

1ère partie  
Production  
de la vapeur

2ème partie  
Utilisation  
de la vapeur

3ème partie  
Production  
de glace

**4ème partie**  
**Memento**  
**technologique**

5ème partie  
vers d'autres  
horizons



Accédez à la  
documentation  
complète de

[www.soleil-vapeur.org](http://www.soleil-vapeur.org)

:

**4ème Partie** Liste des chapitres

► **Chap I – Vapeur et pertes thermiques**

Chap II – Unités Anglo Saxonnnes

Chap III – Tubes toles etc

Chap IV – Boulons Vis Rivets Forets

Chap V – Plomberie et Filetages

Chap VI – Le Brasage

## **Chapitre I VAPEUR et PERTES THERMIQUES**

### SECTION I QUELQUES FONDAMENTAUX AU SUJET DE LA VAPEUR

pages

- 3 A) La vapeur, première approche
  - 1- La casserole d'eau bouillante
  - 2- L'autocuiseur ménager
  - 3- Le stérilisateur
  - 4- Température, pression, complications et sécurité
- 4 B) Les unités de mesure d'énergie et de pression
  - 1- unité de mesure de la quantité l'énergie: le Joule
  - 2- Unité de mesure de la pression: le Bar
  - 3- Pression absolue et pression relative
  - 4- Les variations de la pression atmosphérique
- 5 C) Table de production de la vapeur
- 6 D) Table de production et d'utilisation de la vapeur

### SECTION II MESURES DE PRODUCTION ET CALCULS DE PUISSANCE

- 9 A) Mesure de la production de vapeur: une version de base
  - 1- Le dispositif
  - 2- Les mesures et les calculs
- 10 B) Calculs de puissance
- 11 C) Commentaires
  - 1- Au sujet des unités d'énergie et de puissance
  - 2- Les erreurs de mesure

- 12 3- L'absence de prise en compte de la température de la vapeur produite
- 4- Contrôle continu de la production
- 5) Une variante de la méthode de mesure
- 6) Au sujet du rendement du capteur
- 13 7- Chaudières à Fuel, à gaz, à charbon.
- 14 D) Mesure de la production de vapeur par la méthode du diaphragme calibré en détente critique
  - 1- Mode opératoire
  - 2- détails matériels
- 15 3- Auto-contrôle
- 4- Formule de calcul
- 5- Pression atmosphérique, altitude et météorologie.
- 15 6- Abaques

### SECTION III AVANTAGES , INCONVÉNIENTS ET SÉCURITÉ

- 18 A) Avantages et inconvénients
  - 1- La vapeur excellent fluide thermique
  - 2- le coefficient d'échange de la vapeur
  - 3- la vapeur, énergie fugace
  - 18 4- le caloduc pervers
  - 5 la traque aux pertes thermiques
- 20 B) Sécurité
  - 1- le potentiel de risque
  - 2- en cas de défaillance du conducteur du capteur
  - 3- quelques ordres d'idées

L'absence généralisée de culture en matière de vapeur est à elle seule suffisante à faire échouer un projet sur le point d'aboutir, d'autant que s'y rajoute souvent une absence totale de culture en matière de plomberie. Faire tourner un logiciel est, de fait, beaucoup plus commun que réparer une fuite d'eau; quant à une fuite de vapeur...La vapeur est pourtant le fluide thermique le plus utilisé de par le monde, sans elle les logiciels ne tourneraient pas: toutes les grandes centrales électriques de réseau fonctionnement via la vapeur, qu'elles soient au charbon, au pétrole, ou à énergie nucléaire.

Le memento vapeur est là pour fournir les connaissances essentielles permettant, sans appréhension majeure, de « mettre les mains dans le cambouis ».

Dans un premier temps le lecteur peut se reporter à l'article « La vapeur d'eau » de M. Christophe Alleau, de l'académie de Poitiers, ([http://artic.ac-besancon.fr/reseau\\_stl/ressources/document.php?id=4](http://artic.ac-besancon.fr/reseau_stl/ressources/document.php?id=4)) qui constitue une excellente propédeutique.

On peut aussi consulter [armstronginternational.com/armstrong-university](http://armstronginternational.com/armstrong-university) avec un très grand intérêt

# Section I - Quelques fondamentaux au sujet de la vapeur

## A) LA VAPEUR, PREMIERE APPROCHE

### 1° La casserole d'eau bouillante

Quand on chauffe une casserole d'eau, dans un premier temps la température de l'eau s'élève, puis elle atteint un seuil aux alentours de 100° C; elle entre alors en ébullition et se transforme en vapeur. Plus on continue à chauffer la casserole, plus l'eau se vaporise, mais sans que la température augmente. Il y a "changement d'état" de l'eau, et cette vaporisation est très grosse consommatrice de chaleur: pour vaporiser une quantité donnée d'eau bouillante, il faut presque sept fois plus d'énergie thermique que pour la chauffer de 20 à 100° C.

La vapeur ainsi produite s'échappe de notre casserole, se répand dans l'atmosphère, et se dirige vers la zone la moins chaude de la cuisine, par exemple les vitres (cela se remarque facilement en hiver, notamment en l'absence de double vitrage). Au contact de la zone froide, la vapeur d'eau se condense, l'eau retrouve son état liquide, et ce faisant elle restitue intégralement la chaleur emmagasinée lors de la vaporisation.

La vapeur d'eau excelle à transporter de la chaleur, c'est un très bon fluide thermique. La chaleur qui a été utilisée pour élever la température de l'eau est appelée chaleur sensible; celle qui a été utilisée pour la vaporisation, et qui est restituée lors de la condensation, est appelée chaleur latente, l'ensemble formant la chaleur totale de vaporisation.

Le changement d'état de l'eau et les phénomènes thermiques associés revêtent une importance toute particulière pour notre propos, car c'est la base du volet thermique du capteur "Soleil-Vapeur" (le volet solaire étant décrit par ailleurs).

### 2) L'autocuiseur ménager

Couramment dénommé "cocotte minute", il s'agit cette fois d'un récipient fermé, alors que notre casserole était un récipient ouvert (même si on y avait posé un couvercle). Cette fois, la température d'ébullition de l'eau est de 112° C, la vapeur produite reste confinée dans le récipient hermétiquement fermé, elle monte alors en pression jusqu'à ce qu'elle ait suffisamment de force pour soulever la soupape et s'échapper. Le poids de la soupape est calculé pour une pression de fonctionnement de la cocotte minute de 0.5 bar manométrique.

La température d'ébullition est fonction de la pression qui règne dans le récipient, et vice versa; il y a une relation intangible entre pression et température. Le fait de cuire les aliments à 112° au lieu des 100° usuels de l'eau bouillante permet notamment de diminuer le temps de cuisson..

### 3) Le stérilisateur à vapeur

le niveau de température requis, quelque peu variable selon la nature de la stérilisation, est au maximum de l'ordre de 143° C, correspondant à 3 bar manométrique, pour certaines conserves alimentaires. Pour la stérilisation médicale, il est de 121° C / 1 bar manométrique pendant 30 minutes

#### **4) température, pression, complications et sécurité**

Une casserole d'eau tombe rarement en panne;

Dans le cas d'un autocuiseur, il suffit que le joint soit détérioré, ou le couvercle déformé, pour ne pas atteindre le niveau de température souhaité; ce n'est pas bien grave, on se retrouve dans le cas de figure de la casserole, il suffit de prolonger quelque peu la cuisson

Dans le cas d'un stérilisateur à 3 bars, les problèmes d'étanchéité sont moins faciles à résoudre que dans le cas d'une cocotte minute à 0.5 bar, alors même qu'une fuite de vapeur n'est pas tolérable.

Enfin, la dangerosité d'une installation à vapeur est fonction de la pression ET du volume de vapeur en jeu: plus ces deux paramètres augmentent, c'est à dire plus la quantité d'énergie en jeu est importante, et plus la réglementation est développée.

Il est donc préférable, autant que possible, de se contenter de vapeur à pression atmosphérique; et lorsqu'il faut monter en pression et température, les divers organes (chaudière, tube vapeur, stérilisateur) doivent être agencés intelligemment de façon à minimiser les risques. Le capteur "Soleil-Vapeur" est capable de produire de la vapeur à plus de 6 bar, mais cela est totalement inutile dans le cadre d'une utilisation domestique ou artisanale.

#### **B) LES UNITES DE MESURE**

##### **1) L'unité de mesure de l'énergie thermique est le Joule**

Pour élever de 1 degré Celsius la température de 1 gramme d'eau, il faut 4.18 J. Les multiples sont: le kJ = 1000 J, et le MJ = 1000 kJ

(Auparavant, l'unité était la calorie, qui n'a plus cours depuis 1977; la calorie était la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1g d'eau. 1 cal = 4.18 J).

Il y a équivalence (mais pas réversibilité, hélas !) entre toutes les formes d'énergie; le Joule est donc aussi l'unité de mesure de l'énergie mécanique et de l'énergie électrique.

##### **2) L'unité de pression est le Bar ..**

En toute rigueur, l'unité légale de pression est le Pascal, qui correspond à une force de 1 Newton appliquée sur une surface de 1 m<sup>2</sup>. Le Pascal étant une unité très faible, on utilise couramment le Bar. 1 bar = 100 000 Pascal.= 100 kP

On utilise également l'hectoPascal. 1 hecto Pascal = 1 millibar.

A titre indicatif, une pression de 1 bar correspond environ à une force de 1 kg appliquée sur une surface de 1 cm<sup>2</sup>; c'est également la pression exercée par une colonne d'eau d'environ 10 mètres de haut

##### **3) Pression absolue et pression relative**

La pression absolue indique la pression de la vapeur par rapport au vide ; la pression relative indique la pression de la vapeur par rapport à l'atmosphère ambiante. La pression atmosphérique étant d'environ 1.013 bar, la différence entre pression absolue et pression relative est également de 1.013 bar. Les scientifiques raisonnent en pression absolue, les utilisateurs raisonnent en pression relative: c'est celle indiquée par le manomètre, dite « pression manométrique» .

##### **4) Les variations de la pression atmosphérique**

Le chiffre de 1013 millibar de la pression atmosphérique n'est qu'une valeur moyenne établie au niveau de la mer.

- il varie en permanence en fonction des variations climatiques (cf les bulletins météorologiques)
- il diminue avec l'altitude.

La température d'ébullition de l'eau dans notre casserole du paragraphe précédent varie donc d'autant. En haut d'une montagne, et encore plus par mauvais temps, il faudra bien plus que les trois minutes habituelles pour cuire un œuf à la coque.

L'eau ne bout pas toujours exactement à 100°: il n'est que de se le rappeler, lorsqu'on lit un thermomètre à affichage digital qui précise les 1/10èmes de degré Celsius

On trouvera en section II une table des variations de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

### C) TABLE DE PRODUCTION DE VAPEUR

Les données chiffrées concernant la vapeur sont usuellement regroupées dans des tables de vapeur, dont voici un extrait dans la zone de température et de pression qui nous intéresse plus particulièrement

TABLE DE VAPEUR N° 1					
Energie thermique nécessaire pour produire Un kg de vapeur, à partir d'eau à 20°C			pression manométrique bars	température ° Celsius	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>
Chaleur sensible kJ/kg	Chaleur latente kJ/kg	Chaleur totale de vaporisation kJ/kg			
335	2 257	2 592	0	100.0	0.58
384	2 226	2 610	0.5	111.6	0.86
420	2 201	2 621	1	120.4	1.12
450	2 181	2 631	1.5	127.6	1.36
476	2 163	2 639	2	133.7	1.63
494	2 148	2 642	2.5	138.0	1.87
518	2 133	2 651	3	143.7	2.12
533	2 120	2 653	3.5	147.2	2.37
553	2 108	2 661	4	152.0	2.62
568	2 097	2 665	4.5	155.6	2.86
582	2 086	2 668	5	158.9	3.11
595	2 076	2 671	5.5	162.0	3.35
607	2 066	2 673	6	165.0	3.60
619	2 057	2 676	6.5	167.8	3.84
629	2 048	2 677	7	170.2	4.08
641	2 039	2 680	7.5	173.0	4.32
651	2 031	2 682	8	175.4	4.56

Pour élever la température de Un gramme d'eau de 20 à 100° C, il faut  $4.18 \times 80 = 335$  Joule. Pour Un kg d'eau, il faut 335 kJ

Pour vaporiser Un kg d'eau, sans en élever la température, il faut 2 257 kJ, soit presque sept fois plus d'énergie thermique, dite chaleur latente de vaporisation, qui sera intégralement restituée lors de l'opération inverse de condensation.

La relation entre température et pression est immuable. Les indications du thermomètre et celles du manomètre sont redondantes.

On remarquera que, pour produire un kg de vapeur à une pression élevée, il faut certes augmenter d'autant la quantité de chaleur sensible, mais la quantité de chaleur latente de vaporisation n'augmente pas, elle a même tendance à diminuer légèrement.

Le phénomène de chaleur latente liée au changement de phase (du liquide au gaz, ou du solide au liquide, ou inversement) est très courant en physique, il s'applique à de nombreux matériaux liquides, métalliques, etc...

Des tables de vapeur plus complètes sont disponibles

- [artic.ac-besancon.fr/reseau\\_STL/CIRA/ALLEAU/La%20vapeur%20d'eau.pdf](http://artic.ac-besancon.fr/reseau_STL/CIRA/ALLEAU/La%20vapeur%20d'eau.pdf), page 13, en fin d'un article qui est également une très bonne introduction à la vapeur.

- [thermexcel.com/french/tables/vap\\_eau.htm](http://thermexcel.com/french/tables/vap_eau.htm)

Noter que

- les tables de vapeur sont usuellement établies pour une température initiale de l'eau de 0°C (et souvent sans le mentionner explicitement)

- la pression prise en compte est souvent la pression absolue, et non pas la pression manométrique (= pression relative).

- la différence entre la pression absolue et la pression relative (moyenne...) est de 1013 millibar (et non pas 1 bar).

    Tout cela explique les différences que l'on remarque souvent d'une table à une autre.

## **D) TABLE DE PRODUCTION ET D'UTILISATION DE LA VAPEUR**

Soit un montage selon le schéma de la section II Paragraphe A ci dessous: la vapeur issue d'une chaudière circule dans un serpentín en cuivre immergé dans un récipient rempli d'eau. La sortie du serpentín est libre, sans aucun robinet ni vanne etc... Toute l'installation est donc à pression atmosphérique.

La vapeur pénètre dans le serpentín, commence par céder sa chaleur latente et se condense. Les condensats à leur tour cèdent leur chaleur, puis, poussés par la vapeur, ils s'échappent du serpentín à la température de 60°

Dans ce cas, en Lorsque l'on dispose de Un kg de vapeur à pression atmosphérique, On bénéficie donc de

	2 257 kJ de Chaleur latente
(100-60) *4.18	+ 167 kJ de chaleur sensible,
Soit au total	2 424 kJ

Or pour produire ce kg de vapeur, 2 592 kJ avaient été nécessaire.

Il y a donc une perte de l'ordre de 6 à 12%, variable selon le niveau de température de sortie des condensats, incompressible, inhérente au procédé, correspondant à la fraction non récupérable (en pratique) de la chaleur sensible encore contenue dans les condensats. La température de sortie des

condensats varie quelque peu selon le mode d'utilisation de la vapeur, et selon que l'on se situe au début ou à la fin de la séance de chauffe.

Il est tout à fait possible d'équiper la sortie du serpentin avec un appareil nommé purgeur, qui laisse échapper les condensats tout en maintenant une certaine pression, réglable à volonté. On dispose alors d'un niveau de température plus élevé, à adapter selon les besoins

On peut désormais compléter la table de vapeur par un volet « Utilisation de la vapeur »

Table de vapeur N° 2								
PRODUCTION DE LA VAPEUR			pression mano- métrique	tempé- rature	UTILISATION DE LA VAPEUR			
Energie thermique nécessaire pour produire Un kg de vapeur, à partir d'eau à 20°C					Energie thermique disponible avec Un kg de vapeur, pour une température de sortie des condensats de			
Chaleur sensible kJ/kg	Chaleur latente kJ/kg	Chaleur totale de vaporisation kJ/kg	bars	° Celsius	60° C kJ/kg	90° C kJ/kg	120° C kJ/kg	
335	2 257	2 592	0	100.0	2 424	2 299	-----	
384	2 226	2 610	0.5	111.6	2 442	2 317	-----	
420	2 201	2 621	1	120.4	2 454	2 328	-----	
450	2 181	2 631	1.5	127.6	2 464	2 338	2 213	
476	2 163	2 639	2	133.7	2 471	2 346	2 220	
494	2 148	2 642	2.5	138.0	2 475	2 349	2 223	
518	2 133	2 651	3	143.7	2 483	2 358	2 232	
533	2 120	2 653	3.5	147.2	2 485	2 359	2 234	
553	2 108	2 661	4	152.0	2 493	2 368	2 242	
568	2 097	2 665	4.5	155.6	2 497	2 372	2 244	
582	2 086	2 668	5	158.9	2 500	2 374	2 249	
595	2 076	2 671	5.5	162.0	2 503	2 377	2 252	
607	2 066	2 673	6	165.0	2 506	2 380	2 254	
619	2 057	2 676	6.5	167.8	2 508	2 383	2 257	
629	2 048	2 677	7	170.2	2 509	2 384	2 258	
641	2 039	2 680	7.5	173.0	2 512	2 386	2 261	
651	2 031	2 682	8	175.4	2 514	2 389	2 263	

On remarquera que, pour une température d'utilisation souhaitée, il n'y a strictement aucun avantage à utiliser de la vapeur à haute température. Et même bien au contraire: la production de vapeur à haute température et haute pression étant plus délicate, on aura toujours intérêt à utiliser la vapeur à la température « juste nécessaire ». La température « juste nécessaire » est déterminée d'une part par la température d'utilisation souhaitée, et d'autre part par l'indispensable différence de température (le Delta T) nécessaire pour que l'échange thermique aie lieu dans l'ustensile utilisateur.

Dans l'exemple ci dessus du serpentin échangeur, on constate qu'un delta T de 12° C est suffisant pour faire bouillir l'eau contenue dans le récipient. Il faut alors maintenir la vapeur à 112°C / 0.5 bar dans le serpentin, et l'équiper d'un purgeur, par exemple d'un purgeur-poids; en l'occurrence, une soupape de « cocotte minute » y pourvoira.

Attention: le tableau ci dessus ne tient pas compte des "vraies" pertes thermiques (manque d'isolation de la chaudière, des canalisations, des appareils, fuites vers l'atmosphère...) qui peuvent augmenter notablement la consommation réelle de vapeur.



## Section II - Mesure de la production de vapeur et calculs de Puissance.

L'utilisateur ne profite jamais de l'intégralité de l'énergie thermique absorbée par la chaudière: il y a tout d'abord l'inévitable perte due au niveau de température plus ou moins élevé des condensats rejetés (voir section précédente), puis les pertes en ligne dans la canalisation de vapeur, puis toutes les autres pertes dues à la qualité de l'isolation, aux procédés d'utilisation de la vapeur etc....

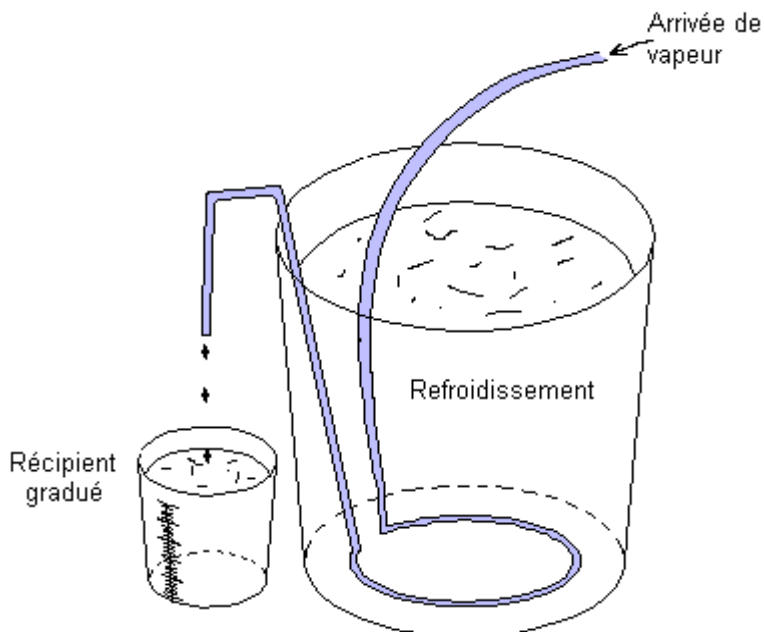
Il faut traquer les pertes par tous moyens, et le point de départ de cette traque, c'est de connaître avec précision la production de vapeur, et de pouvoir la mesurer fréquemment.

### A) MESURE DE LA PRODUCTION DE VAPEUR: UNE VERSION DE BASE

Cette méthode consiste à mesurer les condensats en sortie d'installation, elle convient dans tous les cas de figure y compris les chaudières industrielles Elle est parfaitement adaptée pour les capteurs de petite taille tels que les cuiseurs de 2m<sup>2</sup>

#### 1) Le dispositif

On reprend le dispositif très simple décrit au § précédent: au sortir de la chaudière, la vapeur transite dans un serpentin en cuivre immergé dans de l'eau froide. A l'extrémité du serpentin, on recueille les condensats dans un récipient gradué.



En pratique:

- quelques décimètres de tube cuivre Ø 8 ou 10 mm sont suffisants
- un seau de 10 litres convient très bien pour le refroidissement
- pour le récipient gradué, un vieux biberon fera parfaitement l'affaire.
- on travaille ici à pression atmosphérique, la sortie du serpentin est donc nue, dans aucun robinet ni purgeur etc...
- si l'eau du seau devient trop chaude au point de ne plus condenser entièrement la vapeur, c'est à dire si des fumerolles importantes s'échappent du serpentin, il est préférable de changer l'eau de refroidissement. De légères fumerolles sont admissibles.
- on remarquera que l'échange thermique est très important, voire violent, sur les premiers centimètres de tube cuivre. Il est préférable de prolonger le tube souple d'arrivée de vapeur jusqu'au fond du récipient, pour éviter une stratification de l'eau de refroidissement.

## **2) Les mesures et les calculs de production d'énergie thermique**

Dans le cas d'un capteur de 2m<sup>2</sup>, la quantité totale de condensats recueillis dans le récipient gradué est de l'ordre de 200 à 300 grammes en un quart d'heure, soit 100 à 150 grammes par m<sup>2</sup>

On suppose que la température initiale de l'eau est de 20°C, et que la pression atmosphérique est de 1 013 millibar

On effectue les mesures sur plusieurs quarts d'heure consécutifs, répartis au long de la journée, et on convertit les relevés de production en grammes par quart d'heure, ou en grammes par seconde.

La production d'un gramme de vapeur à 100°C nécessite

- de la chaleur sensible:  $(100-20) * 4.185 = 335$  Joule

- de la chaleur latente 2 257 J

Soit au total 2 592 J, comme indiqué sur la

table de vapeur

On peut désormais effectuer les calculs de puissance

## **B) CALCULS DE PUISSANCE**

L'unité de mesure de l'énergie est le Joule.

L'unité de mesure du temps est la seconde.

Une installation qui produit (ou consomme) une quantité d'énergie(thermique, mécanique, électrique....) de 1 Joule en 1 seconde a une puissance de 1 Watt.

L'unité de puissance est le Watt.  $1 W = 1 J/sec$

Lorsque le petit capteur produit 125 g de vapeur en un quart d'heure et par m<sup>2</sup> de miroir (la température initiale de l'eau étant de 20° C), il produit  $2 592 kJ * 0.125 kg = 324 000$  Joule en 900 secondes,

sa puissance est donc de  $324 000 / 900 = 360$  Watt par m<sup>2</sup>,

soit 720 Watt pour l'ensemble du capteur

Lorsque le capteur de 16 m<sup>2</sup> produit 650 g de vapeur en par heure et par m<sup>2</sup>, soit 0.181 gramme par seconde, sa puissance est de 0.181\*2 595 = 468 Watt par m<sup>2</sup>.  
On peut donc facilement établir une table pour la gamme de puissance d'un capteur donné.

### Table de puissance d'une chaudière d'après sa production de vapeur

La production de vapeur est mesurée par la pesée des condensats  
Température initiale de l'eau: 20° C. Vapeur produite à 100° C à pression atmosphérique

Poids en 15 minutes grammes	Poids en 1 seconde grammes	Puissance Watt	Poids en 15 minutes grammes	Poids en 1 seconde grammes	Puissance Watt	Poids en 15 minutes grammes	Poids en 1 seconde grammes	Puissance Watt
72	0,080	207	149	0,165	428	225	0,250	648
77	0,085	220	153	0,170	441	230	0,255	661
81	0,090	233	158	0,175	454	234	0,260	674
86	0,095	246	162	0,180	467	239	0,265	687
<b>90</b>	<b>0,100</b>	259	167	0,185	480	243	0,270	700
95	0,105	272	171	0,190	492	248	0,275	713
99	0,110	285	176	0,195	505	252	0,280	726
104	0,115	298	180	0,200	518	257	0,285	739
108	0,120	311	185	0,205	531	261	0,290	752
113	0,125	324	189	0,210	544	266	0,295	765
117	0,130	337	194	0,215	557	270	0,300	778
122	0,135	350	198	0,220	570	275	0,305	791
126	0,140	363	203	0,225	583	279	0,310	804
131	0,145	376	207	0,230	596	284	0,315	816
135	0,150	389	212	0,235	609	288	0,320	829
140	0,155	402	216	0,240	622	293	0,325	842
144	0,160	415	221	0,245	635	297	0,330	855

Dans le cas d'un capteur de 2 m<sup>2</sup>, afin d'éviter tout pataches, il faut préciser explicitement s'il s'agit du capteur dans sa totalité, ou de la puissance pour Un m<sup>2</sup> de miroir.

## C) COMMENTAIRES

**1- Au sujet des unités d'énergie et de puissance:** le Joule, seule unité légale d'énergie, est une unité assez faible; aussi on lui préfère parfois une autre unité de mesure, le Watt-heure, qui est la quantité d'énergie produite (ou consommée) *en une heure* par une machine d'une puissance de 1 Watt.

1 Watt/heure = 3600 Joules

1kWh = 1000 Wh = 3600 kJ.

Le Watt et le kW sont des unités de puissance; le Watt-heure et le kWh sont des unités d'énergie. Le kWh est une unité de mesure qui n'a aucune base légale

**2- Les erreurs de mesure** lorsque l'on pèse les condensats, sont toujours dans le sens d'une minoration des résultats: on perd des condensats, ou bien ils s'échappent par évaporation, ou bien il en reste un peu dans le serpent. À titre indicatif: un tube Ø 6 mm intérieur, longueur 1,00 mètre, contient 28 cm<sup>3</sup> d'eau, soit 28 grammes, soit encore 2;8 centilitres. Il faut bien sûr comparer le poids des condensats recueillis au poids d'eau fraîche introduite dans le bouilleur. On constate généralement une « démarque inconnue » de près de 10%

### **3) L'absence de prise en compte de la température de la vapeur produite**

*Ici la notion de température de la vapeur en sortie de chaudière n'intervient pas.* On a déjà remarqué (section I §C Table de production de vapeur) que la quantité de chaleur latente à fournir n'augmente pas lorsque l'on augmente la température de fonctionnement, elle a même tendance à diminuer, or c'est surtout la chaleur latente qui nous intéresse.

Et l'on sait par ailleurs que le capteur permet des niveaux de température bien au delà de 165° C, c'est d'ailleurs là un des ses intérêts majeurs.

Une mesure de la production de vapeur à pression atmosphérique/100° C rend donc très bien compte, dans un premier temps, des capacités d'un capteur.

Il faut toutefois nuancer ce propos par le fait que plus la température est élevée, et plus fortes sont les pertes diverses du simple fait de l'augmentation du delta T par rapport à l'environnement. Le rendement du capteur aura forcément tendance à diminuer lorsque l'on augmente sa température de fonctionnement ce qui est une raison supplémentaire pour ne travailler à la température « juste nécessaire » comme évoqué à la section I § D

**4)Contôle continu de la production,** rien ne s'oppose au fait de recueillir de temps à autre les condensats lors de l'utilisation courante du capteur, afin de détecter une éventuelle anomalie, ou d'inciter le "chauffeur" à améliorer l'exercice de son art.

**5) Une variante de la méthode de mesure:** consiste à faire débiter la vapeur directement dans un récipient contenant de l'eau froide et à effectuer des pesées.

- il faut utiliser deux récipients alternativement.
- chaque récipient pèse 4000grammes brut (récipient + couvercle+ eau de refroidissement)
- on fait débiter la vapeur pendant 15 minutes, puis on pèse à nouveau le récipient
- il est préférable de renouveler l'eau fraîche à chaque quart d'heure.
- les balances digitales de ménage 5Kg/1gramme, disponibles au rayon électro ménager pour 40€, conviennent parfaitement bien
- il faut lester l'extrémité du tube souple de vapeur pour qu'il reste correctement immergé dans le récipient
- le bruit de barbotage, caractéristique de la vapeur pénétrant dans l'eau , est assez désagréable;on peut isoler (phoniquement) le récipient avec quelques serviettes-éponge.
- pour limiter les pertes par évaporation, il faut utiliser un couvercle dans lequel on aura fait une engravure pour passer le tube vapeur (il y a des couvercles pour quelques € au rayon des casseroles).

Une grande partie des mesures publiées au chapitre IX « performances du capteur » ont été réalisées selon cette méthode.

### **6- Au sujet du rendement du capteur**

La production énergétique du capteur "Soleil-Vapeur" est mesurable avec une bonne précision. On

sait également mesurer la quantité d'énergie solaire reçue par le capteur.

On peut donc effectuer des calculs de rendement . Ce n'est pas là le propos immédiat d'un memento sur la vapeur: la question est abordée au chapitre X « Performances du capteur »

Voici toutefois quelques pistes de réflexion

- Quel rendement veut-on calculer: celui de la vapeur produite par le capteur, ou celui de la vapeur mise à disposition de l'utilisateur, ou la vapeur effectivement utilisée ?

- à isolation égale, pour toute machine thermique, les pertes sont d'autant plus élevées que la différence de température avec son environnement est importante: selon que la vapeur est produite à 100 ou 152 °C, ou selon que la température ambiante est froide ou chaude (le rayonnement solaire peut-être excellent par un temps très froid), le rendement sera d'autant affecté

- comme toute machine thermique, le capteur est soumis à un effet d'échelle; plus la machine (capteur, chaudière, moteur...) est de petite taille, plus le rapport entre la surface et le volume devient défavorable; or le volume engendre la puissance, la surface engendre les pertes. Toutes choses égales par ailleurs, un capteur de 2 m<sup>2</sup> a un rendement nettement inférieur à un capteur de 16 m<sup>2</sup>; un capteur de moins de 1 m<sup>2</sup> serait probablement un non sens.

- si l'on se place du point de vue de l'utilisateur, le rendement énergétique stricto sensu (flux de vapeur/flux solaire) n'est pas le seul élément à prendre en compte; il faut tenir compte du mode de travail de la vapeur. Ainsi, dans le cas de la cuisson, la vapeur permet de porter l'énergie thermique au cœur même du récipient de cuisson, lequel peut donc être isolé. Dans le cas plus classique d'une cuisson sur feu de bois ou sur brûleur à gaz, il est en pratique impossible d'isoler le récipient; et une grande partie de l'énergie thermique se dissipe sans avoir servi. Comment comparer les rendements des différents systèmes ? Les cartes sont complètement brouillées.

- Enfin, l'expression du rendement d'un capteur solaire devient complexe du fait des multiples paramètres solaires en jeu, dont il est fait état par ailleurs.

En première approche, on peut retenir que le rendement est de l'ordre 33 % dans le cas d'un petit capteur de 2 m<sup>2</sup>, et qu'il est supérieur à 50% dans le cas d'un capteur de 16 à 25 m<sup>2</sup>

## **7- Chaudières à fuel, à gaz, à charbon,**

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité d'énergie thermique qu'il fournit lors de sa combustion. Il s'exprime en MégaJoules par kg MJ/kg.

Le Pouvoir Calorifique Supérieur représente la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de combustible. Or cette combustion produit de l'eau sous forme de vapeur, qui s'échappe avec les fumées et se condense à l'extérieur. C'est donc une perte pour l'utilisateur.

Le Pouvoir Calorifique Inférieur est la quantité de chaleur produite par la combustion d'une unité de combustible et directement utilisable, compte tenu de la perte due à la chaleur de condensation non récupérée. Les chaudières « à condensation » qui récupèrent la chaleur de condensation, sont une réponse au problème. Le PCI représente environ 90% du PCS.

Fuel domestique: PCI # 43 MJ/kg; densité: #0.84

Fuel lourd N°1: PCI # 41 MJ/kg; densité: #0.94  
Butane/propane PCS # 49.5 Mj/kg PCI # 46 MJ/Kg

Concernant le fuel: l'unité de mesure commerciale est usuellement le litre, alors que pour les calculs thermiques on utilise exclusivement les kg.

Soit une chaudière à fuel lourd produisant de la vapeur à 4 bar, à partir d'eau à 20°. Le rendement d'une chaudière en bon ordre de marche est de l'ordre de 80%.

En brûlant 1 kg de fuel, on dispose de  $41 \cdot 0.8 = 32$  MJ pour produire de la vapeur.

Il faut (cf table de vapeur) 2.661 MJ pour produire Un kg de vapeur.

Chaque kg de fuel permet donc de produire  $32/2.661 = 12.3$  kg de vapeur.

en première approche: **1kg de fuel # 12 kg de vapeur**

Noter que, lors de l'arrêt quotidien (le soir), la quantité de chaleur contenue dans la chaudière est irrémédiablement perdue pendant la nuit, tout comme pour le capteur "Soleil-Vapeur"

Une chaudière à gaz a un rendement supérieur à 80 %, les chaudières à condensation ont un rendement plus élevé.

Une chaudière à charbon au début du 20ème siècle avait un rendement de l'ordre de 55 à 60%;

## **D) MESURE DE LA PRODUCTION DE VAPEUR/ LE DIAPHRAGME CALIBRE en détente critique**

Il s'agit d'une méthode de mesure plus adaptée à un capteur de 16 ou 25m<sup>2</sup>

Le principe:

Lorsqu'une machine débite un fluide sous pression (compresseur d'air, chaudière à vapeur...) on peut mesurer la quantité de fluide produit en le laissant échapper à l'atmosphère à travers un orifice de diamètre connu; c'est la méthode du diaphragme en détente critique, ( cf ancienne norme NF X 10 104)

### **1- Mode opératoire**

- on installe un diaphragme de diamètre convenable en sortie de chaudière, sur une dérivation prévue à cet effet, et munie d'un robinet
- on fait débiter la chaudière sur le diaphragme, et on observe le manomètre. Quelques minutes après qu'il se soit stabilisé, on relève la pression
- on se reporte aux abaques ci dessous.

### **2- Détails matériels**

- pour confectionner des diaphragmes, on utilise des « bouchons laiton » 1/4' ou 3/8<sup>ème</sup>, disponibles dans tous les rayons de plomberie, que l'on perce. La paroi du diaphragme ne doit pas être épaisse. Les forets sont disponibles de 1/10ème en 1/10ème de millimètre chez les revendeurs de fournitures industrielles, ou sur catalogues, ou chez les maquetistes.. Utiliser de préférence une perceuse à petit mandrin, ou monter un mandrin de maquetiste en bout du mandrin d'une perceuse

ordinaire. Marquer les diaphragmes (avant de les percer, pour ne pas déformer l'orifice). On peut vérifier le diamètre à l'aide de la queue de foret, qui est le plus souvent identique à son diamètre nominal. Il est préférable de disposer d'un jeu de plusieurs diaphragmes de diamètres échelonnés.

- Robinet vapeur: robinet à tournant sphérique, voir le chapitre plomberie, un bon choix serait la référence 4810 de chez Legris. Le diaphragme, qui a un filetage mâle cylindrique, s'installe directement sur le robinet avec une étanchéité au ruban Téflon.

### **3- Auto contrôle**

On peut également faire débiter le diaphragme dans un récipient d'eau de plusieurs dizaines de litres, effectuer les pesées, et confronter les résultats

### **4- Formule de calcul**

$$I_{\text{Kg/h/cm}^2} = 0.0206 \times 3600 \sqrt{\frac{P_{\text{Bar absolu}}}{V_{\text{m}^3/\text{kg}}}}$$

Exemple: soit un relevé de pression stabilisée à 4 bar manométriques, avec un diaphragme Ø 1.3 mm

La pression absolue P est 5 bar; le volume V de la vapeur à 5 bar absolus est 0.375 m<sup>3</sup>/kg

I = 270.8 kg de vapeur par heure et par cm<sup>2</sup> d'orifice du diaphragme

Pour un diaphragme Ø 1.3 mm, I = 3.602 Kg de vapeur par heure

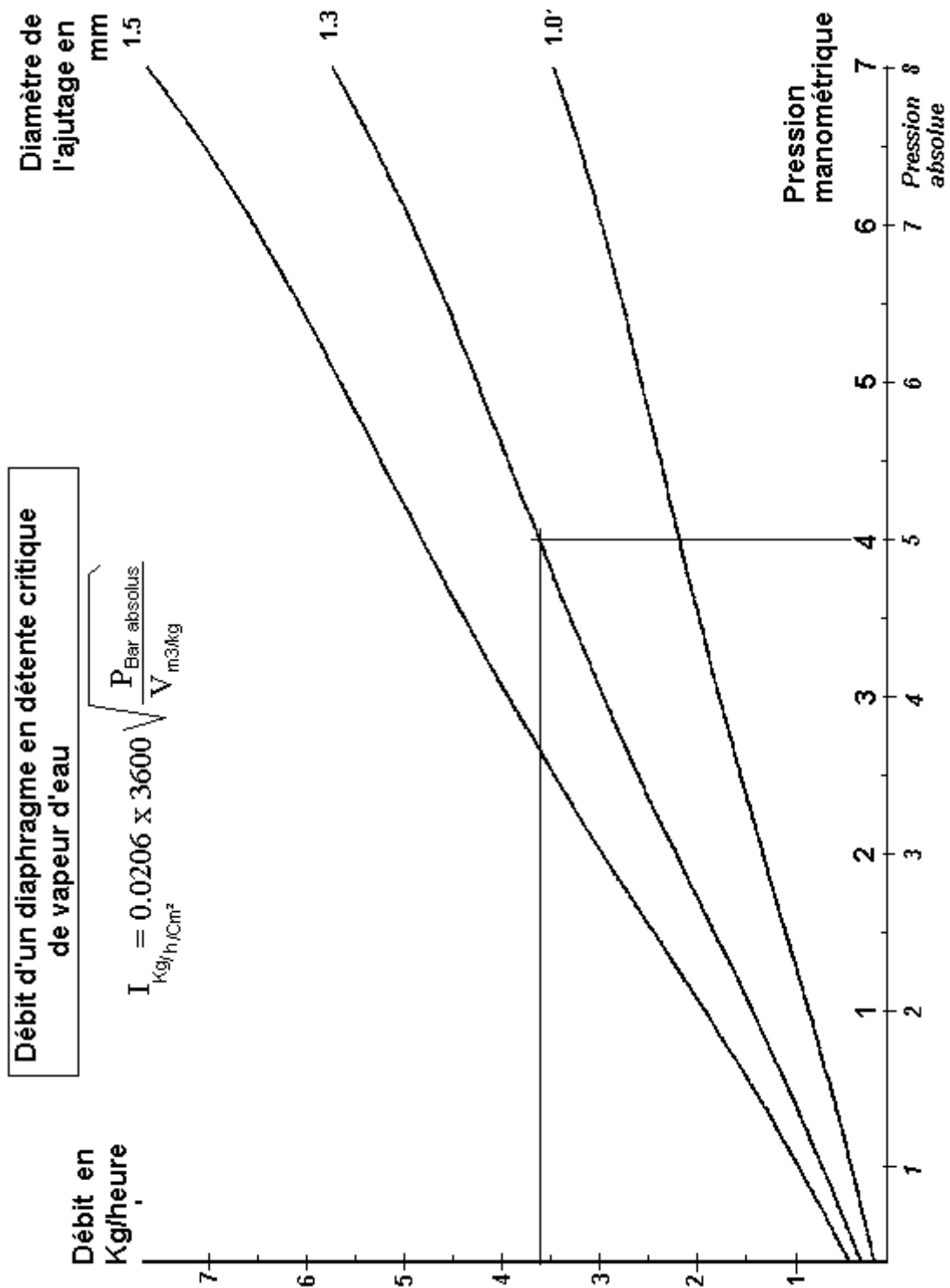
A toutes fins utiles, on trouvera le poids spécifique de la vapeur dans la table de vapeur N° 1 en section I § C

### **5-Pression atmosphérique, altitude et conditions météorologiques**

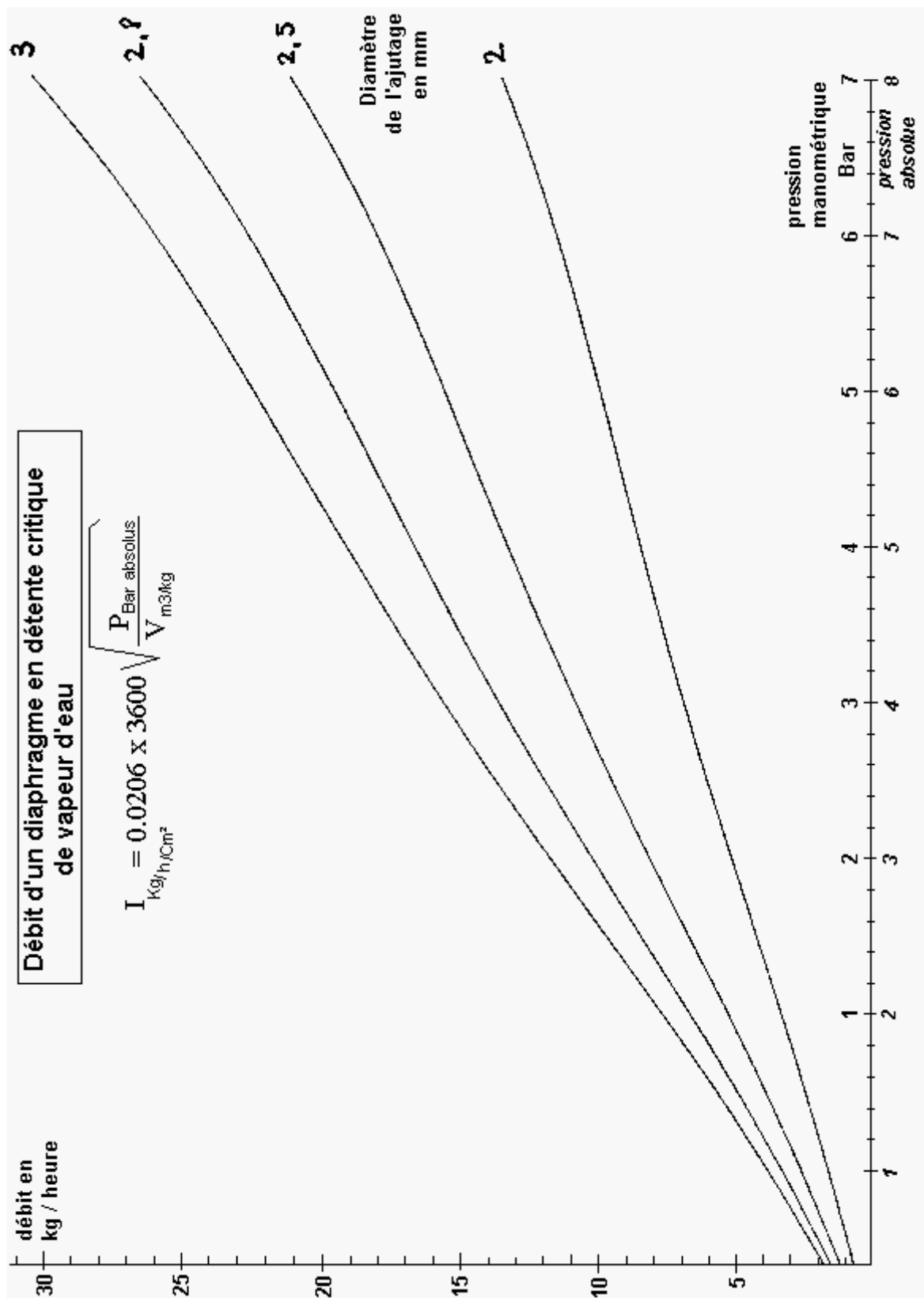
A toutes fins utiles également, on trouvera ci dessous un tableau relatif à la diminution de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude, selon Wikipédia.

<b>Variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude</b>			<b>Variation de la pression atmosphérique en fonction des conditions météorologiques</b>
Altitude en mètres	pression atmosphérique en millibar	Variation pour 100 m environ	
0	1 013	12 mb	Par très beau temps fixe, le baromètre peut monter jusqu'à 1050 mb, voir plus.
500	955	11 mb	
1 000	900	11 mb	par temps de tempête ou de grand vent, le baromètre peut descendre jusqu'à 975 mb, voire plus.
1 500	845	10 mb	
2 000	794	10 mb	
2 500	746	9 mb	
3 000	700	8 mb	
3 500	658	8 mb	
4 000	617		

**6- Abaques** Ci dessous: deux séries de courbes pour connaître rapidement le poids de vapeur produit par une chaudière.







## Section III – Avantages, inconvénients, et sécurité

### A) AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Il s'agit ici d'énumérer quelques caractéristiques de la vapeur, de façon redondante parfois, puisqu'un avantage peut être également un inconvénient.

**1- La vapeur excellent fluide de transfert thermique** en raison du changement de phase qui permet de transporter une grande quantité de chaleur par quantité de fluide. C'est un fluide peu cher et disponible quasi-universellement.

De plus, la vapeur se dirige d'elle même vers la zone froide, il n'y a donc pas besoin de pompe de circulation, comme c'est le cas avec d'autres fluides, par exemple l'huile, qui nécessite un apport d'énergie mécanique, très faible mais néanmoins problématique, .

**2-Le coefficient d'échange de la vapeur** est le meilleur de tous les fluides

« Le coefficient de transmission thermique (par conduction, par convection, par rayonnement ou global) indique quelle est la quantité de chaleur qui traverse (par conduction, par convection, par rayonnement ou les trois à la fois) l'unité de surface d'une paroi donnée pour un gradient de température de un kelvin. L'unité de coefficient de transmission thermique sera donc le Watt par mètre carré-kelvin » (Pohlmann 1993)

On l'appelle également « coefficient global d'échange thermique »

#### Ordre de grandeur des coefficients globaux d'échange

selon un document de inp-toulouse.fr

Fluide chaud	Fluide froid	W/m <sup>2</sup> .°C
Gaz	Gaz	10 - 50
Gaz	Liquide visqueux	20 - 50
Gaz	Liquide peu visqueux	20 - 80
Liquide visqueux	Gaz	20 - 50
Liquide peu visqueux	Gaz	20 - 80
Liquide visqueux	Liquide visqueux	100 - 200
Liquide visqueux	Liquide peu visqueux	100 - 300
Liquide peu visqueux	Liquide peu visqueux	700 - 1800
Vapeur se condensant	Liquide visqueux	200 - 400
Vapeur se condensant	Liquide peu visqueux	1000 - 2000
Vapeur se condensant	Liquide en ébullition	700 - 1500

On trouve dans d'autres documents les chiffres suivants:

Echange gaz-gaz: 45 W/m<sup>2</sup>.K

Echange huile-eau: 800 W/m<sup>2</sup>.K

change vapeur-eau, dans un  
condenseur: 3 400 W/m<sup>2</sup>.K

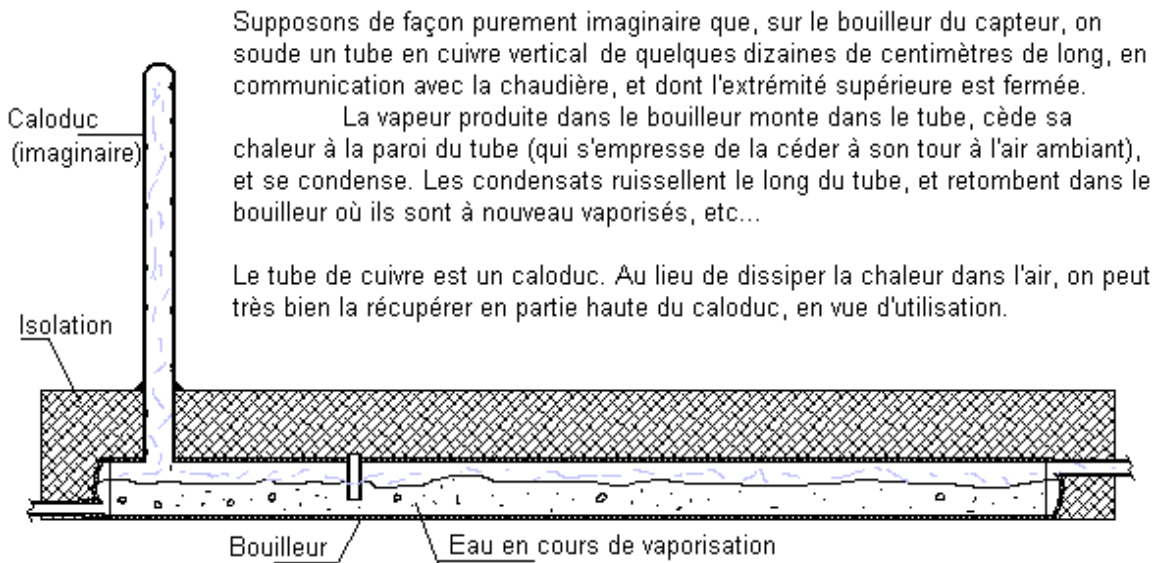
Et dans d'autres documents: le coefficient global d'échange thermique utilisé par les constructeurs d'échangeur vapeur/eau est compris entre 2300 et 2900 W/m<sup>2</sup>.°K

Noter que les valeurs réelles dépendent beaucoup du degré d'encrassement de l'échangeur.

### 3-La vapeur, énergie fugace

C'est le revers de la médaille des avantages ci dessous. La vapeur ne se stocke pas.

### 4- Le caloduc pervers



Pour peu que l'on améliore les échanges du caloduc avec l'air ambiant, par exemple en garnissant l'extérieur avec des ailettes, le caloduc serait capable de transporter et dissiper la plus grande partie de l'énergie solaire que l'on a eu tant de mal à recueillir et concentrer. Le phénomène est d'autant plus redoutable qu'il ne s'accompagne d'aucune fuite de vapeur, et reste « transparent » pour l'utilisateur tout en effondrant les performances du capteur.

Le principe du caloduc a été étudié et calculé, c'est un excellent moyen de transfert de l'énergie thermique. On en trouve des applications pratiques par exemple en matière d'énergie solaire pour transférer la chaleur recueillie par les tubes sous vide (voir [Apricus-solar.com](http://Apricus-solar.com)). Une autre utilisation en vogue actuellement est le refroidissement de composants électroniques.

Il faut retenir à notre usage que

- lors de la conception du circuit vapeur, il faut veiller à ne pas créer involontairement un caloduc. Ainsi une soupape, un manomètre, ou un thermomètre classique de chaudière, placés en extrémité d'un long tube débouchant sur l'extérieur seraient une erreur.
- le principe du caloduc serait excellent pour transférer la chaleur depuis le bouilleur jusqu'au récipient de cuisson, ne serait-ce que pour éviter la perte thermique incompressible de la chaleur sensible des condensats; malheureusement il faut y renoncer pour des questions d'ergonomie et d'accessibilité du récipient

### 5- la traque aux pertes thermiques doit commencer dès le stade de la conception

« la puissance, ce sont les volumes; les pertes, ce sont les surfaces ». A chaque stade de conception et de dessin du capteur et de l'appareil utilisateur, il faut connaître

- les volumes,
- les surfaces isolées,
- les surfaces non isolées.

Il faut bien sûr minimiser la longueur des conduites vapeur, et les isoler (il semble toutefois que, compte tenu des faibles diamètres en jeu, on soit en dessous du diamètre critique d'isolation).

## **B) SECURITE ET REGLEMENTATION**

### **1- Le potentiel de risque**

Concernant les récipients contenant un gaz sous pression, le risque est proportionnel à la quantité d'énergie qu'il renferme, c'est à dire la pression multipliée par le volume.

À pression identique, les contraintes sont d'autant moins élevées dans un tube, que son diamètre est faible, d'où l'intérêt d'une chaudière tubulaire.

Les risques sont complètement différents selon qu'il s'agit d'un gaz compressible, ou d'un liquide incompressible. C'est pourquoi une épreuve de résistance est toujours effectuée avec un liquide.

Les canalisations de cuivre ne présentent pas de gros risque il faut plusieurs centaines de bars pour exploser un tube Ø 8 ou 10

Les déboitages de raccord et les ruptures de flexibles sont réels, toutefois vu les diamètres les conséquences ne peuvent pas être bien importantes. Le risque majeur serait une rupture sous pression de la canalisation de vidange du bouilleur.

**2- en cas de défaillance du conducteur**, notamment en cas d'absence d'eau dans la chaudière, le bouilleur ne subit aucun dommage. La température d'équilibre, selon le thermomètre dans le doigt de gant, est de l'ordre de 210 ° C. Lorsque l'on réalimente en eau fraîche, il se produit un vaporisation violente accompagnée de craquements du métal, mais sans danger majeur. Le phénomène est sans comparaison avec la réalimentation d'une chaudière à énergie fossile « soumise à la flamme » qui, dans des circonstances identiques, exploserait.

L'alarme de niveau bas, obligatoire dans la panoplie de la chaudière classique, est ici inutile. (noter que la température d'équilibre de la chaudière sans eau est inférieure à celle de la chaudière chargée de paraffine, qui s'élève alors à 260° C lorsque l'on n'extrait pas d'énergie)

### **3-Quelques ordres d'idée**

L'eau du robinet est à une pression de l'ordre de quelques bars. 2 bars étant un minimum, 7 bar un maximum.

Une cuve à fuel à usage domestique est éprouvée à 0.5 bar: c'est la pression de fonctionnement d'un cocotte-minute.

Un pneumatique de tracteur agricole est gonflé à moins de 2 bar