



OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle
et de la Promotion du Travail
DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

FROID ET GÉNIE THERMIQUE

RÉSUMÉ THÉORIQUE & GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

Module n°

PHYSIQUE ÉNERGETIQUE

Spécialité :

TECHNICIEN SPECIALISE EN GENIE CLIMATIQUE

Niveau :

TECHNICIEN SPECIALISE

DECEMBRE 2004





ISTA.ma
Un portail au service
de la formation professionnelle

Le Portail <http://www.ista.ma>

Que vous soyez étudiants, stagiaires, professionnels de terrain, formateurs, ou que vous soyez tout simplement intéressé(e) par les questions relatives aux formations professionnelles, aux métiers, <http://www.ista.ma> vous propose un contenu mis à jour en permanence et richement illustré avec un suivi quotidien de l'actualité, et une variété de ressources documentaires, de supports de formation, et de documents en ligne (supports de cours, mémoires, exposés, rapports de stage ...) .

Le site propose aussi une multitude de conseils et des renseignements très utiles sur tout ce qui concerne la recherche d'un emploi ou d'un stage : offres d'emploi, offres de stage, comment rédiger sa lettre de motivation, comment faire son CV, comment se préparer à l'entretien d'embauche, etc.

Les forums <http://forum.ista.ma> sont mis à votre disposition, pour faire part de vos expériences, réagir à l'actualité, poser des questionnements, susciter des réponses. N'hésitez pas à interagir avec tout ceci et à apporter votre pierre à l'édifice.

Notre Concept

Le portail <http://www.ista.ma> est basé sur un concept de gratuité intégrale du contenu & un modèle collaboratif qui favorise la culture d'échange et le sens du partage entre les membres de la communauté ista.

Notre Mission

Diffusion du savoir & capitalisation des expériences.

Notre Devise

Partageons notre savoir

Notre Ambition

Devenir la plate-forme leader dans le domaine de la Formation Professionnelle.

Notre Défi

Convaincre de plus en plus de personnes pour rejoindre notre communauté et accepter de partager leur savoir avec les autres membres.

Web Project Manager

- Badr FERRASSI : <http://www.ferrassi.com>

- contactez : admin@ista.ma

REMERCIEMENTS

La DRIF remercie les personnes qui ont participé ou permis l'élaboration de ce Module de formation.

Pour la supervision :

M. GHRAIRI Rachid
Thermique

Directeur du CDC Froid et Génie

M. BOUJNANE Mohamed
Thermique

Chef du pôle Froid et Génie

Pour l'élaboration

M. DENIEUL

Formateur au G.E.F.En

Pour la validation :

Les utilisateurs de ce document sont invités à communiquer à la DRIF toutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme.

**M. SAID SLAOUI
DRIF**

SOMMAIRE

1 Les systèmes d'unités	5
2 La masse	6
3 Le volume	6
4 La masse volumique	6
5 La dilatation de l'eau	7
6 Le débit	8
6.1 Définition	8
6.2 Loi de conservation des débits massiques (loi des nœuds)	8
7 La vitesse linéaire	8
7.1 Définition	8
7.2 Relation débit, vitesse, section	8
8 La force	8
9 La pression	9
9.1 La pression statique	9
9.2 Les unités de pression	11
9.3 Pression relative (effective), pression absolue	11
9.4 Pression de service, timbre.....	12
9.5 Pression d'épreuve.....	12
10 La température	12
10.1 Définition	12
10.2 Conversions	13
11 L'énergie et la puissance thermiques	13
11.1 Les formes d'énergies	13
11.2 Conservation de l'énergie.....	14
11.3 Notion de rendement	14
11.4 Travail d'une force W, énergie mécanique.....	14
11.5 Puissance d'une force	14
11.6 Chaleur	15
11.7 La puissance thermique.....	16
11.8 Chaleur sensible et chaleur latente.....	17
11.9 Echange de chaleur par convection.....	18
11.10 Echange de chaleur par conduction	19
11.11 Echange de chaleur global	21

12 La vapeur d'eau	22
12.1 Les changements d'état	22
12.2 Relation pression / température d'ébullition.....	22
12.3 Surchauffe et sous-refroidissement	23
12.4 Energies mises en jeu	23
12.5 Valeurs usuelles de pression et de vitesse	29
12.6 Détente et surchauffe.....	30
12.7 Désurchauffe.	31
13 L'énergie de la combustion	31
13.1 Origine de la combustion	31
13.2 Le pouvoir calorifique	31
13.3 Caractéristiques physiques des combustibles les plus courants	32
13.4 Puissance et énergie de la combustion	32
13.4 Rendements	32
14 Les fluides frigorigènes.....	33
14.1 Intérêt des fluides.....	33
14.2 Classification des fluides	33
14.3 Impact des fluides sur l'environnement.....	34
14.4 Termes physiques.....	35
15 La machine frigorifique.....	36
15.1 Les principaux éléments.....	36
15.2 Bilan de machine frigorifique	37
16 Le diagramme de l'air humide.....	40
16.1 L'humidité absolue (teneur en humidité de l'air)	40
16.2 L'humidité relative ou hygrométrie de l'air	40
16.3 La température de rosée.....	41
16.4 La température humide.....	41
16.5 L'enthalpie de l'air	42
16.6 Le volume spécifique de l'air	42
17 Les évolutions élémentaires en traitement d'air	43
17.1 Le mélange d'air neuf et d'air recyclé.....	43
17.2 Le réchauffage de l'air.....	44
17.3 Le refroidissement de l'air	44
17.4 L'humidification de l'air par vapeur d'eau	46
17.5 L'humidification de l'air par eau.....	47
17.6 La déshumidification de l'air	48

1 LES SYSTEMES D'UNITES

Les grandeurs physiques permettent de décrire des phénomènes tels que le mouvement, la propagation de la chaleur, de la lumière.

Pour définir toutes les grandeurs physiques, il faut choisir des unités.

Ces dernières sont exprimées dans le système international (SI). Les grandeurs physiques de base appelées grandeurs fondamentales sont indépendantes et ne peuvent être réduites aux autres unités.

Grandeurs fondamentales	Unités	Symboles
longueur	mètre	l [m]
masse	kilogramme	m [kg]
temps	seconde	t [s]
intensité du courant électrique	ampère	I [A]
température	kelvin	T [K]
angle	radian	α [rad]
quantité de matière	mole	[mol]
Grandeurs dérivées	Unités	Symboles
surface	mètre carré	S [m ²]
volume	mètre cube	V [m ³]
masse volumique	kilogramme par mètre cube	ρ [kg/m ³]
débit	kilogramme par seconde	q _m [kg/s]
force	newton	F [N]
pression	pascal	p [Pa]
vitesse	mètre par seconde	v [m/s]
	radian par seconde	ω [rad/s]
énergie	joule	Q W [J]
puissance	watt	P [W]
moment d'une force	newton mètre	M [N.m]
fréquence	hertz	f [Hz]
tension électrique	volt	U [V]
charge électrique	coulomb	Q [C]
résistance électrique	ohm	R [Ω]
conductance électrique	siemens	G [S]
champ électrique	volt par mètre	E [V/m]

Pour des raisons pratiques, relatives à chaque corps de métier, elles peuvent être exprimées en unités multiples et sous multiples, ou à l'aide d'autres unités.

Exemples :

- unité de chaleur : la calorie [cal] ou le wattheure [Wh]
- unité de vitesse de rotation : le tour par minute [tr/min].

2 LA MASSE

C'est la quantité de matière qui compose un corps. Elle est notée **m** [kg].

Un corps est composé de molécules ou associations d'atomes (carbone, hydrogène, soufre), dont la masse est fixe.

La masse est constante quelles que soient les évolutions subies :

- chauffage, refroidissement
- compression, détente.

Pour modifier la masse d'un corps, il faut enlever de la matière. Pour effectuer des bilans, on raisonnera donc toujours sur les masses.

3 LE VOLUME

C'est l'espace occupé par la matière. Il est noté **V** [m³]. Il traduit l'éloignement des molécules d'un corps les unes par rapport aux autres.

Cet éloignement est variable en fonction des évolutions subies :

- chauffage : le corps occupe plus d'espace pour une même masse (dilatation)
- compression, le corps occupe moins d'espace pour une même masse.

Lorsque l'on décrit des phénomènes physiques, on raisonnera toujours en masse. Toutefois, sous certaines hypothèses, les variations de volume engendrées par le réchauffage, ou le refroidissement sont parfois faibles. On pourra alors raisonner dans le domaine du génie climatique, par souci de simplification, en volume. Ce qui n'est pas le cas pour les évolutions subies par l'eau et la vapeur dans un process industriel.

4 LA MASSE VOLUMIQUE

C'est la masse d'un corps pour un volume de 1 [m³]. La masse volumique permet de répondre à la question suivante : **Combien de kilogrammes dans un mètre cube ?**

Elle est notée ρ [kg/m³] :

$$\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}}$$

La masse volumique dépend des conditions de température et de pression.

- ρ augmente avec la pression.
- ρ diminue lorsque la température augmente.

On donnera toujours ρ pour des conditions standard de pression et de température définies, par exemple à pression atmosphérique et à 0 [°C].

Masses volumiques [kg/m^3] à 20 [°C]	
Eau	998,3
Fuel	850
Cuivre	8930
Fer	7880
Charbon	800

Masses volumiques des gaz [$\text{kg}/\text{m}^3(n)$] à 0 [°C] et p_{atm}	
Air	1,293
Gaz naturel	0,8
Butane	1,68
Propane	1,98

5 LA DILATATION DE L'EAU

Lorsque l'on chauffe de l'eau, celle-ci se dilate. La quantité d'eau (ou la masse) reste constante mais son volume augmente. Pour déterminer l'augmentation du volume d'eau, il faut connaître la température de chauffage et le volume d'eau initial.

En fonction de la température de chauffage, on donne les coefficients de dilatation qui représentent l'augmentation du volume d'eau pour 100 litres pris à 10 [°C] initialement.

Un coefficient de 3 % représente une augmentation de 3 litres pour 100 litres, soit un volume final de 103 litres.

<i>T de l'eau [°C]</i>	<i>% de volume de dilatation</i>
50	1,2
80	2,9
90	3,6
110	5
120	5,8
130	6,8
140	7,8
150	8,9
160	10
170	11,3
180	12,6
190	14
200	15,5

Une installation remplie avec 20 [m^3] d'eau froide à 10 [°C] puis chauffée à 200 [°C] occupera finalement 23,1 [m^3].

6 LE DEBIT

6.1 Définition

Le débit définit une quantité de matière écoulée pendant une durée donnée.

On distingue le **débit massique** [kg/s] et le **débit volumique** [m³/s]. Ce dernier varie en fonction des conditions de pression et de température : le débit volumique d'air augmente au passage au travers une batterie chaude.

En pratique, on indiquera les débits de vapeur d'eau en [t/h].

6.2 Loi de conservation des débits massiques (loi des nœuds)

Lorsque l'on isole un système où s'effectue des écoulements, on peut écrire que :

$$\Sigma \text{ débits entrant} = \Sigma \text{ débits sortant}$$

7 LA VITESSE LINEAIRE

7.1 Définition

On peut définir la vitesse comme étant la $\frac{\text{distance parcourue}}{\text{durée du parcours}}$.

La notion de vitesse moyenne ne prend pas en compte les changements d'allure. Il faut donc pouvoir mesurer la vitesse à un moment donné : c'est la vitesse instantanée. Le compteur d'une automobile donne $v_{\text{instantanée}}$. Certains appareils de mesure comme les anémomètres à hélice permettent de mesurer la vitesse de l'air.

On définit la vitesse en indiquant :

- son intensité [m/s]
- sa direction et son sens.

La vitesse de l'eau dans les canalisations de chauffage est d'environ 1 [m/s], celle de l'air dans les centrales de traitement d'ambiance est de l'ordre de 2 [m/s]. La vitesse de la vapeur dans les conduites de distribution est de plusieurs dizaines de [m/s].

7.2 Relation débit, vitesse, section

Dans une canalisation, on peut déterminer le débit volumique de fluide qui s'écoule, si l'on connaît la section de passage de la canalisation et la vitesse du fluide à l'intérieur de cette canalisation. La vitesse peut être mesurée à l'aide de diaphragme, d'anémomètre, de venturi...

En génie climatique, la vitesse de l'air n'étant pas constante dans une même section de gaine, on déterminera la vitesse moyenne.

$$q_v [m^3/s] = v[m/s] \times S[m^2]$$

8 LA FORCE

La force est une action susceptible de provoquer des déformations, des déplacements. Elle s'exprime en Newton. Elle est notée F [N].

Elle est définie par :

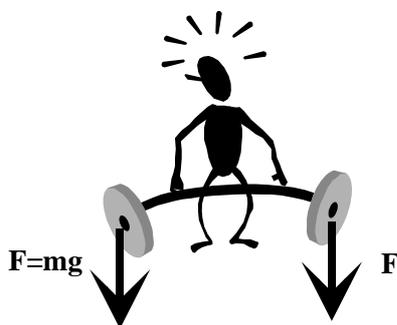
- son intensité en newton [N]
- sa direction et son sens.

Origine des forces :

- Le gaz comprimé à l'intérieur d'une bouteille exerce des « forces pressantes » sur la bouteille.
- L'eau d'une piscine exerce des forces sur le fond de la piscine.
- Les forces de frottements s'opposent au déplacement.

Les forces ont aussi pour origine :

- la gravitation $F = m \times g$ avec g environ égal à 10 (constante).
- les interactions magnétiques (pôles identiques des aimants se repoussent) ou électriques.



La force de gravitation attire les corps vers le bas

9 LA PRESSION

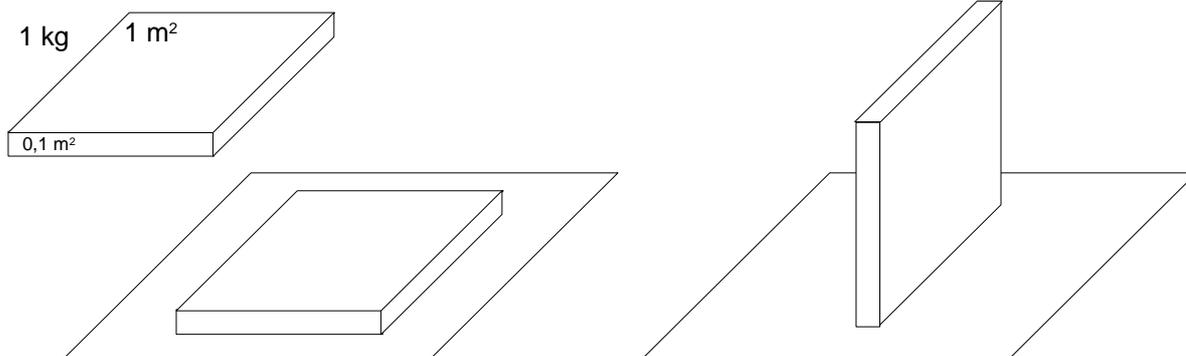
9.1 La pression statique

La pression statique est définie de la manière suivante :

$$p \text{ [Pa]} = \frac{F \text{ [N]}}{S \text{ [m}^2 \text{]}}$$

C'est une force qui « appuie » sur une surface.

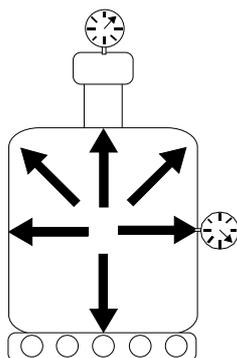
NB : La pression atmosphérique est due au poids (force d'attraction de la terre) de l'air qui s'exerce sur la surface du sol. Elle est de 1 bar environ.



On définira dans les deux cas la pression exercée par l'objet sur le plan support.

Cas des gaz de masse négligeable :

Les fluides gazeux légers « prisonniers » dans des récipients ou des bouteilles exercent des forces pressantes sur les parois. Les molécules de gaz se repoussent et exercent des forcent sur la surface de l'enveloppe de la bouteille.



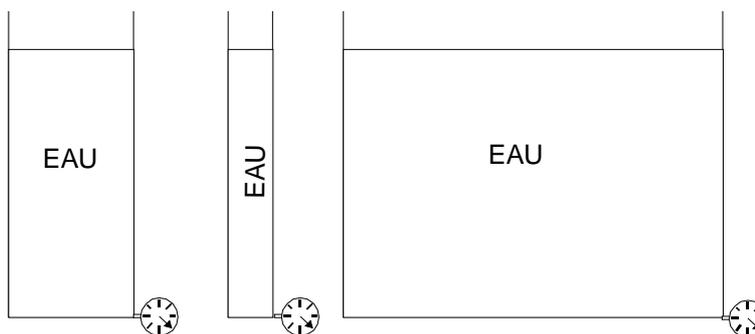
La pression résultante tend à écarter les parois du récipient. La pression s'exerce dans tous les sens avec la même intensité.

Si la pression devient trop forte, la bouteille ne résiste pas.

Cas de l'eau :

Dans les réservoir remplis d'eau et à air libre, la pression qui s'exerce sur les parois du réservoir est due au poids de l'eau. On montre que la pression dans ces réservoirs est en relation avec la hauteur de fluide et la nature du fluide.

$$p \text{ [Pa]} = \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \times g \times h \text{ [m]}$$



Dans ces trois réservoirs, la pression est la même.

Dans les chaudières vapeur ou à eau chaude sous pression, la pression est due à la fois au poids de l'eau et aux forces pressantes de la vapeur.

9.2 Les unités de pression

Les pressions sont exprimées en :

- pascal [Pa]
- bar
- atmosphère [atm]
- kilogramme force par centimètre carré [kgF/cm²]
- mètre de colonne d'eau [mCE] ou [mH₂O].
- mètre de colonne de mercure [mHg]
- pound per square inch [PSI]

voire d'autres unités multiples et sous multiples.

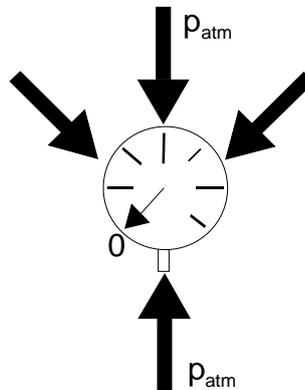
Les correspondances :

- 1 bar = 100000 [Pa] = 750 [mmHg] = 10,2 [mH₂O]
- 1 [atm] = 1,013 bar
- 10 [mCE]. = 0,981 bar = 1 [kgF/cm²]
- 1 PSI = 0,07 bar

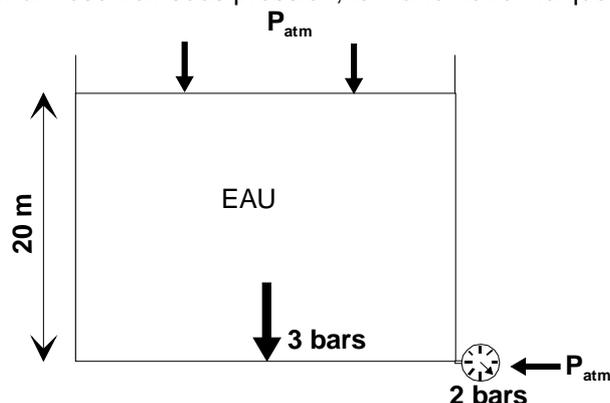
9.3 Pression relative (effective), pression absolue

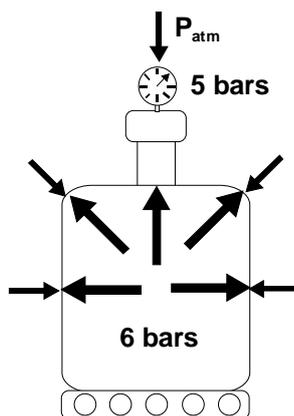
Au niveau du sol, l'air exerce une pression équivalente à 1 bar environ. Cette pression est due au poids de l'air s'exerçant sur la surface du sol. Cette pression s'exerce dans tous les sens et a la même valeur.

Si l'on mesure la pression de l'air à l'aide d'un manomètre, on constate qu'il indique 0 bar. En effet cette pression s'exerce à l'intérieur comme à l'extérieur du manomètre, la résultante est nulle.



Si l'on place un manomètre sur un réservoir sous pression, le manomètre indique la pression relative.





La pression mesurée au manomètre est appelée $p_{relative}$ ou $p_{effective}$. La pression absolue est aussi la pression réelle.

$$P_{absolue} = P_{effective} + P_{atmosphérique}$$

Dans la plupart des cas, les pressions indiquées sont des pressions relatives, mesurées au manomètre.

9.4 Pression de service, timbre

La pression de service est la **pression maximale** que peut supporter l'équipement en fonctionnement continu. Le constructeur ne peut garantir son matériel que s'il est utilisé à des pressions inférieures à la pression de service.

Malgré tout, le matériel peut être soumis parfois à des pressions supérieures pendant une durée très courte.

Dans le cas des chaudières, la pression maximale en utilisation continue est aussi appelée le **timbre**. Le timbre est donné en bar. Pour éviter de dépasser cette pression, on installe des soupapes de sécurité qui s'ouvrent à des pressions inférieures au timbre, protégeant ainsi la chaudière.

9.5 Pression d'épreuve

Le matériel est soumis à des tests de résistance à la pression. La pression maximale pendant la phase de test est appelée pression d'épreuve. La pression d'épreuve est d'1,5 fois le timbre ou le PN.

Les tests sont réalisés régulièrement par des organismes agréés (APAVE et ASAP).

10 LA TEMPERATURE

10.1 Définition

Toute particule de matière, quel que soit son état physique, est animée d'un mouvement microscopique. La température mesure cette agitation des particules au niveau microscopique : une particule à 20 °C est "plus agitée" qu'une particule à 0 °C.

Unités	[°C]	(degré CELSIUS)
	[°F]	(degré FAHRENHEIT)
	[K]	(KELVIN)

10.2 Conversions



La mesure de la température pour les physiciens s'effectue en [K] ou Kelvin.

Une agitation nulle correspond à 0 [K] ou ZERO ABSOLU.

On notera que :

- $t [^{\circ}\text{C}] = T [\text{K}] - 273,15$
- $T [\text{K}] = t [^{\circ}\text{C}] + 273,15$
- $t [^{\circ}\text{C}] = 5/9.(t [^{\circ}\text{F}] - 32)$
- $t [^{\circ}\text{F}] = 9/5.t [^{\circ}\text{C}] + 32$

Une température de 0 °C correspond à 273 K ou à 32 °F

Une température de 0 K correspond à -273 °C

Une température de 0 °F correspond à -18 °C

Un écart de température de 1 °C est équivalent à un écart de 1 K ou de 1,8 °F

Un écart de température de 1 °F est équivalent à un écart de 5/9 K ou de 5/9 °C

11 L'ENERGIE ET LA PUISSANCE THERMIQUES

11.1 Les formes d'énergies

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail. L'énergie existe sous différentes formes :

- mécanique
- électrique
- thermique
- solaire
- nucléaire
- chimique...

L'énergie peut s'échanger d'un système à un autre : la flamme d'un brûleur chauffe l'eau (échange d'énergie thermique).

L'énergie peut se transformer en d'autres formes d'énergie. On peut définir la qualité des énergies. Ainsi le passage de l'énergie mécanique à énergie thermique est simple mais l'inverse est beaucoup plus compliqué et

nécessite des machines complexes (turbine...). L'énergie mécanique est « de qualité supérieure » à l'énergie thermique.

11.2 Conservation de l'énergie

L'énergie totale d'un système se conserve, mais parfois lors d'un échange, on ne peut récupérer toute l'énergie. Ce que l'on ne peut récupérer se dissipe à l'extérieur du système et est perdu.

Dans un bilan d'énergie pour une chaudière à eau chaude :

$$\begin{aligned} & \text{Energie dégagée par la combustion d'un combustible} \\ & = \\ & \text{Energie thermique fournie à l'eau de la chaudière} + \text{énergie des fumées sortant de la chaudière} + \text{énergie} \\ & \text{perdue par les parois} \end{aligned}$$

11.3 Notion de rendement

L'énergie thermique dégagée par la combustion du combustible (consommée) est transférée à la chaudière par l'intermédiaire des gaz de combustion. Mais la totalité de cette énergie n'a pu être transmise à la chaudière. Une partie s'échappe par les fumées chaudes et par les parois de la chaudière, elle est perdue pour l'utilisateur.

La partie qui est transférée à l'eau pourra être utilisée, elle est appelée **énergie utile**.

On peut alors définir la notion de **rendement** noté η (sans unité) :

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}} \quad (\text{toujours inférieur à 1})$$

NB : le bilan peut s'effectuer aussi sur les puissances.

On peut alors comparer les performances des machines, en comparant leurs rendements. Attention, les rendements doivent être donnés pour les mêmes conditions de fonctionnement. Les essais de performances doivent être normalisés.

11.4 Travail d'une force W , énergie mécanique

Lorsque l'on soumet un mobile à une force, celui-ci se déplace. On définit le travail de la force de la manière suivante :

$$W = \vec{F} \times \vec{l}$$

Le travail s'exprime en joule [J].

NB : la force ne fournit du travail que dans le sens du déplacement. Si l'on veut monter un kilogramme d'eau (soumis à la force de gravitation) de 1 m, on fournira $W = m \times g \times l = 10$ joules.

11.5 Puissance d'une force

La puissance est liée au travail de la force, à l'énergie, mais aussi à la durée nécessaire pour accomplir ce travail. Si l'on compare deux machines, celle qui fournit le même travail plus rapidement est la plus puissante.

La puissance caractérise l'appareillage installé.

$$P [W] = \frac{W [J]}{t [s]}$$

On trouve d'autres unités de puissance telles que :

Le cheval [cv] = 736 [W].

11.6 Chaleur

11.6.1 Définition

On constate le transfert d'énergie thermique lorsque deux corps en présence changent de température, ce transfert est appelé chaleur.

On peut aussi constater ce transfert lors d'un changement d'état tel que l'évaporation.

L'échange de chaleur s'effectue toujours du corps le plus chaud (T élevée) vers le corps le plus froid (T plus faible). Le corps le plus chaud cède (fournit) de la chaleur, le corps le plus froid absorbe la chaleur.

La chaleur est notée **Q**. De la chaleur se dégage lors de :

- frottements mécaniques
- passage de courant électrique
- changement d'état
- réaction chimique.

11.6.2 Transfert de chaleur

L'énergie calorifique (ou thermique) se transmet de trois façons :

- par conduction
- par convection
- par rayonnement.

La **conduction** est la propagation de la chaleur **au sein d'un milieu homogène**, par contact, de particule à particule. Les particules les plus chaudes - donc les plus agitées - cèdent un peu de leur agitation aux particules voisines. On peut dire que c'est la chaleur qui se déplace, de particule à particule.

La **convection** est la propagation de la chaleur **d'un fluide vers un solide** (ou inversement). Les particules de fluide, mobiles, viennent prendre (ou laisser) un peu de chaleur au contact du solide. Ce sont les particules qui transportent ici la chaleur.

Les particules de fluide qui viennent s'échauffer (ou se refroidir) au contact du solide, subissent une variation de leur température, donc **la masse volumique du fluide varie** ; les particules vont donc s'élever (si elles s'échauffent) ou au contraire "tomber" (si elles se refroidissent) et être remplacées par de nouvelles particules. Ce mouvement du fluide, entretenu par l'échange de chaleur, est appelé "**mouvement de convection**".

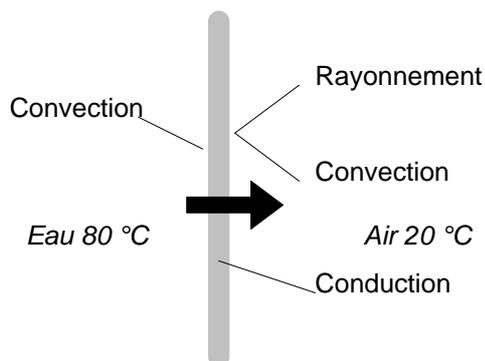
En ce qui concerne le **rayonnement**, la chaleur se propage dans le vide, sans support matériel. Elle provient de la surface d'un objet appelé "émetteur", qui lance un **rayon électromagnétique** (en laissant dans l'opération un peu de chaleur, c'est-à-dire en se refroidissant). Ce rayon se propage en ligne droite, jusqu'à ce qu'il rencontre un obstacle matériel qui joue le rôle du "récepteur". Celui-ci "absorbe" ce rayon et le transforme en chaleur (par conséquent, il s'échauffe).

11.6.3 Synthèse

Conduction et **convection** sont des **modes d'échange matériels**, c'est par l'intermédiaire de particules de matière que la chaleur se propage. Le rayonnement est au contraire un **mode d'échange immatériel**, le rayon électromagnétique se propageant dans le vide.

Convection et **rayonnement** sont des **phénomènes surfaciques**, alors que la conduction se produit dans la masse des objets.

Le plus souvent, un processus d'échange de chaleur met en jeu simultanément plusieurs modes d'échange ; par exemple, dans le cas de la paroi d'une cuve métallique contenant de l'eau chaude (80 °C) et se refroidissant dans l'air ambiant (20 °C) :



On peut observer :

- de la conduction à l'intérieur de la paroi métallique
- de la convection entre l'eau et la paroi ;
- de la convection entre l'air et la paroi ;
- du rayonnement de la paroi vers l'extérieur (côté air).

10.6.4 Les unités de chaleur et d'énergie

- le joule [J], le kilojoule [kJ] unités du système international
- la calorie [cal], la kilocalorie [kcal], la thermie [th] anciennement utilisées dans le domaine du génie climatique
- la frigorie [fg]
- le BTU (british thermal unit)
- La tep (tonne équivalent pétrole) utilisée pour chiffrer les consommations énergétiques d'un pays.

On utilise aussi le wattheure Wh ou kWh ou MWh. Les entreprises telles que E.D.F ou G.D.F fournissent aux utilisateurs l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau chaude sanitaire sous forme d'électricité et de combustible (gaz naturel). Cette énergie est facturée à l'utilisateur en kWh.

Signification de quelques unités d'énergie :

1 calorie = quantité d'énergie nécessaire pour élever 1 [g] d'eau de 1 [°C].

1 joule = quantité d'énergie pour soulever 0,1 [kg] d'un mètre environ.

Correspondance

- 1 [cal] = 4,185 [J]
- 1 [kcal] = 1 [fg] = 4,185 [kJ]
- 1 [Wh] = 3600 [J]
- 1 [kcal] = 1,16 [Wh]
- 1 BTU = 1,05 [kJ]
- 1 [tep] = 11 600 [kWh]

11.7 La puissance thermique

La puissance P peut être considérée comme un débit d'énergie =
$$\frac{\text{Quantité d' énergie}}{\text{temps}}$$
.

Elle caractérise l'appareillage installé.

Un appareil de forte puissance peut transmettre une quantité d'énergie importante en peu de temps.

Les unités de puissance

$$\text{Le watt : } 1 \text{ watt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ seconde}}$$

la kilocalorie par heure [kcal/h], la thermie par heure [th/h]
la frigorie par heure [fg/h].

NB : un appareil capable de fournir une énergie thermique de 2 [kWh] durant une heure en continu doit avoir une puissance de 2 kW.

11.8 Chaleur sensible et chaleur latente

Quand on apporte de la chaleur à de l'eau, il peut se produire deux phénomènes :

- Variation de la température de l'eau : on parle de **chaleur sensible**
- Changement d'état : on parle de **chaleur latente**.

11.8.2 Calcul de la chaleur sensible

Dans le cas général, on notera que la quantité d'énergie à fournir pour élever un corps quelconque en température dépend de la masse du corps, de la différence de température finale et initiale, de la chaleur massique de ce corps.

$$Q [J] = m [kg] \times C [J/(kg \cdot ^\circ C)] \times \Delta T [^\circ C]$$

La chaleur massique est la chaleur qu'il faut fournir à un corps de 1 [kg] pour qu'il s'échauffe de 1 [°C].

On notera

- $C_{\text{eau}} = 4\,180 [J/(kg \cdot ^\circ C)]$
- $C_{\text{air}} = 1\,000 [J/(kg \cdot ^\circ C)]$

On notera que le temps n'intervient pas dans la quantité d'énergie, que l'on chauffe en 1 heure ou 2 n'influence pas cette valeur. Ce qui va changer c'est la puissance.

11.8.3 Calcul de la puissance sensible

$$P [W] = \frac{Q [J]}{t [s]}$$

ou

$$P [W] = q_m [kg/s] \times C [J/kg \cdot ^\circ C] \times \Delta T [^\circ C]$$

Formulaire pratique approximatif :Cas de l'eau

$$Q [Wh] = V [l] \times 1,16 \times \Delta T [^\circ C]$$

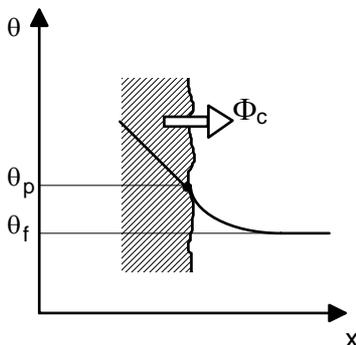
$$P [W] = q_v [l/h] \times 1,16 \times \Delta T [^\circ C], \quad Q [Wh] = P [W] \times t [h].$$

Cas de l'air

$$P [W] = q_v [m^3/h] \times 0,34 \times \Delta T [^\circ C]$$

11.9 Echange de chaleur par convection

Equation générale



θ_p est la température de la paroi ; c'est aussi la température des particules de fluide au contact de la paroi [°C]

θ_f est la température du fluide, loin de la paroi [°C]

$\Delta\theta$ est l'écart de température : $\Delta\theta = \theta_p - \theta_f$ [°C]

h_c est le **coefficient d'échange convectif** [W/(m².°C)]

S est la surface d'échange [m²]

Le **flux de convection** s'exprime par :

$$\Phi_c = h_c \cdot S \cdot \Delta\theta \quad [W]$$

Cette expression peut être formulée d'une autre manière (à rapprocher de $U = R \cdot I$ en électricité) :

$$\Delta\theta = \frac{1}{h_c} \cdot \frac{\Phi_c}{S} = R_c \cdot \frac{\Phi_c}{S}$$

La **résistance thermique de convection** est

$$R_c = 1/h_c \quad [m^2 \cdot ^\circ C/W]$$

Interprétation physique - Paramètres influençant le coefficient d'échange convectif

L'échange par convection nécessite la présence de particules de fluide au contact de la surface du solide. Il est favorisé par une **forte densité** et un **renouvellement rapide** de ces particules sur la surface.

Le coefficient h_c d'échange convectif dépend :

- de la **densité** du fluide (le coefficient d'échange est plus élevé avec un liquide qu'avec un gaz) ;
- de la **forme de la surface d'échange** (plane, cylindrique, ...) ;
- de son **orientation** (verticale, horizontale, ...) car les particules de fluide se renouvellent plus ou moins facilement ;
- de la **vitesse de passage du fluide** sur la surface d'échange ; si l'écoulement de fluide est dû à une source d'énergie indépendante du processus d'échange thermique, on parle de **convection forcée** ; dans le cas contraire, on parle de **convection naturelle** ; le coefficient d'échange est plus élevé en convection forcée qu'en convection naturelle (car la vitesse du fluide est plus grande).

Le coefficient ne dépend pas directement de la nature du matériau constituant la paroi.

Ratios de coefficient h_c

	h_c [W/m ² .°C]
gaz en convection naturelle	3 à 10
gaz en convection forcée	20 à 200
liquide en convection naturelle	100 à 300
liquide en convection forcée	2 000 à 3 000
vapeur se condensant	10 000
liquide se vaporisant (ébullition nucléée)	20 000
métaux liquides (comme le sodium)	50 000

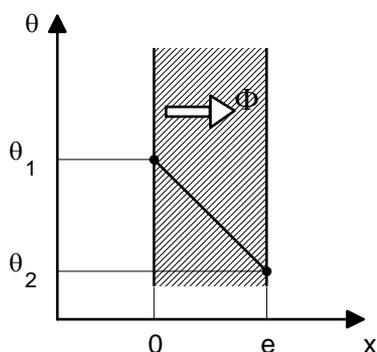
Valeurs usuelles de coefficients h pour les calculs des locaux

	Paroi séparant de l'extérieur	
	h_i	h_e
Paroi verticale	9,1	16,7
Paroi horizontale (vers le haut)	11,1	20

11.10 Echange de chaleur par conduction

Etude détaillée de la conduction unidimensionnelle (échanges à travers une paroi plane)

Conduction dans une couche matérielle homogène



- θ_1 est la température de surface d'un côté de la paroi [°C]
- θ_2 est la température de surface de l'autre côté [°C]
- $\Delta\theta$ est l'écart de température : $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ [°C]
- e est l'épaisseur de la paroi [m]
- λ est la conductivité thermique de la paroi [W/(m.°C)]
- S est la surface de la paroi (surface d'échange) [m²]

Le **flux** s'exprime par :

$$\Phi = (\lambda e) \cdot S \cdot \Delta\theta \quad [W]$$

Cette expression peut être formulée d'une autre manière (à rapprocher de $U = R \cdot I$ en électricité) :

$$\Delta\theta = \frac{e}{\lambda} \cdot \frac{\Phi}{S} = R \cdot \frac{\Phi}{S}$$

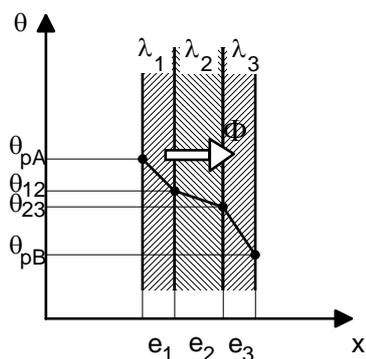
La **résistance thermique de conduction** est

$$R = e/\lambda \quad [m^2 \cdot °C/W]$$

Ratios de coefficient λ

	λ [W/m.°C]
Laine de verre	0,04
Bois de chêne	0,23
Enduit de plâtre	0,46
Brique creuse	0,5
Terre cuite, verre	1,15
Ciment	1,4
Cuivre	390

Conduction dans une paroi composée de plusieurs couches matérielles homogènes



- θ_{pA} est la température de surface d'un côté de la paroi [°C]
- θ_{12} est la température intermédiaire entre couches 1 et 2 [°C]
- θ_{23} est la température intermédiaire entre couches 2 et 3 [°C]
- θ_{pB} est la température de surface de l'autre côté [°C]
- $\Delta\theta$ est l'écart de température : $\Delta\theta = \theta_{pA} - \theta_{pB}$ [°C]
- λ_i est la conductivité de la couche correspondante [W/(m.°C)]
- S est la surface de la paroi (surface d'échange) [m²]

La **résistance thermique de chaque couche** est :

$$R_i = e_i / \lambda_i \text{ [m}^2 \cdot \text{°C/W]}$$

La résistance thermique globale est la somme des résistances thermiques de chaque couche :

$$R_{\text{globale}} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i}$$

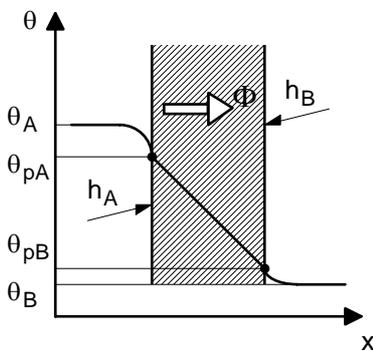
Le flux s'exprime par :

$$\Phi = \frac{1}{R_{\text{globale}}} \cdot S \cdot \Delta\theta \quad [\text{W}]$$

La variation de température est linéaire à l'intérieur de chaque couche composant la paroi.

11.11 Echange de chaleur global

Etude détaillée de l'échange unidimensionnel et coefficient d'échange global



- θ_A est la température du fluide d'un côté de la paroi [°C]
- θ_{pA} est la température de surface du côté du fluide A [°C]
- θ_B est la température du fluide de l'autre côté [°C]
- θ_{pB} est la température de surface du côté du fluide B [°C]
- $\Delta\theta$ est l'écart de température : $\Delta\theta = \theta_A - \theta_B$ [°C]
- h_A est le coefficient d'échange superficiel du côté A [W/(m².°C)]
- h_B est le coefficient d'échange superficiel du côté B [W/(m².°C)]

S est la surface de la paroi (surface d'échange) [m²]

La résistance thermique globale est la somme des résistances thermiques :

$$R_{\text{globale}} = \frac{1}{h_A} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_B}$$

Le flux s'exprime par :

$$\Phi = \frac{1}{R_{\text{globale}}} \cdot S \cdot \Delta\theta \quad [W]$$

On appelle "coefficient global d'échange" l'inverse de la résistance thermique globale :

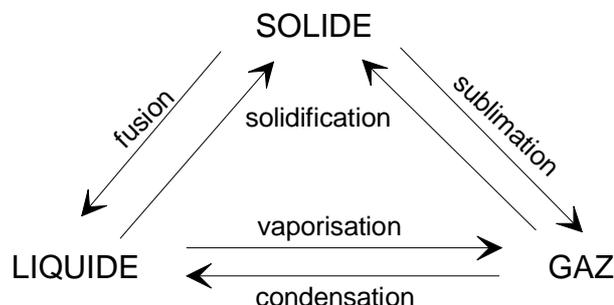
$$U \text{ (ou } K) = 1/R_{\text{globale}} \quad [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$$

L'expression classique du flux est :

$$\Phi = U \cdot S \cdot \Delta\theta \quad [W]$$

12 LA VAPEUR D'EAU

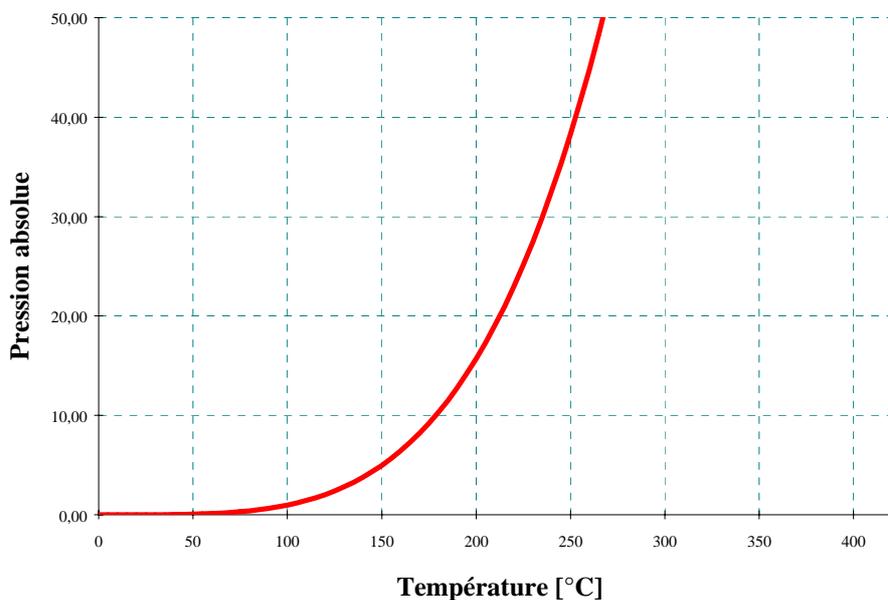
12.1 Les changements d'état



12.2 Relation pression / température d'ébullition

Le changement d'état s'effectue à pression et température constante.

Evolution pression/température



Les conditions de changements d'état dépendent de la pression et de la température.

Ainsi l'eau se vaporise à 100 [°C] sous une pression de 1 [bar] absolu, mais on peut aussi vaporiser de l'eau à 60 [°C] sous une pression de 0,2 [bar].

La température d'ébullition augmente avec la pression, ainsi l'eau se vaporise à 200 [°C] sous 15,7 bars absolus.

12.3 Surchauffe et sous-refroidissement

A pression donnée, la surchauffe est la différence entre la température d'ébullition et la température de la vapeur.

A pression donnée, le sous refroidissement est la différence entre température de l'eau et la température d'ébullition.

12.4 Energies mises en jeu

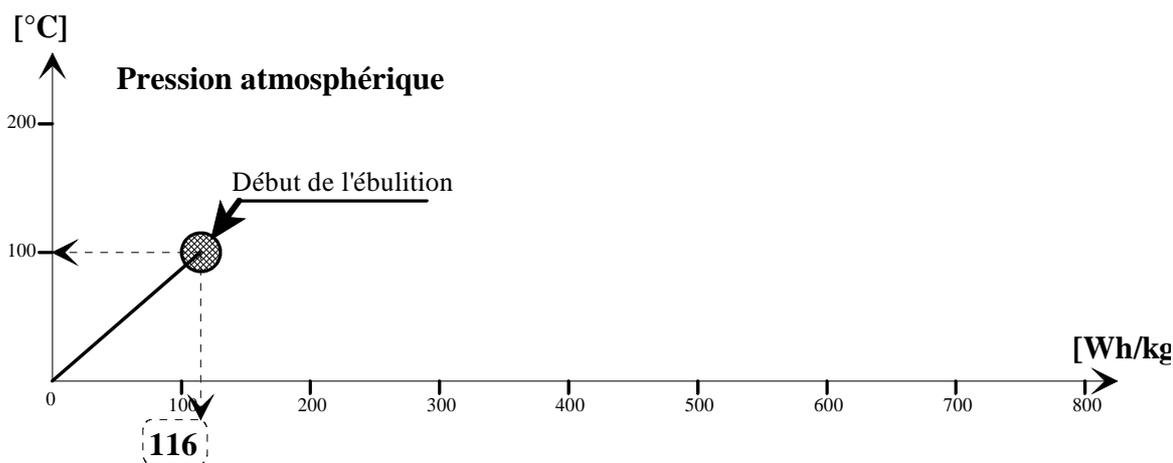
Elévation de la température

Au départ de l'essai la température de l'eau liquide est de 0 [°C].

Attribuons par convention au niveau énergétique initial la valeur 0 [Wh/kg].

Progressivement la température de l'eau s'élève en même temps que son niveau énergétique. Cette évolution va se poursuivre jusqu'à la température de 100 [°C]. A 100 [°C] l'eau commence à bouillir.

Cette évolution est reproduite ci dessous dans un diagramme ou est représentée l'évolution de la température sur l'axe vertical, l'axe horizontal est la représentation du niveau énergétique du produit. Ce niveau d'énergie est appelé **l'enthalpie**. L'enthalpie s'exprime de façon classique en [kJ/kg] unité de quantité d'énergie par unité de masse, parfois on utilise le [Wh/kg].

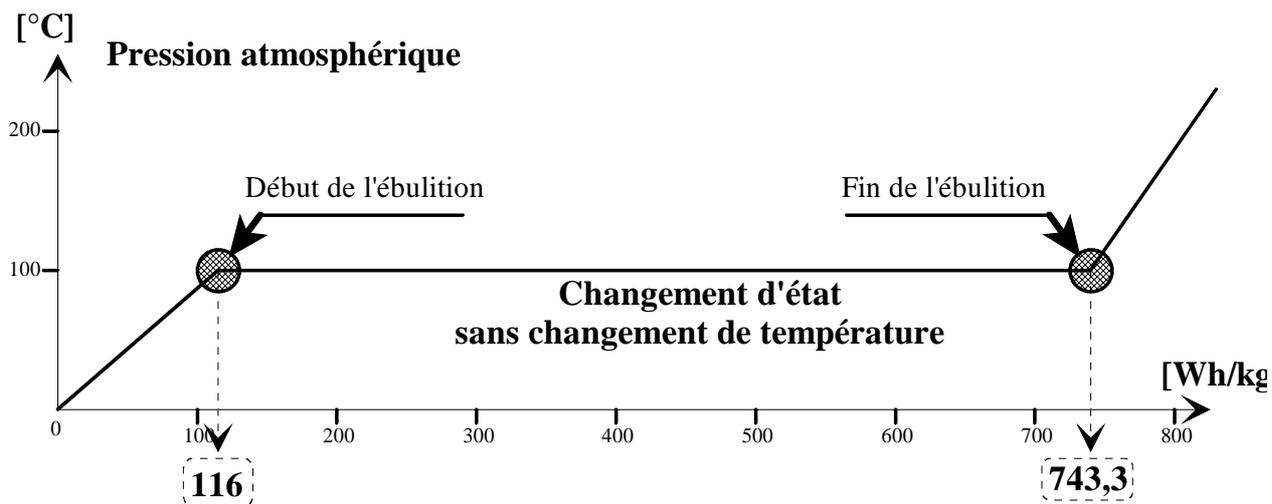


La partie de l'énergie qui sert uniquement au changement de température est appelée **chaleur sensible**.

Vapourisation

A partir du moment où l'eau bout sa température ne s'élève plus. Par contre pendant la phase de vaporisation (ou ébullition) nous continuons à apporter de l'énergie au système, donc son niveau énergétique évolue sans que sa température ne change.

On est en présence d'un changement d'état sans variation de température.



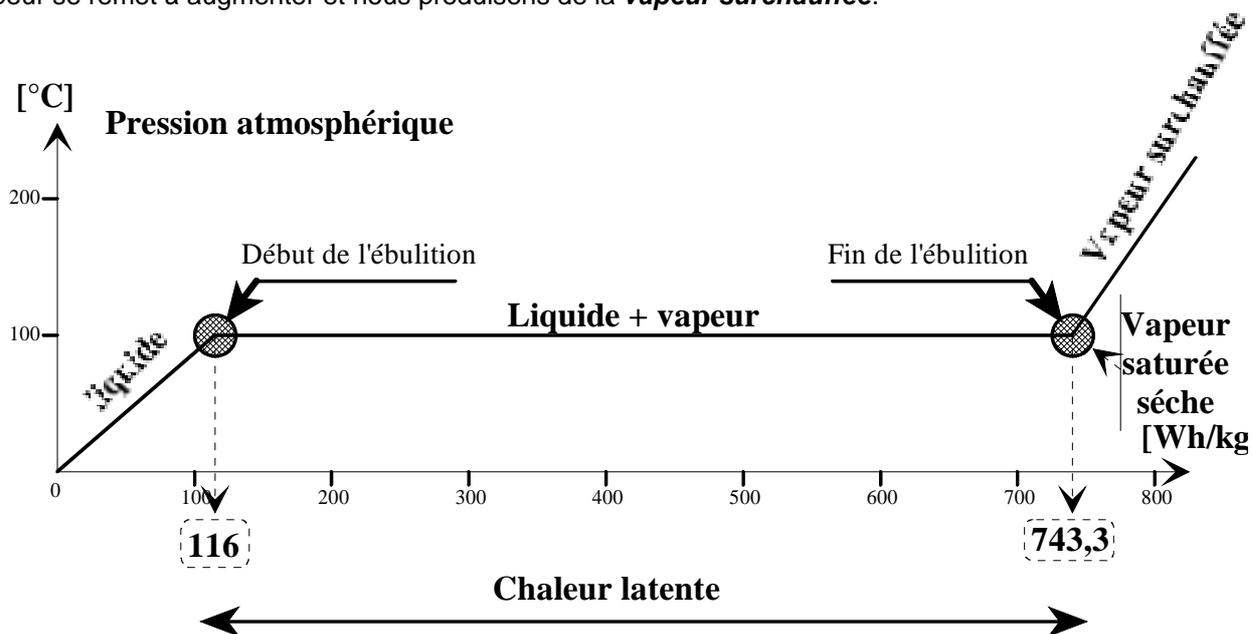
La quantité d'énergie fournie à l'eau pour qu'elle change d'état est appelée **chaleur latente**.

La **chaleur totale** est la somme de la chaleur sensible et de la chaleur latente. L'**enthalpie** est la chaleur totale contenue dans un kg de vapeur en prenant comme valeur de référence (par convention) l'enthalpie nulle à pour l'eau liquide à 0 [°C].

Réchauffage de la vapeur

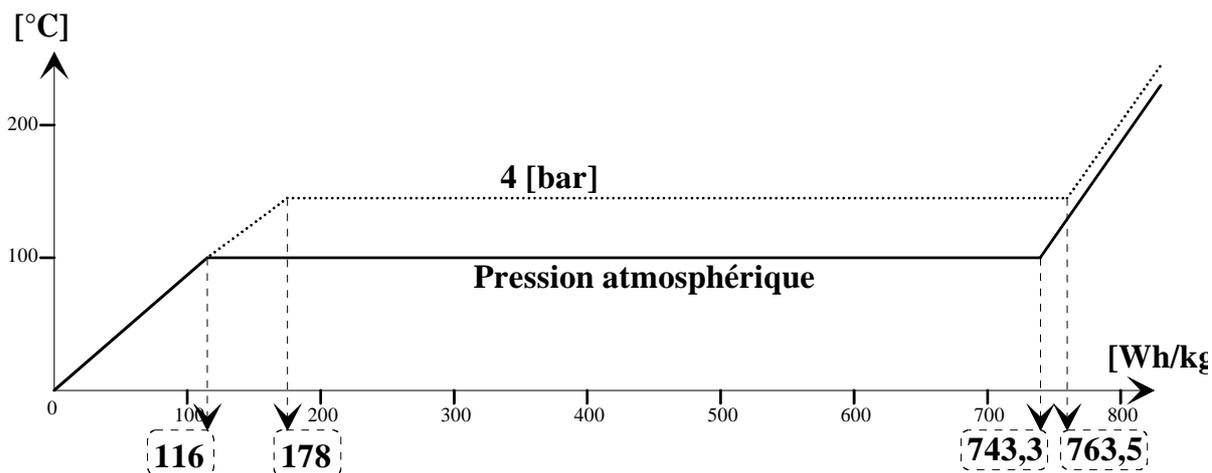
La vapeur juste à la fin de l'ébullition est appelée **vapeur saturée sèche**.

A l'issue de la vaporisation totale si nous continuons à apporter de l'énergie au système, la température de la vapeur se remet à augmenter et nous produisons de la **vapeur surchauffée**.



Influence de la pression.

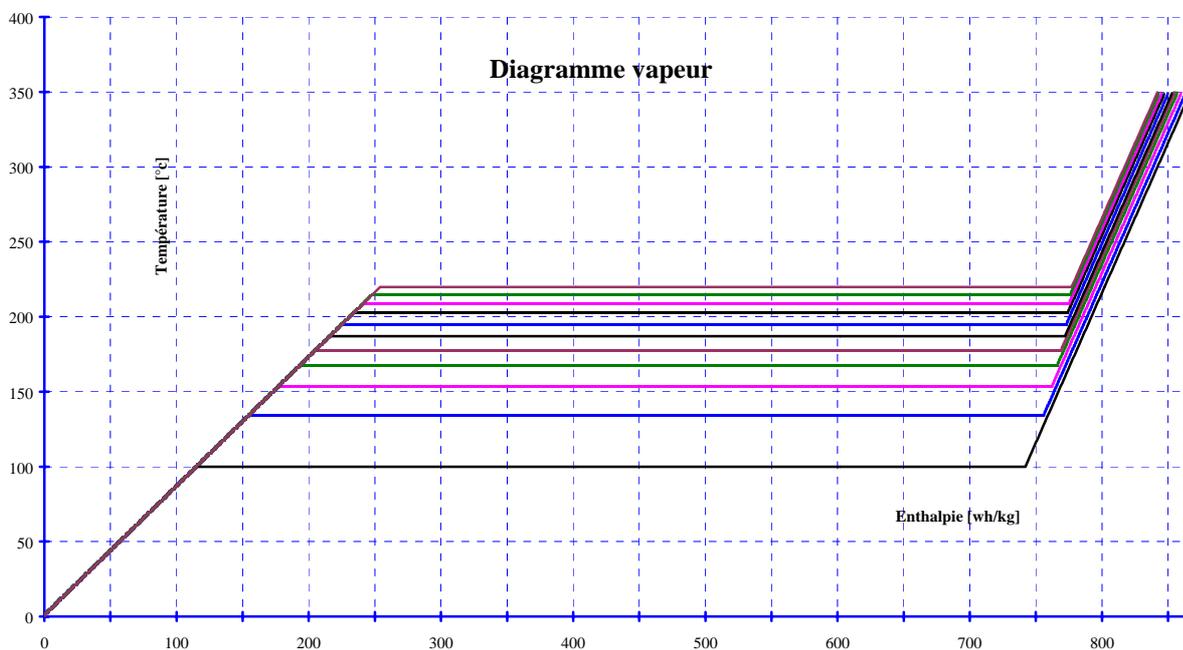
Il est possible de réaliser le même genre d'essai à différentes pressions. Par exemple à 4 bars la température d'ébullition est de 152 [°C], son enthalpie au début de l'ébullition est de 178 [Wh/kg], son enthalpie sous forme de vapeur saturée sèche est de 763,5 [Wh/kg].



Sur le diagramme ci dessus, on constate que l'élévation de la pression a amené une augmentation de la température d'ébullition. Il a fallu chauffer plus pour arriver à séparer les gouttes d'eau qui étaient fortement liées par la pression. La courbe ci dessous vous permet d'avoir une vision globale du phénomène pression température .

Sur le diagramme température / enthalpie ci dessous il est également possible de tracer les différentes courbes pour les différentes pressions. (Il apparaît que dans ce format cela devient illisible, vous trouverez en annexes un diagramme identique complet en grand format et une table de valeurs).

A la lecture de ce diagramme on constate que l'augmentation de pression engendre une augmentation de la température d'ébullition et par voie de conséquence une augmentation de la quantité d'énergie contenu dans l'eau au début de l'ébullition. Par contre la quantité énergétique contenue dans la vapeur aux différentes pressions évolue peu.



Remarques concernant les unités des tableaux et abaques.

Il est nécessaire de vérifier à chaque fois le système utilisé. Le plus simple est de regarder la pression pour l'ébullition à 100 [°C] si la pression de la table est de 0 [bar] il s'agit d'une pression relative, le passage du manomètre à la table se fera directement ; si la pression de la table est autour de 1 [bar] il s'agit d'une table en pression absolue, il sera donc nécessaire de rajouter 1 [bar] à la pression lue sur le manomètre.

Etude de la table de vapeur.

La table fournie en annexe et partiellement reproduite ci dessous nous fournit les principales informations sur la vapeur.

Enthalpie de la vapeur

pression relative	température d'ébullition	eau	vaporisation	vapeur	volume spéc
		chaleur sensible	chaleur latente	chaleur totale	
[bar]	[°c]	[wh/kg]	[wh/kg]	[wh/kg]	[m3/kg]
-0,90	45,81	53,28	664,69	719,97	14,6741
-0,80	60,06	69,83	655,08	724,92	7,6490
-0,70	69,10	80,34	648,91	729,25	5,2290
-0,60	75,87	88,22	644,23	732,44	3,9930
-0,50	81,33	94,58	640,33	734,97	3,2400
-0,40	85,94	99,96	637,12	737,08	2,7320
-0,30	89,95	99,97	634,25	736,69	2,3650
-0,20	93,50	104,64	631,71	740,50	2,0870
-0,10	96,71	108,80	629,38	741,92	1,8690
0,00	100,00	116,40	626,94	743,34	1,6730
0,50	111,61	130,08	618,22	748,30	1,1490
1,00	120,42	140,44	611,42	751,86	0,8810
1,50	127,62	148,92	605,83	754,75	0,7140
2,00	133,69	156,17	600,92	757,08	0,6030
2,50	139,02	162,50	596,56	759,06	0,5220
3,00	143,75	168,14	592,61	760,75	0,4610
3,50	148,02	173,22	588,97	762,19	0,4130
4,00	151,96	177,97	585,58	763,56	0,3740
4,50	155,55	182,31	582,42	764,72	0,3420

La première colonne indique la pression. Elle est donnée ici en bars relatifs ce qui induit que les pressions en dessous de la pression atmosphérique sont affectées d'un signe négatif.

La deuxième colonne indique la température d'ébullition.

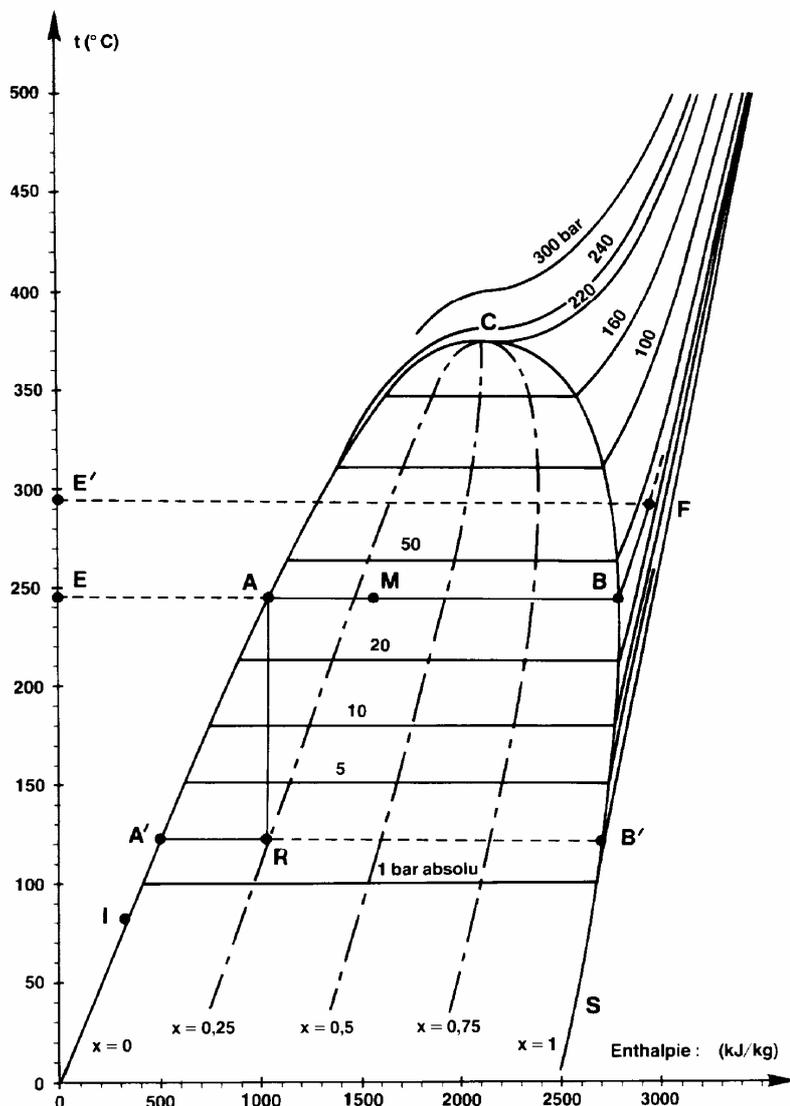
La troisième colonne indique la quantité d'énergie contenue dans l'eau au point d'ébullition.

La quatrième colonne donne la quantité d'énergie qu'il est nécessaire de fournir à l'eau en début d'ébullition pour qu'elle se transforme totalement en vapeur. C'est en fait la différence entre les colonnes trois et cinq.

La cinquième colonne indique la quantité d'énergie contenue dans la vapeur non surchauffée. C'est cette valeur que l'on a l'habitude de prendre pour les calculs rapides. Cette valeur n'évoluant que peu aux pressions qui nous intéressent certaines personnes prennent même cette valeur pour constante dans les calculs de tête.

Etude du diagramme température/enthalpie.

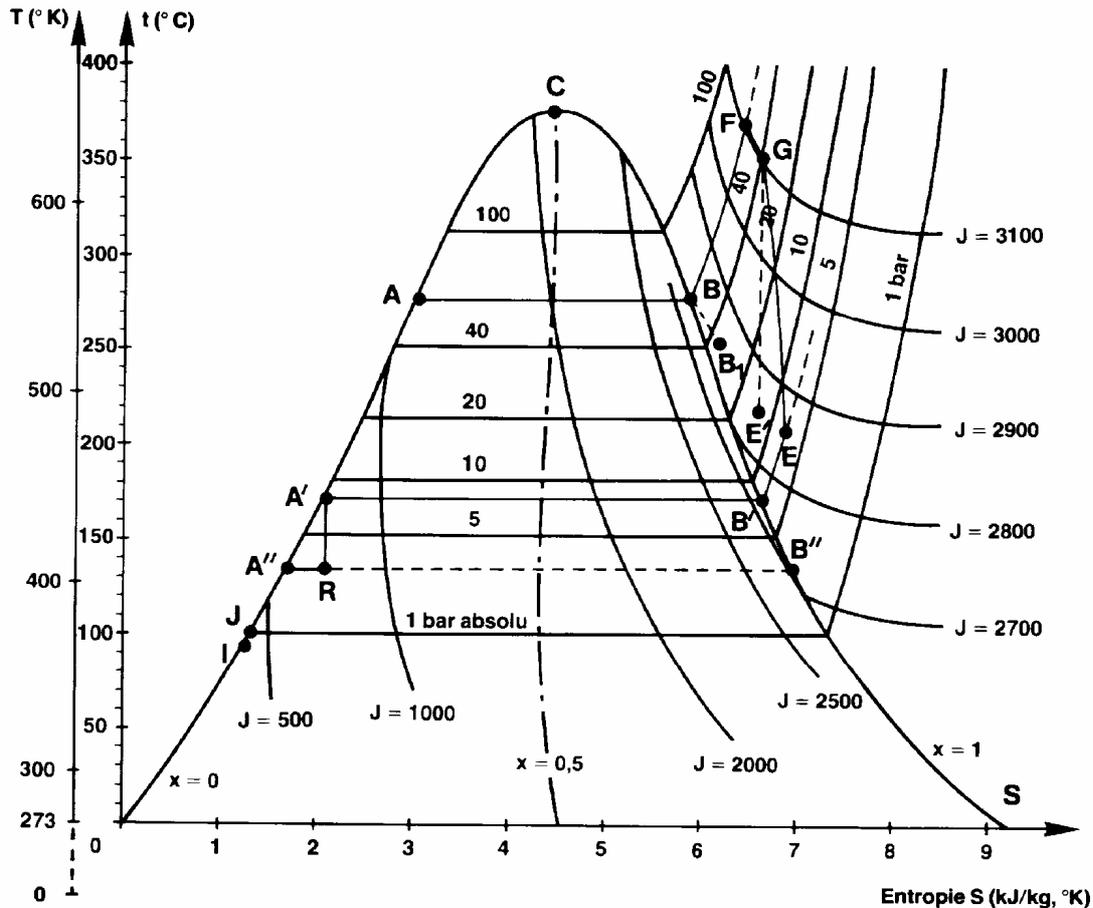
Dans le diagramme ci dessous et également fourni en annexe un certain nombre de points sont tracés. Et nous allons les détailler.



Le point "I" est de l'eau en dessous de la température d'ébullition la température de l'eau s'élèvera jusqu'au point "A" c'est à dire pour la valeur "E", ensuite le produit passera s'il est encore chauffé par le point de mélange "M". Lorsqu'il sera arrivé en "B" on parlera de vapeur saturée sèche. Si le produit est à nouveau chauffé on fabriquera de la vapeur surchauffée comme le point "F", le produit ici est de la vapeur à 40 [bar] avec une surchauffe de 50 [°C], cette valeur de surchauffe est obtenue en faisant la différence entre les valeurs "E" et "E".

Etude du diagramme température/entropie.

Ce diagramme diffère du précédent par la nature de ses axes. L'axe vertical indique toujours la température, l'axe horizontal indique **l'entropie**. La notion d'entropie est assez difficile à expliquer de façon simple ; pour faire simple l'entropie serait le facteur de qualité d'énergie. Ce diagramme est plus difficile à comprendre mais il est plus pratique que le précédent pour faire figurer les différentes évolutions que l'on peut faire subir à un fluide. A l'aide du diagramme présenté ci dessous et fourni en annexe nous allons décrire les différentes évolutions.



Comme sur le diagramme précédent on a:
 La courbe "OC" qui représente les évolutions liquides
 La courbe "CS" qui est celle des vapeurs saturées sèches.

Les évolutions de changement d'état à pression constante sont représentées par les horizontales comme le segment "AB"

Les courbes comme "BF" représentent les évolutions des surchauffes de vapeur.

Les courbes notées "J=xxxx" représentent les évolutions à enthalpie constante (elles étaient verticales dans le diagramme précédent).

Ce diagramme permet de représenter de façon simple les différentes parties de l'usine.

"IJ" Compression de l'eau (pompe alimentaire entre autre).

"JA" Chauffage de l'eau jusqu'à la saturation.

"AB" Vaporisation.

"BF" Surchauffe de la vapeur.

"FG" Détente de la vapeur.

"GE" Travail de la vapeur sur une turbine (la vapeur serait sortie au pont "E" si la turbine avait été une turbine sans perte).

"EA" Utilisation de la vapeur dans un échangeur la partie "EB" représente l'échange sans condensation à pression constante, la partie "B'A" représente un échange avec condensation.

"A'R" détente et revaporisation de la vapeur dans le purgeur.

"RA" puis "A''J" utilisation éventuelle de la chaleur des condensats.

Vous voyez sans doute pourquoi ce diagramme est apprécié par les ingénieurs qui souhaitent avoir une vue d'ensemble chiffrée de l'ensemble de leur installation.

12.5 Valeurs usuelles de pression et de vitesse

12.5.1 Limites réglementaires de pression.

La réglementation concernant la vapeur et en particulier le décret du 2 Avril 1926 modifié plusieurs fois et qui reste jusqu'à la mise en œuvre des futures réglementations européennes, définit le cadre des dénominations des familles d'appareils et en fonction des volumes et des pressions les opérations de contrôle réglementaires. Pour ce qui est de la pression, la réglementation indique que les installations dont la pression est strictement inférieure à 0,5 bar relatif sont dites installations à basse pression. Les autres installations sont dites à haute pression. On a donc:

$$BP < 0.5 \text{ [bar]} \leq HP$$

Les usages parlent également d'installation moyenne pression, cette dénomination n'a pas de référence réglementaire et chacun y met ce qu'il souhaite, pour certains les pressions entre 0,5 et 4 [bar] sont dites à moyenne pression, pour d'autre la limite supérieure se trouve à 6 [bar], pour d'autres la limite se situe à 20 [bar] ; à vous de faire ce dont il s'agit en fonction des habitudes de votre site et de votre interlocuteur.

12.5.2 Vitesses usuelles dans les tubes de vapeur.

Les vitesses maximales admises dans les canalisations de vapeurs résultent de calculs de perte de charge (pertes de pression) et de pertes thermiques, les niveaux de bruit dans les installations entrent également en ligne de compte. Ces calculs ne sont pas au programme. Je vous propose ici un tableau de vitesses maximales communément admises pour vous permettre d'avoir une idée des débits engendrés et par voie de conséquence des puissances mises en œuvre.

Vapeur saturée	Vapeur surchauffée
80 [m/s]	80 [m/s]
> 16 [bar]	> 16 [bar]
45 [m/s]	60 [m/s]
4 à 16 [bar]	4 à 16 [bar]
25 [m/s]	40 [m/s]
15 [m/s]	< 4 [bar]

A RETENIR.

- La vapeur est un produit six fois plus énergétique que l'eau à 100 [°C].
- La vapeur est un produit qui, sous pression, devient automoteur (possibilité de se déplacer tout seul).
- La vapeur peut pendant la phase de condensation échanger de la chaleur sans changer de niveau de température.
- Plus la pression est élevée plus la température d'ébullition de l'eau sera élevée.
- Plus la pression sera élevée plus la température de la vapeur sera élevée.
- Plus la pression est élevée plus il est possible de faire passer de débit, donc de puissance dans un tube sans dépasser les limites de vitesse.

12.6 Détente et surchauffe

Comme annoncé au paragraphe précédent il existe un autre moyen de produire de la vapeur surchauffée. En détendant de la vapeur saturée on obtient souvent de la vapeur surchauffée, nous allons voir comment sur un exemple chiffré.

Etudions le cas d'un échangeur dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Pression avant détendeur: **15 [bar]**
- Pression d'utilisation: **3[bar]**
- Débit: **740 [kg/h]**
- Diamètre détendeur: **DN 25**

La lecture de la table de vapeur (en annexe) nous donne les enthalpies de vapeur suivantes:

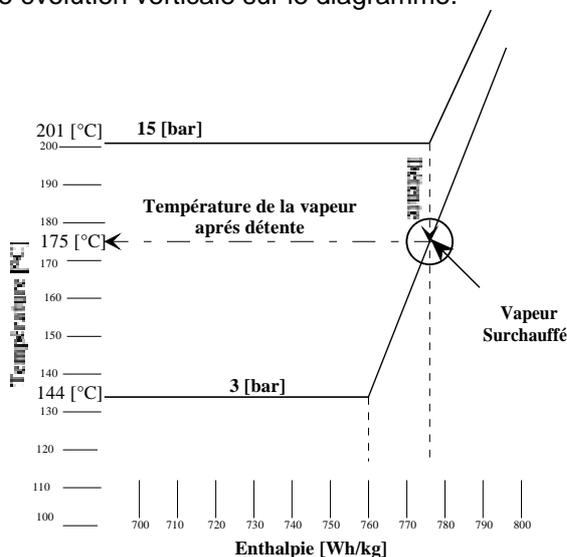
- 3 [bar]: 760,75 [Wh/kg]
- 15 [bar]: 776,08 [Wh/kg]

(la valeur pour la vapeur à 15 [bar] n'est pas directement dans la table qui vous est proposée elle à été établie en effectuant la proportion entre les deux valeurs qui la précèdent et la suivent.)

La différence d'enthalpie amont/aval du détendeur est de 16 [Wh/kg] ce qui peut paraître relativement faible. Si on accepte cette différence d'enthalpie au vu du débit qui circule dans le détendeur, on dit que la puissance dissipée par le détendeur est de 10 [kW].

(16 [Wh/kg] x 740 [kg/h] ≈ 10 [kW].).

Ce qui, vu le diamètre de la vanne, est impossible, un si petit organe ne peut pas dissiper tant de chaleur vers l'extérieur, et si la chaleur n'est pas sortie elle est donc restée dans le produit. Il est certain que la puissance vers l'extérieur n'est pas nulle mais la quantité est négligeable devant les 10 [kW]. Il n'y a pas de différence d'énergie (enthalpie) entre la vapeur à l'entrée du détendeur et la sortie, La détente est alors appelée détente **isenthalpe**. On est donc sur une évolution verticale sur le diagramme.



On remarque donc par le tracé que la vapeur en sortie de détendeur est de la vapeur surchauffée.

Dans le cas présent la vapeur en sortie de détendeur est une vapeur surchauffée à 3 [bar] et à 175 [°C], c'est une vapeur à 3 [bar] et surchauffée de 30 [° C].

En fait si on regarde bien les choses en tenant compte des pertes par les parois de la vanne on effectuera un tracé non pas strictement vertical mais déviant légèrement vers la gauche (traduisant une légère perte d'énergie) et la température de sortie ne sera pas de 175 mais de 170 voir 165 [°C], la surchauffe sera donc de 25 voir de 20 [°C]. Cette surchauffe sera ensuite confrontée aux pertes thermiques dans les canalisations et progressivement la vapeur surchauffée redeviendra une vapeur saturée puis une vapeur titrée (mélange d'eau et de condensat). La surchauffe de la vapeur permet d'éviter d'avoir des gouttelettes d'eau dans la vapeur et de ce fait évite de poinçonner les parties métalliques. Cette surchauffe est donc intéressante avant le transport de la vapeur sur de longues distances ou avant les turbines. Par contre la surchauffe dégrade les transferts thermiques dans les échangeurs de chaleur. Il est donc nécessaire de désurchauffer la vapeur avant passage dans les échangeurs.

12.7 Désurchauffe.

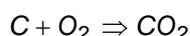
Pour désurchauffer la vapeur on injecte de l'eau sous pression dans la veine de vapeur. Pour cette injection d'eau le débit est réglé en fonction de la température et de la pression de la vapeur.

13 L'ENERGIE DE LA COMBUSTION

13.1 Origine de la combustion

La combustion est une réaction chimique exothermique mettant en jeu le combustible et l'oxygène de l'air. Pour réaliser une combustion il faut :

- un combustible
- un comburant
- de la chaleur (étincelle, ...).



L'oxygène réagit aussi avec l'hydrogène pour former de la vapeur d'eau : $H + O_2 \Rightarrow H_2O$

L'oxygène réagit avec l'azote pour former les oxydes d'azote : NO_x

De plus, la combustion ne s'effectue pas dans les conditions stœchiométriques. On appelle **conditions stœchiométriques** le mélange parfait entre le combustible et l'oxygène, l'oxygène étant en quantité strictement nécessaire pour brûler la totalité du combustible.

Il en résulte dans les fumées la présence de CO , gaz mortel, et d' O_2 .

La combustion peut s'effectuer en défaut d'air ou en excès d'air.

Dans la pratique, la combustion s'effectue en excès d'air pour éviter les imbrûlés tels que le CO (mortel) et la chute de rendement.

13.2 Le pouvoir calorifique

le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète sous pression atmosphérique et les produits de combustion étant portés à 0 [°C].

Il est exprimé en [kWh/kg] pour le fuel, en [kWh/m³N] pour les gaz et en [kWh/kg] pour les combustibles solides.

On distingue le PCI (pouvoir calorifique inférieur) et le PCS (pouvoir calorifique supérieur).

La combustion se produit à température élevée, l'eau contenue dans les produits de combustion est donc vaporisée. La chaleur contenue dans la vapeur n'est pas récupérée tant que les produits de combustions sont à une température supérieure à leur température de condensation, elle est de l'ordre de 55 [°C].

Dès que la température des gaz baisse, il y a condensation, la vapeur cède ces calories.

PCS = quantité de chaleur la vapeur étant condensée
 PCI = quantité de chaleur la vapeur n'étant pas condensée.
 Le PCS est supérieur au PCI.

13.3 Caractéristiques physiques des combustibles les plus courants

	PCS	PCI	PCI/PCS	Masse volumique	Densité	CO ₂ maxi
	kWh/Nm ³	KWh/Nm ³		kg/Nm ³	/air	%
Gaz naturel	11,3	10,2	0,9	0,74	0,57	11,8
Gaz butane commercial	35,6	32,9	0,92	2,6	2	28,3
Gaz propane commercial	27,5	25,4	0,92	1,98	1,53	21,3
	kWh/kg	KWh/kg			/eau	
Fuel domestique	12,7	11,89	0,94		0,84	15,25
Fioul lourd n°2	12,5	11,83	0,95		0,95	15,99
	kWh/kg	KWh/kg				
Charbon anthracite	10,04	9,83	0,98			19,2
Charbons gras	9,59	9,25	0,98			18,5

Pour les combustibles gaz on peut récupérer la chaleur latente.

13.4 Puissance et énergie de la combustion

L'énergie dégagée par la combustion complète d'un combustible peut s'écrire :

$$Q[kWh] = m[kg] \times PCI[kWh / kg]$$

ou

$$Q[kWh] = V[Nm^3] \times PCI[kWh / Nm^3]$$

Pour déterminer la puissance dégagée par la combustion :

$$P[kW] = q_m[kg / h] \times PCI[kWh / kg]$$

13.4 Rendements

Le rendement utile est calculé par rapport au PCI, car dans la plupart des cas, on ne récupère pas la chaleur latente contenue dans les fumées (sauf cas des chaudières gaz à condensation).
 Ce rendement permet de comparer les performances des chaudières entre elles.

Il est défini comme suit :

$$\eta_{uPCI} = \frac{P_{utile}}{P_{combustion}}$$

Le rendement est compris entre 0 et 1 (0 % à 100 %), sauf dans le cas des chaudières à condensation où la puissance fournie à l'eau peut être supérieure à celle de la puissance calculée avec le PCI. On obtient alors des rendements qui peuvent atteindre 104 %.

La puissance utile est la puissance fournie à l'eau.

Le calcul du rendement de combustion grâce à l'analyse des fumées peut s'effectuer par la formule de Siegert :
 Il permet de quantifier les pertes par les fumées

$$\eta_{cPCI} = 100 - f \times \frac{t_f - t_a}{\%CO_2}$$

Combustible	Excès d'air		
	10 %	20 %	30 %
Gaz naturel	0,482	0,471	0,461
Butane / propane	0,530	0,519	0,510
fioul domestique	0,585	0,565	0,558

14 LES FLUIDES FRIGORIGENES

14.1 Intérêt des fluides

Les fluides frigorigènes ont la particularité de s'évaporer à des températures très faibles inférieures à celles du milieu à refroidir.

14.2 Classification des fluides

Fluides minéraux ("SERIE 700")

	Formule	Nomenclature	Remarques
Corps simples			
Hydrogène	H ₂	R 702	Cryogénie (très basses températures) " " "
Hélium	He	R 704	
Azote	N ₂	R 714	
Oxygène	O ₂	R 716	
Corps composés			
Ammoniac	NH ₃	R 717	(très utilisé)
Eau	H ₂ O	R 718	(utilisée dans machines à absorption)
Dioxyde de carbone	CO ₂	R 744	
Dioxyde de soufre	SO ₂	R 764	

Fluides organiques

Ce sont des hydrocarbures, généralement halogénés. Ils contiennent donc :

- du carbone C

et selon le cas :

- de l'hydrogène H
- du chlore Cl
- du fluor F
- du brome Br

Fluides purs

On désigne chaque fluide par la lettre "R" (pour Réfrigérant) suivie d'un nombre traduisant la formule chimique :

"R" (C-1)^(*) (H+1) (F) "B"(Br)^()**

(*) omis si C-1 = 0

(**) omis si Br = 0

Exemples :

— Chlorodifluorométhane	C H Cl F ₂	(C-1 = 0)
		H+1 = 2
		F = 2
		(Br = 0)

Ce fluide sera appelé **R 22**

$$\begin{aligned} \text{--- R 124} \quad & \text{C-1} = 1 \rightarrow \text{C} = 2 \\ & \text{H+1} = 2 \rightarrow \text{H} = 1 \\ & \text{F} = 4 \\ & \text{Br} = 0 \end{aligned}$$

Il manque 1 atome pour saturer la molécule : ce sont des atomes de chlore $\text{Cl} = 1$
Ce fluide est le **Chlorotétrafluoroéthane (C_2HClF_4)**.

Mélanges azéotropes

Ce sont des mélanges de fluides dont les proportions sont ajustées de façon à obtenir un changement d'état sans distillation (donc, pour une pression donnée, à température constante identique pour chacun des constituants). Ils constituent la série "500" : R 500, R 501, R502, etc.

R 502 est actuellement très utilisé ; il comprend 48,8 % de R 22 et 51,2 % de R 115.

Mélanges zéotropes

Pour ces mélanges, lors d'un changement d'état, les différents constituants évoluent à des "vitesses" différentes ; il en résulte une variation de la température entre le début et la fin du processus (pour une pression donnée).

Si la variation de température ne dépasse pas 5 °C, on parle de mélange "semi azéotrope" ou "pseudo azéotrope".

Ces fluides constituent la série "400" ; ils ont été peu utilisés jusqu'à aujourd'hui, certains sont appelés à se développer à la faveur des réglementations récentes concernant les hydrocarbures chlorés.

Classification des fluides organiques selon les constituants des molécules

Des préoccupations relativement récentes concernant la protection de l'environnement ont conduit à classer les fluides organiques selon les éléments chimiques constituant leurs molécules.

	Eléments présents	Exemple
HC	hydrogène, carbone	Propane
CFC	chlore, fluor, carbone	R 12
HCFC	hydrogène, chlore, fluor, carbone	R 22
HFC	hydrogène, fluor, carbone	R 134a

14.3 Impact des fluides sur l'environnement

La toxicité :

Elle est définie par l'AEL ou Limite Admissible d'exposition. C'est la quantité maximale de fluide qui pourra être présente dans l'air sans provoquer de gêne respiratoire à une personne. Elle est donnée en ppm ou [mg/kg].

Plus l'AEL est faible, plus le fluide est toxique.

Le potentiel de destruction de l'ozone :

Les fluides frigorigènes qui s'échappent dans l'atmosphère atteignent les couches les plus hautes. Ses composés chlorés détruit la couche d'ozone. Or cette couche nous protège des rayonnements UV provenant du soleil.

L'ODP (potentiel de destruction de l'ozone) est un indice d'évaluation de l'action du fluide sur la couche d'ozone.

ODP = 0 signifie que le fluide est sans effet sur la couche d'ozone.

Le potentiel d'action sur le réchauffement de la Terre :

Les fluides frigorigènes s'accumulent dans la couche atmosphérique et contribuent à l'effet de serre. Le GWP (potentiel d'action sur le réchauffement de la Terre) indice d'évaluation de l'action du fluide sur l'effet de serre.

GWP = 0 signifie que le fluide ne participe pas à l'effet de serre.

Compte tenu de la dangerosité de ces fluides ainsi que de leur effet sur l'environnement, leur utilisation, leur manipulation, leur récupération fait l'objet de réglementations.

FLUIDE	ODP	GWP	Durée de vie *	AEL	Inflammable
CO ₂	-	1			Non
R12	0,9	2,8	120 ans	1000	Non
R22	0,04	0,32	15 ans	1000	Non
R134 a	0	0,24	15 ans	1000	Non
R407 C	0	-			Non
NH ₃	0	0		25	oui

* une fois libéré à l'atmosphère

14.4 Termes physiques**14.4.1 Evaporer**

Les fluides peuvent changer d'état : passer de liquide à vapeur par exemple.

Cette opération n'est possible que si l'on apporte une quantité d'énergie suffisante, appelée aussi chaleur latente.

Durant la phase de changement d'état le fluide reste à température et pression constantes tant que le mélange des phases existe.

Dans l'évaporateur, le fluide frigorigène est chauffé par l'air ou l'eau et s'évapore. Tandis que le fluide frigorigène s'évapore l'air ou l'eau se refroidit.

L'évaporation produit du froid.

14.4.2 Condenser

Le fluide frigorigène passe de l'état gazeux à l'état liquide.

Il cède sa chaleur à l'air ou l'eau dont la température s'élève.

Le condenseur produit du chaud.

14.4.3 Relation pression – température

La température d'ébullition augmente avec la pression.

Exemple de l'eau :

- A 1 bar absolu, la température d'ébullition est 100 [°C].
- A 2 bars absolus, la température d'ébullition est 120 [°C].

Exemple du R134 a

- A 1 bar absolu, la température d'ébullition est – 26 [°C].
- A 2 bars absolus, la température d'ébullition est – 10 [°C].

Si on libère du R134 a prisonnier d'une bouteille à l'atmosphère, la température au point d'ébullition est – 26,4 [°C].

14.4.4 Surchauffe – sous refroidissement

Pour une pression donnée :

- La surchauffe est la différence de température entre la température du fluide à l'état vapeur et sa température de changement d'état.
- Le sous refroidissement est la différence de température entre la température du fluide à l'état liquide et la température de changement d'état.

14.4.5 Chaleur sensible – chaleur latente

La chaleur sensible est la quantité d'énergie fournie ou cédée pour la variation de température.

La chaleur latente est la quantité d'énergie fournie ou cédée pour le changement d'état.

Les unités utilisées sont :

La kilocalorie, la frigorie, le joule, le wattheure.

NB : 1 [Kcal] = 1,16 [Wh] = 4180 [J] équivalent à 1 frigorie.

14.4.6 Comprimer

La compression consiste à élever la pression en phase gazeuse. L'aspiration au compresseur est à basse pression notée BP. Le refoulement du compresseur est à haute pression notée HP.

14.4.7 Compression adiabatique

Lorsqu'aucun échange de chaleur entre le fluide et son environnement ne s'effectue, il est dit adiabatique. C'est le cas dans les compresseurs. La compression est dite adiabatique.

14.4.8 Détente

La détente consiste à diminuer la pression du fluide. On passe de la HP à la BP.

14.4.9 Source froide – source chaude

La source froide cède sa chaleur au fluide frigorigène (côté évaporateur). Il se refroidit.

La source chaude capte la chaleur du condenseur. Il se réchauffe.

15 LA MACHINE FRIGORIFIQUE

15.1 Les principaux éléments

15.1 Le compresseur

Le compresseur n'aspire que du fluide à l'état gazeux, une seule goutte de liquide à l'aspiration entraîne sa destruction.

L'énergie mécanique fournie permet d'augmenter la pression et la température du gaz.

15.2 Le condenseur

C'est l'échangeur de chaleur dans lequel circule le fluide frigorigène à refroidir. Le fluide passe de l'état gazeux à l'état liquide. Le fluide est sous refroidi en sortie de condenseur.

15.3 Le détendeur

Il permet le passage du fluide de la HP à la BP. Au cours de la détente, le fluide commence à s'évaporer. La détente s'effectue sans perte ou gain d'énergie.

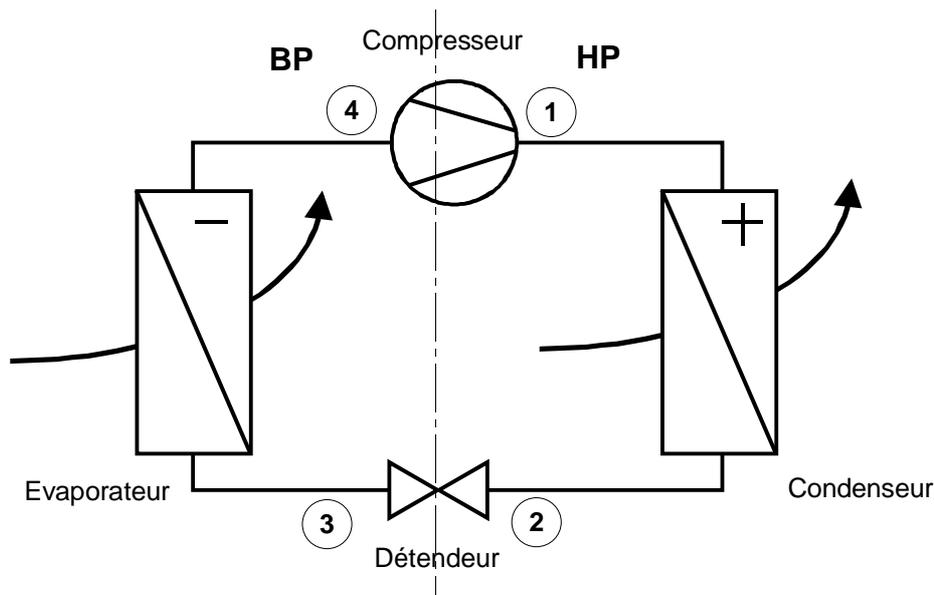
A l'entrée du détendeur le fluide est en phase liquide, la présence de gaz entraîne la destruction du détendeur. Le détendeur le plus simple est constitué d'un capillaire mesurant la température en sortie d'évaporateur. Il mesure la surchauffe et règle le débit de fluide frigorigène entrant dans l'évaporateur.

15.4 L'évaporateur

Le fluide entre en ébullition en absorbant la chaleur de l'air ou de l'eau. Le fluide est surchauffé en sortie

assure la
liquide à

d'évaporateur et
disparition de
l'aspiration du
compresseur.



15.2 Bilan de machine frigorifique

15.2.1 Puissance absorbée à l'évaporateur

La puissance que l'évaporateur est capable d'absorber est :

$$P_{\text{évaporateur}} = q_m \times (h_4 - h_3)$$

P en [kW]

qm en [kg/s] est le débit massique de fluide frigorigène

h en [kJ/kg] est l'énergie totale du fluide frigorigène.

15.2.2 Puissance rejetée au condenseur

$$P_{\text{condenseur}} = q_m \times (h_1 - h_2)$$

P en [kW]

qm en [kg/s] est le débit massique de fluide frigorigène

h en [kJ/kg] est l'énergie totale du fluide frigorigène.

15.2.3 Puissance du compresseur

La puissance utile du compresseur, fournie au fluide, est :

$$P_{compression} = q_m \times (h_1 - h_4)$$

P en [kW]
 q_m en [kg/s] est le débit massique de fluide frigorigène
 h en [kJ/kg] est l'énergie totale du fluide frigorigène.

15.2.4 Performances énergétiques

On peut définir le coefficient de performance d'une machine frigorifique ou COP :

$$COP_{\text{froid}} = \frac{\text{Puissance}_{\text{évaporateur}}}{\text{Puissance}_{\text{compresseur}}} \text{ ou CEF}$$

$$COP_{\text{chaud}} = \frac{\text{Puissance}_{\text{condenseur}}}{\text{Puissance}_{\text{compresseur}}}$$

15.2.4 Débit volumique de fluide

Débit Volumique aspiré q_{va}

Pour déterminer le débit massique de fluide frigorigène, il faut connaître le volume aspiré ainsi que le volume massique v de fluide.

$$q_m = \frac{q_{va}}{v}$$

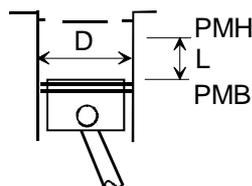
q_m en [kg/s] est le débit massique de fluide frigorigène
 q_{va} est le débit volumique de fluide en [m³/s]
 v est le volume massique en [m³/kg].

Volume balayé q_{vb}

Il s'exprime en [m³/h].

Le volume balayé dépend :

- de la cylindrée C [cm³]
- de la vitesse de rotation du compresseur N [tr/min].



On note que :

$$C = \frac{\pi \times D^2}{4} \times L \times n$$

D diamètre de l'alésage en [cm]

L course du piston en [cm]

n nombres de pistons

$$q_{vb} = \frac{60 \times C \times N}{10^6}$$

N en tour par minute.

Débit volumique aspiré

Lorsque le piston atteint le PMH, il reste encore de la vapeur sous pression élevée dans l'espace restant. Lorsque le piston descend, la vapeur se détend jusqu'à une pression égale à la pression d'aspiration. Le volume aspiré est inférieur au volume balayé.

$$q_{va} = \eta_v \times q_{vb}$$

η_v est appelé rendement volumétrique.

On admet dans la plupart des cas la relation empirique suivante :

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times \tau$$

avec τ taux de compression $\tau = \frac{P_r}{P_a}$

16 LE DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

16.1 L'humidité absolue (teneur en humidité de l'air)

C'est la quantité de vapeur présente dans 1 kilogramme d'air sec. Elle s'exprime en grammes d'humidité par kilogramme d'air sec et elle est notée r (g/kg).

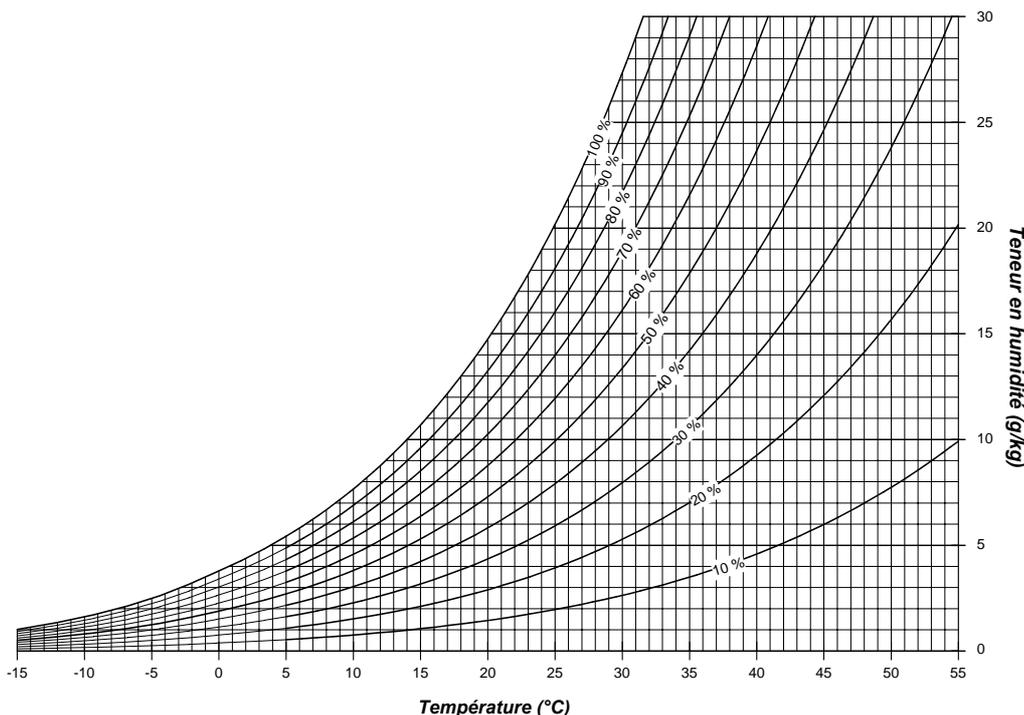
La saturation de l'air en vapeur d'eau

Si on injecte de la vapeur d'eau dans l'air, l'humidité absolue augmente jusqu'à ce que du brouillard apparaisse : la quantité de vapeur contenue dans l'air est alors maximale, c'est la **saturation**.

Plus l'air est chaud, plus l'humidité absolue de saturation augmente.

16.2 L'humidité relative ou hygrométrie de l'air

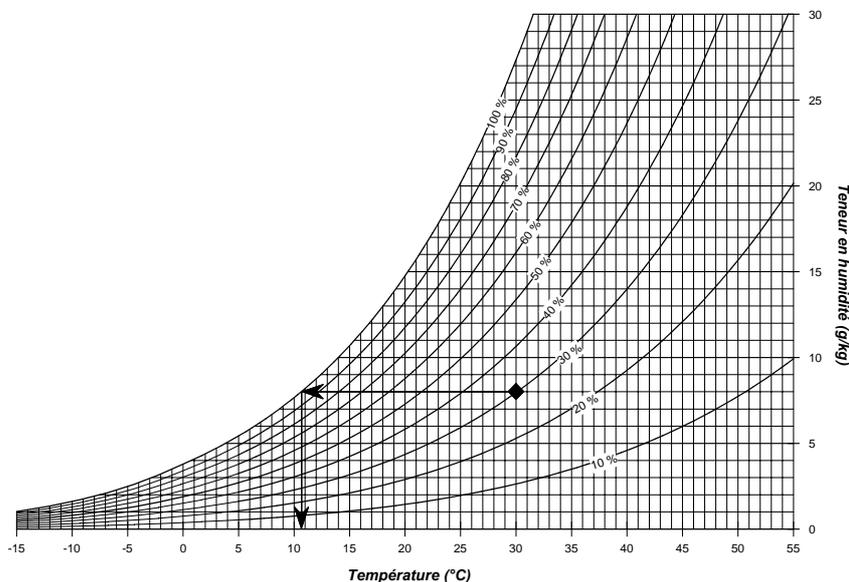
L'hygrométrie représente approximativement le rapport entre l'humidité absolue de l'air et l'humidité de saturation. Une hygrométrie de 100 % correspond donc à la saturation.



Le diagramme de l'air humide (DAH)

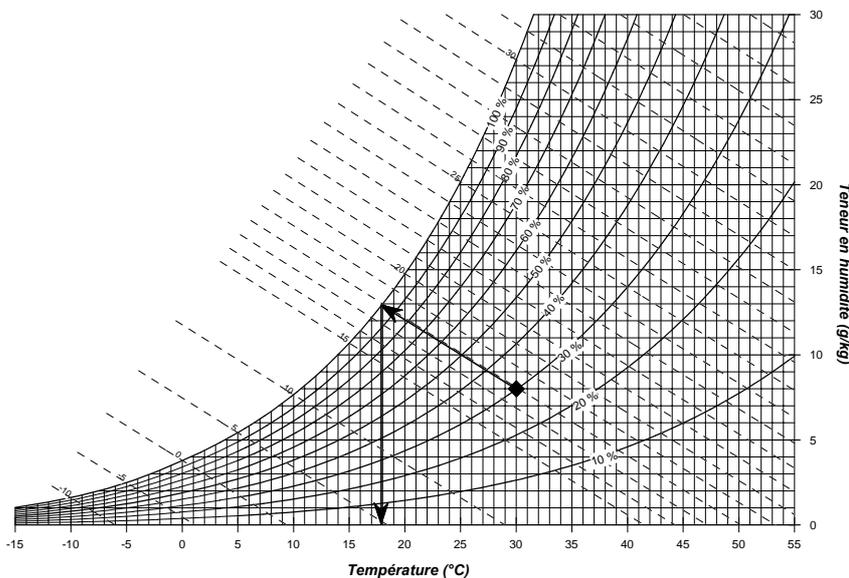
16.3 La température de rosée

C'est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit.



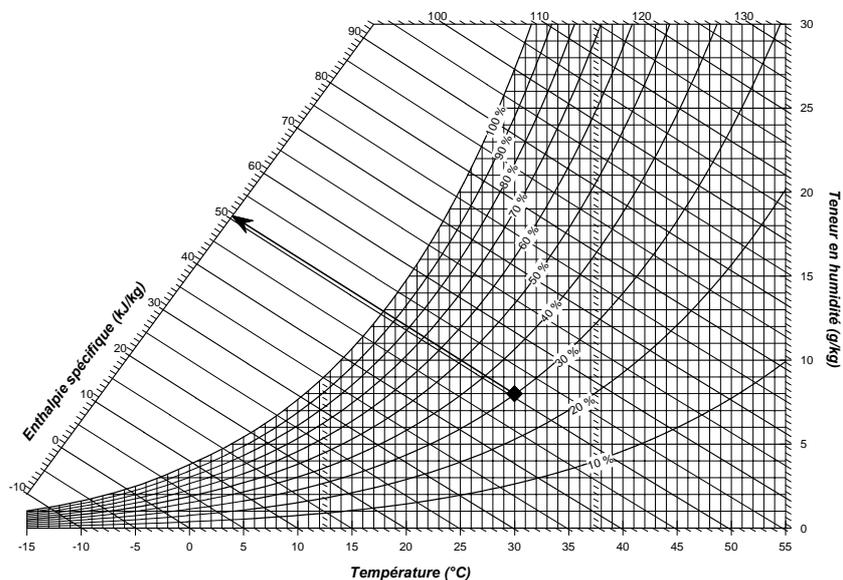
16.4 La température humide

C'est la température mesurée à l'aide d'un thermomètre entouré d'un chiffon imbibé d'eau. Elle est toujours inférieure à la température réelle de l'air.



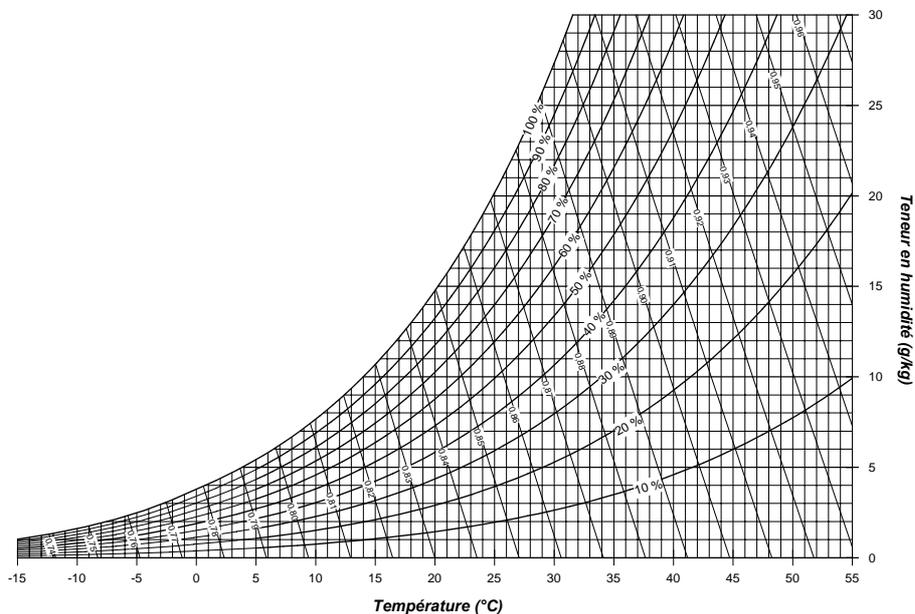
16.5 L'enthalpie de l'air

C'est l'énergie contenue dans l'air. On la note h (kJ/kg).



16.6 Le volume spécifique de l'air

C'est le volume occupé par un kilogramme d'air. On le note v (m³/kg)

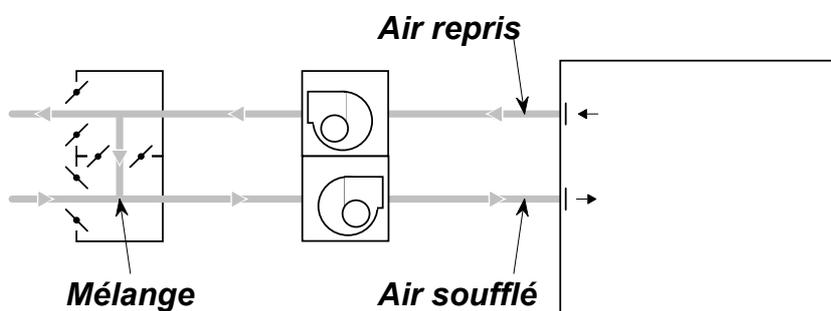


17 LES EVOLUTIONS ELEMENTAIRES EN TRAITEMENT D'AIR

Pour réaliser le traitement de l'air, on peut effectuer 5 opérations :

- le mélange d'air neuf (extérieur) et d'air recyclé
- le réchauffage
- le refroidissement
- l'humidification
- la déshumidification

17.1 Le mélange d'air neuf et d'air recyclé

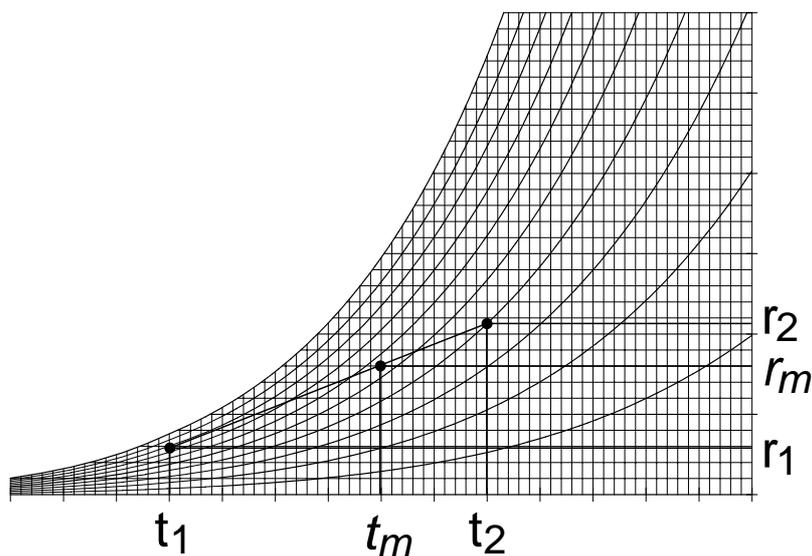


Le recyclage d'une partie de l'air repris permet de limiter la consommation d'énergie.

Calcul des caractéristiques du mélange

$$t_m = \frac{q_1 \cdot t_1 + q_2 \cdot t_2}{q_1 + q_2}$$

$$r_m = \frac{q_1 \cdot r_1 + q_2 \cdot r_2}{q_1 + q_2}$$

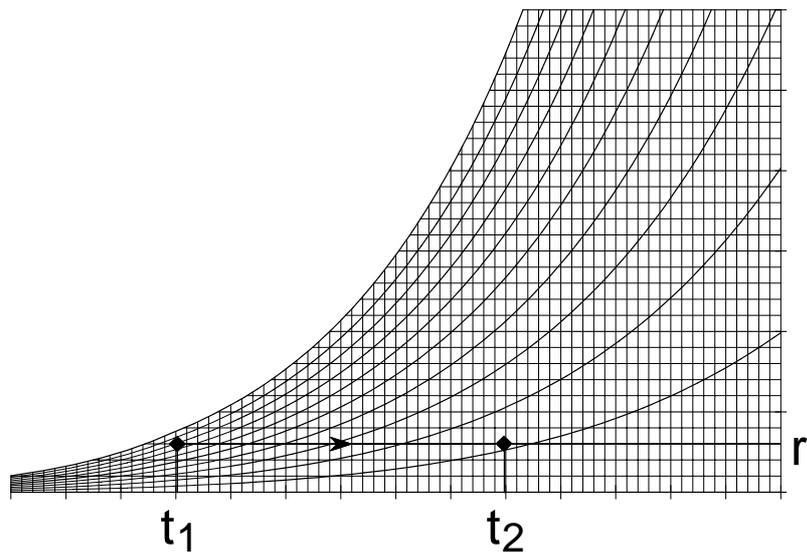


17.2 Le réchauffage de l'air

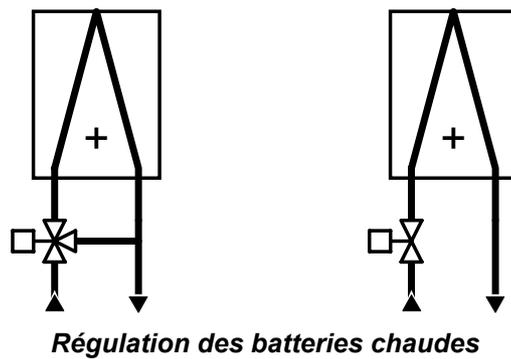
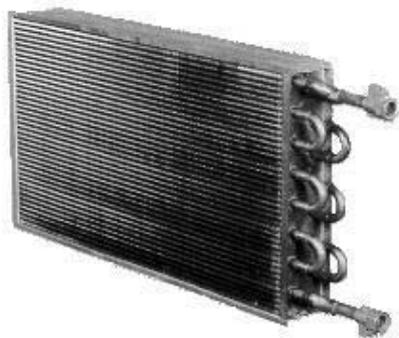
La teneur en humidité de l'air ne varie pas au cours du réchauffage.

Calcul de la puissance :

$$P = q_m \cdot (t_2 - t_1)$$



Les batteries chaudes

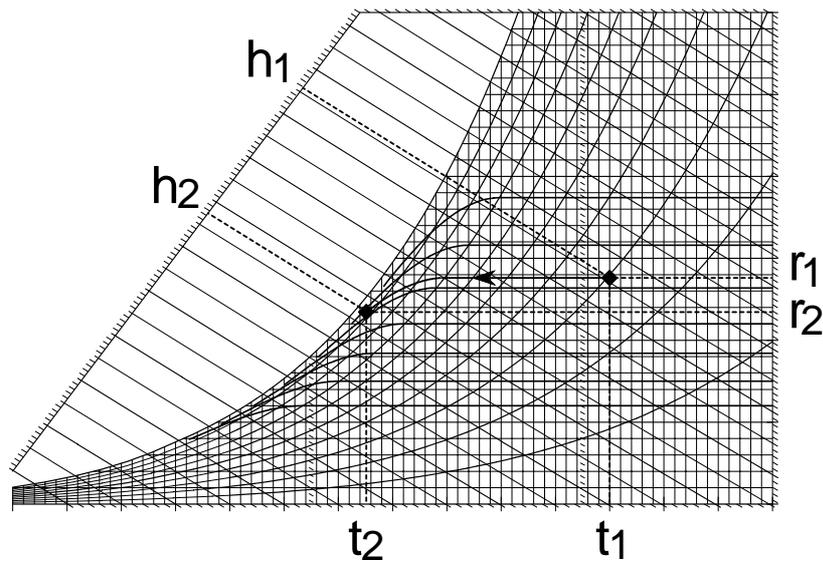


17.3 Le refroidissement de l'air

La teneur en humidité de l'air diminue au cours du refroidissement.

Calcul de la puissance :

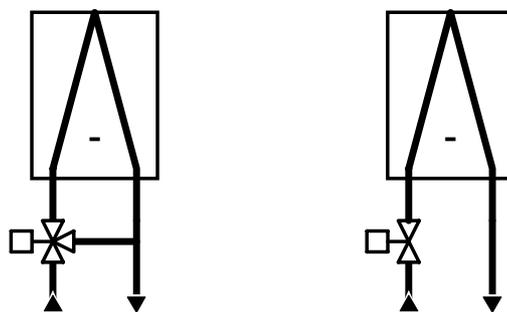
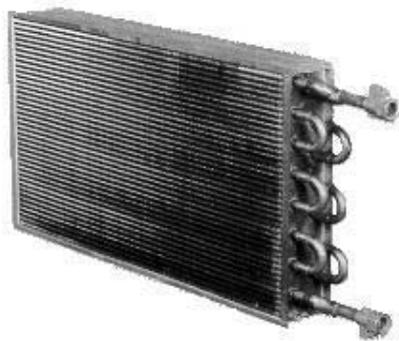
$$P = q_m \cdot (h_1 - h_2)$$



Les batteries froides

Le fluide qui circule dans les batteries froides est :

- de l'eau si t_2 est supérieure à 10 °C ;
 - de la saumure, de l'eau glycolée ou un fluide frigorigène pour t_2 inférieure à 10 °C.
- Les batteries froides dans lesquelles circule un fluide frigorigène s'appelle batteries à « détente directe »



Régulation des batteries froides

17.4 L'humidification de l'air par vapeur d'eau

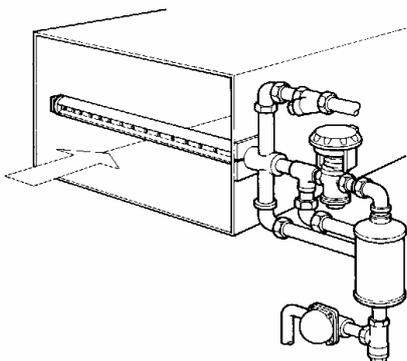
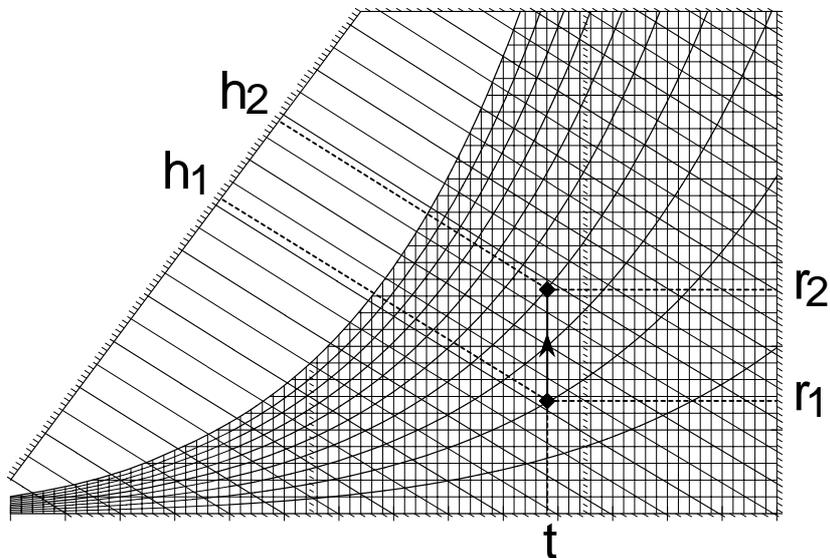
La température de l'air ne varie pas au cours de l'humidification

Calcul de la puissance

$$P = q_m \cdot (h_2 - h_1)$$

Calcul du débit de vapeur d'eau

$$q_{vap} = q_m \cdot (r_2 - r_1)$$



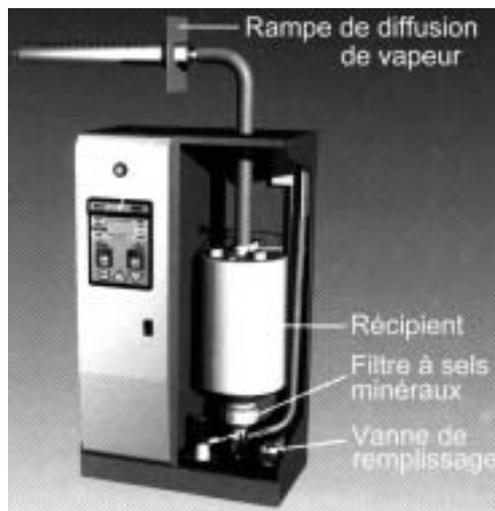
Humidificateurs sur réseaux de vapeur

La vapeur est fournie par une chaudière.

Humidificateurs électriques

Le réchauffage est assuré :

- - soit par des électrodes ; l'eau n'est pas traitée mais il faut assurer une déconcentration ;
- - soit par des résistances. L'eau doit être adoucie.



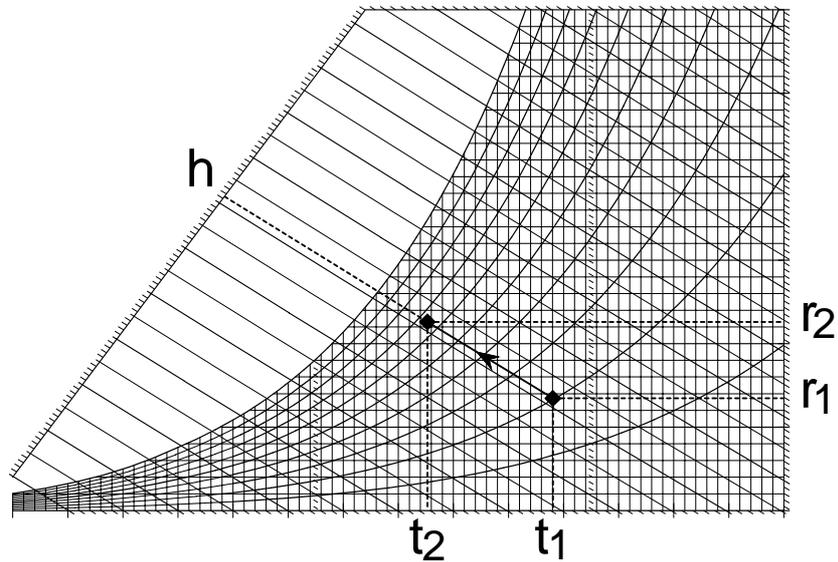
17.5 L'humidification de l'air par eau

L'eau se vaporise directement dans l'air.

La température de l'air diminue au cours de l'humidification.

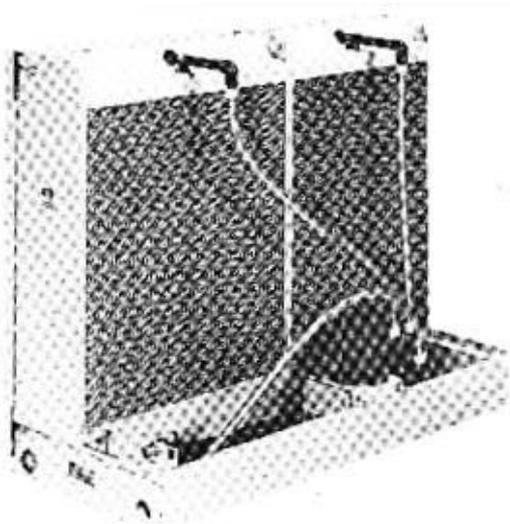
Calcul du débit d'eau vaporisée

$$q_{vap} = q_m \cdot (r_2 - r_1)$$



Les humidificateurs à eau

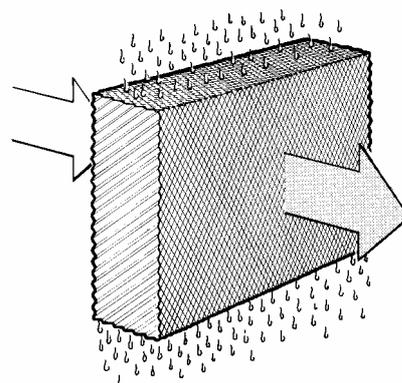
Pour tous ces humidificateurs, le recyclage de l'eau est déconseillé à cause des risques de prolifération de bactéries.



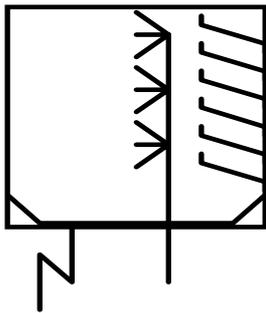
Ruissellement

L'eau doit être adoucie et subir un traitement anti algues.

L'humidification de l'air n'est pas homogène. Une régulation progressive est impossible.



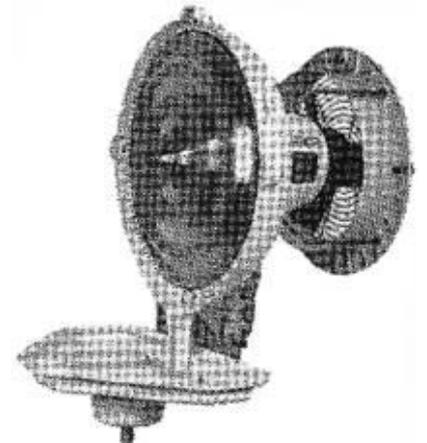
Pulvérisation



Une faible partie du débit pulvérisé se vaporise effectivement.
 L'eau doit être adoucie pour éviter la formation de cristaux de tartre.
 Cet appareil ne peut pas être régulé de manière progressive.

Atomisation

L'eau doit être adoucie pour éviter la formation de cristaux de tartre.



Cet appareil peut être régulé de manière progressive.

17.6 La déshumidification de l'air

On déshumidifie l'air en le refroidissant.

Calcul du débit d'eau condensée

$$q_{eau} = q_m \cdot (r_1 - r_2)$$

