc.) le COP d'une machine frigorigène souvent ne dépasse pas 3 à 3,5.

On peut donc retenir en pratique que 1 kWh électrique fournit 2 à 3,5 kWh de froid.



2.5. Exemples de calcul sur différents équipements

2.5.1. Exemple sur une résistance électrique chauffante

Comme le chauffage à travers une résistance est obtenu par effet Joule, on considère que la puissance absorbée = à la puissance installée à condition évidemment que la résistance ne soit pas variable (condition rarement rencontrée sur site).

2.5.2. Exemple sur un compresseur

Les constructeurs prévoient la plus part du temps des compteurs d'heure, valeurs que l'on peut soit relever, soit enregistrer.

On a alors

$$\text{Cons (kWh/an)} = P \text{ charge (kW)} * \text{heures charge/an} \\ + P \text{ vide (kW)} * \text{heures vide/an}$$

Où les puissances en charge et à vide sont mesurées ou estimées.

Dans le cas des compresseurs à vis, la puissance à vide n'est pas du tout négligeable et peut représenter 40 à 60 % de la puissance en charge.

Dans l'exemple suivant :

$$P \text{ absorbée en charge} = 160 \text{ kW} \rightarrow P \text{ abs à vide} = 2/3 \text{ } 160 \text{ kW}$$

$$\text{Heures en charge} = 3132 \rightarrow \text{Heures à vide} = 8760 - 3132 = 5628 \text{ h}$$

$$P = 160 * 3132 + 2/3 * 160 * 5628 = 1101440 \text{ kWh}$$

		ELE
	Réf. Compta	Electricité (en kWh)
Utilité		TT
Production air comprimé		=160*(1*3132+2/3*5628)



2.5.3. Exemple sur une pompe

En théorie, la puissance nécessaire pour pomper de l'eau d'une hauteur h_1 à une hauteur h_2 est donnée par

$$P_{\text{util}} (W) = \rho * g * D * (h_2 - h_1)$$

où

☞ ρ = masse volumique (1000 kg / m³)

☞ g = 9.81 m/s²

☞ D = débit en m³ / s

Par exemple, la puissance électrique maximale que pourrait développer la chute d'eau d'un robinet (1 m et 10 l / min) vaut :

$$P_{\text{puissance}} = 1000 * 9.81 * (10 * 60 / 1000 / 3600) * 1 = 1.7 \text{ W}$$

Ce qui est très petit.

En pratique la puissance absorbée par une pompe dépend en plus

- Du rendement de la pompe ;
- Des forces de frottement dans les tuyauteries.

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{util}} * \xi$$

$$\text{Où } \xi = 0.6 \dots 0.8$$



2.5.4. Exemple sur l'éclairage

Relevé des puissances électriques installées

Type	Lieu	W	m ²	W/m ²	Heures / jour	Heures	kWh
Contrôle	1	3944	108	37	9	2052	8902
Contrôle	2	1276	38	34	9	2052	2880
Contrôle	3	928	41	22	9	2052	2095
Contrôle	4	696	27	26	9	2052	1571
Contrôle	5	3596	179	20	9	2052	8117
Production	1	2332	386	6	11	2508	6434
Production	2	5704	714	8	16.5	3762	23604
Production	3	2088	229	9	16	3648	8379
Production	4	7772	905	9	10	2280	19492
Production	5	2784	450	6	18	4104	12568
Production	6	2552	214	12	11	2508	7040
Production	7	1798	377	5	10	2280	4509
Production	8	1392	117	12	18	4104	6284
Stockage	1	696	252	3	24	5472	4189
Stockage	2	696	76	9	18	4104	3142
Stockage	3	2610	1802	1	9	2052	5891
Stockage	4	4144	743	6	9	2052	9354
Stockage	5	4000	306	13	9	2052	9029
Stockage	6	406	140	3	24	5472	2444
Stockage	7	2802	321	9	9	2052	6325

Répartition par type de bâtiments (caractérisés par des densités d'éclairage différentes)

Type	Données	Total
Contrôle	Somme de m ²	392
	Moyenne de W/m ²	28
	Somme de kWh	23565
Production	Somme de m ²	3391
	Moyenne de W/m ²	8
	Somme de kWh	88311
Stockage	Somme de m ²	3640
	Moyenne de W/m ²	6
	Somme de kWh	40374
Total Somme de m ²		7423
Total Moyenne de W/m ²		12
Total Somme de kWh		152250



2.6. Conciliation

Dans tous les cas il convient de chercher à concilier le total des consommations des lignes avec le total facturé. L'écart toléré est de $\pm 1\%$.

3	Année : 2004		Vecteurs Achetés		
4			ELEC	GN	GAZ
5		Réf. Compta	Electricité (en kWh)	Gaz Naturel (en kWh)	Gasoil (en l)
6	01	Production	TT	TT	TT
42	02	Bâtiment	TT	TT	TT
43	02.01	Eclairage et bureautique	214,676	XX	XX
44	02.02	Chauffage	XX	63,194	XX
45	02.03	Climatisation	XX	XX	XX
46	03	Utilité	TT	TT	TT
47	03.01	Froid process NH4	1,634,688	XX	XX
48	03.02	Froid bâtiment glycol	609,120	XX	XX
49	03.03	Air comprimé	69,090	XX	XX
50	03.04	Eau Chauffage	XX	1,877,860	XX
51	03.05	Eau chaude électrique	345,155	XX	XX
52	Totaux		3,518,634	1,941,054	60,000
53					
54	Total Acheté		3,496,938	1,941,054	60,000
55	Total exporté				
56	Ecart Stock				
57	Ecart Total Usine / acheté		-21,696	0	0
58	Ecart en %		-0.62	0.00	0.00

En final, il convient de vérifier qu'aucun double comptage n'a été fait.

La plupart du temps, le compteur général de l'usine est placé en amont du ou des transformateurs. Dans ce cas, il convient d'ajouter les pertes en charge et à vide du transformateur, qui représentent de l'ordre de 1.5 % de la puissance consommée dans l'usine.

Si la différence Usine – facture est trop importante, il convient de revoir de façon cohérente certaines des hypothèses prises dans les calculs, en veillant bien à corriger l'ensemble des utilisateurs concernés par l'hypothèse modifiée, en modifiant par exemple, le temps de fonctionnement total, annuel, le coefficient de puissance ou encore le $\cos\phi$ (puissance réactive).

Ce type de démarche par itération sur le calcul de répartition de la consommation reconstituée permet d'approcher plus précisément la facture annuelle réelle d'électricité.



3. Gaz Naturel / Gasoil

3.1. Unités

L'énergie développée par la combustion du gaz naturel devrait s'exprimer en Joules.

1 Joule = 1J

1 000 Joules = 1kJ

1 000 kJ = 1 MJ

1000 MJ = 1 GJ

Souvent l'énergie de combustion développée par le gaz naturel ou le gasoil est exprimée en kWh

1kWh = 1 kW * 1 heure

Comme 1W = 1 J/s, on a le coefficient de conversion suivant :

1kWh = 1000 W * 1 h = 1000 J/ s * 3600 s = 3600000 J = 3600 kJ

Facteurs de conversion (unité d'énergie)					
	tep	GJ	MWh	kcal	Stère
tep	1	41,86	11,628	1,000E+07	7,248
GJ	0,0239	1	0,2778	238891,5	0,1732
MWh	0,0860	3,6	1	860000	0,6234
kcal	1,000E-07	4,186E-06	1,163E-06	1	7,248E-07
Stère	0,1380	5,78	1,604	1,380E+06	1

Les Nm³ sont à éviter car leur contenu énergétique varie en fonction de l'origine du gaz.

Notons que des valeurs lues sur un compteur gaz sont exprimées en m³. Par contre, comme les factures sont exprimées en Nm³, il convient de corriger les valeurs lues pour la température et la pression par la formule suivante :

$$V_0 = V_1 * \frac{273}{(273+t)} * \frac{(1.013 + p)}{1.013}$$

Donc si on mesure 200 m³/h à 20°C et une pression (relative) de 3 bars, on a V₀ = 738 Nm³/h.

3.2. Pouvoir calorifique

La combustion du gaz naturel entraîne la formation de CO₂ et de vapeur d'eau à haute température. L'énergie contenue dans cette vapeur d'eau peut être récupérée (condensée) par exemple grâce à l'utilisation d'une chaudière à condensation.

Dans la majorité des procédés industriels, l'énergie libérée par la condensation de la vapeur d'eau des fumées de combustion n'est pas récupérée. C'est pourquoi ; on exprime conventionnellement le contenu énergétique du gaz naturel en fonction de son PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur).

Par contre, la société de distribution facture évidemment le contenu total d'énergie, exprimé en terme de PCS, pouvoir calorifique supérieur.

En Belgique on a le plus fréquemment (Gaz naturel de type riche) :

$$\text{PCI} = \sim 36500 \text{ kJ/Nm}^3 = \sim 10 \text{ kWh/Nm}^3$$

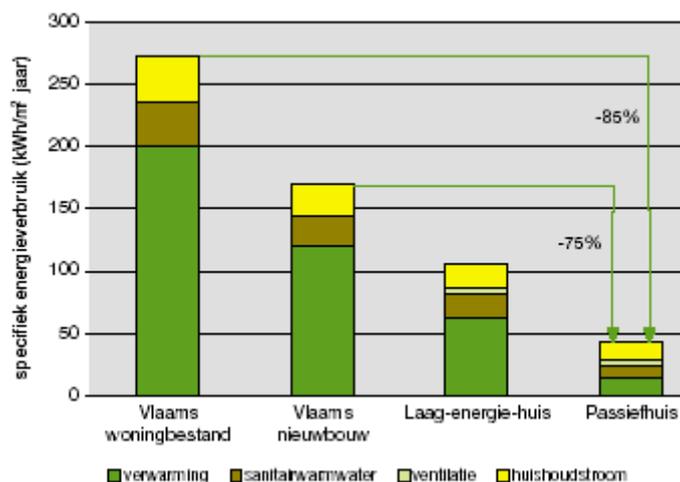
$$\text{PCS} = \sim 405000 \text{ kJ/Nm}^3 = \sim 11 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$\text{PCI} = \sim 0.9 * \text{PCS}$$

Nous préconisons d'utiliser de préférence le PCS pour concilier sans risque d'erreur.

3.3. Chauffage bâtiments

Le graphique suivant donne des ordres de grandeur en kWh/m² pour les besoins annuels en chauffage des bâtiments.

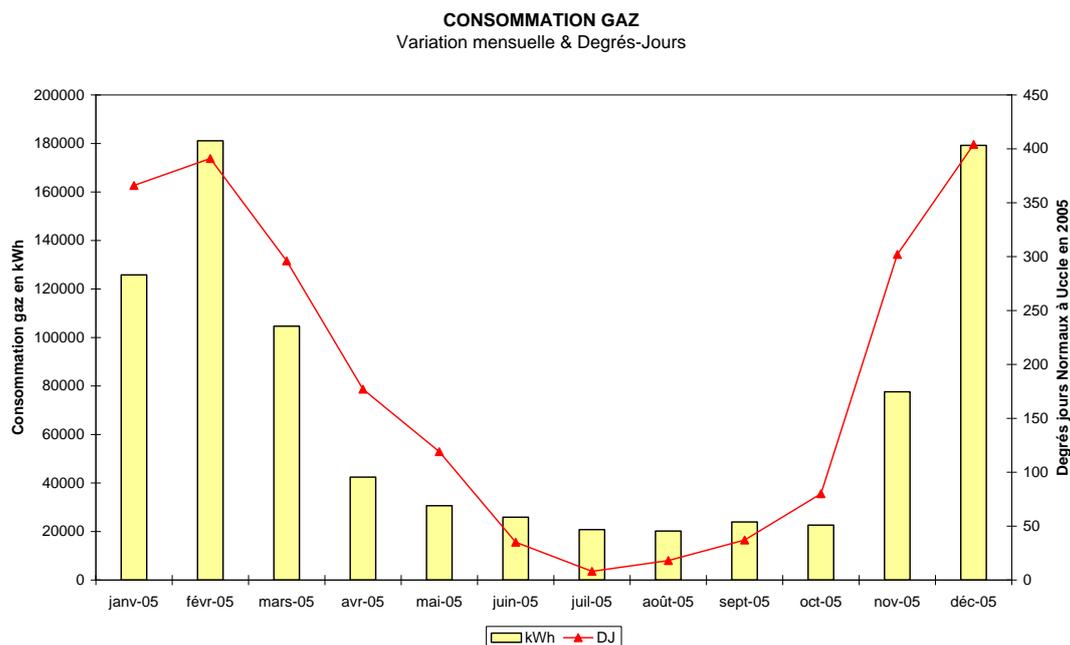


Ainsi pour des bureaux « anciens », on peut avoir des consommations de l'ordre de 200 kWh / m²/ an, alors que pour une nouvelle construction, on devrait plutôt avoir de l'ordre de 130 kWh / m² et / an.

A titre informatif, des bâtiments peu consommateurs en énergie (60 kWh/m²/an) sont équipés au minimum de :

- bonne isolation (>12 cm)
- double vitrage ($k < 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- ventilation mécanique double flux (avec récupération de chaleur)
- chaudière à condensation

Comme la consommation en chauffage des bâtiments est liée aux variations saisonnières, l'observation des variations mensuelles des factures peut donner une bonne idée des besoins en chauffages des bâtiments.



Ainsi dans l'exemple précédent, comme la consommation moyenne en été est de 33000 kWh/mois et celle d'hiver est de 134000 kWh/mois, on en déduit que les besoins en chauffage annuels sont de 5 mois * (134000 – 33000 kWh) = ~ 500000 kWh/an. Le solde est donc consommé par le procédé et la production d'eau chaude sanitaire.



3.4. Eau chaude sanitaire

Le calcul du contenu énergétique de l'eau est le suivant :

Chaleur massique = 1 kcal/kgK = 4,186 kJ/kgK

$$Q \text{ (kWh)} = m \text{ (litre/jour)} * 4.186 * (T_2 - T_1) * \text{temps (jours)} / 3600$$

Ainsi par exemple, la consommation de 10 douches/jour à raison de 50 litres /douche et 220 jours par an pour de l'eau chauffée à 55°C et entrant à 10°C :

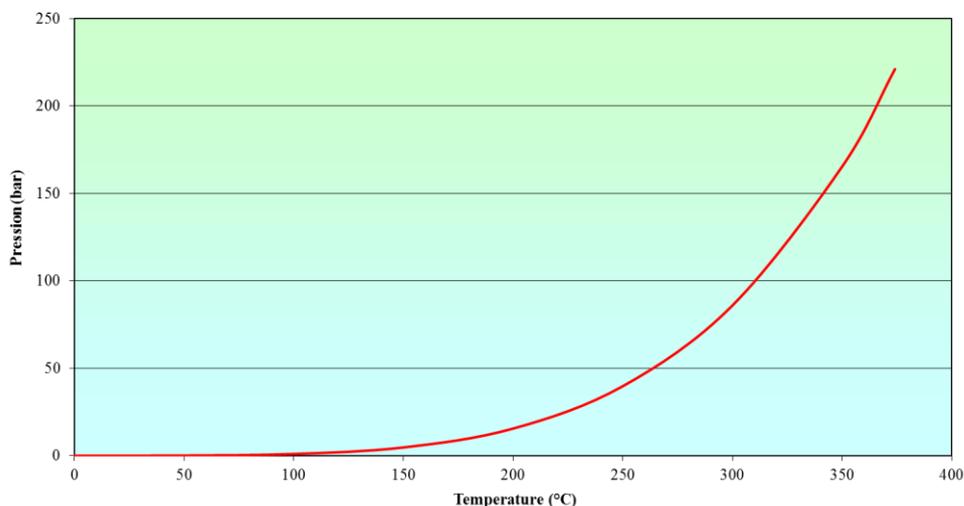
$$Q = 10 * 50 * 4.186 * (55 - 10) * 220 / 3600 = 5756 \text{ kWh}$$

3.5. Vapeur

Il existe à chaque niveau de pression une température à laquelle débute la vaporisation de l'eau. La courbe ainsi créée dans un diagramme P/T est la courbe de tension de vapeur.



Courbe de Tension de vapeur



Pour une pression donnée, la chaleur transmise à l'eau fait monter sa température, puis lorsque la température de vaporisation est atteinte, la chaleur permet de vaporiser l'eau et la température reste constante.

La chaleur nécessaire pour créer de la vapeur se répartit en 2 parties :

La chaleur sensible c'est l'énergie qui fait varier la température de l'eau sans en changer l'état.



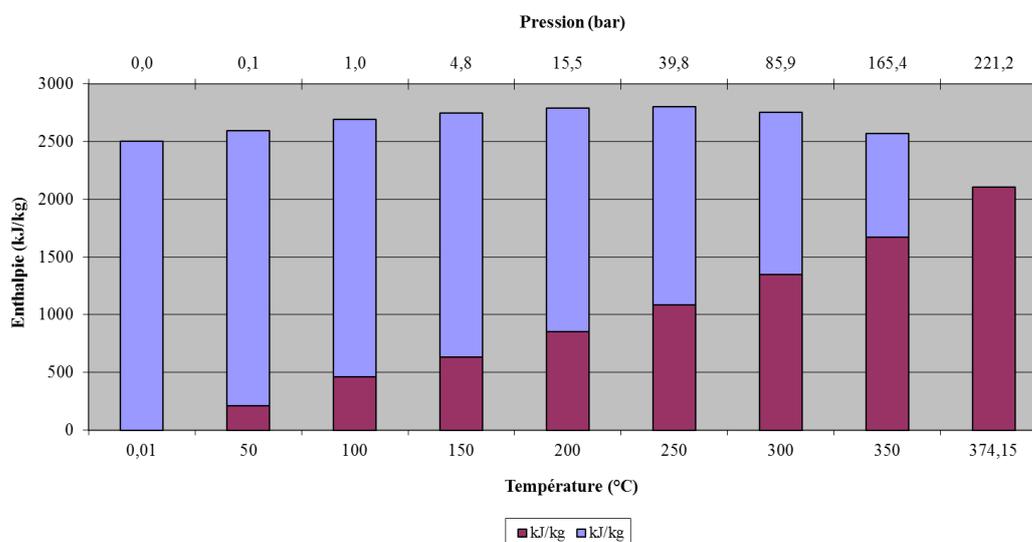
La chaleur latente c'est l'énergie qui fait changer l'état du corps sans en modifier la température.

A 100°C (1 bar), il faut 5 fois plus d'énergie pour changer d'état que pour amener l'eau de 0° à 100°C. Ceci met néanmoins en évidence la nécessité de récupérer les condensats dans un réseau vapeur (20% d'économie potentiel).



Propriété thermodynamique de la vapeur d'eau saturée

JBV Créé le 17/07/2007 "3J_Enthalpie_20070717_JBV.xls"



On voit ainsi que plus on vaporise à haute température (haute pression) plus on met de l'énergie dans l'eau sous forme de liquide et moins il faut en mettre pour la vaporiser. Au-delà d'un certain niveau de température ou de pression, il n'est plus possible de transformer l'eau en vapeur.

T° T °C	Pression P bars	Ch sensible h' kJ/kg	Ch latente h'' kJ/kg	Ch Vap r kJ/kg
0.01	0.0	0.0	2501.6	2501.6
50	0.1	209.3	2592.2	2382.9
100	1.0	461.3	2691.3	2230.0
150	4.8	632.2	2745.4	2113.3
200	15.5	852.4	2790.9	1938.5
250	39.8	1085.8	2800.4	1714.6
300	85.9	1345.0	2751.0	1406.0
350	165.4	1671.9	2567.7	895.8
374.15	221.2	2107.4	2107.4	0.0



Et donc en pratique, on peut retenir que :

- condensats: 1 m³ à 100°C contient 461 MJ = 128 kWh
- 1 tonne de vapeur (3... 10 bars) : environ 2750 MJ = 736 kWh

3.6. Four de réchauffage de produits

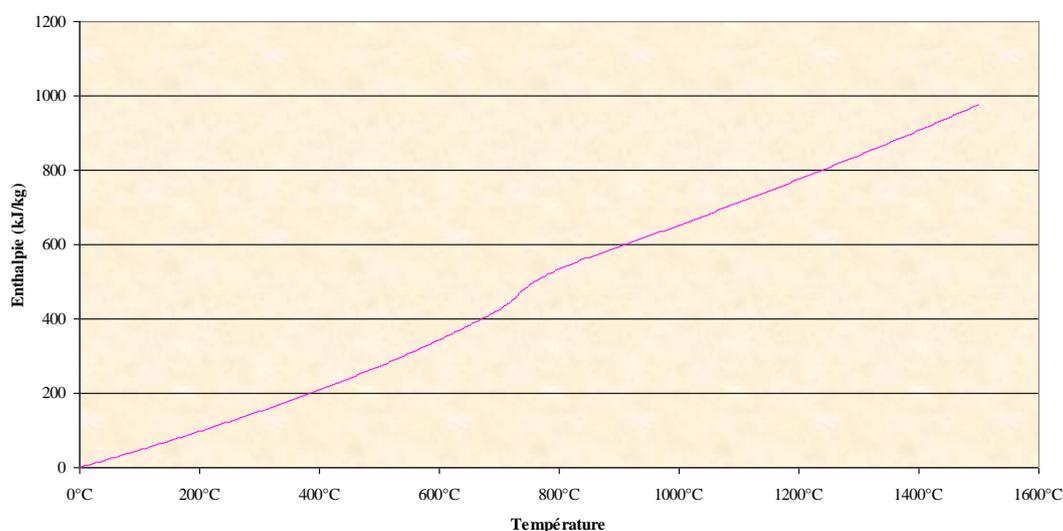
La consommation d'un four doit évidemment tenir compte des différentes pertes thermiques.

La puissance thermique "Qo" apportée par le gaz naturel aux brûleurs se répartit de la manière suivante :

- "Qu" est la puissance utile c'est-à-dire qui est emportée par la charge (four statique ou continu);

Pour un acier au carbone traditionnel, on observe :

Enthalpie de l'acier carbone



L'enthalpie est une fonction d'état : ($h = \int Cp(T)dT$).

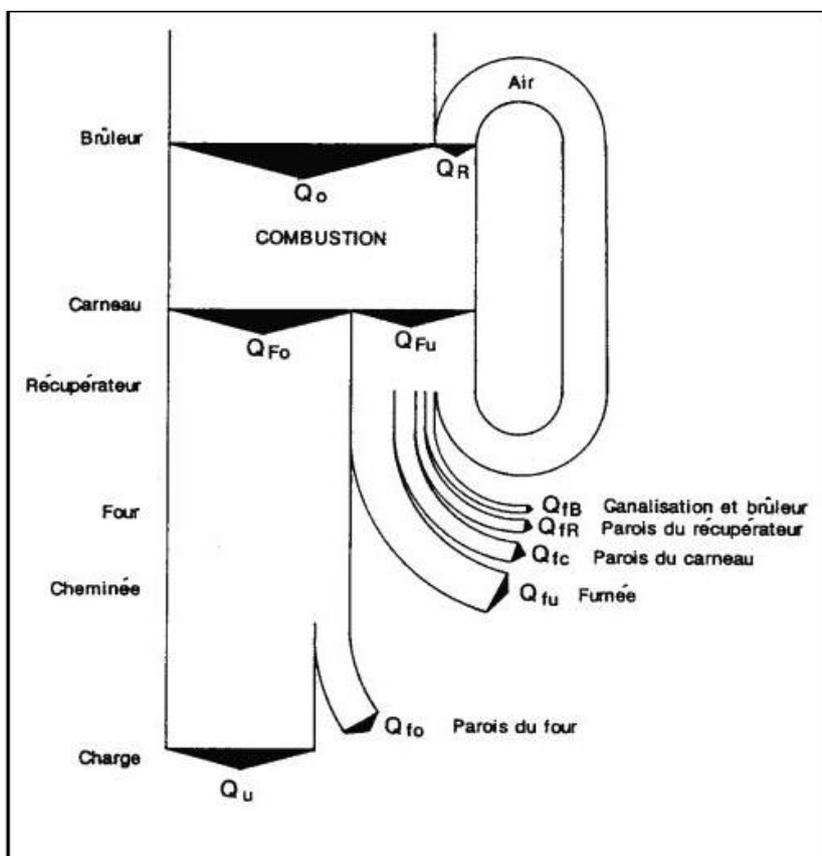
L'enthalpie à 650°C = 382.6 kJ/kg

L'enthalpie à 0°C = 0 kJ/kg

Δh de 0°C à 650°C = 382.6 kJ/kg

- " Q_{fo} " est la puissance totale correspondante aux pertes par conduction au travers des parois et aux pertes par rayonnement par les ouvertures de l'enceinte;
- " Q_{fc} " est la perte thermique du carneau de fumées;
- " Q_{fR} " est la perte thermique du récupérateur éventuel;
- " Q_{fu} " est la perte à la cheminée;
- " Q_{fB} " est la perte thermique des conduites d'air chaud.

Voici un schéma qui illustre la manière dont l'énergie apportée par le gaz naturel est utilisée ou perdue dans le four :



Les autres termes désignent des puissances "internes" c'est-à-dire qui n'interviennent pas dans les entres / sorties de la "boîte noire" constituée par le four, sa charge, son carneau, son récupérateur et ses conduites d'air chaud.

Dans la pratique, le rendement global d'un four dépasse rarement 50% s'il n'y a pas de récupérateur de chaleur dans les fumées et peut monter à 70% dans le cas contraire, voire au-delà dans le cas de brûleurs régénératifs.

