

LA VAPEUR EN MODELISME NAVAL

Compilation des cahiers

Ecrit par Suykens Léonard

Edité par l'a.s.b.l. Model Nautic Club

- 1 J'AI VOULU EN SAVOIR PLUS SUR LA VAPEUR D'EAU**
- 2 JE CONSTRUIS UN ENSEMBLE CHAUDIERE-BRULEUR**
- 3 J'AI VOULU COMPRENDRE LES MYSTERES
ENTOURANT LES BRULEURS GPL**
- 4 JE CONSTRUIS UN MODELE REDUIT DE A A Z**
- 5 JE CONSTRUIT UN MOTEUR OSCILLANT**
- 6 JE CONSTRUIS UN MOTEUR TYPE PILON**

LA VAPEUR EN MODELISME NAVAL

J'AI VOULU EN SAVOIR PLUS SUR LA
VAPEUR D'EAU

PREAMBULE

Un musicien qui ne joue pas "à l'oreille" doit connaître le solfège.
De la même façon, nous vaporistes, devons connaître les unités utilisées dans notre hobby.

Avant de parler d'eau vaporisée nous retiendrons que :

LA FORCE

Elle était anciennement, l'unité de force qui donnait à la masse de 1 kg poids, une accélération de 9,81 mètres par seconde, et s'écrivait kg ou kgf.
Depuis 1974 l'unité de force est celle qui communique à la masse de 1kg une accélération de 1 mètre par seconde.

Cette unité de force est le NEWTON et s'écrit N, elle vaut $\frac{1}{9,81} = +/- 0,1kg$.

RETENONS Q'UN N VAUT ENVIRON 0,100 KG

Dorénavant vous demanderez donc chez l'épicière 50 NEWTON de pommes de terre plutôt que 5 kg. Vous reviendrez très vite à l'ancienne conception.

LA PRESSION

La pression est par définition l'action d'une force par unité de surface.



Anciennement on l'exprimait entr'autre en kg/cm², mais puisque l'unité de force a changé, il fallut nécessairement changer l'unité de pression.

Elle devient par exemple le NEWTON par m² ou N/m².

C'est la définition du PASCAL. Le PASCAL ou Pa vaut +/- 0,1 Kg/m².

Il faut donc environ 100.000 Pa pour obtenir 1 kg/cm²

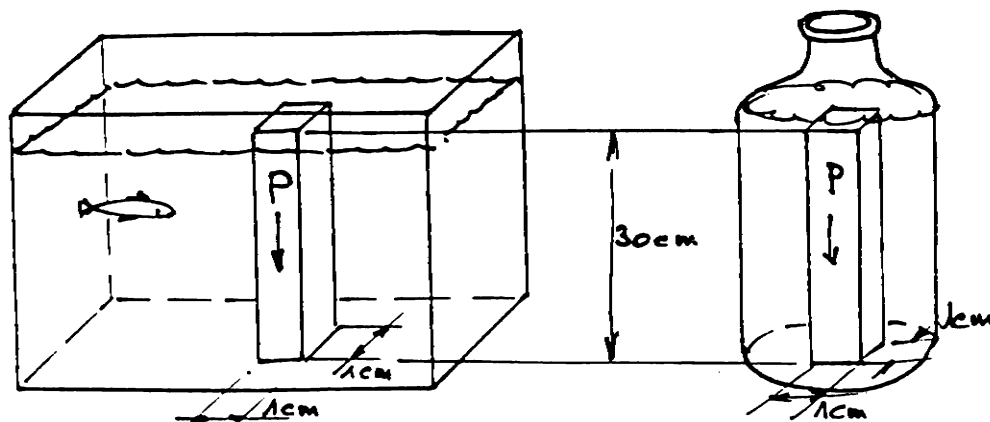
RETENONS QUE 1 KG/CM² VAUT +/- 100.000 Pa

UTILISONS PLUTOT LE Bar QUI VAUT LUI AUSSI 100 KPa

Dans nos lectures techniques de tous les jours nous rencontrons bien d'autres manières d'exprimer la pression.

Prenons l'exemple suivant :

Le poids de l'eau des sources, rivières, canaux etc exerce une pression sur le fond (et latéralement). On peut l'exprimer de différentes façons.



La pression P qu'exerce l'eau sur le fond se détermine ou s'exprime en prenant le poids de la colonne de liquide agissant sur une surface déterminée; par exemple, 1 cm x 1 cm.

Dans notre aquarium ou dans la bouteille la pression sera de 30 gr/cm² parce que le poids de la colonne d'eau qui agit sur la surface de 1 cm² égale 30 gr.

En effet 30 cm x 1 cm² = 30 cm³.

Sachant que 1000 cm³ ou 1 dm³ pèse 1000 gr on en déduit que 30 cm³ pèsent 30 gr.

On peut aussi dire que la pression est de 30 cm d'eau

ou 300 mm d'eau

ou 0,3 m d'eau

On utilise souvent ces façons pour exprimer la valeur de la pression lorsque l'on parle de pompes à faible puissance. Par exemple en chauffage central on parlera de circulateurs ayant un débit de 1000l/h avec une pression de 10 m d'eau ou 10m de colonne d'eau ou 10m CE (ce qui revient à dire que cette pompe donne une pression différentielle de 1kg/cm² ou 1 Bar).

L'unité de pression la plus utilisée de nos jours (et admise) est le Bar.

1 Bar = +/- 1kg/cm² = +/- 100 kPa

= 10m CE = +/- 1 atm.

= 14 psi (pounds square inch)

Dans le cas de nos petits bateaux, nous parlerons de pressions lues au manomètre. Souvent exprimées en kg/cm², sachons cependant que l'atmosphère dans laquelle nous vivons vaut +/- 1 Bar et doit s'ajouter à la pression lue au manomètre si l'on veut parler de pression absolue. Les tables que nous consultons pour nos calculs sont toujours exprimées en pressions absolues.

RETENONS QUE 1 BAR = +/- 1KG/CM² = 100 kPa
LA PRESSION ABSOLUE Pabs = PRESSION MANOMETRE + 1 BAR.

LA TEMPERATURE

La température dans nos régions est exprimée en degrés CELCIUS.

Si cette température, graduée en °C pouvait descendre dans nos thermomètres conventionnels jusqu'au point le plus bas, on pourrait lire -273,16 °C.

Cette température est appelée température absolue et correspond au 0° K du nom de KELVIN.

Notre 0° C correspond donc en fait à 273° K.

RETENONS QUE le °C = le °K pour ce qui concerne
les différences de température
le °C devient °K en additionnant 273°C
lorsque l'on exprime un niveau de température.

QUANTITE DE CHALEUR

Anciennement l'unité de chaleur était la calorie et s'écrivait cal et/ou kcal (= 1000 cal).

Aujourd'hui il convient d'utiliser l'unité légale : le joule = J

RETENONS QUE 1 kcal = 4,18 KJ

Pour rappel, chauffer 1 kg d'eau (ou 1l) de 1°C demande une quantité de chaleur de 1 kcal.

La quantité de chaleur nécessaire pour chauffer de 1°C, 1kg de matière s'appelle chaleur spécifique. Puisqu'il faut 1 kcal pour chauffer 1 kg d'eau de 1°C, sa chaleur spécifique est de 1.

Dans la plupart des publications actuelles on utilise encore la kilocalorie (kcal) comme unité de calcul, celle-ci étant plus représentative de la notion "chaleur".

Rappelons donc que 1 KW = 860 kcal/h

1 chh = 632 kcal/h

La France a longtemps utilisée la Thermie qui vaut 1000 kcal.

PUISSANCE

Déplacer 75 kg de 1 mètre en 1 seconde demande une puissance de 1ch (1 cheval).

Un moteur de 1ch qui travaille pendant 1 heure développe un travail appelé 1 cheval heure et dégage 632 kcal de chaleur. De la même manière 1 Kilowatt (kw) développe 860 kcal/h.

Nous pourrions encore énumérer plusieurs définitions, unités etc, mais le but recherché est de pouvoir "naviguer" dans les termes techniques courants et non pas de rechercher à gagner les jeux olympiques de l'érudition.

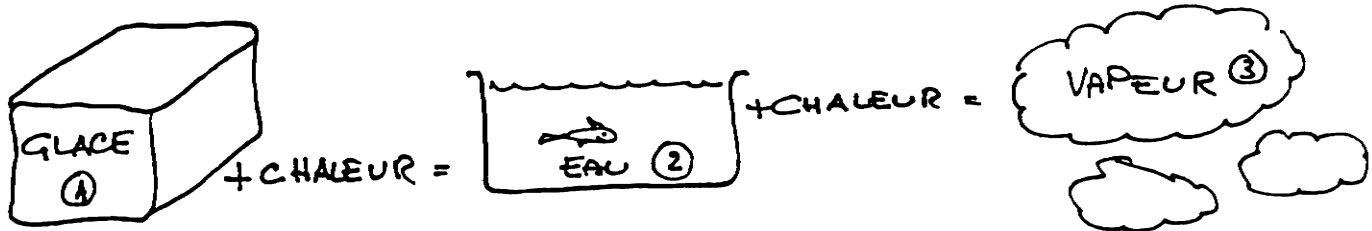
Passons donc au sujet qui nous préoccupe.

Un professeur disait un jour : L'eau c'est de l'eau, mais ce n'est pas de l'eau en étant de l'eau.

Définition on ne sait plus clair (comme de l'eau de roche).

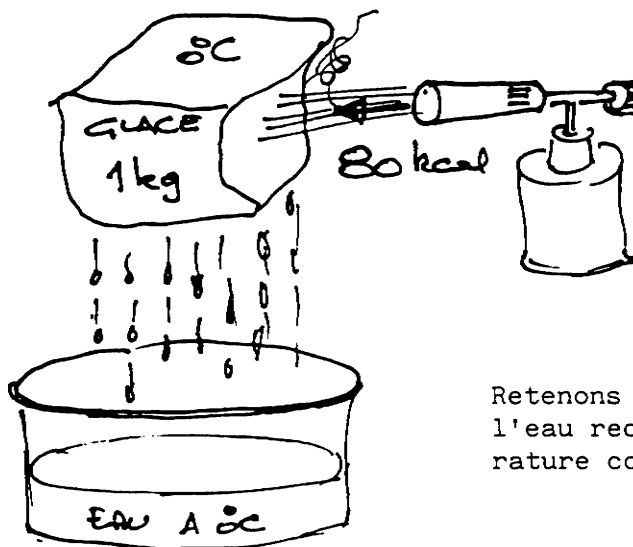
En fait, on veut dire par là que l'eau comme beaucoup de fluides, passe par 3 états dépendant de la température et pression ambiante.

A LA PRESSION AMBIANTE (ou pression atmosphérique)



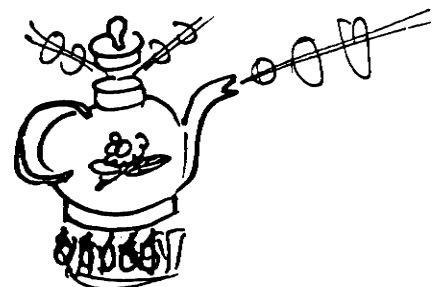
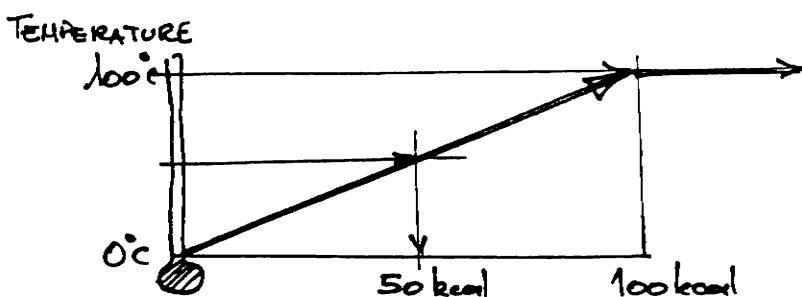
① PHASE SOLIDE

En passant de l'état solide à l'état liquide, la glace absorbe 80 kcal par kg, cette chaleur s'appelle chaleur de fusion



Retenons que pendant la fusion l'eau recueillie restera à température constante de 0°C.

② PHASE LIQUIDE



Lorsque l'on chauffe 1kg d'eau à partir de 0°C on constate une augmentation de température de 1°C par kcal fournie (Normal, puisque la chaleur spécifique =1) Après avoir donné 100 kcal au kilo d'eau celui-ci se mettra à bouillir. Cette chaleur est appelée chaleur sensible.

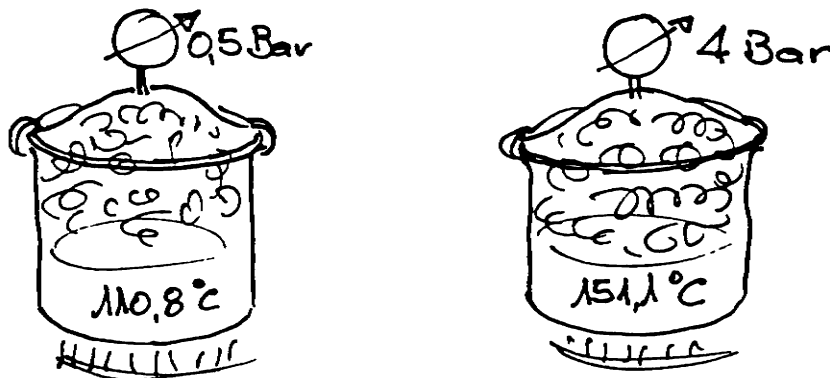
③ PHASE VAPEUR

Il faudra encore fournir 535 kcal pour que toute l'eau se transforme en vapeur. Cette chaleur s'appelle chaleur latente de vaporisation. Pendant ce temps, la température de l'eau et de la vapeur ne varie pas et reste constante à 100°C.

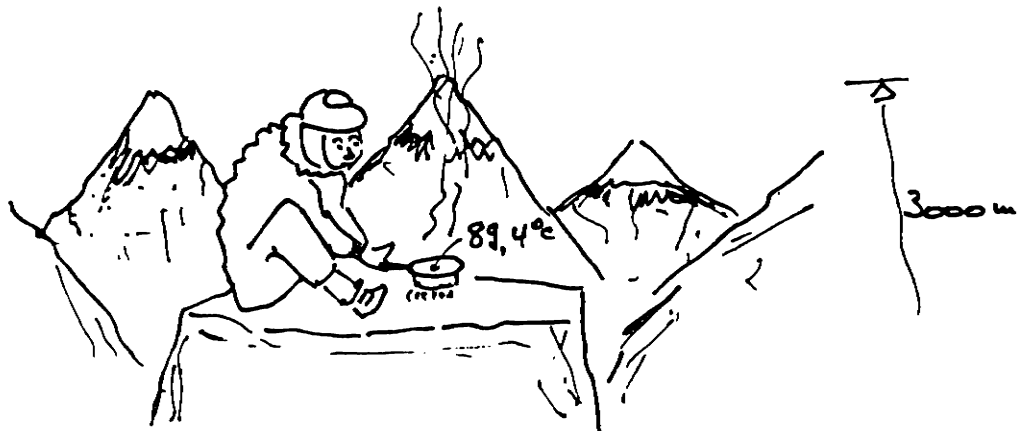
RETENONS QUE POUR : (à la pression atmosphérique)
 Fondre 1kg de glace il faut 80 kcal.
 Chauffer 1kg d'eau de 0 à 100°C il faut 100 kcal
 Transformer 1kg d'eau bouillante en vapeur il faut 535 kcal

Tout ceci est vrai pour autant que nous nous trouvons à la pression atmosphérique (sous-entendu au niveau de la mer).

Si nous augmentons la pression sur l'eau, la température d'ébullition augmente. Ainsi si nous faisons bouillir l'eau dans une cocotte minute avec une pression au dessus de l'eau de 0,5 Bar au manomètre, on constate que l'eau va bouillir à 110,8°C. Si nous forçons sur la pression jusqu'à 4 Bars mano l'eau va bouillir à 151,1°C.



Inversément, si nous diminuons la pression, par exemple si nous grimpons sur une montagne de 3000m, la pression atmosphérique descend à 0,7 Bar et l'eau va bouillir à 89,4°C (Bonjour le café)



On peut ainsi voir bouillir l'eau à 6,7°C si on diminue la pression à 0,01 Bar.

RETENONS QU'À CHAQUE PRESSION CORRESPOND
 UNE TEMPÉRATURE D'ÉBULLITION BIEN DÉTERMINÉE

Si nous revenons un moment à nos chaudières de bateaux, on constate que la pression de marche se situe toujours au delà de la pression atmosphérique. Si, pour l'exemple, on suppose une pression de 3 Bars au manomètre, on peut voir dans la table (voir plus loin) que l'eau qui se trouve sous le plan de vapeur est à 142,9°C. Cette eau est dite surchauffée. En cas de fuite ou de rupture de la chaudière, une partie de cette eau se vaporise instantanément du fait qu'elle est mise en contact avec la pression atmosphérique où elle boût à 100°C. Sachant qu'à cette température la vapeur occupe un volume de plus de 1700 fois celui de l'eau, on comprend aisément l'avantage à ne pas se trouver dans la trajectoire du jet de vapeur. Et dire que certains se demandent pourquoi on fait un test pression avant mise en service d'une chaudière.

Mais revenons à nos moutons et parlons de chaleur spécifique (définie plus haut).

Imaginons que nous voulions vaporiser 1kg d'eau en surchauffant celle-ci à 4 Bars manomètre et 250°C. Pour rendre plus clair la notion de chaleur spécifique nous imaginons que nous ne disposons que de glace à -20°C.

Dans les tables on trouve les valeurs suivantes :

eau	chal.spec.	= 1,00 kcal/kg
glace	"	= 0,50 kcal/kg
vapeur	"	= 0,50 kcal/kg (à pression constante)

Bilan

-Avant de la fondre il faut amener la glace de -20° à 0°C.	
-Chaleur nécessaire 1kg x 0,5(chal.spec.)x 20°C(diff.de temp.) =	10kcal
-Chaleur de fusion à 0°C	80kcal
-Chauffage de l'eau de 0°C à 151,1°C (temp. de l'eau à la pression abs de 5 Bars, soit 4 Bars mano + 1 Bar)	
1kg x 1(chal. spec) x 151,1°C =	152kcal
(152 parce que la chal.spec. varie quelque peu)	
-Vaporisation de l'eau à 151,1°C (voir tables)	504kcal
-Surchauffe de la vapeur de 151,1°C à 250°C	
1kg x 0,5 (chal. spec.) x (250 -151,1) = +/-	50kcal

Total de la chaleur fournie	796kcal

Je ne connais pas pour ma part, des courageux qui iraient jusqu'à casser la glace de l'étang par -20°C pour quand même naviguer, mais on ne sait jamais.

Poursuivons nos investigations et voyons ce qui se passe pendant un cycle de navigation.

Prenons l'exemple suivant :

- Contenance de la chaudière	900 cc eau à 20°C
- Consommation de vapeur	15gr/min
- Poids de la chaudière	2kg
- Chal.spec. cuivre	0,094
- Pression manomètre de marche	3 Bars
- Vapeur	saturée sèche
- Température de l'eau à 4 Bars abs	142,9°C
- Mise en température souhaitée	10 min.

Pour l'exercice on suppose qu'il n'y a pas de pertes thermiques (déperditions).

Bilan thermique

Chauffage de l'eau à 142,9°C

$$0,9\text{kg} \times 1 \text{ (chal.spec.)} \times (142,9^\circ\text{C} - 20^\circ) \text{ (diff. de temp.)} = 110,6 \text{ kcal}$$

Chauffage de la masse de cuivre de la chaudière

$$2 \text{ kg} \times 0,094 \text{ (chal.spec.)} \times (142,9^\circ\text{C} - 20^\circ) = 23,1 \text{ kcal}$$

<u>total</u>	<u>133,7 kcal</u>
--------------	-------------------

Si nous voulons donner cette chaleur de 133,7 kcal en 10 minutes, il faudra prévoir un brûleur pouvant donner par heure $133,7 \times 6 = 802,2 \text{ kcal}$

La chaleur de vaporisation de l'eau à 142,9°C est de (voit tables) 509,0 kcal/kg.

Le temps de navigation pourra être de $\frac{900 \text{ cc}}{15 \text{ gr/min}} = 60 \text{ minutes}$

La chaleur à fournir en 60 min. ou en 1 heure sera donc $0,9 \text{ kg} (900 \text{ cc}) \times 509,0 = 458,0 \text{ kcal.}$

On constate (aux pertes près) que pour chauffer la chaudière il faut quasi le double de chaleur par rapport à celle nécessaire en navigation.

Cela fait réfléchir et ne met plus en doute le grand avantage à installer un régulateur de gaz.

Pour les lecteurs, qui à ce stade, ne sont pas encore effondrés, il nous faut entrer un peu plus dans les détails. Il n'est en effet pas possible de ce dire vapistre sans avoir une idée du diagramme de Mollier. Avant de le construire (rassurez-vous dans une forme simplifiée) il est bon de regarder les tableaux ci-dessous dans lesquels j'ai puisé les infos nécessaires pour les exercices faits ci-dessus.

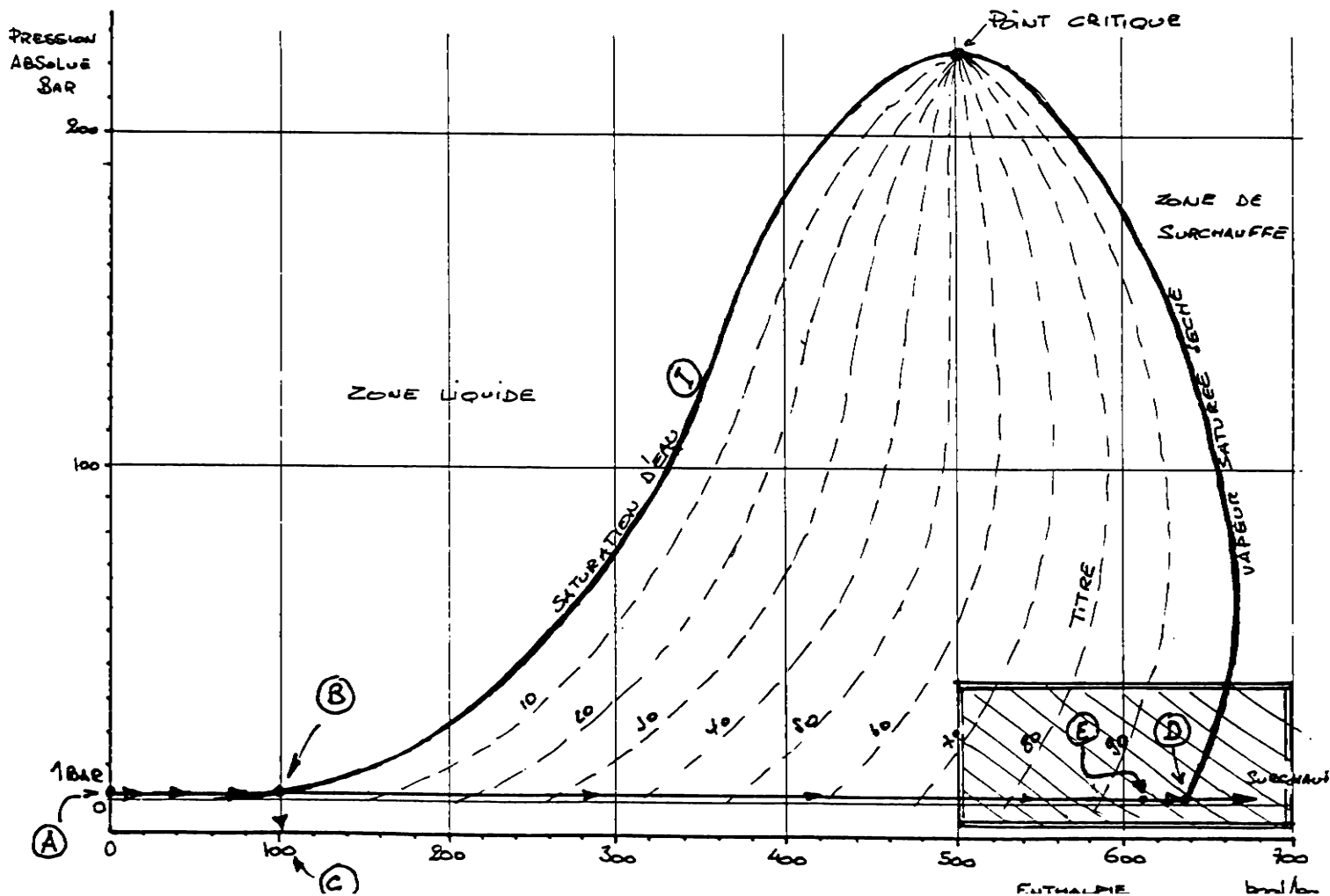
CHALEUR SPECIFIQUE DE DIFFERENTS CORPS EN KCAL/kg (°C)

<u>Métaux</u>	<u>Autres corps</u>	<u>Liquides</u>
Aluminium 0,214	Beton 0,21	Alcool 0,58
Plomb 0,031	Gypse 0,26	Huile machine 0,40
Cuivre 0,094	Verre 0,20	Pétrole 0,50
Laiton 0,092	Chêne 0,57	Térébenthine 0,43
Fer 0,110	Grès 0,17	Goudron/bitume 0,50
Acier 0,115	Briques 0,22	Eau 1
Zinc 0,094		Glace 0,50
		Benzine 0,50
		Air 0,24

TABLE DE LA VAPEUR D'EAU SATUREE

:Pression :absolue :mano + :1 Bar :	:Tempé- :rature :t°C :	:Volume :spécifique :m3/kg :	:Poids :spécifique :Kg/m3 :	:Chaleur : du :liquide :kcal/kg :	:Chaleur :latente :de vapo- :risation :kcal/kg :	:
: 1,00	: 100,0	: 1,721	: 0,58	: 100	: 539	:
: 1,20	: 104,2	: 1,451	: 0,69	: 104	: 536	:
: 1,40	: 108,7	: 1,258	: 0,79	: 108	: 533	:
: 1,60	: 112,7	: 1,108	: 0,90	: 112	: 530	:
: 1,80	: 116,3	: 0,993	: 1,00	: 116	: 528	:
: 2,00	: 119,6	: 0,902	: 1,10	: 120	: 526	:
: 2,50	: 126,8	: 0,735	: 1,36	: 127	: 520	:
: 3,00	: 132,9	: 0,619	: 1,61	: 133	: 516	:
: 3,50	: 138,2	: 0,533	: 1,87	: 139	: 512	:
: 4,00	: 142,9	: 0,471	: 2,12	: 144	: 509	:
: 5,00	: 151,1	: 0,381	: 2,62	: 152	: 504	:
: 10,00	: 179,0	: 0,198	: 5,04	: 181	: 481	:
: 15,00	: 197,3	: 0,134	: 7,44	: 200	: 466	:
: 20,00	: 211,3	: 0,101	: 9,85	: 216	: 453	:
: 50,00	: 262,7	: 0,040	: 24,85	: 274	: 393	:
: 75,00	: 289,1	: 0,025	: 38,66	: 307	: 353	:
: 100,00	: 309,5	: 0,018	: 54,21	: 334	: 317	:
: 150,00	: 340,5	: 0,010	: 93,90	: 381	: 243	:
: 200,00	: 364,0	: 0,006	: 161,20	: 431	: 150	:
: 225,00	: 374,0	: 0,003	: 315,00	: 501	: 0	:

Si nous "rangeons" les chiffres ci-dessus dans un système cartésien nous obtenons le diagramme de Mollier.



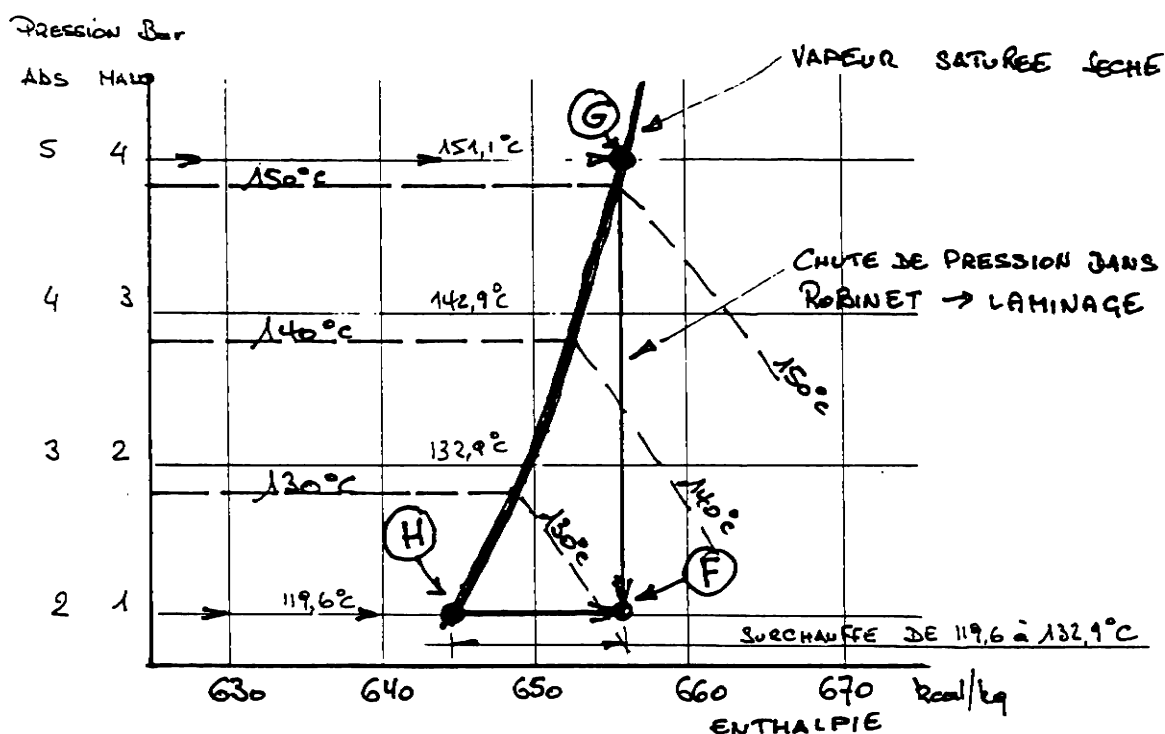
Ce diagramme à l'avantage de contenir toutes les données nécessaires aux calculs et permet de voir l'évolution du fluide de façon plus concrète que dans les tables.

Pour l'exemple, prenons l'eau de la pression atmosphérique. En partant de l'ordonnée 1 Bar (A) nous allons tracer une ligne vers la droite. Au point (B) l'eau est chauffée à 100° et contient donc 100 kcal/kg (C) (en partant de l'eau à 0°C et contenant par définition zéro kcal). On dit aussi que l'enthalpie de l'eau est de 100 kcal/kg. Nous continuons à chauffer et progressons vers le point (D) où toute l'eau est évaporée et aura une enthalpie de 635 kcal/kg. A cet endroit la vapeur est dite vapeur saturée sèche.

Entre les points (B) et (C) l'eau s'évapore progressivement en passant par différents stades appelés titres. Entre ces 2 points la vapeur est dite vapeur humide. Si la vapeur se trouve au point (E) on parle de vapeur humide au titre 0,95 (parce que contenant encore 5% d'eau).

Si nous continuons à chauffer la vapeur au delà du point (D) la vapeur est dite surchauffée. Pendant le processus d'évaporation d'eau et surchauffe, la pression reste constante. Retenons donc que lorsque nous surchauffons la vapeur dans nos petites chaudières, seul la température monte mais la pression reste constante.

Nous allons agrandir la partie hachurée pour expliquer un autre phénomène.



Imaginons que nous voulions alimenter notre machine à vapeur avec une vapeur légèrement surchauffée et à une pression de 2 Bars. 2 solutions sont possibles. Soit nous sortons la vapeur de la chaudière à 2 Bars, au point (H) et alimentons la machine via un tuyau de vapeur passant par le foyer de façon à surchauffer la vapeur jusqu'en (F) par exemple. Une autre façon consiste à ne pas installer un tube vapeur dans le foyer mais de simplement augmenter la pression de la chaudière jusqu'en (G) par exemple. Il suffit maintenant de simplement "étrangler" la vapeur à la sortie de la chaudière à l'aide du robinet d'arrêt pour provoquer une perte de pression de (G) jusqu'en (F). Cette opération s'appelle laminer la vapeur.

En fait lorsque l'on détend la vapeur sans production de travail on ne diminue pas la chaleur contenue dans le fluide qui, par conséquent, se surchauffe. Pour quand même faire un peu scientifique (ça fait bien au bord de l'eau), on appelle cela une détente adiabatique.

Nous devons encore connaître un autre phénomène, celui du primage. Lorsque l'eau est en ébullition dans nos chaudières, une petite partie de celle-ci est entraînée avec la vapeur, surtout en première partie du parcours lorsque le niveau d'eau est au maximum. C'est ce phénomène qui est souvent à l'origine de ce que l'on appelle le coup de bélier dans les conduites. En effet, l'eau entraînée passe par des situations perturbées du fait de la cavitation, se détend parfois brusquement à des endroits où la pression est plus réduite (par exemple après un coude), et provoque par sa vaporisation instantanée des bulles de vapeur qui sont à l'origine du bruit caractéristique. Dans nos petits bateaux, ces phénomènes ne sont pas importants et même inaudibles du fait des petites quantités d'énergie mises en jeu.

Revenant un moment au diagramme de Mollier (page 8) il est intéressant de noter que ; à fur et à mesure que l'on monte sur la ligne de saturation d'eau **(I)** celle-ci demande de plus en plus de chaleur pour atteindre son point d'ébullition alors que la chaleur d'évaporation diminue. C'est tellement vrai qu'au sommet de la courbe (au point d'inflexion pour les nostalgiques) la chaleur d'échauffement de l'eau (chaleur sensible) est maximale et la chaleur d'évaporation (chaleur latente de vaporisation) devient nulle. Dans cette situation l'évaporation de l'eau est instantanée. C'est ce que l'on appelle le point critique. Au delà de ce point il n'est plus possible de rencontrer du liquide. Vous allez dire, ça n'existe pas dans la nature, mais c'est ce qui vous trompe, beaucoup de fluides présentent les mêmes caractéristiques fondamentales que l'eau, et le plus près de nous est l'air. Nous vivons constamment dans une situation au delà du point critique. Un exemple plus concret est celui du gaz naturel qu'il faut entr'autre refroidir à -160°C pour le rendre liquide.

En fait si tout cela paraît bien complexe, il suffit de se remémorer que dans la nature, tous les fluides répondent à la règle générale des 3 états (solide, liquide, vapeur) mais à des températures/pression différentes.

Retenons les quelques exemples ci-dessous pour ce qui concerne leur température d'ébullition.

- A la pression atmosphérique l'eau bout à	100°C
l'alcool pur bout à	78°C
l'huile de frites bout à +/-	180°C
le butane bout à +/-	0°C
le propane bout à	-42°C
l'air bout à	-193°C
le gaz naturel bout à	-160°C

LA VAPEUR EN MODELISME NAVAL

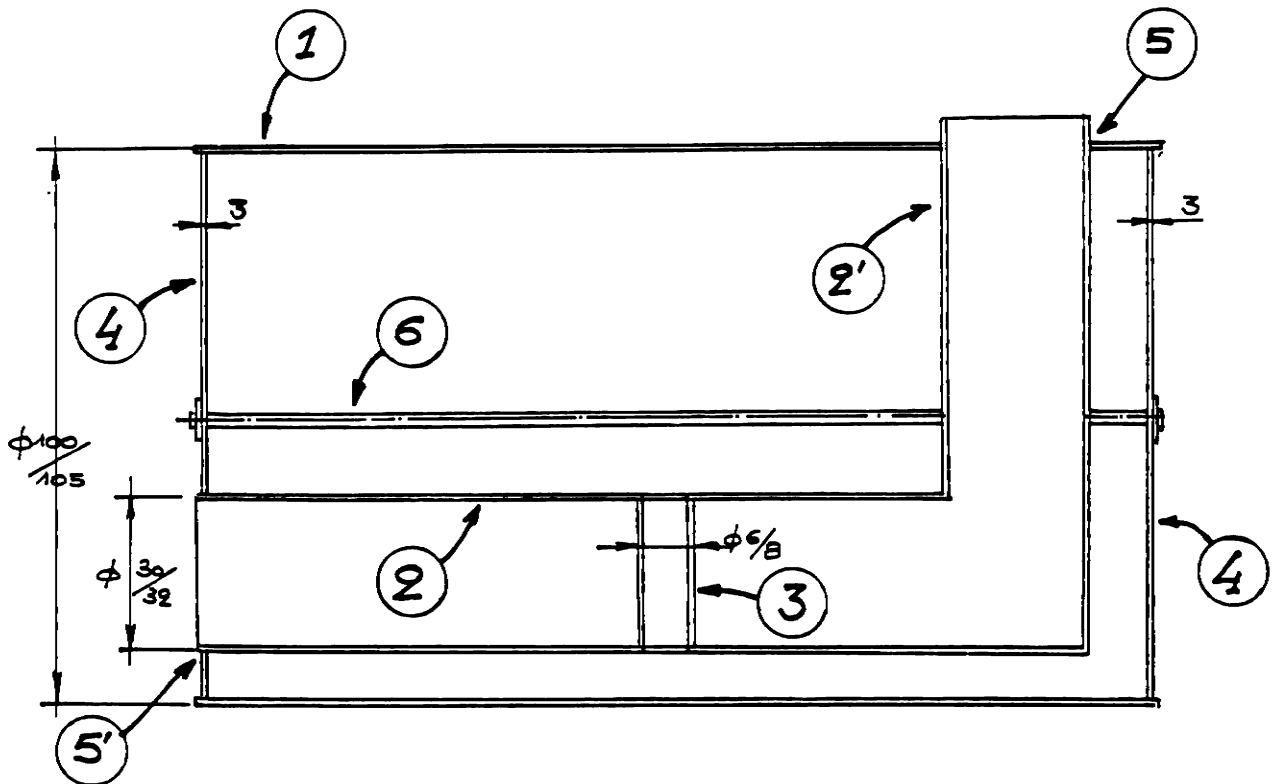
JE CONSTRUIS UN ENSEMBLE CHAUDIERE/BRULEUR

Avant propos Le navimodélisme à vapeur implique une prise en considération sous l'aspect SECURITE.

Il est impératif de procéder à une approche technique de ses composants. C'est la raison pour laquelle cette brochure existe. Elle n'est certe pas complète, mais pourra éviter des déboires au lecteur assidu, amateur de ce genre de délassement.

Le moteur à vapeur étant déjà abondamment décrit dans la littérature spécialisée, il ne sera pas repris dans les pages qui suivent.

CONSTRUCTION D'UNE CHAUDIERE
POUR NAVIMODELISME



Type de chaudière :	A foyer intérieur de type GALLOWAY à fonds plats.
Timbre :	5 Bar
Pression d'épreuve:	7,5 Bar
Métal utilisé :	Cuivre rouge Taux de travail 3 kg/mm^2 Taux de rupture 30 kg/mm^2
Brasure :	Alliage d'argent à 40 % Température de fusion supérieure à 600°c . Taux de rupture 50 kg/mm^2

REMARQUES :

- L'article 758 du R.G.P.T. stipule :
Aucune chaudière mobile d'une capacité supérieure à vingt-cinq litres et timbrée à une pression dépassant un demi kilogramme par centimètre carré, ne pourra être mise en usage qu'après une autorisation délivrée par le Gouverneur de la Province où elle doit fonctionner en premier lieu.
- Les calculs font appel aux Normes Belges NBN 732 à 743 et 101-022.
- La pression de calcul adoptée est la pression d'épreuve (par mesure de sécurité vis à vis du cuivre).
- La surcharge d'épaisseur c pour effet de corrosion n'entre pas en considération, compte tenu de l'utilisation de cuivre et de combustible gazeux de type butane-propane.

① Calcul de l'épaisseur de l'enveloppe cylindrique.

$$e = \frac{P \times R}{fz - 0,5 P} + c$$

$$e = \frac{0,75 \times 50}{30 \times 1 - 0,5 \times 0,75}$$

$$e = 1,26 \text{ mm} < 2,5 \text{ mm}$$

e = mm

P = 0,75 N/mm²

R = Rayon int. = 50 mm

f = Taux de travail = 30 N/mm²

z = 1 (const. sans rivets)

c = 0 (voir remarque)

② Calcul du tube foyer.

Compte tenu des tubes GALLOWAY le calcul du tube foyer s'appuie sur la formule utilisée pour foyer ondulé.

$$e = \frac{P \times De}{1,2 f} + c$$

$$e = \frac{7,5 \times 32}{1,2 \times 300}$$

$$e = 0,66 \text{ mm} < 1 \text{ mm}$$

Formule hétérogène

e = mm

P = 7,5 Bar = +/- 7,5 kg/cm²

De = mm Ø ext₂

f = 300 kg/cm²

②' Calcul du tube cheminée.

$$e = \frac{P \times De}{1,6 f} + c$$

$$e = 0,5 \text{ mm} < 1 \text{ mm}$$

$$e = \frac{0,75 \times 32}{1,6 \times 30}$$

③ Calcul du tube GALLOWAY.

$$e = \frac{P \times De}{2 f + P} + c$$

$$e = 0,098 \text{ mm} < 1 \text{ mm}$$

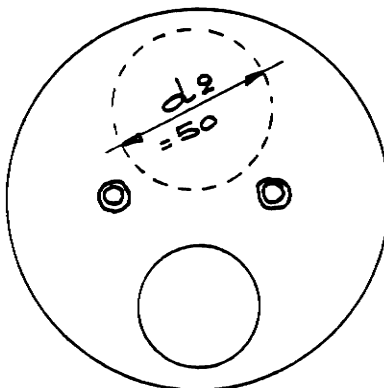
$$e = \frac{0,75 \times 8}{2 \times 30 + 0,75}$$

④ Calcul des fonds plats avec entretoises.

$$e = 0,35 \times d_2 \sqrt{\frac{P}{f}} + c$$

$$e = 0,35 \times 50 \sqrt{\frac{0,75}{30}}$$

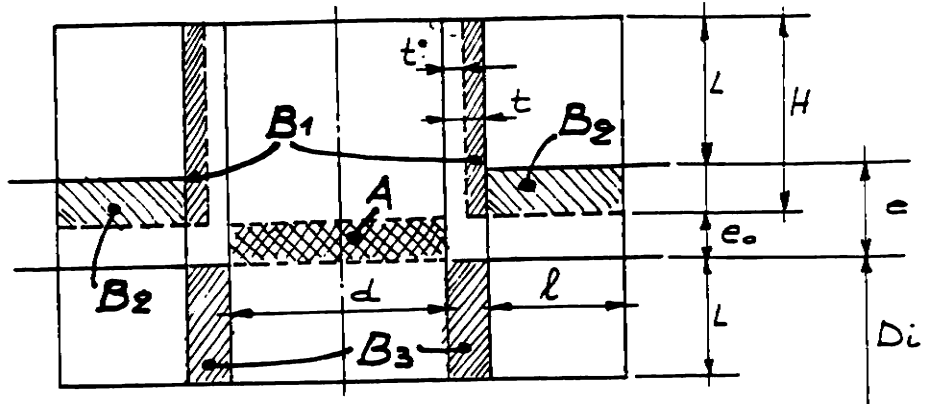
$$e = 2,76 \text{ mm} < 3 \text{ mm}$$



5

5'

Remarque : la vérification du renfort en 5' s'appuie sur le même principe de calcul.



L'aire de compensation B ($B_1 + B_2 + B_3$) est au moins égale à l'aire à compenser A.

$$\text{Aire à compenser } A = d \times e = 30 \times 1,26 = 37,8 \text{ mm}^2$$

$$L = 0,8 \sqrt{(Di + e) e} = 0,8 \sqrt{(100 + 2,5) 2,5} = 12,8 \text{ mm}$$

$$L = 0,8 \sqrt{(d + t) t} = 0,8 \sqrt{(30 + 1) 1} = 4,38 \text{ mm}$$

Aires	de compensation $B_1 = 2 \times H \times 0,5 = 2 (4,38 + 1,24) \times 0,5 = 5,62 \text{ mm}^2$	2
	$B_2 = 2 \times L \times 1,24 = 2 \times 12,8 \times 1,24 = 31,74 \text{ mm}^2$	2
	$B_3 = 2 \times L \times 1 = 2 \times 4,38 \times 1 = 8,76 \text{ mm}^2$	2
		2
	$46,12 \text{ mm}^2$	$46,12 \text{ mm}^2$

$$46,12 \text{ mm}^2 > 37,8 \text{ mm}^2$$

Remarque : le même calcul mené pour des ouvertures plus petites (remplissage, prise vapeur, etc) donne des résultats en plus prononcés, en écart positif pour B et n'est par conséquent plus détaillé.

6

Calcul des entretoises.

Diamètre provisoire du tirant : 9 mm nombre : 2

$$S = \frac{F}{f}$$

S = section nette du tirant en mm^2
 F = effort exercé par le fluide sur la surface supportée par le tirant
 f = 30 N/mm^2

$$F = P \times A$$

$$A = a \times b - \frac{\pi d^2}{4}$$

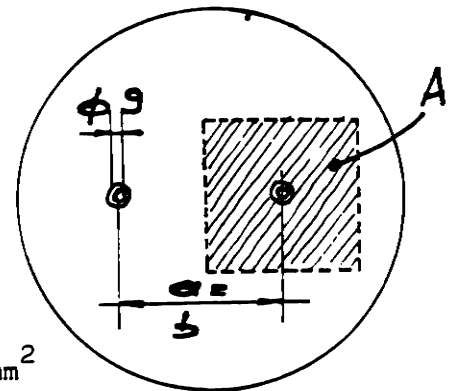
$$A = 50 \times 50 - \frac{\pi \times 9^2}{4}$$

$$= 2500 - 63,6 = 2436 \text{ mm}^2$$

$$F = 0,75 \times 2436 = 1827 \text{ N}$$

$$S = \frac{1827}{30} = 60 \text{ mm}^2$$

$$60 \text{ mm}^2 < 63,6 \text{ mm}^2$$



Les tirants de diamètre 9 mm sont adoptés.

Résistance du cordon de soudure.

Longueur cordon $100 \times \pi \phi = 314 \text{ mm}$

Charge non reprise par les tirants

$$p \times \left(\frac{\pi \times D^2}{4} - 2 A \right)$$

$$0,75 \times (7854 - 4872) = 2236 \text{ N.}$$

soit +/- 200 kg réparti sur un pourtour de 314 mm

Charge en cisaillement par mm

$$\frac{200}{314} = \frac{0,6}{0,8} = 0,8 \text{ kg donc négligeable}$$

(0,8 ← coefficient de cisaillement)

0

CALCUL DE LA SURFACE DE CHAUFFE
D'UNE CHAUDIERE POUR NAVIMODELISME

La façon la plus simple pour calculer cette surface est de faire appel aux chiffres empiriques mentionnés dans les revues spécialisées. On parle ainsi de vaporisation de 4 à 6 cm³ par minute et par décimètre carré.

Une approche plus technique est décrite ci-après.

Remarque : - Les calculs sont menés avec les anciennes unités qu'il suffit pour les puristes de convertir en unités "SI" à l'aide de quelques constantes.

- La chaudière étudiée dans l'exemple ci-dessous sera calculée pour alimenter un moteur à vapeur de type AL5 (Mr LECOMTE) 2 cylindres, vertical double effet, alésage 12, course 12, en alimentation totale.

Déterminons le débit de vapeur nécessaire en admettant que le moteur tournera à 600t/min. sous 2 Bar.

Puissance fournie par le moteur dans ces conditions (aux pertes près)

$$ch = \frac{\pi \times R^2 \times P \times L \times A \times n}{60 \times 75}$$

R = rayon piston en cm = 0,6

P = pression mano = 2 Bar

L = course en m = 0,012

A = nombre d'effets = 4

n = nombre de tours minute = 600

$$ch = \frac{\pi \times 0,6^2 \times 2 \times 0,012 \times 4 \times 600}{60 \times 75} = 0,0144 \text{ ch.}$$

= 10 Watt

Pour la petite histoire, la machinerie de la GULNARE, (plan de Mr RETIF pour les initiés) calculée de la même façon donne une puissance de 9,58 Watt.

Volume du moteur en cm³ :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times l \times 4$$

D = 1,2 cm

$$V = \frac{\pi \times 1,2^2}{4} \times 1,2 \times 4 = 5,42 \text{ cm}^3 \quad l = 1,2 \text{ cm}$$

Soit à 600 t/min. $5,42 \times 600 = 3252 \text{ cm}^3/\text{min.}$

Caractéristiques de la vapeur à 2 Bar manomètre

t° 133°c

poids spécifique 1,61 gr/dm³

chaleur latente de vaporisation 517 kcal/kg

Débit de vapeur en poids à 2 Bar mano et 600t/min.

$$Q = 3252 \times \frac{1,61}{1000} = 5,23 \text{ gr/min.}$$

Nous admettrons une perte de vapeur aux joints, bielles etc de +/- 20%.

Le poids d'eau à évaporer par minute sera donc :

$$5,23 + (5,23 \times 0,2) = 6,27 \text{ gr/min. (1)}$$

Partons du fait que l'eau dans la chaudière ait été réchauffée au préalable à 133°c, il faut lui fournir par minute :

$$\frac{517 \times 6,27}{1000} = 3,24 \text{ kcal/min. (2)}$$

Cette chaleur doit être fournie à l'eau via la paroi d'échange de chaleur de la chaudière, c.à d. par le tube foyer plus les tubes auxilliaires (dans notre cas de type GALLOWAY).

La loi générale d'échange de chaleur en kcal/h est d'application.

$$Q = K \times S \times \Delta t$$

$$K = \frac{1}{R}$$

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}$$

K = Coefficient de transmission de chaleur en kcal/m²/h/°c

R = résistance thermique

α = Coefficient de convection

$$\alpha_i = 30 \quad \alpha_e = 50$$

e = épaisseur de paroi en m

λ = Coefficient de conductibilité en kcal/h/m/°c = 300 pour le cuivre

S = surface en m²

Δt = différence de température moyenne

$$K = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{0,001}{300} + \frac{1}{50}} = \frac{1}{0,033 + \cancel{X} + 0,020}$$

↓ négligeable

$$K = \frac{1}{0,053} = 18,8 \text{ kcal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{c}$$

Température de la flamme à l'entrée du foyer : 1400°c

Température de la flamme à la cheminée : 200°c

Température de l'eau : 133°c

$$\Delta t \text{ (courants croisés)} = \frac{1400 + 200}{2} - 133 = 667^\circ\text{c}$$

$$Q = 18,8 \times 1 \times 667 = 12.539 \text{ kcal/m}^2/\text{h}.$$

La chaleur pouvant être transmise par minute et par dm²

$$q = \frac{12.539}{60 \times 100} = 2,08 \text{ kcal/min/dm}^2$$

La surface de chauffe de notre chaudière devra donc être de min.

$$\frac{3,24^{(2)}}{2,08} = 1,55 \text{ dm}^2 \text{ (3)}$$

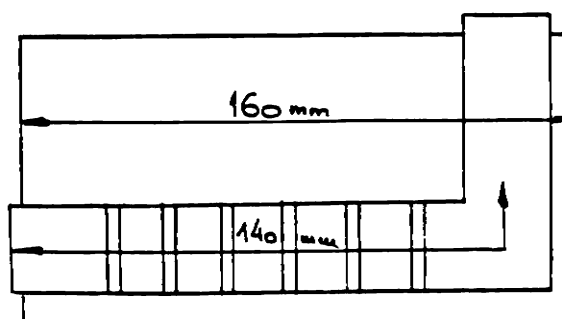
Observation : Le poids d'eau évaporé par dm² et par min.

$$\frac{6,27^{(1)}}{1,55} = 4,04 \text{ gr, ce qui est dans la norme.}$$

On constate que la production de vapeur par unité de surface augmente lorsque l'échange se fait par des tubes d'eau verticaux (augmentation de la convection α_e).

Remarque constructive : En général, la chaudière sera construite en cuivre pour des raisons de commodités ; pas d'entretien, pas de corrosion etc. Pour ce qui concerne l'échange de chaleur proprement dit, on constate que, malgré son coefficient λ élevé, son action sur l'échange global est négligeable.

- Dimensionnement de la chaudière. Tubes cuivre disponibles : 80/84 - 26/28 - 6/8



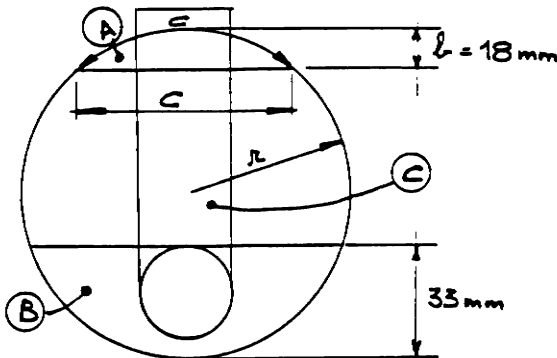
Admettons à priori les dimensions ci-dessus et calculons la surface en cm^2

Tube foyer	$S = \pi \times 2,8 \times 14$	$= 123 \text{ cm}^2$
à retirer	$12 \times \pi \cdot 0,4^2$	$= - 6 \text{ cm}^2$
Tubes Galloway	$4 = 6 \times \pi \times 0,8 \times 2,8$	$= 42 \text{ cm}^2$
	total	159 cm^2

$$1,59 \text{ dm}^2 > 1,55 \text{ dm}^2 (3)$$

- Temps de marche ou autonomie

Volume de la chaudière $\pi \times 4^2 \times 16 = 804 \text{ cm}^3$



$$\text{Volume (A)} = 16 \times \frac{r(a-c) + cb}{2} = 16 \times \frac{4(8,2-6,9) + 6,9 \times 1,8}{2} = 140 \text{ cm}^3$$

$$\text{(B)} = 16 \times \frac{4(11-7,7) + 7,7 \times 3,3}{2} = 308 \text{ cm}^3$$

$$\text{(C)} = \pi \times 1,4^2 \times 2,5 = \pm \frac{15}{463} \text{ cm}^3$$

- Temps de navigation théorique

$$\frac{804 - 463}{6,27} = 54 \text{ minutes soit } \pm 1 \text{ heure}$$

Comme la chaudière sera chauffée à l'aide de gaz GPL, un bref rappel des caractéristiques de ces combustibles est repris ci-dessous (propane et butane commercial).

Formule	Propane C_3H_8	Butane C_4H_{10}
Tension de vapeur à 20°C (bars absolus) à 50°C	9,6 19,2	2,9 6,6
Masse spécifique à l'état liquide (kg/dm^3) à 20°C	0,502	0,573
Masse spécifique à l'état gazeux (kg/m^3) à 20°C	1,85	2,4
Pouvoir calorifique en kcal/kg inférieur	11.000	10.900
supérieur	11.900	11.800
en kcal/ m^3 inférieur	20.400	26.200
à 20°C et 1013 mbar supérieur	22.000	28.300
Température d'ébullition à pression atmosphérique	-42°C	-5°C
Température de la flamme dans l'air	1920°C	1920°C
dans l'oxygène	2820°C	2820°C
Chaleur latente de vaporisation à 20°C kcal/kg	85	85
Limites d'inflammabilité fourchette dans le mélange en %	entre 2,4 et 9,5	1,9 et 8,5

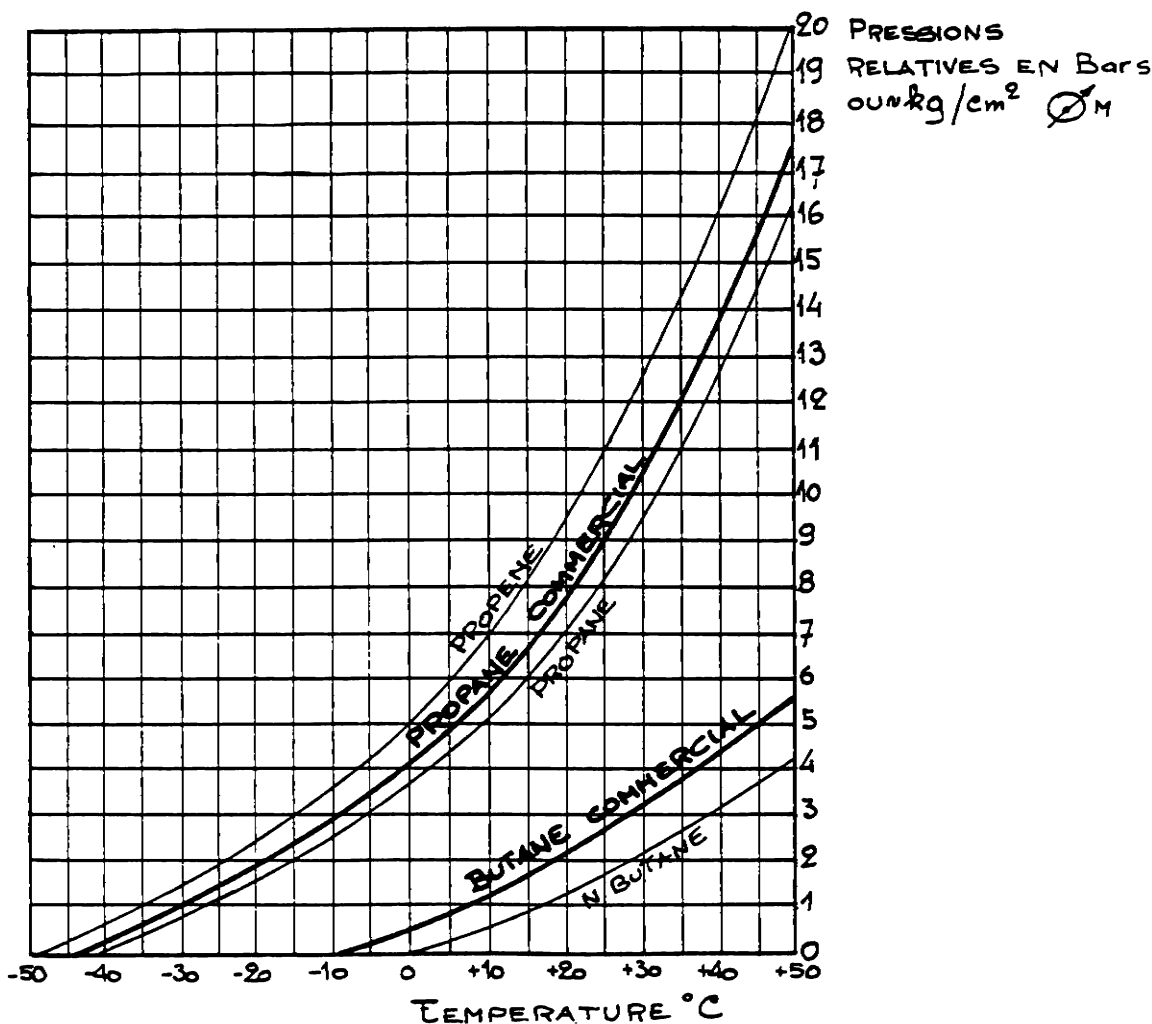
Action physico-chimique

Les GPL n'attaquent pas les métaux usuels.

Leur très faible viscosité leur confère une propension à s'infiltrer par les orifices les plus étroits tels que la porosité de certains métaux. Ils dissolvent facilement un très grand nombre de substances; graisse, huile, vernis, caoutchouc naturel etc.

L'évaporation rapide du propane, à l'état liquide provoque au contact de la peau des lésions analogues à des brûlures.

Les gaz ne sont pas toxiques, l'inhalation prolongée ne peut provoquer que des maux de tête, pour peu qu'il reste une présence d'oxygène suffisante pour les besoins de l'organisme.



CALCUL DU BRULEUR GPL

Déterminer le type de brûleur ainsi que sa puissance calorifique, implique d'abord de fixer différents critères :

- temps de réchauffe
- type de chaudière
- espace disponible pour le réservoir à gaz
- type de gaz (butane, propane ou mélange)

Pour l'exemple ci-après, nous prendrons comme base la chaudière déterminée précédemment.

Temps de réchauffe souhaité : 20 minutes

Nous supposons qu'il n'y a pas de place disponible pour loger une cartouche de gaz commercial (type camping gaz 190 gr par exemple) et devons donc déterminer la grandeur du réservoir à gaz ainsi que ses caractéristiques de construction.

Volume métal

- Fonds	$41^2 \times 2 \times 2 = 21.124 \text{ mm}^3$	
- Enveloppe	$82 \times 2 \times 160 = 82.435 \text{ mm}^3$	
- Foyer	$27 \times 1 \times 220 = 18.661 \text{ mm}^3$	
- Tubes	$6 \times 7 \times 1 \times 28 = 3.694 \text{ mm}^3$	
	<u>$125.914 \text{ mm}^3 =$</u>	$0,126 \text{ dm}^3$
- Poids chaudière	$0,126 \text{ dm}^3 \times 8,8$ (poids spécifique) =	$1,110 \text{ kg}$
- Accessoires (tirants, dôme, soupape, niveau) estimé à		<u>$0,450 \text{ kg}$</u>
		1.560 kg
- Volume d'eau à chauffer, voir ci-avant $804 \text{ cm}^3 - 140 \text{ cm}^3 =$		664 cm^3
- Chaleur d'échauffement de la chaudière de 20° à 133°C	$1.560 \times 0,1$ (chal.spec.) $\times (133-20) =$	$17,63 \text{ kcal}$
- Chaleur d'échauffement de l'eau	$0,664 \times 1$ (chal. spec.) $\times (133-20) =$	$75,03 \text{ kcal}$
		<u>$92,66 \text{ kcal}$</u>
- Pertes de chaleur par les parois pendant l'échauffement (suivant formule de Spaleck-Kaiser)		<u>$32,00 \text{ kcal}$</u>
	total	<u>$124,66 \text{ kcal}$</u>

Sachant par expérience que le rendement d'une petite chaudière et du brûleur est de l'ordre de 75 et 60 % il faudra donc fournir en 20 min. une quantité de chaleur de :

$$\frac{124,66}{0,75 \times 0,6} = 277 \text{ kcal}$$

La puissance calorifique horaire du brûleur sera donc de $3 \times 277 = 831 \text{ kcal}$.

Consommation du brûleur en GPL

$$\frac{831 \times 1000 \text{ gr}}{11.000 \text{ (p.c.i)}} = 75,55 \text{ gr/h}$$

En pratique nous adopterons par exemple le brûleur CAMPING GAZ de 130 gr/h à 1 Bar.