



## INTRODUCTION A LA PROPULSION



Document rédigé dans les années 80 par des membres du GEA et digitalisé en 2002 par Luc Leyns, membre du Groupe d'Etudes Aérospatiales (GEA) de Belgique.

# **INTRODUCTION A LA PROPULSION**

## 1. NOTIONS FONDAMENTALES

1.1. HISTORIQUE

1.2. PRINCIPE DE LA REACTION

1.3. FORME DE TUYERE

1.4. LA FORCE DE PROPULSION OU POUSSEE

1.5. IMPULSION TOTALE

1.6. IMPULSION SPECIFIQUE DES PROPERGOLS

1.7. VITESSE D'EJECTION

## 2. CHIMIE DES PROPERGOLS

2.1. INTRODUCTION

2.2. FORMES PHYSIQUES DES PROPERGOLS

2.2.1. Propergols solides

2.2.2. Propergols hybrides ou lithergols

2.2.3. Propergols solides

2.3. LES PROPERGOLS SOLIDES

2.3.1. Généralités

2.3.2. Choix du propergols

2.3.3. Combustion limitée et emploi d'inhibiteurs

## 3. GÉOMÉTRIE DES CHARGES

3.1. INTRODUCTION - CONSIDERATIONS GENERALES

3.2. CHARGES A COMBUSTION FRONTALE OU TRANVERSALE

3.3. CHARGES A COMBUSTION INTERNE

3.4. CHARGES A COMBUSTION EXTERNE

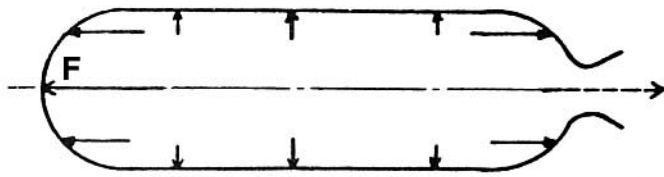
## 1. NOTIONS FONDAMENTALES

### 1.1 HISTORIQUE.

Le moteur à réaction est certainement un des plus anciens moteurs connus dans son principe (dès le milieu du XI<sup>e</sup> siècle, les Chinois utilisaient les "flèches à feu" - probablement des fusées incendiaires), mais aussi le plus complexe dans sa réalisation et ce, en dépit de son apparente simplicité. Il repose sur une loi fondamentale de la physique dite "de l'action et de la réaction" énoncée par Isaac Newton "A chaque action correspond une réaction équivalente et de sens contraire".

### 1.2 PRINCIPE DE LA REACTION.

Imaginons que l'on produise une réaction de combustion à l'intérieur d'un corps fermé de tous côtés. La résultante des forces de pression s'exerçant sur les parois est nulle (Loi de Mariotte). Ouvrons un orifice dans la paroi arrière, cela permet aux gaz en expansion de s'échapper et rompt ainsi l'équilibre des pressions. Les gaz jaillissent de la tuyère tout en maintenant leur pression sur le fond de la chambre. D'où une pression plus grande sur la face avant que sur la face arrière. Le corps est alors projeté en avant sous l'influence de la force résultante de cette différence de pression.



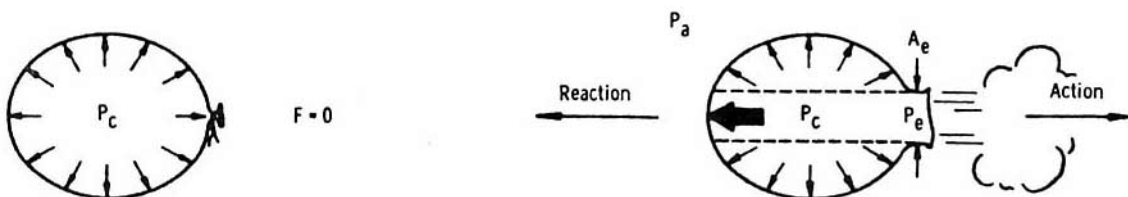
La force de propulsion d'une fusée est une force de pression appliquée sur l'avant du propulseur, non équilibrée en raison de l'orifice pratiqué à

l'arrière.

Cette force de pression est proportionnelle au débit massique  $\dot{m}$  des gaz et à leur vitesse d'éjection ( $V_e$ ).

On aurait donc tort de croire qu'une fusée se propulse contre quelque chose d'externe. La poussée s'exerce intérieurement à l'engin et plus la vitesse des gaz est grande, plus considérable est la poussée.

On peut aisément reproduire le phénomène en utilisant des moyens courants, par exemple, un tuyau d'arrosage où l'action de l'eau engendre une réaction dans la lance que tient votre main. Vous pouvez aussi gonfler un ballon que vous laissez partir soudainement. L'air comprimé sortant de la valve produit une réaction qui projette l'objet en arrière.



### Quelques erreurs trop communes.

On peut s'étonner, après tant de lancements spectaculaires si abondamment commentés, du nombre d'idées erronées qui sont encore monnaie courante. L'une des plus répandues est qu'une fusée ne peut pas fonctionner dans le vide, alors que c'est précisément là qu'elle opère dans les meilleures conditions.

Une autre, est que la vitesse d'une fusée ne peut dépasser celle avec laquelle elle éjecte ses gaz, alors que la mécanique élémentaire montre qu'elle lui est facilement très supérieure et ne cesse de croître tant qu'il reste quelque chose à éjecter.

Plus grave est l'erreur commise par ceux qui conçoivent difficilement qu'il puisse y avoir mouvement sans propulsion, se fiant à leur expérience quotidienne qui montre qu'un véhicule finit par s'arrêter quand le combustible vient à manquer, alors qu'il suffit de lever les yeux pour voir ce véhicule énorme qu'est la Lune tourner, et cela depuis des milliards d'années, sans aucune propulsion autonome.

L'attraction universelle Une erreur tout aussi grave est la croyance qu'un véhicule peut être lancé dans l'espace de manière à ce qu'il "échappe" à l'attraction terrestre. Il ne lui échappera pas plus que le ballon de football qui rebondit sur un stade n'échappe à celle du Soleil ou de Sirius. Tous les corps dans l'univers s'attirent mutuellement en raison directe de leur masse et en raison inverse de leur distance au carré. Lorsqu'ils sont très éloignés l'un de l'autre, leur attraction – jamais nulle – peut être négligeable devant d'autres plus fortes. L'attraction qu'exerce la Terre sur la Lune est prépondérante à la distance à laquelle se trouve notre satellite, et celui-ci tourne sagement autour de notre planète, tout en restant sensible à l'attraction du Soleil, beaucoup plus faible parce que l'astre est beaucoup plus éloigné. L'orbite de la Terre autour du Soleil est perturbée par les planètes.

Dans le cas d'une fusée, une réaction chimique produit, dans la chambre de combustion, des gaz à température et pression très élevées qu'il faut convertir en énergie cinétique. Cette conversion est réalisée à l'aide de la tuyère.

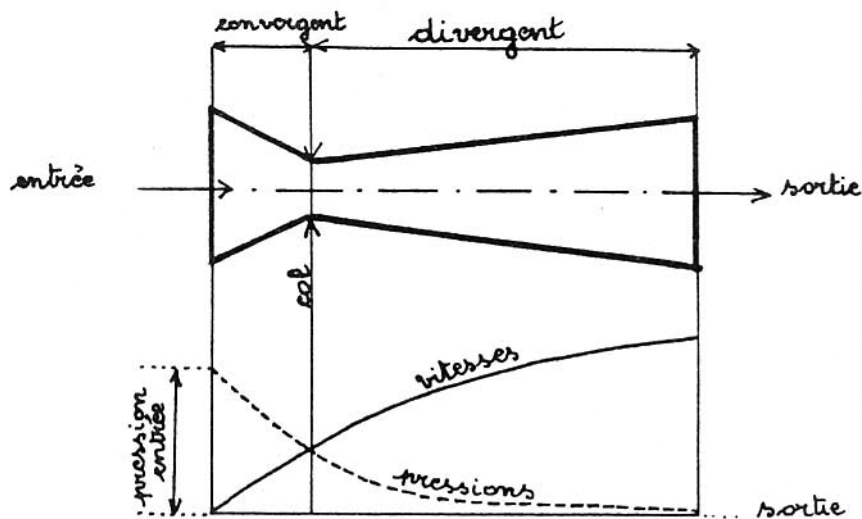
### 1.3 FORME DE LA TUYERE.

Pour remplir son rôle, la tuyère doit présenter un profil rationnel, c'est-à-dire une partie convergente. En désignant par  $Q$  le poids de gaz qui passe en une seconde dans une section normale quelconque  $S$  et par  $d$  son poids spécifique et par  $v$  sa vitesse, on a

$$Q = S \cdot v \cdot d$$

Le poids est évidemment le même pour toutes les sections d'un bout à l'autre de la tuyère. Or, au fur et à mesure que les gaz avancent dans la tuyère, ils se détendent et leur vitesse  $v$  augmente en suivant une courbe. Mais par suite de l'augmentation de volume (due à la détente), le poids spécifique diminue plus lentement que l'augmentation de vitesse, de sorte que le produit  $v \cdot d$  augmente. Or, comme le débit  $Q$  reste constant, la section  $S$  doit diminuer. C'est pourquoi, à l'entrée des gaz dans la tuyère, la section de celle-ci va en diminuant on dit que la tuyère possède une partie convergente.

Quand cette partie convergente atteint une section limite, celle-ci porte le nom de "col de la tuyère". On démontre qu'à cet endroit, le poids spécifique des gaz diminue rapidement et pour conserver le débit  $Q$ , il faut augmenter la section  $s$ . La section de la tuyère, à partir du col, devra donc aller en augmentant. Nous aurons une partie divergente.



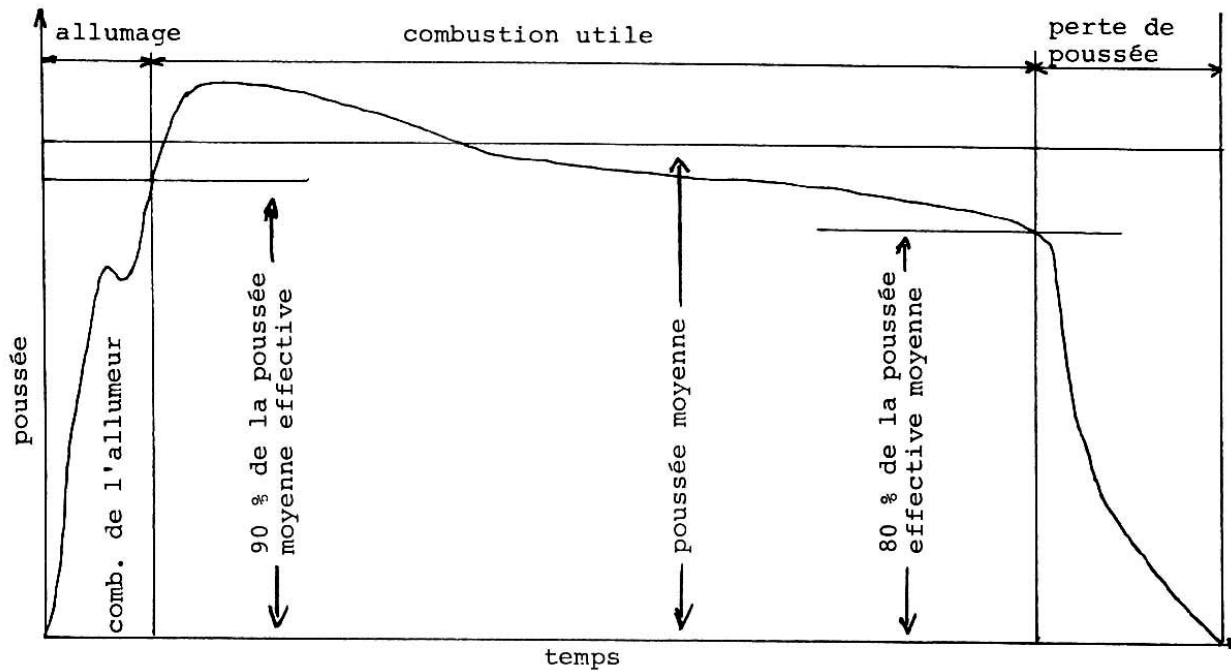
#### 1.4 LA FORCE DE PROPULSION OU POUSSEE.

Le théorème des quantités de mouvements indique que la poussée  $P$  est proportionnelle au débit massique  $\dot{m}$  et à sa vitesse d'éjection  $V_e$   
 $\dot{m}$  en Kg/sec  
 $V_e$  en m/sec  
 $P$  en Kgf ou Kg'

$$P = \dot{m} \cdot V_e \quad (1)$$

Il faut cependant ajouter un terme correctif qui tient compte du fait que, en général, la pression statique  $P_e$  dans la section de sortie de la tuyère n'est pas égale à la pression atmosphérique ambiante  $P_a$ . Si  $A_e$  est l'aire de la section droite à l'échappement de la tuyère, on a donc

$$P = \dot{m} \cdot V_e + (P_e - P_a) A_e \quad (2)$$



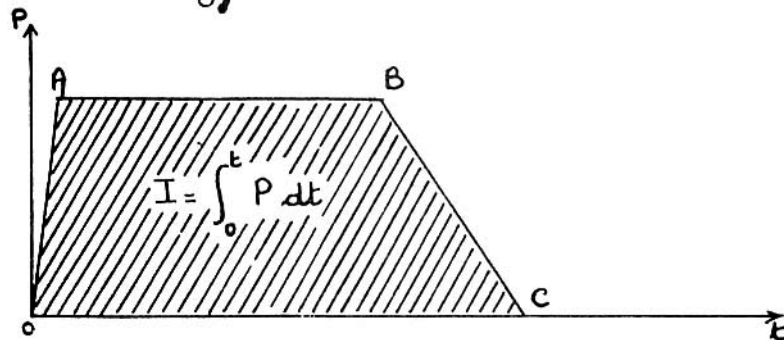
*profil type de la courbe de poussée d'un moteur-fusée*

### 1.5 IMPULSION TOTALE.

L'impulsion totale est par définition le travail développé par le moteur.

Pour les mathématiciens, on dira que  $I$  est l'intégrale de  $P dt$  étendue à toute la durée de combustion.

$$I = \int_0^t p dt$$



La surface oABC représente le travail développé par le moteur, donc l'impulsion totale  $I$ .

### 1.6 IMPULSION SPECIFIQUE DES PROPERGOLS.

Cette notion est importante pour pouvoir comparer la valeur énergétique des propergols. Elle ne dépend pas du type de moteur mais uniquement du type de propergol.

En effet, par définition, l'impulsion spécifique  $I$  est le temps pendant lequel 1 Kg de propergol délivre une poussée de 1 Kgf.

$$\text{Donc: } I_s = \frac{I}{\text{poids de propergol}}$$

Elle a la dimension d'un temps et se mesure en secondes. L'impulsion spécifique peut aussi s'obtenir à partir de la poussée et du débit  $Q$ .

$$I_s = \frac{P}{Q} = \frac{P}{\dot{m} \cdot g} \quad (3)$$

### 1.7 VITESSE D'EJECTION.

Il s'agit de la vitesse avec laquelle les gaz brûlés sont éjectés de la tuyère.

On sait que (1)  $P = \dot{m} \cdot V_e$   
et que (3)  $P = m \cdot g \cdot I_s$

On en déduit

$$V_e = g \cdot I_s \quad (4)$$

La vitesse d'éjection est calculée à partir d'une donnée expérimentale ( $I_s$ ). Il y a par conséquent une certaine imprécision quant à sa valeur.



## 2. CHIMIE DES PROPERGOLS

### 2.1 INTRODUCTION.

Nous avons vu que le fonctionnement d'un moteur-fusée repose sur la production, au sein de la chambre de combustion, d'une grande quantité de gaz, de masse molaire moyenne la plus faible possible, à haute température et sous une pression élevée.

Le rôle du chimiste sera de sélectionner des composés qui, une fois mis en présence et mis à feu d'une manière adaptée, donneront naissance à ce gaz. Cela fait, il devra déterminer, pour des composés donnés, la composition pondérale qui donnera au propergol les meilleures performances.

La mise à feu pourra, en fonction de la nature des composés et de leur forme physique, être nécessaire ou non. Nous y reviendrons en passant sommairement en revue les formes physiques que peuvent revêtir les propergols.

### 2.2. FORMES PHYSIQUES DES PROPERGOLS.

#### 2.2.1 Propergols solides

Les composants du mélange sont intimement mélangés et présents sous la forme d'un pain dans la chambre. L'allumage doit toujours être provoqué par un dispositif annexe.

#### 2.2.2 Propergols hybrides ou lithergols

Les composants sont séparés l'un, solide est fixé dans la chambre, l'autre, liquide, est stocké dans un réservoir et introduit par des injecteurs placés en tête de chambre de combustion. L'allumage peut se produire soit spontanément, lorsque le liquide injecté arrive au contact du pain (nous avons alors un lithergol hypergolique), soit en actionnant un dispositif d'allumage qui peut faire appel à une petite quantité de liquide présentant un caractère hypergolique en présence de la charge solide ou faire appel à un allumage classique qui est actionné après le début de l'injection du liquide.

#### 2.2.3 Propergols liquides

Les composants sont stockés dans des réservoirs distincts et injectés dans la chambre qui est initialement vide. Selon la nature des composants, nous aurons, à nouveau, à faire la distinction entre les liquides hypergoliques et non hypergoliques avec les mêmes remarques qu'en 2.2.2 en ce qui concerne les dispositifs d'allumage.

Le choix d'un des types de propergols cités sera dicté par le profil de mission de l'engin que le moteur doit équiper, et aussi, par des conditions technico-économiques. Etant donné les possibilités d'un club amateur, le choix du propergol solide s'impose.

## 2.3 LES PROPERGOLS SOLIDES.

### 2.3.1 Généralités.

Les propergols solides ont généralement une valeur inférieure quant à l'impulsion spécifique et brûlent à des températures élevées. Plusieurs d'entre eux sont extrêmement dangereux à fabriquer car ils contiennent des explosifs qui nous sont familiers depuis des années. Même si le propergol, dans son aspect final, peut être parfaitement stable, insensible aux chocs, à l'attrition et à la chaleur, le procédé exigé par sa composition peut également présenter de graves dangers. De nombreux propergols solides doivent être mélangés à l'état de fusion, ou bien condensés sous une pression de plusieurs tonnes afin de leur donner la densité nécessaire.

L'équipement exigé pour obtenir ce résultat et y parvenir avec une mesure suffisamment large de sécurité, est tellement coûteux et complexe qu'il est hors de portée des moyens de n'importe quel groupe d'amateurs. Les presses hydrauliques et les moules nécessaires pour ce genre de travail sont très onéreux.

Lorsque l'on songe aux immenses ressources, en terme d'argent, d'équipement, de laboratoire et de techniciens-chercheurs, actuellement consacrées au développement des propergols solides aux Etats-Unis ainsi qu'en de nombreux pays du monde, il apparaît parfaitement insensé de penser qu'un jeune et brillant génie, travaillant pendant ses heures de loisirs dans une cave ou une mansarde puisse découvrir une formule dont l'importance ait échappé jusqu'à présent aux meilleurs cerveaux spécialisés du secteur.

Il est plus vraisemblable que le jeune génie provoque une explosion, se fasse arracher un bras et mette le feu à la maison. Les substances utilisées dans les propergols pour les fusées n'ont rien à voir avec celles qu'on manipule à la cuisine. Par conséquent, il serait bien plus sage et plus sûr pour un amateur, d'éviter toute expérience avec des combustibles et même d'essayer de fabriquer ceux qui exigent des fusions ou des pressions élevées pour se mélanger à l'oxydant.

Les propergols solides possèdent certains avantages bien définis qui les rendent plus agréables à ceux qui les utilisent, notamment au service militaire qui se préoccupe toujours des problèmes que pose le transport de l'approvisionnement en des zones éloignées du théâtre d'opération, ainsi que les problèmes tout aussi importants du service, de l'entretien, de l'entraînement du personnel. La simplicité des propergols solides, qui peuvent être préparés en des confections spéciales ou directement coulés dans les moteurs-fusées, et n'exigent pas les canalisations compliquées et les mécanismes de contrôle que les propergols liquides comportent, leur donne un avantage pratique très important.

Une grande performance peut parfois être sacrifiée dans les buts militaires au profit de la facilité de maniement, d'entraînement ainsi que des exigences logistiques. Parmi les avantages qu'offrent les propergols solides, citons les suivants:

- a) ils sont peu toxiques, ce qui réduit les problèmes de leur maniement ainsi que les dangers auxquels est exposé le personnel, tout en éliminant la nécessité de disposer d'équipements complexes et de vêtements de protection
- b) haute densité, ce qui équivaut à un volume moindre et par conséquent une économie d'espace et de volume dans l'emménagement ainsi qu'une économie de poids dans la structure de l'engin
- c) facilité de maniement, la fusée et le propergol peuvent être lancés comme un tout unique, en réduisant au minimum les installations pour l'approvisionnement, la dispersion du combustible avec le temps (par évaporation) ainsi que le procédé compliqué du count-down ou même permet d'éliminer complètement tous ces facteurs
- d) ils n'occasionnent pas de perte par évaporation ou par fuites
- e) mise à feu facile, ils n'exigent aucunement des systèmes compliqués ou des températures élevées pour la mise à feu.

Mais, avec les avantages, nous trouvons également un certain nombre de désavantages que présentent les propergols solides par rapport aux propergols liquides. Ces inconvénients sont:

- a) performances moins brillantes - un kilo de propergol solide produit une poussée inférieure à celle d'un kilo de propergol liquide;
- b) décomposition - tandis que de nombreux liquides peuvent être conservés indéfiniment (à condition qu'ils soient contenus dans des récipients appropriés), de nombreux propergols solides ont tendance à se décomposer ou à vieillir dans les réservoirs entreposés; ce qui donne lieu à des modifications de leur structure chimique;
- c) fissuration - des fissures s'ouvrent quelquefois dans des grains coulés, soit à cause de leur vieillissement, soit à cause d'un maniement défectueux. Par contre, le phénomène de fissuration thermique peut se produire au cours de la combustion. La présence de ces fissures augmente la surface de combustion et les températures et les pressions produites, ce qui peut provoquer de violentes explosions.

#### Dangers et surprises des propergols solides.

Comme dans le cas des propergols liquides, la préparation et l'utilisation des propergols solides présentent un certain nombre de risques bien définis et qui devraient convaincre toute personne dotée de bon sens qu'il serait absolument insensé d'effectuer des expériences avec ces substances.

L'amateur qui ignore ces dangers ou qui les considère à la légère, s'expose à des dangers très sérieux. Voici, à titre d'avertissement, une liste des substances les plus dangereuses et des risques qu'elles comportent:

Poudre noire - C'est le mélange explosif le plus ancien que l'on connaisse et c'est également le plus instable. Son comportement est tellement imprévisible et son maniement présente de tels dangers que l'on ne l'utilise plus depuis longtemps professionnellement pour aucune application sérieuse.

Un mélange de salpêtre, charbon et soufre explose immédiatement lorsqu'il est exposé à la chaleur, à l'attrition, à un choc et bien entendu à une étincelle. De petites quantités de ce mélange peuvent être utilisées avantageusement comme amorces pour un propergol plus stable, ou bien comme charge explosive pour séparer les étages successifs d'une fusée, ou bien encore pour expulser un système de récupération avec parachutage. Pour ce qui est de la quantité à manipuler, on devra se borner à quelques grammes.

Têtes d'allumettes - Cette "matière première" a été souvent et largement utilisée par un grand nombre d'amateurs trop désinvoltes, pour préparer des petits jeux uniquement pour le plaisir de provoquer une petite explosion. L'allumette qui s'allume par frottement est évidemment une chose instable inventée en vue d'offrir à la ménagère un moyen facile pour allumer ses fourneaux. Une tête d'allumette ne présente évidemment pas un gros risque.

L'explosion de cent grammes de têtes d'allumettes peut arracher un bras ou une jambe. On peut faire exploser un récipient plein de têtes d'allumettes simplement en l'agitant.

Nitroglycérine et nitrocellulose - Ces deux substances sont utilisées en tant que bases principales de nombreux propergols solides, mais elles ne doivent jamais être manipulées par des amateurs. Elles donnent lieu à des effets toxiques pour le corps humain. Les deux substances sont extrêmement sensibles aux chocs, à l'attrition, à la chaleur (surtout la nitroglycérine) et figurent parmi les explosifs les plus puissants que l'on connaisse.

Chlorates et perchlorates - Voici encore deux substances que les amateurs doivent éviter de manipuler, pour n'importe quelle raison. Les chlorates que l'on peut obtenir facilement - chlorate de sodium et chlorate de potassium - sont tellement sensibles à l'attrition qu'ils peuvent exploser si on les frotte par terre ou si on les pile au mortier. Aussi, ne sont-ils plus utilisés pour fabriquer des propergols professionnels. Les perchlorates sont plus stables, mais demeurent dangereux.

Métaux en poudre - Virtuellement tout métal réduit en poudre est dangereux s'il est en mesure de se soulever sous forme de poussière dans l'air. Le fer, le magnésium, le nickel et l'aluminium produisent des mélanges explosifs avec l'air même lorsqu'ils sont versés d'un récipient à l'autre, ou bien agités à l'intérieur d'un récipient. Quelques métaux comme le magnésium s'allument spontanément lorsqu'ils sont diffusés sous forme de poussière dans l'air ambiant, même sans l'intervention d'une étincelle.

En général, cette éventualité demeure possible pour toute substance réduite en poudre extrêmement fine, qu'elle soit classée comme combustible ou non. On sait que des moulins à blé ou des fabriques de ciment ont explosé sans aucun signe avertisseur en provoquant parfois la démolition complète de l'immeuble.

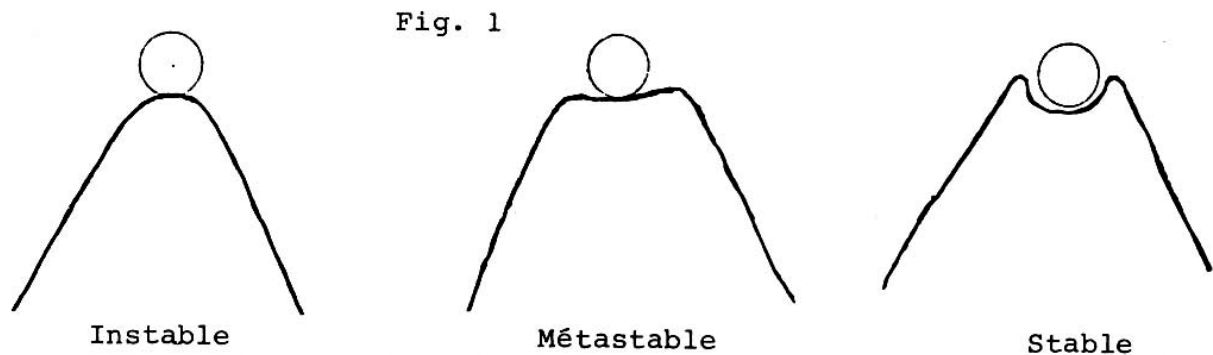
Outre les dangers que les poudres métalliques finement triturées présentent, il faut ajouter que plusieurs de ces poudres deviennent extrêmement sensibles lorsqu'elles sont mélangées avec un oxydant.

Combustions spontanées - Certaines substances s'allument spontanément lorsqu'elles sont exposées à l'air. Parmi ces substances on trouve le phosphore jaune, le sodium métallique et le potassium métallique. Bien entendu, ces substances ne devront jamais être manipulées par des amateurs. Pendant leur combustion, des fragments enflammés jaillissent, qui peuvent provoquer de profondes brûlures sur la peau.

### 2.3.2 Choix du propergol.

Le choix d'un propergol, et donc de ses constituants, sera, bien entendu, dicté par le "contenu énergétique" de ceux-ci, par le type de moteur dans lequel ils devront être mis en oeuvre (ce dernier déterminant les critères de stabilité requis) et aussi par le profil de mission assigné à l'engin.

On peut se représenter le "contenu énergétique" d'un propergol comme l'énergie potentielle d'un rocher sphérique posé au sommet d'une montagne la forme du sommet (fig. 1) la pente des flancs et la hauteur pouvant caractériser respectivement la stabilité, le caractère plus ou moins explosif du mélange et le "contenu énergétique" proprement dit de celui-ci.



On distinguera plus ou moins nettement trois régimes d'explosion caractérisés par la vitesse de propagation du front de flamme

- La combustion  $v$  1 mm/sec.
- La déflagration 1 mm/sec.  $v$  100 m/sec.
- La détonation  $v$  1000 m/sec.

Insistons sur le fait que ces limites sont assez arbitraires et ne peuvent jamais que caractériser un phénomène se produisant dans des conditions bien déterminées. En effet, un même mélange peut, suivant les conditions dans lesquelles il est mis à feu, adopter indifféremment l'un des trois régimes.

Compte tenu de ces réserves, il va de soi que pour un moteur à propergol solide, il est exclu d'utiliser autre chose que des mélanges relativement stables et non détonants.

En ce qui concerne les moteurs à lithergols et à liquides, le choix est plus vaste dans la mesure où l'on peut utiliser des mélanges éminemment instables (hypergols) et que le caractère hautement déflagrant d'un propergol peut être exploité par un dosage judicieux de ses composants.

Ajoutons encore que la sélection du propergol devra également répondre à des considérations de disponibilité industrielle et de prix de ses constituants.

### 2.3.3 Combustion limitée et emploi d'inhibiteurs

Les caractéristiques de la combustion de chaque grain de propergol sont obtenues grâce à la combinaison de la forme en grain et à l'application d'inhibiteurs (substances non combustibles, ou à combustion lente) qui sont placés sur une partie de la surface du grain afin d'empêcher la combustion sur la partie en question. Le matériau utilisé comme inhibiteur présente généralement une nature analogue au propergol auquel il est appliqué.

Dans le cas des grains qui ont été coulés dans les chambres de combustion de manière à y former une adhérence parfaite entre le grain et la paroi, cette adhérence joue le rôle d'inhibiteur, sans qu'il soit nécessaire de donner un revêtement au grain.

### Vitesse de combustion

Le type de combustion que l'on obtient avec une forme particulière de grain, l'ampleur de la surface de grain exposée à la combustion et la quantité en poids de propergol consommé en une période déterminée de temps, n'ont aucun effet sur la vitesse de combustion du propergol donné, bien que les différences de pressions régnant dans la chambre de combustion provoquées par la forme du grain puissent exercer leur influence sur la vitesse de combustion. La vitesse de combustion d'une combinaison de propergol (par exemple le nombre de centimètres du propergol en question qui peuvent être brûlés en une seconde de combustion) est déterminée empiriquement par des expériences, et ce chiffre reste constant pour ce propergol donné, à une pression donnée, quelle que soit la forme du grain ou la quantité de surface exposée à la combustion.

La combustion procède perpendiculairement par rapport à la surface qui brûle et, tant que la pression reste constante, elle avance du même nombre de centimètres par seconde, indépendamment des dimensions de la surface qui brûle.

Cependant, dans le cas pratique, plus la surface de combustion est grande, plus la vitesse de combustion augmente car l'augmentation de la quantité de propergol consommé pendant chaque seconde engendre des pressions plus élevées dans la chambre de combustion de la fusée et au fur et à mesure que la pression augmente, la vitesse de combustion augmente également.

Si le propergol utilisé est particulièrement sensible au changement de pression et si les modifications de sa vitesse de combustion augmentent rapidement avec l'augmentation de pression, alors la combustion peut échapper complètement à tout contrôle et une explosion se produit. Aussi, est-il opportun de disposer d'un propergol dont la vitesse de combustion reste à peu près constante pendant un large intervalle de modification de la valeur de la

pression.

Un autre facteur qui influence la vitesse de combustion du propergol est la température qui se produit à l'intérieur de la chambre de combustion. Des températures plus élevées ont tendance à provoquer de plus fortes vitesses de combustion, mais le comportement des propergols varie sensiblement, suivant la manière dont ils réagissent à l'augmentation de température.

#### Temps de combustion

Il apparaît de ce qui précède qu'il est très aisé de calculer le temps de combustion pour n importe quelle charge de propergol, une fois qu'on aura noté la vitesse de combustion et la pression dans la chambre de combustion. Le temps de combustion pour n' importe quel grain de propergol est égal à l'épaisseur du grain divisé par la vitesse de combustion.

Nous devons remarquer ici que cette discussion sur la vitesse et le temps de combustion ne s'applique qu'aux propergols solides comprimés en grains compacts, dont on connaît la densité.

Il est par contre impossible de prévoir, même approximativement, la vitesse de combustion et le temps de combustion de propergols solides en forme de poudre non comprimée et pour plusieurs raisons. Tout d'abord, on ne trouve jamais deux mélanges absolument pareils. La densité, les dimensions des cristaux ou des granulés et la quantité d'air emprisonnée par le mélange dans sa masse, varient sensiblement d'un propergol à l'autre. Il n'existe d'autre part aucun moyen pour contrôler l'ampleur de la surface de combustion grâce à des inhibiteurs, et pour la faire adhérer à un récipient, et le résultat est que la zone enflammée a tendance à s'élargir au hasard, à travers tout le mélange, en provoquant une combustion irrégulière.

Aussi, les vitesses de temps de combustion données pour un propergol ne sont qu'approximatives et représentent les caractéristiques moyennes obtenues à partir d'un grand nombre d'expériences.

#### Propergols solides pour amateurs

Nombreux sont les propergols utilisés par les amateurs dans leurs recherches incessantes du "propergol idéal". Quelques-uns de ces propergols se sont révélés des combinaisons très dangereuses et ont provoqué plusieurs accidents, car les personnes qui les utilisaient n'avaient aucune familiarité avec leurs propriétés. Si ces amateurs imprudents avaient eu quelques notions supplémentaires sur les ingrédients qu'ils s'apprêtaient à utiliser, ils n'auraient pas affronté des expériences dangereuses qui devaient provoquer des désastres.

Mais, il y a des gens qui n'apprennent qu'en essayant et qui ne se contentent pas d'écouter l'avis et les conseils des autres. De plus, ils ne se donnent même pas la peine d'essayer d'obtenir des renseignements sur la question qui les intéresse avant d'essayer de trouver par eux-mêmes en effectuant directement les expériences.

Il n'y aura pas de place pour ces personnes dans la communauté scientifique de l'avenir, à cause de leur système de travail et de leur mentalité, qui sont bien éloignés d'une saine méthode scientifique. D'autre part, il est très probable que ces téméraires termineront leur jeunesse dans une explosion dont le seul résultat positif sera de les empêcher de nuire ultérieurement à leurs voisins.

Il existe une grande masse de travail et d'études de développement à effectuer avant qu'une association quelconque de modélistes de fusées puisse affirmer qu'elle a épuisé le potentiel des deux propergols auxquels le reste de ce chapitre sera consacré.

#### Le propergol "en bonbons".

Le mélange des deux propergols les plus utilisés par les amateurs, le salpêtre et le sorbitol, est peut-être le plus facile à réaliser. Appelé "bonbon" par un grand nombre de jeunes modélistes de fusées ce propergol produit une bonne impulsion et s'allume facilement. Cependant, il est assez difficile à manipuler et doit être façonné, fondu et mélangé d'une manière impeccable. Toute opération de fusion est dangereuse et ce propergol ne fait pas exception à la règle, même s'il existe une bonne marge entre le point de fusion du mélange et celui de la température de mise à feu. Le malaxage doit avoir lieu dans des conditions soigneusement contrôlées. Le mélange fondu doit être directement coulé dans la chambre de combustion de la fusée, après que cette dernière aura été chauffée jusqu'à la température de fusion du propergol. Cela signifie que le moteur fusée ainsi que tout récipient ou outil doivent être préchauffés jusqu'à la température de fusion afin d'éviter tout refroidissement prématuré au cours des opérations de coulage. Si ce processus est interrompu par une raison quelconque, le refroidissement partiel du mélange peut provoquer des fissurations et donner naissance à des bulles d'air, susceptibles d'augmenter la surface de combustion du grain. La combustion désordonnée et échappant à tout contrôle qui en résulte, peut produire des pressions et des températures supérieures au maximum prévu par le projet et provoquer des explosions ou du moins briser les parois de la chambre de combustion du moteur.

#### Zinc et soufre

Le mélange pour amateurs le plus répandu est de loin la combinaison de soufre et de zinc. Cependant, on ne dispose que de très peu de données authentiques ou concrètes sur ce propergol. On ne saurait donc s'étonner si généralement les amateurs font preuve d'une certaine confusion d'idées à cet égard, non seulement à cause de la variété de jugement dont ce propergol est l'objet mais souvent aussi à cause des opinions contradictoires qu'il suscite.

Pour donner quelques exemples, on lui attribue des capacités d'impulsion spécifique (temps pendant lequel un kilo de combustible exercera une poussée de 1 Kg) variant d'un minimum de 20 sec. jusqu'à un maximum de 150 tandis que des vitesses de combustion varient de 35 cm/sec jusqu'à 736 cm/sec. Bien entendu, il y a quelque chose qui cloche dans ces définitions, ce qui exige quelques éclaircissements



On peut croire raisonnablement que les caractéristiques contradictoires attribuées à ce propergol possèdent un fond de vérité. Et c'est particulièrement vrai si l'on adopte exactement les mêmes critères et si l'on travaille dans les mêmes conditions que les personnes qui ont exprimé les opinions en question. De plus, il faut être en mesure de reproduire exactement le mélange employé ainsi que le moteur dans lequel le mélange est utilisé.

Les performances d'un propergol sont influencées par de nombreux facteurs variables (la composition du propergol, le projet du système de propulsion et les conditions atmosphériques constituant le milieu de l'expérience où elle se déroule) . Essayer de comparer des données de performance de deux expériences différentes au cours desquelles aucune des variables n'a été contrôlées est un pur contresens car il n'existe pas de bases pour une comparaison.

Considérons le plus simple des facteurs, celui de la proportion des ingrédients utilisés dans la combinaison du propergol. On a chargé le zinc et le soufre dans une fusée, après quoi on les a brûlé dans la simple proportion d'une partie de soufre pour une partie de zinc (en poids) On a également employé la proportion d'une partie de soufre pour trois parties de zinc. Dans ces deux cas, la fusée se comportera d'une manière satisfaisante pour autant que l'observateur puisse en conclure.

Mais la performance obtenue constituait-elle un optimum ? C'est une autre paire de manches. Rien que par cette très large variation dans les proportions des ingrédients utilisés, vous êtes à même de saisir la futilité d'une tentative d'établir d'efficaces paramètres de performances pour le propergol.

Une autre raison qui explique la pénurie de paramètres très précis quant aux performances du mélange zinc-soufre, est que ce propergol a été utilisé, dans la plupart des cas, sous forme de poudre non comprimée. Nous avons déjà dit que la vitesse de combustion pour les substances en poudre ne peut être établie car on ne peut évaluer la surface de combustion. Dans la plupart des cas, la substance en poudre a tendance à brûler d'un seul coup plutôt qu'à suivre une progression ordonnée.

Parmi les nombreux autres facteurs qui varient sensiblement dans des mélanges en poudre et rendent impossible toute comparaison entre les performances et les données obtenues de différentes sources, nous trouvons

- le degré de pureté des ingrédients
- les dimensions des particules des mêmes ingrédients
- la densité à laquelle les ingrédients sont portés au cours du chargement
- les conditions d'humidité auxquelles les ingrédients ont été exposés aussi bien pendant l'emmagasinement que pendant leur utilisation
- la perfection avec laquelle les ingrédients ont été mélangés
- la quantité d'air présente dans la chambre de combustion
- la conductivité des parois de la chambre de combustion
- l'efficacité du système de propulsion dans lequel le mélange est mis à feu.

### 3. GEOMETRIE DES CHARGES

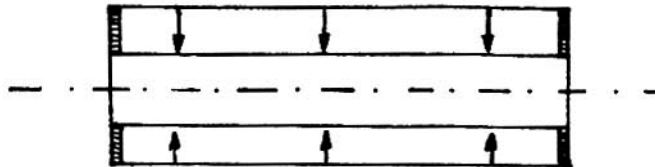
#### 3.1. INTRODUCTION - CONSIDERATIONS GENERALES.

La loi de poussée en fonction du temps d'un moteur-fusée à propergol solide est régie par la variation dans le temps du débit des gaz produits par la charge.

Ce débit est proportionnel, d'une part, à la vitesse de combustion du propergol et, d'autre part, à la surface en combustion cela explique l'importance fondamentale de la forme géométrique de la charge. Quelques exemples de formes simples de charges vont nous donner une idée de la variation dans le temps de la surface de combustion.

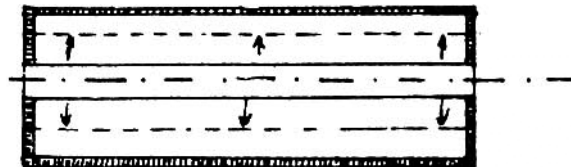
Considérons d'abord une charge cylindrique pleine brûlant par sa face externe, les extrémités en étant inhibées par un vernis spécial incombustible. On constate que la surface en combustion diminue avec le temps pour se réduire à rien sur l'axe du cylindre on dit qu'une telle charge est dégressive.

charge dégressive  
Fig. 1



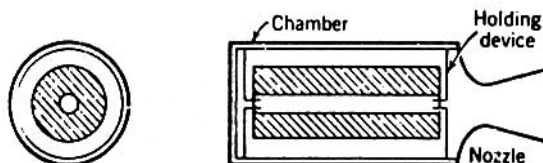
Prenons maintenant le cas d'une charge creuse brûlant par sa face interne, les extrémités et la surface extérieure étant imbibées. Nous constatons dans ce cas, que la surface en combustion croît dans le temps la charge est progressive.

charge progressive  
Fig. 2



Enfin prenons une charge cylindrique creuse brûlant par sa face externe et par sa face interne, les extrémités étant inhibées. La face interne est progressive, la face externe est dégressive, et, en additionnant les deux surfaces en combustion, nous constatons que la surface totale est constante.

charge neutre  
Fig. 3



Dans le tracé des charges on est obligé de tenir compte de la technique de mise en oeuvre des propergols considérés, afin de ne pas se heurter à une impossibilité technologique lors de la réalisation. Les limites géométriques sont imposées par des considérations de diamètre ou de longueur liées à l'engin propulsé, et par des considérations de comportement des charges sous l'effet de l'accélération ou de la pression interne.

### 3.2 CHARGES A COMBUSTION FRONTALE OU TRANSVERSALE.

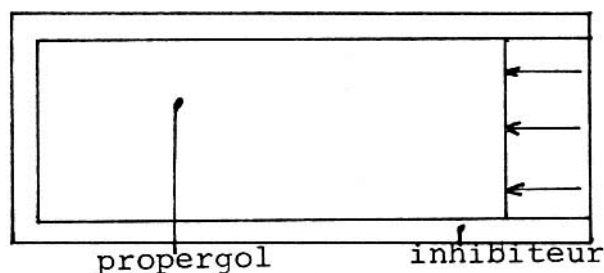
A) Charges à une seule surface de combustion confondue avec la section transversale de la chambre.

Ces charges permettent le remplissage maximum de la chambre, mais leur faible surface de combustion ne permet que des poussées petites pour un diamètre de propulseur donné. Les propulseurs envisagés avec de telles charges, sont d'un calcul aisé. Ils permettent en effet de mettre en évidence les paramètres fondamentaux de la balistique interne. La surface de combustion est neutre et, par conséquent la poussée est approximativement constante.

Toutefois, la loi de poussée réelle montre qu'après la montée en pression initiale, la poussée diminue légèrement avec le temps, en raison de l'augmentation des pertes dans la chambre dont le volume libre croît. Par après, la poussée peut éventuellement recommencer à croître, avec l'augmentation de la température de la partie restante de la charge. Enfin, la surpression finale due à la fragmentation du bloc de propergol, en fin de combustion, est rare dans cette catégorie de propulseurs.

Les charges sont inhibées extérieurement (surface latérale et fond).

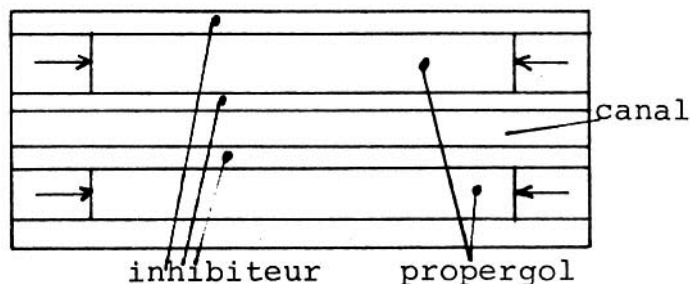
Fig. 4



B) Charges à deux surfaces de combustion opposées.

Le principe de la combustion frontale permet également de faire brûler une charge par les deux extrémités. Dans ce cas, on doit ménager un canal d'écoulement pour les gaz produits par la surface en combustion du côté du fond du propulseur. Ce canal doit être, bien entendu, inhibé. La surface de combustion est aussi neutre dans ce cas.

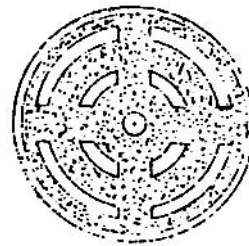
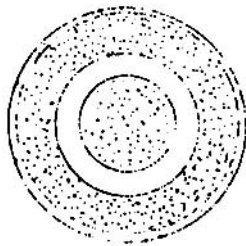
Fig. 5



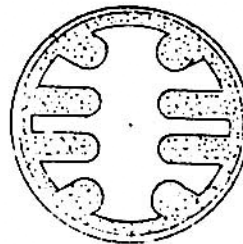
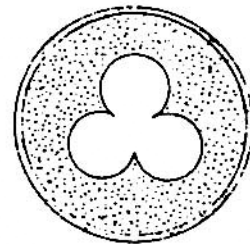
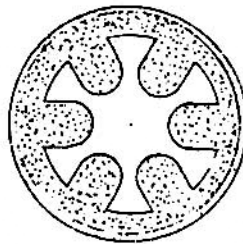
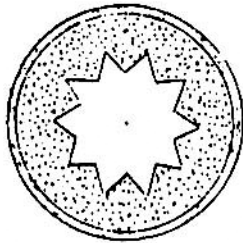
### 3.3 CHARGES A COMBUSTION INTERNE.

Les charges à combustion interne sont celles pour lesquelles les perforations sont totalement entourées par le propergol. Ainsi, les canaux d'écoulement des gaz de combustion le long des charges ne sont pas au contact de la paroi du propulseur. Cette disposition est particulièrement intéressante pour les longues durées de fonctionnement car elle évite l'échauffement du corps du propulseur. Un autre avantage de cette disposition est de centrer automatiquement la charge dans la chambre de combustion et de la maintenir centrée pendant toute la durée du fonctionnement.

On peut trouver des profils de perforation donnant des surfaces de combustion rigoureusement constantes, tels ces cylindres de poudre concentriques

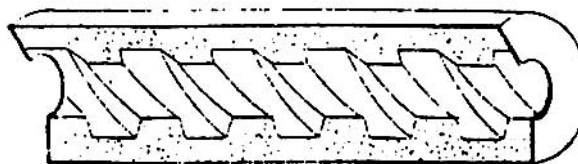


ou seulement approximativement constantes, telles les formes suivantes



mais qui n'évoluent pas le long de la charge et forment donc des blocs qui peuvent être tronçonnés à n'importe quelle longueur.

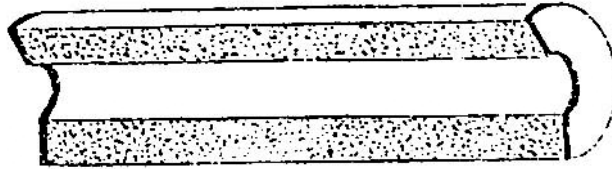
A ce type de charge se rattachent encore les blocs à perforation hélicoïdale, qui permettent également le tronçonnage à n'importe quelle longueur.



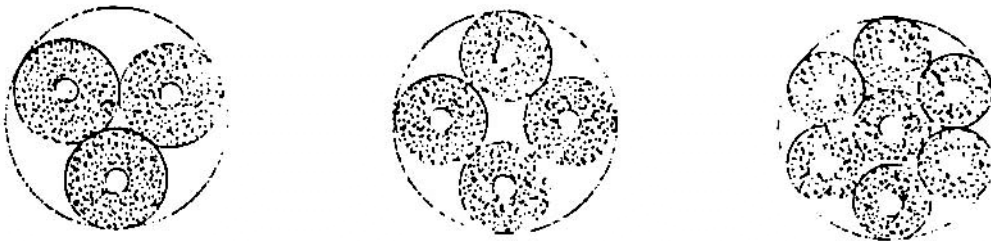
### 3.4 CHARGES A COMBUSTION EXTERNE.

Les charges à combustion externe sont celles dans lesquelles une partie, au moins, des canaux d'écoulement est au contact de la paroi du propulseur. Cette disposition est surtout utilisée pour les courtes durées de fonctionnement. Les blocs correspondants sont généralement filés à la presse.

Un simple bloc tubulaire, inhibé sur les deux faces donne une surface de combustion constante.

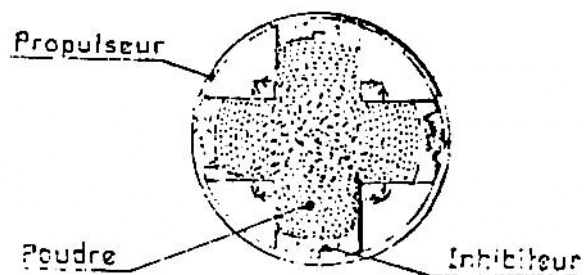
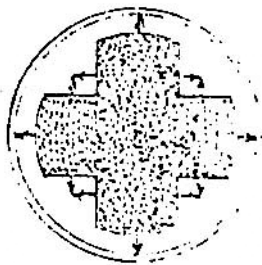


De tels blocs tubulaires peuvent également être assemblés dans un même propulseur par fagots.

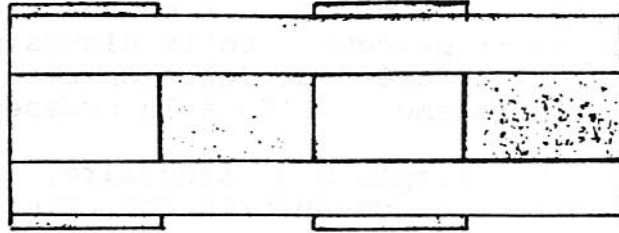
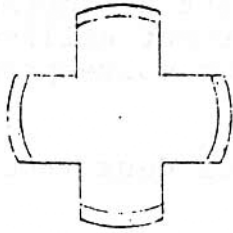


Le remplissage maximum serait obtenu avec un trou central du tube infiniment petit. On en déduit que les coefficients de remplissage sont inférieurs à 0,65 pour 3 blocs, 0,69 pour 4 blocs, 0,78 pour 7 blocs.

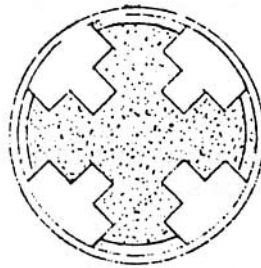
Les blocs cruciformes sont également très utilisés, en particulier dans les raquettes. La combustion d'un bloc donné par toutes ses faces entraîne une réduction de la surface entre le début et la fin de la combustion qui atteint environ 40 %. En inhibant les faces latérales, la surface de combustion augmente au contraire pendant la combustion d'environ 50 %.



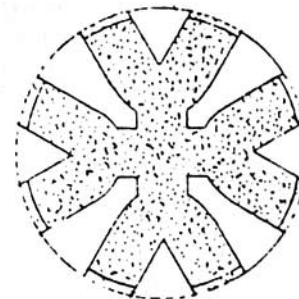
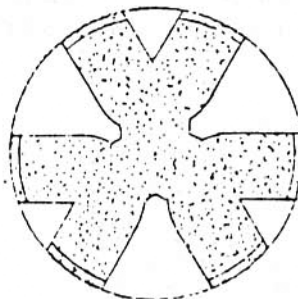
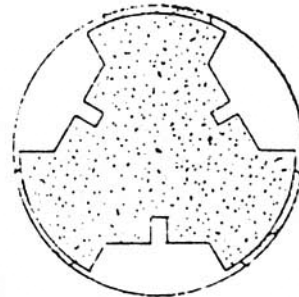
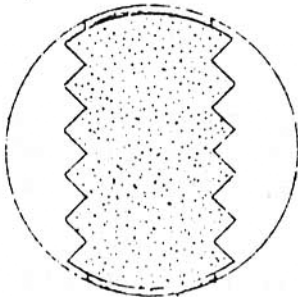
Il est impossible donc d'obtenir une surface de combustion sensiblement constante en n'inhibant qu'une partie des faces latérales:



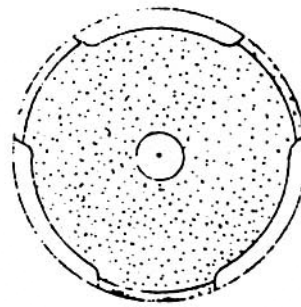
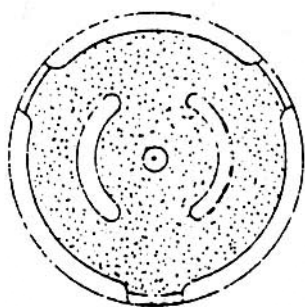
De tels blocs présentent le même avantage que les charges à combustion interne en ce qui concerne leur centrage dans le propulseur, pendant le fonctionnement. Un autre tracé cruciforme peut être obtenu par fraisage à partir d'un bloc cylindrique.



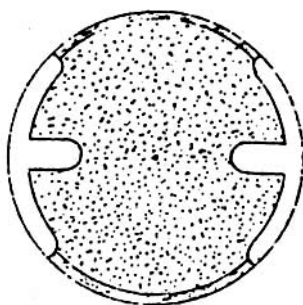
D'un tracé à quatre branches, on peut également passer à un tracé avec un nombre de branches différent. On trouve, dans la documentation les tracés ci-dessous, correspondant à deux, trois, six et huit branches:



On peut bien entendu essayer de centrer aussi un bloc tubulaire en lui adjoignant des pattes inhibées longitudinalement. On arrive alors à des tracés du genre de ceux ci-dessous :



A ces deux traces, on peut encore rattacher le tracé ci-dessous :

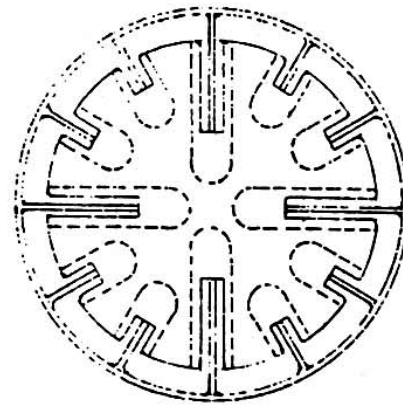
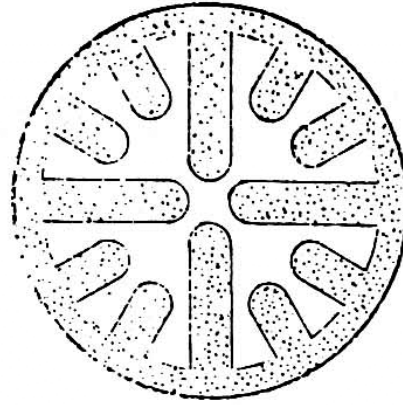


### 3.5 GRILLES ET SUPPORTS DE BLOCS.

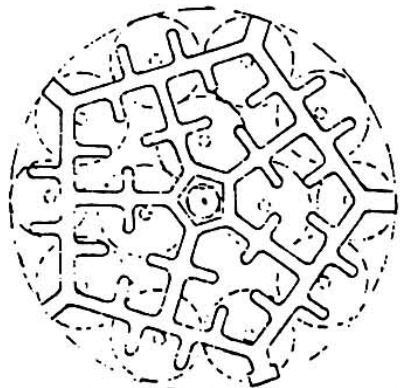
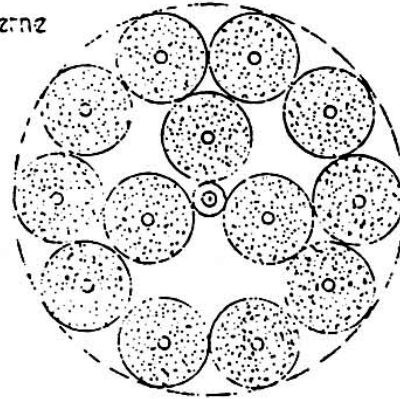
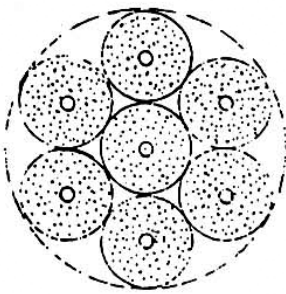
Les grilles et supports de blocs sont des pièces mécaniques insérées entre la section arrière de la charge de poudre et le convergent de la tuyère. Ces pièces sont destinées à supporter les blocs en cours de fonctionnement, de façon à éviter que des efforts dus à la répartition de pression à l'intérieur du propulseur et à l'accélération ne déforment les blocs ou ne les engagent dans le convergent de la tuyère.

Les supports, plus spécialement destinés aux charges à combustion interne, reproduisent généralement la forme de la section de la charge à un instant donné du fonctionnement ; de plus, ils sont raidis par des éléments longitudinaux prenant appui sur le convergent.

Les grilles, plus spécialement destinées aux chargements tubulaires, ne doivent pas permettre le passage de chaque bloc, même en fin de combustion lorsque celui-ci n'est plus qu'un tube extrêmement mince, et de diamètre plus faible qu'au commencement du fonctionnement



Exemples de supports de blocs associés à des charges  
à combustion interne



Exemples de grilles associées à des chargements  
en blocs tubulaires