



**CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES**



**Sciences Techniques Jeunesse**

**Département Education-Jeunesse du CNES**  
18, avenue Edouard Belin - 31401 TOULOUSE CEDEX 4  
Tél. : ( )5 61 27 31 14 / Fax : ( )5 61 28 27 67  
Site Internet : <http://www.cnes-edu.org/>

**ANSTJ - Secteur Espace**  
16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS  
Tél. : ( )1 69 02 76 10 / Fax : ( )1 69 43 21 43  
Site Internet : <http://www.anstj.org/espace/>

# **LA PROPULSION DES FUSEES EXPERIMENTALES**

## **Compte-rendu de journées d'études**

**Réédition Aout 2002**

Cahier ANSTJ

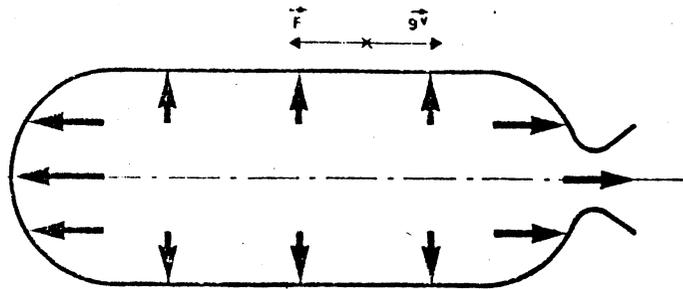
# LA PROPULSION DES FUSEES EXPERIMENTALES

Compte-rendu des VIIIèmes Journées d'Etudes

## I - PRINCIPE PHYSIQUE D'UN PROPULSEUR

### • Poussée

La force de propulsion d'un moteur à réaction est une force de pression appliquée sur l'avant et non équilibrée en raison de l'orifice pratiqué à l'arrière.



La force de réaction est proportionnelle au débit massique des gaz ( $q$ ) et à leur vitesse d'éjection ( $\vec{V}$ )

$$\vec{F} = -q \vec{V}$$

Le débit massique de gaz est la masse de gaz expulsée du propulseur par unité de temps.

$$q = \frac{dm}{dt}$$

### • Performances

Les performances d'une fusée de masse  $m$  sont ainsi déterminées, avec  $i$  l'état initial et  $f$  l'état en fin de combustion.

$$F = - \frac{dm}{dt} V = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_f = -V \int_i^f \frac{1}{m} \frac{dm}{dt} = -V \ln \left(\frac{m_i}{m_f}\right)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_f = V \ln \frac{m_i}{m_f}$$

La vitesse de la fusée en fin de combustion dépend donc du rapport massique  $\frac{m_i}{m_f}$

### • Pression de culot

La pression de culot apporte un terme correctif à la poussée.

L'orifice de sortie (col de la tuyère) a une surface  $S_c$  soumise à une pression  $P_c$  (pression des gaz éjectés). Après détente, les gaz ont une pression  $P_a$  qui est la pression atmosphérique environnante. Cette différence de pression nommée pression de culot est cause d'une poussée supplémentaire:

$$F = qV + (P_c - P_a) S_c$$

La poussée d'un réacteur fusée est donc maximale dans le vide ( $P_a = 0$ ).

## II - CONSTITUTION D'UN PROPULSEUR

Les propulseurs des fusées sont anaérobies car ils puisent l'oxygène nécessaire à leur combustion dans un corps chimique embarqué à bord de l'engin.

Le composé chimique se nomme alors propergol.

Le propulseur est constitué de :

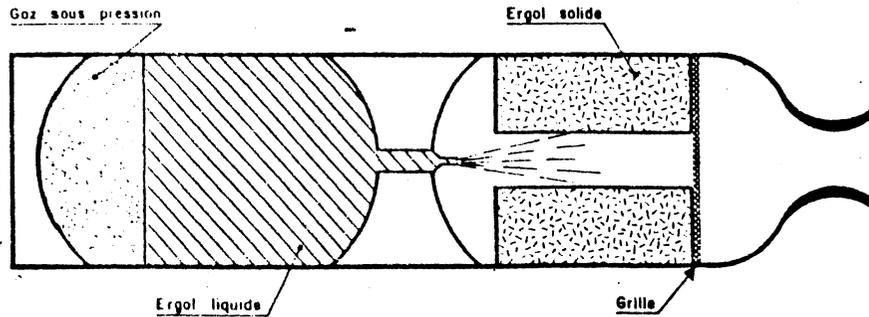
- un ou plusieurs réservoirs
- une chambre de combustion
- une tuyère qui augmente la vitesse d'éjection des gaz tout en dirigeant leur jet.

Dans la chambre de combustion, sont réunis deux ergols, composés chimiques qui vont réagir entre eux pour libérer de l'énergie. Ces ergols sont :

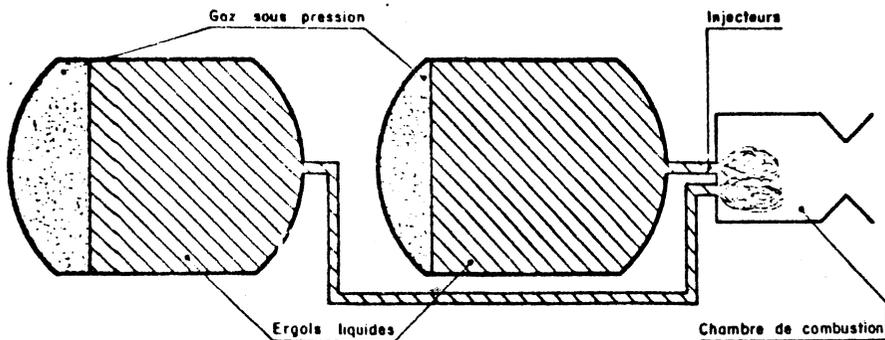
- le combustible ou carburant (réducteur) qui brûle
  - le comburant (oxydant) qui entretient la combustion.
- Ces deux corps mélangés forment le propergol.

Les ergols peuvent être soit liquide, soit solide, déterminant ainsi le type du moteur.

- moteur à propergol liquide  
constitué de deux ergols liquides, ces ergols sont mis sous pression et injectés dans la chambre de combustion.



- moteur à propergol hybride (ou lithergol) constitué d'un ergol liquide et d'un ergol solide. L'ergol liquide est mis en contact avec l'ergol solide dans la chambre de combustion.



- moteur à propergol solide (ou à poudre) constitué d'un mélange de deux ergols solides dans la chambre de combustion.

Lorsque les deux ergols réagissent par simple contact, le propergol est hypergol.

Lorsque un seul composé chimique joue à la fois le rôle de carburant et celui de comburant, il est dit monergol.

Dans le cas de fusées de petites dimensions, les propulseurs à poudre offrent de bonnes performances et ce sont ces moteurs qui seront ici étudiés.

### III - LES POUDRES

#### • Qualités d'une poudre

Les qualités demandées à une poudre portent sur ses performances et sa mise en oeuvre.

Les performances dépendent, hormis la masse, surtout de la vitesse d'éjection des gaz de combustion.

Cette vitesse nécessite :

- une température très haute donc le pouvoir calorifique de la poudre élevé;
- une masse moléculaire des gaz faible;
- un rapport masse sur puissance le plus petit possible;
- des conditions de pression et de température compatibles avec l'enveloppe et l'allumeur;
- une bonne stabilité dans le temps.

La mise en oeuvre consiste en :

- une grande sécurité d'emploi en particulier lors du transport et du stockage;
- une réalisation pas trop complexe;
- un approvisionnement facile;
- un faible prix de revient.

## • Constitution d'une poudre

Une poudre se compose en général de :

- un propergol, mélange de combustible et comburant;
- des adjuvants qui jouent un rôle chimique, mécanique ou balistique;
- un inhibiteur, isolant thermique qui permet de réguler la vitesse de combustion ou de protéger des parties mécaniques.

## • Caractéristiques d'une poudre

- Le coefficient de débit est le rapport du débit massique ( $q$ ) sur le produit de la pression de la chambre de combustion ( $P_c$ ) par la surface du col de la tuyère ( $S_c$ ).

$$C_D = \frac{q}{P_c S_c}$$

en seconde par mètre ( $\text{s m}^{-1}$ )

- la vitesse caractéristique qui est l'inverse du coefficient de débit

$$C = \frac{1}{C_D}$$

- l'impulsion spécifique qui est le rapport de la poussée du propulseur ( $F$ ) sur le poids de propergol consommé par seconde ( $q_0 \gamma_0$ ).

$$I_{sp} = \frac{F}{q_0 \gamma_0}$$

avec  $g_0$  accélération de la pesanteur au niveau du sol d'où  $I_{sp}$  en secondes.

Une poudre se distingue tout d'abord par son aspect physique, elle est :

- hétérogène : combustible et comburant sont deux composants distincts;
- homogène : le même composant tient lieu de carburant et de comburant.

## • Les poudres hétérogènes

Il en existe deux principaux types :

- la poudre noire dont le carburant est du nitrate de potassium et le comburant un mélange de soufre et de carbone.

Cette poudre est instable dans le temps, très dangereuse et de ce fait peu usitée.

- les poudres composites dont le combustible est également un liant pour donner une forme au bloc de poudre.

Pour limiter le plus possible le taux de liant, qui n'a pas de rendement, sont utilisés hydrocarbures (asphaltes, goudron) ou des matières plastiques (polyéther, polyuréthanes). Les combustibles les plus employés sont :

- les résines polyvinyliques : matières thermoplastiques ramollissant vers  $150^\circ \text{C}$  et faciles à mouler;
- les polybutadiènes dont les propriétés élastiques sont voisines de celle du caoutchouc;
- les polyuréthanes possédant une bonne élasticité et une bonne résistance à la chaleur en donnant à la poudre une impulsion spécifique élevée;
- les silicones : combustibles les plus récents qui, ne possédant pas de dérivés gazeux, ne forment pas de bulles de gaz dans le bloc de poudre.

Le combustible s'enrichit souvent d'une poudre métallique pulvérulente qui dégage une grande énergie par combustion.

Y est ajouté un comburant qui peut être un sel de sodium, de potassium ou d'ammonium tels :

- le nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )
- le perchlorate d'ammonium ( $\text{ClO}_4\text{NH}_4$ )
- le perchlorate de potassium ( $\text{KClO}_4$ )

Les perchlorates sont les plus utilisés car plus riches en oxygène.

L'impulsion spécifique est d'environ 250s.

Les propulseurs ANTILOPE et GAZELLE utilisent la poudre "plastolite" (la terminaison "ite" indique la présence d'aluminium) composée de :

- perchlorate d'ammonium
- chlorure de polyvinyle
- aluminium
- adjuvants divers.

### • Les poudres homogènes

Les plus connues sont les colloïdales qui sont obtenues en gélant un support nitré.

Si ce support est uniquement à base de nitrocellulose, la poudre est dite à simple base telle la poudre B (poudre à canon).

Les poudres à double base utilisent quant à elles un mélange de nitrocellulose et de nitroglycérine.

Les poudres à triple base possèdent en plus de la nitroguanidine, antilueur et refroidisseur.

Les autres éléments entrant dans la composition des poudres homogènes sont :

- le dinitrate de diéthylénglycol,
- le nitropolystyrène,
- des stabilisants,
- des adjuvants balistiques ou mécaniques.

Les propulseurs CABRI et FAON utilisent la poudre SD française, poudre double base d'impulsion spécifique 200 à 230s et constituée de :

- nitrocellulose	66%
- nitroglycérine	25%
- centralite	8%
- divers	1%

Le propulseur ELAN utilise la poudre épictète, identique à la SD mais de mode de fabrication différent.

La poudre SD possède un potentiel énergétique de 850 à 950 calories par gramme (cal/g), potentiel légèrement inférieur pour l'épictète mais allant jusqu'à 1.200 cal/g pour la balistite (poudre à mortier) et descendant vers 700 à 800 cal/g pour la poudre triple base.

### • Les adjuvants

Les adjuvants doivent assurer un bon déroulement de la combustion.

Ils ont un rôle soit chimique, soit mécanique, soit balistique :

- Rôle chimique de catalyseurs qui accélèrent la prise en masse de la poudre (mise à feu simultanée de tout le pain de poudre); de stabilisants qui évitent ou retardent le vieillissement de la poudre; d'antioxydants qui empêchent l'oxydation des combustibles.
- Rôle mécanique d'agents mouillants qui permettent l'agglomération de la poudre; de plastifiants qui assouplissent les liants, de durcisseurs dans le cas contraire.
- Rôle balistique des métaux polyvalents qui accélèrent ou ralentissent la vitesse de combustion tels le cuivre, le titane, le fluorure de lithium; des métaux pulvérulents qui améliorent les propriétés énergétiques de la poudre (température de combustion plus grande) tels l'aluminium ou le béryllium.

### • L'inhibiteur

La combustion des poudres s'effectue toujours par couches parallèles. Suivant la mission que doit remplir le propulseur, on peut jouer sur sa poussée en variant le débit des gaz et par extension la surface de combustion.

Pour modifier cette surface, le bloc de poudre est enduit localement d'un inhibiteur, vernis spécial empêchant la combustion de s'étendre à toute la surface du bloc.

D'autre part, si la poudre brûle à environ 1800°C, l'enveloppe métallique d'un moteur est déjà attaquée à 120°C, il est donc nécessaire de la protéger par un inhibiteur.

Les propriétés demandées à un inhibiteur sont :

- une liaison poudre-inhibiteur parfaite;
- un coefficient de dilatation voisin de celui de la poudre;
- qu'aucune réaction chimique ne soit possible avec la poudre avant et pendant le fonctionnement.

Sont utilisées pour les poudres composites, des résines synthétiques peu combustibles; pour les poudres colloïdales, des mélanges plastiques à base d'amianté ou de talc.

LA PROPULSION DES FUSEES EXPERIMENTALES (suite)

IV - FABRICATION DES BLOCS DE POWDRE

Il existe quatre principaux modes de fabrication des blocs de poudre :

- la compression s'appliquant essentiellement aux poudres hétérogènes sans liant;
- le filage, procédé utilisé pour les poudres colloïdales;
- le moulage utilisé pour les poudres colloïdales et composites;
- le coulage dans le propulseur, même procédé que le précédent mais utilisant le propulseur comme moule.

Ces différents modes limitent le poids et les dimensions du pain de poudre soit en fonction de problèmes mécaniques (tenue du bloc, résistances...), soit physiques (création de bulles ou de poches d'air dans le bloc ...).

• La compression poudres hétérogènes sans liant

Combustible et comburant étant mélangés, la poudre est tassée dans le propulseur.

La compression ne s'applique qu'aux petites dimensions.

Les moteurs de mini-fusées sont fabriqués de cette façon.

• Le filage ou extrusion à la presse poudres colloïdales (SD)

La nitrocellulose est dissoute dans de la nitroglycérine à 80% d'humidité. Une bouillie est obtenue qui est essorée sur un filtre à bande (presse-pâte de papeterie) et en centrifugeuse.

La "galette" ainsi obtenue contient encore 40% d'humidité.

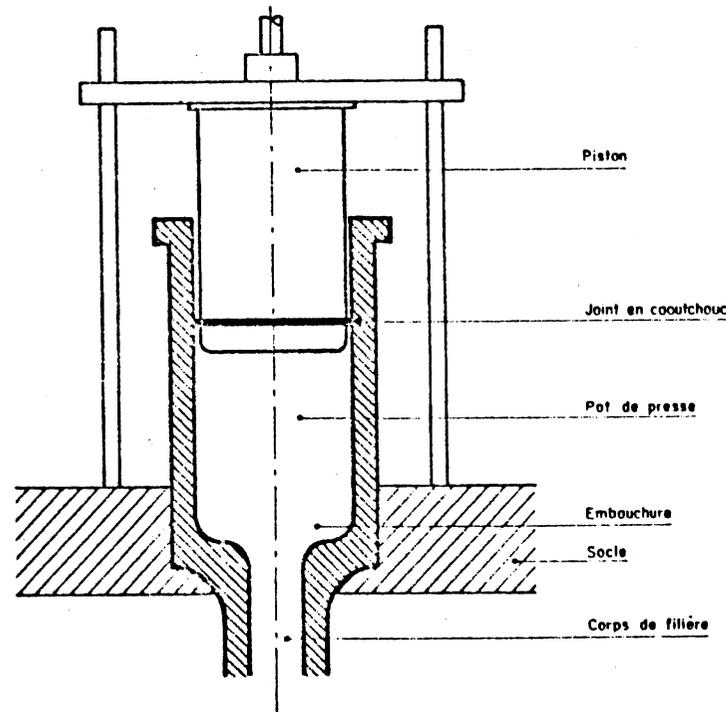
Les adjuvants complémentaires sont introduits au cours d'un premier malaxage.

Le taux d'eau est abaissé à quelque pour cent puis soigneusement dosé pour connaître la masse exacte de la galette (taux de galette sèche).

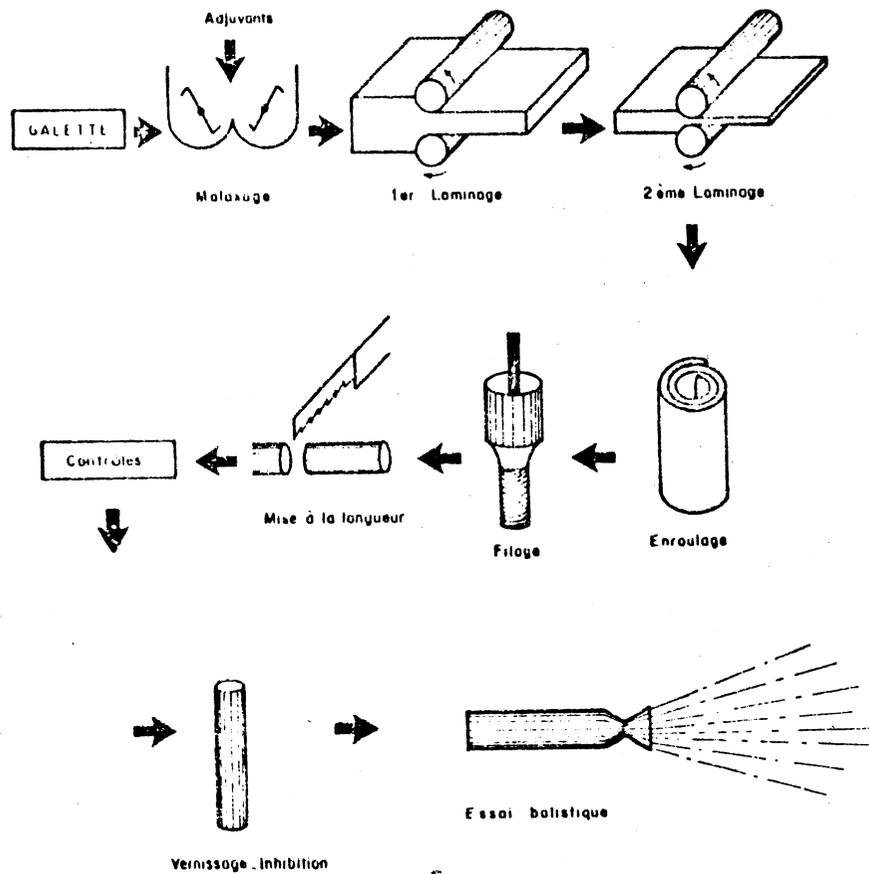
La nouvelle galette est laminée à chaud une première fois. Son taux d'humidité diminue jusqu'à 5%. Elle se transforme en une plaque friable et opaque.

Un second laminage à chaud (90° C) provoque la gélatinisation de la nitrocellulose par la nitroglycérine (additionnée de centralite). Une plaque souple et translucide ayant un faible taux d'humidité (0,5%) est obtenue.

Les plaques sont enroulées et le rouleau est enfourné dans le pot de presse. Un piston le pousse dans la filière.



Le boudin de poudre extrudé est enfin tronçonné, contrôlé aux rayons X et aux ultra-sons, parfois recuit pour éliminer les contraintes internes.



Le brin peut être utilisé seul ou en fagots dans un propulseur.

Les limitations de ce procédé sont que :

- seules les formes cylindriques peuvent être obtenues,
- la puissance des presses ne permet de faire que des blocs de 2 m de long et de 20 cm de diamètre au maximum.

- le matériel de fabrication est lourd, coûteux et très dangereux car la nitroglycérine doit être stockée à plus de 8° centigrade, les canalisations ne doivent pas comporter de points bas où elle pourrait s'accumuler, le sol doit être en plomb et une ventilation efficace doit exister.

Malgré cela, les prises de feu sont quotidiennes.

• Le moulage poudres colloïdales (Epictète) et poudres composites

Dans le cas de poudres composites, l'oxydant et le combustible sont préparés séparément.

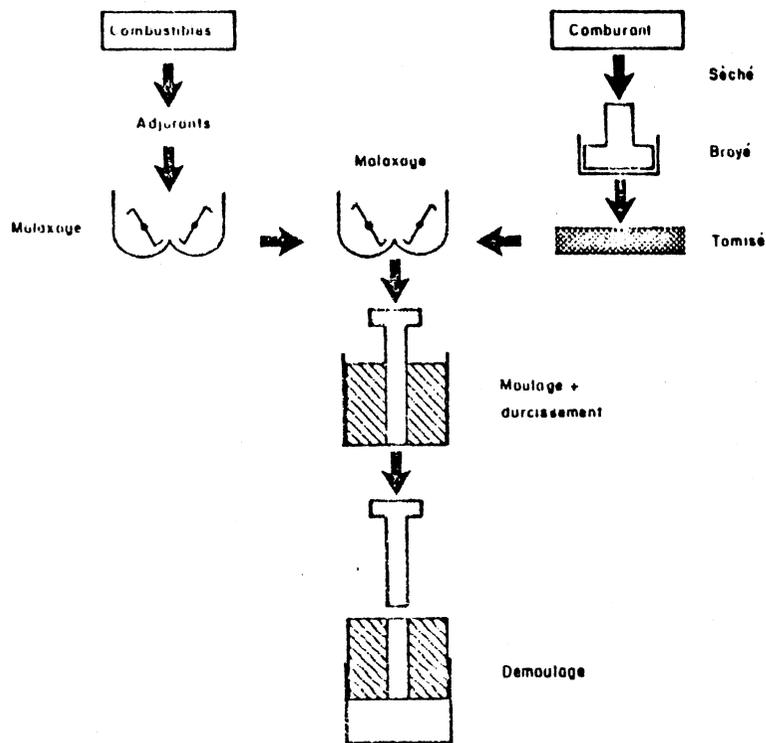
L'oxydant est séché, broyé et tamisé, la grosseur des grains influant sur la vitesse de combustion.

Le combustible liant est malaxé avec les adjuvants divers.

Comburant et combustible sont alors mélangés à l'aide d'un malaxeur (la durée du malaxage influe sur la vitesse de combustion).

La pâte obtenue est ensuite coulée dans le moule et cuite à 50° durant 15 jours.

Le durcissement est réalisé en dernier lieu par polymérisation et gélification puis le bloc est démoulé et inhibé.

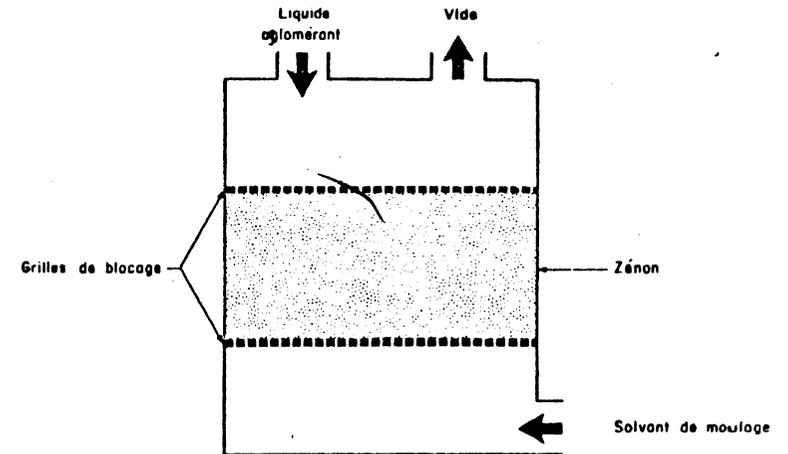


Dans le cas de la poudre épictète (colloïdale), le moulage est très particulier.

Dans un moule sont stockés les brins de zénon, brins de nitrocellulose de diamètre 1 cm obtenus par extrusion après dissolution.

La zénon est tenue entre 2 grilles et un solvant de moulage est introduit en bas du moule.

Puis l'ensemble est séché sous vide avant que ne soit introduit le mélange agglomérant de nitroglycérine additionnée de triacétine.



Un chauffage à 50° C sous vide est ensuite appliqué pour assurer une première tenue mécanique et éliminer le surplus de nitroglycérine enlevé en fin de chauffage.

La réalisation se termine par une seconde cuisson qui dure trois jours, suivie d'un refroidissement d'une semaine.

Le bloc est alors inhibé avec des résines thermodurcissables.

La fabrication par moulage est limitée à des blocs de poudre ne dépassant pas 3 m de long et 80 cm de diamètre mais le matériel est courant et peu onéreux.

Dans le cas de pain de poudre plus lourd, le procédé du coulage dans le propulseur est utilisé.

• Coulage dans le propulseur

Le propulseur lui-même sert de moule. Ceci permet de supprimer l'inhibiteur de protection mécanique et les fonds démontables.

Il faut toutefois s'assurer qu'après polymérisation, il n'y ait pas de retrait de la poudre.

Des blocs de plus de 2 tonnes sont ainsi fabriqués.

• Sécurité

Avant de mettre le bloc à disposition du fabricant de propulseurs, sont exécutés de nombreux tests de sécurité :

- coefficients de sensibilité aux frottements et à l'impact,
- compatibilité entre produits (inflammation spontanée),
- sensibilité au déplacement (malaxeur, agitateur),
- sensibilité à la détonation,
- diamètre critique ....

V - CONSTITUTION D'UN PROPULSEUR

Lors de la définition d'un propulseur adapté à une mission, outre le type de poudre, il sera nécessaire de définir :

- la forme géométrique du bloc,
- l'enveloppe,
- la tuyère.

Pour ce faire, de nouvelles caractéristiques interviennent :

- le serrage

$$K = \frac{S_p}{S_c}$$

où  $S_p$  est la surface de combustion du bloc de poudre et  $S_c$  la surface du col de la tuyère.

- Coefficient de remplissage

$$R = \frac{V_p}{V_c}$$

où  $V_p$  est le volume de la charge de poudre et  $V_c$  le volume du cylindre circonscrit à la charge de poudre.

- La vitesse de combustion du pain de poudre ( $V$ ) définie par la loi de Saint Robert.

$$V = C p^n$$

avec  $p$  pression à l'intérieur du moteur,

$C$  coefficient indépendant de la pression et variant avec la température,

$n$  constante propre à chaque poudre.

• Point de fonctionnement

Pour assurer un bon fonctionnement du propulseur, il est nécessaire que le débit des gaz issus du propergol soit égal à celui sortant par la tuyère qui sont ainsi exprimés :

- pour la tuyère

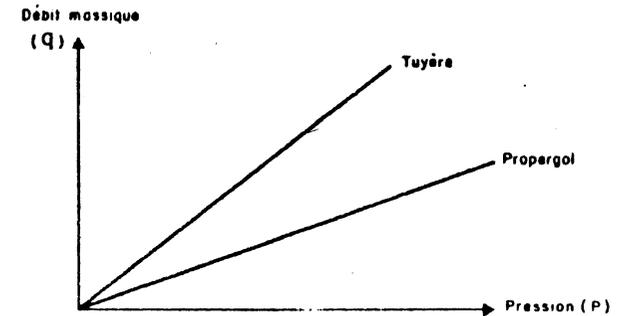
$$q = C_D p S_c$$

- pour le bloc de poudre

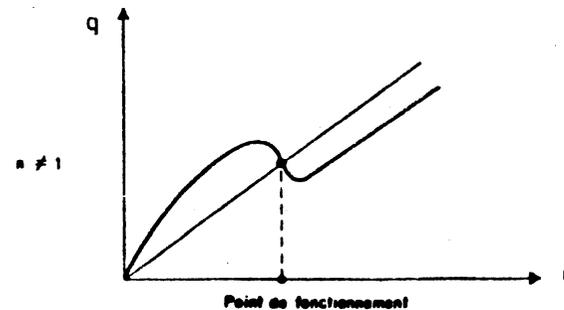
$$q = \rho S V$$

avec  $V$  vitesse de combustion qui est égale à  $C p^n$ ,  
 $S$  surface de combustion et  $\rho$  masse volumique.

Pour que les deux équations s'égalisent ailleurs qu'en 0, il est nécessaire que  $n$  soit différent de 1.



Pos de point de fonctionnement



Pour la SD, le point de fonctionnement varie de 100 à 300 Bars, pour l'épictète, il environne 100 Bars.

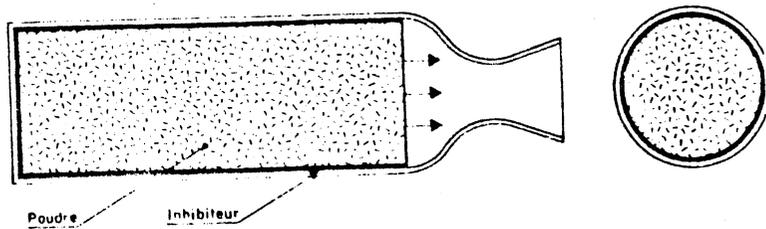
La vitesse de combustion est en particulier dépendante du mode de combustion qui peut être :

- frontal
- interne
- externe
- mixte.

• Blocs de poudre à combustion frontale

Le bloc est plein et brûle par la tranche. La combustion est dite "en cigarette".

Les poussées obtenues sont petites et constantes sur des temps de combustion longs (jusqu'à plusieurs minutes) pour un coefficient de remplissage maximum  $R = 0,9$ .



Le propulseur FAON utilise ce mode de combustion.

• Blocs de poudre à combustion interne

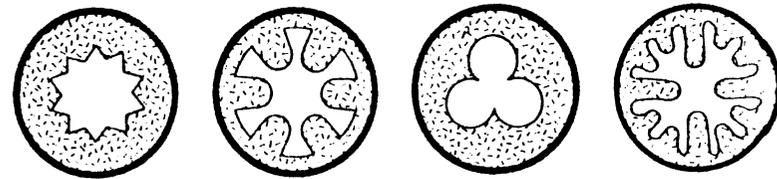
La surface de combustion est obtenue par une perforation axiale.

De ce fait, les gaz de combustion ne sont pas en contact avec les parois du propulseur.

Elle permet des temps de combustion très variables suivant l'épaisseur à brûler, mais plus courts que pour une combustion frontale, la forme du bloc assurant une propulsion progressive ou constante au choix de l'utilisateur.

Le diamètre du canal central doit alors être supérieur à celui de la tuyère, en général d'un rapport 2 sinon la tuyère effective se trouverait à l'intérieur même du canal.

Le coefficient de remplissage est de l'ordre de 0,6.



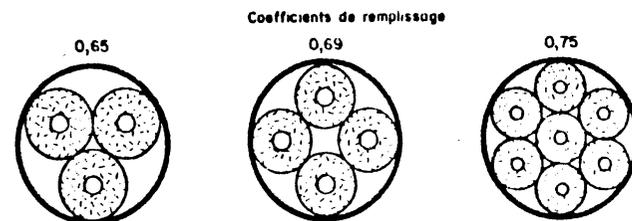
Surfaces de combustion à peu près constantes

CABRI, ANTILOPE et GAZELLE utilisent un pain de poudre à canal central en étoile.

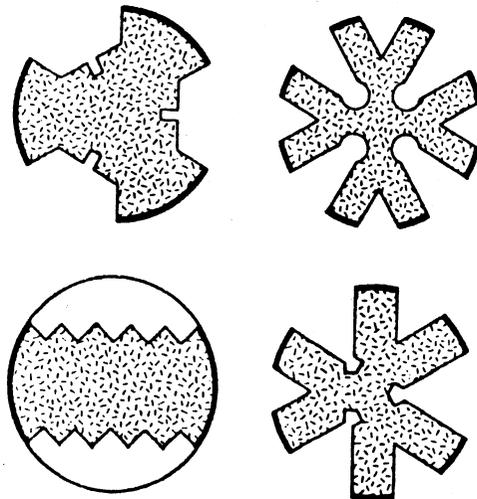
• Blocs de poudre à combustion externe

Le pain de poudre brûlant par l'extérieur, la surface de combustion est bien plus grande que pour une combustion interne pour un diamètre égal du propulseur, ce qui diminue d'autant la durée de combustion.

Ce mode permet l'assemblage de blocs de poudre par fagots dans un même propulseur.



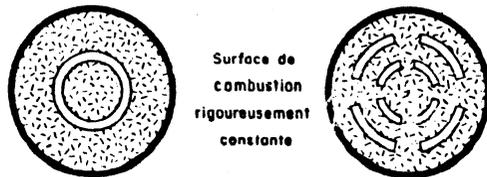
Groupement par fagots de blocs tubulaires



Coupes représentatives de blocs à combustion externe

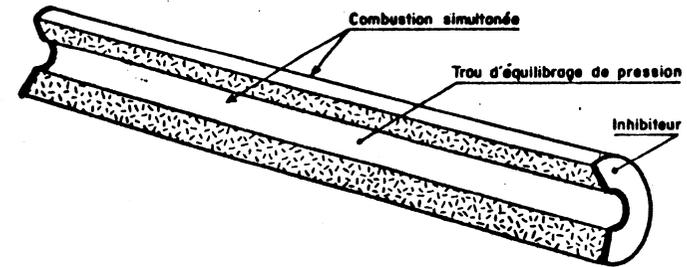
• Blocs de poudre à combustion mixte

Les modes de combustion précédents peuvent avoir lieu **simultanément** pour obtenir des combustions rigoureusement constantes,



Surface de combustion rigoureusement constante

et à la fois rapides tel le propulseur ELAN équipé d'un bloc tubulaire à combustion interne-externe.



VI - STRUCTURE D'UN PROPULSEUR

La structure d'un propulseur constitue à la fois l'enveloppe du bloc de poudre et la chambre de combustion.

Elle doit pouvoir supporter la pression des gaz de combustion, leur température, leur érosion et les contraintes mécaniques de vol telles que accélération et vibration tout en restant aussi légère que possible pour améliorer le rapport massique.

• Les matériaux

Deux types de matériaux sont utilisés :

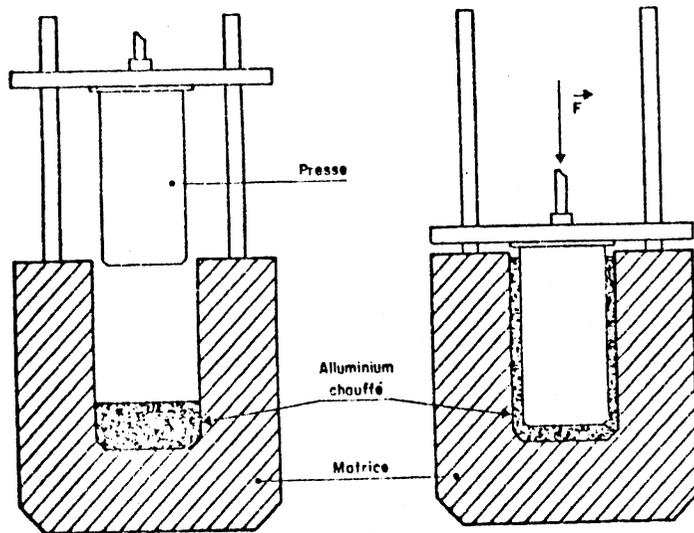
- les métaux,
- les matériaux bobinés.

Les enveloppes métalliques sont réalisées soit en alliages légers, soit en acier.

- les alliages légers

l'enveloppe est obtenue par "ébauche filée" :

L'aluminium est chauffé dans une matrice, une presse le fait remonter entre ses propres parois et celles de la matrice.



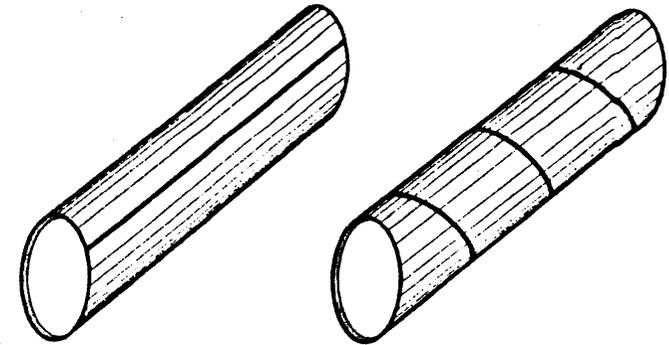
L'usinage est ensuite exécuté dans la masse.

Le corps du propulseur FAON est réalisé de cette façon.

Les corps ainsi réalisés sont légers mais la résistance à la rupture de l'aluminium ne dépasse pas  $48 \text{ daN/mm}^2$ .

- Les aciers utilisés sous forme de tubes roulés soudés: La soudure pose de sérieux problèmes de tenue à haute température lorsque le propulseur fonctionne. Il faut donc traiter les enveloppes thermiquement.

Il est également possible d'opter pour une soudure hélicoïdale qui permet de répartir les contraintes.



Roulé soudé

Soudure hélicoïdale

Une autre méthode dérivée de l'ébauche filée est le fluotournage.

Les aciers utilisés ont des résistances à la rupture allant jusqu'à  $200 \text{ daN/mm}^2$  mais sont 2,5 fois plus lourds que les alliages légers.

- les matériaux bobinés allient la fibre de verre dont la résistance à la traction peut atteindre  $470 \text{ daN/mm}^2$  et les résines thermodurcissables.

Mais le bobinage ne peut être utilisé que pour des propulseurs simples car il faut couler directement les poudres dans l'enveloppe, étanchéifier intérieurement par une pellicule de caoutchouc et utiliser des poudres suffisamment élastiques pour suivre les déformations de l'enveloppe.

Après bobinage, le stratifié est cuit pour polymériser la résine.

L'intérieur des enveloppes est généralement protégé thermiquement par des matériaux à base d'amiante ou de bakélite (protections qui assurent parfois la régulation de combustion) ou bien réalisé en matériaux ablatifs (qui résistent à la chaleur en se consumant) qui ne résistent que pendant la durée de fonctionnement du moteur.

. Fixation du bloc

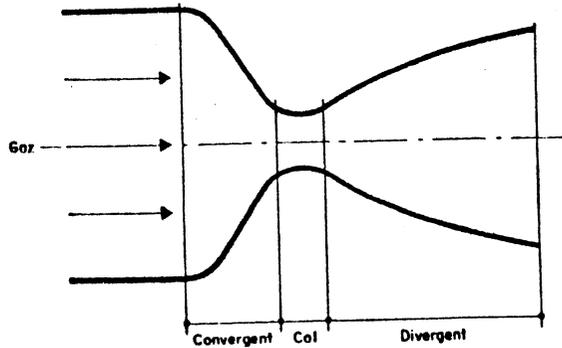
Une fois l'enveloppe terminée, le bloc peut être collé, moulé-collé, calé ou tenu par des goujons.

### VII - LES TUYERES

La tuyère joue trois rôles :

- assurer la direction du jet de gaz,
- régler la combustion du bloc de poudre,
- transformer l'énergie thermique des gaz en énergie cinétique.

#### • Constitution d'une tuyère



Profil d'une tuyère

La tuyère se décompose en :

- un convergent, tronc de cône qui peut être très ouvert et très court surtout si la vitesse des gaz à son entrée est faible,
- un col de tuyère dont le rayon de courbure assure la variation progressive de la vitesse des gaz. La vitesse des gaz au col est sonique. C'est le col qui joue le rôle de régulateur de combustion,
- un divergent tronc de cône à génératrices rectilignes ou curvilignes. La demi-ouverture est généralement limitée à 15° afin d'éviter le décollement de la couche limite des gaz.

Le divergent assure la détente des gaz et leur transformation énergétique. La vitesse continue à croître dans cette partie de la tuyère.

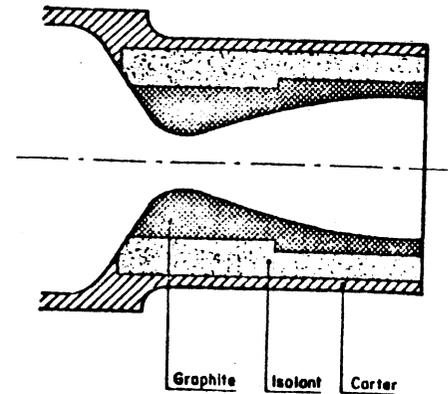
Si les gaz sont détendus à la pression extérieure, la tuyère est dite adaptée.

#### • Matériaux utilisés dans une tuyère

C'est au col de tuyère que les échanges thermiques sont les plus importants; le col devant garder une section constante, il utilisera un matériau à haut point de fusion tel le graphite bon jusqu'à 2700° C ou le tungstène bon jusqu'à 2300°.

L'enveloppe de la tuyère est constituée par un carter métallique qui doit supporter les contraintes mécaniques.

Un isolant thermique sépare ce carter d'avec le matériau réfractaire.

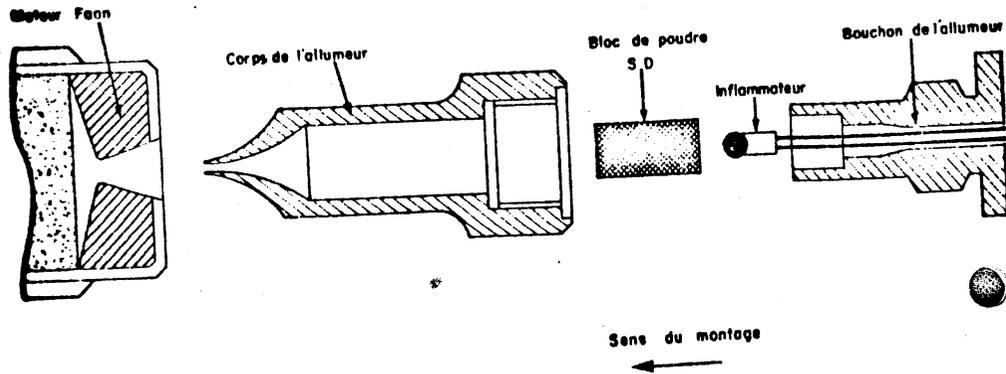


### VIII - ALLUMAGE DU PROPULSEUR

Les poudres n'ont aucun rendement à basses pression et température, le rôle de l'allumeur est d'assurer cette montée en pression et en température suffisante pour qu'il y ait allumage du pain de poudre, ceci avec toutes les conditions de sécurité nécessaires.

Pour assurer cette sécurité, un allumage électrique à distance est opéré. Un inflammateur est constitué d'un filament métallique (nickel-chrome) entouré d'une perle de poudre. Lorsqu'un courant important traverse le filament, il rougit et la poudre s'enflamme.

Cette perle peut alors enflammer à son tour une quantité de poudre plus importante qui "éclabousse" dans le propulseur (ELAN, ANTILOPE, GAZELLE, CABRI) ou allumer un micro-propulseur dont la tuyère est introduite dans celle du moteur qu'il s'agit précisément d'allumer (FAON).



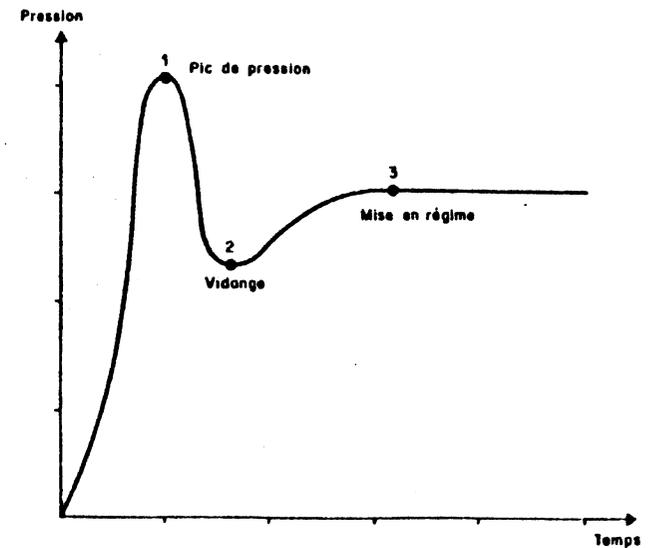
L'allumage s'effectue en trois temps :

- 1 - la tuyère étant obturée, l'allumeur assure une montée en pression. Ce pic de pression doit pouvoir être supporté par l'enveloppe et le bloc de poudre.

- 2 - Une fois monté en pression, le propulseur s'allume et supprime l'obturation de la tuyère : fusée qui s'élève pour le FAON, bouchon éjecté pour CABRI, GAZELLE, ANTILOPE, ou obturateur cassé pour l'ELAN.

Une fois la tuyère débouchée, le propulseur se "vide" et une chute de pression apparaît qui ne doit pas être trop importante car le bloc de poudre pourrait se réteindre.

- 3 - Le propulseur se met en régime dans les conditions de température et de pression qui sont les siennes.



#### Bibliographie :

Propulsion par poudre par H. VERDIER  
(Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique).