

# CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA COMBUSTION DANS LES FUSÉES A LITHERGOL OU HYBRIDES

Par ANDRÉ MOUTET et MARCEL BARRÈRE

*Sommaire*—Le présent article est consacré à l'étude de la combustion de combustibles solides hypergoliques en présence d'un comburant liquide injecté dans le foyer.

Les phénomènes qui sont analysés se rapportent à l'allumage du foyer, au régime permanent et à la stabilité de la combustion.

L'allumage est étudié sur des dispositifs spéciaux qui mesurent le délai d'allumage évalué en fonction de la nature du combustible et du comburant.

Le régime permanent est caractérisé par la valeur de la vitesse d'ablation du combustible solide placé dans un écoulement oxydant chaud. Cette vitesse d'ablation est évaluée en fonction des paramètres de fonctionnement du propulseur et les lois obtenues expliquent le principe de fonctionnement des fusées à lithergol.

Enfin, une étude de la stabilité d'un tel système est exposée.

## 1. INTRODUCTION

DANS tout système propulsif, les phénomènes de combustion jouent un rôle important puisque dans une large mesure, ils régissent le fonctionnement du propulseur. Ce rôle a été souligné par de nombreux auteurs dans les domaines les plus divers de la propulsion: turboréacteur, statoréacteur, fusées à poudre ou à propergol liquide<sup>(1)(2)(3)</sup>: le fonctionnement des fusées à poudre, par exemple, dépend des lois définissant la vitesse de combustion de la poudre; la stabilité de la combustion et les performances de la fusée sont également liées à ces lois<sup>(4)</sup>.

Les phénomènes de combustion analysés dans le présent travail le sont sur un nouveau mode de propulsion: les fusées à lithergol ou suivant la terminologie américaine les fusées hybrides. Ce système n'échappe pas à la règle générale énoncée plus haut, les phénomènes de combustion y jouent un rôle très important.

Un propulseur de ce type utilise simultanément des réactifs liquides et solides, cette disposition ayant comme principaux avantages l'emploi de propergols d'impulsion spécifique élevée, le refroidissement des tuyères, le guidage ou le pilotage par modulation du débit<sup>(5)(6)</sup>.

L'engin se compose (Fig. 1a) d'un foyer de grande dimension dans lequel est stockée la fraction solide du propergol, la partie liquide est contenue dans un réservoir, un système d'alimentation et d'injection

introduisant ce corps actif liquide dans le foyer. Le fait d'admettre comme propergol une partie solide et une partie liquide étend le nombre de combinaisons de corps actifs possibles: les éléments combustibles, exception faite pour l'hydrogène, sont, dans leur état naturel solides et trouvent de ce fait un emploi direct dans les fusées à lithergols.

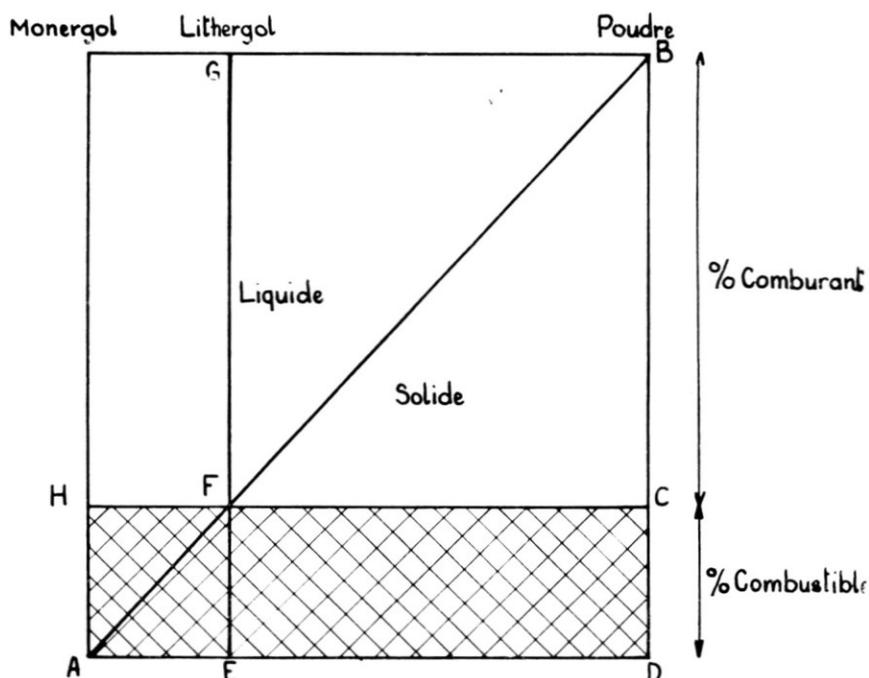


FIG. 1a. définition des fusées à lithergol.

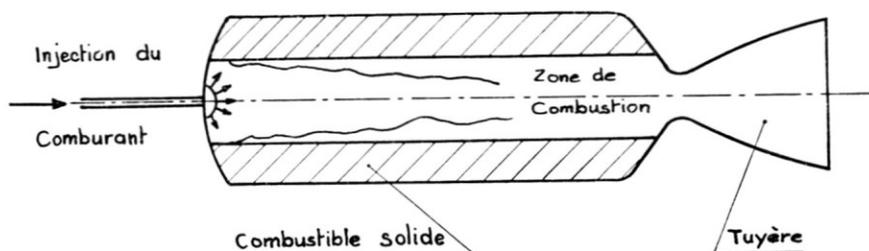


FIG. 1b. Coupe schématique d'une fusée à lithergol.

De plus, cette disposition (liquide-solide) se situant entre la fusée à poudre et la fusée à monergol, de très nombreuses solutions structurales peuvent être élaborées, il suffit pour s'en rendre compte de considérer le graphique de la Fig. 1a où en ordonnées est porté le pourcentage de combustible et de comburant entre la poudre et le monergol; le plan est

divisé en deux parties par le segment AB, celle du haut correspond à la phase liquide, celle du bas à la phase solide. Une fusée à lithergol classique correspond au point de fonctionnement F pour lequel tout le comburant est liquide et le combustible solide; mais, à côté de cette solution, on peut concevoir par exemple une fraction solide stockée dans le foyer contenant des éléments combustibles et comburants (segment ED), et également un monergol qui contienne les mêmes éléments avec un excès de comburant (segment EA).

Une telle conception du propulseur conduit à une combustion hétérogène généralement complexe, le but de ce travail est d'examiner dans ses grandes lignes et d'un point de vue fondamental les problèmes posés par cette combustion hétérogène et qui concernent les différentes phases du fonctionnement du propulseur à savoir le démarrage de la combustion, le régime établi, la stabilité de la combustion.

## 2. ALLUMAGE DES LITHERGOLS

Comme dans le domaine des propergols liquides, on distingue deux types de substances combustibles suivant qu'elles sont ou non hypergoliques avec le comburant utilisé, le terme hypergolique signifiant que la combustion démarre sans apport d'énergie extérieure lorsque comburant et combustible sont mis en contact. Examinons tout d'abord l'allumage des substances hypergoliques. Une séquence de film prise à grande vitesse d'une goutte de comburant tombant sur un combustible va permettre de décrire les différents phénomènes qui se succèdent depuis le contact de la goutte avec la substance jusqu'à l'apparition de la première flamme. Cette séquence est reproduite sur la Fig. 2. Sur la photographie de gauche, on aperçoit la goutte de comburant qui tombe et vient en contact avec le combustible solide représenté par une tache blanche rectangulaire. Cette substance est collée sur une matière plastique non hypergolique (Plexiglas). La goutte vient s'écraser sur le combustible solide et s'étale sur l'extrémité supérieure de la substance. Pendant cette phase, aucune réaction chimique n'apparaît, elle correspond à un temps physique de contact. Ensuite, cette zone s'agrandit et les premières fumées y prennent naissance. A la surface, on observe alors un bouillonnement dû aux réactions chimiques exothermiques augmentant la température des gaz; la première flamme apparaît dans la phase gazeuse au-dessus de la zone de contact. Les diverses étapes de l'allumage peuvent donc se résumer ainsi:

- (a) mise en contact du liquide et du solide (temps mécanique de contact),
- (b) démarrage des réactions chimiques exothermiques dans cette zone de contact ayant pour effet d'augmenter la température du milieu,
- (c) apparition de la première flamme dans la phase gazeuse.

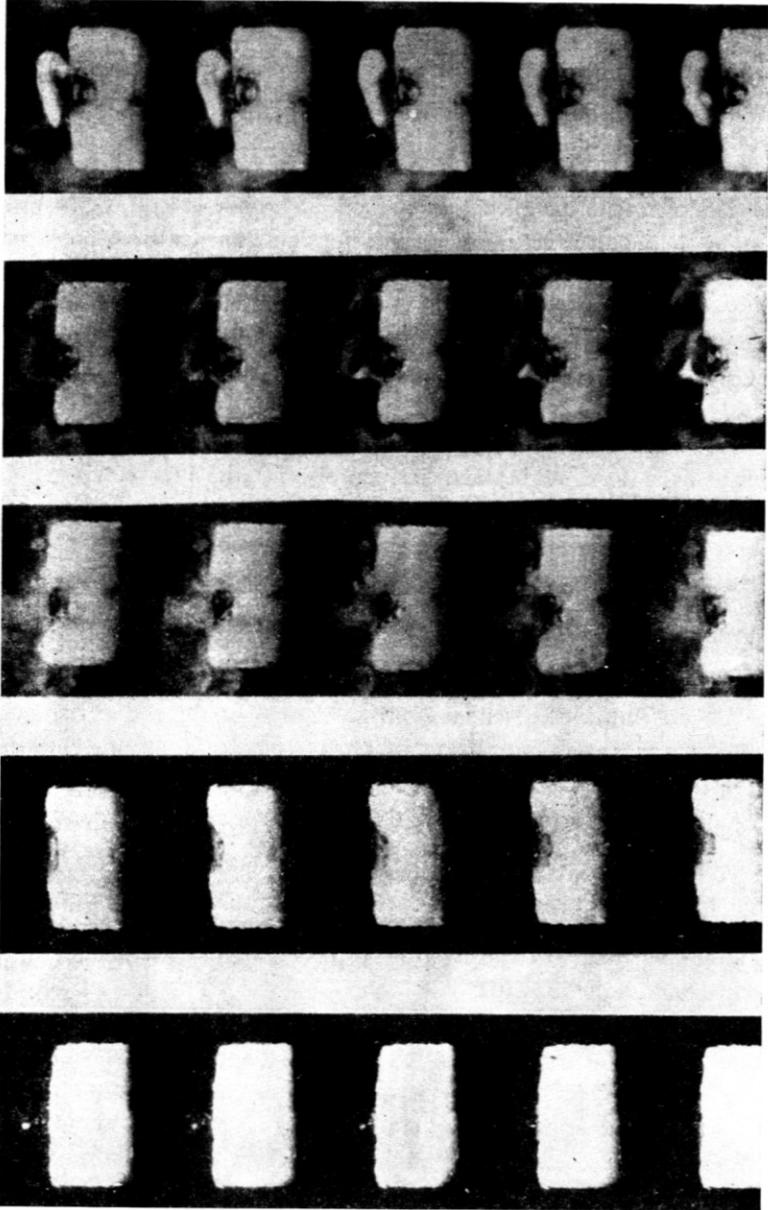


FIG. 2. Allumage des lithergols. Cadence de prise de vues: 12,200 images/s.

Les phénomènes d'allumage des lithergols seront donc caractérisés par le délai d'allumage global défini comme l'intervalle de temps qui sépare le contact des corps actifs de leur inflammation, ce délai étant fonction d'un temps mécanique de contact et d'un temps chimique difficile à séparer d'après l'allure des phénomènes observés.

L'étude des conditions d'allumage va tout d'abord porter sur la mesure de ce délai.

### 2.1—Dispositifs de mesure du délai d'allumage des lithergols

Dans tout dispositif de ce genre, on distingue deux parties concernant respectivement la réalisation du contact liquide solide et la mesure du délai. Deux types d'appareils ont été utilisés à l'ONERA, le premier concerne des dispositifs de laboratoire avec lesquels, il est plus aisé d'étudier les divers paramètres qui agissent sur ce délai, le deuxième type étant

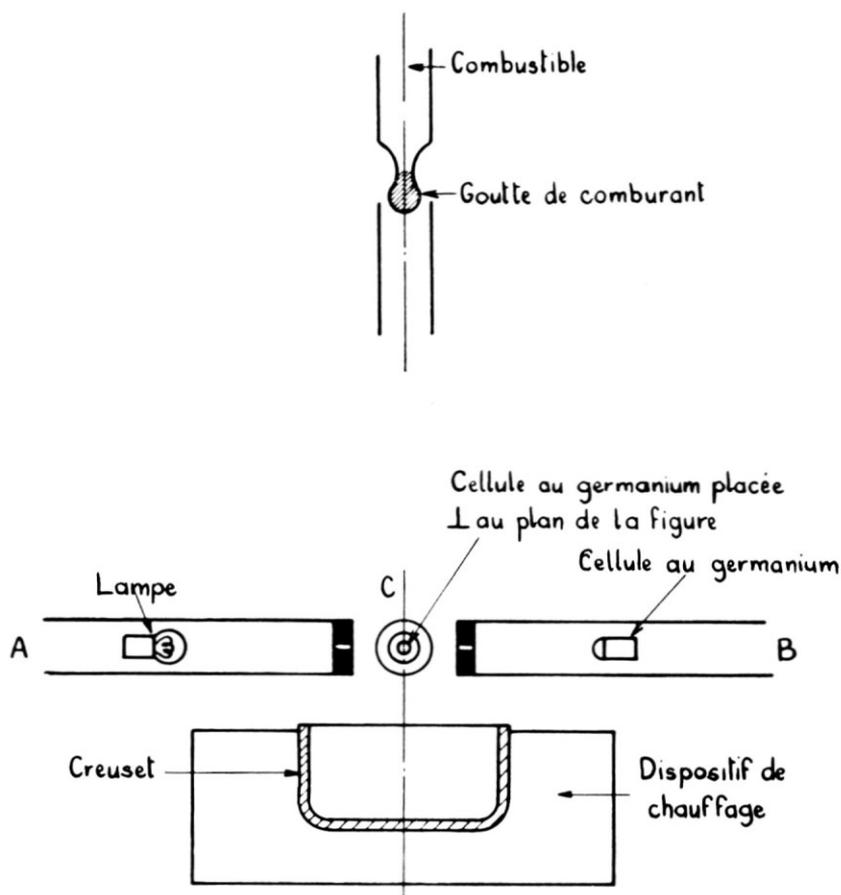


FIG. 3. Dispositif de mesure du délai d'allumage des lithergols par la méthode de la goutte.

constitué par des microfusées qui permettent de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement du propulseur.

2.1.1.—*Dispositifs de laboratoire* — (A) Le plus simple de ces appareils est schématisé sur la Fig. 3. Il comprend un dispositif permettant de former d'une manière reproductible des gouttes de comburant, le combustible solide est coulé dans un creuset; un bloc chauffant permet de faire varier la température de ce combustible. Le passage de la goutte coupe un faisceau lumineux donnant un premier top sur l'oscillogramme. Une photodiode au germanium analyse l'évolution de l'énergie lumineuse. Les

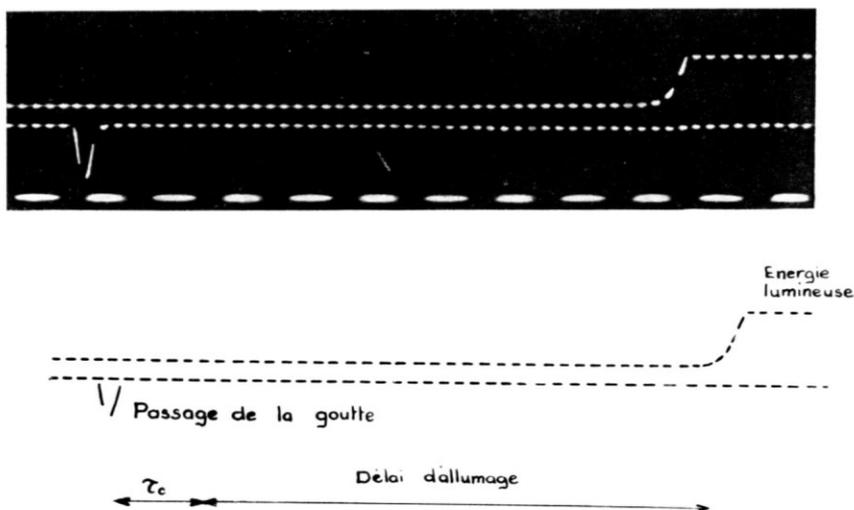


FIG. 4. Enregistrement du délai d'allumage par la méthode de la goutte.

variations de cette énergie sont enregistrées au cours du temps. Un oscillogramme type, obtenu avec ce dispositif, est représenté sur la Fig. 4: le spot du bas donne le passage de la goutte et fixe l'origine des temps, le spot du haut traduit les variations d'énergie lumineuse. Il faut tenir compte dans l'évaluation du délai d'un terme correctif  $\tau_c$  correspondant au temps mis par la goutte pour aller du faisceau lumineux à la surface du combustible; ce temps est déterminé par une expérience préalable.

La cellule au germanium utilisée est sensible au rayonnement infra rouge, elle permet donc de suivre l'évolution des réactions chimiques avant l'apparition de la flamme. Sur l'enregistrement de la Fig. 4, on observe une montée progressive traduisant l'évolution chimique; les formes de montée observées dépendent beaucoup de la nature du comburant et du combustible.

(B) Un deuxième dispositif a été utilisé pour l'étude de l'allumage des lithergols. Un des inconvénients de la méthode précédente est la

mise en jeu d'une très faible quantité de corps actifs, l'énergie libérée pendant la phase d'allumage est faible et une grande partie de cette énergie est distribuée dans tout l'espace environnant la zone de contact, on observe alors de très longs délais et avec certaines substances, bien

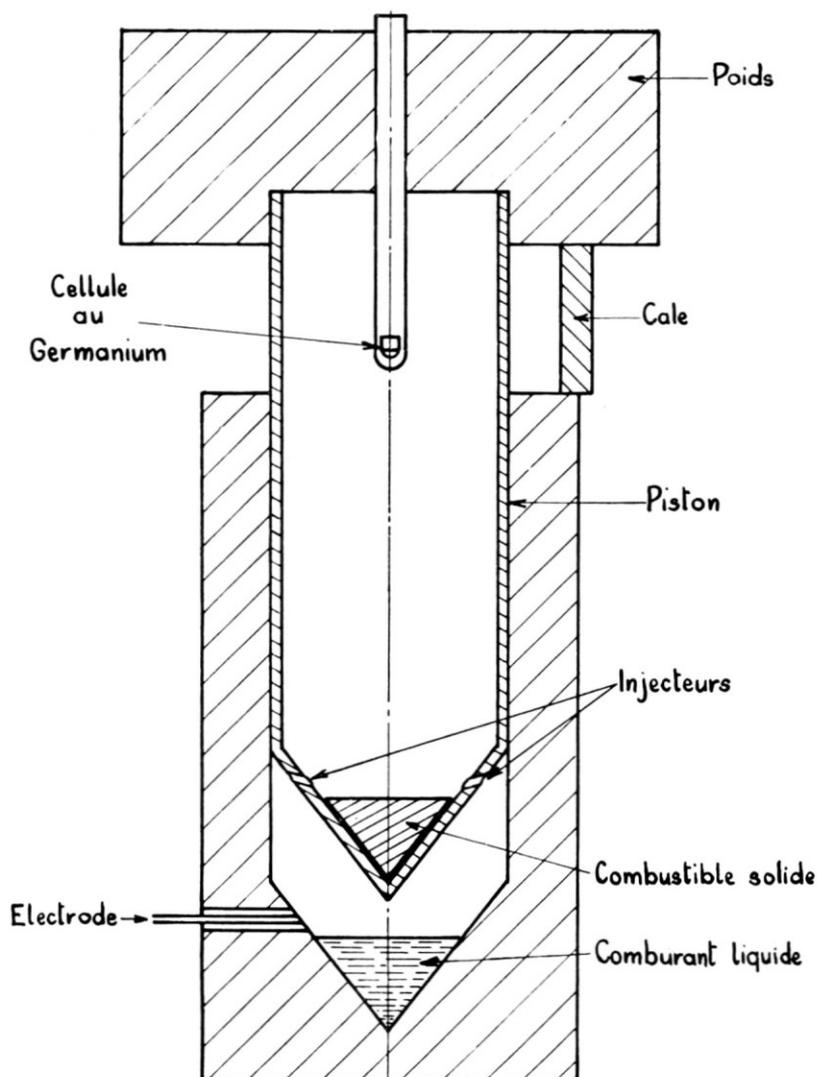


FIG. 5. Dispositif de mesure du délai d'allumage des lithergols.

qu'hypergoliques, l'inflammation n'a pas lieu. Pour remédier à cet inconvénient, un dispositif a été imaginé mettant en jeu une plus grande quantité de propergol. Il comprend deux parties principales (Fig. 5).

— un cylindre, usiné dans un bloc d'acier inoxydable, se termine par une partie conique qui reçoit le comburant;

— un piston se déplace dans cette partie cylindrique et se termine également par un cône de même angle au sommet que le précédent; ce piston également en acier inoxydable est creux, le profil extérieur étant

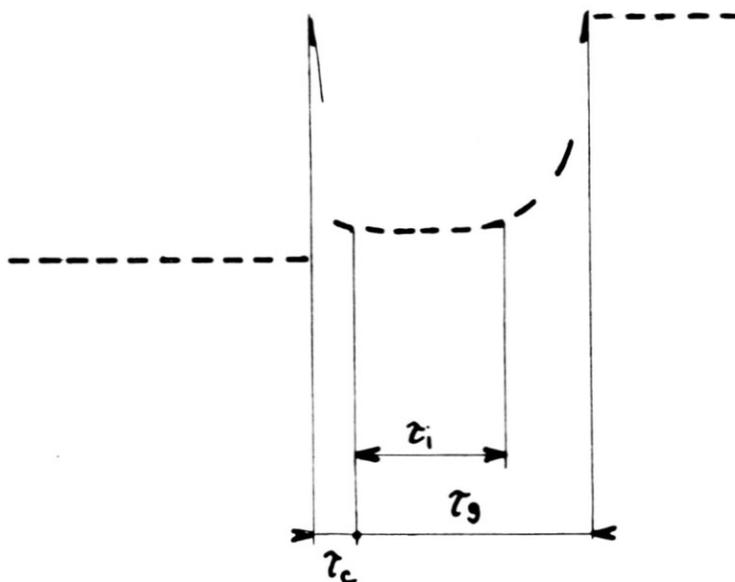
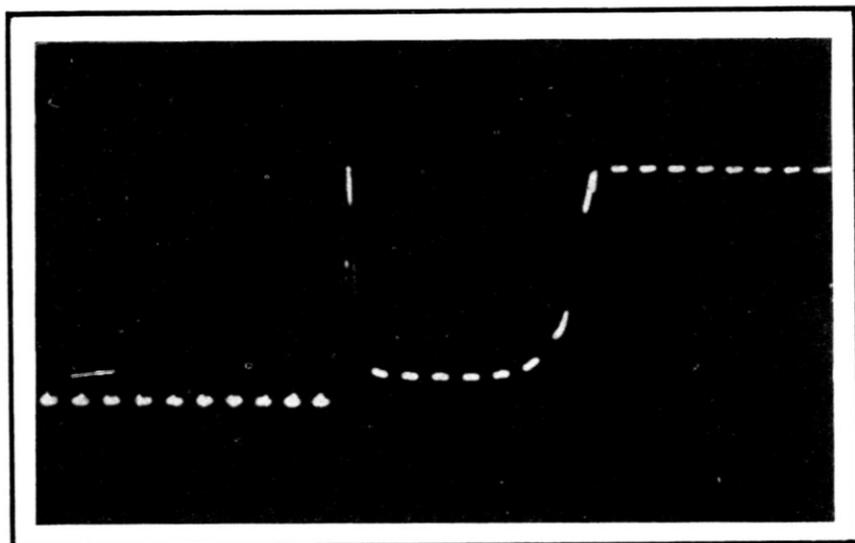


FIG. 6. Enregistrement du délai: méthode du piston.

identique au profil intérieur. C'est dans le cône intérieur qu'est placée une capsule conique contenant le combustible solide. Quatre orifices d'injection sont ménagés à la partie supérieure du cône du piston, l'axe des orifices étant dirigé vers le sommet du cône. Le piston est surmonté d'un poids, et une cale d'une certaine hauteur est placée entre le poids et le cylindre. Si on enlève brusquement cette cale, le piston tombe et dans son mouvement refoule vers le haut le comburant placé dans le cylindre inférieur qui passe ensuite à travers les orifices et arrive rapidement en contact avec le combustible. Le passage du comburant est détecté grâce à une électrode placée près des orifices. Le temps qui s'écoule entre le passage du comburant et son arrivée à la surface du combustible est de l'ordre de la milliseconde, il définit la constante de l'appareil. Les premières réactions chimiques et l'inflammation sont détectées comme dans le dispositif précédent par une cellule au germanium sensible au rayonnement infra rouge. L'enregistrement du délai se fait sur oscillographe cathodique de la manière suivante:

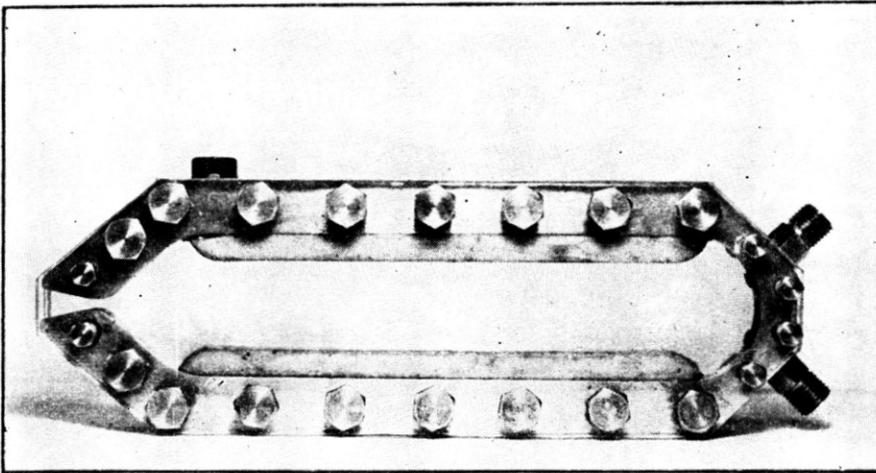


FIG. 7. Photographie d'une chambre à parois transparentes utilisée pour l'étude de la combustion des lithergols.

Le Wehnelt est modulé à la fréquence étalon de mille périodes par seconde. Au passage du comburant devant l'électrode, on observe une première impulsion très brève qui définit l'origine des temps. Le spot revient ensuite au zéro. La cellule enregistre alors au bout d'un certain temps la variation d'énergie lumineuse au cours des premières réactions chimiques jusqu'à l'apparition de la flamme.

Un exemple d'enregistrement obtenu est donné sur la Fig. 6. On détermine deux délais:  $\tau_i$  correspondant au temps nécessaire pour observer

les premières réactions chimiques,  $\tau_g$  est le délai global ( $\tau_c$  correspond à la constante de l'appareil).

2.1.2—*Microfusées*—La chambre à voyant mise au point pour ces mesures comporte un foyer de section rectangulaire dont les deux parois latérales sont constituées par deux plaques de Plexiglas. Le système d'injection du comburant comprend deux jets identiques formant un angle de  $90^\circ$ . Le combustible est collé sur la paroi de la chambre comme indiqué sur la Fig. 7. La mesure du délai se fait à l'aide du film pris à grande vitesse

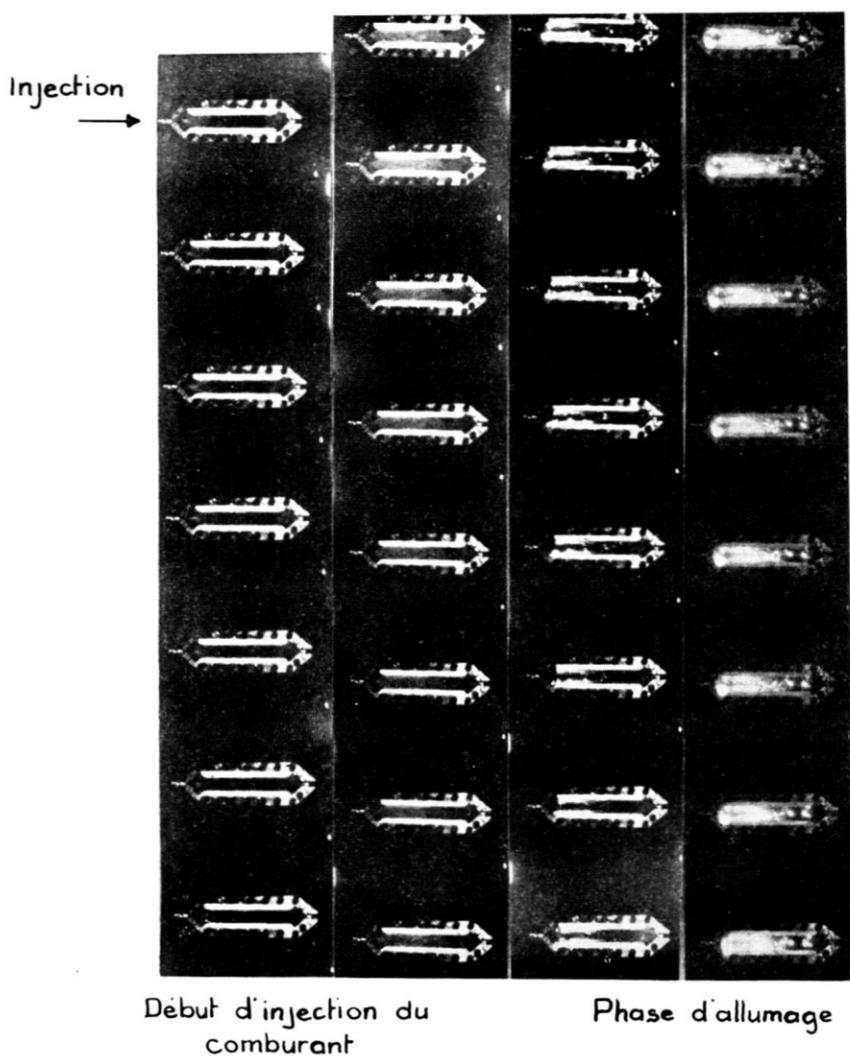


FIG. 8. Allumage des lithergols. Film pris à une cadence de 3000 images par seconde.

au cours de la phase d'allumage. On observe aussi l'arrivée du comburant (Fig. 8), l'apparition des premières réactions chimiques et la flamme qui se manifeste par de petits points très lumineux à la surface du combustible du côté du système d'injection, la flamme se propage ensuite tout le long du bloc combustible.

### 2.2—Influence des paramètres physiques et chimiques sur les conditions d'allumage

Il est particulièrement intéressant de déterminer l'influence des divers paramètres physico-chimiques sur le délai d'allumage afin d'obtenir un départ progressif de la combustion sans pointe de pression excessive. Les facteurs physiques et chimiques agissant sur le délai ont été étudiés par les méthodes résumées dans le paragraphe précédent, nous allons donner brièvement quelques résultats.

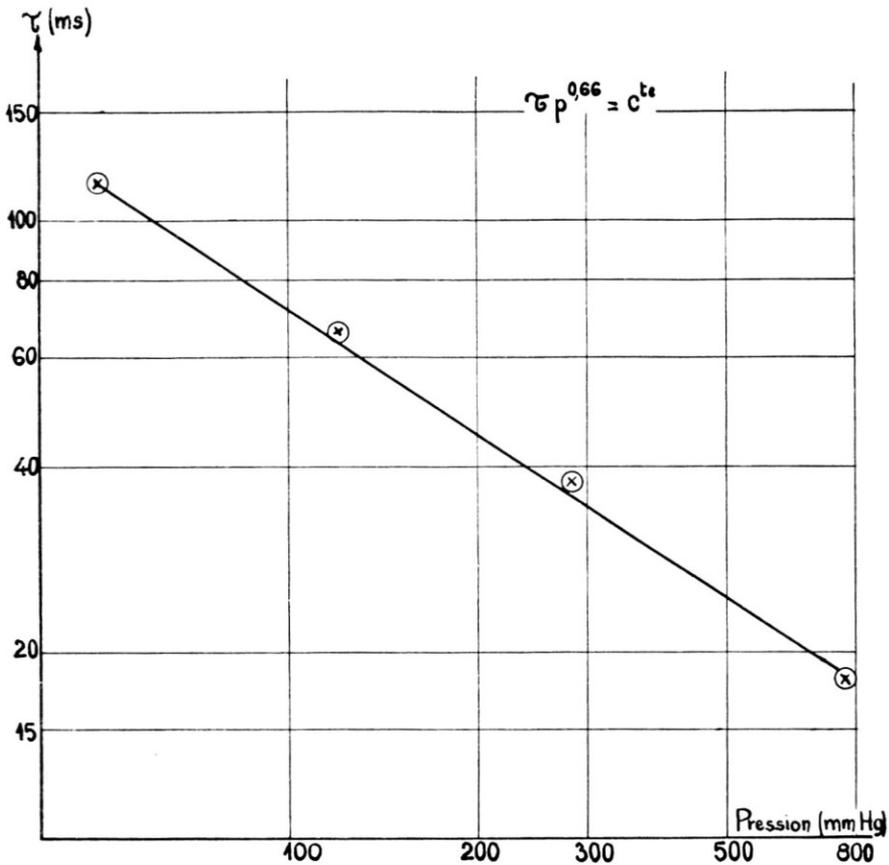


FIG. 9. Variation du délai d'allumage (méthode de la goutte) en fonction de la pression (10% de A dans B).

Les principaux paramètres agissant sur le délai d'allumage sont les suivants:

- la pression du milieu ambiant,
- la température des corps actifs,
- la nature des gaz environnant la zone de réaction,
- le système d'injection et la distribution du comburant,
- la nature des corps actifs.

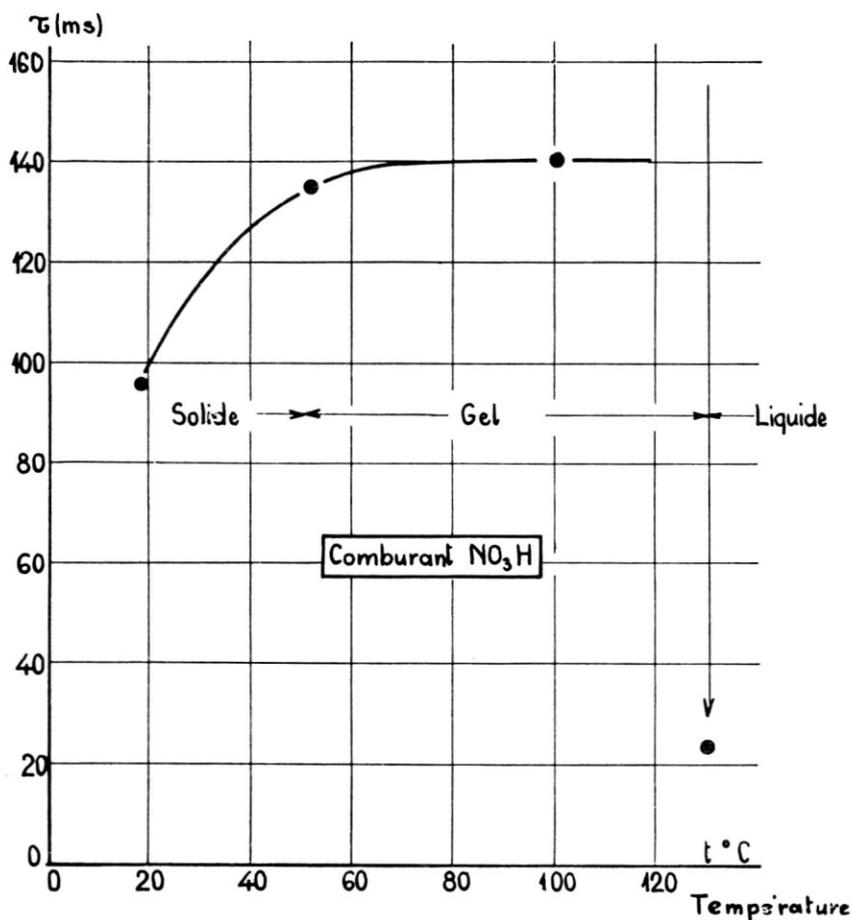


FIG. 10. Variation en fonction de la température du délai d'allumage influence de l'état physique { combustible solide composite }  
comburant NO<sub>3</sub>H

2.2.1—*Influence de la pression*—L'influence de la pression a été étudiée avec la méthode de la goutte. Dans ce cas, le volume des gaz formés au cours de la combustion est négligeable par rapport au volume de l'enceinte de sorte que l'on peut admettre une pression sensiblement con-

stante pendant la phase d'allumage. Les lois obtenues (Fig. 9) sont de la forme  $\tau p^n = \text{constante}$  avec un exposant  $n$  égal à 0,66 avec les propegols utilisés. Les basses pressions font donc apparaître de longs délais. Ces résultats sont analogues à ceux déjà obtenus avec les propegols liquides<sup>(7)</sup>.

2.2.2—*Influence de la température du combustible*—L'influence de la température du combustible sur le délai d'allumage est très variable. Deux cas types sont donnés montrant à la fois l'importance de l'état physique du combustible et de la nature du comburant. L'accroissement de la tem-

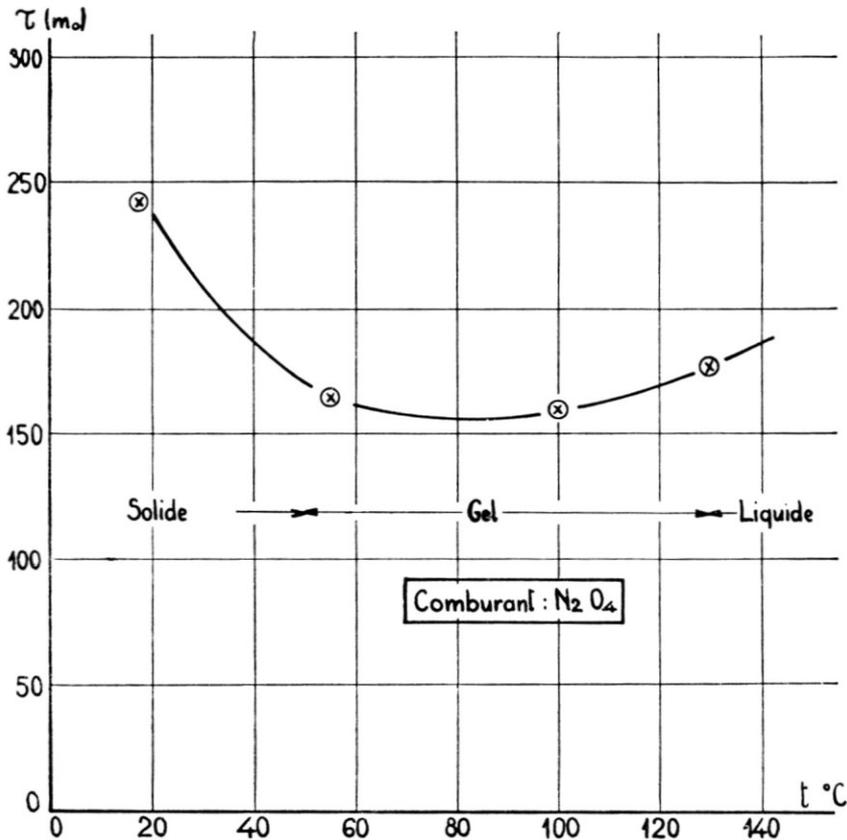


FIG. 11. Variation en fonction de la température du délai d'allumage influence de l'état physique { combustible solide composite }  
 { comburant N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> }.

pérature du combustible modifie sa structure interne: du solide, il passe à l'état de gel et à partir d'une certaine température, il devient liquide. Le délai d'allumage pendant ces divers états croît avec la température lorsque le comburant est l'acide nitrique, puis à la transition (gel-liquide)

(Fig. 10) le délai chute brusquement puisqu'il passe de 140 à 20 milli-secondes.

Avec  $N_2O_4$  et le même combustible, le délai diminue avec la température, passe par un minimum aux environs de  $80^\circ C$  et augmente légèrement lorsqu'on atteint la phase liquide (Fig. 11).

2.2.3—*Influence de la nature du gaz environnant la zone de réaction*—Comme l'indiquent les photographies de la Fig. 2, l'apparition de la flamme a lieu dans la phase gazeuse et les gaz formés à partir de la réaction chi-

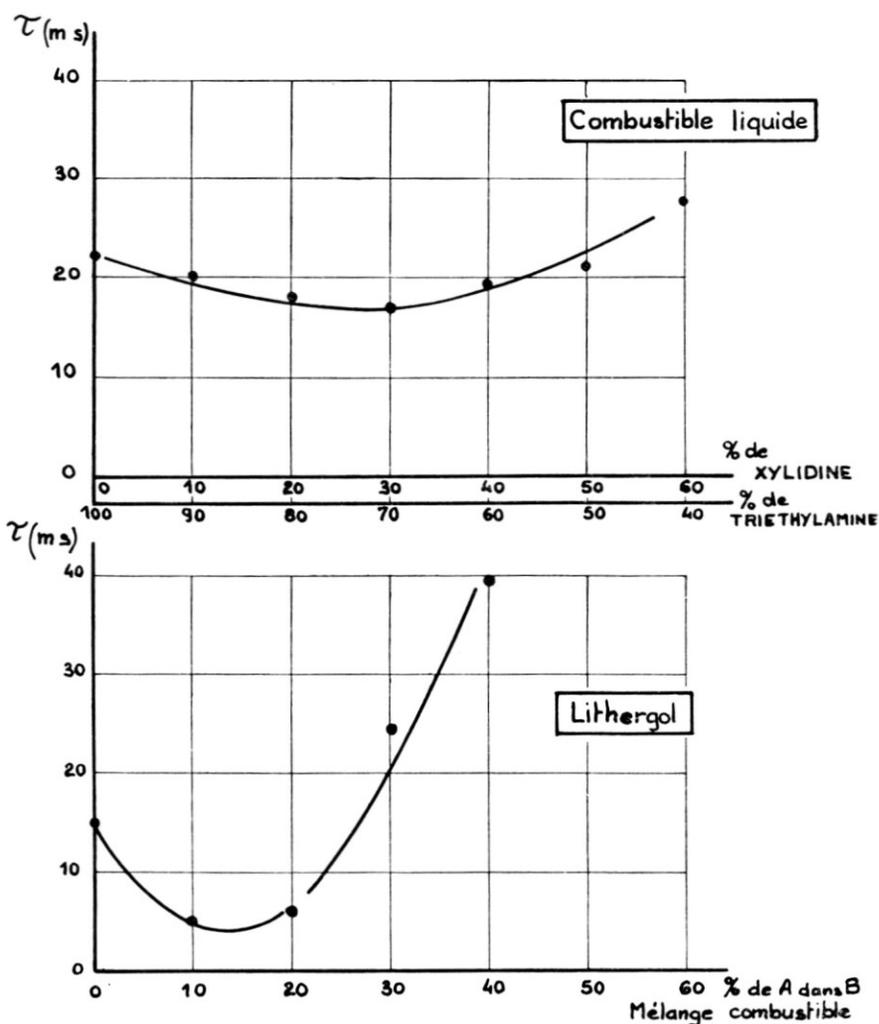


FIG. 12. Variation du délai d'allumage en fonction de la proportion de composés hypergoliques contenus dans le mélange combustible. (Appareil à piston.) (Comparaison avec les combustible liquides.)

mique de la zone de contact contiennent à la fois des éléments combustibles et des éléments comburants (air) celui-ci modifie le délai, en effet, les éléments combustibles peuvent choisir le comburant du milieu extérieur plus actif que les dérivés oxygénés de l'azote.

2.2.4—*Influence de la nature des corps actifs*—Le délai d'allumage est très sensible à la nature du combustible et des délais très courts ont pu être obtenus avec certaines substances. Dans le cas des fusées à lithergols, on utilise généralement des mélanges de plusieurs combustibles afin d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques. On constate comme dans le cas

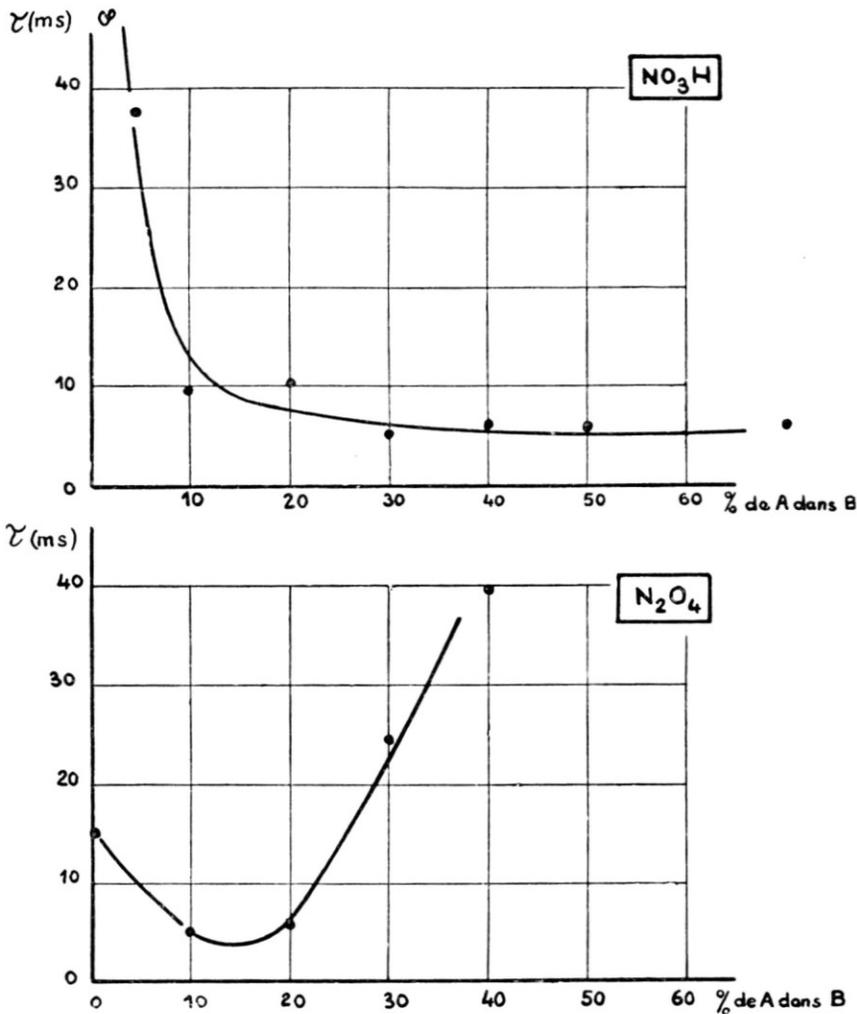


FIG. 13. Influence de la nature du comburant sur le délai d'allumage (Dispositif à piston).

des combustibles liquides que les mélanges ont des délais plus courts que les substances prises séparément. La Fig. 12 illustre ce fait: la courbe du haut correspond à un combustible liquide mélange triéthylamine-xylidine, le délai le plus court est obtenu pour 30% de xylidine; la courbe du bas correspond à un mélange de deux combustibles solides entre 10 et 20% de A dans B, on obtient des délais de l'ordre de 5 millisecondes.

La nature du comburant peut modifier cette propriété et les délais obtenus sont très différents lorsqu'on passe de  $\text{NO}_3\text{H}$  à  $\text{N}_2\text{O}_4$  (Fig. 13). Avec  $\text{NO}_3\text{H}$ , le délai de la substance A est infini alors qu'il est de 15 millisecondes avec  $\text{N}_2\text{O}_4$ , avec B, les résultats sont inversés.

En conclusion, la nature chimique du comburant et du combustible a une action très importante sur le délai d'allumage.

### 2.3—Pointe de pression au départ

Comme dans les foyers de fusées à propergol liquide, le délai d'allumage va déterminer la pointe au départ mais avec les lithergols, cette pointe est en général moins aiguë et s'étend sur plusieurs millisecondes. En pre-

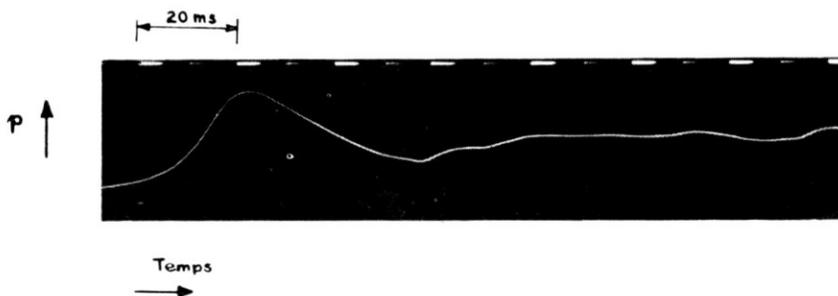


FIG. 14. Pointe de pression au départ.

mière approximation, on peut admettre que la pointe de pression est proportionnelle au débit de propergol injecté (fraction liquide) et vaporisé (fraction solide) pendant le délai  $\tau$ .

$$P \ll k\tau \langle \dot{m} \rangle \quad (1)$$

avec comme définition du débit moyen

$$\langle \dot{m} \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [\dot{m}_l(t) + \varphi(t) \rho_s A_b v_s] dt, \quad (2)$$

où  $\dot{m}_l(t)$  est le débit liquide injecté et  $\varphi(t)$  la fraction du combustible, vaporisée à l'instant  $t$ ,  $\rho_s$  la masse spécifique du combustible,  $A_b$  la surface de combustion,  $v_s$  la vitesse d'ablation de la matière combustible.

La pointe de pression est donc d'autant plus importante que le délai est long, que le débit de comburant est important et que la fraction de

combustible vaporisée sera élevée. Pour diminuer cette pointe de pression, on peut donc jouer dans le cas des fusées à lithergol sur  $\tau$ ,  $\dot{m}_i(t)$  et  $\varphi(t)$ . L'action sur  $\varphi(t)$  permet d'obtenir au cours du temps une augmentation progressive de la surface de combustion. La Fig. 14 est un enregistrement de la pression au départ, elle s'étend par suite de la valeur de  $\varphi(t)$  sur une vingtaine de millisecondes.

### 3. LE RÉGIME PERMANENT

Une coupe schématique d'une chambre de combustion d'une fusée à lithergol est représentée sur la Fig. 15. Le combustible solide entoure complètement les parois du foyer, le comburant est injecté à une extrémité

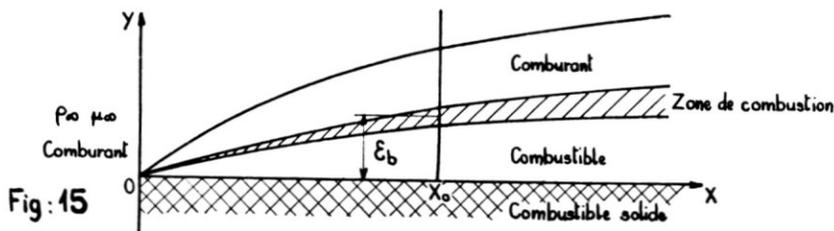


FIG. 15. Schéma théorique de la combustion des lithergols.

et vient en contact avec la surface du combustible, une flamme de diffusion s'amorce et se développe tout le long du foyer. Elle peut être schématisée suivant un problème plan comme indiqué sur la Fig. 15: La flamme divise le plan en deux régions, une zone contenant un excès de gaz combustible située entre la flamme et le combustible et, vers l'axe du

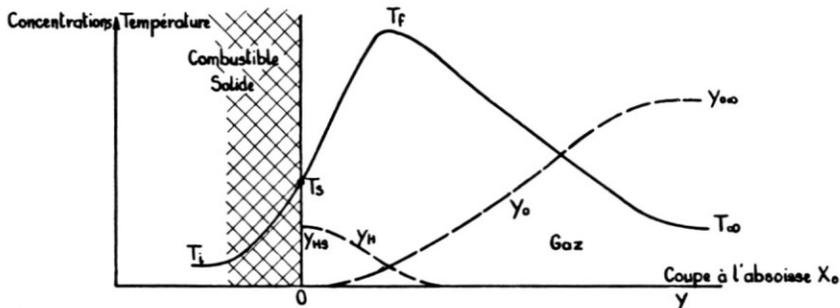


FIG. 16. Schéma théorique de la combustion des lithergols.

foyer, une zone comburante. Cette flamme se développe au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'injecteur. Dans une section d'abscisse  $X_0$  (Fig. 16) la température, en partant du solide et en allant vers les gaz comburants démarre à  $T_i$ , température initiale du bloc, parvient à  $T_s$  à la surface de séparation solide gaz, passe par un maximum dans la zone de flamme,

elle décroît ensuite jusqu'à la valeur  $T_\infty$  du gaz comburant. La concentration du comburant  $Y_H$  passe de  $Y_{HS}$  à la surface pour s'annuler dans la zone de flamme et la concentration du comburant  $Y_0$  passe de la valeur  $Y_{0\infty}$  dans le canal central à une valeur nulle près de la paroi. Le long de  $Y$  le rapport de mélange combustible carburant varie définissant une flamme de diffusion. Les échanges thermiques entre flamme et parois ont pour effet de transformer le solide en gaz, on observe alors une régression du combustible à une vitesse  $v_s$ . Cette vitesse comme dans le cas des fusées à poudre est un paramètre fondamental puisqu'elle est liée au fonctionnement du foyer. La détermination de  $v_s$  va être abordée dans ce qui suit tant sur le plan théorique qu'expérimental.

### 3.1—Etude théorique de la vitesse d'ablation

Le problème de l'évolution au cours du temps de la géométrie du combustible est un problème d'ablation avec combustion au voisinage de la paroi, mais alors que dans le cas de l'ablation, c'est le transfert de chaleur qui est intéressant à connaître, dans le cas des lithergols, on s'intéresse plutôt à la vitesse d'ablation. Les équations utilisées sont celles de la couche limite correspondant à la plaque plane compliquées par la présence des zones de diffusion et de combustion.

Les équations différentielles de base qui régissent les phénomènes correspondent aux équations fondamentales de l'aérothermochimie<sup>(8-13)</sup>.

On distingue :

(a) l'équation de continuité globale

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (3)$$

$x$  et  $y$  ayant la définition de la Fig. 16,  $u$  et  $v$  la vitesse de l'écoulement suivant  $x$  et suivant  $y$ .

(b) l'équation de conservation des espèces

$$\rho u \frac{\partial y_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial y_i}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_{ij} \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \frac{D_i^T}{T} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \dot{W}_i \quad (4)$$

où  $Y_i$  est la concentration massique des espèces =  $\rho_i/\rho$ ,  $D_{ij}$  est le coefficient de diffusion binaire entre les espèces  $i$  et  $j$  et  $D_i^T$  est un coefficient de diffusion dû aux gradients de température  $D_i^T = k_i^T D_{ij}$ ,  $\dot{W}_i$  est le taux de production chimique de l'espèce  $i$ .

(c) L'équation du mouvement :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( u \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0$$

(d) L'équation de la conservation de l'énergie:

$$\sum_i Y_i(C_p)_i \left[ \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = u \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_i \left[ (C_p)_i \left( \rho D_{ij} \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \frac{D_i^T}{T} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial y} - \sum \dot{W}_i h_i \quad (6)$$

avec la chaleur spécifique de chaque espèce  $(C_p)_i = \left( \frac{\partial h_i}{\partial T} \right)_p$ ,  $h_i$  étant l'enthalpie de chaque espèce comprenant l'énergie chimique et thermique. La résolution de ce système appliqué à l'étude générale de la combustion des lithergols est fort complexe, elle se modifie si l'on suppose le nombre de Prandtl  $\mu \frac{\bar{C}_p}{\lambda}$ , le nombre de Schmidt  $\frac{\mu}{\rho D_{ij}}$  ou le nombre de Lewis  $L_e = \frac{\rho D_{ij} \bar{C}_p}{\lambda} = \frac{P_r}{S_c}$  à l'unité ( $\bar{C}_p = \sum_i Y_i (C_p)_i$ ).

Cette résolution fait apparaître un paramètre de transfert identique à celui défini par D.B. Spalding<sup>(14)</sup> pour la combustion de gouttes de combustible; ce paramètre a pour expression:

$$B = \frac{h_\infty - h_s + Q}{h_{SH} - h_{IH} + L} = \frac{C_p(T_\infty - T_0) + Q}{C_s(T_s - T_i) + L} \quad (7)$$

où  $h_\infty - h_s$  est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer le comburant de la température  $T_\infty$  à la température de surface  $T_s$ ,  $Q$  est la chaleur libérée par la réaction de combustion par unité de masse,  $h_{SH} - h_{IH}$  est la chaleur contenue dans la partie solide et  $L$  est l'énergie pour faire passer l'unité de masse de combustible de l'état solide à l'état gazeux.

Après une résolution classique du système, on arrive à l'expression de la vitesse d'ablation qui est de la forme:

$$v_s = \frac{\rho_\infty u_\infty}{\rho_p} \psi(B) \frac{1}{Re^{1/2}} \quad (8)$$

$\rho_\infty u_\infty$  correspondant à la masse spécifique et à la vitesse du comburant en amont.  $Re = \frac{\rho_\infty u_\infty L}{\mu_\infty}$  est le nombre de Reynolds où intervient la longueur du bloc  $L$ .

Les valeurs de  $\psi(B)$  ont été tabulées par Emmons<sup>(13)</sup> pour une résolution exacte du système et pour une solution approchée correspondant à l'approximation de Rayleigh dans ce cas:

$$\psi(B) = \frac{1,174 \Theta(B)}{Re^{1/2}} \quad (9)$$

$\Theta$  et  $B$  étant reliés par la relation:  $B = \sqrt{\pi} \Theta e^{\Theta^2} (1 + \exp \Theta)$ .

Les valeurs de  $\psi(B)$  sont données sur la Fig. 17.

La vitesse d'ablation  $v_s$  est inversement proportionnelle à la masse spécifique du combustible, proportionnelle à la racine carrée du débit unitaire du comburant  $\sqrt{\rho_\infty u_\infty}$ ; elle croît avec l'énergie libérée par la combustion et décroît lorsque l'énergie contenue dans la partie solide  $L + C_s(T_s - T_i)$  augmente.

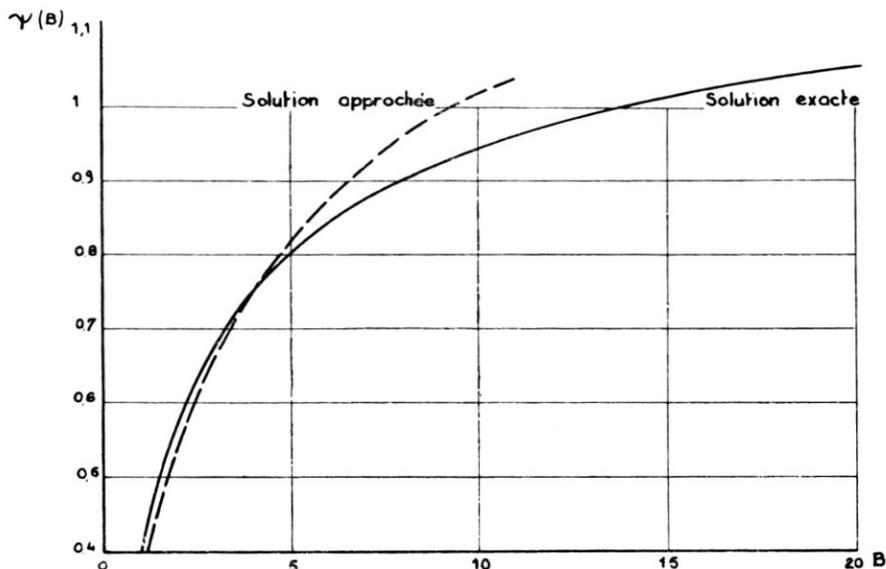


FIG. 17. Variation de la fonction  $\psi$  avec le paramètre de transfert  $B$ .

Ces lois sont à rapprocher de celles utilisées dans l'étude de la combustion de gouttes de combustible dans un écoulement et déduites de la relation de Frössling, ces lois appliquées au lithergol conduisent à une expression pour  $v_s$  de la forme

$$v_s = v_{s0}(1 + aR_e^{1/2}S_c^{1/3}) \quad (10)$$

où  $v_{s0}$  est la vitesse d'ablation en l'absence d'écoulement.

### 3.2—Etude expérimentale de la vitesse d'ablation

La première idée qui vient à l'esprit pour une étude fondamentale sur la vitesse d'ablation est d'utiliser un montage analogue à celui déjà mis au point pour la détermination de la vitesse de combustion des gouttes combustibles placées dans un écoulement. Un tel dispositif est schématisé sur la Fig. 18. Il comprend une pastille de combustible soit sphérique, soit cylindrique, placée dans des vapeurs comburantes dont la température peut varier entre 90 et 200°C. Avant l'essai, une chemise en téflon protège le combustible du comburant. Au moment de l'essai, un électro-aimant libère cette protection. La combustion s'amorce et le combustible brûle

au cours du temps. Un système d'écran diffusant est placé à contre jour pour bien détacher sur la photographie le contour du combustible. Les films pris dans ces conditions montrent une variation aléatoire de la géo-

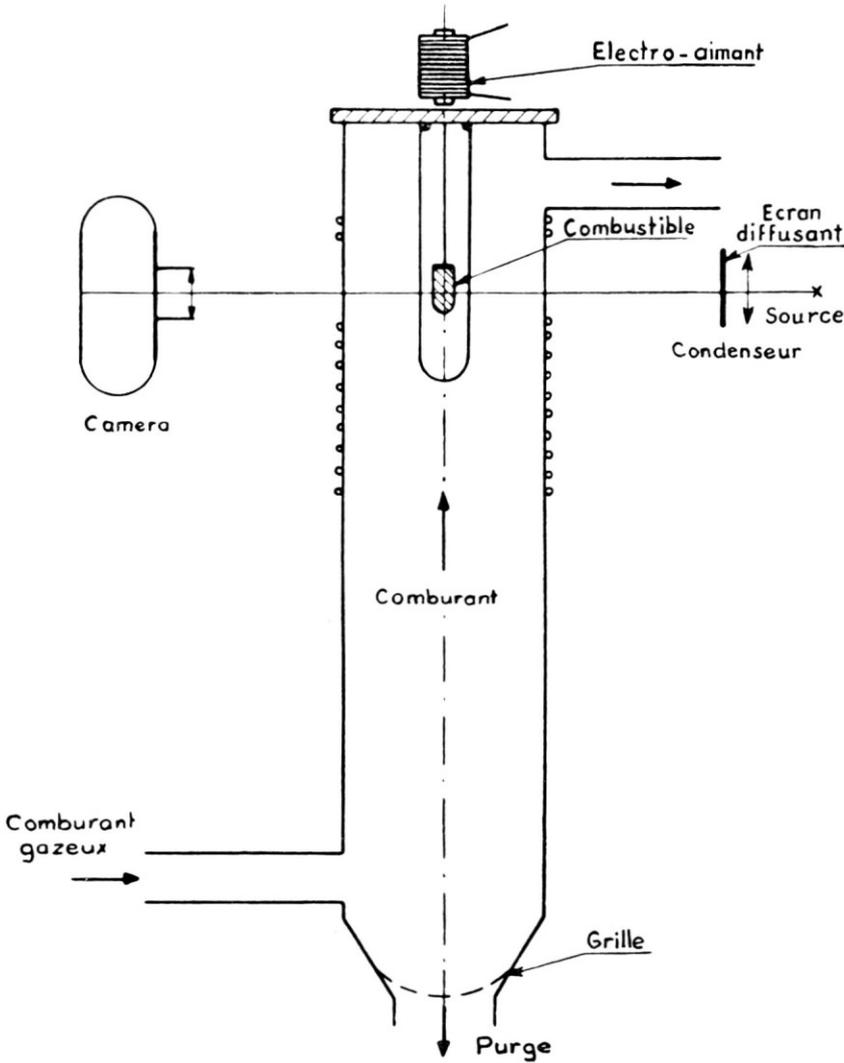


FIG. 18. Dispositif d'étude de la vitesse d'ablation.

métrie du combustible et il n'a pas été possible de déduire de ces enregistrements la vitesse d'ablation, les chiffres obtenus étant peu reproductibles (Fig. 19). L'étude sur propulseur a permis de préciser expérimentalement les lois de vitesse d'ablation du combustible.



FIG. 19. Combustion d'un cylindre de combustible dans un comburant gazeux.

3.2.1—*Fonctionnement d'une fusée à lithergol*—Le foyer d'une fusée à lithergol est schématisé sur la Fig. 20 dans le cas d'un bloc combustible avec perforation centrale. A partir de cette géométrie on définit trois paramètres de section :

$$\left. \begin{aligned} K_p &= \frac{A_p}{A_c} = \frac{\text{Section de passage des gaz}}{\text{Section du col de la tuyère.}} \\ K_b &= \frac{A_b}{A_c} = \frac{\text{Surface du solide en contact avec la flamme}}{\text{Surface du col.}} \\ K_i &= \frac{\mu_i A_i}{A_c} = \frac{\text{Section efficace d'injection du comburant}}{\text{Surface du col.}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Le fonctionnement de la fusée à lithergol dépend de deux équations traduisant le rapport de mélange et la conservation du débit<sup>(6), (14)</sup>.

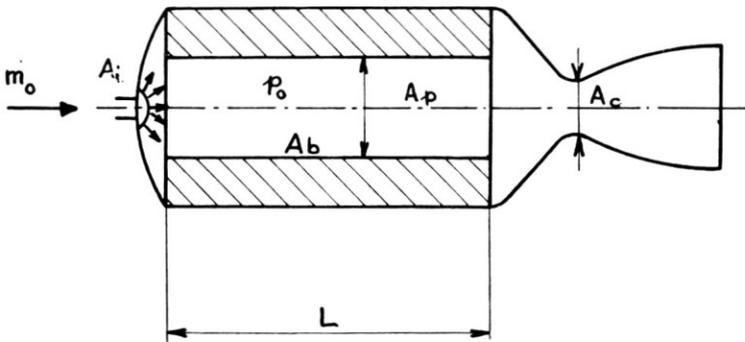


FIG. 20. Coupe du foyer d'une fusée à lithergol (notations).

Le rapport de mélange  $\psi$  est défini comme le quotient du débit combustible  $\dot{m}_s = \rho_s A_b v_s$  par le débit total traversant le col de la tuyère  $\dot{m}_t = \frac{p_0 A_c}{C^*}$  d'où la valeur de  $\psi$

$$\psi = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_t} = \frac{\rho_s v_s c^*}{p_0} K_b \quad (12)$$

dans cette expression  $C^*$  est la vitesse caractéristique, dans une théorie approchée, elle dépend du rapport  $\gamma$  des chaleurs spécifiques, de la température de fin de combustion  $T_c$  et du nombre de moles contenues dans l'unité de masse des gaz brûlés :

$$C^* = \Gamma(\gamma) \sqrt{nRT_c}$$

La conservation du débit donne la relation, elle s'écrit en introduisant le paramètre  $\psi$  :

$$K_i C^* \sqrt{2\rho_i(p_i - p_0)} = (1 - \psi)p_0$$

Les équations (12) et (13) dépendent par l'intermédiaire de  $\psi$  de la vitesse d'ablation. D'après la théorie du paragraphe 3.1,  $v_s$  est une fonction du débit unitaire traversant le canal central  $q_{\infty} u_{\infty} = \frac{\dot{m}}{A_p} = \frac{p_0}{K_p C^*}$ , de la pression  $p_0$  et de la température de fin de combustion  $T_f$  qui peut être remplacée la vitesse caractéristique  $C^*$ , l'expression devient alors en première approximation :

$$v_s = ap_0^z \left( \frac{p_0}{K_p C^*} \right)^{\beta} C^{*\gamma} \quad (14)$$

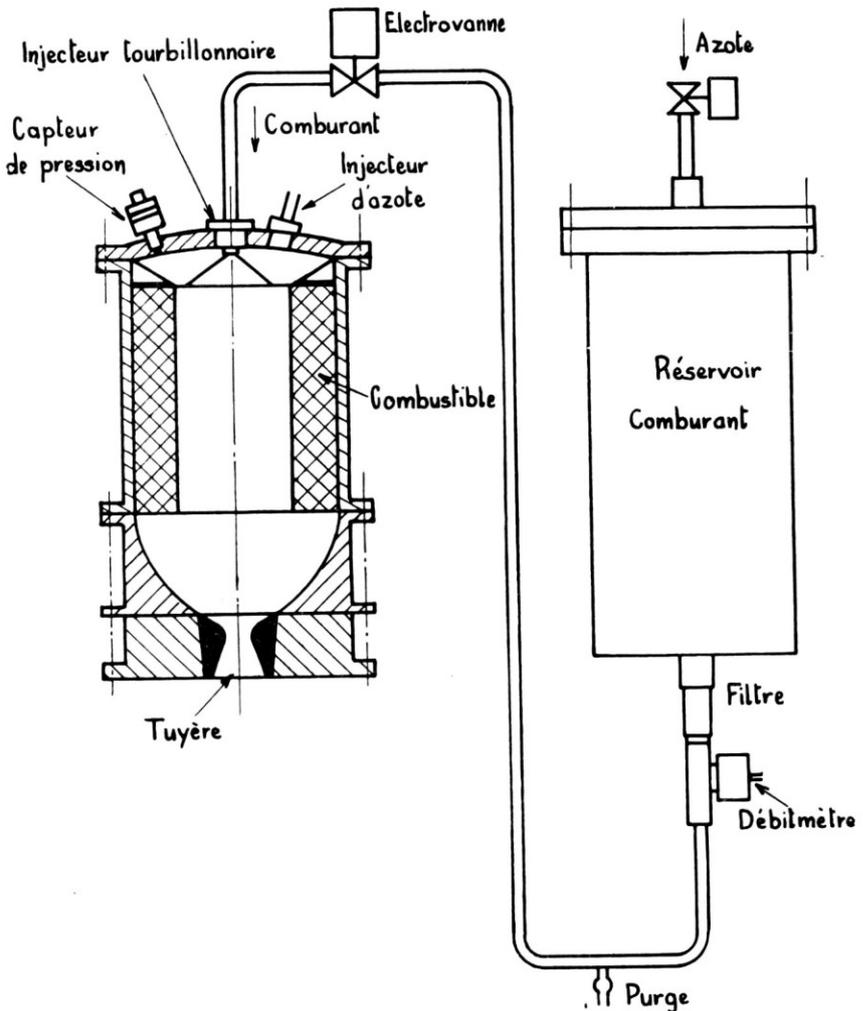


FIG. 21. Schéma du propulseur et de son alimentation.

A partir de cette définition de  $v_s$ , l'expression (12) devient:

$$\psi = a \rho_s K_b K_p^{-\beta} c^{*(\gamma-\beta+1)} p_0^{(\alpha+\beta-1)} \quad (15)$$

A partir de ces relations et des résultats expérimentaux obtenus, on doit justifier la relation 14 et déterminer en particulier les valeurs des paramètres  $a$  et des exposants  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

3.2.2—*Description du propulseur et résultats expérimentaux*—Le propulseur utilisé pour l'étude de la combustion des lithergols possède une poussée variant entre 5 et 15 kg/cm<sup>2</sup> suivant la pression de chambre. Il est schématisé sur la Fig. 21; il comprend une chambre de combustion cylindrique dans laquelle est coulé le combustible; un injecteur du type tourbillonnaire assure une répartition convenable du comburant sur la surface du com-

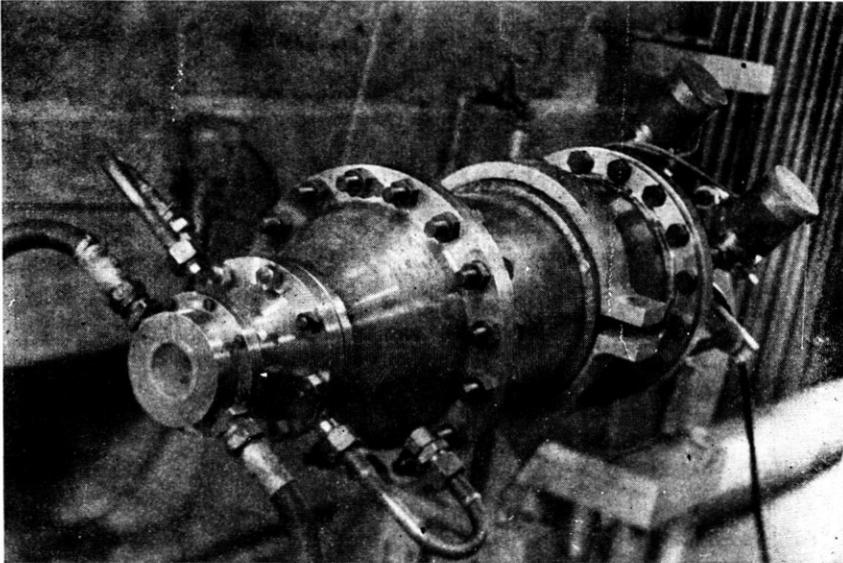


FIG. 22. Aspect extérieur du propulseur.

bustible; la tuyère est un alliage à base de tungstène permettant de résister aux hautes températures, le système d'alimentation est à gaz sous pression. Sur ce propulseur, on mesure le débit de comburant, la pression dans le foyer et dans le système d'injection, le débit de combustible étant déterminé par pesée. La vue extérieure d'un propulseur de plus grosse dimension mais basée sur le même principe est donnée sur la Fig. 22.

Partant d'un bloc cylindrique de longueur  $L$ , les paramètres géométriques  $K_b$  et  $K_p$  ont pour valeurs:

$$K_b = \frac{2L}{R_c^2} R(t), \quad K_p = \frac{[R(t)]^2}{R_c^2}$$

$R$  étant le rayon du canal central à l'instant  $t$  et  $R_c$  le rayon au col de la tuyère.

L'expression du paramètre  $G = K_b K_p^{-\beta}$  qui intervient dans l'expression de  $\psi$  devient alors:

$$G = \frac{2L}{R_c^{2-2\beta}} [R(t)]^{1-2\beta}$$

La variation de la pression au cours du temps va définir le rapport de mélange et une relation entre les divers exposants. L'enregistrement de la Fig. 23 montre que la pression reste constante pendant le tir ainsi que

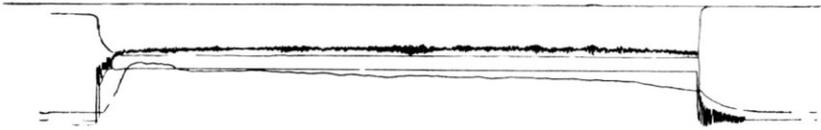


FIG. 23. Enregistrement des paramètres de fonctionnement pendant

le tir:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{pressions} \\ \text{poussée} \\ \text{débit} \end{array} \right\}$ .

le débit d'acide nitrique, cette constatation conduit à avoir une valeur du rapport de mélange constante, donc une valeur de  $G$  indépendante du temps ce qui se traduit par un exposant  $\beta = \frac{1}{2}$ . C'est là un premier

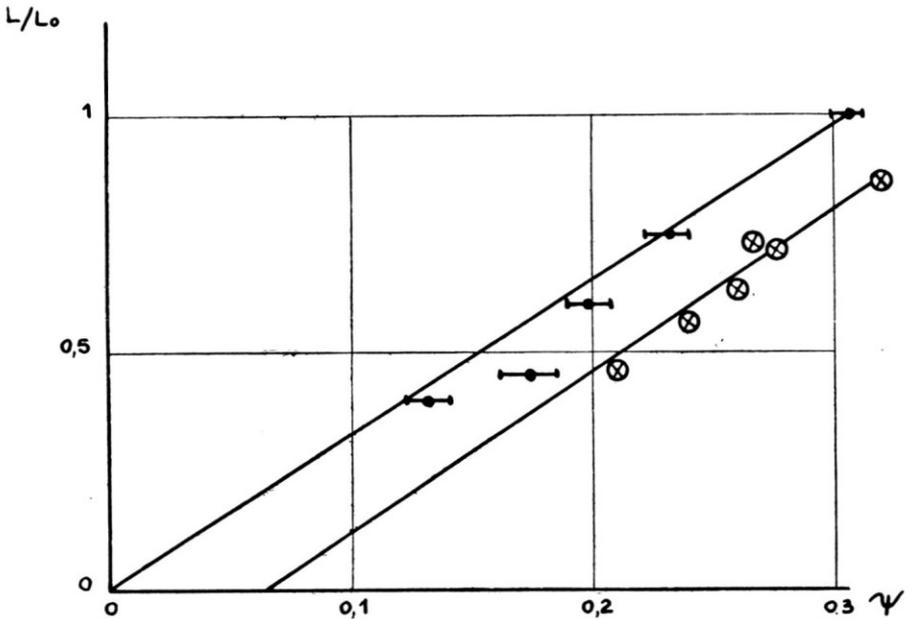


FIG. 24. Variation de  $L/L_0$  en fonction de  $\psi$ .

résultat dans l'évaluation de la vitesse d'ablation à partir d'essais sur propulseur. Cette valeur correspond bien à celle donnée par la théorie présentée au § 3.1.

Comme conséquence de ce résultat, l'expression du rapport de mélange  $\psi$  devient:

$$\psi = a_{O_2} c^{*(\gamma+1/2)} p_0^{(\alpha-0,5)} \frac{2L}{R_c}$$

Dans cette expression, il reste trois inconnues  $a$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  qui sont déterminées soit en faisant varier la longueur  $L$  du bloc, soit, pour une longueur donnée, en faisant varier la pression dans le foyer;  $C^*$  est calculé à partir

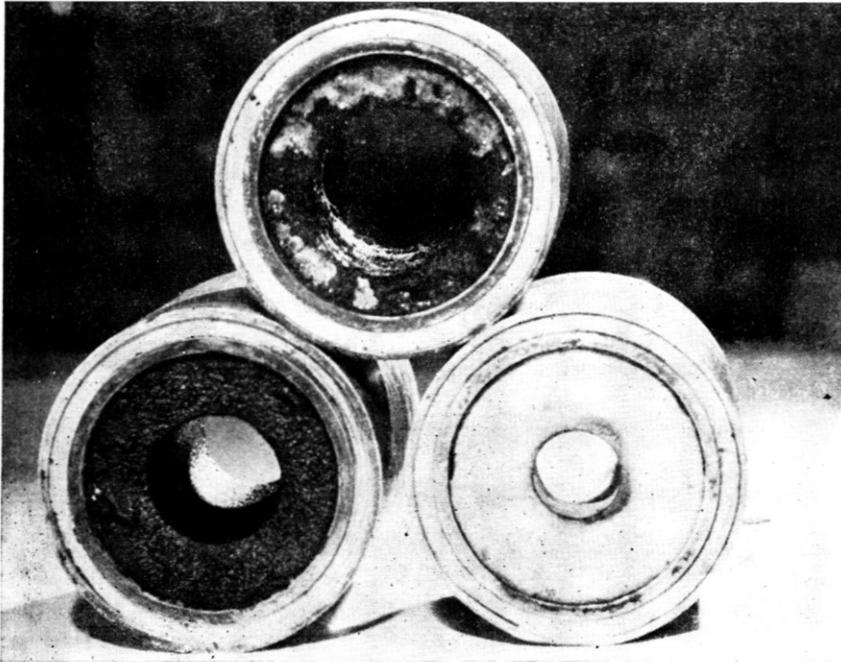


FIG. 25. Aspect du combustible { A avant l'essai }  
 { B après l'essai }.

de la mesure du débit global traversant la tuyère et de la pression  $p_0$ . On vérifie bien en particulier que  $\psi$  varie linéairement avec  $L$  (Fig. 25) en remarquant toutefois que pour certaines conditions de fonctionnement, la droite ne passe pas par l'origine. La zone intéressante de  $\psi$  avec les propergols étudiés, se situe entre 0,1 et 0,3.

Cette étude sur propulseur nous a permis de préciser les lois de vitesse d'ablation utilisables dans les fusées à lithergol. Bien que dans ce cas

de nombreux paramètres interfèrent, il a été cependant possible de justifier ces lois.

En un instant donné, l'épaisseur de combustion, excepté au voisinage de l'injecteur, est constante tout le long d'une génératrice. La Fig. 26 nous donne l'aspect du bloc avant et après combustion, le premier bloc a été arrêté après 5 secondes de fonctionnement, le deuxième après 10

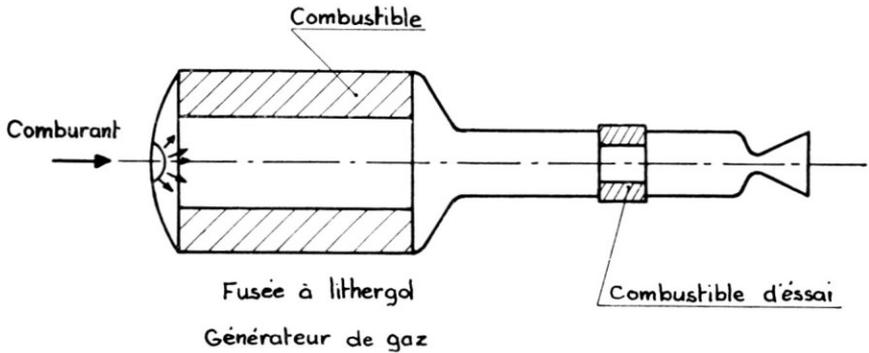


FIG. 26. Propulseur pour l'étude des vitesses d'ablation du combustible.

secondes. Les mesures géométriques ou des pesées permettent de contrôler l'épaisseur moyenne brûlée. Entre la vitesse initiale d'ablation  $(v_s)_0$ , le diamètre initial de la perforation centrale  $D_0$ , l'épaisseur de combustible brûlée  $e$  et le temps de combustion  $t_b$  on obtient la relation :

$$(v_s)_0 = \frac{e(e + D_0)}{D_0 t_b}$$

qui détermine  $(v_s)_0$  si  $e$  est mesuré avec une bonne précision.

Cette méthode du propulseur quoique ayant donné des résultats intéressants dans la détermination de la vitesse d'ablation pourrait être améliorée en utilisant un propulseur mieux adapté à cette étude. Il est schématisé sur la Fig. 26 et se compose d'une fusée à lithergol principale génératrice d'un gaz chaud comburant dont on peut faire varier le rapport de mélange en agissant sur la longueur du bloc. Ce propulseur se termine par un tube cylindrique qui contient le bloc de combustible à étudier, une tuyère placée à l'extrémité maintient une pression constante dans toute la veine de mesure.

#### 4. STABILITÉ DE LA COMBUSTION

Les instabilités de combustion dans les fusées à propergol liquide couvrent deux domaines, celui des basses fréquences correspondant à un couplage entre la combustion et le système d'injection et celui des hautes

fréquences déterminé par les modes acoustiques du foyer. Dans les fusées à propergol solide, le mode acoustique est le plus important et particulièrement le mode tangentiel. Donc, *a priori*, les fusées à lithergol devraient hériter à la fois des instabilités de combustion des liquides et des solides. Examinons tout d'abord le cas des basses fréquences qui sont dues pour la plupart à l'existence d'un délai entre l'injection et la combustion; les conditions de stabilité dépendent des paramètres géométriques du propulseur, des paramètres de fonctionnement mais également du rapport  $\frac{\tau}{t_S}$  où  $\tau$  est le délai séparant la combustion de l'injection du propergol et  $t_S$  le temps de séjour du propergol dans le foyer.

Généralement, dans le cas des fusées à propergol liquide, le délai est sensiblement le même pour tous les éléments de propergol pénétrant au même instant dans la chambre, il est très légèrement distribué autour d'une valeur moyenne. Par contre, si la même théorie des instabilités de basse fréquence peut s'appliquer à un foyer de fusées à lithergol, la notion de délai est modifiée.

Figeons à un instant donné la combustion, les fractions situées près de la tête d'injection correspondent à la combustion du combustible avec le comburant injecté à l'instant  $\tau_i$ .  $\tau_i$  comprend le délai de préparation du combustible, le temps de mélange avec le comburant et le temps de combustion. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du plan d'injection, il faut ajouter à  $\tau_i$  le temps nécessaire pour que le comburant arrive dans un plan d'abscisse  $x$ , ce temps a pour expression:

$$\tau(x) = \int_0^x \frac{dx}{u(x)}$$

$u(x)$  est la valeur moyenne de la vitesse dans le plan  $X$ .

En fin de bloc, le délai entre l'injection et la combustion a pour valeur:

$$\tau_L = \tau_i + \tau(L)$$

Le schéma qui intervient alors dans l'étude des instabilités de basse fréquence consiste à admettre un délai distribué depuis la valeur  $\tau_i$  jusqu'à  $\tau_L$ ;  $\tau_L$  est voisin du temps de séjour global,  $t_S$  du propergol dans le foyer, ce temps de séjour  $t_S$  est défini comme le quotient de la masse de propergol séjournant dans le foyer par le débit masse de propergol brûlé. Une étude théorique des instabilités de basse fréquence avec l'hypothèse du délai distribué montre que la stabilité du système est accrue si l'écart entre le délai maximum (ici  $\tau_L$ ) et le délai minimum  $\tau_i$  augmente. De ce point de vue, on se place dans le cas des fusées à lithergol dans de très bonnes conditions puisque  $\tau_i$  est petit par rapport à  $\tau_L$ , la différence  $\tau_i - \tau_L$  étant de l'ordre de grandeur du temps de séjour  $t_S$ .

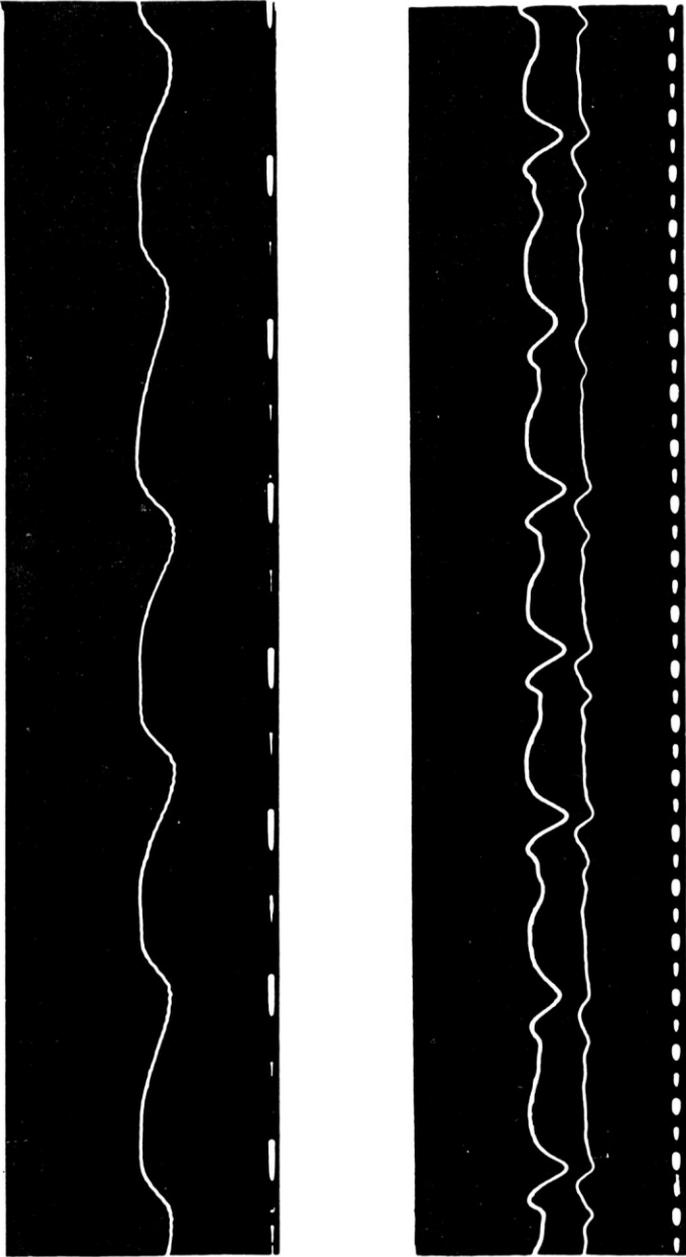


FIG. 27. Forme de signaux obtenus pendant le régime d'instabilité de basse fréquence.

A titre d'exemple, la théorie de L. Crocco montre<sup>(16)</sup> dans le cas où le délai  $\tau$  est lié à la pression suivant une loi de la forme  $\tau p^n = Cte$  que la condition de stabilité intrinsèque est donnée par l'inégalité  $n \leq \frac{1}{2}$  en supposant un délai distribué linéairement de  $\tau_i$  à  $\tau_L$  avec  $\tau_i$  petit, cette condition est moins restrictive puisque  $n \leq 1$ .

Cet accroissement de la stabilité de la combustion par rapport aux fusées à liquide est constaté expérimentalement. Dans des conditions de fonctionnement très diverses ainsi que pour des basses pressions de chambre, les courbes de pression enregistrées montrent une très grande stabilité de fonctionnement. Dans certains cas, lorsque la surpression d'injection devient très faible ou pour certaines configurations du bloc combustible et de l'injecteur, des instabilités de basse fréquence ont été observées. La forme des signaux obtenus est représentée sur la Fig. 27. Leur dissymétrie fait penser à un phénomène de relaxation. Ces instabilités se répercutent dans le foyer dans le système d'injection. Généralement, les variations de pression sont de faibles amplitudes allant jusqu'à 10% de la pression moyenne.

Les instabilités de haute fréquence sont avec les fusées conventionnelles du type acoustique, le mode tangentiel étant le plus dangereux. Les fusées à lithergol de par leur géométrie ne devraient pas être exemptes de ce type d'instabilité, cependant au cours des tirs qu'il nous a été donné de faire, aucune fluctuation de pression de haute fréquence n'a été détectée; cela tient peut-être à l'hétérogénéité du milieu, les diverses flammes de diffusion définissant un écoulement stratifié.

## 5. CONCLUSION

Les phénomènes de combustion dans les foyers de fusées à lithergol sont très complexes, nous avons essayé au cours de ce bref exposé de donner quelques résultats obtenus à l'ONERA concernant l'allumage, le fonctionnement du foyer et la stabilité de combustion. Bien que fragmentaire, ces résultats soulignent un certain nombre de points importants.

— L'allumage des fusées à lithergol est similaire à celui des fusées à liquide, le but des recherches étant de choisir des substances combustibles ayant un très court délai d'allumage avec le comburant utilisé, ce court délai étant la condition essentielle pour obtenir un bon départ. L'allumage et le réallumage de ces foyers sont peut-être possibles avec cette solution, cette possibilité étendant dans l'espace le domaine de fonctionnement du propulseur.

— Les lois définissant les vitesses de régression de la partie solide ont pu être établies à partir d'essais sur propulseur. Il serait bon de vérifier

ces lois par des expériences de laboratoire où les paramètres seraient plus accessibles que sur le propulseur.

— Pour l'instant, les phénomènes d'instabilité ne viennent pas gêner le fonctionnement du foyer mais ceux-ci peuvent apparaître lorsque les dimensions du propulseur vont augmenter.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. ROY, M., Thermodynamique des systèmes propulsifs à réaction. Dunod 1947.
2. KÁRMÁN, TH. VON, Conférences Sorbonne 1951-1952.
3. LANCASTER, O. E., Jet Propulsion Engine Volume XII High Speed Aerodynamics Princeton 1959.
4. ROY, M., Recherches théoriques sur le rendement et les conditions de réalisation des systèmes motopropulseurs à réaction. P.S.T. du Ministère de l'Air N° 1 (1930).
5. ROY, M., Discussion de table ronde sur les "Problèmes fondamentaux de Propulsion". AGARD Meeting (1959).
6. MOUTET, A. et BARRÈRE, M., Les fusées à lithergol ou fusées hybrides. R.A. N° 75 Mars-Avril 1960.
7. MOUTET, H., MOUTET, A. et BARRÈRE, M., Influence de la température et de la pression sur les délais d'allumage des hypergols. N.T. ONERA N° 45 (1958).
8. ROY, M., Aérodynamique fondamentale et notions d'Aérothermochimie. Publication ONERA N° 84 (1956).
9. KÁRMÁN, TH. VON, Fundamental Equations in Aerothermochemistry. Selected Combustion Problems II AGARD Butterworths Scientific Publications, London (1956).
10. PENNER, S. S., Introduction to the Study of Chemical Reactions in Flow Systems. AGARDOGRAPH N° 7 Butterworths Scientific Publications London (1955).
11. LEES, L., Convective Heat Transfer with Mass Addition and Chemical Reactions Combustion and Propulsion III AGARD Colloquium Pergamon Press 1958.
12. SCALA, S. M., Hypersonic Stagnation point Heat Transfer to Surface Having Finite Catalytic Efficiency. III U.S. National Congress of Applied Mechanics.
13. EMMONS, H. W., The Film Combustion of Liquid Fuel. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik Bd 36 S. 1. 80 Janvier-Février 1956.
14. SPALDING, D. B., Combustion of a single droplet and of a Fuel Spray. I-Selected Combustion Problems, Cambridge (1953). Butterworths Scientific Publications London.
15. BARRÈRE, M., JAUMOTTE, A., FREIJS DE VEUBEKE, B. et VANDENKERCKHOVE, J., Rocket Propulsion. Elsevier (1960).
16. CROCCO, L. et CHENG, S. I., Theory of Combustion Instability in Liquid Propellant Rocket Motors AGARDOGRAPH N° 8 Butterworths Scientific Publications.