

I.1. LES SYSTEMES PROPULSIFS SPATIAUX

Le système propulsif est le dispositif permettant à l'aéronef d'acquérir sa vitesse et de vaincre la traînée aérodynamique.

Un moteur fusée peut être classé principalement selon le type d'énergie stockée (chimique, nucléaire, électrique, ...), sa fonction (booster, contrôle d'altitude, manœuvre orbitale, etc.) et les propergols utilisés.

I.1.1. La propulsion chimique

Pour se propulser, une fusée à propulsion chimique éjecte des gaz à la plus haute vitesse possible. Plus la vitesse d'éjection est grande, plus le moteur est performant et économe.

Pour que l'éjection se fasse rapidement, il est important que les gaz soient très chauds, légers, et même si cela a un peu moins d'importance, sous forte pression.

Pour y parvenir, il faut donc produire une réaction chimique très énergétique entre 2 substances (les ergols) dans une chambre de combustion dont la forme est spécialement étudiée pour transformer la température et la pression en vitesse d'éjection.

Cette réaction chimique très énergétique est presque toujours une combustion. Pour obtenir une combustion il faut un combustible (le carburant, ou plus généralement : "ce qui brûle") et un comburant (ce qui fait brûler, souvent l'oxygène, mais pas seulement)[1].

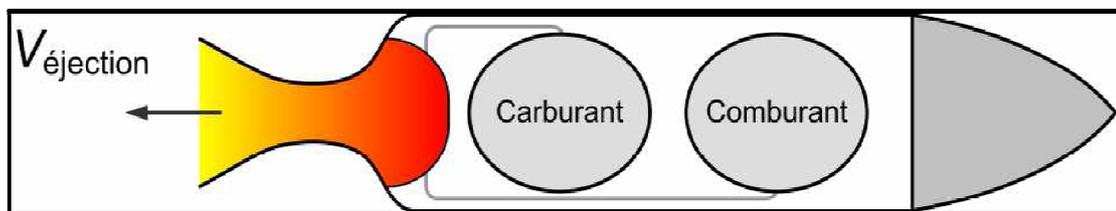


Figure I.1 : éjection de gaz chauds

I.1.1.1. Propulsion chimique liquide

Pour échapper à l'attraction terrestre, un moteur chimique doit faire réagir deux constituants pour éjecter des gaz brûlants à très grande vitesse afin de créer la poussée suffisante. Pour cela on utilise généralement deux composants, le carburant et le comburant. On les nomme plus communément « ergols », les deux formant un couple d'ergols. La propulsion liquide utilise deux ergols, dont le couple actuellement le plus efficace et le plus utilisé est le : dihydrogène / dioxygène (présent dans le moteur Vulcain 2). Ce couple est dit cryotechnique puisque les ergols sont contenu à très basse température, de l'ordre de -253°C . En effet, dans la partie supérieure de la stratosphère, le dioxygène n'étant pas présent en assez grande quantité pour permettre la combustion, il faut l'emmener sous forme liquide[2].

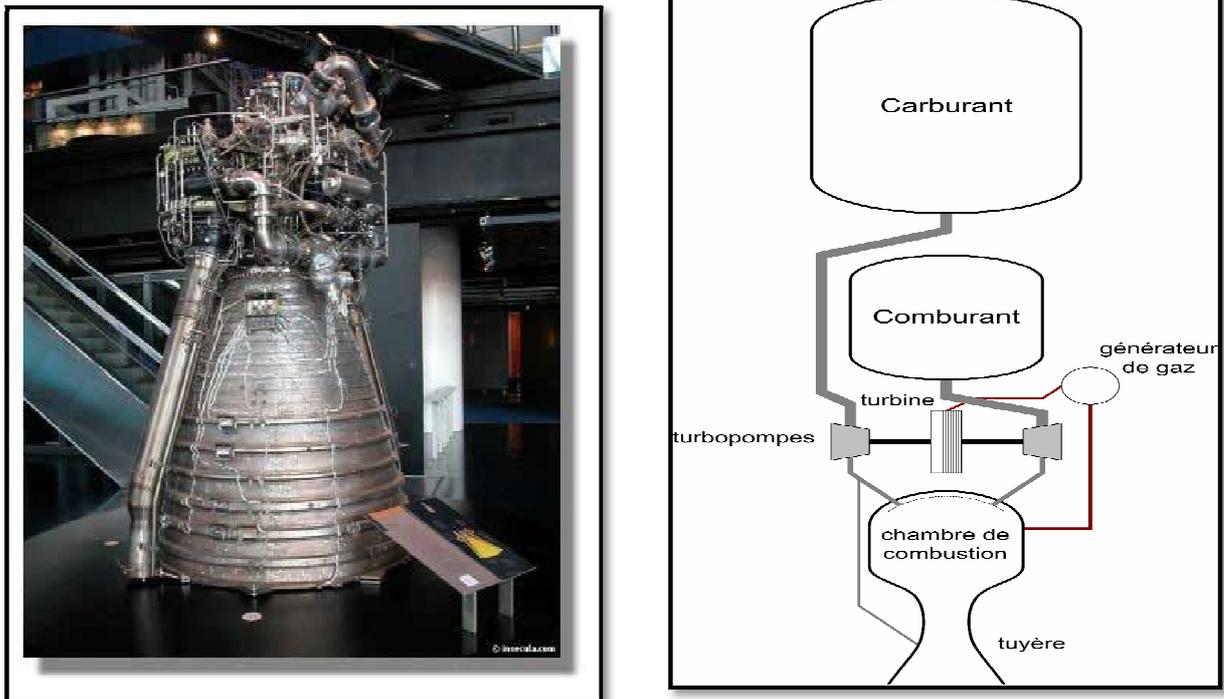


Figure I.2 : une réplique du moteur vulcain

I.1.1.2. Propulsion chimique solide

La propulsion solide utilise le même principe que la propulsion liquide mais a pour combustible du propergol (un propergol est un couple d'ergol, il peut être liquide ou solide). Le mode de fonctionnement reste le même à la seule différence que les propergols sont sous forme de pâte ou de poudre et qu'il n'y pas de chambre de combustion. En effet, la réaction se produit à l'endroit même où les propergols se situent. On peut le comparer à un feu d'artifice géant car il suffit d'une étincelle pour provoquer une réaction en chaîne permettant ainsi d'arracher la fusée du sol. L'étincelle jaillit donc dans un cylindre central et la propagation de la combustion se fait naturellement. Nous ne pouvons donc pas la contrôler mais ce mode de propulsion est très convoité et utilisé dans les fusées Ariane 5/6 et Titan 4[2].

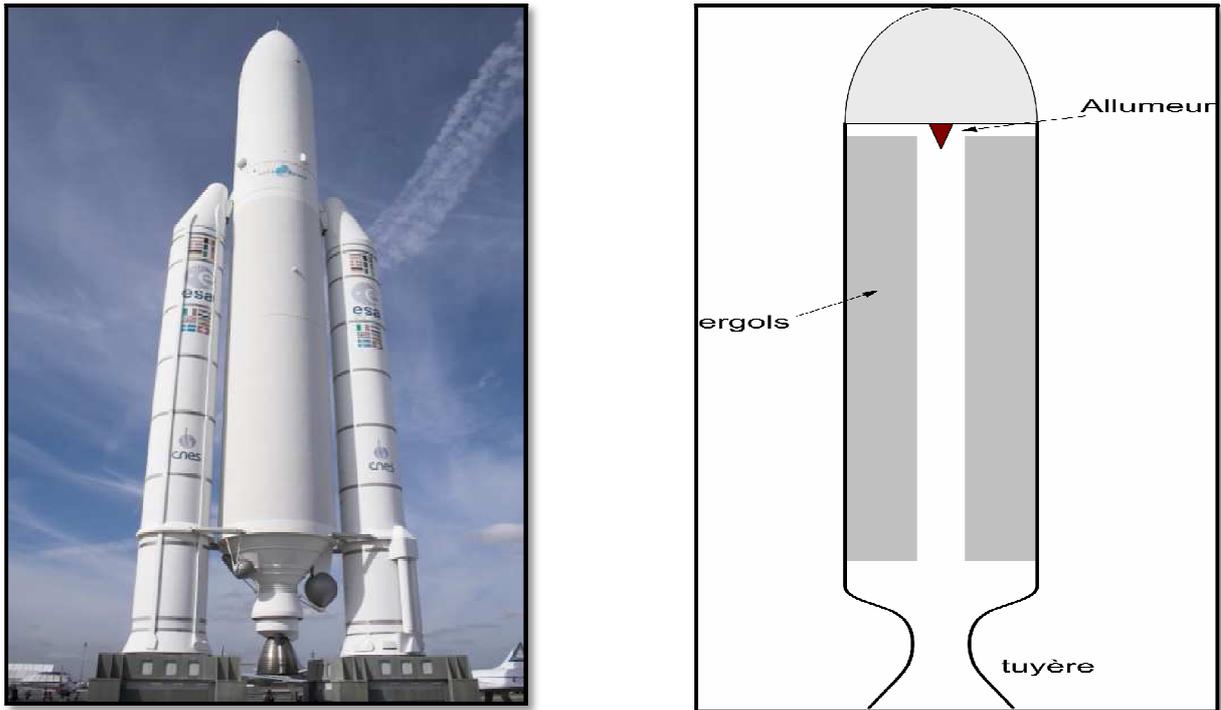


Figure I.3 : Ariane 5

I.1.1.3. Propulsion nucléaire

L'intérêt d'utiliser des propulseurs nucléaires est d'utiliser peu de carburant (l'uranium). Avec une réaction atomique, on produit de la chaleur qui permet de chauffer de l'hydrogène qui va sortir à une vitesse très élevée. Hélas, un des problèmes est l'approvisionnement en hydrogène. De plus, même si ce problème était résolu, de nombreuses polémiques existent quant à la sécurité d'employer l'énergie nucléaire dans l'espace.

On peut utiliser les moteurs nucléaires de manière auxiliaire afin de produire de l'énergie électrique pour alimenter un moteur ionique[3].

I.1.1.4. Propulsion hybride

La propulsion dite hybride utilise des propergols solides et liquides, afin de combiner les avantages des deux types en diminuant les inconvénients. Les premiers essais ont été menés par l'armée américaine en 1958.

Le combustible solide est généralement identique à celui des fusées classiques, sans oxydant. Le comburant est liquide.

L'intérêt de la propulsion hybride réside en sa simplicité, mais aussi dans le fait que la poussée puisse être régulée en variant l'alimentation en comburant liquide.

Aujourd'hui, le projet Perseus du CNES inclut le développement d'un lanceur utilisant la propulsion hybride capable de placer en orbite un satellite d'une dizaine de kilogrammes. SpaceShipOne est le premier avion spatial à utiliser la propulsion hybride[3].

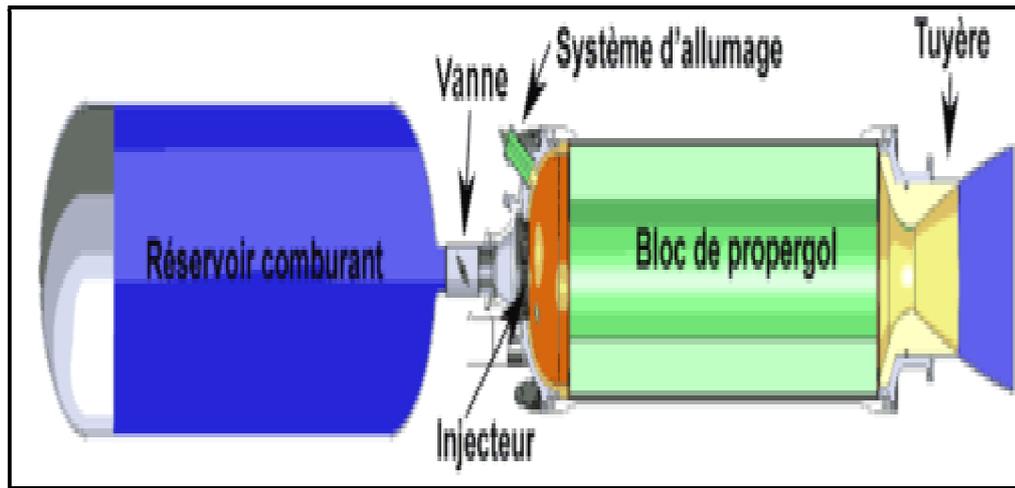


Figure I.4 : schéma d'un moteur hybride

I.1.1.5. Intérêts de propulsion chimique

- Les avantages :
 - ✓ Vitesse d'éjection élevée : économie en ergol.
 - ✓ Rendement élevé (50-60%).
- Les inconvénients :
 - ✓ Faible niveau de poussée.
 - ✓ Complexité et masse du système[4] [5] [6] [7].

I.1.2. Propulsion électrique (ionique)

D'autres moteurs utilisent une réaction non chimique pour la production de la poussée. Leur puissance reste souvent modeste, mais grâce à une faible consommation, ils procurent une accélération constante de très longue durée (permettant ainsi d'atteindre de grandes vitesses après une longue accélération). Ils sont utilisés pour la propulsion de sondes ou de véhicules interplanétaires. C'est le cas des moteurs ioniques.

Ce type de propulsion, comme son nom l'indique, utilise des ions (des atomes ayant perdu ou gagné des électrons, et devenant ainsi chargés) accélérés par un champ électrique ou magnétique (ou les deux combinés) pour créer une force de poussée, et donc assurer la propulsion de l'engin, conformément à la troisième loi de Newton. Comparés aux moteurs chimiques, les moteurs ioniques produisent une poussée relativement faible, mais possèdent une impulsion spécifique très grande (de l'ordre de 3000 secondes), ce qui les rend intéressants dans des voyages interplanétaires. De plus, la mise en œuvre d'un système propulsif ionique est généralement facile, puisque, outre le fait que le principe de propulsion soit assez simple, l'énergie électrique qu'il utilise est, à ce jour, assez bien maîtrisée, ce qui apporte une plus grande flexibilité au niveau de la réalisation et de l'intégration du moteur au

vaisseau spatial. Ces systèmes font actuellement l'objet de recherches poussées, et de nouveaux moteurs toujours plus puissants sortent des laboratoires de recherche (notamment le NASA Jet Propulsion Laboratory). On compte plusieurs types de moteurs ioniques :

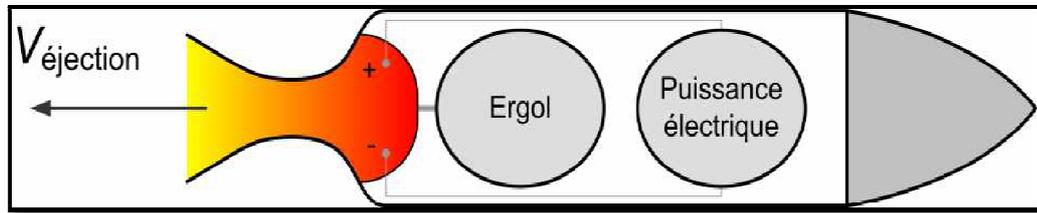


Figure I.5 : éjection de particules chargées (ions)

I.1.2.1. Le moteur ionique électrostatique

Ce type de propulseur produit les ions en bombardant des atomes de gaz (du xénon, choisi pour sa masse atomique élevée et son énergie d'ionisation faible) avec des électrons. Les ions ainsi formés sont ensuite accélérés lors de leur passage à travers deux grilles chargées positivement et négativement. Les ions sont ainsi propulsés à des vitesses pouvant atteindre 29000 m/s.

I.1.2.2. Le moteur ionique électromagnétique

Les ions sont produits de la même façon qu'avec un moteur ionique électrostatique, mais sont accélérés à l'aide d'un champ magnétique, ce qui évite tout contact du carburant avec le système accélérateur, augmentant ainsi la durée de vie du moteur.

I.1.2.3. Le moteur à effet Hall

Ce moteur utilise une combinaison entre un champ magnétique et électrique pour accélérer les ions. Il fait aussi appel à l'effet Hall, processus complexe qui ne sera pas étudié dans cet exposé[8].

I.1.2.4. Intérêts de propulsion ionique

- Les avantages :
 - ✓ Vitesse d'éjection de l'ergol élevée.
 - ✓ Rendement élevée ~ 50-60 %.
 - ✓ Longue durée de tir _ vitesse finale importante.
- Les inconvénients :
 - ✓ Très faible niveau de poussée.
 - ✓ Complexité, masse et encombrement du système.
 - ✓ Opération à basse pression.

- ✓ Puissance disponible limitée[4] [5] [6] [7].

I.2. STRUCTURE D'UN ENGIN AUTOPROPULSÉ À LIQUIDE

est un véhicule qui se déplace dans l'espace grâce à un moteur-fusée en emportant à la fois le combustible et le comburant nécessaires à son fonctionnement. Une fusée comprend plusieurs étages pour maximiser sa capacité d'emport[9]. Ce moteur-fusée comprend :

- Le générateur de gaz qui entraîne les turbopompes.
- Les turbopompes qui mettent sous pression carburant et comburant provenant des réservoirs.
- Les injecteurs qui diffusent les ergols (carburant et comburant) dans la chambre de combustion.
- Le système d'allumage qui initialise la combustion si les ergols ne sont pas hypergoliques
- Le circuit de refroidissement qui refroidit la chambre de combustion et une partie de la tuyère.
- La chambre de combustion dans laquelle sont brûlés carburant et comburant.

La tuyère dans laquelle se réalise la détente des gaz qui sont accélérés[10][11][12][13][14]

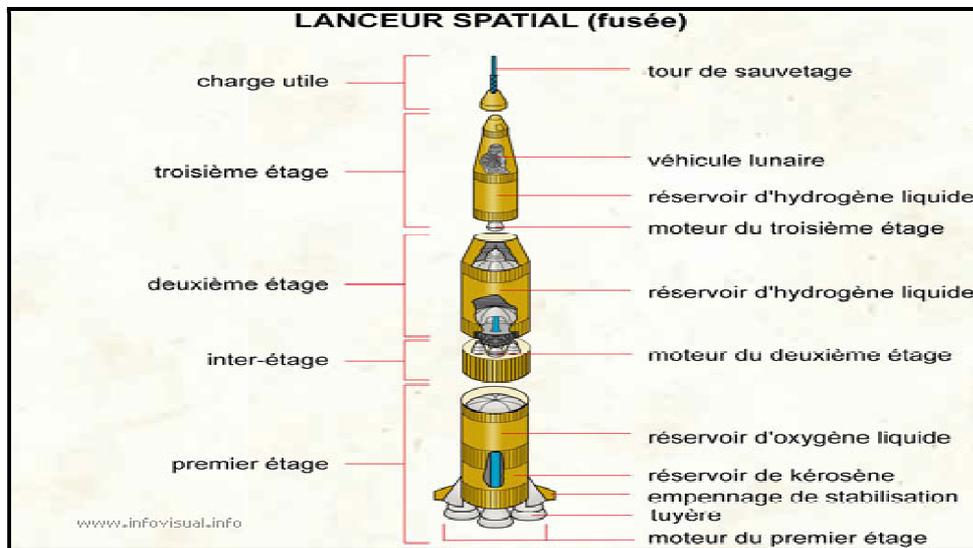


Figure I.6 : composants d'un fusé à liquide

I.3. PROPERGOLES LIQUIDES

Le premier « propergol » liquide semble remonter à 1895-1897, époque à laquelle Pedro A. Paulet, ingénieur péruvien, aurait utilisé l'action du peroxyde d'azote sur de l'essence pour lancer des fusées.

Le combustible et le comburant (les deux « ergols ») sont stockés séparément, à l'état liquide et à basse pression (de l'ordre de 2 bars), dans deux réservoirs (sphères de stockage). À l'allumage du moteur, les deux « ergols » sont injectés conjointement dans la chambre de combustion du moteur, sous très haute pression, grâce à des turbopompes. Ils entrent en réaction chimique. La réaction chimique crée une combustion très vive qui produit une grande quantité de gaz à haute température (de l'ordre de 3000°) et haute pression. Ces gaz s'échappent dans la tuyère à des vitesses de l'ordre de 2000 m/s à 3000m/s (plus de 10.000 Km/h)[15].

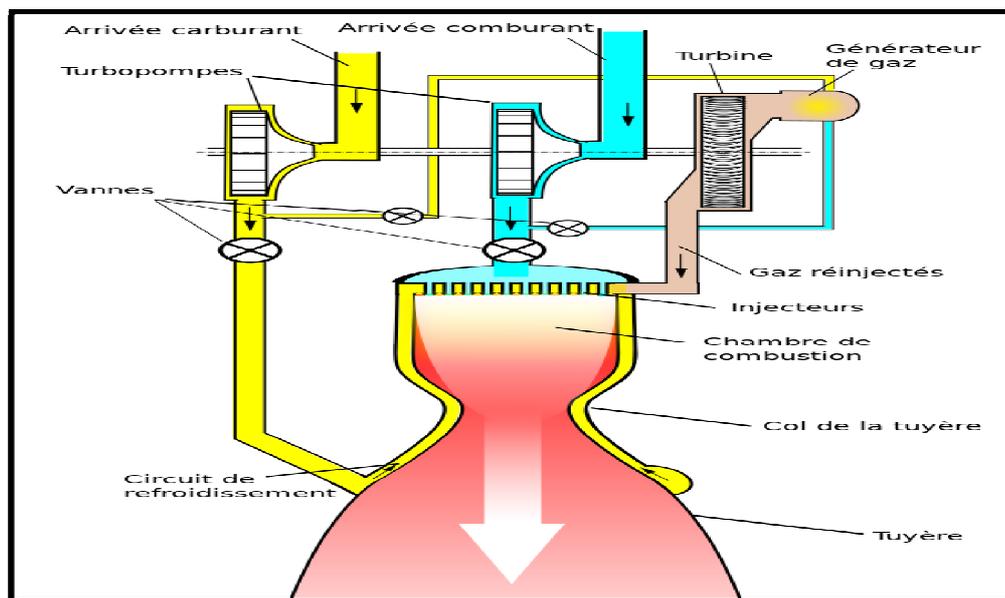


Figure I.7 : schéma de fonctionnement d'un moteur à propergols liquide

I.3.1. Définitions

- Propergols : Un propergol est un produit de propulsion constitué d'un mélange de comburant et de carburant.
- Ergols : Un ergol est une substance homogène employée seule ou en association avec d'autres substances et destinée à fournir de l'énergie.
- Carburants : Un carburant est un combustible qui alimente un moteur thermique constitué à base de carbone (kérosène, hydrogène liquide).
- Comburants : Un comburant est un corps chimique qui a pour propriété de permettre la combustion (oxygène liquide, ...)[16].

I.3.2. Principaux ergols liquides

- Oxydants (comburants) :

- ✓ oxygène liquide (LOX).
- ✓ peroxyde d'azote (NTO).
- ✓ peroxyde d'hydrogène.
- ✓ fluor liquide.
- ✓ fluorure d'oxygène.
- Réducteurs (carburants) :
 - ✓ hydrogène liquide (LH2)
 - ✓ hydrazine
 - ✓ hydrate d'hydrazine
 - ✓ Sintin (kérosène de synthèse qui fut utilisé par Soyouz-U2)
 - ✓ Ethanol[15].

I.4. POUSSEE ET PERFORMANCE D'UN SYSTEME MOTEUR – FUSEE

I.4.1. La force de poussée

Le théorème des quantités de mouvements indique que la poussée P est proportionnelle au débit massique m° et à sa vitesse d'éjection V_e

m° en Kg/sec

V_e en m/sec

P en Kgf ou Kg'

$$P = m^\circ \times v_e \text{ (I.1)}$$

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[17].

$$P = m^\circ \times v_e + (P_e - P_a)A_e \quad \text{(I.2)}$$

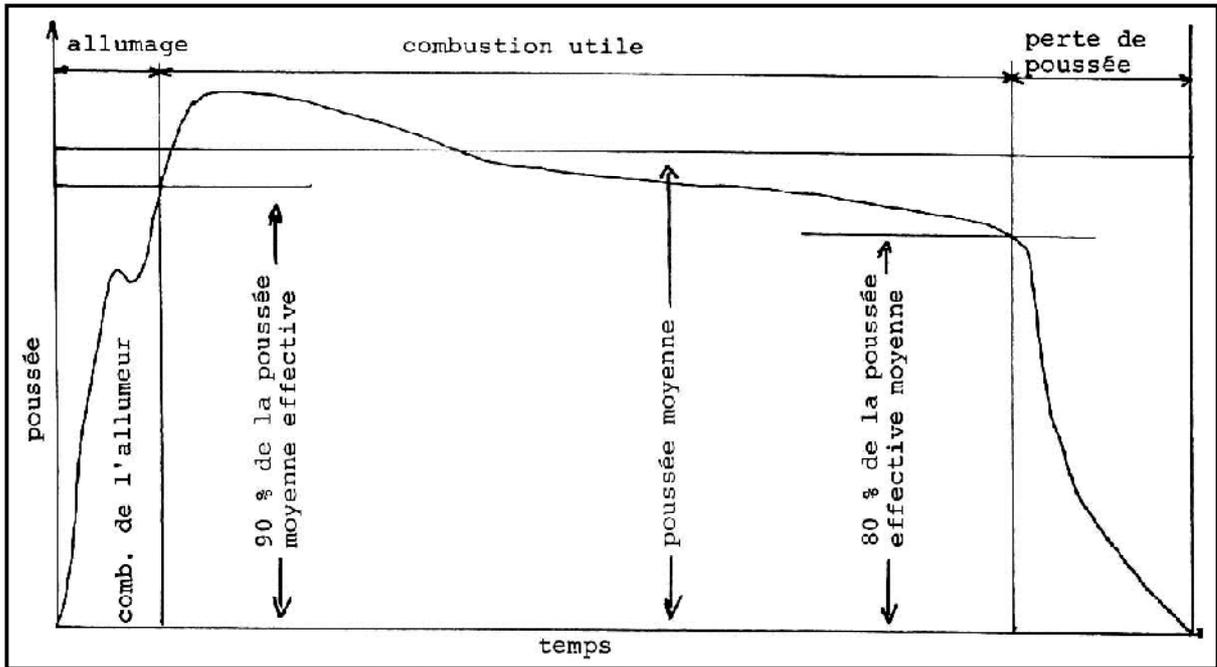


Figure 1.8 : profil type de la courbe de poussée d'un moteur-fusée

I.4.2. Performances d'un système moteur- fusée

L'astronautique actuelle repose en grande partie sur les performances des moteurs fusées grâce auxquels on peut communiquer aux charges utiles les vitesses formidables nécessaires à leur satellisation.

C'est ainsi qu'ARIANE, dont la mission nominale est la mise en "orbite de transfert géostationnaire" doit amener une ou plusieurs charges utiles au périgée, à quelques centaines de km d'altitude, en leur communiquant une vitesse d'environ 10 km/s.

Après séparation, les charges utiles livrées à elles-mêmes décrivent sans cesse l'orbite de transfert entre le périgée et l'apogée à 36 000 km, jusqu'à ce que leur moteur soit allumé à l'apogée et leur communique le gain de vitesse qui les fait passer sur l'orbite définitive équatoriale et circulaire d'altitude 36 000 km : le satellite est alors fixe par rapport à la terre.

Mais, le satellite doit encore être équipé de petits moteurs complémentaires destinés à parfaire cette trajectoire, à la corriger des effets de l'attraction solaire ou lunaire ou encore à contrôler son orientation vers la terre[18].

De nombreuses caractéristiques permettent de mesurer les performances d'un moteur-fusée. Certaines sont importantes dans tous les cas d'utilisation :

- La poussée.
- L'impulsion spécifique c'est-à-dire la vitesse des gaz éjectés. Celle-ci dépend en premier lieu de la combinaison d'ergols utilisée et en deuxième lieu de l'efficacité du circuit d'alimentation, de la combustion et du circuit de refroidissement.

- Le rapport poids (du moteur) /poussée.
- Optimisé pour le fonctionnement dans le vide : la longueur du divergent est soit optimisée pour le fonctionnement dans le vide soit pour les basses couches de l'atmosphère[10][11][12][13][14].