

LA VAPEUR EN MODELISME NAVAL

J'AI VOULU COMPRENDRE LES MYSTERES  
ENTOURANT LES BRULEURS GPL

**AFIN DE COMPRENDRE CE QUI SE PASSE EN PRATIQUE, DIGÉRON D'ABORD UN PEU DE THÉORIE.**

Et pour encourager ceux qui n'aiment pas s'instruire, rappelons le proverbe Japonais :  
*On commence à vieillir quand on fini d'apprendre.*

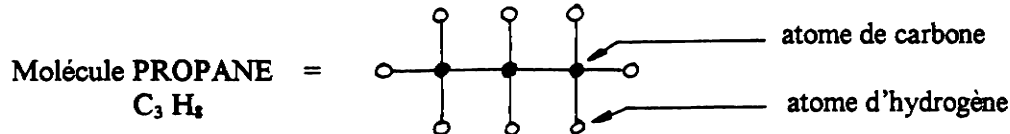
**Définition de la combustion**

La combustion est l'oxydation rapide d'un combustible; une flamme visible et un dégagement de chaleur en sont le résultat.

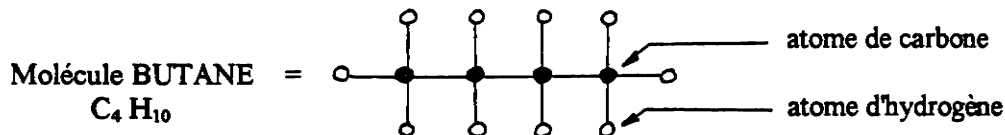
**Chimie de la Combustion**

Rappel de quelques notions.

Molécule = Groupement d'atomes constituant la plus petite quantité de matière pouvant exister à l'état libre.



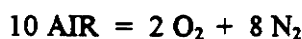
LA MOLÉCULE DE PROPANE CONTIENT :  
 3 ATOMES DE CARBONE ET 8 ATOMES D'HYDROGÈNE



LA MOLÉCULE DE BUTANE CONTIENT :  
 4 ATOMES DE CARBONE ET 10 ATOMES D'HYDROGÈNE

Dans l'air atmosphérique la molécule d'oxygène comporte 2 atomes. On l'écrit :  $O_2$ .

D'autre part, l'air est composé de 20 % d'oxygène et 80 % d'azote. Il en résulte que chaque fois que nous devons utiliser une quantité d'oxygène, on entraînera automatiquement quatre parts d'azote dans cette application.



Les molécules d'azote sont inertes dans une réaction chimique, elles ne font que d'absorber une partie de la chaleur produite.

Examinons la réaction de combustion du propane :



$C_3 H_8$  = Propane

$5 O_2 + 20 N_2$  = Air nécessaire à la combustion.

$CO_2$  = Gaz Carbonique ( Dioxyde de carbone)

$H_2O$  = Eau sous forme de vapeur

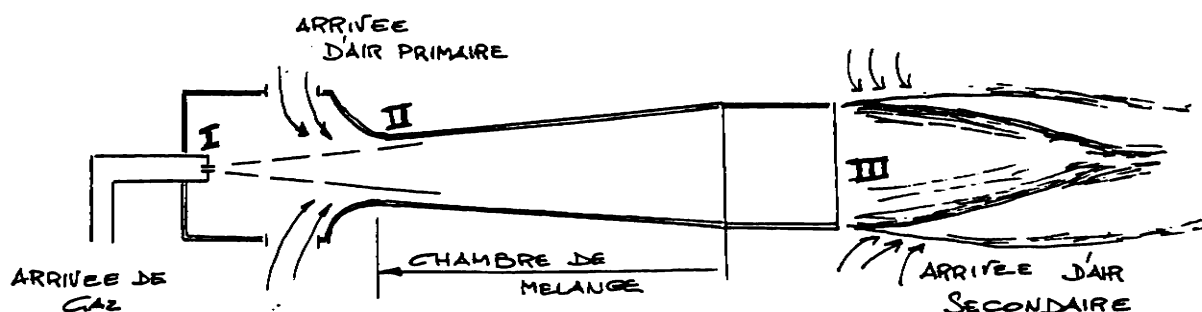
En introduisant dans cette formule le poids atomique de chaque composant on peut en déduire que :

IL FAUT 1 M<sup>3</sup> D'AIR POUR BRÛLER 1000 KCAL.

Sachant que 1 m<sup>3</sup> de propane " titre " +/- 23.500 kcal , on en déduit qu'il faudra +/- 23,5 m<sup>3</sup> d'air pour en assurer une combustion complète.

## VOYONS MAINTENANT COMMENT CELA SE PASSE DANS LA PRATIQUE.

Dans le brûleur dit "atmosphérique" on ne dispose que de la force d'éjection du gaz pour assurer l'appel d'air nécessaire à la combustion. On fait appel à la technique du VENTURI pour améliorer l'efficacité d'entraînement d'air. Néanmoins, on arrive que très difficilement à aspirer tout l'air nécessaire à la combustion par les seuls orifices du brûleur au niveau de l'injecteur. On parle dès lors d'air primaire et d'air secondaire. Voyons ci-après, le principe de construction du brûleur atmosphérique.



En I le gaz pénètre dans le corps du brûleur par un orifice appelé gicleur ou injecteur. En II on trouve le col de tuyère ( c'est à dire la partie la plus mince entre le convergent et le divergent du venturi). A cet endroit on peut mesurer une dépression qui va assurer l'aspiration d'une partie de l'air de combustion dit " air primaire ". En III le mélange air-gaz brûle et c'est à cet endroit que l'air secondaire pénètre la flamme afin d'assurer une combustion complète.

Par le calcul on démontre que la variation de débit gazeux admis par le gicleur conditionne l'entraînement d'air primaire dans la même proportion.

Il suffit donc, pour moduler la puissance du brûleur, d'agir uniquement sur le gaz.

Compte tenu des caractéristiques ci-dessus un brûleur atmosphérique ne peut s'utiliser que dans des enceintes en équilibre atmosphérique ou mieux, en légère dépression.

## VITESSE DES FLAMMES

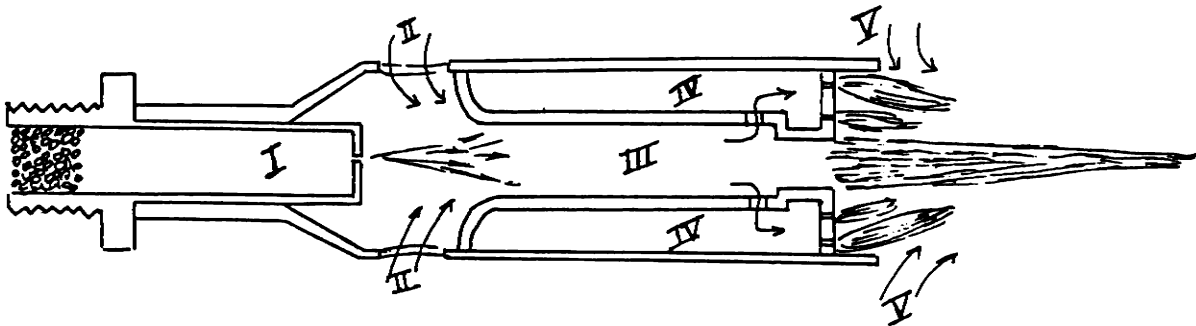
Dans un mélange aéré à 100%, tout l'air nécessaire à la combustion se trouve intimement mélangé avec le gaz combustible, la combustion s'effectuera à vitesse maximale et par conséquent fournira une flamme courte. Au contraire, des mélanges trop riches ( trop peu d'air ) fourniront une flamme molle et longue, en outre la vitesse de flamme sera plus lente.

La température de flamme obtenue dans l'air à mélange correct est de environ 1.900°C.

Comme la vitesse d'une flamme gaz de propane ou butane est relativement lente ( de l'ordre de 30 cm/sec) et que l'on veut dégager un maximum de chaleur au niveau du bec du brûleur on va utiliser un artifice pour atteindre ce but.

On évite donc le soufflage de la flamme en disposant autour de l'orifice du brûleur une couronne de petites flammes auxiliaires destinées à constamment rallumer la flamme principale à la base.

Voyons à titre d'exemple comment est réalisé un brûleur de chalumeau camping gaz.

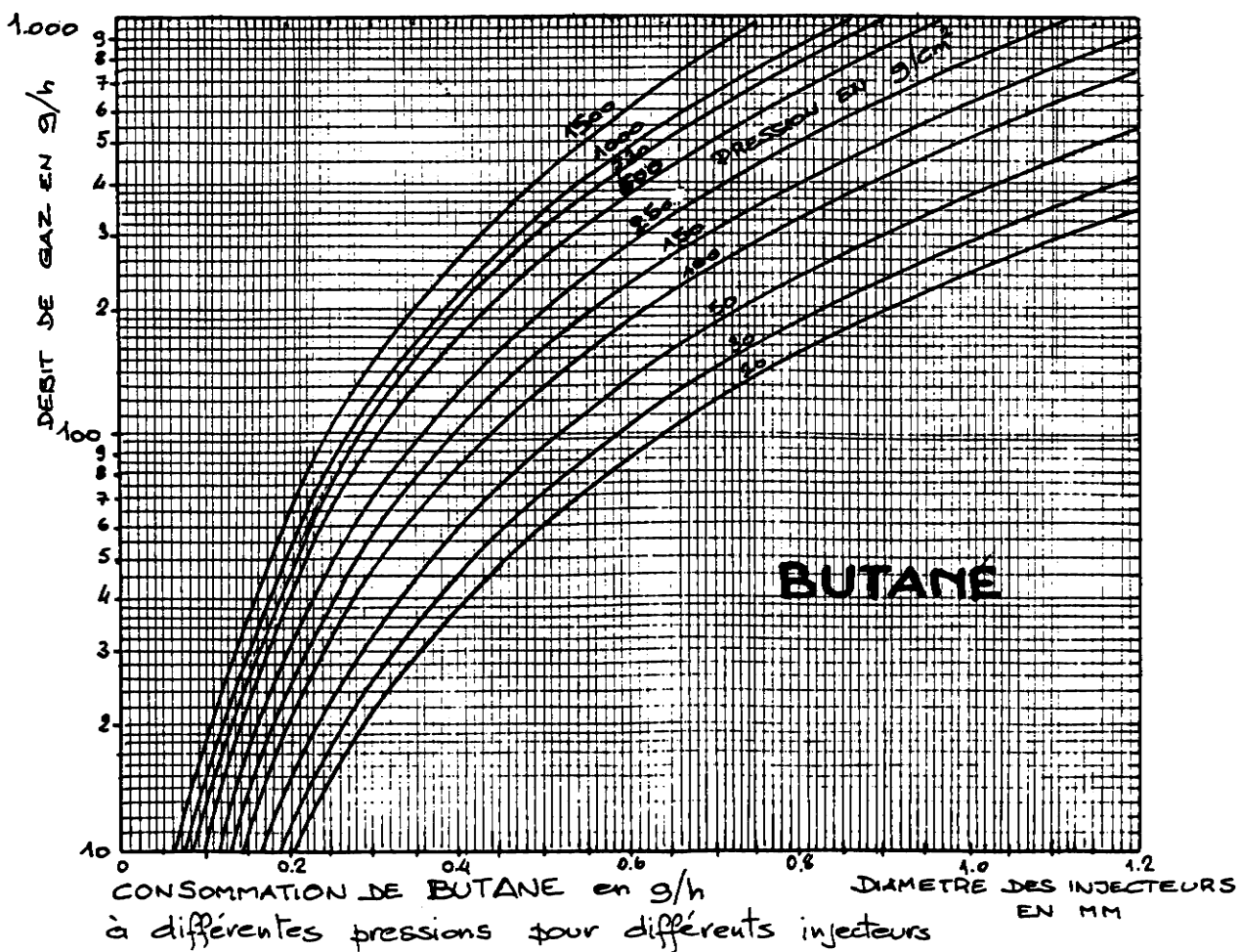
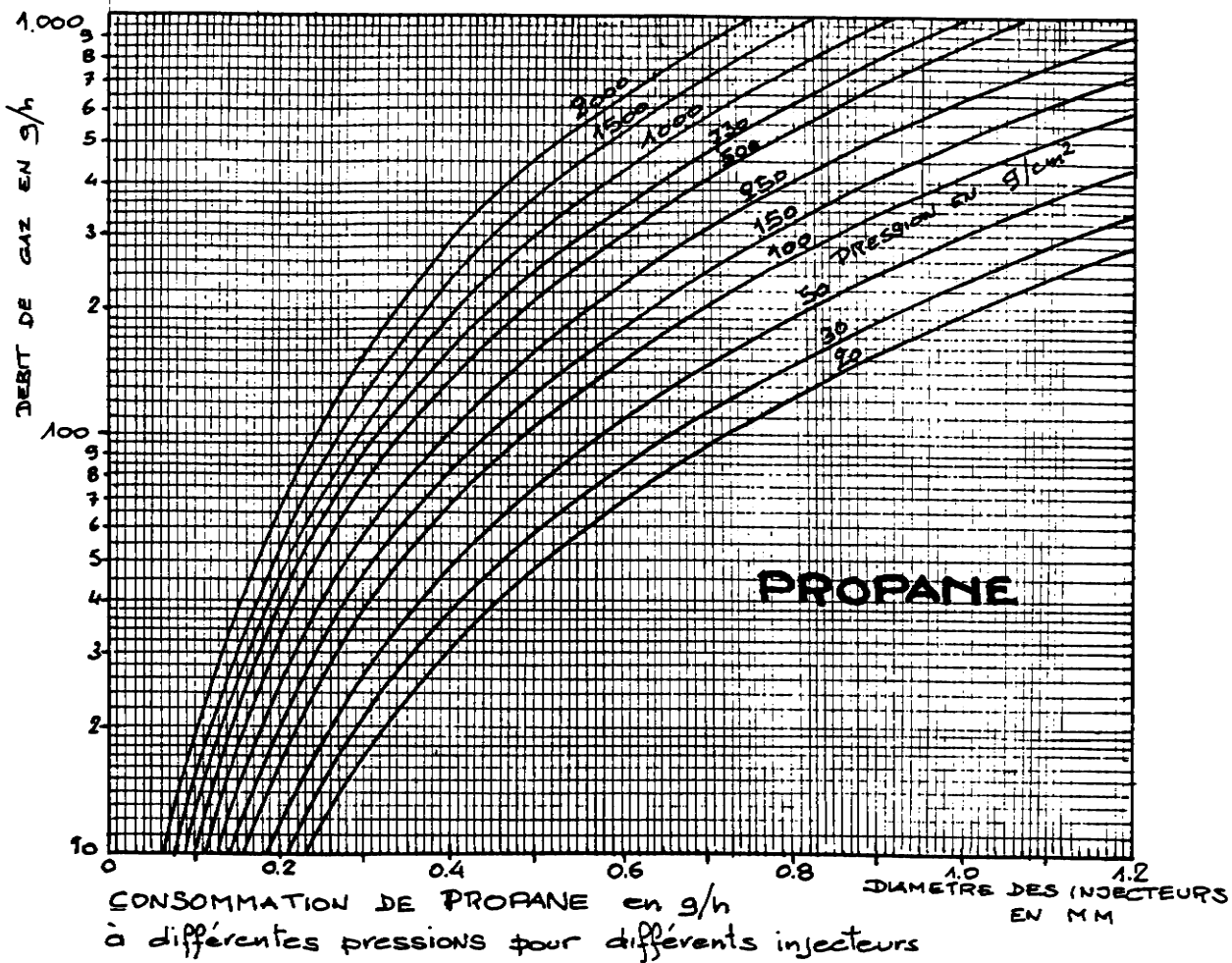


- I. Injecteur allongé avec filtre - coefficient de dépense élevé : 0,85 - bon guidage de l'éjection  
- assure une certaine détente régulée de par l'action du filtre.
- II. Entrée d'air primaire - environ 80% donc très bonne stabilité et vitesse de flamme.
- III. Chambre de mélange
- IV. Chambre de détente pour mélange air-gaz vers flammes pilotes.
- V. Air secondaire autour du bec ( chauffé par flammes pilotes) donc chauffé, température de flamme augmentée - bon accrochage.

Dans un autre cahier intitulé :

### LA VAPEUR EN NAVIMODELISME JE CONSTRUIS UN ENSEMBLE CHAUDIÈRE - BRÛLEUR

J'ai indiqué des valeurs pratiques permettant la construction personnalisée de brûleurs atmosphériques. Ci-après des diagrammes permettent de déterminer le diamètre de l'injecteur adéquat en fonction des critères de construction adoptées ( pression, type de gaz, débit).



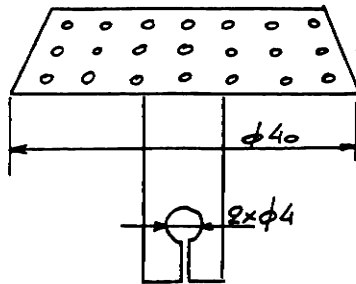
Rappelons aussi que les brûleurs de type torche ( Bec BUNSEN) acceptent des débits calorifiques de l'ordre de 5 à 10 kcal/mm<sup>2</sup> de section libre. Il n'en est pas de même pour les brûleurs céramique.

En effet le débit calorifique acceptable est de l'ordre du dixième des brûleurs torche, on comptera sur un débit de 0,5 à 1 kcal/mm<sup>2</sup>.

Un exemple pratique illustre la différence.

Il s'agit de remplacer un brûleur marguerite d'un brûleur Camping-gaz Bleuet 206 par un brûleur céramique.

Examinons le brûleur Camping-gaz.



← Trois rangées de trous d'un diamètre moyen de 1,4 au nombre total de 76.

$$\text{Section : } 76 \times \frac{1,4^2 \times \pi}{4} = 117 \text{ mm}^2$$

Charge calorifique admise de 5 à 10 kcal/mm<sup>2</sup>.

$$\text{Puissance calorifique pour une charge moyenne de } 7,5 \text{ kcal/mm}^2 \\ 117 \times 7,5 = 877,5 \text{ kcal A}$$



← Injecteur de 0,22 mm de diamètre ( mesuré à l'aide d'une mèche de 0,2 mm)

Voyons sur le diagramme le débit correspondant en butane à une pression de 1 Bar ; celui-ci est de 60 gr/h. ( 60 gr/h correspond à 0,06 x 12.000 = 720 kcal/h B en P.C.S.) .

Les chiffres A et B sont donc en harmonie.

La bonbonne 206 " fait " 190 gr, soit une autonomie de  $\frac{190}{60} = 3 \text{ h.}$  (l'autonomie indiquée sur l'appareil par

le constructeur est de min. 2,5 h et max. 4 h)

Le même injecteur va servir à alimenter un petit brûleur céramique. La plaquette céramique choisie (de récupération) aura une dimension de 60 x 45 mm et comportera 37 rangées de 22 trous chacune.

Le diamètre d'un trou est de 1,1 mm.

$$\text{La section libre est donc de } 37 \times 22 \times \frac{1,1^2 \times \pi}{4} = 773 \text{ mm}^2$$

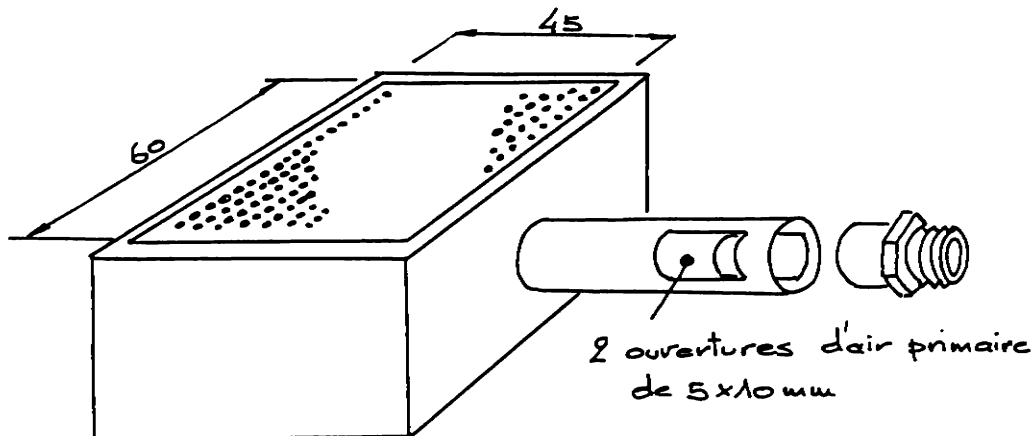
Charge calorifique par mm<sup>2</sup>  $\frac{720}{773} = 0,93 \text{ kcal / mm}^2$  . Le débit de 0,5 à 1 kcal /mm<sup>2</sup> est donc respecté.

**Remarque,** le principe d'un brûleur céramique est de développer sa flamme à la surface du radiant de façon à ce que ce dernier soit le plus chaud possible. Pour éviter que la flamme ne rentre dans le corps du brûleur et retourne vers l'injecteur, il faut une certaine épaisseur en ce qui concerne la plaquette céramique ( de l'ordre de 10 mm ) de façon à ce que le dessous reste à une température la plus basse possible.

Ce genre de construction donne à son tour une perte de charge que la faible inertie du jet de gaz à la sortie de l'injecteur doit combler.

Il faut par conséquent agrandir les ouvertures d'aspiration d'air primaire pour assurer une bonne ventilation de la flamme, faute de quoi le système ne fonctionne pas.

Dans le cas présent, le brûleur céramique à les mesures ci-après.



## UN PETIT MOT SUR L'EXTINCTION DES BRÛLEURS.

On sait que le GPL brûle dans des limites de mélange étroites ( +/- 2 à +/- 9,5 % de gaz dans le mélange).

- Si donc un coup de vent plongeant empêche la sortie des gaz de la cheminée pendant une fraction de seconde, on constatera que le mélange de gaz-air sort des limites d'inflammabilité et le brûleur s'éteint. Ce phénomène peut se présenter aussi bien avec un brûleur torche qu'avec un brûleur céramique. L'avantage de ce dernier est qu'il a une température de fonctionnement au niveau de la céramique supérieur à 600° C. Cette température étant supérieure à la température d'auto allumage, le brûleur fonctionne à nouveau correctement dès que l'élément perturbateur a disparu.
- On remarque souvent à l'odorat qu'un brûleur fonctionne avec manque d'air ( formation d'aldéhydes C O H non brûlés ) . Rappelons que pour brûler correctement le brûleur doit pouvoir respirer. Un manque d'ouverture d'air vers le brûleur fera brûler celui-ci avec une flamme molle qui sera soufflée à la moindre perturbation.
- Un brûleur surdimensionné n'arrivera pas à faire passer la totalité des gaz à travers la chaudière, ce qui réduira le rendement de combustion et rendra le système également très sensible à la moindre perturbation. La notion " Qui peut le plus, peut le moins " n'est pas valable dans le cas présent

## UN PEU PLUS DE TECHNOLOGIE POUR LES PURISTES.

### Mécanisme de la combustion.

A la température ambiante, la vitesse des molécules gaz + oxygène n'est pas assez élevée pour rentrer en réaction. Il faut une température de l'ordre de 600° C pour assurer leur rupture par collision et par conséquent leur entrée en réaction.

L'azote dans l'air ne participe pas à la réaction et n'entraîne par conséquent qu'une dilution de la chaleur. C'est ainsi qu'une combustion en oxygène peut atteindre des températures de l'ordre de 2900° C.

En préchauffant l'air de combustion ( par exemple à 275° C ) on peut augmenter la température de la flamme ( d'environ 110° C ).

### Caractéristiques de combustion.

Pouvoir calorifique = Quantité de chaleur fournie par la combustion de l'unité de volume ( ou de masse ) . Si l'on tient compte de la chaleur de condensation de la vapeur d' eau, on parle de P.C.S. ( supérieur ) sinon il s'agit du P.C.I. ( inférieur ).

<b>Propane</b>	11.080 kcal au kilo en P.C.I.	22.400 kcal / N m <sup>3</sup>
	12.060 kcal au kilo en P.C.S.	24.000 kcal / N m <sup>3</sup>

<b>Butane</b>	10.930 kcal au kilo en P.C.I.	26.200 kcal / N m <sup>3</sup>
	11.800 kcal au kilo en P.C.S.	28.300 kcal / N m <sup>3</sup>

### LIMITE D'INFLAMMABILITÉ ( dans l'air )

<b>Propane</b>	: entre 2,2% — 10 %
<b>Butane</b>	1,8% — 8,8 %
<b>Acétylène</b>	2,5% — 80 %

### TEMPÉRATURE D'AUTO-INFLAMMATION.

Pour mélange STOECHIMÉTRIQUE	553° C ( aération correcte à 100 % )
------------------------------	--------------------------------------

### TEMPÉRATURE MAXIMALE DE FLAMME.

Dans l'air	1920° C
Dans l'oxygène	2820° C

PRODUITS DE COMBUSTION.Exemple : **Propane**1 kg de  $C_3H_8$  libère dans la combustion 1,5 kg d'eau et 3 kg de  $CO_2$ , ce qui représente 14 % en volume.TYPES DE FLAMME.

Une flamme brûlant avec excès d'air est dite : **flamme oxydante**  
 avec trop peu d'air est dite : **flamme réductrice**  
 avec 100 % d'air nécessaire est dite : **flamme Stoechiométrique**

VITESSE DE FLAMME ( du type déflagration dans l'air - dans tube test)

Propane 32 cm/sec.  
 Butane 33 cm/sec.  
 Hydrogène 280 cm/sec.  
 Acétylène 260 cm/sec.

ET POUR LA FINE BOUCHE CALCULONS LA RÉACTION DE COMBUSTION DU MÉTHANE ( même procédé pour d'autres gaz ) .

Combustion du gaz naturel ( admettons 100 % Méthane)

Rappel : poids atomique H = 1 C = 12 O = 16 N = 14

l'air contient 23 %  $O_2$  et 77 %  $N_2$  en poids. Rapport  $\frac{77}{23} = 3,35$  \*

$$CH_4 + 2O_2 + N_2 = CO_2 + 2H_2O + N_2 + \text{chaleur.} -$$

$$16 + 64 + N_2 = 44 + 36 + N_2$$

divisons par 16

$$1 + 4 + N_2 = 2,7 + 2,25 + N_2$$

Puisqu'il faut 4  $O_2$  pour brûler 1 kg de  $CH_4$  nous pouvons donc dire qu'il entre dans la composition  $4 \times 3,35$  \* = 13,4  $N_2$ . D'autre part si l' $H_2O$  se condense nous retrouvons en finale que la combustion de 1 kg de Méthane demande 4 kg d'oxygène et donne 2,75 kg de gaz carbonique, 13,4 kg d'azote et 2,25 kg d'eau. Calculons le % de  $CO_2$  mesurable dans les gaz brûlés.

La mole de  $CO_2$  occupe 22,4 L et pèse 44 gr, 1  $m^3$  pèse donc  $\frac{44}{22,4} \times 1000 = 1,96$  kg.

2,75 kg représente donc  $\frac{2,75}{1,96} \times 1 = 1,4$   $m^3$  C

La mole de  $N_2$  occupe 22,4 L et pèse 28 gr., 1  $m^3$  pèse donc  $\frac{28}{22,4} \times 1000 = 1,25$  kg

1,25 kg représente donc  $\frac{13,4}{1,25} *$  = 10,73  $m^3$  D

TOTAL C + D = 1,4 + 10,73 = 12,13  $m^3$

Dans 12,13  $m^3$  de gaz il y a 1,4  $m^3$  de  $CO_2$  soit  $\frac{1,4}{12,13} = 11,54$  %

La mesure de ce % ainsi que la température de fin de combustion ( à la cheminée) permet de calculer le rendement de combustion.



## UN PETIT MOT AU SUJET DES RÉSERVOIRS DE GPL.

Il reste à démystifier quelques rumeurs non fondées.

- Lorsque le gaz est soutiré en phase gazeuse, il est clair que le gaz liquide dans la bonbonne refroidit, par conséquent les parois prennent souvent des températures inférieures au point de rosée de l'air ambiant. ( pour rappel le point de rosée est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant se condense).

Ce fait est bénéfique, compte tenu que la condensation de vapeur d'eau amène de la chaleur au récipient et participe ainsi à l'évaporation du gaz de pétrole enlevé par soutirage, si même du givre apparaît, ce fait est bénéfique compte tenu qu'il amène 80 kcal/kg de givre formé.

- Par temps froid ; lorsque l'on utilise un mélange de gaz butane et propane il faut savoir qu'en début de soutirage de gaz en phase gazeuse plus de 90 % du gaz soutiré sera du propane. Ce pourcentage descend en court de soutirage jusqu'à tendre vers 10 % en fin de course. Au contraire, le pourcentage de butane va augmenter en sens inverse en partant de +/- 10 % au début pour finir à 90 % en fin de parcours.

Si la bonbonne se trouve dans un remorqueur ( donc protégée ) le système fonctionne, étant donné la hausse de température à l'intérieur du bateau en cours de navigation. Dans le cas d'une chaloupe avec une bonbonne non protégée le système est moins évident.

- Lorsque l'on soutire du GPL en phase liquide, il faut se rappeler que 1 goutte de liquide se transforme à pression atmosphérique en +/- 250 gouttes de gaz . Attention aux fuites !!!.

Les bouteilles de gaz réutilisables sont souvent rouillées à l'intérieur. Le transfert se fera donc via un filtre doté en plus d'une capsule aimantée

- Sous l'effet de hausse de température, les GPL en phase liquide se dilatent environ 20 fois plus que l'eau. Pour éviter que des réservoirs soient mis en danger par dilatation, il ne sont jamais remplis au delà de 80 % du volume. Le robinet avec orifice de fuite, erronément nommé robinet de décompression, sert en réalité à indiquer le niveau de remplissage et non pas pour une autre raison quelle qu'elle soit ( dégazage, décompression, désaération etc. ).

février 1995

SUYKENS Léonard.