

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

Gm. 0267

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION

TITRE

AMÉLIORATION DU PROCESSUS
DE COMBUSTION DANS LES
INSTALLATIONS ÉNERGETIQUES

DATE : MAI 1988

AUTEUR : Kokou Billy GBEVE
DIRECTEUR : Thialis KAMARA
CO-DIRECTEUR : El-Oualith SOW

A

mes sœurs

mes frères

ma mère

mon père

mes amis

tous ceux qui m'ont
soutenu ,

Je dédie ce travail x

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis ici d'exprimer ma reconnaissance au Docteur en Énergie Thermique Thialis KAMARA, Professeur à l'École Polytechnique de Thiès, initiateur et directeur du projet, pour ses conseils qu'il n'a jamais ménagés et pour sa disponibilité permanente.

Je remercie très sincèrement l'Ingénieur D.E.P.T. El- Oualith SOW Chef de Production à la SENELEC pour son soutien sans réserve.

Mes remerciements vont à tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué directement ou indirectement à la réussite de ce travail.

SOMMAIRE

Parmi les réactions chimiques, une classe particulièrement importante est constituée par les oxydations qui mettent en œuvre l'oxygène, un des constituants principaux de l'atmosphère terrestre. Grand nombre de processus naturels en sont la manifestation, tels, par exemple, la respiration, les processus physico-chimiques dans l'activité musculaire, l'activité microbienne aérobie et, de manière générale, les combustions ou oxydations naturelles, qu'elles soient lentes comme dans l'altération de certaines roches et minerais, ou même vive comme dans la propagation du feu.

La réaction de combustion vive est la première que l'homme ait été capable de déclencher volontairement lorsque, au plus profond de son histoire, il acquit « l'art du feu ». Cette découverte allait constituer pour lui un élément essentiel de sa puissance ; et beaucoup plus tard, il parvint à la mieux maîtriser et à l'asseoir dans des machines productrices d'énergie ; c'est encore elle qui lui permet aujourd'hui d'entrevoir une entreprise cosmique dont les limites sont imprévisibles. Cet « art du feu » doit encore et sans cesse être perfectionné et mieux compris. C'est l'objectif des chapitres qui vont suivre.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	II
Remerciements	III
Sommaire	IV
Table des matières	V
Introduction	1

Chapitre 1 GENERALITES

1.1. Théorie de la combustion	2
1.2. Aspect thermodynamique	9
1.3. Aspect cinétique	14
1.4. Aspect diffusionnel	23

Chapitre 2 COMBUSTIBLES ET COMBUSTION

2.1. Combustibles et comburants	29
a) Combustibles	29
b) Comburant	31
2.2. Combustion des combustibles gazeux	32

a° Combustion du carbone	32
b° Combustion de l'hydrogène	34
c° Combustion du soufre	34
d° Combustion d'un hydrocarbure	35
2.3. Combustion des combustibles liquides	37
2.4. Méthodes de combustion	38
a° Combustion stoechiométrique	38
b° Combustion sans imbrûlés	38
c° Combustion avec imbrûlés en présence d'excès d'air	39
d° Combustion avec imbrûlés en manque d'air	39
e° Combustion étagée	40

Chapitre 3 MODES DE PROPAGATION

3.1. Auto-inflammation ou explosion proprement dite	41
3.2. Propagation subsonique ou déflagration	48
a° Déflagration en régime laminaire	49
b° Régime turbulent	58

3.3. Propagation supersonique ou détonation	61
a°/ Détonation en phase gazeuse	62
b°/ Transition de la déflagration à la détonation	68
c°/ Détonation en phase condensée	71

Chapitre 4 BRULEURS ET PHENOMENES

4.1. Brûleurs à combustibles	72
a°/ Brûleurs à gaz	72
b°/ Brûleurs à fuel	74
c°/ Brûleurs combinés	78
4.2. Phénomènes fondamentaux	79
a°/ Structure de la flamme	79
b°/ Phénomènes fondamentaux	81
4.3. Conditions d'une bonne combustion	83
a°/ Température d'inflammation	83
b°/ Pulvérisation	84
c°/ Turbulence	86
d°/ Excès d'air	87
e°/ Température de combustion	87
d°/ Température du comburant	88

Chapitre 5 OPTIMISATION DE LA COMBUSTION

5.1	Facteurs déterminants	89
a/	Gradient de vitesse	89
b/	Effet de paroi	92
c/	Effet de l'atmosphère environnant la flamme	96
d/	Autres facteurs	97
5.2.	Méthodes de stabilisation	99
a/	Brûleurs domestiques	99
b/	Brûleurs industriels	101
5.3.	Moyens de diminution des oxydes et lutte contre la corrosion	104
a/	Moyens de diminution des oxydes	104
b/	Lutte contre la corrosion	108

Chapitre 6 APPLICATIONS NEGATIVES

6.1.	Limites d'inflammabilité	112
6.2.	Applications négatives: sécurité	117
	Conclusion	120

Annexes.

- A1 Diagramme de fonctionnement d'un brûleur
- A2 Allumage de la flamme
- A3 Vues schématisques de différents types de brûleurs.
- A4 Vue d'ensemble des différentes modalités de la combustion.
- A5 Schéma de la combustion.
- B Bibliographie

Chapitre 1

GENERALITES

INTRODUCTION

L'homme n'a pas attendu l'étude des phénomènes de la combustion avant de la mettre à profit pour son développement et son épanouissement.

Comme dans tout autre domaine, l'homme est appelé à tendre vers la perfection. Les coûts de certains combustibles ajoutés au fait que les ressources énergétiques ne sont pas inépuisables ont poussé l'homme à étudier les différentes modalités et conformités de la combustion afin d'améliorer ce processus dans les installations énergétiques.

Le but poursuivi dans mes recherches bibliographiques est d'approcher la connaissance fondamentale des phénomènes de combustion afin qu'elles puissent servir comme outil et contrôle dans le vaste domaine de l'amélioration des applications pratiques.

Après avoir décrit les aspects et modes de propagation de la combustion, on parlera des combustibles et des brûleurs. Après seulement on sera en mesure de tenter d'optimiser la combustion. Et comme ce n'est pas toujours qu'on désire le feu on terminera par les applications négatives de la combustion.

1.1. LA THEORIE DE LA COMBUSTION

Les besoins énergétiques du monde sont couverts à 85% par les combustibles naturels (houille, pétrole) - 10% énergie hydraulique - 5% nucléaire.

Les formes d'énergie directement utilisable (électrique - mécanique - lumière) à partir de la mise en œuvre du potentiel chimique (énergie chimique) nécessitent dans la majorité des cas le passage par la production de chaleur assurée par la combustion vive. L'homme n'a pas attendu l'étude des phénomènes fondamentaux avant l'application de la combustion.

L'optimisation des procédés industriels devient une exigence quand on sait que les réserves en combustibles sont non inépuisables et que le problème de la pollution de l'air est d'une importance vitale. Dans ce but la connaissance des phénomènes fondamentaux demeure une condition indispensable (à toute optimisation). Dans les applications industrielles les phénomènes de la combustion relèvent de plusieurs disciplines dont les principales sont : - la chimie - la thermodynamique et - l'aérodynamique.

On parle souvent du caractère aérothermochimique de la combustion à cause de la connection interdisciplinaire.

Une description générale de cette réalité physique appelée « combustion vive » et de ces manifestations (modalités concrètes) serait utile pour situer les différents phénomènes de la combustion.

On ne peut donner une définition pouvant permettre la distinction entre la combustion vive et tout autre phénomène d'oxydation ou combustion lente. A défaut nous allons prendre des exemples. Dans une bouteille ou un récipient on enferme du méthane (CH_4) et de l'oxygène (O_2) dans un rapport stoechiométrique. Exposés à la température normale les deux réactifs initiaux n'évoluent pas. On dit que le mélange est métastable.

Lorsqu'on porte le mélange à 200°C , le méthane commence à s'oxyder et il se forme des produits tels que le méthanol, l'acide formique, le formaldéhyde, le carbone et le gaz carbonique. Cette transformation requiert un certain temps (quelques minutes) de sorte qu'on peut suivre l'évolution de la vitesse globale de réaction.

Cette vitesse peut être exprimée par exemple par la diminution du nombre de moles de méthane par unité de temps.

Après une accélération cette vitesse atteint un maximum pour ensuite diminuer en raison de l'épuisement des réactifs [s'il n'y a pas épuisement la vitesse reste constante et égale au maximum]. Une telle séquence est caractéristique d'une oxydation lente ou encore d'une combustion lente. (voir figure n°1)

On a une allure différente lorsque le même mélange initial est porté à une température de 560°C . Pendant un temps très court se déroulent des réactions de type «oxydation lente». Après ce temps la vitesse réactionnelle s'accélère brusquement pour atteindre une valeur théoriquement infinie s'il n'y a pas épuisement de réactifs. (figure n°1)

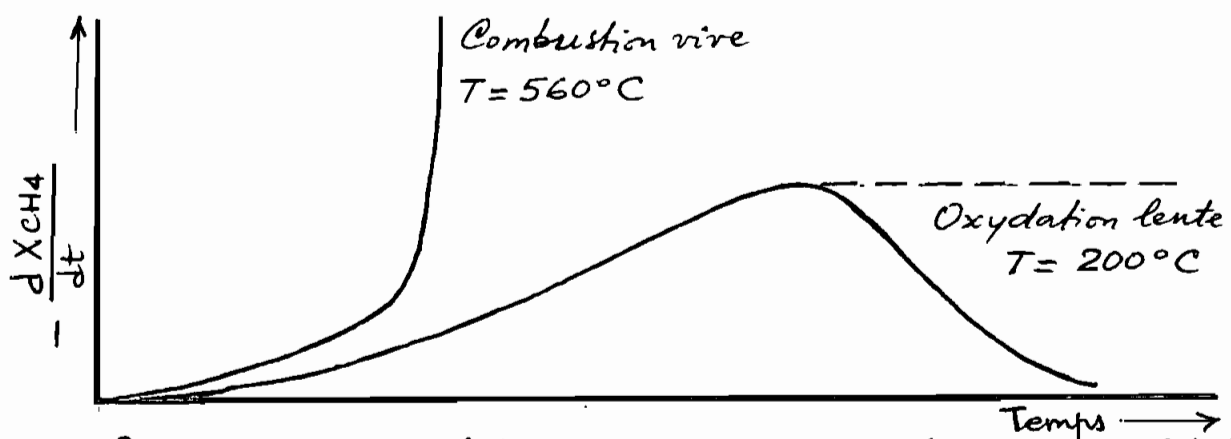


figure n°1 : Evolution (schématisique) de la vitesse globale de réaction dans le cas d'une oxydation lente et dans le cas d'une combustion vive.

Cet emballement de la vitesse de réaction est la caractéristique propre d'une combustion vive et il se manifeste dans ses différentes modalités. La conséquence de cet emballement est une évolution thermodynamiquement non équilibrée se traduisant par des concentrations de certaines espèces transitoires supérieures à celles qu'on aurait en supposant l'équilibre thermodynamique atteint. Ces espèces sont des atomes et des radicaux à l'état fondamental ou excité. La production des radicaux présents à l'état excité se manifeste entre autres par l'émission de lumière qui est associée généralement à la présence d'une flamme: c'est le phénomène de chimiluminescence.

Les combustions vives sont également souvent accompagnées d'un phénomène de chimionisation (concentrations en espèces chargées supérieures à celles que donnerait l'équilibre thermodynamique) qui illustre encore le déséquilibre thermodynamique qui se manifeste dans la combustion vive ou simplement combustion.

Les modalités et les apparences du phénomène de la combustion dépendent des conditions physiques et aérodynamiques.

Souvent la combustion débute par une réaction d'oxydation lente. Lorsque les conditions de températures, de pression, de concentration sont réalisées dans le système (carburant plus comburant) la combustion se transforme en oxydation vive : c'est l'explosion ou l'auto-inflammation.

L'allumage correspond à une auto-inflammation locale. A partir du point d'allumage la zone de réaction peut dépendamment des conditions se propager de proche en proche dans le mélange frais. La zone réactionnelle en propagation est appelée front de flamme qui peut se propager de manières différentes.

Lorsque le carburant et le comburant sont mélangés au préalable on parle de flammes de prémélange. Si par contre le phénomène de propagation est contrôlé par la vitesse avec laquelle s'opère par diffusion les réactifs, on parle de flammes de diffusion.

En fonction de la nature du mélange et de certaines conditions de confinement, on peut avoir une propagation de la flamme à une vitesse subsonique (c'est la déflagration) ou à une vitesse supersonique (c'est la détonation).

La différence entre ces deux modes de propagation est grande du point de vue aérodynamique. La déflagration se déroule à des vitesses différentes selon qu'elle se produit dans un mélange inflammable au repos ou en écoulement laminaire ou dans un mélange en écoulement turbulent.

Ceci constitue un cas type de l'incidence des conditions aérodynamiques sur la combustion.

Dans la presque totalité des applications industrielles, la flamme se propage dans des conditions de turbulence plus ou moins prononcée et le contrôle de ces dernières constitue un facteur important dans l'optimisation des procédés. Il s'avère donc que la connaissance de la nature de l'interaction entre la flamme et la turbulence est d'une grande importance pour la pratique.

Les phénomènes de combustion (auto-inflammation, déflagration en prémélange, flamme diffusionnelle, laminaire ou turbulente, détonation, ...) peuvent se produire théoriquement dans des conditions strictement adiabatiques. Le confinement dû aux parois solides (du réacteur du four de combustion, du cylindre d'un moteur à combustion interne...) provoque des pertes de chaleur et de radicaux libres.

Les flammes confinées sont donc des flammes non-adiabatiques.

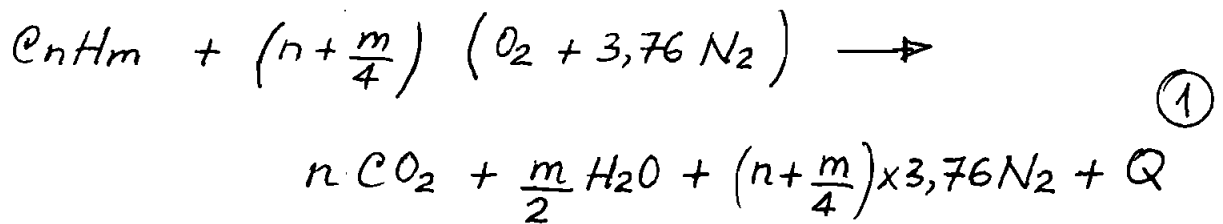
Le confinement joue un rôle important sur l'état final de la combustion et sur la vitesse de propagation de la flamme. Dans les cas extrêmes il peut rendre la combustion impossible. Il impose donc de l'extérieur, des limites à l'existence de la flamme qu'on appellera limites extrinsèques. L'effet du confinement ou l'effet de paroi est soit favorisé, soit minimisé selon les applications industrielles.

Il existe des limites de propagabilité intrinsèques provenant de la nature même du mélange combustible - comburant. Ce sont les limites d'inflammabilité et de détonabilité, qui dépendent de la composition du mélange et du degré de dilution par des gaz inertes.

Dans la majorité des cas les réactions de combustion se font en phase gazeuse. Même avec le bois, la cire, le charbon gras on a une flamme de diffusion en phase gazeuse. Par un phénomène de pyrolyse et de distillation, des vapeurs de combustibles s'échappent de ces matières et brûlent après mélange avec l'oxygène de l'air.

1.2. ASPECT THERMODYNAMIQUE

La combustion vive est une suite de réactions chimiques. On sait d'ailleurs que toute combustion est une réaction d'oxydation d'un réactif réducteur appelé combustible, par un réactif oxydant désigné par le terme général de comburant. Le comburant le plus utilisé est l'oxygène ou l'air (l'oxygène de l'air). Les combustibles courants sont les hydrocarbures. Les produits de combustion sont essentiellement le gaz carbonique et la vapeur d'eau. Soit l'hydrocarbure C_nH_m en combustion avec l'oxygène de l'air. La réaction est la suivante:



Q étant la quantité de chaleur libérée par mole de combustible, Q est appelée chaleur de combustion. Le tableau n° A6 en annexe donne la chaleur de combustion pour quelques combustibles.

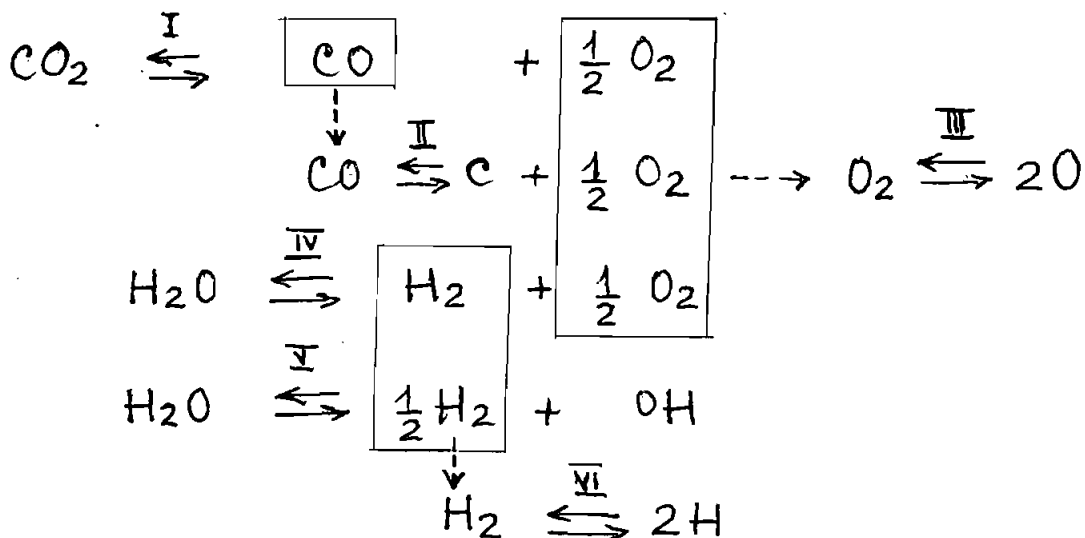
La chaleur de combustion est égale à la différence entre la somme des chaleurs de formation

des produits et celle des réactifs. La chaleur de combustion dépend et de la nature du combustible et de celle du carburant. Dans des conditions adiabatiques la totalité de l'énergie libérée est accumulée dans les produits de combustion comme chaleur sensible. On a alors:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} c_p(\text{produits}) dt \quad (2)$$

La combustion porte donc les produits de T_i (température initiale) à T_f (température finale).

Dans les applications industrielles T_f est élevée 2000 à 3000 K et le gaz carbonique et la vapeur sont partiellement dissociés suivant les réactions suivantes:



Les équilibres I à IV peuvent être caractérisés par des constantes d'équilibre reliant les concentrations des différentes espèces chimiques participant à la réaction.

$$\text{Pour l'équilibre I: } K_I = \frac{[\text{CO}] \times [\text{O}_2]^{1/2}}{[\text{CO}_2]}$$

$$\text{Pour l'équilibre II: } K_{II} = \frac{[\text{C}] \times [\text{O}_2]^{1/2}}{[\text{CO}]}$$

Les constantes d'équilibre dépendent de la température et généralement de la pression.

Pour calculer la température finale T_f la connaissance des variations des constantes d'équilibre en fonction de la température est nécessaire. Par là même on peut déterminer les concentrations à l'équilibre du gaz carbonique, de l'oxyde de carbone, de la vapeur d'eau et de chacun de leurs produits de dissociation.

A vrai dire la combustion n'est jamais adiabatique. Il y a toujours des pertes de chaleur par conductivité thermique et par rayonnement.

Pour les mêmes température et pression initiales, les températures de combustion dépendent de la nature du combustible (ce qui est une évidence) et du comburant ainsi que de la composition du mélange.

Pour ce qui concerne l'incidence de la composition, la température de combustion atteint un maximum aux environs de la stoechiométrie. Un mélange trop dilué donne des températures de combustion inférieures parce que les gaz inertes absorbent une partie de la chaleur de combustion sous forme de chaleur sensible. (figure n° 2 et tableau n° 1).

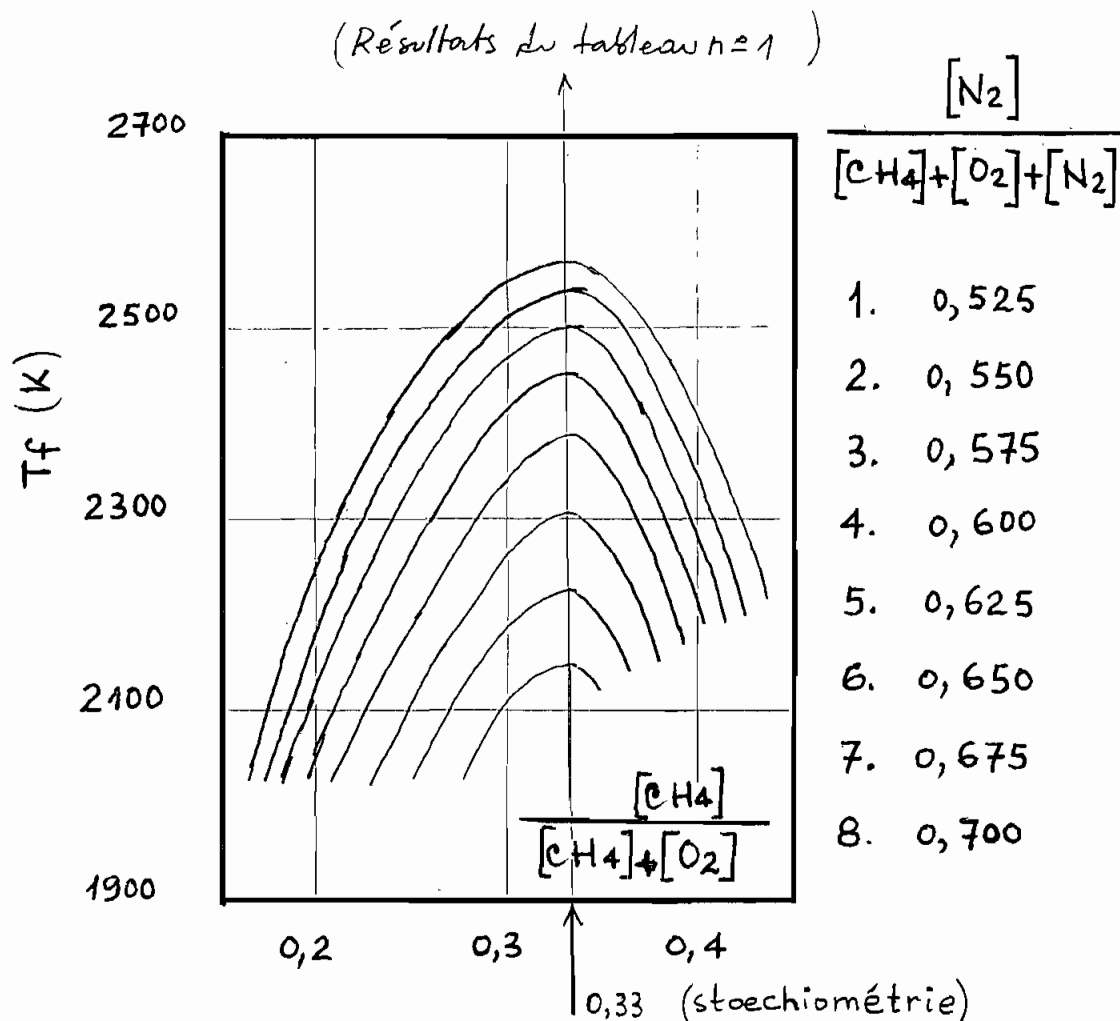


figure n° 2 : Température des flammes de méthane et d'oxygène dilués par l'azote

$$T_i = 295K \quad p = 1 \text{ atm}$$

Tableau n° 1

Température de fin de combustion. T_f

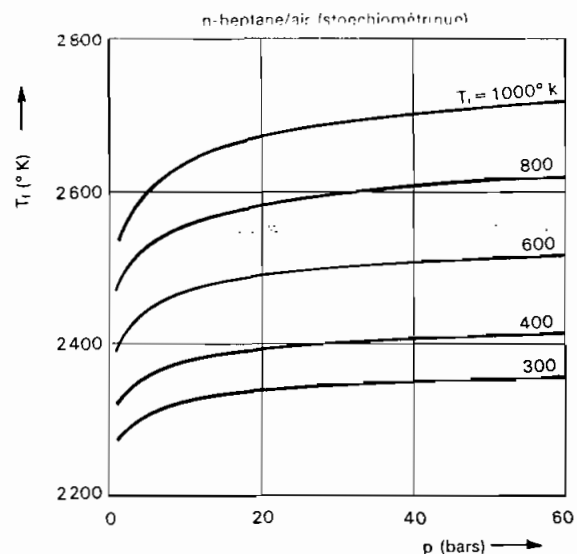
Mélanges stoechiométriques méthane / oxygène dilués par de l'azote ; $T_i = 295 \text{ K}$ $p = 1 \text{ atm}$.

Azote dans le mélange (%)	T_f (K)	
	Mesurée	Calculée
52,5	2570	2677
60	2450	2552
70	2145	2285

La température finale de combustion augmente lorsqu'on augmente la température initiale ou la pression initiale du mélange inflammable.

Les deux paramètres tendent à diminuer le degré de dissociation des produits de combustion.

figure n° 3
(page suivante)



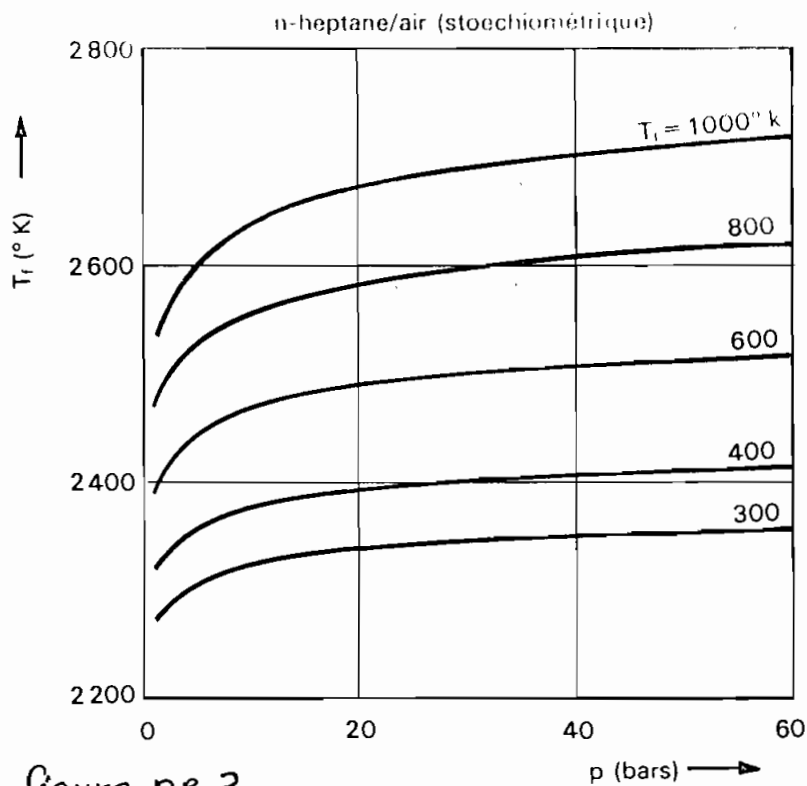


figure n° 3

Évolution de la température (T_f) des produits de combustion d'un mélange stoéchiométrique *n*-heptane/air, calculée en fonction de la pression (p) pour différentes valeurs de la température initiale (T_i).

Document IFP.

1.3 ASPECT CINÉTIQUE

La réaction globale ne reflète pas le mécanisme réel de la combustion qui se fait par une succession de réactions plus simples appelées étapes élémentaires parce qu'elles ne mettent en jeu que deux ou trois partenaires : les molécules ou radicaux libres. Le radical est un groupement d'atomes possédant un ou plusieurs électrons de valence non appariés : CH_3 , OH , ...

Adoptant le symbolisme suivant :

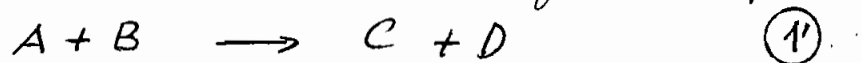
combustible A

comburant B

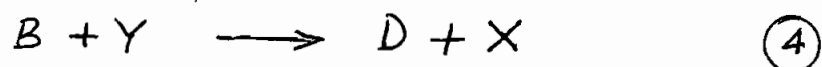
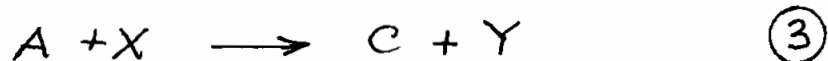
radicaux X, Y, ...

produits de combustion C, D, ... ,

on peut présenter la réaction globale par :



Cette réaction se fait par la succession d'au moins deux étapes élémentaires impliquant des radicaux, et qui constituent les étapes de propagation de la réaction.

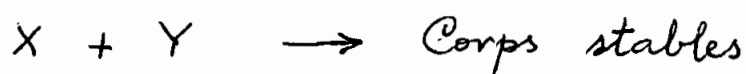


Au terme de ces deux étapes une molécule de combustible est transformée en produits de combustion et le radical X est régénéré.

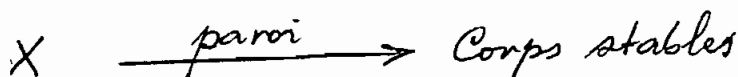
La succession des étapes ③ et ④ peut continuer indéfiniment, formant ainsi une chaîne réactionnelle dont les étapes ③ et ④ constituent le maillon. Ces étapes représentent les étapes de propagation de la réaction en chaîne.

Un seul radical X ou Y initialement présent dans le mélange des réactifs suffirait à transformer toutes les molécules de combustible en produits de combustion. Mais on doit tenir compte d'une part de la possibilité de disparition des radicaux libres (rupture de la chaîne) et d'autre part de la possibilité de leur formation (ramification de la chaîne).

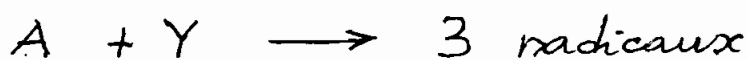
La rupture a lieu lorsque deux radicaux entrent en collision. Par la réunion de leurs électrons non appariés il y a formation d'une liaison covalente, ce qui fait disparaître leur caractère radicalaire avec production d'une espèce chimique stable:



La terminaison de la chaîne peut également se produire lorsqu'un radical atteint une paroi solide. Les parois (surfaces métalliques surtout) possèdent des électrons de valence non appariés. Elles captent les radicaux pendant un temps jusqu'à ce que d'autres radicaux viennent se combiner avec eux :



Cette perte est compensée par des réactions qui produisent d'autres radicaux (réactions de ramification) :



Chaque radical engendre une nouvelle chaîne de propagation par la succession des étapes élémentaires. ③ et ④

Cette ramification prend l'aspect d'une avalanche lorsque sa fréquence est suffisamment élevée. Le nombre de chaînes augmente de plus en plus vite. Il s'ensuit une accélération de la vitesse, qui conduit à un emballement du processus global.

(voir figure n° 4)

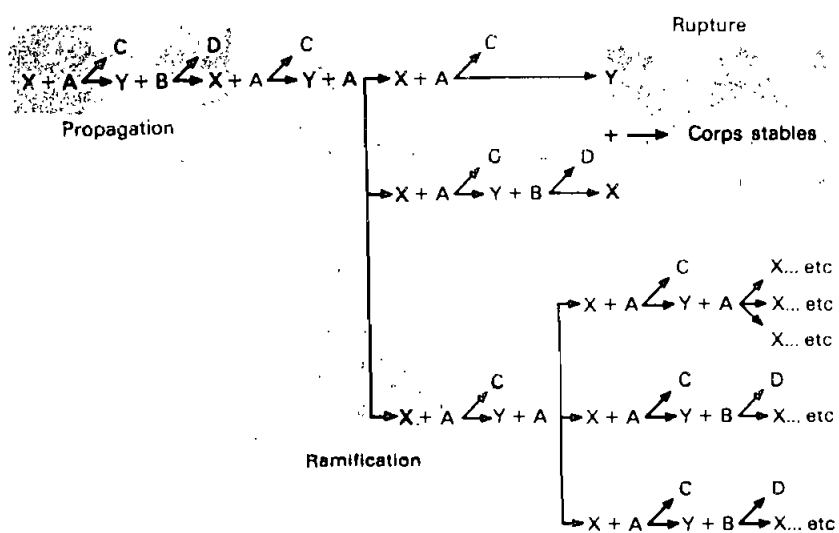


FIG. 4 Schéma de l'évolution d'une réaction de combustion par chaînes ramifiées.

(A : combustible ; B : comburant ; C et D : produits de combustion ; X et Y : radicaux libres.)

L'étude de la dépendance des vitesses réactionnelles des étapes élémentaires vis-à-vis de la température et de la concentration en radicaux nous permettra de mieux comprendre le processus d'emballerment de la réaction.

Exprimons la concentration de l'espèce chimique i par sa fraction molaire X_i

$$X_i = \frac{\text{Moles de } i}{\text{Moles de toutes les espèces chimiques dans le mélange}}$$

La vitesse de réaction est la variation de la fraction molaire d'une espèce chimique en fonction du temps.

Pour l'étape de propagation (3) $A + X \rightarrow C + Y$
la vitesse s'écrit (diminution de A et augmentation de C) :

$$V_p = - \frac{dX_A}{dt} = \frac{dX_C}{dt}$$

Cette dérivée peut être exprimée par la fréquence de collisions biparticulaires par molécule (Z_2) multipliée par le produit des probabilités suivantes :

a/ la probabilité pour que la collision ait lieu entre deux partenaires appropriés (ici entre une molécule A et un radical X)

$$X_A \cdot X_X$$

b/ la probabilité pour que l'approche des deux particules ait lieu suivant une orientation géométrique adéquate exprimée par un facteur stérique $f \leq 1$. On prendra $f=1$

c/ la probabilité pour que la collision soit suffisamment énergétique pour donner lieu à la réaction élémentaire $A+X \rightarrow C+Y$ (sinon ce serait une collision élastique).

Selon la théorie de Boltzmann, cette probabilité est donnée par l'expression :

$$e^{-E/RT}$$

où: E est l'énergie minimale (encore appelée énergie d'activation) que la collision doit générer pour dépasser le seuil élastique.

R constante universelle des gaz.

On a alors la vitesse sous la forme :

$$V_p = f_3 \cdot Z_2 \cdot X_A \cdot X_X \cdot e^{-E_p/RT}$$

$$V_p = f_3 \cdot Z_2 \cdot X_A \cdot X_X \cdot e^{-E_p/RT}$$

Z_2 est le rapport de la vitesse moyenne de translation d'une molécule par son libre parcours moyen (λ) :

$$Z_2 = c/\lambda = (8R)^{1/2} \cdot T_0 \cdot p \cdot (\pi TM)^{1/2} \cdot p_0 \cdot \lambda_0$$

où : R constante universelle des gaz

M masse moléculaire moyenne de la molécule

λ_0 libre parcours moyen à la température et à la pression normales (T_0, p_0).

Pour l'étape de propagation (4) $B + Y \rightarrow D + X$

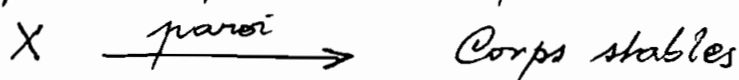
$$V_p' = f_4 \cdot Z_2 \cdot X_B \cdot X_Y \cdot e^{-E_p/RT}$$

Pour l'étape de rupture en phase gazeuse homogène (5) $X + Y \rightarrow$ Corps stables

$$V_t = f_5 \cdot Z_3 \cdot X_X \cdot X_Y \cdot e^{-E_t/RT}$$

$E_t \approx 0 \quad Z_3 \approx 10^{-3} Z_2$

Pour l'étape de rupture sur paroi solide (6)



$$V_t' = f_5 \cdot Z_s \cdot X_{(X \text{ ou } Y)} \cdot e^{-E_t'/RT}$$

Z_s fréquence des collisions sur la paroi.

Pour l'étape de ramification $\textcircled{7}$ $A + Y \rightarrow 3 \text{ radicaux}$

$$V_r = f_7 \cdot Z_2 \cdot X_A \cdot X_Y \cdot e^{-E_r/RT}$$

D'une manière générale on peut exprimer les vitesses réactionnelles comme suit : (étape de propagation $A + X \rightarrow C + Y$)

$$V_p = k_3 \cdot [A] \cdot [X] = k_{30} \cdot [A] \cdot [X] \cdot e^{-E_p/RT}$$

L'unité de la constante réactionnelle k_3 dépend du choix des unités des concentrations

$[A]$ et $[X]$

$$k_3 = f_3 \cdot Z_2 \cdot e^{-E_p/RT}$$

$$k_{30} = f_3 \cdot Z_2$$

Lorsque les vitesses des deux étapes de propagation sont égales $V_p = V_{p'}$ on a un régime stationnaire.

Etant donné que ce sont ces étapes qui sont responsables de la transformation des réactifs initiaux en produits de combustion (réaction globale), la vitesse globale sera égale aux vitesses de propagation :

$$V_{\text{combustion}} = V_p = V_{p'}$$

Donc la vitesse globale de réaction doit subir une accélération lorsque la température s'élève ($e^{-E_p/RT}$) ou lorsque la concentration en radicaux libres augmente $[X]$, $[Y]$.

Or l'oxydation est une réaction exothermique et en absence de tout échange avec l'extérieur, la température s'élève automatiquement au cours de son développement. La vitesse de ramification est accélérée par une augmentation de température. Les réactions de rupture ne sont pratiquement pas affectées ($E_t \approx 0$ et $Z_3 \approx 10^{-3} Z_2$).

En conséquence la concentration en radicaux s'élève avec la température, les deux phénomènes se traduisant par une auto-accélération de la réaction.

1.4 ASPECT DIFFUSIONNEL

L'intensité avec laquelle se produisent les réactions de combustion dépend de l'intensité du transfert de chaleur et de masse dans le flux qui à son tour s'explique par le déplacement de la masse, de la diffusion et de la conductivité thermique.

Dans le flux de gaz la diffusion et la conductivité thermique se produisent par suite du déplacement thermique des molécules et du mouvement désordonné des molécules de gaz à compositions et températures différentes.

La diffusion tout comme le transfert de chaleur est engendrée par les gradients de concentration et de température.

Des expériences ont montré que le flux de matière de diffusion est proportionnel au gradient de concentration et au gradient de température :

$$m_M = - D \frac{dC}{dx} - k D \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

où : m_M est la quantité de matière transmise par suite de la diffusion moléculaire à travers une unité de section par unité de temps

- D coefficient de proportionnalité [m^2/sec] appelé coefficient de diffusion moléculaire.
- kD coefficient de diffusion thermique
- C concentration de l'espèce en diffusion.
- x coordonnée dans le sens de l'écoulement.

Le coefficient de diffusion dépend de la température et est inversement proportionnel à la pression suivant la relation :

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \cdot \frac{p_0}{p}$$

$$n = 1,5 \dots 2.$$

D_0 coefficient de diffusion à la pression et à la température normales p_0, T_0 .

$$T \text{ (K)}, \quad p \text{ (Pa)}.$$

Lorsque la différence entre les masses moléculaires n'est pas trop élevée et que le gradient de température est très petit on peut négliger la diffusion thermique. Alors la masse transmise par diffusion m_M exprimée en $moles/m^2 \cdot sec$ ou en $kg/m^2 \cdot sec$ dépendamment de l'unité de la concentration est déterminée par la loi de Fick :

$$m_M = -D \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

La quantité de chaleur transmise par suite de la conduction thermique moléculaire q_M , exprimée en $\text{kJ/m}^2 \cdot \text{sec}$ se détermine à partir de la formule de Fourier :

$$q_M = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

où : λ est le coefficient de conductivité thermique moléculaire ($\text{kW/m} \cdot \text{K}$).

Un gaz peut se déplacer suite à une différence de température ou de concentration ou sous l'action de forces extérieures. Dans le premier cas il s'agit d'une convection naturelle ou convection libre et dans le second cas d'une convection forcée.

La masse globale de matière transmise par diffusion et par convection, m , exprimée en $\text{moles/m}^2 \cdot \text{sec}$ s'exprime par la relation:

$$m = -D \frac{dC}{dx} + Wx \cdot C \quad (4)$$

Tenant compte de l'équation des gaz parfaits on a :

$$m = -\frac{D}{RT} \times \frac{dP}{dx} + Wx \cdot \frac{P}{RT}$$

Le flux thermique est donné par :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} + c_p \cdot \rho \cdot W_x \cdot T \quad (5)$$

où :

- λ est la conductivité thermique
- W_x la composante de la vitesse dans la direction de l'écoulement.
- T la température
- c_p la capacité calorifique
- ρ la pression partielle
- ρ la densité du mélange.

Les premiers termes dans les expressions de m et de q représentent le transfert de masse ou de chaleur dû à la diffusion ou à la conduction thermique ; les deuxièmes termes, le transfert de masse ou de chaleur dû à la convection.

L'équation différentielle de la variation de la concentration des espèces en diffusion dans la direction perpendiculaire à la surface de diffusion est alors :

$$-W_x \cdot \frac{dc}{dx} + D \cdot \frac{d^2c}{dx^2} = 0 \quad (6)$$

Le rapport des quantités de matière, transmises par convection et par diffusion moléculaire est caractérisé par le nombre adimensionnel appelé critère de diffusion de Peclet (nombre de Peclet):

$$Pe_d = \frac{W.l}{D} \quad (7)$$

où l représente la dimension caractéristique du flux.

Pour une grande valeur de Pe_d on peut négliger la diffusion moléculaire.

Le critère de diffusion de Peclet peut être décomposé en nombres de Reynolds et de Prandtl :

$$Pe_d = \left(\frac{W.l}{\nu} \right) \cdot \left(\frac{\nu}{D} \right) = Re \cdot Pr. \quad (8)$$

Pour les gaz on peut admettre que $Pr \approx 1$ alors on a :

$$Pe_d \approx Re.$$

L'équation de la diffusion qui donne la distribution des valeurs moyennes de la concentration des espèces dans le flux peut être obtenue en étudiant le bilan des flux

de matières à travers une face du parallélépipède élémentaire au travers duquel passe le fluide contenant ces matières. La différence entre la quantité de matières introduites par diffusion et convection dans le volume élémentaire et celle sortant du volume est utilisée pour déterminer la variation de concentration.

Dans certains cas la diffusion moléculaire peut être l'élément principal dans la distribution de la concentration dans le flux.

Par contre lorsque la turbulence est assez développée ou lorsque nous nous trouvons dans le cas de turbulence libre alors, la diffusion moléculaire devient négligeable.

Chapitre 2

COMBUSTIBLES ET

COMBUSTION

2.1 COMBUSTIBLES ET COMBURANTS

2.1.a Les combustibles

Les combustibles sont subdivisés en trois grandes classes : les solides, les liquides et les gazeux. Le tableau suivant donne la liste des principaux combustibles industriels.

Tableau n°2

	COMBUSTIBLES		
	SOLIDES	LIQUIDES	GAZEUX
Naturels	Bois Tourbe <u>Lignite</u> <u>Houille</u> Anthracite	Pétrole	<u>Gaz naturel</u>
Artificiels	Charbon de bois Charbon de tourbe Agglomérés Coke métallurgique Coke de gaz	<u>Fuel-oil lourd</u> <u>Fuel-oil léger</u> (Gas-oil (Fuel-oil domestique (Essence Kérosène Huile de schiste Goudron de houille Benzols Alcools Carburants de synthèse Huiles végétales <u>Naphta</u>	Hydrogène Acétylène Butane <u>Propane</u> Gaz à l'eau Gaz à l'air Gaz de cokerie <u>Gaz de hauts-</u> <u>fourneaux</u>

Ces combustibles sont constitués d'un mélange de corps plus ou moins complexes dans lesquels dominent le carbone et l'hydrogène.

Le carbone peut se trouver sous la forme d'élément :

soit libre (charbons),
 soit combiné à l'hydrogène sous forme de carbone d'hydrogène (fuel-oil, gaz naturel),
 soit combiné à d'autres éléments sous forme d'oxyde de carbone, d'alcools.

Les compositions élémentaires types sont données dans les tableaux ci-après.

Tableau 3A — Combustibles gazeux.

Eléments combustibles	hydrogène	H_2 %	
	oxyde de carbone	CO %	
	méthane	CH_4 %	
	hydrocarbures divers	$\Sigma C_m H_n$ %	
	hydrogène sulfuré	H_2S %	
	sulfure de carbone	CS_2 %	
Elément comburant	oxygène	O_2 %	
Eléments inertes	azote	N_2 %	} K %
	gaz carbonique	CO_2 %	
	gaz sulfureux	SO_2 %	
	vapeur d'eau	H_2O %	

Tableau 3B — Combustibles solides et liquides.

Eléments combustibles	carbone	C %
	hydrogène	H %
	soufre	S %
Elément comburant	oxygène	O %
Eléments inertes	azote	N %
	eau	E %
	stériles	K %

2.1. b Le comburant

Il peut être un corps oxydant quelconque.
Le comburant le plus utilisé est l'oxygène sous la forme d'oxygène pur ou d'air (oxygène de l'air).

La composition de l'air sec est :

* en poids Azote (N_2) 75,5 %

Oxygène (O_2) 23,2 %

Argon et divers 1,3 %

* en volume Azote (N_2) 78,03 %

Oxygène (O_2) 20,99 %

Argon (Ar) 0,94 %

Gaz carbonique (CO_2) 0,03 %

Hydrogène (H_2) 0,01 %

(sans tenir compte des autres gaz inertes
Héon, Hélium, ---)

Dans des applications spéciales on utilise comme comburant : le protoxyde d'azote, fluor ou chlore.

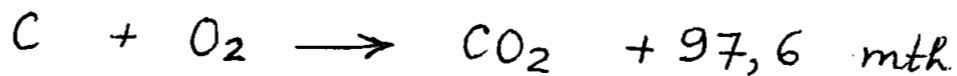
2.2 COMBUSTION DES COMBUSTIBLES

GAZEUX

Les combustibles gazeux contiennent outre les éléments simples : le carbone, l'hydrogène, le soufre ; des hydrocarbures. Donc la combustion d'un combustible gazeux se résume à celle des éléments simples comme le carbone et l'hydrogène et des hydrocarbures.

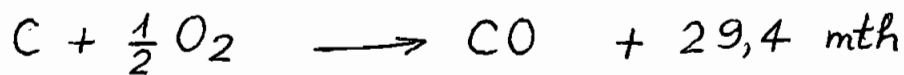
2.2.a Combustion du carbone.

Lorsqu'il se trouve en présence de tout l'oxygène qui lui est nécessaire il se produit une combustion complète. Le carbone se combine à l'oxygène pour former de l'anhydride carbonique CO_2 :



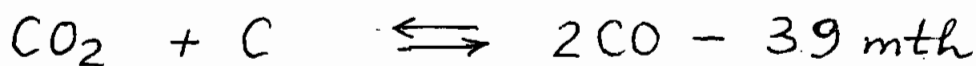
Le carbone pur a donc un pouvoir calorifique de 8 133 mth/kg et un pouvoir comburivore de 11,49 kg d'air [8,89 Nm³ d'air]
Le pouvoir fumigène de 1kg de carbone est de 8,89 Nm³ de gaz.

Si la quantité d'oxygène (donc d'air) est insuffisante pour assurer la combustion complète du carbone, la partie non complètement brûlée donne de l'oxyde de carbone selon la réaction :



Ce qui correspond à une perte de chaleur de 69,8% par atome de carbone non complètement brûlé.

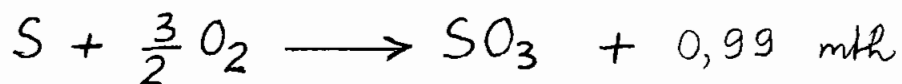
Si la quantité d'oxygène ne permet la combustion de tout le carbone, le CO_2 formé par la combustion complète peut réagir sur le carbone chaud pour donner de l'oxyde de carbone :



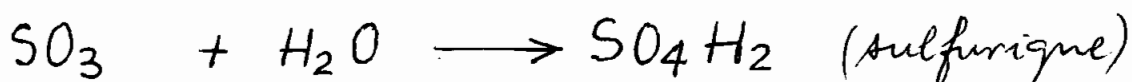
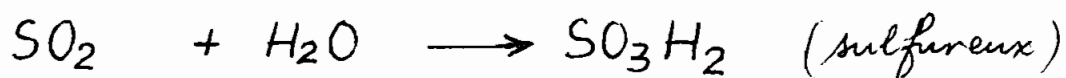
Ce type de réaction va à l'encontre du but visé car elle absorbe de la chaleur au lieu d'en fournir.

Il est indispensable d'avoir toujours assez d'air comburant pour pouvoir brûler intégralement le carbone à l'état de CO_2

Il y a aussi production simultanée de l'anhydride sulfurique suivant la réaction :



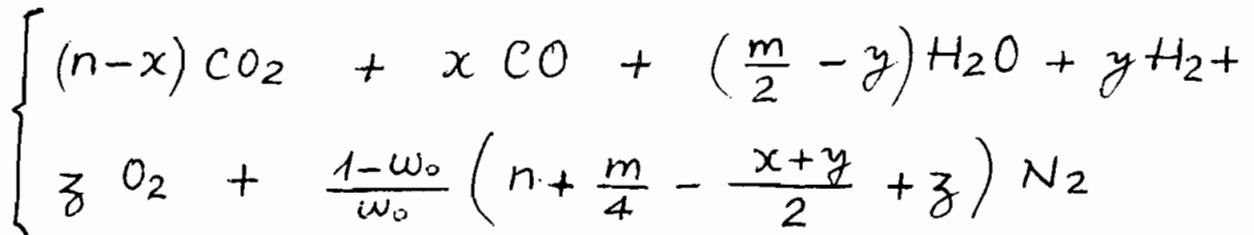
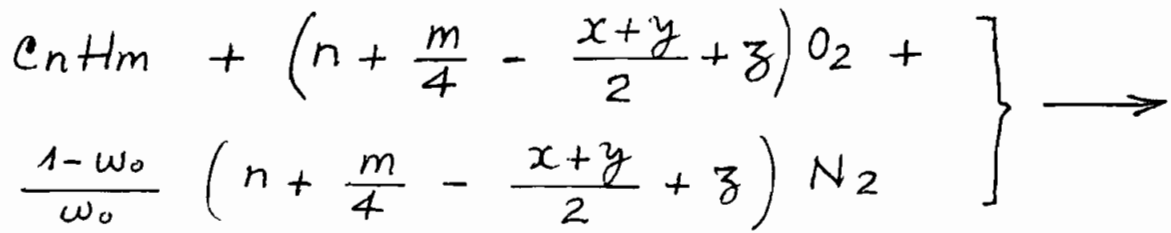
En présence d'humidité (vapeur d'eau due à la combustion de l'hydrogène) ces anhydrides vont donner des acides :



Ces deux acides sont extrêmement corrosifs. Donc le soufre est un élément nocif dans les combustibles.

2.2.d Combustion d'un hydrocarbure

En supposant que l'hydrocarbure C_nH_m par la combustion avec un comburant de teneur en oxygène w_o ne produit que des imbrûlés CO et H_2 (pas de production de carbone ni d'autres hydrocarbures). l'équation générale s'écrit :



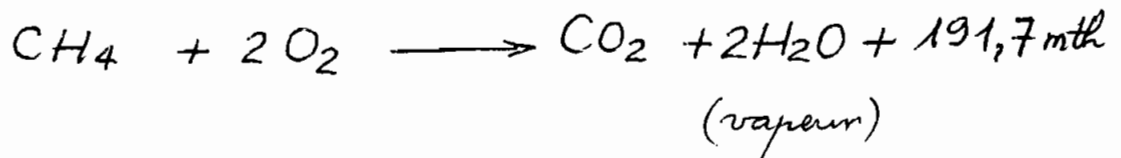
La combustion d'une mole de $C_n H_m$ donne naissance à des fumées contenant :

x moles de monoxydes de carbone CO

y moles d'hydrogène H_2

z moles d'oxygène O_2

Pour l'analyse de la combustion on utilise des équations plus simples. Pour le méthane par exemple on a :



Connaissant la composition d'un combustible gazeux donné on peut déterminer la quantité de chaleur dégagée par sa combustion à partir de celles des éléments actifs qui le constituent.

2.3 COMBUSTION DES COMBUSTIBLES

LIQUIDES

Il y a deux façons de brûler un combustible liquide :

- Il peut être évaporé et mélangé avec le comburant, avant la combustion qui est alors identique à celle obtenue avec le combustible gazeux. Cette méthode est peu employée car les suies qui se forment risquent de boucher le brûleur. Elles brûlent difficilement et se retrouvent en grande partie dans les fumées. Et puis la vaporisation est difficile sans craquage préalable,
- Le combustible peut être admis au foyer en phase liquide ; il est pulvérisé sous forme de gouttelettes et c'est en définitive l'évolution de ces gouttelettes qui contrôle le déroulement de la combustion. Si le diamètre des gouttelettes est inférieur à 20μ , il n'y a pas de différence fondamentale entre le problème de la combustion des combustibles gazeux et celui des liquides pulvérisés.

2.4. METHODES DE COMBUSTION

En général la combustion est complète et la constitution des fumées ne dépend que du rapport des débits de comburant et de combustible envoyés dans la chambre de combustion.

2.4.a°/ Combustion stoechiométrique

Elle est obtenue lorsque le combustible et le comburant sont en proportion stoechiométrique: il n'y a ni excès ni défaut de combustible ou de comburant. On retrouve dans les fumées du gaz carbonique (CO_2), de la vapeur d'eau (H_2O), de l'oxyde de soufre (SO_2), de l'azote (N_2) et d'autres gaz sous forme de traces.

2.4.b°/ Combustion sans imbrûlés

Elle est encore appelée combustion complète avec excès d'air. Elle est plus fréquente dans les applications industrielles (chaudières). Les gaz présents dans les fumées sont: CO_2 , SO_2 , H_2O , N_2 et autres sous forme de traces. Il faut nécessairement un excès d'air.

2.4.c°) Combustion avec imbrûlés en présence d'excès d'air.

C'est une combustion incomplète. Malgré l'excès d'air il peut y avoir des imbrûlés dans les fumées sous forme de méthane et d'oxyde de carbone (CH_4 , CO). [les autres étant ramenés à ces deux formes]. Il y a parfois des solides qui se déposent dans les parois des échangeurs ou entraînés par les fumées.

2.4.d°) Combustion avec imbrûlés en manque d'air

C'est elle qui est communément appelée combustion incomplète. La quantité de méthane (CH_4) et d'oxyde de carbone (CO) est importante de même que celle des imbrûlés solides. Elle est utilisée dans les fours sidérurgiques pour avoir une atmosphère réductrice. On peut trouver de l'oxygène dans les fumées malgré sa pénurie.

2.4. e) Combustion étagée

Elle s'effectue en deux temps (réactions en deux temps). L'air comburant est admis en quantité insuffisante. Il conduit à une combustion incomplète et réductrice à basse température. Le complément et l'excès d'air sont admis pour terminer la combustion.

Chapitre 3

MODES DE

PROPAGATION

3.1. AUTO-INFLAMMATION OU EXPLOSION

PROPREMENT DITE

Lorsqu'un mélange de combustible et de comburant est exposé à la température ambiante il ne se produit aucune réaction de combustion. A cette température les vitesses réactionnelles sont pratiquement nulles. Le mélange est en état métastable.

• En élevant la température de façon homogène dans tout le volume, des réactions d'oxydation lente apparaissent. Ces réactions vont en s'accéléralant de par l'augmentation de température consécutive à l'exothermicité des réactions.

L'épuisement progressif des réactifs s'accompagne d'une diminution de la vitesse réactionnelle.

• Porté à des températures de plus en plus élevées, le mélange atteint une température où la réaction d'oxydation s'emballe et se transforme en combustion vive : c'est l'auto-inflammation. La température minimale à laquelle elle se produit est appelée température d'auto-inflammation.

La température d'auto-inflammation dépend de la nature et de la composition du mélange explosif. Elle est une fonction caractéristique pour un mélange déterminé.

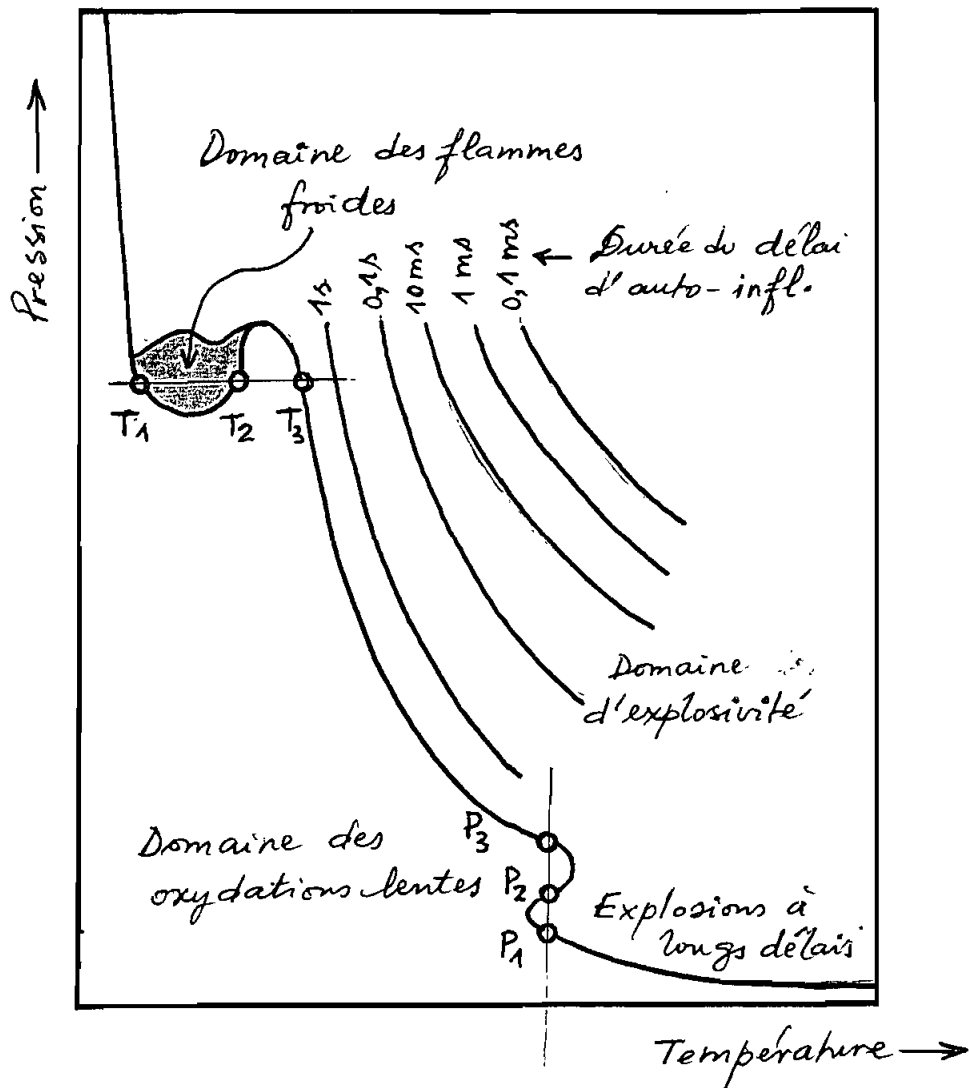


figure n° 5 Représentation schématique des domaines d'explosivité et d'oxydation lentes pour un mélange hydrocarbure/air.

La température d'auto-inflammation est d'autant plus élevée que la pression est faible.

Aux pressions élevées on note trois températures limites T_1, T_2, T_3 (voir figure n° 5 page précédente)

C'est le domaine des flammes froides.

Aux faibles pressions on note le domaine des auto-inflammations à long délais. Pour une température donnée il existe trois pressions limites successives d'auto-inflammation.

Pour un mélange explosif porté instantanément à sa température d'auto-inflammation (ou même supérieure à cette dernière) l'auto-inflammation ne se produit qu'après un délai appelé délai d'auto-inflammation. Ce délai est d'autant plus long que la température est plus élevée.

L'explication de ce délai se trouve dans la nécessité d'élaborer une concentration en radicaux par des étapes de ramification de manière que la réaction d'oxydation puisse s'emballer (C'est l'auto-inflammation).

La connaissance des températures d'auto-inflammation est d'une grande importance dans le domaine de la sécurité. La majorité des combustibles sont relativement volatils. Et il arrive que la température d'auto-inflammation de la nappe (fuites et air) soit inférieure à celle du mélange explosif.

Dans les moteurs à explosion interne ce ne sont pas les températures d'auto-inflammation qui revêtent l'intérêt pratique mais la connaissance des délais d'auto-inflammation.

Dans le cas des moteurs à essence le mélange carburant/air est allumé par une étincelle électrique. La flamme se propage durant un certain temps. Vu que la température augmente à cause de la pression due à l'expansion des gaz brûlés, la fraction de mélange non encore brûlée explose donnant lieu à des ondes de pression nocives pour les matériaux. Pour éviter ce phénomène connu sous le nom de «cliquetis» il est recommandé d'opérer avec des mélanges ayant des délais d'auto-inflammation suffisamment longs afin de permettre que la totalité des gaz soit brûlée. Les combustibles sont classés selon leur tendance au cliquetis par l'indice d'octane (Convention). Par définition le n-Heptane est de l'indice zéro et l'iso-octane de l'indice 100. Plus le combustible résiste au cliquetis plus son indice d'octane est élevé et inversement. Les contraintes économiques font que le raffineur opte pour les combustibles de faible indice d'octane.

De faibles quantités d'additifs (par exemple de plomb) améliore l'indice d'octane. Mais ces additifs engendrent d'autres problèmes liés à la pollution.

L'emballement de la vitesse réactionnelle globale d'oxydation, qui constitue l'auto-inflammation ne se réalise que lorsque la concentration en radicaux libres (propagateurs de la chaîne) atteint une valeur critique $(X_R)_c$ ou $[X_R]_R$.

La variation de cette concentration est contrôlée par les étapes élémentaires qui augmentent le nombre de radicaux libres, et les étapes de rupture en phase gazeuse et les parois qui les diminuent. La vitesse de chaque étape dépend exponentiellement de la température par le facteur d'Arrhénius:

$$e^{-E/RT}$$

La variation de la fraction molaire des radicaux en fonction du temps (dX_R/dt) est égale à la somme algébrique des vitesses réactionnelles des étapes élémentaires (Approximation)!

$$\frac{dX_R}{dt} = V_r - V_t - V_t' =$$

$$\frac{dX_R}{dt} = Z_2 \cdot X_A \cdot X_Y \cdot e^{-E_r/RT} - Z_3 \cdot X_Y \cdot X_X - Z_5 \cdot X_R \cdot e^{-E_t'/RT}$$

En posant :
$$\delta = X_A \cdot \frac{X_Y}{X_R} \cdot e^{-E_R/RT}$$

$$F_t = Z_3 \cdot X_Y \cdot X_X / Z_2 \cdot X_R^2$$

$$\beta_s = \frac{Z_5}{Z_2} \cdot e^{-E_t'/RT} \quad \text{on a :}$$

$$\frac{dX_R}{dt} = Z_2 \cdot \delta \cdot X_R - Z_2 \cdot F_t \cdot X_R^2 - Z_2 \cdot \beta_s \cdot X_R$$

L'énergie d'activation est généralement faible (1 à 2 kcal/mole). Donc l'augmentation de la fraction molaire des radicaux libres en fonction de la température sera déterminée par le facteur d'Arrhénius de l'étape de ramification. Le délai d'auto-inflammation θ est l'inverse de la vitesse d'accroissement des radicaux libres. Il dépend donc de la température suivant :

$$\theta = \text{facteur de proportionnalité} \times e^{E_r/RT}$$

L'équation de $\frac{dX_R}{dt}$ permet de prévoir la condition d'explosivité. Elle est obtenue pour $\frac{dX_R}{dt} = 0$; (X_R) ne peut augmenter indéfiniment, elle atteint une valeur critique maximale puis décroît. $(X_R)_{\max} = (\delta - \beta_s) / F_t$
 La condition la moins sévère de l'auto-inflammabilité est donc : $(X_R)_c \leq (\delta - \beta_s) / F_t$.

L'intégration de l'équation de $\frac{dX_R}{dt}$ permet de calculer le délai d'auto-inflammation théorique à pression et température données.

A pressions élevées (pour un grand nombre d'hydrocarbures) on observe des flammes froides.

Les produits de combustion des flammes froides sont des produits d'oxydation incomplète (CO , formaldéhyde CH_2O , ...) au lieu de CO_2 et de la vapeur d'eau. Elles sont des auto-inflammations particulières. Elles sont moins exothermiques d'où le vocable « froides ».

A des pressions encore plus élevées les flammes froides sont suivies d'une auto-inflammation franche.

A basses pressions on a la péninsule à longs délais (pour la plupart des hydrocarbures).

Le mélange hydrocarbure/oxygène se transforme presque entièrement en un mélange hydrogène/oxyde de carbone/oxygène. Ceci requiert un temps appréciable et explique l'existence d'un délai relativement long.

3.2. PROPAGATION SUBSONIQUE

DE LA FLAMME OU DEFLAGRATION

Lorsque les conditions de « propagabilité » sont remplies, la zone de combustion encore appelée « flamme » se propage avec une vitesse déterminée par rapport au mélange inflammable.

Lorsque la vitesse est subsonique (c'est le cas dans la plupart des propagations) on parle de déflagration. Cette vitesse détermine la quantité de mélange qui peut être brûlée par unité de temps. Sa connaissance est d'une grande importance dans la pratique.

Dans la plupart des applications industrielles il s'agit d'une déflagration turbulente caractérisée par des fluctuations erratiques de la vitesse et l'influence des conditions aérodynamiques sur la flamme.

Pour des mélanges au repos ou en écoulement laminaire, l'influence des conditions aérodynamiques est négligeable. On parle alors de « flammes laminaires ».

3.2.a/ Déflagration en régime laminaire

La vitesse dont on a besoin est celle du front de flamme par rapport au mélange inflammable. La flamme se «déplace» à travers le mélange ou encore le mélange s'écoule à travers la flamme. On a l'impression que la flamme est assise au sommet du brûleur. En réalité elle est en propagation à travers le mélange combustible / air qui s'écoule du brûleur avec une vitesse constante.

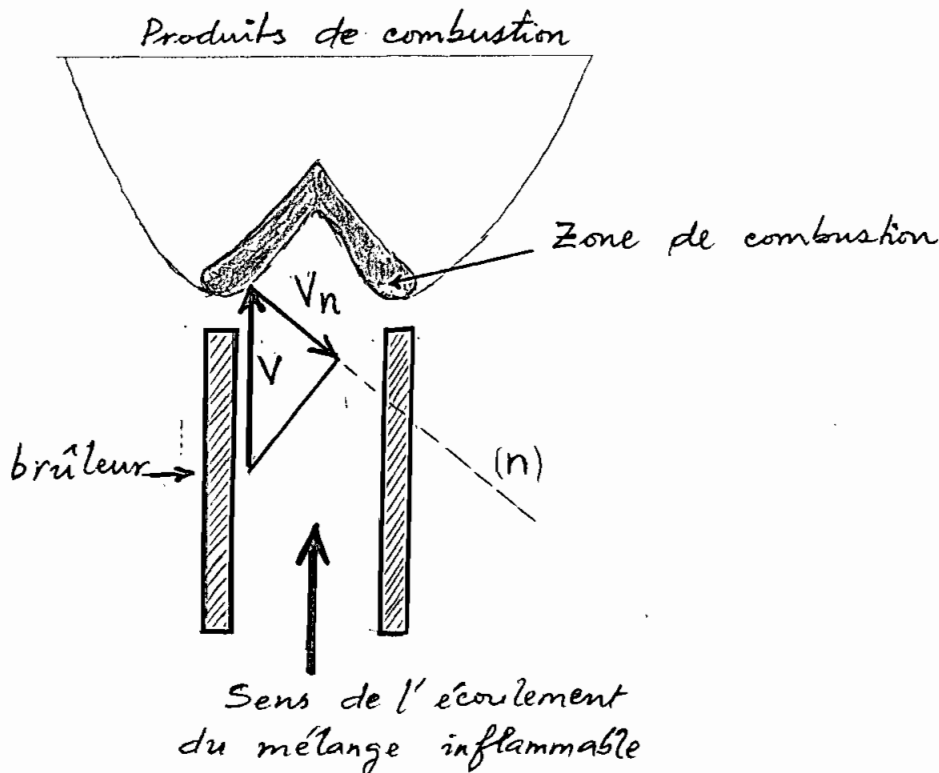


figure n° 6. Vitesse normale de déflagration

La direction de la vitesse du mélange gazeux qui s'écoule à travers le front peut être oblique par rapport à ce dernier. La vitesse laminaire dans ce cas est la projection de la vitesse du mélange sur la normale au front de flamme.

(voir fig. n° 6 page précédente)

La vitesse de déflagration est la vitesse laminaire relative au mélange inflammable et normale à la surface de la flamme ; on l'appelle aussi vitesse normale de la flamme.

Un brûleur Bunsen permet la détermination de la vitesse de déflagration. Elle est identique de point en point sur toute la surface de la flamme. D étant le débit du mélange et S la surface de la flamme on a :

$$V_n = D/S$$

La surface de la flamme est déterminée à partir de photographies. La vitesse de déflagration est un peu plus élevée au sommet du cône à cause du préchauffage des gaz qui le traversent et, un peu plus faible à la base en raison des pertes thermiques vers le bord du brûleur.

La vitesse de déflagration dépend de plusieurs paramètres.

La vitesse de déflagration dépend de la nature du combustible et du comburant, de la richesse du mélange, du degré de dilution, de la température et de la pression initiales des gaz. (voir figures n° 7 à 11 et tableau n° 4)

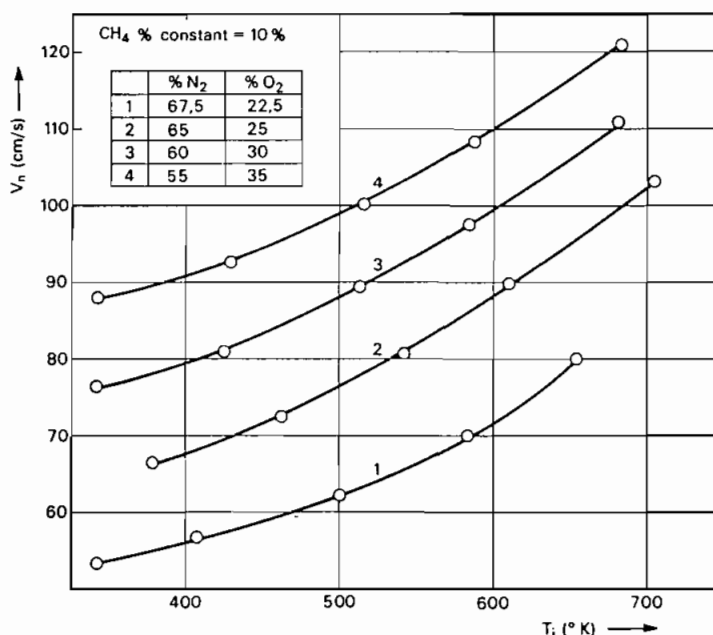


FIG. 7. Influence de la température initiale (T_i) du mélange sur la vitesse normale de propagation. Mélanges $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$.

D'après Van Tiggelen (A.), Vandenabeele (H) et Corbeels - Kinetic Parameters in Premixed Flames, AFOSR-TN 59-1149, 1960.

TABLEAU 4

VITESSES FONDAMENTALES

Différents mélanges de combustibles avec l'air, en fonction de la richesse. Température et pression initiales : 25 °C et 1 bar. Les vitesses fondamentales sont données en cm/s.

COMBUSTIBLE	RICHELISSE				
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Hydrogène	120	145	170	204	245
Méthane	30,0	38,3	43,4	44,7	39,8
Propane		42,3	45,6	46,2	42,3
n-heptane	37,0	39,8	42,2	42,0	35,5
Éthylène	50,0	60,0	68,0	73,0	72,0
Benzène	39,4	45,6	47,6	44,8	40,2
Méthanol	34,5	42,0	48,0	50,2	47,5
Ether éthylique	37,0	43,4	48,0	47,6	40,4
Acétylène	107	130	144	151	154
Sulfure de carbone	58,0	59,4	58,8	57,0	55,0

D'après GIBBS (G. J.) et CALCOTE (H. F.). - J. Chem. Enging., 1959, 4, 226.

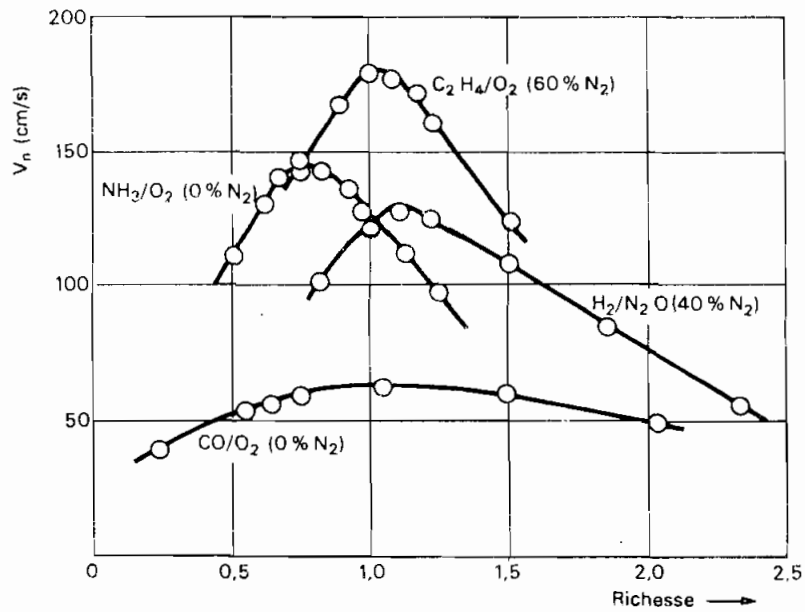


FIG. 8 Influence de la richesse du mélange sur la vitesse normale $V_n = D/S$.
 Références : voir Van Tiggelen (A.) et coll. - Oxydations et combustions, Éditions Technip, Paris, 1968, vol. I, p. 361.

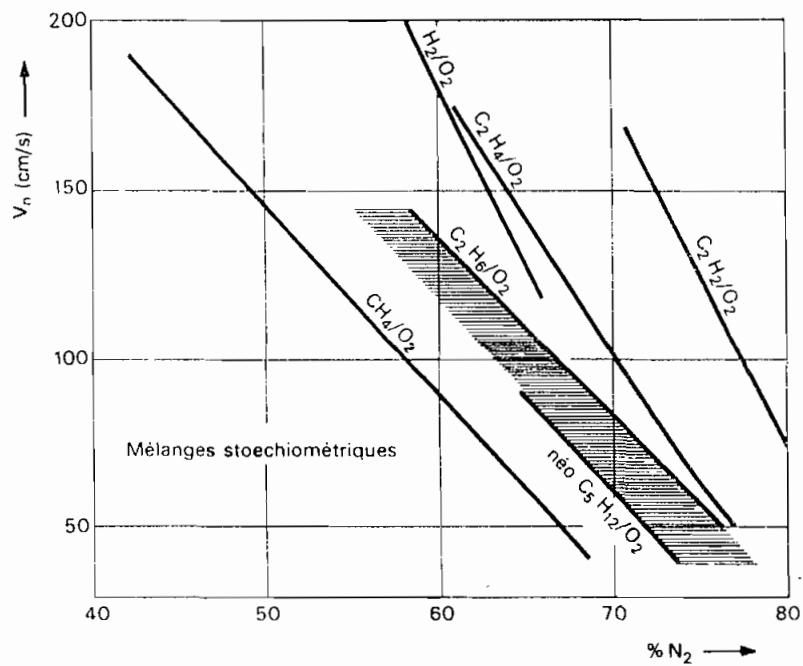


FIG. 9 Influence de la dilution sur la vitesse normale de propagation.
 La zone hachurée comprend les courbes relatives aux mélanges d'hydrocarbures lourds et d'oxygène.
 Références : voir Van Tiggelen (A.) et coll. - Oxydations et combustions, Éditions Technip, Paris, 1968, p. 356.

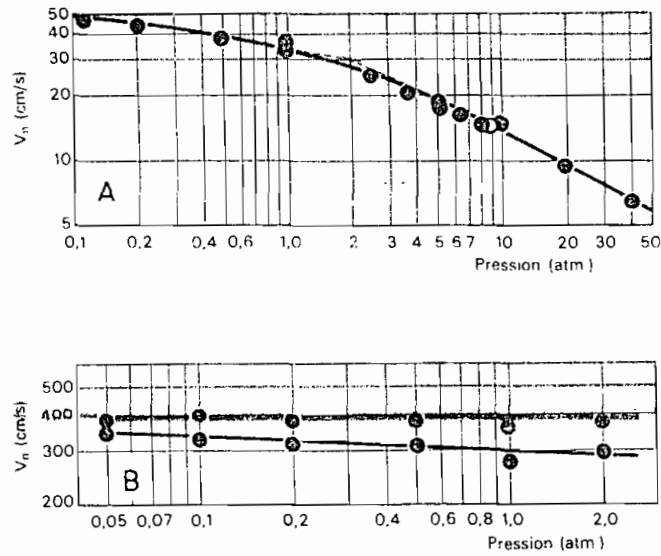


FIG. 10 Influence de la pression sur la vitesse normale de propagation.

Cas de $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ (ou air).

A : mélanges stœchiométriques de méthane et d'air :

B : courbe 1 : mélanges $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$;

courbe 2 : mélanges $\text{CH}_4 + 4\text{O}_2$;

Diedrichsen (J.) et Wolfhard (H. G.). - *Trans. Faraday Soc.*, 1956. 52, 1102.

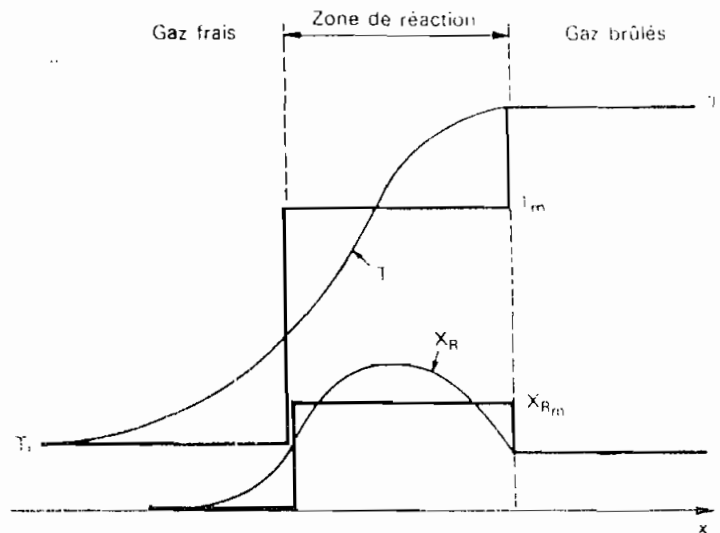


FIG. 11. Évolution de la température (T) et de la concentration des radicaux libres (X_R) à travers un front de flamme (x = sens de l'écoulement du mélange).

D'après Van Tiggelen (A) et coll - *Oxydations et combustions*, Editions Technip, Paris, 1968, vol. I, p. 478.

Certains additifs exercent un effet inhibiteur sensible. Par exemple quelques pour mille de plomb tétraéthyle ajoutés à un mélange stœchiométrique de hexane/air diminuent la vitesse normale de propagation d'environ 30%. La zone de combustion que constitue la flamme présente une structure non homogène. Le gradient de température est élevé. Le front de flamme est riche en radicaux libres.

Le phénomène de propagation s'explique par deux faits : les couches de gaz frais sont chauffées par conductivité thermique et les radicaux libres diffusent vers les gaz frais.

En faisant la simplification que le front de flamme est un volume réactionnel ayant une concentration en radicaux libres et une température moyenne homogènes et en ne considérant que l'effet de la conduction on peut avoir une expression de la vitesse de déflagration. Cette hypothèse de la flamme « réacteur homogène » donne des résultats proches des expérimentaux. Notons T_m la température moyenne, X_R la concentration moyenne en radicaux libres. (voir figure 11, page 51 et l'épaisseur de la zone de combustion (front),

, D coefficient de diffusion en radicaux libres,
 La vitesse de propagation est contrôlée par la
 vitesse de diffusion des radicaux libres à
 travers le front de flamme vers les gaz frais
 (hypothèse excluant la conduction thermique).

La diffusion d'un radical à travers la zone
 d'épaisseur e et la combustion d'un volume
 d'épaisseur e et de surface S ont lieu
 durant le même temps.

Le temps de combustion est :

$$t_r = e / V_n$$

La vitesse globale de combustion est égale à
 l'inverse du temps

$$V_c = V_p' \quad t_r = \frac{e}{V_n} = \frac{1}{V_c}$$

D est relié à t_r et à e par $D = e^2 / 2 \times t_r$
 Donc V_n est proportionnelle à : D/e .

Un nombre de radicaux quittent le front de
 flamme constamment par diffusion. Dans les
 phases de rupture en phase gazeuse la
 majorité de ces radicaux libres se recombinaient.
 La vitesse normale reste constante. Donc on
 est obligé d'admettre que la concentration

des radicaux libres reste constante dans le front de flamme durant la propagation. Il faut alors une compensation qui résulte des réactions de ramification.

Il faut que la probabilité totale de ramification diminuée de celle de rupture soit égale à l'unité. C'est la condition de stationarité de la flamme.

La probabilité de ramification est égale à la probabilité de ramification par collision multipliée par Z le nombre de collisions subies par le radical sur la trajectoire e . De la même manière on obtient la probabilité de rupture.

La probabilité de ramification par collision est le produit des probabilités suivantes :

- la capacité du radical à la ramification
(X_Y/X_R)
- son partenaire de collision doit être approprié (X_A)
- la réaction soit suffisamment énergétique
 $e^{-E_r/RT}$

Appelons σ le produit de ces trois probabilités. La probabilité de rupture par collision est égale au produit des probabilités partielles précédentes: soit $F_t \times X_R$.

On a alors la condition de stationarité :

$$Z (\delta - F_t \cdot X_R) = 1$$

Sur une trajectoire de longueur e , un radical subit

$$Z_2 = \frac{e}{\lambda} \times tr \quad \text{collisions}$$

La condition de stationarité devient :

$$\frac{e}{\lambda} (\delta - F_t \cdot X_R) \frac{e^2}{2.D} = 1$$

Avec les expressions précédentes et $tr = \frac{e}{V_n} = \frac{1}{V_c}$

on a une relation théorique pour la vitesse normale de propagation :

$$V_n = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot D (\delta - F_t \cdot X_R)}{\lambda}}$$

avec : la vitesse de ramification $V_r = \frac{e}{\lambda} \cdot \delta \cdot X_R$

la vitesse de rupture des chaînes

$$V_t = \frac{e}{\lambda} \cdot F_t \cdot X_R^2$$

on a :

$$V_n = \sqrt{\frac{2 \cdot D (V_r - V_t)}{X_R}}$$

Comme le montre l'expression de la vitesse normale de propagation il existe une relation directe entre la cinétique de la réaction et le phénomène physique de la propagation de la flamme. La mesure de la vitesse normale de déflagration nous donne des renseignements sur le mécanisme réactionnel de la combustion. Elle nous informe sur les processus fondamentaux comme le type de ramification et son énergie d'activation. Pour ces raisons on l'appelle parfois vitesse fondamentale de déflagration.

L'expression de la vitesse permet d'expliquer qualitativement les variations de la vitesse de déflagration en fonction des paramètres : richesse, dilution, température initiale. La vitesse de ramification dépend de la température moyenne t_m de la flamme par son énergie d'activation relativement élevée. Or t_m croît avec la température initiale et la température finale des produits de combustion. Donc les changements qui tendent à abaisser la température de la flamme entraînent nécessairement une diminution de la vitesse fondamentale de déflagration.

La température des produits de combustion T_f (donc la vitesse de déflagration) a un maximum aux environs de la stoechiométrie et diminue vers les mélanges pauvres et riches (figure n° 7 à 11).

La dilution par des gaz inertes abaisse la température de la flamme. Elle abaisse également la vitesse fondamentale. L'influence des fractions molaires du combustible et du comburant est modifiée car la dilution par les gaz inertes abaisse les fractions molaires.

Le préchauffage augmente la vitesse fondamentale

3.2. b) Déflagration en régime turbulent

Lorsque la vitesse d'écoulement d'un gaz dépasse une certaine valeur minimale, les forces de friction engendrent des tourbillons qui pénètrent dans tout le volume gazeux et transmettent le trouble. Ces tourbillons s'entrechoquent. La vitesse se trouve modifiée. Il apparaît des vitesses relatives entre les différents éléments du volume du fluide. Chaque élément a une vitesse fluctuante qui se superpose à la vitesse moyenne de l'écoulement. Ces fluctuations ne peuvent être décrites mathématiquement parce que complètement désordonnées. Dans certains cas il peut y avoir des turbulences très élevées donnant lieu à des fluctuations de pression et de densité.

La vitesse instantanée (V) d'un point du fluide est la somme de la vitesse moyenne d'écoulement (\bar{V}) constante dans le temps parce que imposée par le débit, et d'une fluctuation v pouvant prendre toutes les valeurs et directions possibles.

$$V = \bar{V} + v$$

Dans ces fluctuations, il y a une énergie qui est mise en jeu : c'est l'énergie turbulente. Elle est donnée par l'expression

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad \rho \text{ densité}$$

La vitesse de fluctuation sert à caractériser la turbulence. On utilise l'intensité de turbulence :

$$v' = \sqrt{\overline{v^2}}$$

(racine de la moyenne des carrés de la vitesse de fluctuation)

La vitesse moyenne \bar{v} est nulle dans les systèmes fermés (chambre de combustion des moteurs). Dans ce cas la turbulence est créée par les parties solides en mouvement (hélices, pistons, ...) par rapport aux gaz.

Théorie cinétique des gaz.

Une molécule entre en collision avec une autre après avoir parcouru une distance appelée libre parcours moyen (λ). Cette collision donne lieu à des échanges d'énergie. Dans un écoulement turbulent, le tourbillon (particule) subit des échanges énergétiques avec d'autres tourbillons après avoir couvert

une distance appelée échelle de temps.
La turbulence n'est ni homogène ni isotrope.
D'après l'intensité et la nature de la turbulence
les trois effets suivants peuvent se produire.
Pour une flamme laminaire soumise à un
champ turbulent : le front de flamme
s'épaissit ; se fripe et fluctue ; puis est
partiellement déchiqueté.

Les méthodes de mesure de la vitesse normale
de propagation par rapport au mélange frais
sont analogues à celles utilisées pour la
mesure de la vitesse fondamentale de la flamme
laminaire. Dans le cas de la turbulence la
direction normale est fixée par rapport au
front apparent.

La turbulence est favorable à une augmen-
tation de la vitesse normale de propagation.
Mais on sait aussi que des intensités très
élevées de turbulence peuvent conduire à
une extinction de la flamme. La turbulence
exerce une influence sur l'allumage de la flamme,
les limites d'inflammabilité et sur les conditions
extrinsèques de propagabilité. Elle influe sur
tous les phénomènes où diffusion de chaleur et
de masse joue un rôle important.

3.3. PROPAGATION SUPERSONIQUE

DE LA COMBUSTION OU DETONATION

Sous certaines conditions la déflagration peut s'accélérer et sa vitesse peut atteindre des valeurs supersoniques constantes de l'ordre de Mach 6 à 8. On parle alors de détonation. Comme dans le cas de la déflagration il existe des compositions limites de détonabilité. Ces limites ne coïncident pas nécessairement avec les limites d'inflammabilité. (figure n° 12

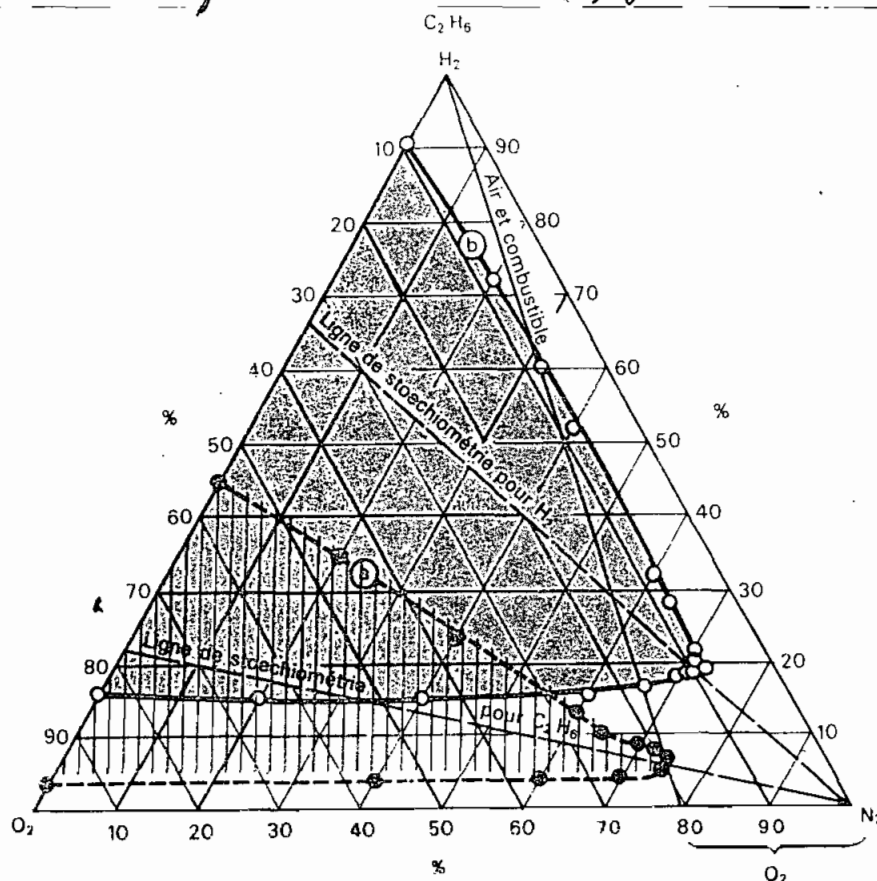


FIG. 12 Limites de détonabilité, mesurées dans un tube à détonations.

(a) $C_2H_6/O_2/N_2$ - (b) $H_2/O_2/N_2$.

D'après Schüller, cité par Wagner (H. G.). - Fundamental data obtained from Shocktube Experiments. Agardograph n° 41, Pergamon Press, Oxford, 1961, p. 320.

TABLEAU 5

COMPOSITIONS LIMITES DE DÉTONABILITÉ

Combustibles avec l'oxygène ou l'air (à pression et température initiales normales), exprimées en pourcent de volume de combustible dans le mélange total.

COMBUSTIBLE		COMBURANT			
		Air		Oxygène	
		Limite inférieure	Limite supérieure	Limite inférieure	Limite supérieure
H ₂	hydrogène	18,3	58,9	15	90
CO + H ₂	mélange équimolaire d'hydrogène et d'oxyde de carbone	19	58,7	17,2	91
NH ₃	ammoniac			25,4	75,4
C ₂ H ₂	acétylène	4,2	50	3,5 à 3,6	92 à 93
(C ₂ H ₅) ₂ O	éther éthylique	2,8	4,5	2,6 à 2,7	40

D'après LAFFITTE (P.). — *Sci. Petroleum*, 1938, 4, 2995.

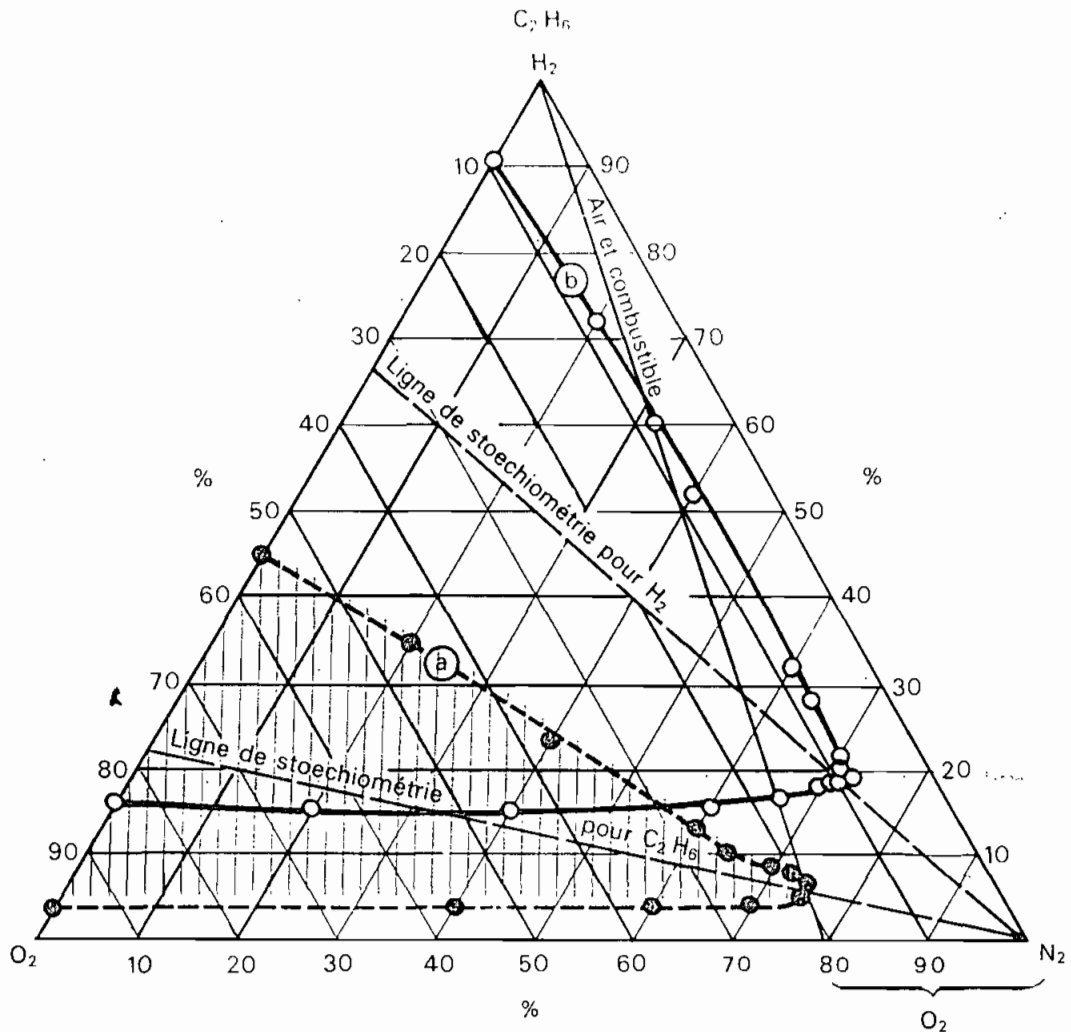


FIG. 12 Limites de détonabilité, mesurées dans un tube à détonations.

(a) C₂H₆/O₂/N₂ — (b) H₂/O₂/N₂.

D'après Schüller, cité par Wagner (H. G.). — *Fundamental data obtained from Shocktube Experiments*. Agardograph n° 41, Pergamon Press, Oxford, 1961, p. 320.

3.3. a/ la détonation stable en phase gazeuse

On a longtemps considéré la détonation en phase gazeuse comme une auto-inflammation en « bloc » du mélange. Plus tard les recherches de Mallard, Le Chatelier, Chapman, Jouguet, Von Neumann, Doering, Zeldovitch ont abouti à la théorie aérodynamique de la détonation.

Cette théorie définit la détonation comme étant une auto-inflammation continuellement engendrée derrière une onde de choc plane (elle même entretenue par l'énergie dégagée par la combustion) et se déplaçant avec la vitesse supersonique de cette dernière.

Les dernières recherches ont montré que la détonation possède des effets tridimensionnels très compliqués (ondes de choc obliques, collisions d'ondes de choc, phénomènes vibratoires...). Ceci ne fait pas pour autant perdre sa valeur à la théorie de l'onde de détonation plane. Car ses principes de calcul restent toujours valables.

Soit une onde de détonation plane se propageant de gauche à droite dans un conduit cylindrique. (Figure n° 13)

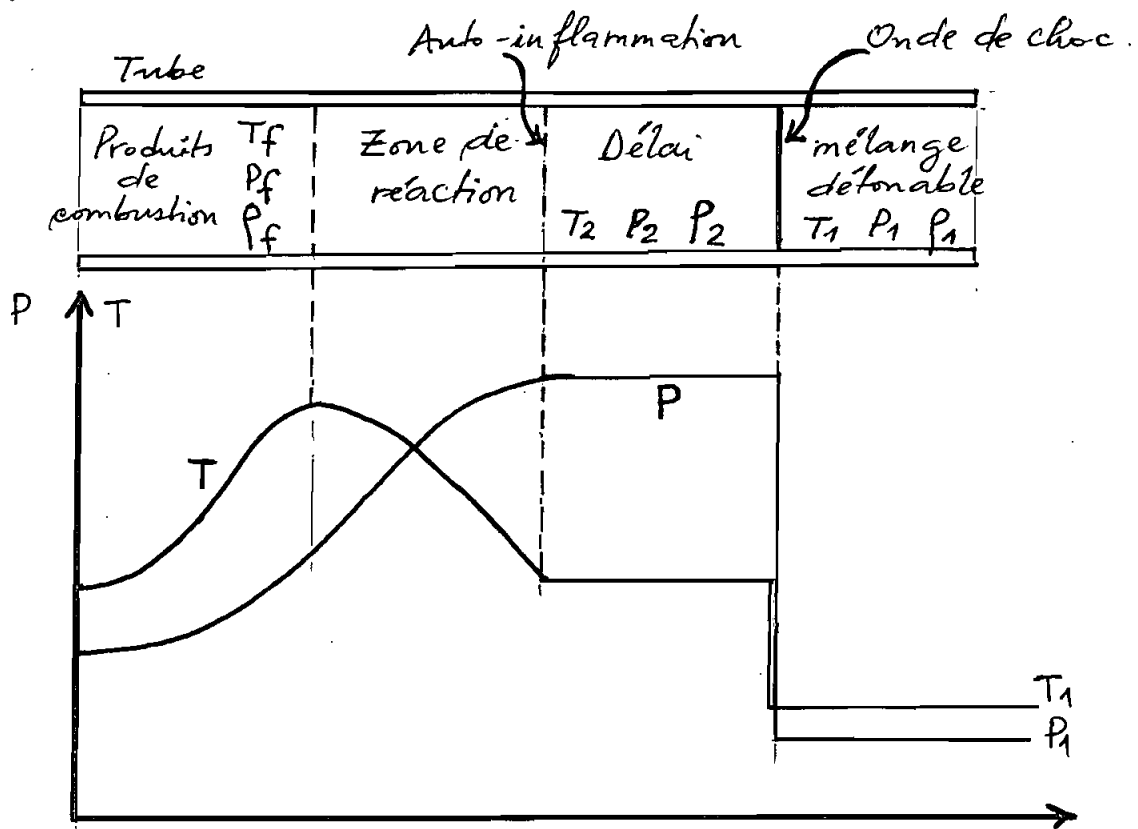


figure n° 13.

Vue schématique des profils de température et de pression.

Le mélange détonable a les conditions initiales: T_1, P_1, ρ_1, V_1 (nulle par rapport aux parois du tube, mais non nulle par rapport à l'onde de détonation qui s'approche du mélange).

V_1 est en valeur absolue, égale à la vitesse de propagation de la détonation (V_d). [V_d est définie comme la vitesse normale de la détonation par

rapport au mélange] $V_d = -V_1$

Le mélange est d'abord porté à T_2 avec V_2 par rapport à l'onde de choc, ρ_2 . Après un bref délai d'auto-inflammation, le mélange explose. Les réactifs sont transformés en produits de combustion en un temps très court. La réaction est très exothermique et les produits de combustion se trouvent dans un état aux paramètres : T_f , P_f , ρ_f , V_f .

Désignons par H_1 , H_2 les chaleurs sensibles par unité de masse dans les états 1 et 2 ; m le flux massique par unité de surface à travers l'onde de choc. Les équations de continuité donnent :

$$\text{Conservation de masse: } m + \rho_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot V_2$$

$$\text{Conservation de la quantité de mouvement: } P_1 + \rho_1 \cdot V_1^2 = P_2 + \rho_2 \cdot V_2^2$$

$$\text{Conservation de l'énergie: } H_1 + \frac{V_1^2}{2} = H_2 + \frac{V_2^2}{2}$$

Ces trois équations combinées donnent une relation caractéristique de l'onde de choc. La courbe représentative est le lieu géométrique des états P_2, ρ_2 pouvant être obtenus par une onde de choc à partir d'un état P_1, ρ_1 donné.

Cette courbe s'appelle courbe de Hugoniot des réactifs. Son expression est :

$$H_2 - H_1 = \frac{1}{2} (p_2 - p_1) \left(\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_1} \right)$$

La loi des gaz parfaits $p = \rho R T / M$ (M poids moléculaire moyen) permet de déterminer la température T en fonction de laquelle on lit les valeurs des enthalpies dans des tables thermodynamiques.

Les équations de la conservation de masse et de la conservation de la quantité de mouvement donnent :

$$\dot{m}^2 = \frac{p_2 - p_1}{1/\rho_1 - 1/\rho_2}$$

C'est la pente d'une droite passant par l'état p_1, ρ_1 et un des points p_2, ρ_2 . C'est la droite de Rayleigh. La pente permet de déterminer les vitesses que doivent avoir les ondes de choc pour amener le mélange dans un état 2 déterminé. En effet l'équation de la droite de Rayleigh et celle de la conservation de masse donnent :

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_1} \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{1/\rho_1 - 1/\rho_2}}$$

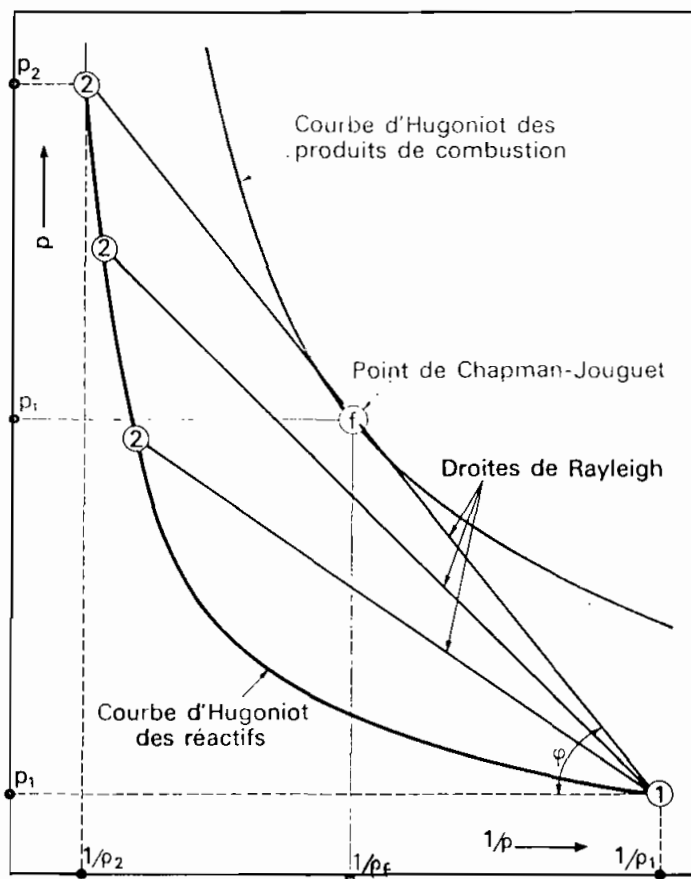


FIG. 14 Évolution de la pression et de la masse volumique dans une onde de détonation plane.

(1) : état initial ; (2) : état du mélange derrière l'onde de choc ; (f) : état Chapman-Jouguet. Les droites sont des droites de Rayleigh.

Avec l'évolution du phénomène, l'état 2 se convertit progressivement en un état f caractérisé par une combustion complète des réactifs qui atteignent l'équilibre thermodynamique.

Les trois équations de continuité entre les états 1 et f donnent :

$$\dot{m} = \rho_1 \cdot v_1 = \rho_f \cdot v_f$$

$$P_1 + \rho_1 \cdot v_1^2 = P_f + \rho_f \cdot v_f^2$$

$$Q + H_1 + \frac{v_1^2}{2} = H_f + \frac{v_f^2}{2}$$

Q étant la chaleur de combustion définie par unité de masse à la température T_1 .

Ces trois équations donnent l'équation de la courbe de Hugoniot des produits de combustion :

$$H_f - H_1 - Q = \frac{1}{2} (P_f - P_1) \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_1} \right)$$

De même les équations de la Conservation de masse et de celle de la quantité de mouvement donnent la droite de Rayleigh :

$$\dot{m}^2 = \frac{P_f - P_1}{1/\rho_1 - 1/\rho_2}$$

L'équation de la droite de Rayleigh et celle de la conservation de la masse donnent la vitesse V_1 que l'onde doit avoir pour amener le mélange détonable à l'état f à partir d'un état 1 donné :

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1} = \frac{1}{\rho_1} \sqrt{\frac{P_f - P_1}{1/\rho_1 - 1/\rho_f}}$$

La stabilité de l'onde de détonation est obtenue lorsque l'onde ne se sépare pas de la zone réactionnelle au cours du temps. Il faut donc que les états possibles 2 et f se déplacent à la même vitesse. En d'autres termes il faut que les états 2 et f soient sur la même droite de Rayleigh.

Chapman et Jouguet, puis Doering, Von Neumann et Zeldovitch ont démontré que cette droite de Rayleigh doit être de plus en plus tangente à la courbe de Hugoniot des produits. Elle est unique. Disposant de la courbe de Hugoniot des produits il suffit de tracer sa tangente à partir du point $(P_1, 1/\rho_1)$. Le point de tangence fixe le seul état f désigné sous le nom de « point de Chapman-Jouguet ». Cette courbe permet le calcul de la vitesse de détonation et la détermination de l'état 2.

3.3. b) Transition de la déflagration à la détonation

Dans certaines conditions de confinement bien déterminées la vitesse de déflagration s'accélère pour aboutir à l'établissement de la détonation. Ceci demande un temps qui est caractéristique de la nature du mélange. Il dépend de la température et de la pression initiales du mélange, des facteurs géométriques comme le diamètre du tube de détonation.

L'intervalle de temps est appelé période d'induction ou de transition à la détonation.

A la période de transition correspond une distance appelée distance d'induction ou de prédétonation.

L'énergie d'allumage influence la valeur de ces période et distance d'induction. Avec une énergie importante on peut supprimer presque entièrement la période de prédétonation.

L'accélération de la déflagration pendant la période de transition s'explique par la création d'onde de pression sous l'effet de l'expansion des produits de combustion derrière le front de flamme.

L'obtention de la détonation nécessite l'empêchement de l'évacuation des produits de combustion que la déflagration laisse derrière elle. L'expansion thermique de ces produits agit sur la flamme comme un piston. Donc lorsque le front de flamme s'accélère il envoie des ondes de pression dans le mélange inflammable. Ces ondes progressent avec une vitesse égale ou légèrement supérieure à la vitesse du son. Elles élèvent la température du mélange du mélange devant la flamme et il s'ensuit une nouvelle accélération de cette dernière. Il se crée une nouvelle onde de pression avec une vitesse supérieure à la précédente. Le phénomène se répète jusqu'à ce que ces ondes de pression deviennent de plus en plus fortes et prennent l'aspect de véritables ondes de choc avec des vitesses supersoniques de plus en plus intenses.

* Le front de flamme peut s'accélérer et rattraper l'onde de choc devenue suffisamment puissante pour établir une détonation. La puissance de l'onde de choc suppose une vitesse compatible avec l'hypothèse de Chapman - Jouguet.

* Une auto-inflammation peut se déclencher entre l'onde de choc et le front de flamme. La zone de réaction et l'onde de choc sont ainsi rapprochées.

Dans les deux cas l'onde de choc et la zone de réaction sont couplées et la détonation est réalisée.

Durant la transition la turbulence créée par la friction des gaz mis en vitesse par le système d'ondes contre la paroi semble favoriser la détonation. L'influence des parois peut atténuer la vitesse de détonation par des effets de non-adiabaticité et de friction. La rugosité des parois diminue sensiblement la distance d'induction de détonation.

Composition du mélange détonable (moles)	Diamètre du tube (mm)	Distance de prédétonation (cm)
$C_2H_2 + 3O_2$	6	48
	16	52
	24	58
	43	105
$H_2 + 0,5O_2$	25	70
$C_2H_2 + 2,5O_2 + 4N_2$	15,9	52
$C_2H_2 + 9O_2$	9	50
$C_2H_2 + 5O_2$	9	5
$C_2H_2 + 1O_2$	9	3

Distance de prédétonation. (Conditions initiales normales)
Tableau n° 6.

3.3.01 Détonation en phase condensée

Suivant les conditions les mélanges appelés dans ce cas explosifs peuvent déflagrer ou détoner. La quantité et la forme de la masse explosive, le mode de confinement et la méthode d'ignition jouent un grand rôle dans la détonabilité des explosifs.

La détonation ne se produit qu'au delà d'une masse appelée masse critique variable d'un explosif à l'autre. Les explosifs ayant une faible masse critique sont appelés explosifs primaires et sont utilisés pour déclencher la détonation dans les autres appelés explosifs secondaires.

Les produits de réaction des détonations en phase condensée dépendent de la composition des explosifs et sont généralement gazeux (CO , CO_2 , H_2O , N_2). Les pressions très élevées mises en oeuvre font que certains produits peuvent être sous forme solide.

Généralement la vitesse de détonation dans les solides augmente avec la masse volumique, le diamètre de la charge (explosif sous forme cylindrique) et la résistance mécanique de l'enveloppe.

TABLEAU 7.

VITESSE DE DÉTONATION, PRESSIONS ET TEMPÉRATURES A L'ÉTAT CHAPMAN-JOUGUET
(CALCULÉES)

EXPLOSIF	VITESSE DE DÉTONATION (m/s)		VALEURS A L'ÉTAT CHAPMAN-JOUGUET		MASSE VOLUMIQUE DE L'EXPLOSIF (g/cm ³)
	Théorique	Mesurée	T _J (°K)	p _J (t/cm ²)	
Dynamite (75 % trinitro- glycérine + 25 % Kiesel- guhr)	7 220	6 950	5 520	139	1,55
Trinitroglycérine	8 060	7 500	5 640	199	1,60
Dinitrite de glycol	7 630	8 000	5 730	174	1,50
Tétranitrométhane	7 740	—	3 000	147	1,643
Nitrate de méthyle	6 640	6 400	5 200	117,2	1,21
Trinitrotoluène	6 480	6 700	3 870	110	1,50
Trinitrophénol	6 900	6 900	4 400	127	1,50

D'après TAYLOR (J.). — Detonation in Condensed Explosives. Clarendon Press, Oxford, 1952.

Chapitre 4

BRULEURS ET
PHENOMENES

4.1. BRULEURS A COMBUSTIBLES

La fonction d'un brûleur est d'admettre le combustible et le comburant en quantités convenables dans un foyer, d'assurer leur mélange et de maintenir la stabilité de la combustion qui a été amorcée par un moyen externe.

4.1. a) Brûleurs à gaz

Le brûleur contient un injecteur amenant le gaz sous pression, une amenée d'air et la sortie ou tête percée d'orifices en nombre variable. Par homologie avec les flammes, on peut distinguer brûleurs à flamme de diffusion et brûleurs à prémélange. (voir figure n° 15)
Les jets de gaz (combustible) et de comburant peuvent être convergents ou parallèles (figure n° 16)

La géométrie des flammes est fortement affectée par la forme de l'orifice de sortie du combustible, la nature du régime d'écoulement et par l'angle formé par les directions respectives des jets gazeux.

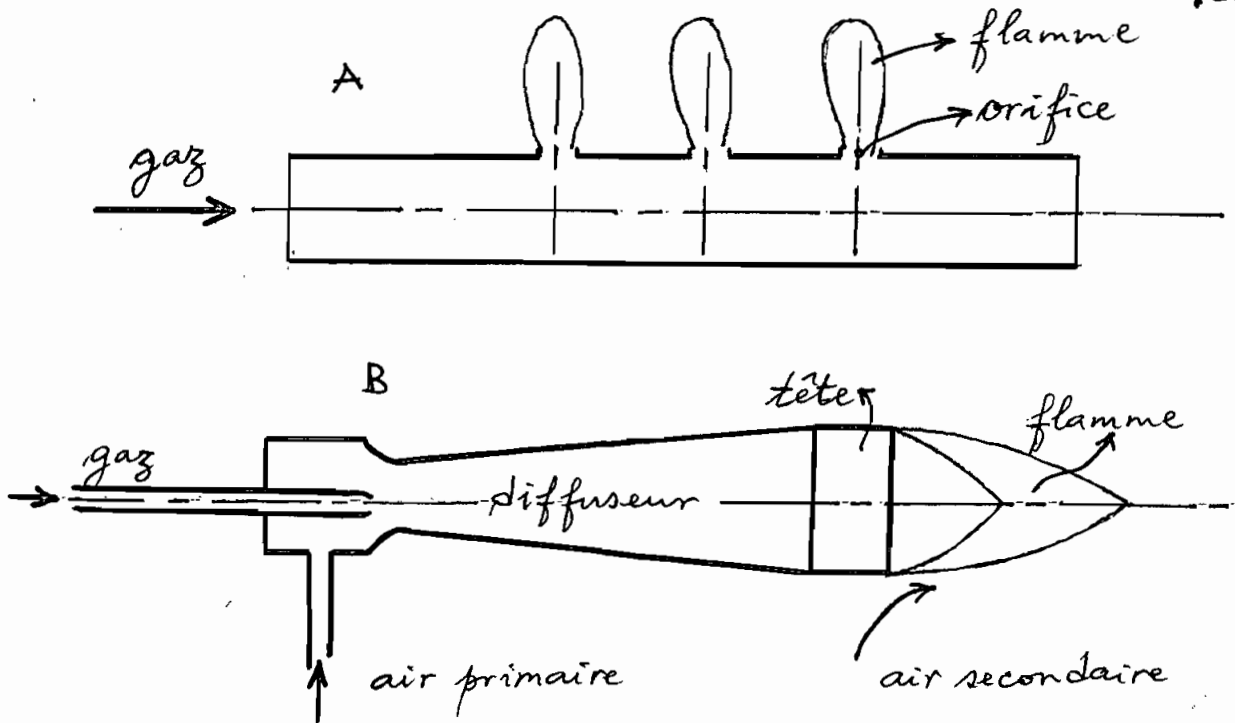


figure n°15. A Brûleur à gaz à flamme de diffusion.
 B Brûleur à gaz à prémélange.

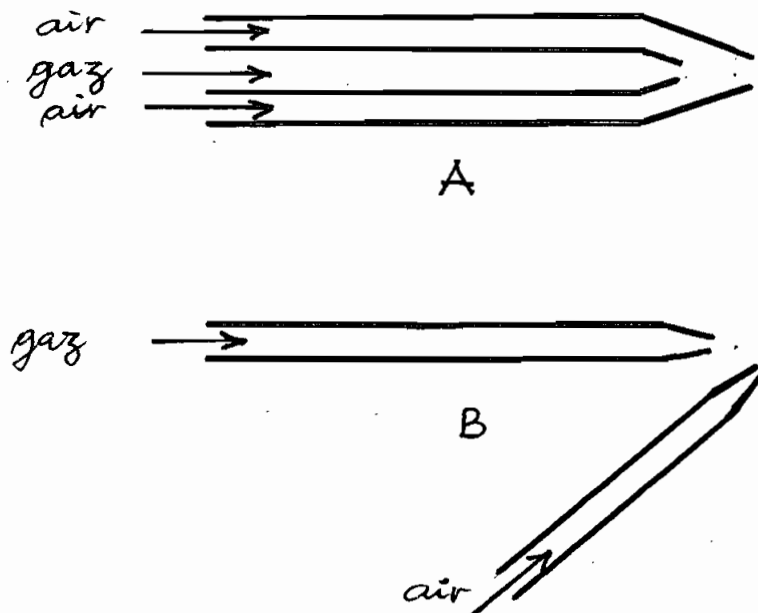


figure n°16. Brûleurs à flamme de diffusion
 A. jets parallèles B. jets convergents.

Le déroulement de la combustion est influencé par le phénomène de recirculation des produits de la combustion.

Plus la poussée de réaction du jet de gaz est grande, plus la combustion est rapide et plus la température maximale de la flamme est élevée.

Le préchauffage du comburant (air) accélère le craquage du combustible dans la flamme et entraîne une augmentation de la température de la flamme.

4.1. b) Brûleurs à fuel

Dans ces brûleurs il est nécessaire de pulvériser le fuel. La pulvérisation a pour objet de diviser le combustible liquide en particules extrêmement fines assurant un meilleur contact avec l'oxygène comburant.

La pulvérisation permet une classification des brûleurs à fuel.

Brûleurs à pulvérisation mécanique

La pulvérisation mécanique est basée sur la détente brutale du fuel-œil préalablement mis sous pression et en rotation rapide. (voir figure n° 17)

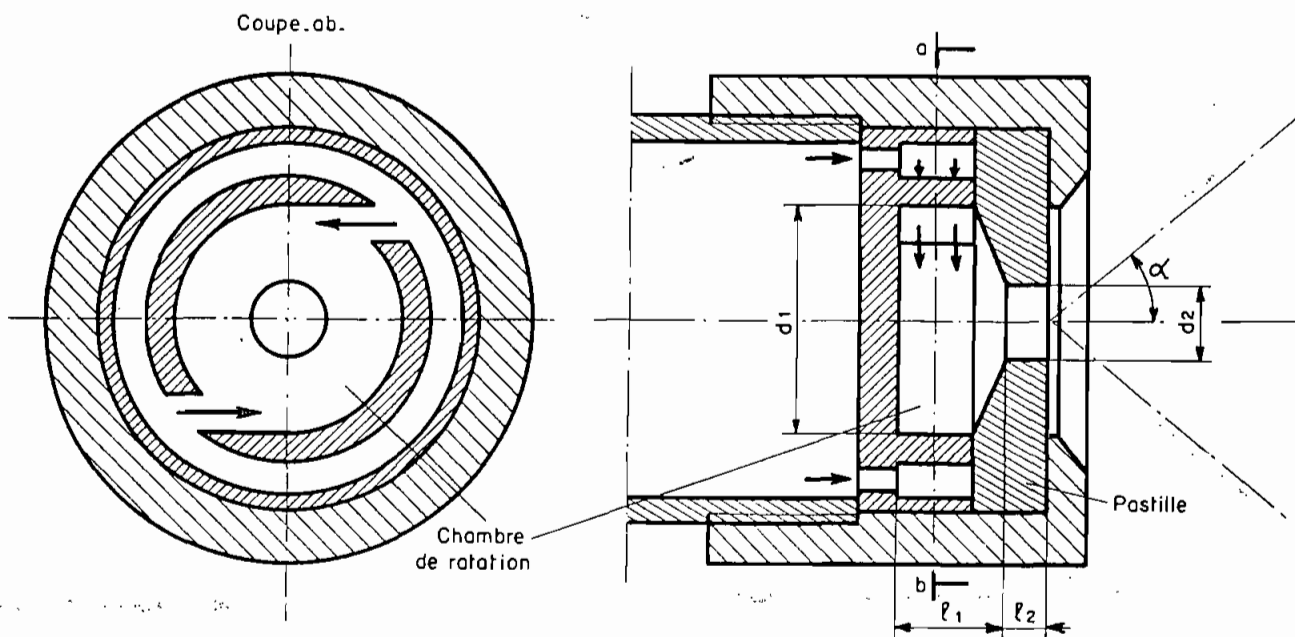


FIGURE 17 - BRULEUR A PULVERISATION MECANIQUE

La pulvérisation mécanique s'obtient aussi grâce à l'énergie du combustible lorsqu'il est chassé à travers une tuyère (figure n° 18.A) ou par suite de la rotation de certains éléments du brûleur. (figure n° 18.C)

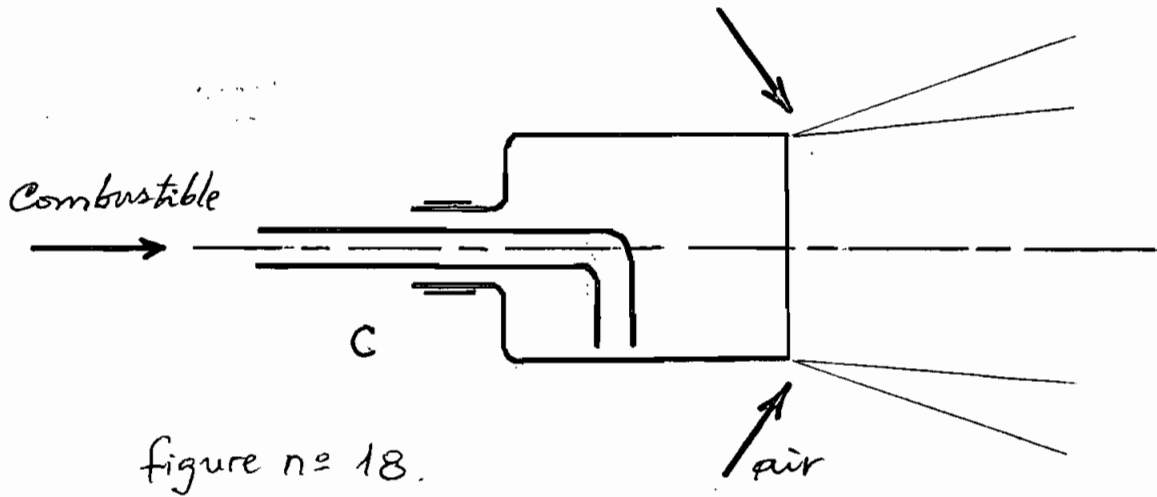
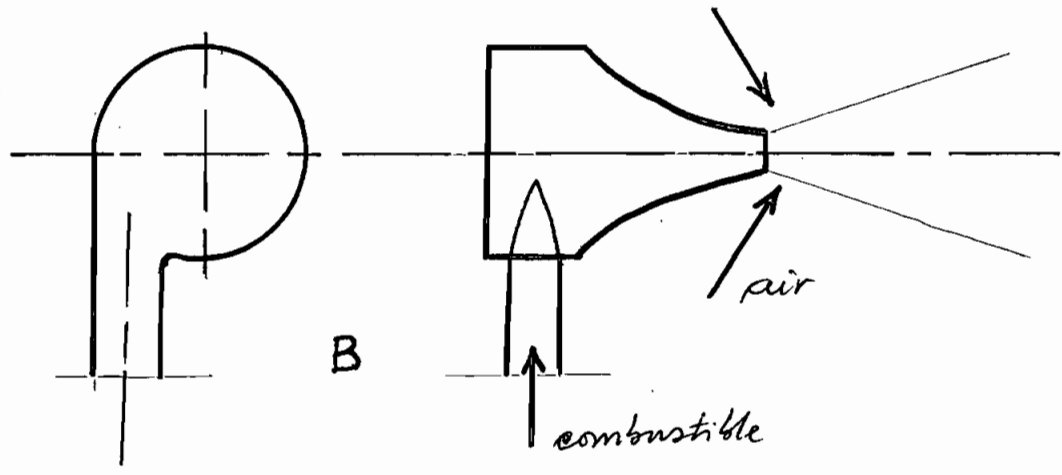
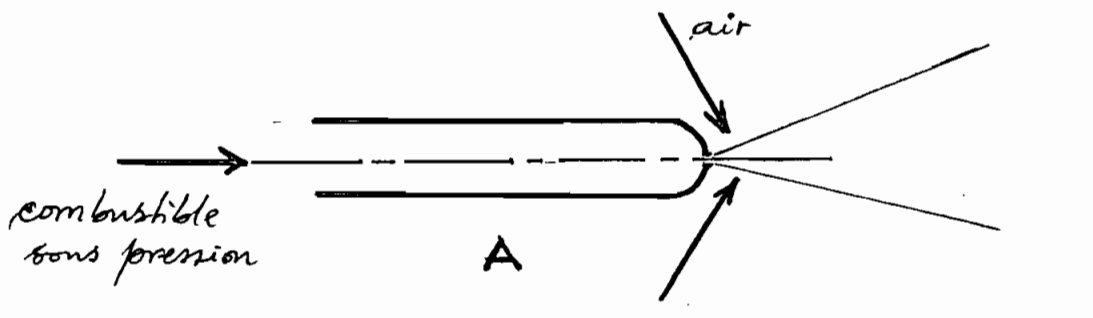


figure n° 18.

Une nappe conique se forme au nez du brûleur et se désagrège rapidement par amincissement et frottement sur l'air de combustion injecté autour du brûleur. Les brûleurs à pulvérisation sont utilisés pour avoir de très grands débits. Le fuel oil doit être filtré avant la pulvérisation.

Brûleurs à pulvérisation par air

Dans ces brûleurs la pulvérisation est obtenue grâce à l'énergie du pulvérisateur (l'air) qui se déplace à une grande vitesse. A travers le brûleur passent approximativement 10% de la quantité d'air nécessaire à la combustion. La quantité restante est envoyée dans la chambre de combustion pour achever la pulvérisation.

(voir figure 19)

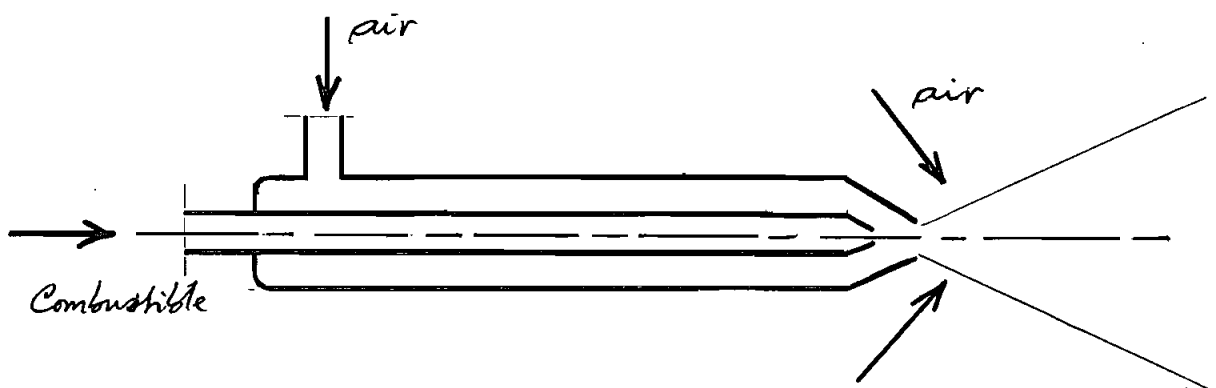


figure n° 19

Brûleur à pulvérisation par air.

Brûleurs à pulvérisation par vapeur

Le principe de ces brûleur est le même que celui des brûleurs à pulvérisation par air. La vapeur est utilisée comme milieu pulvérisateur. On utilise approximativement 5% de la quantité de vapeur produite par le générateur de vapeur. Ces brûleurs permettent une bonne qualité de pulvérisation.

Ils consomment beaucoup de vapeur. L'injection dans la chambre de combustion de la vapeur de pulvérisation augmente la quantité de vapeur dans les produits de combustion. Ceci accroît les risques de corrosion par formation d'acide. Il y a aussi perte de rendement avec les fumées renvoyées. Leur fonctionnement s'accompagne d'un bruit élevé.

Comparaison entre les brûleurs à pulvérisation mécanique et ceux avec un milieu pulvérisateur

Les brûleurs à pulvérisation mécanique exigent un fin nettoyage du fuel, donnent une pulvérisation de moindre qualité, ne permettent pas une variation de débit sur une plage assez large (80 à 100% contre 20 à 100% pour les brûleurs avec milieu pulvérisateur [air, vapeur]).

Comme avantages les brûleurs à pulvérisation mécanique ne consomment pas beaucoup d'énergie, ils ne font pas beaucoup de bruit, ne provoquent pas d'augmentation dans les produits de combustion et donnent une flamme relativement plus courte.

4.1.c) Brûleurs combinés

Pour éliminer l'inconvénient principal des brûleurs à pulvérisation mécanique on utilise les effets combinés : mécanique et milieu pulvérisateur, permettant un fonctionnement économique avec une plage assez large de variation de débit. Malgré la complexité dans leur fabrication ces brûleurs trouvent aujourd'hui une grande utilisation.

Il existe aussi des brûleurs combinés au point de vue combustibles. Ils peuvent être utilisés pour les combustibles gazeux ou liquides ou les deux simultanément.

4.2. PHENOMENES FONDAMENTAUX

La vitesse de déflagration dans un mélange réactif est maximum pour un mélange légèrement plus riche en combustible ; elle est plus grande si le mélange réactif contient l'oxygène pur au lieu de l'air. Elle augmente si le mélange est préchauffé suivant la relation :

$$V_n(T) = V_n(298) \cdot \left(\frac{T}{298} \right)^\alpha$$

$$\text{ou } \alpha \simeq 1,74$$

4.2. a) Structure de la flamme

Lorsque le mélange gaz combustible-air (appelé air primaire) est injecté par un injecteur pour le brûleur on obtient la flamme aérée. Elle est composée d'un cône bleu au centre, le panache entourant le cône bleu, la zone de diffusion de l'air ambiant et la zone des produits de combustion. (voir figure n° 20

Lorsque le combustible est injecté sans mélange préalable et brûlé dans l'air fourni à la sortie on obtient la flamme de diffusion (voir figure n° 20

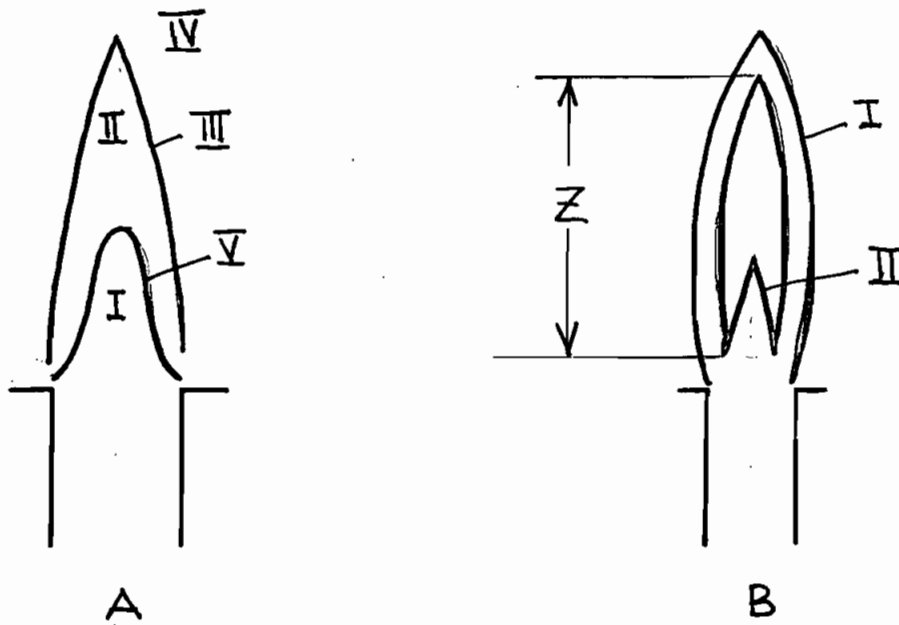


figure n°20 Structure de la flamme

- A - flamme aérée I cône bleu II panache
 III zone de diffusion IV zone de produits
 de combustion V front de flamme
- B - flamme de diffusion I manteau bleu
 II zone génératrice de particules de carbone
 Z zone éclairante.

Si l'on diminue le taux d'aération primaire d'un brûleur à mélange préalable, on voit apparaître une pointe jaune au sommet du cône bleu. Si l'on continue à diminuer le taux d'aération primaire la tache jaune grandit et à la limite, la flamme devient flamme de diffusion. On définit l'indice pointe jaune comme le taux d'aération primaire

correspondant à la transition entre la flamme aérée et la flamme de diffusion. L'indice pointe jaune varie en fonction du diamètre des orifices de sortie et du débit de gaz.

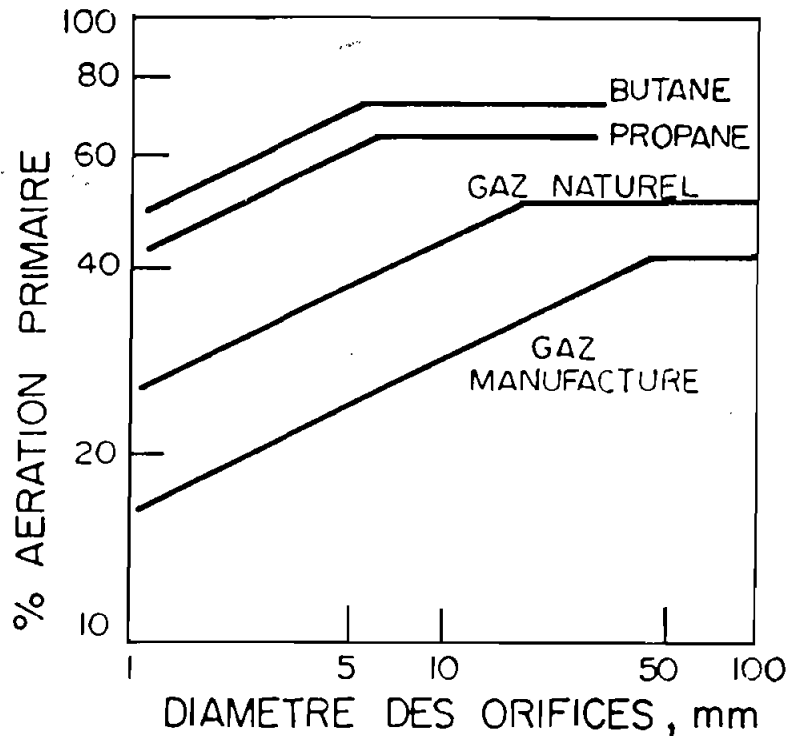


figure n°21.

4.2.6/ Phénomènes fondamentaux

* Lorsqu'on augmente la pression du gaz d'une flamme aérée on augmente sa vitesse de sortie. Une partie de la base de la flamme s'éloigne de l'orifice du brûleur : c'est le décollement de la flamme. A une valeur plus élevée de la pression

la flamme oscille dans l'espace à une certaine distance de l'orifice : c'est la flamme aérienne.

* Si on augmente encore la vitesse de sortie la flamme s'éloigne du brûleur et elle est soufflée (elle s'éteint) puisqu'elle n'a plus de position d'équilibre au dessus du brûleur. Le soufflage de la flamme définit la vitesse de soufflage et la pression qui le provoque est la pression de soufflage.

* Avant le soufflage si on diminue la pression la flamme recolle. C'est le recollement de la flamme.

* Si l'on continue à diminuer la pression du gaz, dépendamment du diamètre des orifices, la flamme peut pénétrer brusquement dans le brûleur : C'est le retour de flamme définissant la vitesse critique et la pression de retour de flamme. Le retour de flamme est impossible dans le cas des flammes de diffusion.

Ces différents phénomènes varient en fonction du diamètre des orifices, de la vitesse d'écoulement du gaz, de la composition du mélange.

4.3. CONDITIONS THEORIQUES D'UNE

BONNE COMBUSTION

La combustion d'un combustible industriel, solide, liquide ou gazeux n'est pas spontanée par le seul fait de sa mise en contact avec l'oxygène de l'air. C'est heureux, car s'il en était autrement nous ne disposerions pas de ces combustibles dans la nature.

4.3.0°/ Température d'inflammation

Pour avoir la combustion il faut amener le combustible à une température suffisante pour obtenir son inflammation.

Avec un combustible solide comme la houille, l'échauffement entraîne la perte d'humidité puis la distillation des matières volatiles. La température d'inflammation se situe vers 500°C . Avec un combustible liquide l'échauffement entraîne un dégagement de vapeurs, plus faciles à enflamer. Cette inflammation se situe entre 100 et 160°C pour un fuel-pil lourd.

Pour les gaz naturels à prédominance en méthane la température d'inflammation est de l'ordre de 700 à 800°C . Pour les gaz de hauts fourneaux à forte teneur en oxyde de carbone cette température est de 600 à 700°C environ.

La température d'inflammation sera atteinte localement, à l'entrée du combustible dans la chambre de combustion à l'aide d'une source auxiliaire de chaleur. Cette source de chaleur est réalisée le plus souvent par une torche d'allumage fonctionnant avec un combustible possédant une température d'inflammation assez basse.

4.3. b/ Pulvérisation

Combustibles solides

Durant le chauffage d'un morceau de charbon pour atteindre sa température d'inflammation, on observe: - la phase séchage - la phase distillation avec combustion des matières volatiles dégagées - la combustion du carbone.

Cette dernière combustion se fait à la périphérie du morceau considéré avec formation de coke.

L'enveloppe plus ou moins poreuse fera obstacle à la pénétration de l'oxygène comburant et à l'échauffement. Or ces deux conditions sont nécessaires pour la continuation de la combustion des éléments actifs situés à l'intérieur du morceau. Donc l'opération sera plus facile et plus rapide si le morceau de charbon est finement divisé en grains. La pulvérisation du charbon consiste en sa réduction en petites particules. Elle permet aussi un transport plus facile du combustible. Le tableau suivant donne les températures d'inflammation en °C de quelques charbons en fonction de la finesse de leur pulvérisation.

Tableau. n° 8.

TEMPERATURE D'INFLAMMATION DES CHARBONS EN FONCTION DE LA FINESSE DE PULVERISATION

Nature du combustible	Finesse du charbon pulvérisé			
	passant au tamis	passant aux tamis compris entre	passant aux tamis compris entre	passant aux tamis compris entre
	N° 230 ASTM N° 20 AFNOR	250 & 170 ASTM 20 & 22 AFNOR	200 & 170 ASTM 21 & 22 AFNOR	170 & 70 ASTM 22 & 27 AFNOR
	°C	°C	°C	°C
Charbon anthraciteux	210 - 220	480 - 490	550	-
Charbon maigre	193 - 198	430 - 438	515 - 525	-
Charbon gras	190 - 195	410 - 420	510 - 520	-
Charbon à gaz	170 - 180	390 - 395	475 - 485	610 - 615
Charbon flambant à gaz	170 - 175	340 - 350	460 - 470	590

On se rend aisément compte de l'influence prépondérante de la finesse sur la température d'allumage.

Combustibles liquides

La combustion est conditionnée par la pulvérisation sous forme de fines gouttelettes. Cette pulvérisation est obtenue grâce à un réchauffage préalable du combustible, qui facilite ainsi en même temps l'obtention plus facile de la température d'inflammation.

4.3. c) Turbulence

La production de fumées durant la combustion peut conduire à l'étouffement de la flamme. Les gaz inertes produits par la combustion (CO_2 , H_2O) ou provenant du combustible lui-même (H_2O , CO_2 et azote) et l'azote du comburant vont réaliser une ambiance empêchant l'oxygène de l'air d'atteindre les particules chaudes du combustible pour permettre leur combustion.

Dans un foyer industriel, pour obtenir une combustion plus parfaite, il faut donner au combustible et à l'air comburant un fort mouvement de turbulence permettant un meilleur contact des particules de combustibles avec l'oxygène.

4.3.d° Excès d'air

Pour être sûr d'obtenir une combustion la plus complète possible, il s'avère nécessaire de fournir au combustible un complément d'air en plus de celui qui lui est pratiquement nécessaire. C'est l'excès d'air. Le coefficient d'excès d'air est le rapport entre le volume d'air réel envoyé dans la chambre de combustion et le volume d'air nécessaire pour la combustion neutre du combustible. Cet excès d'air doit être optimum.

4.3.e° Température de combustion

Les températures produites par la combustion sont assez élevées pour permettre la continuité de la combustion sans qu'il soit nécessaire de maintenir la source de chaleur qui a été nécessaire pour son amorçage (température d'inflammation).

Mais dans les marches à régime réduit, il peut s'avérer nécessaire de mettre en service une source auxiliaire de chaleur pour éviter l'extinction partielle de la flamme : c'est l'opération de soutien de la flamme.

4.3. f°/ Température de l'air comburant

L'air comburant doit être préalablement réchauffé en utilisant la chaleur résiduelle des gaz de combustion. Ceci permet de satisfaire simultanément :

- l'amélioration du rendement thermique (moins de refroidissement de la chambre de combustion et récupération de la chaleur des gaz produits),
- l'inflammation du combustible, une introduction d'air froid risque à certains régimes (élevés), d'abaisser la température ambiante à une valeur inférieure à la température d'inflammation.

Les conditions d'une bonne combustion sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau n° 9. Conditions théoriques d'une bonne combustion

CONDITIONS	COMBUSTIBLE	COMBURANT
Température d'inflammation	Torche d'allumage	
Division du combustible en fines particules	Pulvérisation des combustibles solides et liquides	
Mélange intime combustible-comburant	Turbulence	Turbulence et injection dans la masse du combustible
Combustion complète du combustible		Excès d'air
Maintien de la combustion	Température de combustion - Soutien	
Température air comburant		Réchauffage

Chapitre 5

OPTIMISATION DE LA
COMBUSTION

5.1. FACTEURS DETERMINANTS

On désire dans les applications industrielles une flamme bien ancrée en un endroit déterminée et on envoie le mélange inflammable à travers elle.

Dans la théorie du gradient de vitesse à la périphérie de l'écoulement gazeux on considère que la stabilité du front de flamme est fonction :

- du champ des vitesses locales d'écoulement à la base du front de flamme
- des effets de paroi
- de l'atmosphère environnant la flamme.

5.1.01 Gradient de vitesse à la limite de l'écoulement gazeux

Pour un jet gazeux en régime laminaire dans un tube de rayon R la vitesse locale u du fluide en chaque point du plan de la section de sortie est :

$$u = 2 U_m \left(1 - \frac{x^2}{R^2} \right)$$

où U_m est la vitesse de débit

x la distance d'un point quelconque du plan à l'axe du tube.

Le gradient de vitesse est alors :

$$g = \frac{du}{dx} = -4 \frac{U_m \cdot x}{R^2}$$

Il peut être exprimé en fonction du débit volumétrique :

$$g = \pm \frac{4 Q_v}{\pi R^3}$$

avec à la limite de l'écoulement $g = \pm \frac{4U_m}{R}$

Le gradient de vitesse est utilisé pour repérer la stabilité des flammes en régime laminaire. Ce concept peut être étendu à d'autres types d'écoulement (géométrie de la conduite, régime turbulent).

Dans un écoulement quelconque, il existe au voisinage de la paroi, une zone de faible épaisseur dans laquelle la vitesse locale u du fluide varie très rapidement. Pour un tube de rayon R et de longueur dl la résistance des forces de viscosité dans cette zone a pour expression :

$$dF = g \cdot \eta \cdot 2\pi \cdot dl$$

De la formule générale des pertes de charge :

$$dp = \lambda \cdot \frac{\rho U_m^2}{2} \times \frac{1}{2R} \times dl$$

avec η la viscosité dynamique
 λ coefficient linéique de perte de charge

on a :

$$dF = \lambda \cdot \frac{\rho U_m^2}{2} \times \frac{1}{2R} \cdot \pi R^2 dl$$

En égalant les deux expressions des forces de viscosité on a :

$$g = \frac{\lambda \cdot Qv}{8\pi R^2} \cdot \frac{\rho U_m}{\eta}$$

soit, en introduisant le nombre de Reynolds :

$$g = \frac{\lambda \cdot Qv \cdot Re}{16 \cdot \pi \cdot R^3}$$

Quelque soit le régime λ est toujours de la forme

$$\lambda = a / Re^b \quad a \text{ et } b \text{ des constantes.}$$

La dernière expression du gradient de vitesse permet donc de prévoir l'apparition du décollement des flammes en régime établi, laminaire ou turbulent.

5.1.6°/ Effet de paroi

Lorsqu'on traite la déflagration en régime isolé on suppose des conditions adiabatiques. Ceci n'est pas rigoureusement exact. On doit tenir compte des échanges possibles avec l'entourage de la zone réactionnelle (les parois solides entre lesquelles la combustion s'installe). La paroi exerce une action inhibitrice sur la combustion, laquelle action résulte de deux effets: refroidissement et destruction des centres actifs propagateurs de la combustion. La température des parois est sensiblement plus faible que celle de la zone réactionnelle. Elles enlèvent donc des calories à la zone réactionnelle. Les parois constituent un lieu de rupture des chaînes de propagation, les radicaux libres s'y combinant plus facilement qu'en phase gazeuse. Dans les cas pratiques la flamme se propage dans des conditions non-adiabatiques. Seulement la portion de la flamme se trouvant à proximité de la paroi subit l'influence de cette dernière. Là où l'effet de non-adiabaticité se produit le double effet de la perte de chaleur et de radicaux engendre une diminution de la vitesse réactionnelle et

un ralentissement de la vitesse normale. Dans la proximité immédiate de la paroi, la combustion s'annule complètement et la vitesse normale chute à une valeur nulle. En s'éloignant de la paroi, la vitesse s'accroît progressivement pour atteindre à une certaine distance sa valeur adiabatique. (voir figure n° 22

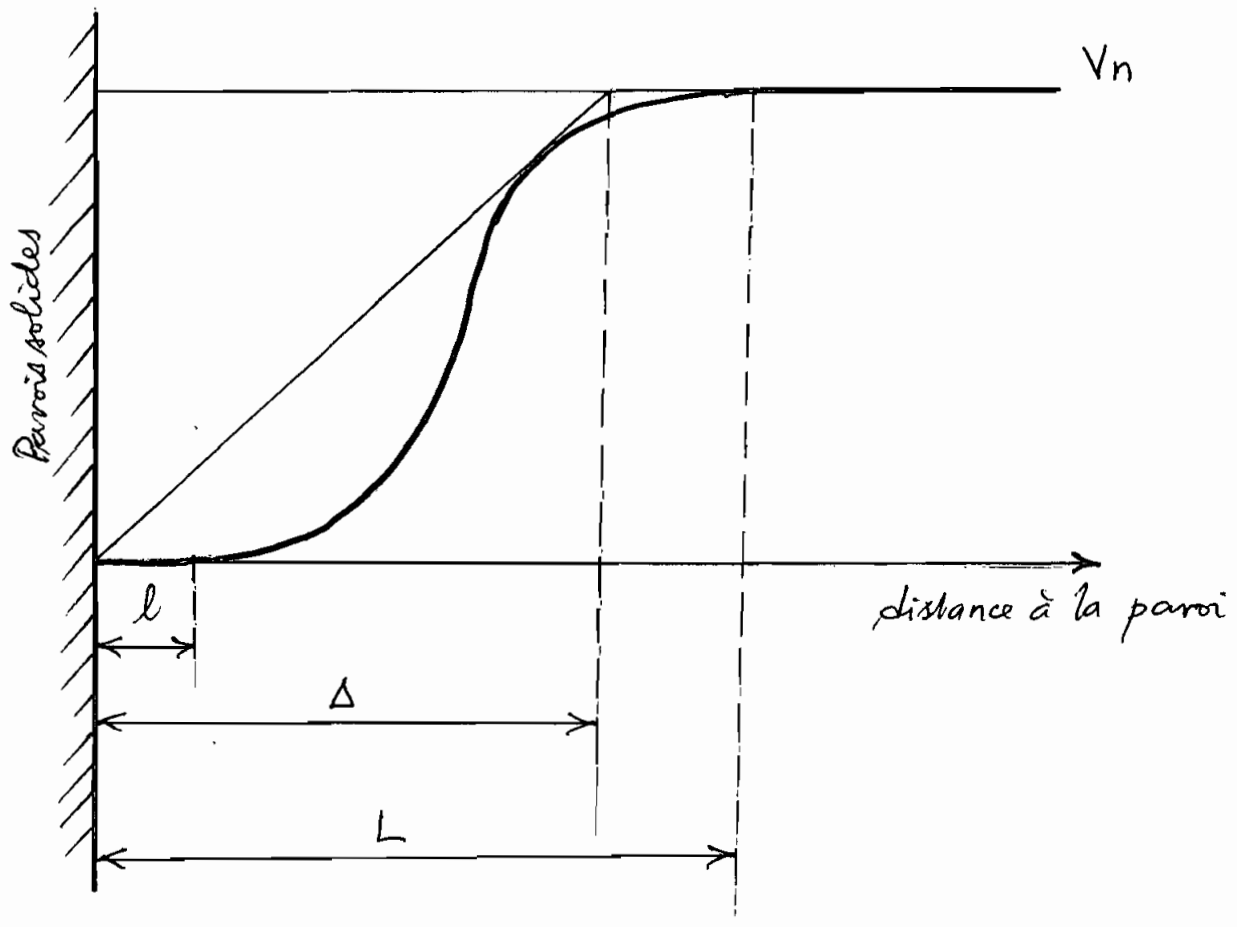


figure n° 22 Influence d'une paroi solide sur la valeur locale de la vitesse fondamentale :
 l distance limite ; Δ distance de pénétration ;
 L distance d'effet de paroi.

La distance sur laquelle la vitesse normale de propagation s'annule est appelée distance limite l . Celle sur laquelle la vitesse atteint sa valeur adiabatique est appelée distance d'effet de paroi: L . Il existe donc une zone annulaire d'épaisseur l (distance limite) exempte de combustion. C'est ce qui explique l'existence d'un espace mort dans le cas d'une flamme stabilisée sur un brûleur (espace qui sépare la base de la flamme du brûleur). L'influence de paroi permet de "tremper" ou de « coincer » la flamme par des parois suffisamment rapprochés. On définit donc la dimension de poinçonnement qui est la distance minimale entre deux plans (diamètre minimal pour un conduit cylindrique) en dessous de laquelle la flamme ne peut exister. etc.

Ces grandeurs sont fonctions de la nature du mélange, de la température et de la pression initiales, de la nature de la paroi, de sa géométrie. Les études ont montré que :

$$d_c = \frac{K \cdot T_0}{c_p \cdot \rho \cdot V_f}$$

K : Coefficient de conductivité thermique du mélange
 T_0 : température absolue, ρ : masse volumique, c_p : chaleur massique du mélange ; V_f : vitesse fondamentale.

Dans certaines conditions, la flamme peut échauffer un obstacle au point de le porter à une température supérieure à la température d'inflammation. Dans ce cas la combustion peut se poursuivre même si les passages présentés par l'obstacle sont inférieurs à la dimension de coincement. Il s'agit d'une transmission de la combustion et non une propagation. On définit la distance de sécurité d_s (voir tableau n° 10) pour laquelle cette transmission est impossible.

Combustibles	d_c (mm) (diamètre de coincement)	d_c (mm) (distance de coincement entre deux plans)	d_s (mm) distance de sécurité
hydrogène	1	0,58	0,28
oxyde de carbone	2	1,24	
Méthane	3,30	2,05	
propane	2,80	1,73	0,96
butane	3,40	2,16	1,07
pentane	3,20	2	0,99

Tableau n° 10 distances de coincement et de sécurité pour mélanges stœchiométriques de différents combustibles avec l'air.

5.1. c°/ Effet de l'atmosphère environnant la flamme

La diffusion avec l'atmosphère modifie le mélange gazeux. Il peut y avoir changement de la distance d'effet de paroi. La diffusion de l'air n'est possible qu'à la base de la flamme. Elle se superpose à l'effet de paroi et contribue à modifier le profil des vitesses locales de déflagration sur le front de flamme.

Avec des mélanges stoechiométriques ou pauvres la pénétration de l'atmosphère accélère la chute de la vitesse de déflagration sur le front de flamme.

Pour les mélanges riches la diffusion modifie différemment le profil des vitesses locales qui passe par un maximum au voisinage de la paroi (où le mélange est sensiblement stoechiométrique). (voir figure n° 23)

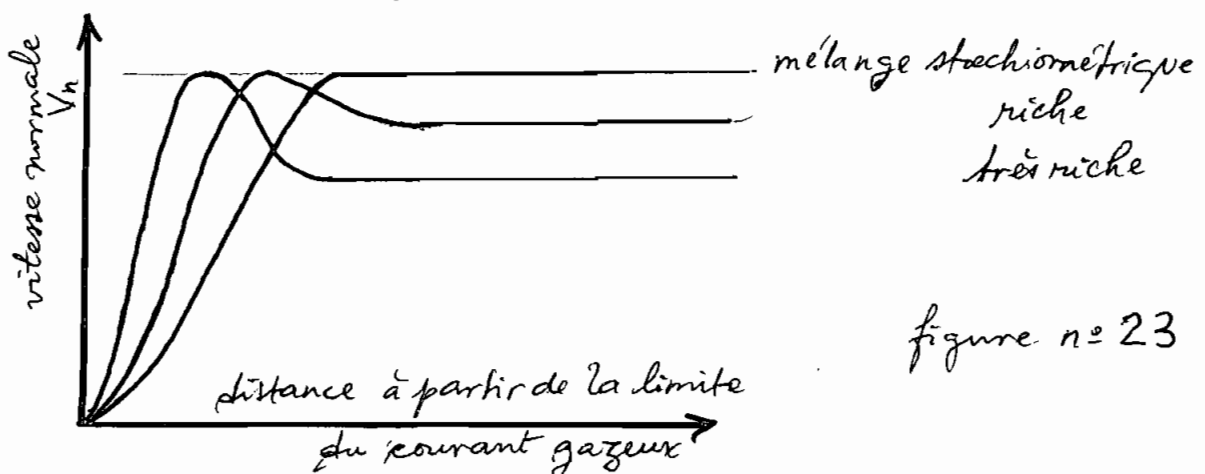


figure n° 23

Effet de la diffusion de l'atmosphère sur la vitesse locale.

5.1.d/ Autres facteurs

C'est l'ensemble de tous les facteurs pouvant influencer d'une manière ou d'une autre sur le décollement ou le retour de flamme.

- * Nous avons déjà vu l'influence de la vitesse de déflagration.
- * Lorsque la température d'un mélange préalable augmente, la tendance au décollement diminue et la tendance au retour de flamme augmente.
- * La distance entre les orifices de formation des flammes n'influe ni sur le décollement, ni sur le retour de flamme, tant que l'espacement entre ces supérieurs à leur diamètre dans le cas des orifices circulaires, leur largeur dans le cas des fentes.
- * L'inclinaison des flammes ne modifie pas la limite de décollement mais favorise le retour de flamme. Pour les flammes inclinées la vitesse critique doit être majorée de 15%.
- * Par le dioxyde de carbone la pollution de l'atmosphère favorise fortement le décollement des flammes. Il y a diminution de la vitesse fondamentale de déflagration et augmentation de l'effet de diffusion à la base des flammes.

Aux orifices de sortie des brûleurs le régime d'écoulement n'est généralement pas établi et les limites de stabilité des flammes sont plus réduites.

5.2. METHODES DE STABILISATION

Les flammes des gaz riches (butane, propane, gaz naturel) ont une tendance très marquée au décollement. Les flammes des gaz de la première famille (forte teneur en hydrogène) ont une tendance au retour de flamme.

Il est donc nécessaire d'augmenter la souplesse des brûleurs.

5.2. a) Brûleurs domestiques

Le retour de flamme est éliminé en adoptant les cotes des orifices de sortie inférieures aux dimensions de coincement. C'est le système Meker consistant en un cloisonnement qui divise la section de sortie en compartiments égaux.

Pour combattre le décollement on dispose des arsenaux suivants : déflecteurs, flammes-pilotes et la modification du profil des vitesses.

La flamme déplace une quantité d'air considérable, l'atmosphère à la base de la flamme n'est pas immobile, son mouvement favorise la diffusion donc le décollement.

Un déflecteur, à la base de la flamme, s'oppose à ce mouvement et repousse l'apparition du décollement. Il permet d'augmenter la vitesse critique de décollement de 50%.

La base de la flamme principale peut être entourée par une petite flamme appelée flamme-pilote. Par son apport de chaleur supplémentaire la flamme-pilote diminue l'action inhibitrice de la paroi et augmente la vitesse locale de déflagration à la base des flammes. Le courant gazeux de la flamme-pilote déforme le profil des vitesses du courant principal et diminue la valeur du gradient de vitesse à la base de la flamme principale.

On peut modifier le profil des vitesses par un usinage approprié de telle sorte que la valeur du gradient de vitesse soit très faible dans une région de la flamme. Cette modification combinée à l'effet du déflecteur, permet d'obtenir une zone d'ancrage qui stabilise toute la flamme.

5.2.b°) Brûleurs industriels

Dans les applications industrielles c'est le soufflage total qu'il faut éviter et non le décollement. Les flammes-pilotes, les obstacles inertes, les jets gazeux et l'écoulement tourbillonnaire sont utilisés pour stabiliser ou accrocher les flammes.

Les limites de stabilité d'une flamme turbulente sont différentes de celles d'une flamme laminaire. Mais les flammes-pilotes jouent le même rôle. Ce sont des flammes à faible débit qui entourent le bord du brûleur principal et qui stabilise la flamme principale par allumage continu. On peut interposer un obstacle dans l'écoulement. Le front de flamme s'établit et est appuyé sur les bords de l'obstacle. (voir figure n° 24

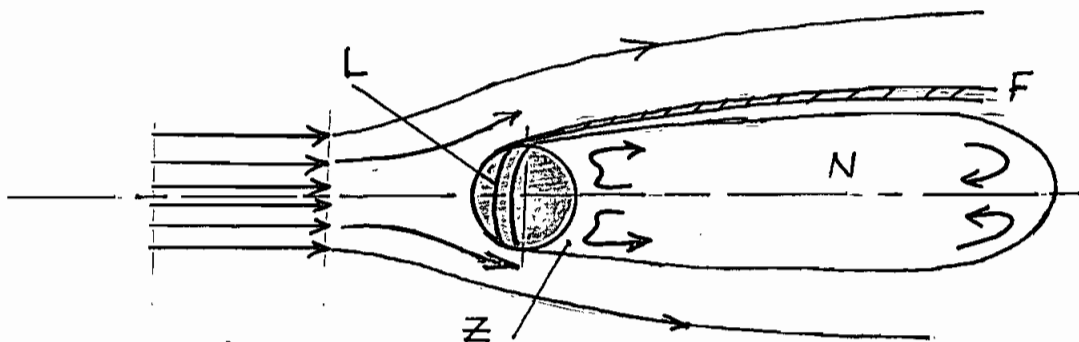


figure n° 24

- F front de flamme - L ligne de l'écoulement
- N noyau de stabilisation - Z zone de mélange.

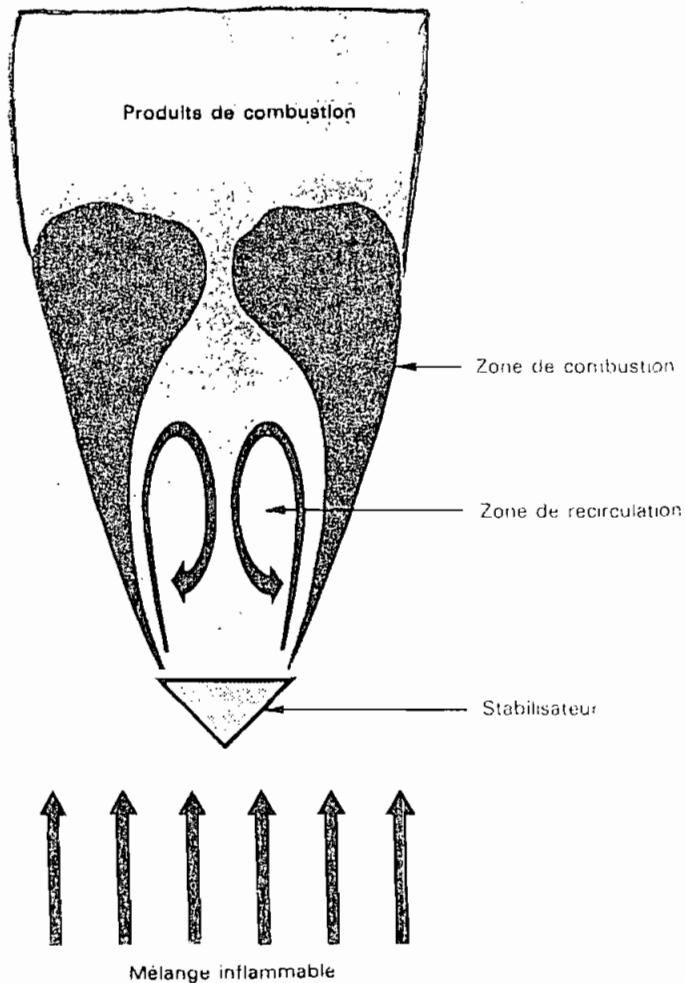
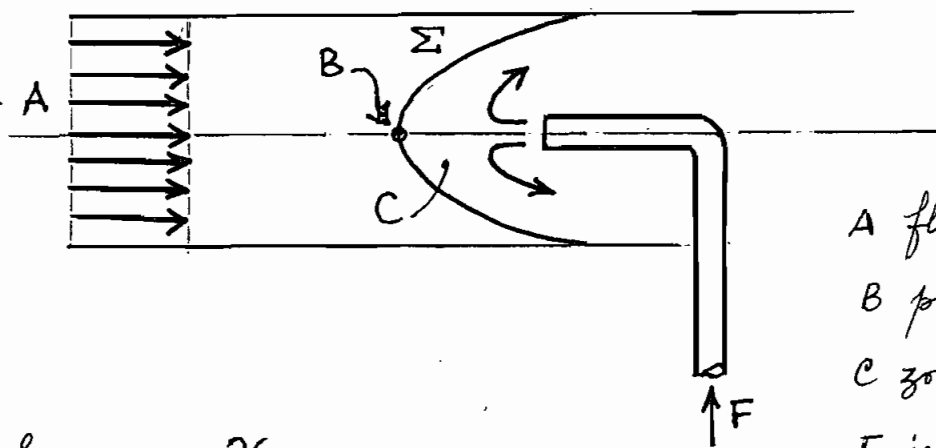


FIG. 25 Schéma de stabilisation d'une flamme turbulente avec création d'une zone de recirculation derrière le stabilisateur.

La stabilisation est conditionnée par la zone immédiatement en aval : le noyau de mélange qui est constitué de gaz entièrement brûlés, de température uniforme égale à la température de combustion. L'efficacité des obstacles comme stabilisateurs s'explique par un effet aérodynamique : dans la zone en aval de l'obstacle, la vitesse d'écoulement est très faible et le sens de l'écoulement peut même être renversé et crée

ainsi des tourbillons derrière l'obstacle. Ces tourbillons assurent une recirculation et une réintroduction à la base de la flamme de gaz et de produits de combustion provenant des parties de la flamme situées plus en aval.

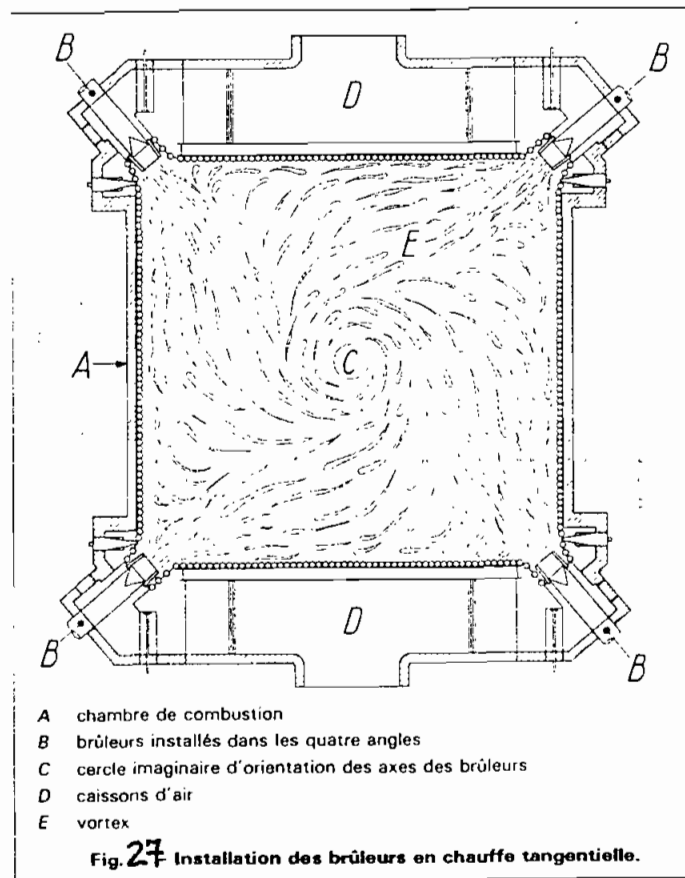
On peut envoyer un jet à contre-courant pour créer une zone où la vitesse des gaz est très réduite (avec un point d'arrêt). Le résultat est le même qu'avec les obstacles inertes.



- A flux principal
- B point d'arrêt
- C zone critique
- F jet de stabilisation.
- Σ front de flamme

figure n° 26

Stabilisation par jet gazeux.



5.3. MOYENS DE DIMINUTION DES OXYDES ET LUTTE CONTRE LA CORROSION

Les éléments polluants résultant de la combustion sont la poussière, les oxydes de soufre et d'azote. Les oxydes de soufre en présence de la vapeur d'eau forment des acides très corrosifs.

5.3.a°/ Moyens de diminution des oxydes

Un dimensionnement convenable des équipements de dépoussiérage résout le problème des poussières. Cette tâche revient au constructeur des brûleurs.

Pour les oxydes de soufre des appareils spéciaux de désulfuration doivent être installés. Mais ces appareils n'éliminent pas totalement ces oxydes.

Pour les oxydes d'azote: la combustion elle-même a un effet sur ces éléments polluants. Ils sont fonction de la quantité d'oxygène (excès d'air), de la température de combustion et de la teneur en azote du combustible.

D'après les expériences de Mitsubishi, la teneur des gaz de combustion en oxydes d'azote croît linéairement avec la teneur en azote du combustible.

(voir fig. n° 28)

Le choix du combustible est un moyen pour diminuer les oxydes d'azote.

L'émission d'oxydes d'azote croît dans le même sens que l'excès d'air de combustion (figure n° 29)

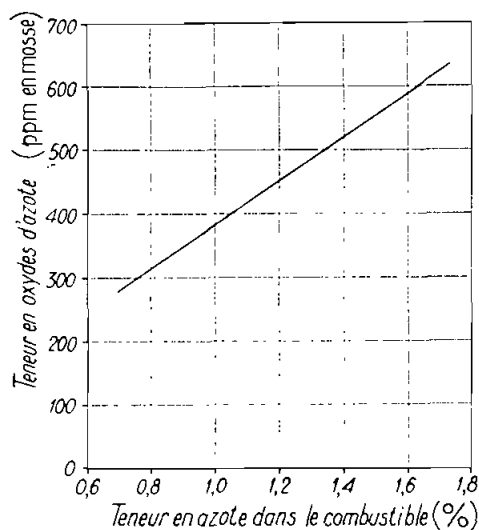


Fig. 28 Influence de la teneur en azote du combustible sur la teneur en oxydes d'azote des gaz de combustion (d'après Mitsubishi).

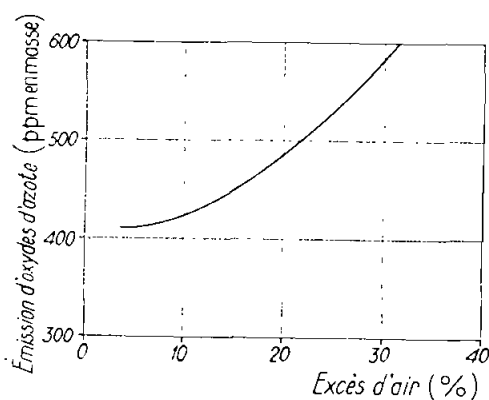


Fig. 29 Influence de l'excès d'air sur la teneur en oxydes d'azote dans les gaz de combustion.

L'émission d'oxydes d'azote croît avec la température de combustion. L'excès d'air optimum est de 20 à 25%. On veillera à ce que 105 à 110% soient introduits dans les brûleurs et les 15 à 20% restants soient injectés au dessus des brûleurs comme illustré à la figure n°30

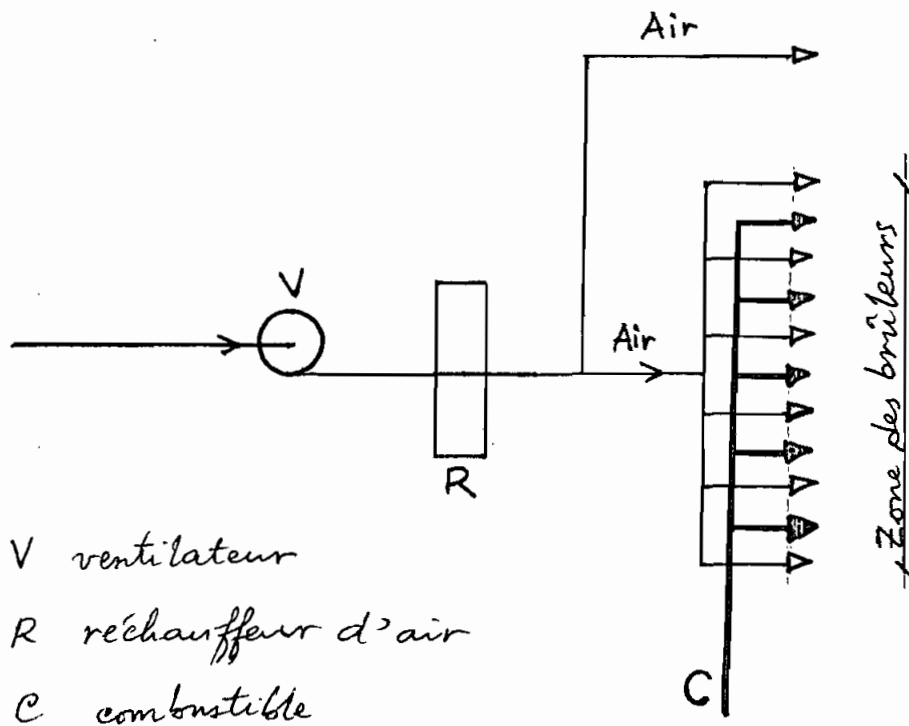
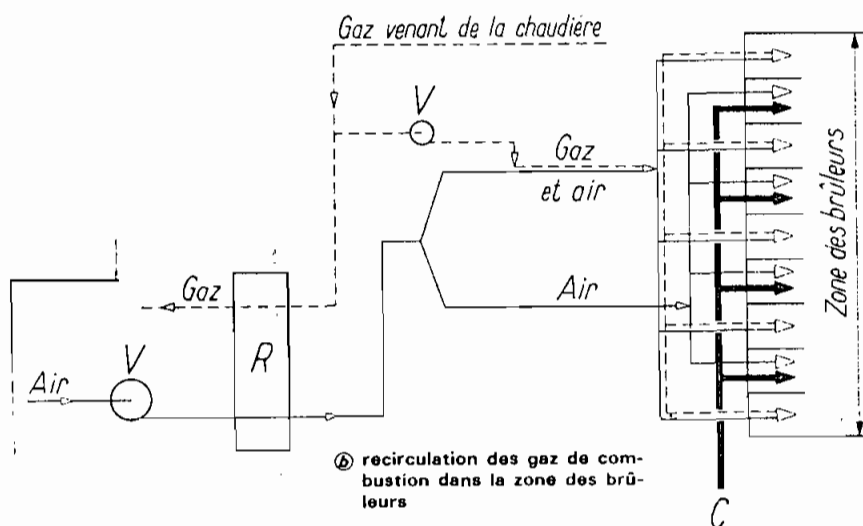


Figure n°30 Distribution de l'air de combustion dans et hors de la zone des brûleurs

C'est la combustion étagée. L'atmosphère réductrice et la température réduite qui résulte de la première phase limitent la combinaison de l'oxygène et de l'azote.

On pourra recycler aux brûleurs des gaz de combustion prélevés après le dépoussiéreur. Ces gaz recyclés seront mélangés à une partie de l'air de combustion. (voir figure n° 31

La proportion de gaz recyclés recirculant aux brûleurs est de l'ordre de 20% de la quantité d'air de combustion (en poids). Le recyclage permet de diminuer la quantité d'oxyde d'azote.



- C Combustible
 R réchauffeur d'air
 V ventilateurs (de soufflage et de recirculation)

Fig. 31 - Distribution de l'air de combustion et recirculation des gaz de combustion dans la zone des brûleurs (chauffe tangentielle).

5.3. b) Lutte contre la corrosion

La corrosion se manifeste à haute température, sous l'influence du pentoxyde de vanadium (V_2O_5); à basse température sous l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui entraîne une destruction rapide des faisceaux.

Lutte contre la corrosion à basse température.

La formation d'anhydride sulfurique croît avec l'excès d'air. Donc la combustion à faible excès d'air diminuera l'action destructrice de l'acide.

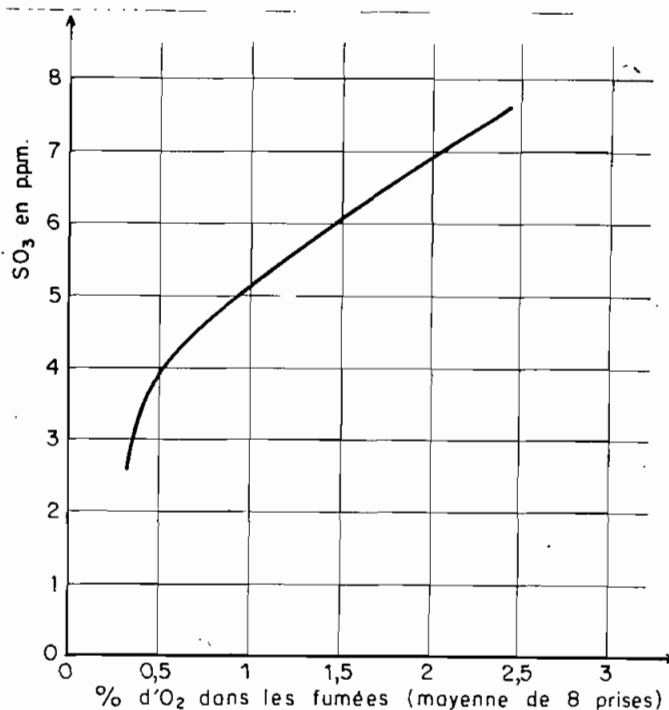


FIGURE 32 - FORMATION DE L'ANHYDRIDE SULFURIQUE EN FONCTION DE L'EXCES D'AIR

L'injection d'additifs comme la dolomie $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ ou de gaz ammoniac (NH_3) permet de neutraliser l'action de l'acide par formation de sulfates qu'on ramone facilement.

On peut laver les faisceaux des réchauffeur d'air par ruissellement d'eau sodée. Cette eau bien répartie sur les surfaces d'échange avec les gaz de combustion assure la dilution ou la neutralisation de l'acide sulfurique formé. Avec le grenailage on peut enlever les dépôts adhérents qui se trouvent dans les tubes. Il consiste à faire tomber par gravité de la grenaille de fonte sur les tubes.

L'utilisation des matériaux résistant à la corrosion comme les tubes d'acier ou de cuivre enrobés de plomb, les tubes d'acier enrobés d'aluminium, les tubes en verre Pyrex résout le problème de la corrosion.

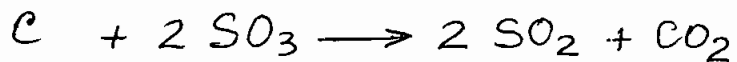
Lutte contre la corrosion à haute température

L'excès d'air doit être réduit pour faciliter la formation du sesquioxyde (V_2O_3) ou du bioxyde de vanadium (V_2O_4) en lieu et place du pentoxyde (V_2O_5) .

Des additifs comme le kaolin (ou la silice colloïdale (Al, Si) et la dolomie $(\text{CO}_3)_2 \text{CaMg}$ sont utilisés pour provoquer des dépôts. Le kaolin produit le minimum de dépôt alors que la dolomie présente des risques d'obstruction. En contrepartie la dolomie est quatorze fois moins chère que le kaolin.

Des combustions mixtes permettent elles aussi de lutter contre la corrosion.

* Combustion mixte fuel-oil -- charbon: Le carbone a un rôle réducteur et son action sur l'anhydride sulfurique peut se traduire par les équations:



Cette combustion mixte entraîne la disparition de l'anhydride sulfurique. On est alors amené à penser que la présence d'imbrûlés solides dans les gaz de combustion serait bénéfique du point de vue des risques de corrosion.

* Combustion mixte fuel-oil -- gaz de haut-fourneau. Le gaz de haut-fourneau, dont l'élément combustible est l'oxyde de carbone, ne présente pas les mêmes risques que le gaz naturel dans

le cas d'une combustion mixte avec le fuel qui est déconseillé.

Le gaz naturel est constitué surtout de méthane et d'heptane. La combustion produit de grandes quantités de vapeur d'eau. En combustion mixte avec le fuel-oil la production d'acide sulfurique est très favorisée.

Chapitre 6

APPLICATIONS NEGATIVES

6.1. LIMITES D'INFLAMMABILITE

La propagation de la flamme n'est possible que dans des mélanges compris entre certaines limites de compositions. Ces limites peuvent être déterminées expérimentalement en enfermant le mélange dans un réacteur et en provoquant l'allumage par une étincelle suffisamment énergétique. Les essais sont réalisés avec des mélanges de plus en plus pauvres et de plus en plus riches. Les mélanges pour lesquels la flamme ne se propage plus à travers le réacteur permettent la détermination des limites supérieure et inférieure d'inflammabilité représentées par les pourcentages de combustibles correspondants. Avec des mélanges de richesse constante, mais de dilution variée on détermine de même une limite de dilution. La figure n°33 donne (diagramme triangulaire) la région d'inflammabilité du mélange ternaire méthane / oxygène / azote. On remarque que le domaine s'étend légèrement lorsque la température initiale du mélange s'élève. Le tableau n°11 fournit quelques données sur ces limites pour différents combustibles.

TABLEAU n° 11

LIMITES INFÉRIEURES ET SUPÉRIEURES D'INFLAMMABILITÉ

Combustibles en mélange avec l'air et avec l'oxygène pur, exprimées en pourcent (volume) de combustible dans le mélange total.

COMBUSTIBLE		COMBURANT			
		Air		Oxygène	
		Limite inférieure	Limite supérieure	Limite inférieure	Limite supérieure
H ₂	hydrogène	4,0	74,5	4,0	94
CH ₄	méthane	5	15	5	60
C ₃ H ₈	propane	2,25	9,4	2,25	45
C ₂ H ₅ OH	alcool méthylique	3,3	19		
(C ₂ H ₅) ₂ O	éther éthylique	1,8	36,5	2,1	82
CH ₂ Cl ₂	chlorure de méthylène	inflammable		15,5	66
NH ₃	ammoniac	15	27	14	79

Valeurs compilées d'après plusieurs auteurs. Pour les références bibliographiques, voir VAN TIGGELEN (A.) et coll. — Oxydations et combustions. *Editions Technip*, Paris, 1968.

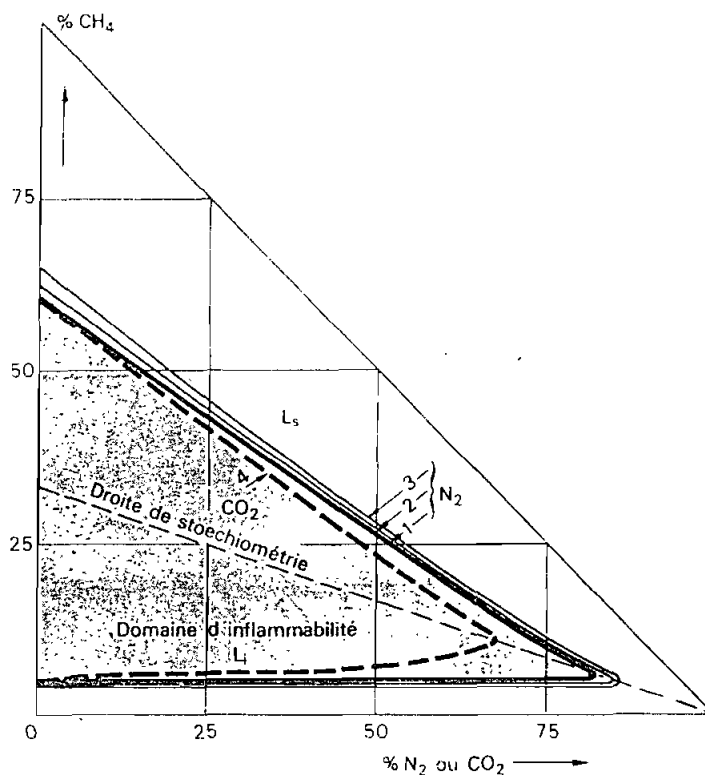


FIG. 33 Limites d'inflammabilité des mélanges CH₄/O₂/N₂ (courbes 1, 2 et 3) et (CH₄/O₂/CO₂) (courbe 4).

Température initiale : 20 °C (courbes 1 et 4) ; 160 °C (courbe 2) et 375 °C (courbe 3).

D'après Remmerie (P.) et Van Tiggelen (A.). — (Thèse), Louvain.

Les méthodes de détermination des limites d'inflammabilité ne fournissent que des valeurs proches des réelles. On aimerait avoir (déterminer) l'aptitude du mélange à être le siège d'une déflagration. Mais on mesure la possibilité d'allumer une flamme. L'allumage d'une flamme requiert une quantité minimale d'énergie appelée énergie minimale d'allumage. Elle est très faible pour des mélanges stoechiométriques d'hydrocarbures avec l'air (quelques dixièmes de millijoules) mais croît très vite avec des mélanges plus pauvres ou plus riches. Elle peut devenir tellement élevée qu'il devient impossible de réaliser une telle décharge. Or, la détermination des limites d'inflammabilité se réalise sur des mélanges les plus riches et les plus pauvres qui sont à la limite de l'inflammabilité. Dès lors on peut se demander si la valeur de l'énergie d'allumage n'entache pas d'erreur la détermination des limites d'inflammabilité.

L'explication de l'existence des limites intrinsèques de propagabilité ne peut se faire que qualitativement car elle n'est pas facile.

Deux conditions de propagabilité dépendant exclusivement du mélange peuvent être écrites. La condition cinétique découlant directement de l'équation déduite pour la vitesse fondamentale

$$V_n = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot D (\delta - F_t \cdot X_R)}{\lambda}}$$

Elle s'annule pour $\delta = F_t \cdot X_R$ d'où une première condition (cinétique) d'inflammabilité :

$$X_R < \delta / F_t$$

L'existence de la flamme, siège de réactions exothermiques est subordonnée à un bilan thermique positif. Ce bilan est la somme des vitesses élémentaires, chacune multipliée par la chaleur qu'elle dégage. En adoptant le symbolisme déjà utilisé et en posant :

$$\alpha = X_A \cdot \frac{X_x}{X_R} \cdot e^{-E_p/RT},$$

Q_p , Q_t les chaleurs dégagées respectivement par l'étape de propagation et de rupture en phase gazeuse,

$-Q_r$ la chaleur absorbée par l'étape de ramification;

on a le bilan thermique suivant qui constitue une condition (thermique) d'inflammabilité:

$$Z_2 \left(\alpha \cdot X_R \cdot Q_p - \delta \cdot X_R \cdot Q_r + F_t \cdot X_R^2 \cdot Q_t \right) > 0$$

d'où :

$$X_R > \frac{\delta \cdot Q_r - \alpha \cdot Q_p}{F_t \cdot Q_t}$$

L'association des deux conditions semble donc montrer que le mélange devient inflammable par lui-même lorsque la concentration en radicaux libres est comprise entre ces deux limites. Cette concentration en radicaux libres dépend évidemment des concentrations relatives des réactifs ainsi que de celle du diluant.

6.2. APPLICATIONS NEGATIVES : SECURITE

Il est question des interventions et prédispositions ayant pour but d'empêcher ou d'annuler le danger constitué par la combustion.

Dans le domaine de la sécurité, on s'intéresse surtout aux limites inférieure et supérieure d'inflammabilité des combustibles avec l'air. Pour les deux limites la dilution n'est pas la même. Les extincteurs au gaz carbonique opèrent par dilution de la flamme, en ramenant le mélange en dehors des limites de dilution.

Des corps [comme le chlorure de méthylène] qui forment des mélanges inflammables avec l'oxygène, sont parfaitement ininflammables avec l'air et sont employés comme extincteurs de flamme où l'air est le comburant. (voir tableau n° 12

TABLEAU n° 12

LIMITES INFÉRIEURES ET SUPÉRIEURES D'INFLAMMABILITE

Combustibles en mélange avec l'air et avec l'oxygène pur, exprimées en pourcent (volume) de combustible dans le mélange total.

COMBUSTIBLE	COMBURANT			
	Air		Oxygène	
	Limite inférieure	Limite supérieure	Limite inférieure	Limite supérieure
H ₂ hydrogène	4,0	74,5	4,0	94
CH ₄ méthane	5	15	5	60
C ₃ H ₈ propane	2,25	9,4	2,25	45
C ₂ H ₅ OH alcool méthylique	3,3	19		
(C ₂ H ₅) ₂ O éther éthylique	1,8	36,5	2,1	82
CH ₂ Cl ₂ chlorure de méthylène	ininflammable		15,5	66
NH ₃ ammoniac	15	27	14	79

Valeurs compilées d'après plusieurs auteurs. Pour les références bibliographiques, voir VAN TIGGELEN (A.) et coll. — Oxydations et combustions. Éditions Technip, Paris, 1968.

On peut éteindre un feu d'incendie en isolant le matériau combustible de l'oxygène de l'air à l'aide d'une mousse ou d'une nappe de gaz incomburent (extincteur à CO_2 , ombrelle d'eau pulvérisée se transformant rapidement en vapeur d'eau). L'extinction sera parfaite en refroidissant le foyer ou les sources de chaleur capables de fournir la température d'inflammation.

En prévention, on peut rendre les matériaux ininflammables ou non combustibles. C'est l'ignifugation: on incorpore aux matériaux certaines substances ayant des propriétés inhibitrices (par exemple les sels d'halogènes). Dans la lutte active contre le feu on peut abaisser la température du foyer de l'incendie ou diluer l'atmosphère pour la rendre ininflammable.

On ne peut lutter activement contre une explosion. La seule lutte possible est la prévention. On peut procéder par dépistage (à l'aide d'explosimètres). On doit supprimer les sources possibles d'allumage dans les zones où on ne peut éviter les mélanges inflammables. Ces sources sont généralement: les flammes, les corps solides à des températures élevées, les étincelles électriques ou électrostatiques.

On doit dépister la déflagration avant qu'elle ne se transforme en détonation. Des détecteurs d'ondes (sensibles aux ondes de pression émises par le front de flamme en accélération), ou des détecteurs sensibles au rayonnement infrarouge de la flamme peuvent être utilisés. La détection est utilisée dans les mines, les moulins et silos, les raffineries où les poudres combustibles finement divisées en mélange avec l'air peuvent présenter de graves dangers.

CONCLUSION

Comme on aurait dû le remarquer dans tout ce qui précède, on ne peut tout avoir à l'optimum à la fois. C'est malheureusement l'une des règles qui gouvernent le monde.

Prenons par exemple l'excès d'air. Il est nécessaire pour ne pas avoir une combustion incomplète qui occasionnerait des pertes de combustibles en imbrûlés dans les fumées. Mais l'excès d'air augmente en même temps le taux des oxydes de soufre et d'azote dans les fumées.

Bien que disposant d'arsénaux nous permettant de réduire la pollution de l'atmosphère en deça des limites permises par la réglementation, il reste qu'on ne peut éliminer complètement l'effet des oxydes dans les circuits des installations.

D'ailleurs l'obtention d'une flamme stable est subordonnée à la production en grande quantité de ces oxydes. C'est pour ainsi dire que la vie de tous les jours est faite de compromis et de concessions. Le but poursuivi pousse les industriels à payer le prix pour des installations d'entretien.

Connaissant mieux les facteurs qui favorisent le feu nous sommes ainsi bien armés à l'empêcher ou le combattre là où nous ne le désirons pas. Cependant « de grandes lacunes subsistent encore dans la connaissance fondamentale de la combustion et cela même pour des phénomènes dont une meilleure compréhension serait très profitable à l'amélioration de certains procédés techniques de combustion ».

ANNEXES

A1. Diagramme de fonctionnement

Le diagramme de fonctionnement d'un brûleur est construit sur le plan puissance calorifique - taux d'aération primaire par cinq courbes. A chaque réglage du brûleur correspond un point: $M(n, Q)$. Au-dessous de la courbe (1) la pression est trop faible; au-dessus de (2) la pression est trop forte; au-dessus de (3) l'air comburant est insuffisant et la combustion est incomplète. On établit cette courbe en mesurant le rapport de CO/CO_2 dans les fumées. Au-dessus de (4), le taux d'aération est trop faible et des pointes jaunes apparaissent, au-delà de la courbe (5) il existe un excès d'air primaire. La zone entourée par ces courbes correspond au bon fonctionnement du brûleur. (voir figure n° A1-1

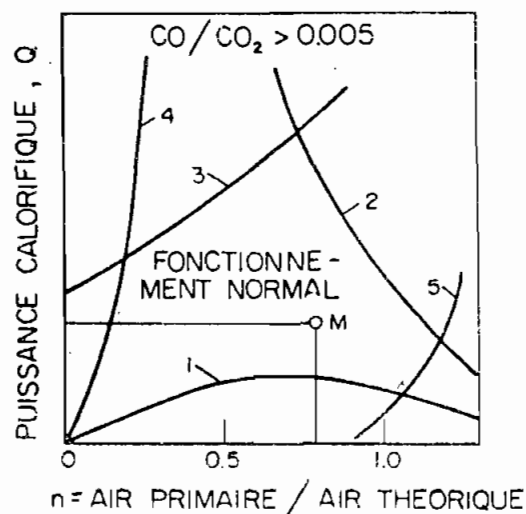


Figure A1.1. Diagramme de fonctionnement d'un brûleur.

A.2. Allumage de la flamme

L'allumage de la flamme peut s'effectuer de deux manières. • On peut introduire directement une quantité de gaz chauds (donc de radicaux libres) dans le mélange inflammable. C'est l'exemple de la flamme d'allumette. • On peut fournir la quantité d'énergie nécessaire à une auto-inflammation localisée en plongeant un corps solide chauffé ou en introduisant une étincelle électrique.

Trois conditions doivent être réalisées pour que l'allumage soit efficace :

L'énergie de la source doit être suffisamment élevée.

Elle doit être libérée dans un volume supérieur à un volume minimal critique.

Et ceci dans un temps suffisamment court.

Considérons le processus de propagation de la flamme : les couches successives du mélange sont amenées en état de combustion grâce à un échange thermique et diffusif de radicaux avec les couches de gaz qui sont déjà en réaction. Le bilan doit être positif pour que la flamme puisse continuer à se propager elle-même.

Ce bilan est positif seulement lorsque la vitesse d'accroissement du volume du front de flamme reste inférieure à celle de l'accroissement du volume des produits de combustion. Pour une source ponctuelle, la flamme a une forme sphérique. Elle se propage dans toutes les directions de manière théoriquement isotrope.

Posons r le volume des gaz brûlés, e l'épaisseur du front de flamme; le volume de la zone de réaction est :

$$\frac{4\pi}{3} (r+e)^3 - \frac{4\pi}{3} r^3$$

et celui des gaz brûlés :

$$\frac{4\pi}{3} r^3$$

La vitesse d'accroissement du volume de la zone de réaction est :

$$\frac{d(\text{Volume flamme})}{dt} = 4\pi e (2r+e) \frac{dr}{dt}$$

La vitesse d'accroissement du volume des gaz brûlés est :

$$\frac{d(\text{Volume gaz brûlés})}{dt} = 4\pi r^2 \cdot \frac{dr}{dt}$$

Pour un rayon nul la deuxième vitesse est nulle alors que la première vaut $4\pi e^2 \frac{dr}{dt}$.

La deuxième l'emporte sur la première lorsque le rayon de la flamme atteint une valeur critique r_c . Alors la propagation de la flamme se poursuit de manière autonome. Ce rayon critique est obtenu en égalant les deux vitesses:

$$r_c = e(1 + \sqrt{2})$$

Pour une source linéaire on a:

$$r_c = e$$

Dans les deux cas le rayon critique détermine une valeur critique du volume de mélange qui doit être porté à la température de la flamme (T_f) par l'énergie de la source. Le rayon critique fixe en première approximation la quantité minimale d'énergie (E_m) à fournir par la source d'allumage. Dans le cas d'une source ponctuelle (sp) et d'une source linéaire (sl) de longueur L on aura respectivement:

$$E_m(sp) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot e^3 \cdot (1 + \sqrt{2})^3 \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_f - T_i)$$

$$E_m(sl) = \pi \cdot e^2 \cdot L \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_f - T_i)$$

ρ masse volumique, c_p chaleur spécifique du mélange,
 T_i température initiale du mélange.

On a ainsi des expressions donnant la valeur théorique de l'énergie minimale d'allumage, lorsque celle-ci est libérée par la source en un temps très court et de façon homogène dans tout le volume critique.

Si la durée de l'étincelle est trop longue, une partie de l'énergie sera dispersée par conduction thermique en dehors du volume critique et l'allumage ne pourra se produire à cause du niveau alors trop bas de l'énergie disponible. (voir figures n° A3-1, 2, 3, 4)

La turbulence dans le mélange inflammable change notablement les valeurs de l'énergie minimale. Dans la plupart des applications industrielles (allumage des fours, moteurs à essence, turbo-réacteurs) un état de turbulence plus ou moins intense est toujours atteint.

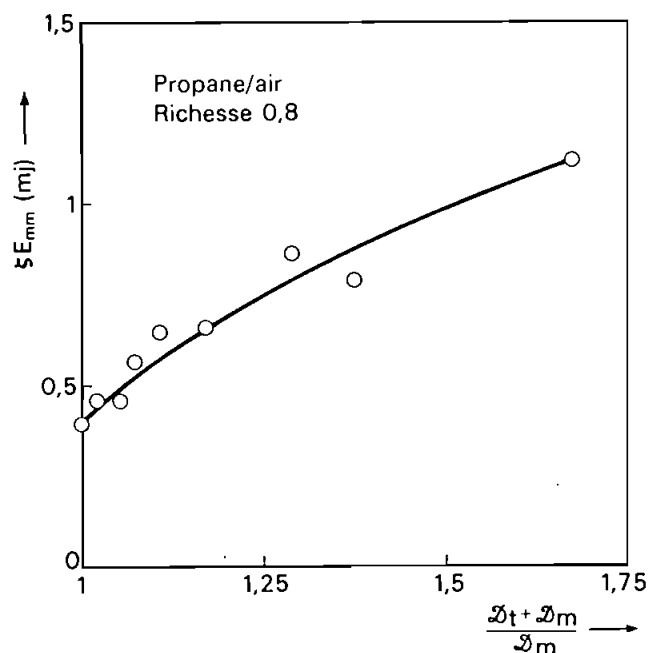


FIG. A2.1. Influence de la diffusivité turbulente sur l'énergie utile minimale d'allumage d'un mélange propane-air.

Document IFP inédit.

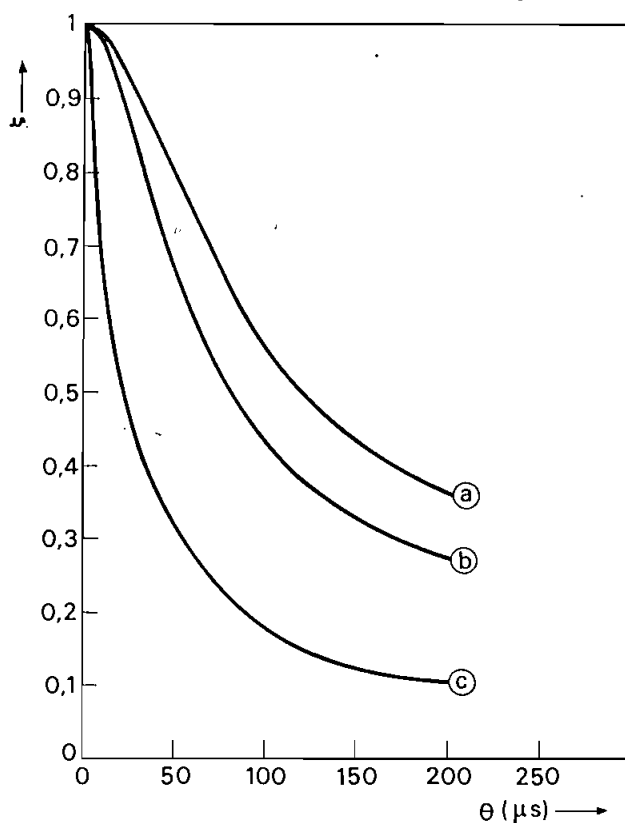


FIG. A2.2. Fraction utile (ζ) de l'énergie libérée par une source linéaire en fonction de la durée de la décharge (θ), en régime laminaire.

Courbe a : épaisseur du front de flamme (e) = 0,023 cm ;
 Courbe b : épaisseur du front de flamme (e) = 0,017 cm ;
 Courbe c : épaisseur du front de flamme (e) = 0,010 cm.

Document IFP inédit.

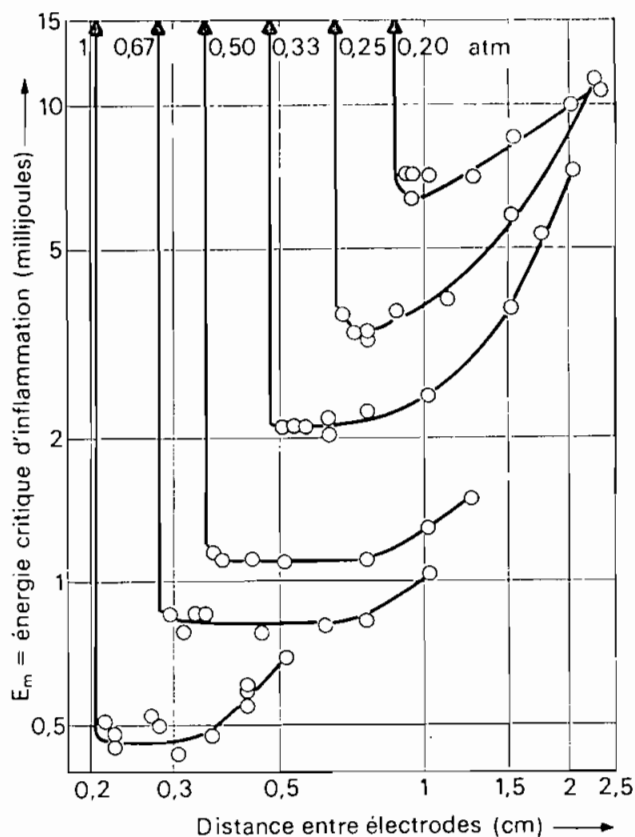


FIG. A2.3 Ignition par étincelles.

Energie critique d'allumage en fonction de la distance entre les électrodes (ces dernières sont encastrées à affleurement dans des disques de verre parallèles). mélanges stoechiométriques de méthane et d'air sous différentes pressions.

D'après Blanc (M. V.), Guest (P. G.), Von Elbe (G.) et Lewis (B.). — *J. Chem. Phys.*, 1947, 15, 800.

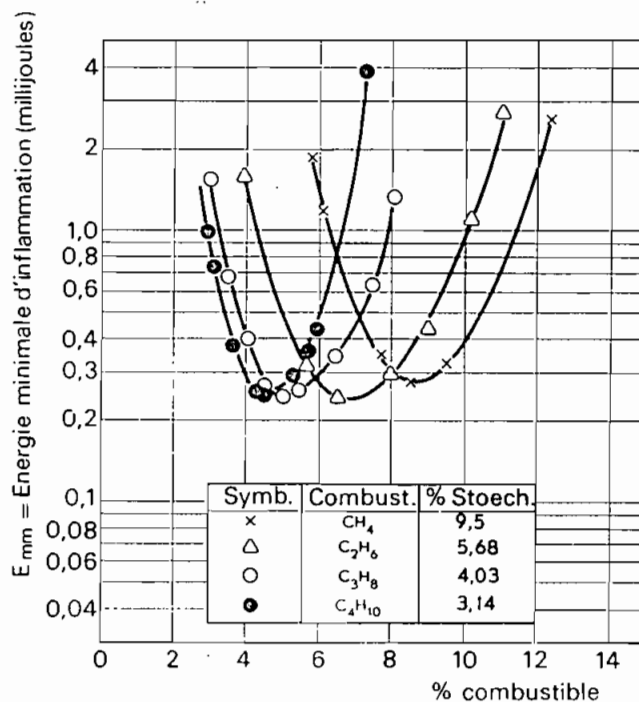


FIG. A2.4 Énergie minimale (E_{mm}) d'allumage.

Mélanges de méthane, éthane, propane ou butane et d'air. En abscisse le pourcentage de combustible dans le mélange.

D'après Blanc (M. V.), Guest (P. G.), Von Elbe (G.) et Lewis (B.). — *Third Internat. Symp. on Combustion, Williams et Wilkins*, Baltimore, 1949, p. 365.

Vues schématiques de différents types de brûleurs.

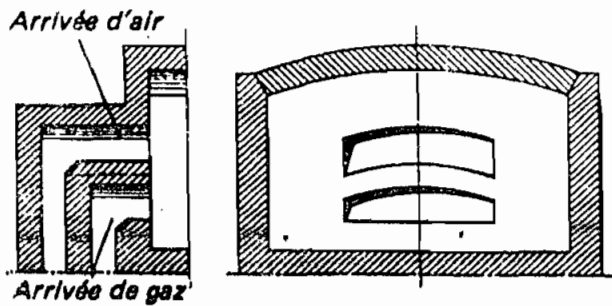


FIG. A31. Brûleur à gaz en maçonnerie à courants parallèles

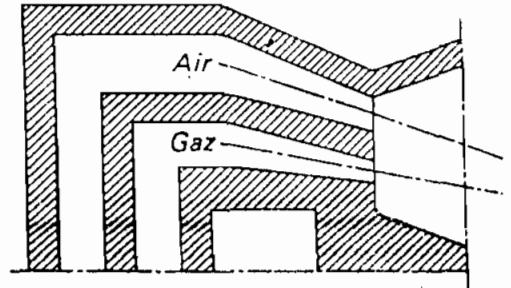


FIG. A32. Brûleur maçonné à courants convergents

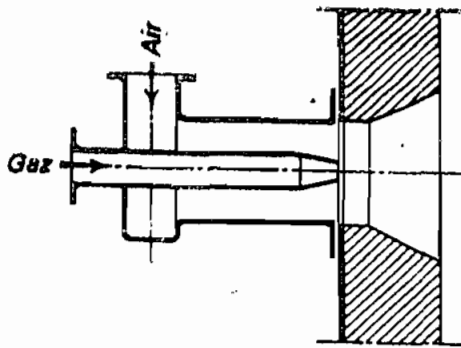


FIG. A33. Brûleur à courants parallèles

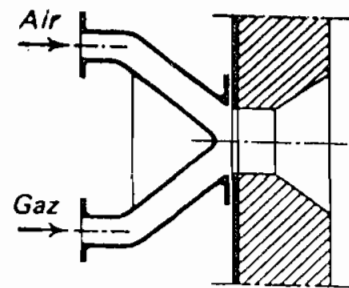


FIG. A34. Brûleur à courants convergents

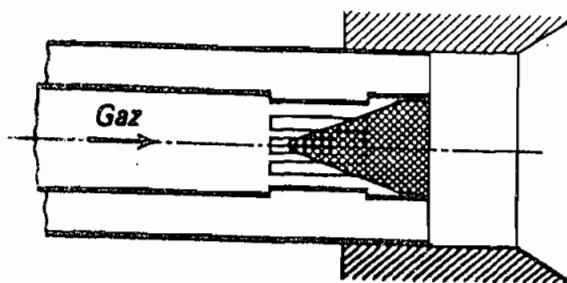


FIG. A35. Brûleur à répartiteur de gaz

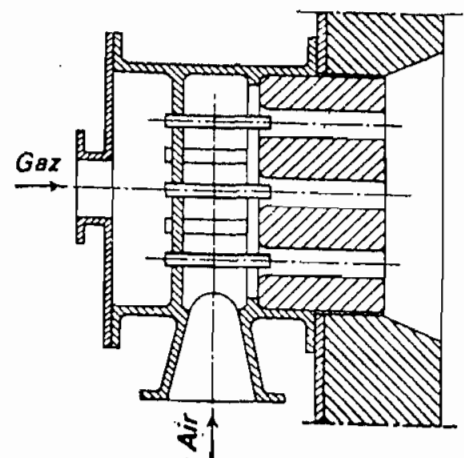


FIG. A36. Brûleur à flamme divisée

FIG. A37. Brûleur à tourbillonnement d'air

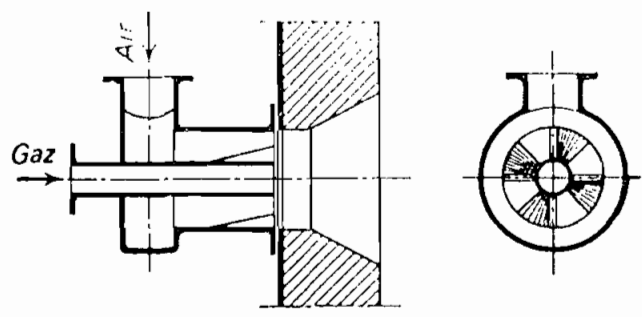


FIG. A38. Brûleur à tourbillonnement d'air et à flamme divisée.

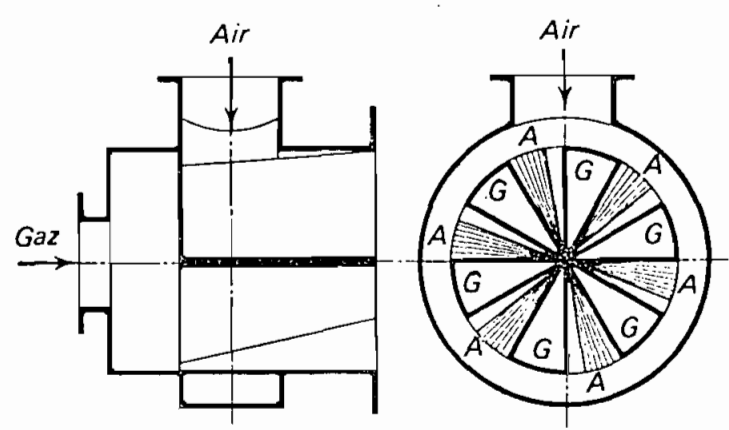


FIG. A39. Brûleur à prémélange

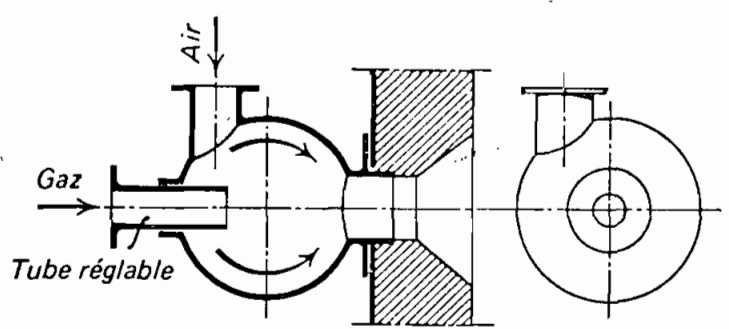


FIG. A30. Brûleur à air induit

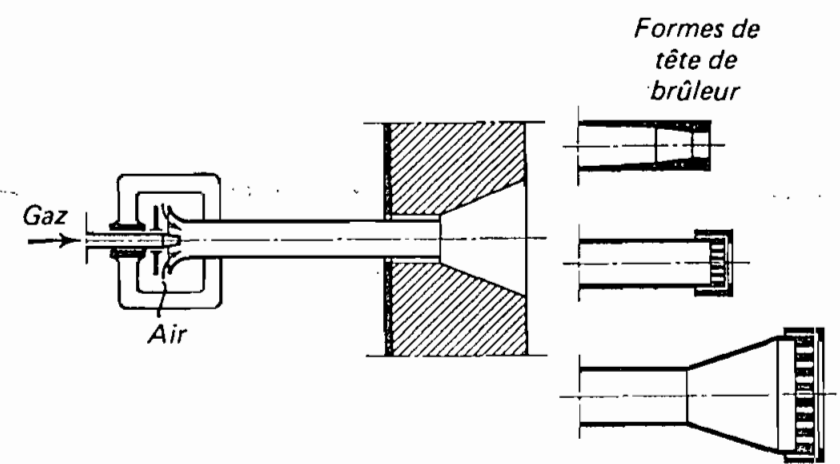
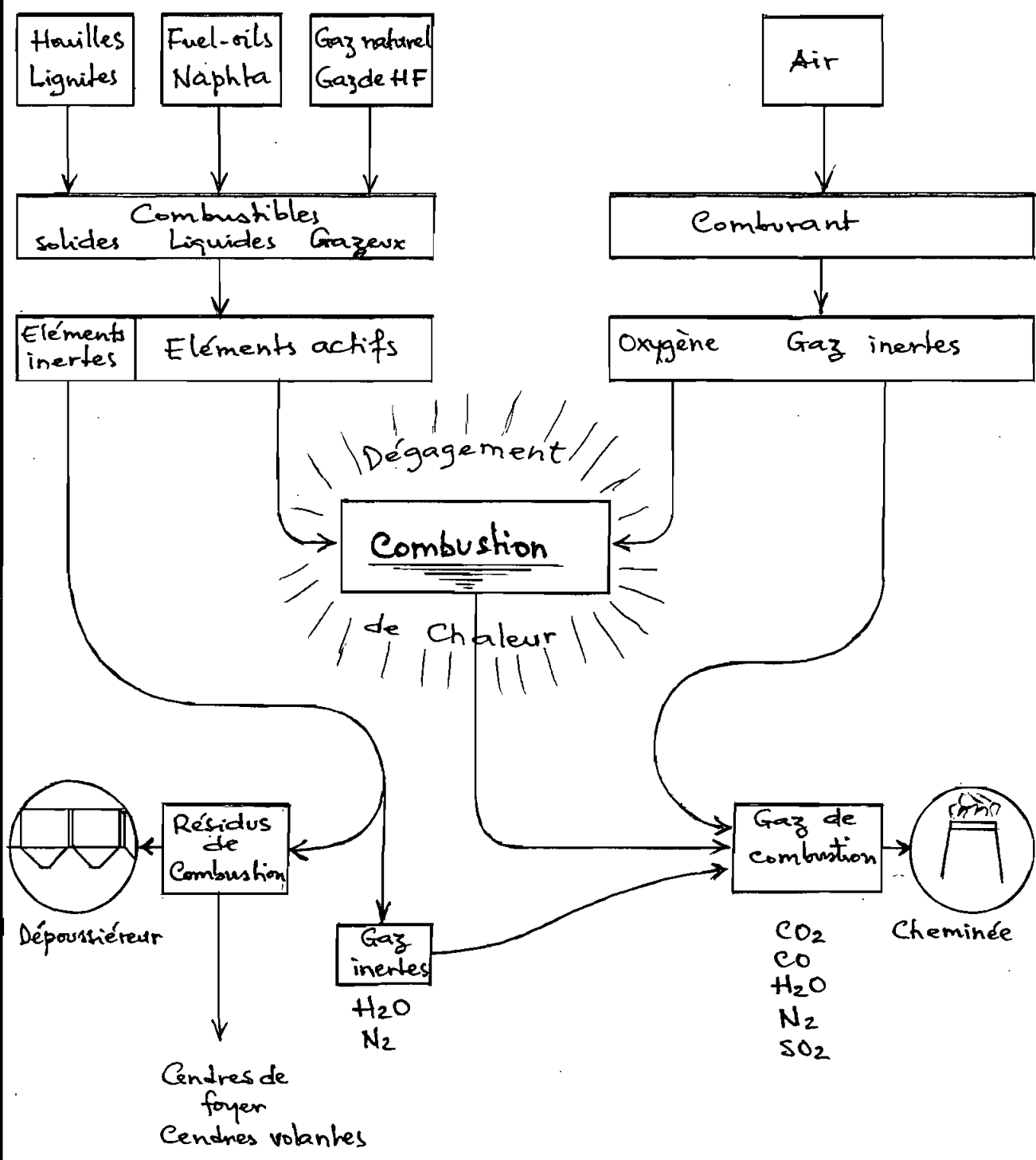


TABLEAU I

VUE D'ENSEMBLE DES DIFFÉRENTES MODALITÉS DE LA COMBUSTION

	Région de l'espace où existent des conditions (pression, température, composition)		Phénomènes de transfert de chaleur et de masse du type :	
	(hyper) CRITIQUES	SUB-CRITIQUES	MOLÉCULAIRE	TURBULENT
Réactifs en pré-mélange	<p>Auto-inflammation (ou explosion sensu stricto)</p> <p>Allumage (= auto-inflammation suivie de propagation)</p>	<p>Propagation contrôlée par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - diffusion de radicaux et conductivité thermique - autre phénomène établissant conditions critiques (par exemple: onde de choc) <p>Détonation</p>	<p>Déflagration laminaire</p>	<p>Déflagration turbulente</p>
Réactifs non pré-mélangés		<p>Propagation contrôlée par (vaporisation) et interdiffusion des réactifs</p>	<p>Flamme de diffusion laminaire</p>	<p>Flamme de diffusion turbulente</p>

Schéma de la Combustion.



(Electricité de FRANCE)

BIBLIOGRAPHIE

- * Etude exergetique d'une chaudière de l'industrie alimentaire. CODIPRAL - Projet de fin d'Etude. Abdou DIACK
- * Calcul de la consommation et Contrôle économique de la Centrale du Cap de Piche (SENELEC)
Projet de fin d'Etude. Djiby NDIAYE et Mamadou NGOM
- * Gazeification et Combustion de la tourbe
Projet de fin d'Etude. Braham THIONGANE
- * Thermique appliquée aux fours industriels. Tome 1.
N. HEILIGENSTAEDT
- * Aspects physiques et chimiques de la combustion
G. de SOETE et A. FEUGIER
- * Analyse spectrale quantitative de la flamme
R. MAVRODIMEAONU et H. BOITEUX
- * Analyse de la combustion . E. BILGEN
- * La Combustibles : Notice technique sur le Centrale.
Electricité de France EDF (et SENELEC)
- * La Combustion : Notice technique sur la Centrale
Electricité de FRANCE EDF (et SENELEC)
- * Catalogue Général PILLARD (Constructeurs de brûleurs et d'équipements énergétiques.)
- * Oxydations et Combustions. Tomes 1 et 2
A. Van TIGGELEN ; J. C. BALANCEAU ; J. BURGER ; G. de SOETE ;
L. SAJUS ; B. SALÉ ; P. J. VAN TIGGELEN

- * Techniques de l'Ingénieur A3 Thermique
B1 Chaudières

- * Thermodynamique et Energetique Lucien BOREL
- * Notes sur les combustibles et la combustion. Cours EPM
- * Equipements thermiques de usines generateurs d'energie
electrique J. RICARD
- * Note de Cours : Chaleur, Chimie, Thermodynamique (E.P.T.)
- * Regulation dans les centrales. Günter KELFENE
- * Les hautes temperatures. Jacques LACHNITT.
- * Documentation du Professeur KAMARA (Polycopis et Notes)
- * Documentation du Professeur CERNEA (Polycopis et Notes et
Revue Power.)

- * Theory of detonation ZELDOVICH et KOMPANEETS
- * Les deflagrations P. LAFFITTE
- * Chemical Kinetics and Chain Reactions .N. SEMENOV
- * Flame Structure R.M. FRISTOM .