

LA VAPEUR EN MODELISME NAVAL

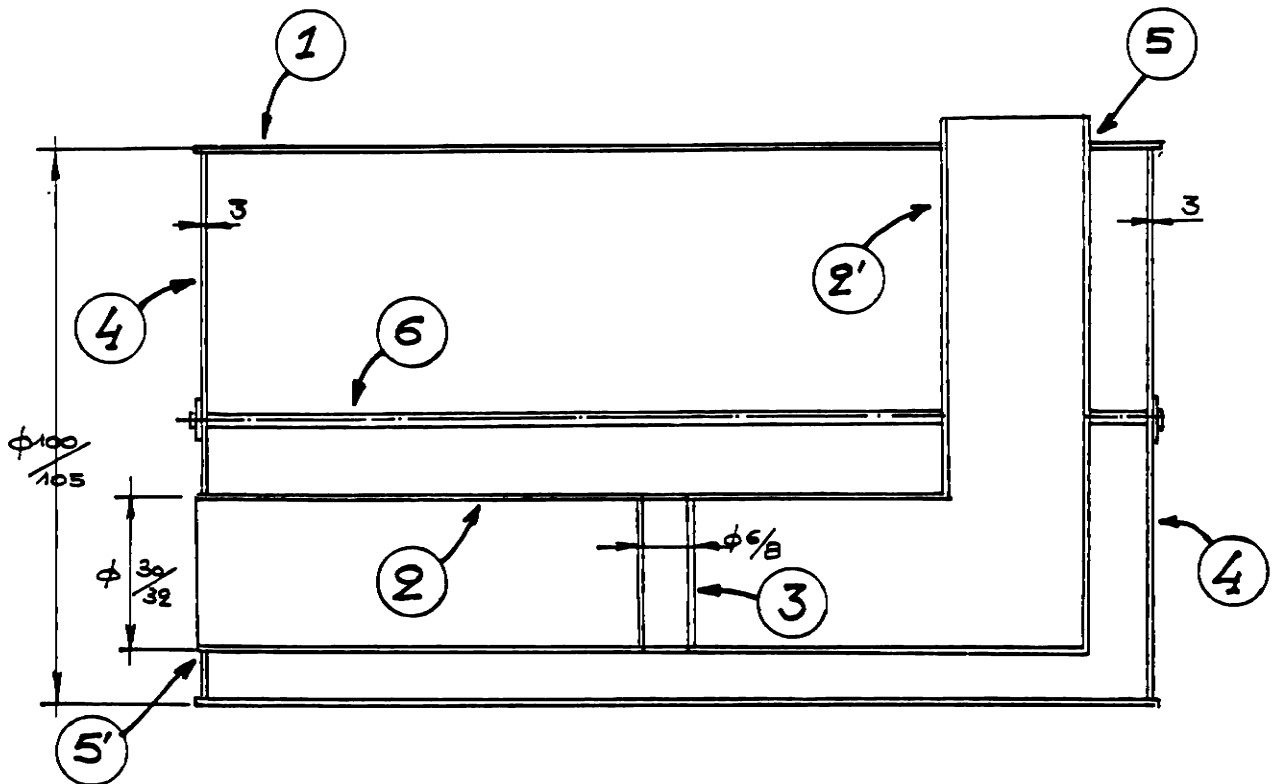
JE CONSTRUIS UN ENSEMBLE CHAUDIERE/BRULEUR

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 ext.

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.

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

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

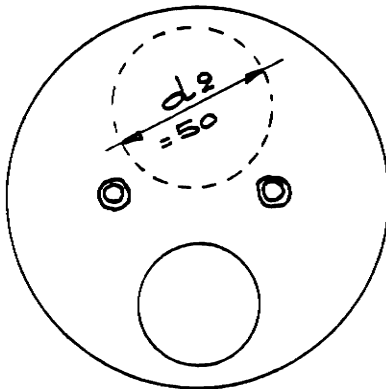
$$e = \frac{0,75 \times 8}{2 \times 30 + 0,75}$$

④ Calcul des fonds plats avec entretoises.

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

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

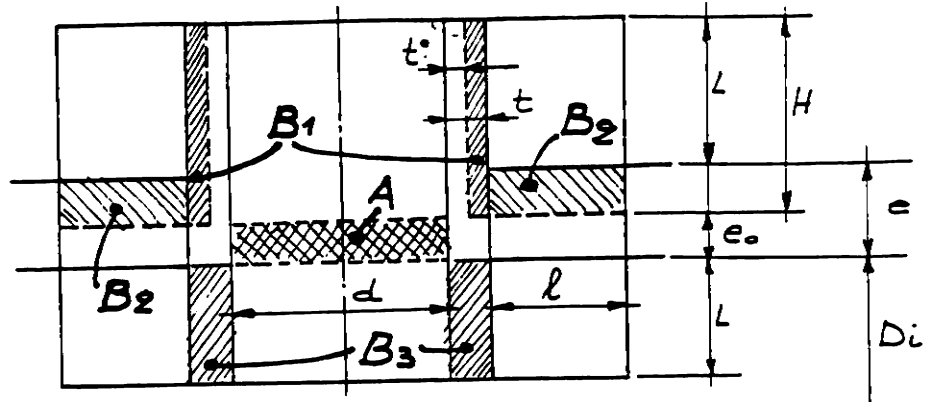
$$e = 2,76 \text{ mm} < 3 \text{ mm}$$



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.

$$\text{Aire à compenser } A = d \times e_0 = 30 \times 1,26 = 37,8 \text{ mm}^2$$

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

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

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

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

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

$$F = P \times A$$

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

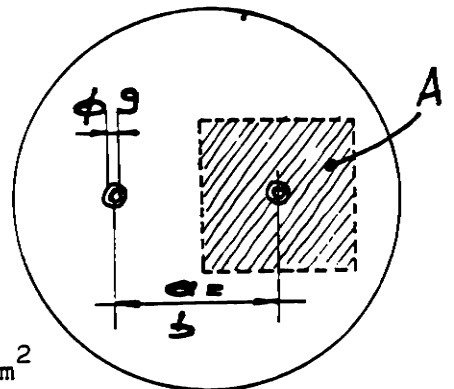
$$A = 50 \times 50 - \frac{\pi \times 9^2}{4}$$

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

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

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

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



Les tirants de diamètre 9 mm sont adoptés.

Résistance du cordon de soudure.

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

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.

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

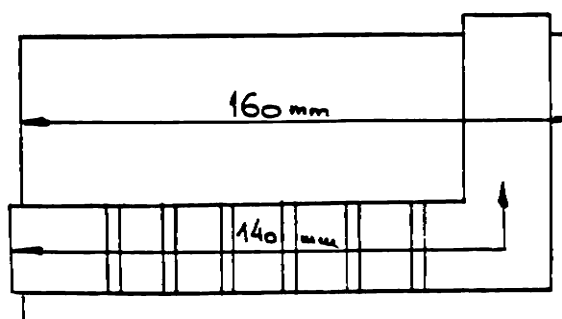
Observation : Le poids d'eau évaporé par dm² et par min.

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

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



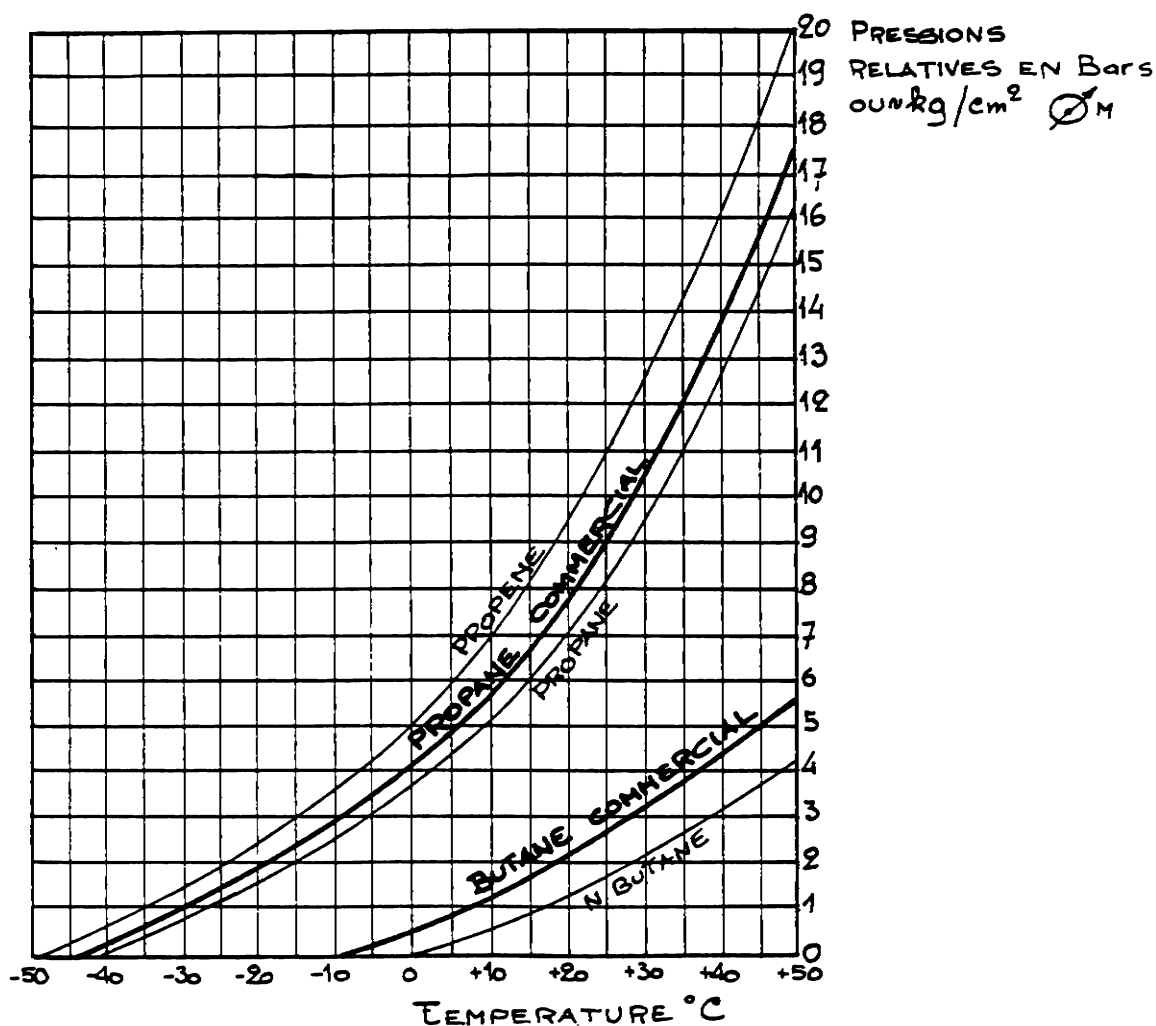
Action physico-chimique

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	$0,126 \text{ dm}^3 \times 8,8 \text{ (poids spécifique)} =$	$1,110 \text{ kg}$
- 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	$1.560 \times 0,1 \text{ (chal. spec.)} \times (133-20) =$	$17,63 \text{ kcal}$
- Chaleur d'échauffement de l'eau	$0,664 \times 1 \text{ (chal. spec.)} \times (133-20) =$	$75,03 \text{ kcal}$
		<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.

Pendant la marche du bateau il faudra fournir une quantité de chaleur latente de vaporisation théorique de 3,24 kcal/min (2) et une chaleur due à la déperdition de la chaudière de :

$$Q = K.S. \Delta t \quad K \text{ moyen} = \frac{18 + 8}{2} = 13 \quad S = 0,05 \text{ m}^2 \quad \Delta t = 133 - 50$$

$$Q = 13 \times 0,05 \times (133 - 50) = 54 \text{ kcal/h soit } 0,9 \text{ kcal/min.}$$

$$\text{Total de chaleur à fournir par heure } (3,24 + 0,9) \times 60 = 248,4 \text{ Kcal}$$

$$\text{Poids de gaz horaire à prévoir} = \frac{248,4 \times 1000}{0,75 \times 0,6 \times 11.000} = 50,18 \text{ gr.}$$

Pendant la navigation il faudra donc, en principe, réduire la flamme, ce qui se fait généralement à l'aide d'un organe de régulation agissant sur le débit de gaz.

Pour d'autres types de chaudières équipant de grands bateaux (plus de 1,2 m) il faudra éventuellement construire son propre brûleur, le modèle approprié n'étant pas toujours disponible dans le commerce.

Voyons ci-après quelques exemples de réalisation.

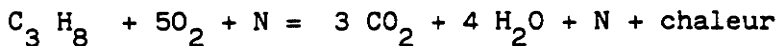
Mais avant cela il nous faudra passer par un peu de technique.

Rappel de la chimie de combustion des GPL.

Le gaz propane/butane se compose de carbone et d'hydrogène sous forme saturé ou non. Les 2 types se comportant pratiquement de la même façon lors de la combustion, nous ne traiterons que de gaz dit saturé (paraffinique).

Lors de la réaction de combustion, le carbone ainsi que l'hydrogène se combinent avec l'oxygène de l'air en produisant de la chaleur (réaction exothermique).

C'est ainsi que l'équation de la combustion du propane peut s'écrire :



Sans entrer dans les détails nous pouvons faire ressortir de cette équation, en remplaçant les molécules par des poids, que : Pour brûler 1 kg de combustible gazeux il faut env. 15 kg d'air, soit 12,5 m³ d'air.

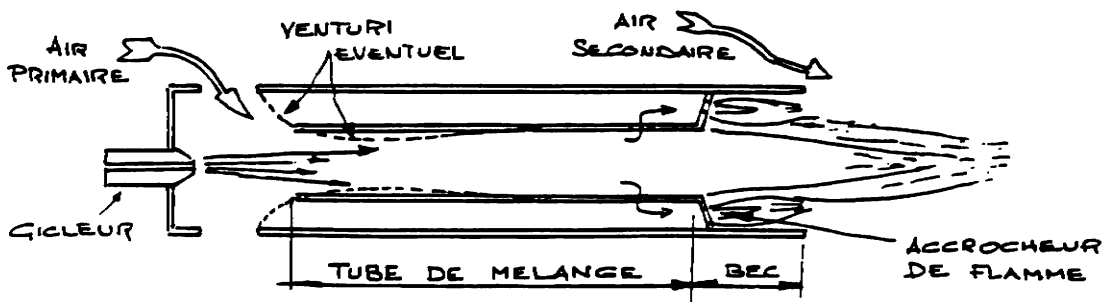
Une autre approche conduit à dire qu'il faut 1 m³ d'air pour brûler 1.000 kcal. Cela revient à dire que dans l'exemple ci-dessus, pour faire brûler correctement le brûleur CAMPING GAZ à raison de 130 gr de gaz/heure, il faut ajouter environ 1,560 m³ d'air/heure.

Pour que ce brûleur puisse respirer correctement il faudra prévoir dans le bateau une ouverture de :

$$\frac{1,560}{3.600 \text{ sec.}} \times \frac{1}{0,25} = 0,000173 \text{ m}^2 \text{ soit } 6 \times 3 \text{ cm}$$

(0,25 = passage d'air en m/sec.)

Construisons un brûleur de type atmosphérique avec accrocheur de flamme. Ci-après un schéma des différentes parties dont est constitué ce type de brûleur.

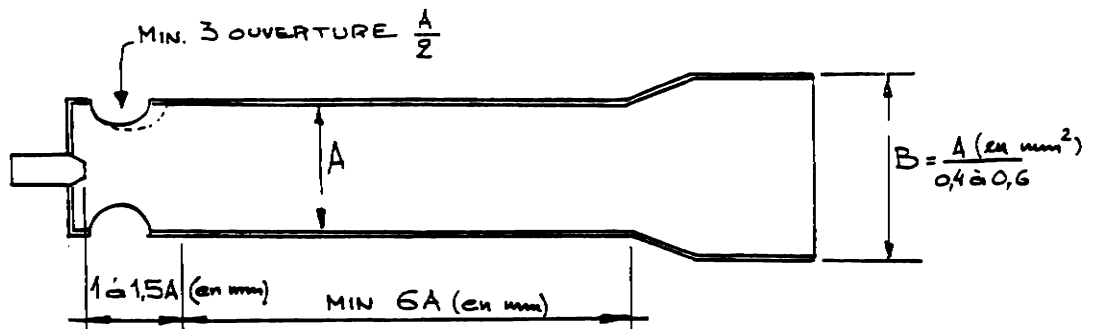


Passons en revue ces différentes parties.

- Gicleur : Injecte le gaz à haute vitesse dans le brûleur et entraîne de ce fait (par effet Venturi) une partie de l'air de combustion dit air primaire. Pour l'utilisation en bateau la bague de réglage d'air primaire n'est pas nécessaire.
- Tube de mélange : Parcourt de gaz et d'air où s'opère le mélange.
- Bec de brûleur : Endroit où se développe sa flamme avec adjonction d'air secondaire.

En général, les brûleurs sont conçus théoriquement mais déterminés in fine par expérimentation pratique.

Néanmoins, on peut construire des brûleurs donnant satisfaction pour autant que l'on observe quelques règles fondamentales.

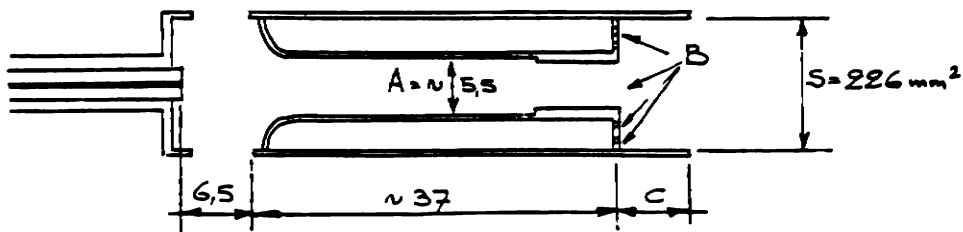


La puissance calorifique du brûleur est principalement fonction de sa section B.

Pour les GPL on accepte des valeurs de 5 à 10 kcal/mm² de section libre du bec. Ces valeurs peuvent aller jusqu'à 13 kcal/mm² dans le cas où une régulation de débit précise n'est pas nécessaire.

Pour certaines applications où l'on désire une concentration calorifique importante, par exemple pour un chalumeau à dard pointu, on utilise des artifices ayant pour but d'accrocher la flamme principale.

Pour illustrer ce qui précède, analysons le chalumeau Camping Gaz bien connu des vaporistes



- gicleur \varnothing 0,3 mm

Distance gicleur - tube mélangeur = +/- A

Longueur tube mélangeur = +/- 6 A

La relation $B = \frac{A}{0,4 \text{ à } 0,6}$ est vérifiée.

En effet si l'on calcule la section libre de B par rapport à A on arrive à la relation $39 = \frac{22}{0,56}$ ce qui correspond à la norme.

Charge calorifique par rapport à la section du bec.

Le gicleur de 0,3 mm débite sous une pression de 1 Bar +/- 130 gr/h de butane, ce qui correspond à $0,13 \times 12.000 = 1.560$ kcal, soit par unité de surface du bec B $\frac{1560}{226} = 6,9$ kcal, ce qui est parfaitement admissible.

La virole C a plusieurs avantages :

- elle protège les flammes accrocheuses.
- elle permet l'échauffement du bec, ce qui à cet endroit, et pour ce type de brûleur bien précis est favorable (échauffement de l'air secondaire).
- permet de moduler la puissance du brûleur dans une plus large gamme.

Remarque : Un espace libre suffisant, pour air secondaire, est laissé entre le bec et le tube foyer.

Un autre type de brûleur pouvant être utilisé dans le cas de chaudières de type Scott; il sera muni d'une rampe en lieu et place du bec. Celle-ci sera en tube acier ou en fonte.

Pour la construction par l'amateur il est bon de choisir un tube à paroi épaisse (moins de risques de retour de flamme).

Le principe est le même que pour le brûleur ci-avant.

Le tube sera pourvu d'ouvertures de différentes formes, trous, fentes, avec protubérances etc.

Le brûleur à fentes est le plus performant en puissance calorifique.

Ci-après un calcul de brûleur à ouvertures rondes.

Gaz : butane à 1 Bar, puissance calorifique demandée 1500 kcal/h.

Longueur disponible pour les perforations : 280 mm
 \emptyset injecteur (suivant diagramme) : 0,29 mm
 \emptyset intérieur du tube et \emptyset des perforations : à calculer

Des tables, dont un extrait ci-dessous, donnent les valeurs expérimentales sur lesquelles on s'appuie pour sélectionner les caractéristiques de construction.

!perforation!	! S mm ²	! kcal / min.	! trou / moyen	! / h max.	! entr'axe des trous !
! 1,4	! 1,53	! 15	! 18	! 20	! max 5 mm
! 1,8	! 2,54(5)	! 20	! 25	! 28(4)	!
! 2,0	! 3,14	! 22	! 27	! 30	! max 6,5 mm
! 2,2	! 3,8	! 25	! 30	! 34	!

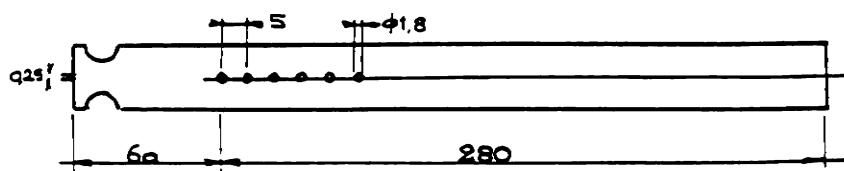
Nombre de trous à prévoir si la perforation est de 1,8 mm avec entr'axe de 5 mm : $\frac{280}{5} = 56$

Puissance calorifique correspondante, le brûleur étant chargé au maximum : $56 \times 28(4) = 1568$ kcal/h

Section du tube suivant norme $\frac{A}{B} = 0,4$ à $0,6$

$$B = 56 \times 2,54(5) = 142 \text{ mm}^2 \quad A = \text{tube de } 10/12 \text{ mm}$$

Longueur du tube mélangeur : $10 \times 6 = 60$ mm



Le brûleur à fentes se caractérise généralement par :

- Charge par mm^2 de surface de fente 6 kcal
- Distance entre fentes entre 8 et 12 mm
- Angle des fentes de 90 à 135°c
- Ouverture des fentes entre 1 et 1,6 mm

La hauteur de flamme de ces brûleurs se situe à pleine charge à environ 60 mm.

Pour terminer ce court passage sur les brûleurs, il faut retenir que :

- le brûleur atmosphérique ne supporte pratiquement pas de surpression dans la chambre de combustion.
- la diminution de la pression de gaz à l'entrée du brûleur produit une réduction proportionnelle en air de combustion primaire, cette dernière restant par conséquent correcte.
- tenter d'augmenter la puissance calorifique d'un brûleur en agrandissant le gicleur conduit systématiquement à un mauvais fonctionnement.
- pour l'utilisation du gaz en liquide il est bon de monter un clapet de retenue entre le réservoir et le brûleur, empêchant une montée dangereuse en pression de ce dernier en cas d'obstruction du gicleur du brûleur.

Revenons au brûleur ci-avant, 130 gr/h sous 1 Bar et procédons au calcul de

LA SURFACE D'ECHANGE ET LE DIMENSIONNEMENT DU RESERVOIR GPL

Trois possibilités de gaz sont offertes : le propane, le butane ou le mélange propane-butane.

Le propane est un gaz que l'on peut utiliser en toutes saisons, compte tenu de sa tension de vapeur élevée.

Rappelons cependant que :

la température d'ébullition à pression atmosphérique est de -42°c , ce qui peut occasionner des brûlures conséquentes lors de transfert du produit.

le réservoir doit être calculé pour des pressions élevées de l'ordre de 25 Bar et plus.

- Le butane est un gaz à tension de vapeur peu élevée, ce qui rend difficile son utilisation en hiver. En été par contre, il est facile à mettre en oeuvre pour autant que la surface de son récipient soit suffisamment grande.

- Le mélange de propane et de butane semble à priori la bonne formule. En effet lors de la mise en route du brûleur, la fraction légère du mélange c.à d. le propane vaporise et alimente la combustion (et ce même par temps très froid). Par après, le mélange propane-butane s'appauvrit en propane mais la température intérieure du bateau monte, ce qui favorisera l'évaporation du butane.

Le procédé est donc valable, seul reste à mélanger les 2 produits, sinon qu'ils soient disponibles en mélange dans le commerce.

L'évolution des 2 composants du mélange se déroule suivant une loi logarithmique pendant la vaporisation.

Exemple : Admettons un mélange de 100 gr de propane/N butane consistant en 75 gr de propane (C_3) et 25 gr de N butane (C_4).

Si l'évaporation se fait dans une ambiance de 26°c , quelle part de propane restera-t-il dans le mélange lorsqu'il restera 10 gr de C_4 ?

Rapport des pressions absolues des 2 composants à 26°C $\frac{P_p}{P_n} = \frac{10,2}{2,7} = 3,8$

A_p , B_p , A_n et B_n sont les poids de C_3 et C_4 de "départ" et "d'arrivée"

$$\log \frac{A_p}{B_p} = \frac{P_p}{P_n} \log \frac{A_n}{B_n}$$

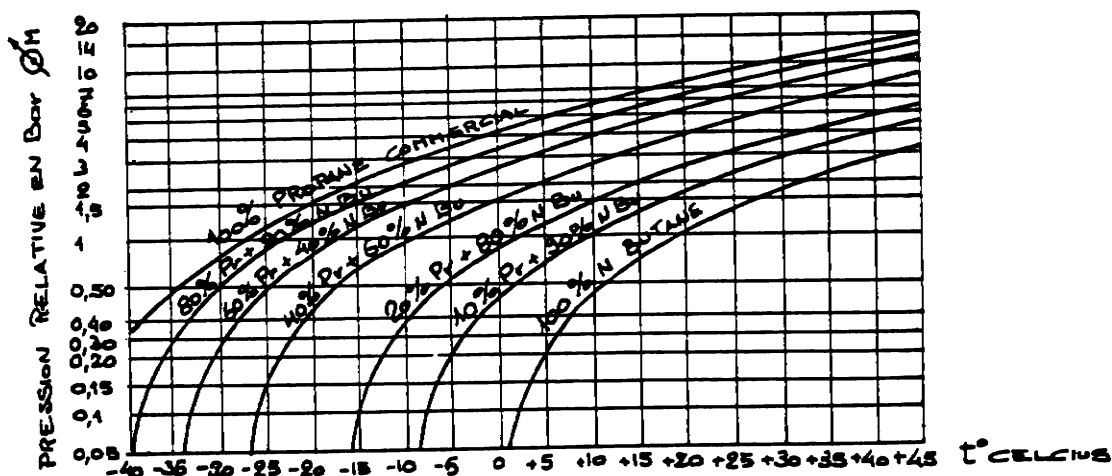
$$\log \frac{75}{B_p} = 3,8 \log \frac{25}{10}$$

$$\log 75 - \log B_p = 3,8 \log 2,5$$

$$\log B_p = \log 75 - 3,8 \log 2,5 = 0,359$$

$$B_p = 2,3 \text{ gr}$$

On peut se faire une idée du pourcentage des composants C_3 / C_4 en mesurant la pression et la température du réservoir au repos, et en se référant au graphique ci-dessous.



nota : Si le BUPRO contient une certaine fraction d'insaturés, la pression de vapeur sera légèrement supérieure aux valeurs mentionnées.

Pour déterminer le réservoir gaz, nous considérerons l'utilisation du butane.

Le gaz étant brûlé sous forme gazeuse et stocké sous forme liquide, il faudra le vaporiser avant utilisation.

Deux moyens sont possibles : la vaporisation naturelle utilisant les parois du réservoir comme échangeur avec la chaleur de l'air ambiant ou la vaporisation forcée en utilisant une partie de la chaleur produite par la combustion.

La deuxième méthode sera décrite plus loin mais le calcul sera mené pour la vaporisation naturelle (moins dangereuse).

Nous supposons être en été avec une température à l'intérieur du bateau de 25°C qui grimpe dans les premières minutes à 50°C vu la proximité de la chaudière, l'ensemble étant disposé dans une enceinte confinée. Cette dernière température servira de base de calcul.

Nous devons disposer de 1 Bar de pression au brûleur plus la perte de charge de la conduite d'amenée de gaz avec ses composantes. Le gaz doit donc quitter le réservoir à env. 1,2 Bar. Température correspondante : +8°C. La formule générale de transfert de chaleur est d'application.

$$Q = K \times S \times \Delta t \quad K = 10 \text{ (par expérience)} \quad \Delta t = (50-8) = 42^\circ\text{C}$$

$$Q = K \times \Delta t = 10 \times 42 = 420 \text{ kcal/h (6)}$$

Liquide à évaporer (au réchauffage) 75,55 gr/h
 Chaleur d'évaporation du butane à 8°C 92 kcal/kg
 Liquide pouvant être évaporé par m² et par heure $\frac{420 \text{ (6)}}{92} = 4,56 \text{ kg}$

Surface nécessaire au réservoir gaz $\frac{75,55}{4560 \text{ gr}} = 0,0165 \text{ m}^2 = 165 \text{ cm}^2$

Admettons un diamètre de récipient de 5 cm

Longueur nécessaire $\frac{165 - 2\pi R^2}{\pi \times 5 \times 0,8} \text{ (7)} = 10 \text{ cm}$

Dans la pratique ce calcul est à nuancer. En effet :

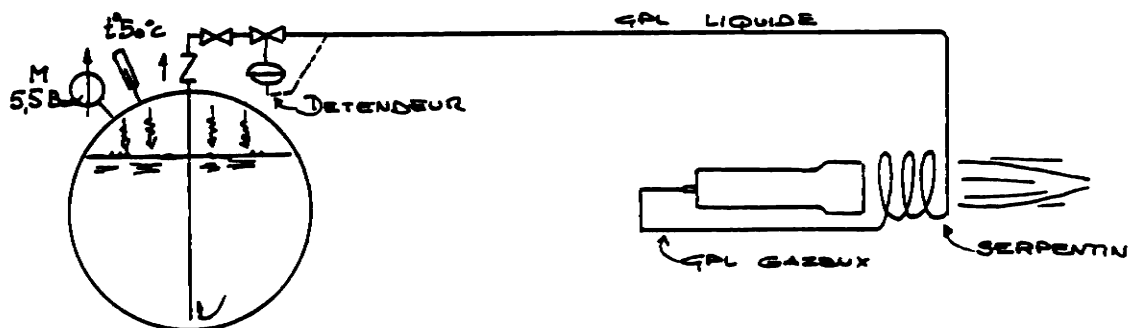
- 1° Le réservoir n'est jamais rempli à 100% mais seulement à 80% (7) pour permettre l'expansion du liquide. (20 fois celui de l'eau) Le coefficient $K = 10$ n'est valable que pour la surface dite mouillée.
- 2° Le réservoir se vide en cours de marche, donc la surface d'échange diminue.

Le calcul s'avère donc faux dans le temps. Néanmoins le système marche et ceci pour les raisons suivantes :

- 1° Au départ le réservoir construit en métal se trouve à 20°C et possède donc une "certaine chaleur propre" qu'il va céder au liquide pour s'évaporer.
- 2° Le liquide lui-même cèdera de sa chaleur propre (de 20 à 8°C) au processus d'évaporation.
- 3° Pendant la marche nous avons vu que le débit de gaz doit diminuer, et par conséquent son évaporation.
- 4° Les pertes de vapeur dans le bateau vont se condenser sur les parois du réservoir et augmenterons considérablement son coefficient K .

Tout ceci fait que le système marche.

L'autre méthode pour vaporiser le butane dont question ci-dessus, ne fait plus intervenir le réservoir de stockage en tant qu'évaporateur, mais plutôt comme propulseur. En effet, c'est la tension de vapeur du butane dans le réservoir qui va pousser le gaz liquide vers un serpentin de vaporisation. Ce dernier est intégré dans le brûleur et emprunte à la flamme la chaleur d'évaporation nécessaire pour se retrouver sous forme gazeuse au gicleur.



Cette façon de brûler le gaz n'est pas à conseiller, sauf si l'on maîtrise parfaitement les GPL.

Dans certaines applications le gaz butane est brûlé en liquide dans des brûleurs similaires à ceux utilisés pour le fuel.

Cette façon de faire n'est pas décrite, étant à proscrire en modélisme à vapeur.

CONSTRUCTION DU RESERVOIR GPL

A 50°C la pression du butane est de 5,5 Bar au manomètre. Le calcul sera fait pour une pression d'épreuve de 1,5 fois la pression de service maximum.

1	Epaisseur de l'enveloppe	$P = 0,825 \text{ N/mm}^2$
	$e = \frac{P \times R}{fz - 0,5P} + c$ (négligé)	$R = 25 \text{ mm}$
		$f = 30 \text{ N/mm}^2$
		$z = 1$
	$e = 0,69$	

En pratique, pour la commodité, le brazage etc nous prendrons une épaisseur de 2 mm.

2	Epaisseur du fond plat	
	$e = 0,35 d_2 \sqrt{\frac{P}{f}} + c$	$d_2 = +/- 20 \text{ mm}$
	$e = 0,35 \times 20 \sqrt{\frac{0,825}{30}} = 1,16 \text{ mm}$	soit 2 mm en pratique

3	Calcul du tirant \emptyset provisoire 6 mm section 28 mm ²	
	$S = \frac{F}{f}$	$F = P \times A$
		$A = 20 \times 20 = 400$
	$F = 0,825 \times (400 - 28) = 307 \text{ N}$	$S = \frac{307}{30} = 10 \text{ mm}^2$
	Le diamètre adopté = $\sqrt{\frac{10 \times 4}{16}} = +/- 4 \text{ mm}$	

Le renforcement des ouvertures dans l'enveloppe pour prise de gaz etc n'est pas envisagé compte tenu du petit diamètre de ces accessoires.

Il reste à passer en revue les organes qui participent à la sécurité.

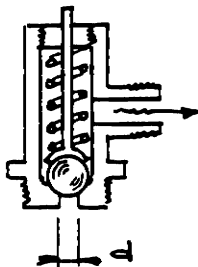
SOUPAPE DE SECURITE POUR LA CHAUDIERE A VAPEUR

Organe que l'on monte impérativement sur la chaudière en un ou plusieurs exemplaires. Elle évite en principe une hausse de pression (accidentelle) dans la chaudière, empêchant celle-ci, par définition, de dépasser 10% du timbre.

Ces soupapes se trouvent dans le commerce et sont généralement dotées d'une bille en acier inoxydable appuyée sur un siège à l'aide d'un ressort également en inoxydable. Il est bon que la bille soit surmontée d'une tige pouvant être utilisée pour vérifier le bon fonctionnement.

La préférence sera donnée à une soupape à décharge latérale permettant d'évacuer la vapeur par la cheminée du bateau.

Formule empirique pour déterminer le diamètre du siège.



$$d = 2,6 \sqrt{\frac{S}{p-0,412}}$$

$d = \text{cm}$
 $S = \text{surface de chauffe de la chaudière en m}^2$
 0,0155 m² dans notre exemple
 $p = \text{tension de vapeur en atm} = +/- 5$

$$d = 2,6 \sqrt{\frac{0,0155}{5-0,412}} = 0,15 \text{ cm soit } 1,5 \text{ mm}$$

NIVEAU D'EAU

Celui-ci se compose d'un tube creux en verre supportant la pression, branché entre 2 accessoires en métal communiquant avec le haut et le bas de la chaudière. Le tube aura un diamètre tel qu'il puisse indiquer le niveau d'eau sans subir les effets de capillarité. Les 2 accessoires sont de préférence, dotés de clapets fermant le niveau d'eau en cas de bris de glace.

SOUPAPE DE SECURITE POUR LE GAZ

Compte tenu des fuites possibles au niveau du clapet des soupapes, il est préférable de ne pas installer ce dispositif. Il s'agit toutefois d'être certain de ne jamais surremplir le réservoir de liquide. En fonctionnement normal, c.à d. lorsque la chaudière est chauffée, le robinet de gaz est ouvert et l'écoulement du gaz est toujours possible. Dans ce même ordre d'idée, le commerce met à la disposition du client une multitude de récipients remplis de gaz non munis de soupapes de sécurité. Si une soupape est utilisée elle devra être calculée pour éviter une surpression de 20% dans le réservoir.

Le débit minimum que la soupape doit pouvoir évacuer, sans que la pression intérieure ne dépasse 20% la pression d'ouverture, doit satisfaire à la relation suivante donnant le débit en air ramené à 15°C à la pression atmosphérique.

$$D = 10,6552 \times S \times 0,82 \quad \text{m}^3/\text{min}$$

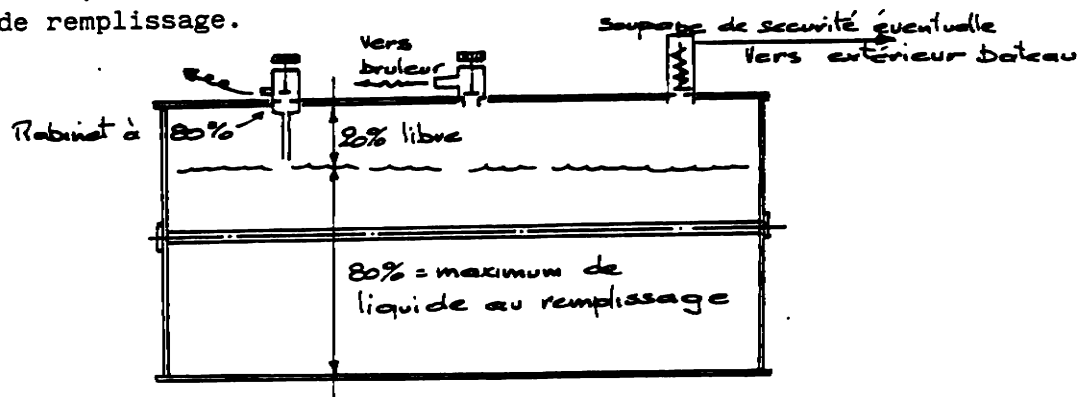
$$D = \text{débit m}^3/\text{min}$$

$$S = \text{surface totale du réservoir en m}^2$$

Il est clair que l'évacuation de la soupape de sécurité devra se faire à l'extérieur du bateau (gaz sous forme de vapeur plus lourd que l'air).

ROBINET DE NIVEAU 80%

Organe très important constitué d'un robinet avec tube plongeur pénétrant dans le réservoir. Lors du remplissage de ce dernier, le robinet est ouvert et évacue de la vapeur. Dès que le niveau de remplissage en liquide atteint 80%, il sort du liquide, ce qui est l'indication de l'arrêt impératif de remplissage.



REGULATEUR DE GAZ

Cet appareil est appelé à limiter la production de vapeur en fonction des besoins du moteur. Pour ce faire, il est intercalé dans la conduite de gaz menant au brûleur, et est commandé par la pression de la vapeur. Cet appareil peut être utilement doublé d'une sécurité de coupure de gaz en cas d'extinction de flamme ainsi que par manque d'eau dans la chaudière. Un magnifique exemple de régulateur de gaz doublé d'une sécurité ainsi que d'un by-pass de démarrage a été construit par Mr Pierre Benoit et est décrit dans le M R B n° 329 d'avril 1991.