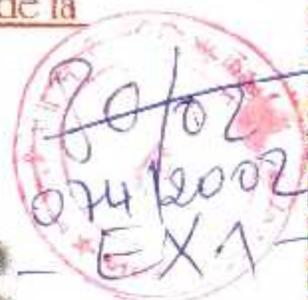


République Algérienne démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université de Blida
Institut d'Aéronautique



OBJET DE FIN D'ETUDE

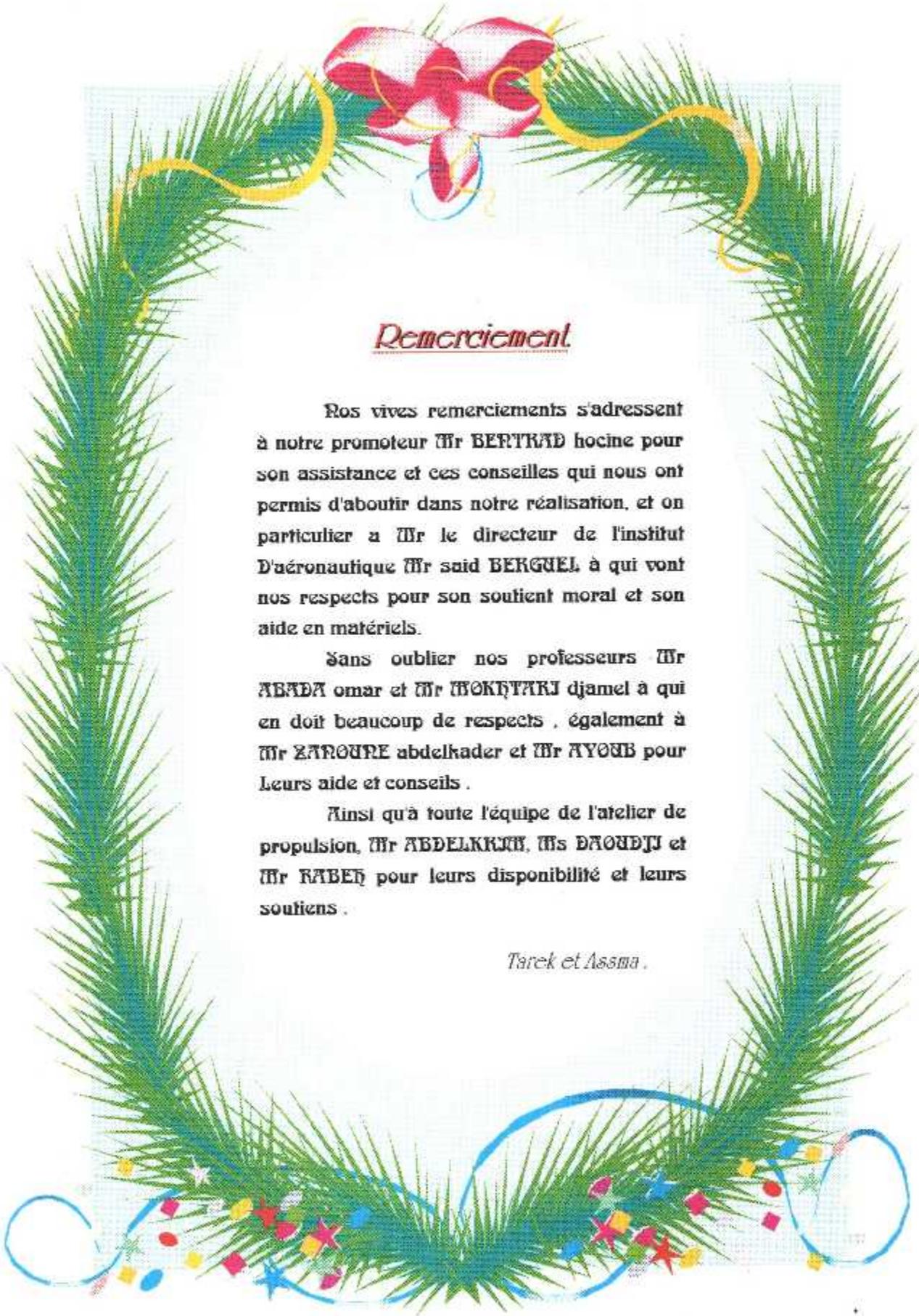
THEME

**Elaboration d'un banc d'essais
pour statoréacteur et
pulsoréacteur**

Proposé par :
Gentrac
Rouane

Présenté par :
Hamid Tarek
Mansour Abite

SESSION : 2002
OPTION : PROPULSION



Remerciement.

Nos vives remerciements s'adressent à notre promoteur M^r BERTRAND hocine pour son assistance et ces conseils qui nous ont permis d'aboutir dans notre réalisation, et en particulier à M^r le directeur de l'institut D'aéronautique M^r saïd BERGUEL à qui vont nos respects pour son soutien moral et son aide en matériels.

Sans oublier nos professeurs M^r ABADA omar et M^r MOKHTARI djamel à qui en doit beaucoup de respects , également à M^r ZAROURE abdelkader et M^r AYOUB pour leurs aide et conseils .

Ainsi qu'à toute l'équipe de l'atelier de propulsion, M^r ABDELKRIM, M^s DAOUDJ et M^r RABEH pour leurs disponibilité et leurs soutiens .

Tarek et Assma .

Dédicaces.

Je dédie ce mémoire à mon père et
à ma mère bien aimé pour leurs sacrifices
À mes frères adorés rafik toufik
abderrahmen et lounis mon bien aimé ,
À SAMJRA et à RABEN pour
l'aide et le soutien qu'il mon offert ,
Et en particulier à mon binôme
ASSMA ,
À mes tentes ZFOR et
MJASSA ainsi qu'à tous mes cousines
et cousins .
À tous mes amies et
particulièrement SOFJANE et
YOUNES .
À mes collègues ingénieurs
TOUFIK et MOUNJA À ma cousine
KARJNA et mes amies FOUZJA
NASSJNA SJHEM, FACJNA
DJIDA...
Et à tous ceux qui méritent mes
respects.

TAREK...





Dédicaces.

Je dédie ce travail à celle qui
encouragé durant mes études, ma
très cher grande mère **MJMA**,
A ma mère et à mon père qui mon
apportés bonheur, amour et
tendresse, ainsi qu'à mon grand père
bien aimé.

A mes très chers sœurs, **SABAË**,
MALJKA et la petit **MANEL**,
A mes tentes et oncles, Ainsi qu'à
toutes mes cousines et cousins,
SADEK, **KABJBOU**,
TASMJME et **SALSABJL**,
A mon cher binôme **TAREK**,
A mes très cher amies **KAYET**,
LEJLA, **JDRJNE**, **NABJLA**,
RADJA, **LABBASSJ**,
KOUARJ, **CHAKJR**, **AMJNA**,
BACHJR, **TOUFJK**, **MOUNJR**
et **NASSJMA**...

ASSMA.

Sommaire

<u>Introduction</u>	2
----------------------------------	---

Chapitre I : Statoréacteur.

1. Description	4
2. Fonctionnement	5
3. Différents types de statoréacteur	5
3-1 Statoréacteur classique	6
3-2 Statoréacteur à combustion supersonique	6
3-3 Statoréacteur combiné	7
4. Le domaine de vol du statoréacteur	10
5. Etude technologique d'un statoréacteur classique	11
5-1 Entrée d'air	12
5-2 La chambre de combustion	14
5-3 Tuyère d'éjection	18

Chapitre II : Pulsoréacteur.

1. Introduction et description	21
2. Différents types de pulsoréacteurs	21
3. Pulsoréacteur à valves mobiles	22
3-1 Description	22
3-2 Cycle de fonctionnement	22
3-3 Fonctionnement des valves d'obturations	24
3-4 Problèmes et solutions	25
3-5 Différents formes de valves	27
3-6 Différents applications des pulsoréacteurs	28
4. Pulsoréacteur sans valves ou à valves aérodynamique	30
4-1 Pourquoi un pulsoréacteur sans valves ?	30
4-2 Description	31
4-3 Cycle de fonctionnement	31
5. Comparaison entre le statoréacteur et le pulsoréacteur	32

Chapitre III : Etude thermodynamique.

1. Etude thermodynamique d'un statoréacteur classique	35
1-1 Entrée d'air subsonique divergente	36
1-2 La chambre de combustion	39
1-3 Tuyère d'éjection	43
1-4 Performances du statoréacteur classique	45
2. Etude thermodynamique d'un pulsoréacteur à valves	47

Chapitre IV : Ventilateur .

1. Définition.	58
2. Constitution d'un ventilateur	58
3. Classification.	60
3-1 Classification suivant l'utilisation et le mode de raccordement	60
3-2 Classification suivant la position dans le circuit	61
3-3 Classification suivant la trajectoire du fluide dans la roue	62
3-4 Classification suivant l'augmentation relative de la pression	63
3-5 Classification suivant le mode d'entraînement	64
4. Les caractéristiques d'un ventilateur	66
4-1 Les caractéristiques primaires	66
4-2 Les caractéristiques secondaires	68
5. Triangle de vitesse dans un ventilateur centrifuge	69
5-1 A l'entrée du ventilateur station	69
5-2 A la sortie de la roue	69
6. Les courbes caractéristiques d'un ventilateur	72

Chapitre V : Instruments de mesures .

1. Introduction	73
2. Mesure de pression	73
2-1 . Les manomètres	73
2-2. Les manomètres à déformations de solide	73
2-3. Les manomètres à liquide	74
2-4. Principe de mesure	74
3. Mesure du débit	77
3-1. Le débitmètre à orifice déprimogène	77
3-2. Les prises des pressions dans un appareil déprimogène	78
3-3. Principe de mesure par la différence de pression	79
3-4. Description du débitmètre a flotteur	80
4. Mesure de la vitesse	82
4-1 Le tube de Pitot	82
4-2 Le tube de venturi	82

5. Mesure de la température	84
5-1 Définition	84
5-2 Différents types de thermocouples	85
5-3 Mesure de température par thermocouple	85

Chapitre V : Le banc d'essais.

1. Introduction	88
2. Le ventilateur	89
3. Le socle	90
4. Le statoréacteur	92
a) L'entrée d'air	93
b) La chambre de combustion	95
c) La tuyère d'éjection	96
d) Mode de fonctionnement	97
5. Le pulsoréacteur	97
a) L'entrée d'air	98
b) Le manche de raccordement	102
c) La rampe d'injection	102
d) La chambre de combustion	103
e) La tuyère d'éjection	104
f) Mode de fonctionnement.....	105
6. Le circuit d'alimentation carburant.....	106
- Mesures de sécurités	107
7. Le circuit d'allumage électrique	108
8. Le système de contrôle.....	110
9. Mesure de sécurités	112
a) A l'arrêt... ..	112
b) En fonctionnement	112
10. Les procédures de démarrage stato et pulso	112
11. Phase d'accélération	113
12. Extinction	113
13. Manipulation	114
a) Caractéristiques ventilateur	114
b) Détermination de la vitesse de soufflage entrée moteur stato ...	117
c) Détermination des performances du statoréacteur.....	118
d) Interprétation des résultats	121

Conclusion

125

Liste des symboles

126

Bibliographie.

127

Introduction

Introduction :

Le statoréacteur et le pulsoréacteur sont deux moteurs à réaction dépourvus d'organes tournant tel que le compresseur et la turbine, pour effectuer un cycle moteur. Malgré leur simplicité de réalisation et de mise au point technologique, ces moteurs à réactions reste compliqué à maîtriser et présente une consommation intensive de combustible.

Toute fois on peut rencontrer ces types de moteurs sur des avions à échelle réduit (pulso) et pour la propulsion de certains avions et missiles (stato).

Vu la disponibilité de deux moteurs abandonner à caractère didactique, nous à ramener de penser à concevoir et de réaliser un banc d'essais permettant de contenir les deux machines, pour pouvoir mettre à la disposition de nos camarades étudiant à l'atelier de propulsion deux moteurs en parfaite états de fonctionnement.

Le travail entrepris s'est soldé par une maintenance effectuer sur les deux moteurs ainsi que le ventilateur, la compréhension de leur fonctionnement et de leur mise en marche d'une part. Et l'élaboration d'un banc d'essais a usage didactique assurant la mise en fonctionnement et le contrôle des deux moteurs d'une autre part.

Chapitre 1

Statoréacteur

1. Description :

Le statoréacteur qui veut dire réacteur statique, à été inventé en 1911 par le Français R.LORIN, avec un principe de fonctionnement très simple pour les vols à grandes vitesses.

Il s'agit simplement d'un tube dans lequel on fait brûler du carburant. Il a été utilisé sur quelques avions expérimentaux notamment le Griffon et la série d'avions Le DUC qui avaient en commun une silhouette inimitable.

Le statoréacteur est adapté à des vitesses très élevées (Mach=1 - Mach=5), il est utilisé principalement de nos jours à des tâches très spécifiques comme la propulsion de missiles.



Fig.(1-1) Le Griffon.



Fig. (1-2) Le DUC.

À la différence d'un turboréacteur le statoréacteur ne contient aucune pièce mobile, seulement une entrée d'air, une chambre de combustion qui comporte des injecteurs de carburant, un accroche flammes, et un canal d'éjection.

Le statoréacteur ne fonctionne réellement qu'à des vitesses supérieures à 500 km/h et s'avère très gourmand en kérosène. Il est donc inadapté aux phases de décollage et d'atterrissage, c'est ce qui explique son utilisation très limitée dans l'aviation moderne.

En théorie, le statoréacteur n'a pas de vitesse limite, il peut accélérer indéfiniment aussi longtemps qu'il reste de l'oxygène dans l'air. Cependant, il est en pratique limité aux basses vitesses hypersoniques (de l'ordre de Mach=5). Au-delà de cette limite, les performances du statoréacteur se dégradent à cause des hausses de température de l'air admis.

2. Fonctionnement :

En raison du déplacement de l'avion vers l'avant, une grande quantité d'air se trouve introduite à travers le diffuseur où la compression est assurée par freinage d'air, entraînant ainsi une augmentation de pression depuis la pression atmosphérique P_0 jusqu'à la pression P_2 à la sortie du diffuseur.

Bien que la vitesse de l'écoulement d'air libre à l'entrée du diffuseur peut être sonique ou subsonique, l'écoulement sortant l'admission est généralement gardé en régime subsonique pour maintenir une bonne combustion toujours subsonique.

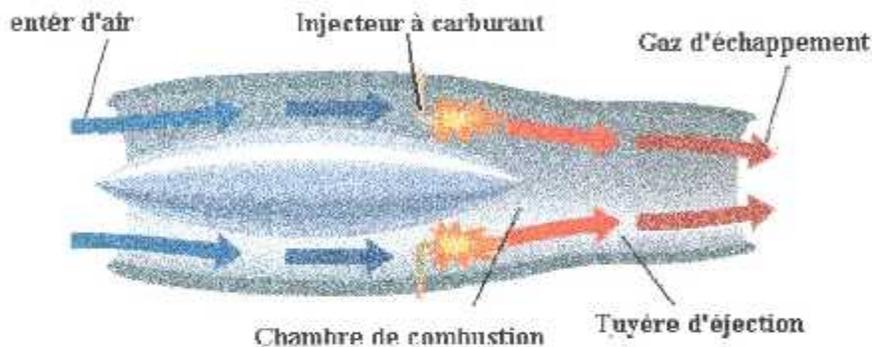


Fig (1-3) Statoréacteur subsonique classique (Ramjet).

L'air est admis à la chambre de combustion où, une quantité de combustible est injecté et brûlée, pour assurée une réaction de combustion complète à pression constante. La flamme est accrocher à l'intérieur grâce à un dispositif appeler accroche flammes.

Les gaz de combustion portée à une température très élevée sont accélérés dans une tuyère d'échappement et éjectés à l'arrière du statoréacteur, jusqu'à la pression atmosphérique.

3/ Différents types de statoréacteur :

Les statoréacteurs sont classés suivant la mission et la vitesse de vol, il existe trois catégories :

- ☛ Les statoréacteurs classiques,
- ☛ Les statoréacteurs hypersoniques,
- ☛ Les statoréacteurs combinés.

3-1/ Statoréacteur classique :

Le statoréacteur classique est moteur comme il a été présenté précédemment, ou l'énergie cinétique de l'air capté par l'entrée d'air est transformée en énergie de pression, puis il s'établit une réaction de combustion à une vitesse subsonique pour sortir enfin accélérer à travers un col sonique vers l'atmosphère.

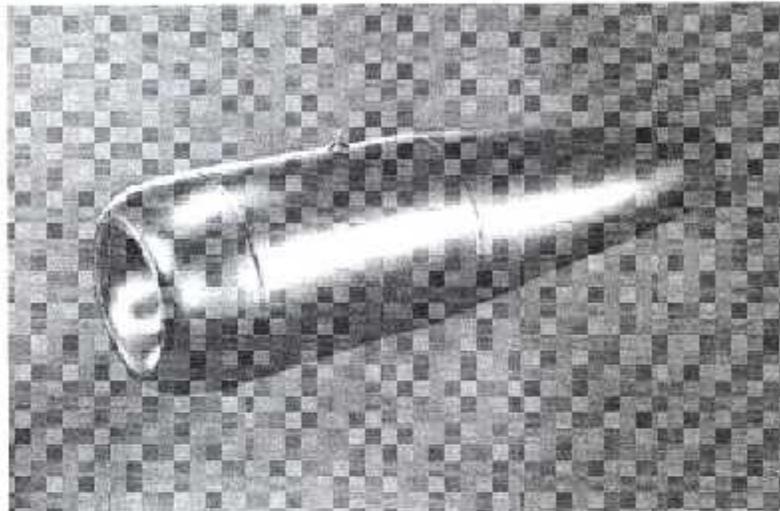


Fig.(1-4) Statoréacteur classique.

Le statoréacteur classique peut être utilisé jusqu'à une vitesse de vol voisinant de ($M = 6$)

3-2/ Statoréacteur à combustion supersonique (scramjet) :

Comme son nom l'indique déjà, dans ce type de statoréacteur on ne parle plus de section sonique ou de col sonique d'éjection, car l'écoulement reste toujours supersonique à l'intérieur.

Ce mode de combustion présente sur la combustion subsonique les avantages suivant :

- ☞ Meilleures performances.
- ☞ Meilleur rendement énergétique.
- ☞ Meilleure tenue technologique.

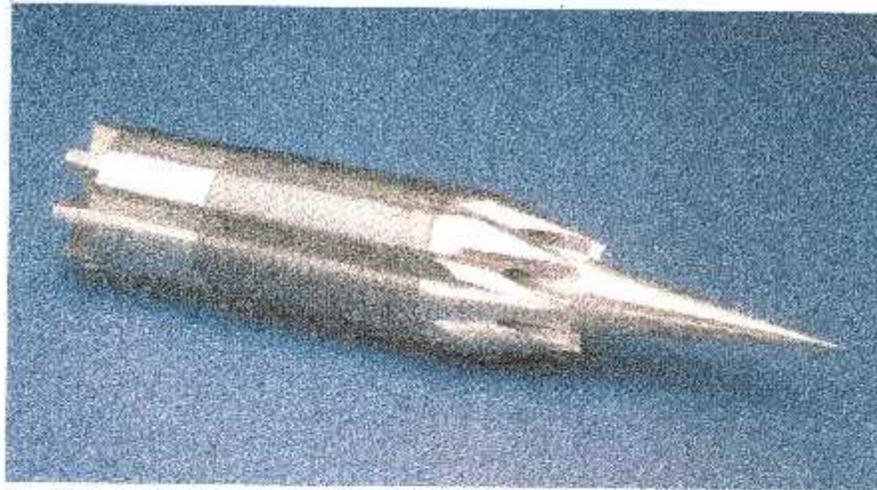


Fig.(1-5) Statoréacteur hypersonique (Scramjet).

3-3 /Statoréacteur combiné :

Les statoréacteurs combinés sont le résultat d'une association d'un statoréacteur avec un turboréacteur ou bien avec une fusée, permettant ainsi au point d'une certaine complexité technologique d'améliorer les performances plus que celle relative à chacun tous seul.

Les stato-combinés existe sous plusieurs formes :

3-3-1 /Le turbo-stato :

Le turbo-stato est l'association d'un turboréacteur et d'un statoréacteur classique qui trouve une utilisation intéressante dans le domaine des vitesses entre ($M = 0$ a $M = 6$).

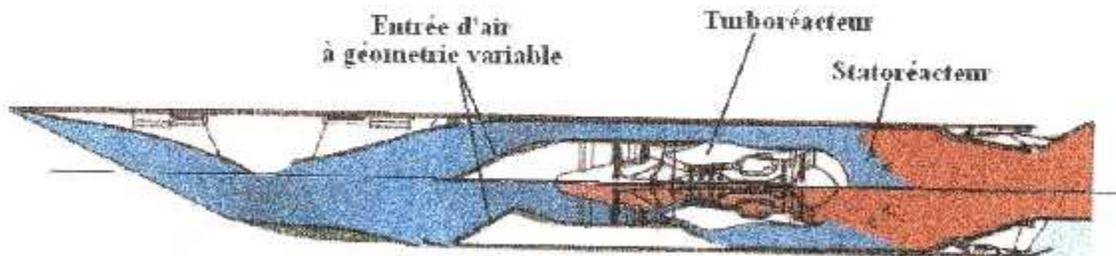


Fig.(1-6) Le turbo-stato .

Son principe est simple le turboréacteur est placé au centre du combiné est progressivement by-passé lorsque les vitesses de vol atteignent ($M = 2$).

Ce type de combiné offre une amélioration du domaine de vol pour les deux composants (turbo et stato) et une conservation de la consommation spécifique propre pour chacun d'eux.

Le domaine d'application du turbo-stato est celui de l'avion hautement supersonique comme le *SR-71 Black-bird*.

3-3-2 / Le turbo- fusée :

Dans ce type de combiné, L'énergie nécessaire à entraînée la turbine liée au compresseur du turboréacteur classique n'est plus fournie par une chambre de combustion, mais par un générateur fusée qui assure la plus grande partie de la poussée.

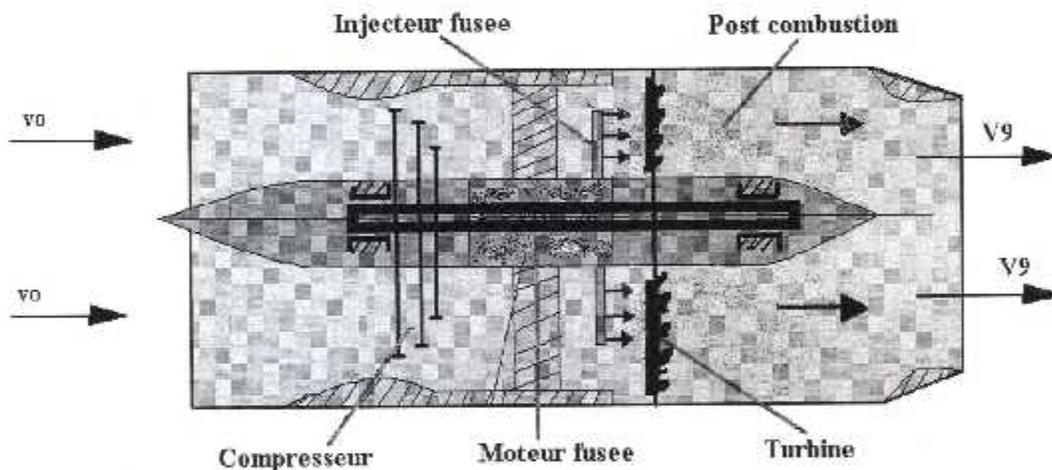


Fig.(1-7) Turbo-fusée.

La richesse du mélange dégagé par la fusée doit être élevé dans le but d'avoir du combustible en excès qui est ensuite brûlé avec l'air captée par le compresseur.

Aux vitesses supérieures à ($M = 4$), le fonctionnement du turbo-stato est envisageable, le statoréacteur étant alimenté par les gaz riches de la fusée, alors que le turbo est progressivement by-passé.

Ce type de combiné offre une technologie plus simple que celle du turbo classique. Le domaine d'application est celui du missile supersonique de moyen portée

3-3-3 / Le statoréacteur à deux modes :

Comme son nom l'indique déjà le statoréacteur à deux modes permet l'utilisation d'une combustion subsonique puis supersonique à partir de $M=5$ dans une même chambre de combustion, lui permettant d'effectuer des missions entre $M=2$ et $M=7$.

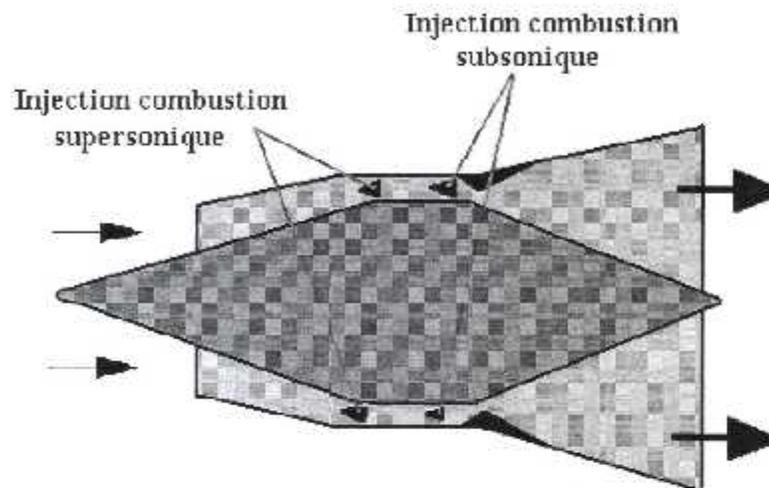


Fig.(1-8) Statoréacteur à deux modes.

Avec des performances meilleures à celle d'un statoréacteur classique fonctionnant dans le même domaine de vol.

L'emploi de la combustion supersonique permet de définir un propulseur à géométrie fixe (pas de variation de prise d'air et d'éjecteur).

3-3-4 / La fusée à appoint d'air :

Utilisé pour la propulsion des missiles par les Russes, la fusée à appoint d'air permet une captation d'air disposée annulairement autour d'un éjecteur de fusée permet d'améliorer les performances de cette dernière.

Malgré la complexité technologique de réalisation, la fusée à appoint d'air offre une consommation spécifique inférieure à celle de la fusée de l'ordre de 2.

Les fusées à appoint d'air sont utilisées sur les missiles russes.

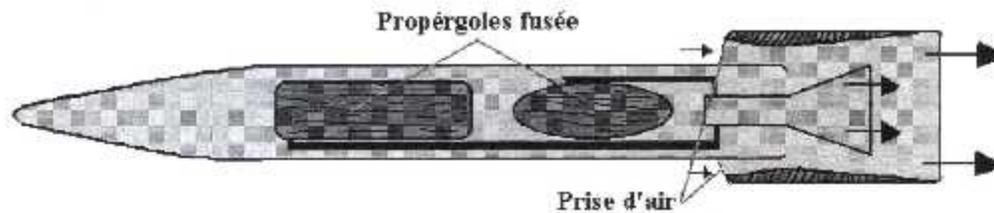


Fig.(1-9) Fusée à appoint d'air.

3-3-5/ Le stato-fusée :

La différence entre le stato-fusée et la fusée à appoint d'air se résume dans le rôle de la fusée. Dans le stato-fusée la fusée n'a qu'un seul rôle celui d'un générateur à gaz alors que la majeure partie de la poussée est assurée par la partie stato, par contre dans la fusée à appoint d'air la fusée est prépondérante

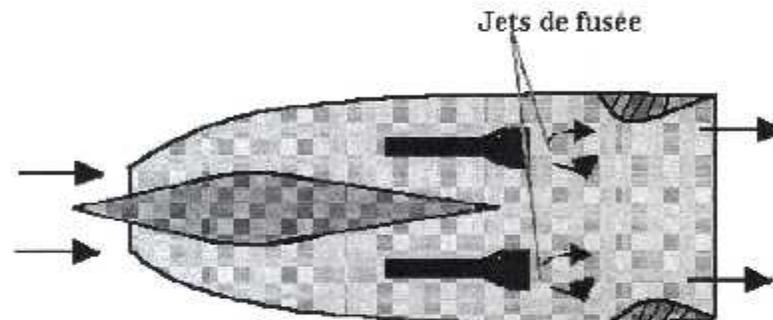


Fig.(1-10) Stato-fusée.

Plusieurs types de stato-fusée pouvant être envisager, permettent de réaliser des propulseurs monoétage très compacts et performants.

4- / Le domaine de vol du statoréacteur :

Les statoréacteurs peuvent être utilisés soit comme des propulseurs de croisières, soit comme des propulseurs d'accélération, offrant un vaste domaine d'application et d'évaluation qui a été bien confirmé par de nombreuses expériences en vol qui peut aller jusqu'à des vitesses avoisinantes le $M=21$ à de très hautes altitudes.

Pour le statoréacteur classique le domaine théorique d'évolution s'étend jusqu'aux vitesses voisines de $M=5$ évoluent à une altitude ne dépassant pas 40 km.

Sur le plan technologique, les principaux problèmes posés par la réalisation de statoréacteur à combustion supersonique sont :

- ☞ Les problèmes de la portance.
- ☞ Le problème d'ordre thermique, suites aux fortes températures atteintes dans la chambre de combustion.
- ☞ Le problème de régulation nécessaire pour optimisée les performances.

Le domaine d'évolution du statoréacteur et de tout ses combinés est représenter dan le schéma suivant :

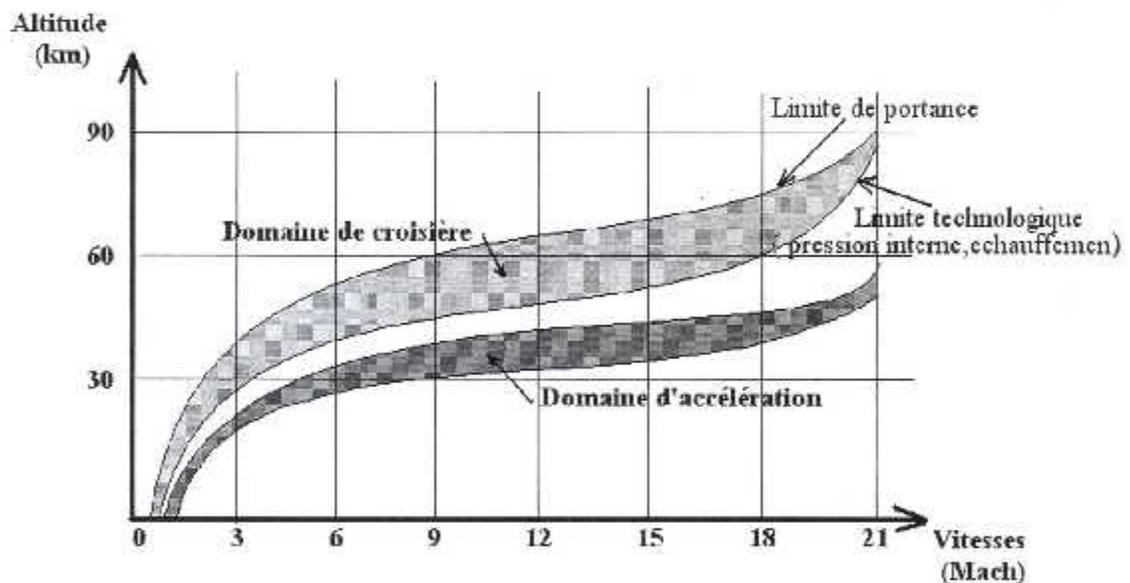


Fig.(1-11) Domaine d'évolution du statoréacteur.

5- Etude technologique d'un statoréacteur classique :

Nous allons consacrer la majeure partie de notre travail à l'étude d'un statoréacteur classique équipé d'une entrée d'air subsonique (divergente) de type pitot, d'une chambre de combustion subsonique à section constante et d'une tuyère d'éjection convergente.

5-1 / Entrée d'air :

L'entrée d'air se présente généralement sous la forme d'une conduite à section variable, elle a pour rôle de faire le raccordement entre les filles d'air avec l'entrée du compresseur pour les turboréacteurs ou, bien l'entrée de la chambre de combustion pour les statoréacteurs et ce pendant les différents phases de vol.

Les entées d'air utilisé dans le domaine de l'aviation sont de type subsonique ou supersonique.

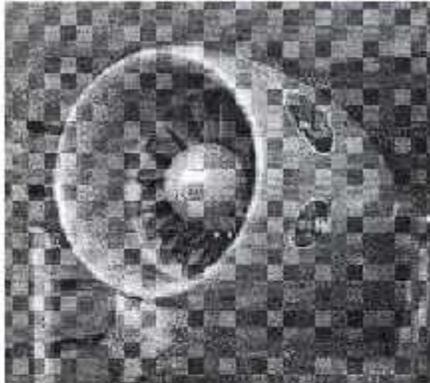


Fig.(1-12) Entrée d'air
Subsonique.



Fig.(1-13) Entrée d'air supersonique.

5-1-1 / Les différentes formes d'entrée d'air :

Les entées d'air se diffèrent suivant le domaine d'évolution de l'aéronef, car d'après la relation d'HUGONIOT, en fonction du nombre de Mach (M) qui caractérise l'écoulement ; la vitesse varie d'une manière inverse avec la variation de la section, selon la relation (1) si dessous :

$$\frac{dS}{S} = \frac{dV}{V} (M^2 - 1)$$

La relation de BERNOULI s'écrit :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} V^2 = cst$$

Soit :

- P/ρ : Représente l'énergie de pression de l'unité de masse de fluide.
- $1/2V^2$: Représente l'énergie cinétique.

D'après les deux relations(1) et (2) on arrive à expliquer le comportement de l'air à travers une section et bien choisir la forme adéquate de l'entrée d'air, et de faire les conclusions suivantes:

1/- Toute variation d'énergie cinétique se traduit par une variation d'énergie de pression.

2/- En subsonique dans un divergent l'énergie cinétique (vitesse) diminue au profit de l'énergie de pression, contrairement à ce qui se passe à travers une section convergente où il y a diminution d'énergie de pression et augmentation de l'énergie cinétique (vitesse).

Donc, suivant le nombre de Mach trois régimes sont à définir :

- Régime subsonique ($M < 1$),
- Régime sonique ($M = 1$),
- Régime supersonique et hypersonique ($M > 1$).

5-1-2 / la souris :

Les entrées d'air adoptées dans le domaine supersonique sont généralement de type convergente-divergente, ou bien type pitot équipée d'un corps central conique appelé "la souris" suite à son déplacement rapide, qui est commandé par un régulateur automatique en fonction des paramètres vitesse M_0 , Régime moteur, incidence, dérapage, pression.

La souris a pour rôle d'améliorer l'efficacité de l'entrée d'air et d'optimiser l'écoulement de l'air à travers, grâce à la création d'onde de choc (oblique puis droite) accrochée aux niveaux des lèvres.

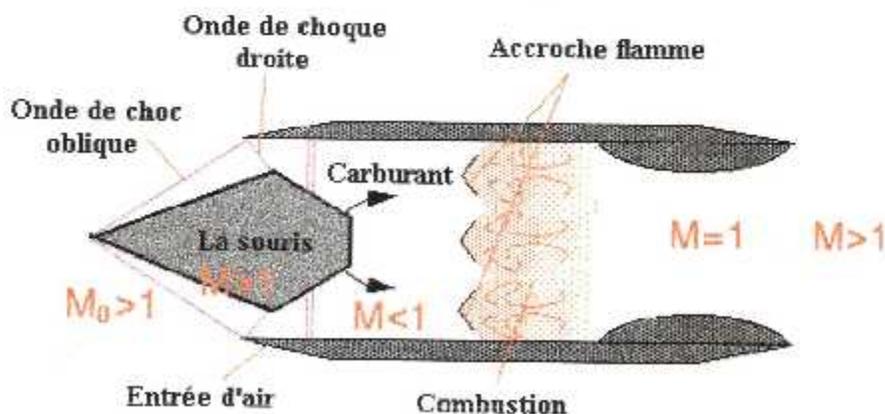


Fig. (1-14) L'évolution du Mach à travers les ondes de chocs.

Malgré l'amélioration du rendement après l'onde de choc oblique l'écoulement reste toujours supersonique, il ne deviendras subsonique qu'après avoir passer l'onde de choc droite.

5-2 : La chambre de combustion:

La chambre de combustion est conçue dans le but d'assuré la combustion du mélange air/ carburant (transformation de l'énergie chimique du mélange en énergie calorifique).

La température des gaz de combustion ne doit pas dépasser la température structurelle admissible des parois de la chambre de combustion.

Moins de un demi du volume total de l'air admissible à la chambre de combustion est mélanger au carburant puis brûler, le reste de l'air (air secondaire) est simplement chauffé car il à pour rôle de refroidir et de protégée les parois de la chambre de combustion des températures trop élevée de la combustion. Le rapport d'air /carburant à l'intérieure de la chambre de combustion varie selon le type de moteur, il est de 30/1 à 60/1 en quantité de poids (gramme bien sur)

Le rapport moyen (air/carburant) admissible pour les nouveaux moteurs est approximativement de 40/1 (gr), mais seulement 15/1 sont utilisées pour une combustion complète.

Le rapport massique théorique (air/carburant) est par définition appelé **dosage théorique**.

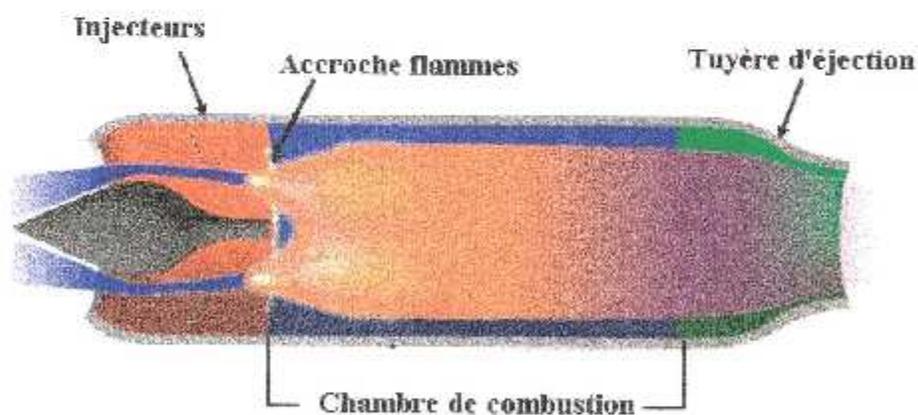


Fig. (1-15) Chambre de combustion pour statoréacteur classique

Pour les statoréacteurs classiques, dont il fait l'objet de notre étude la chambre de combustion est sous forme cylindrique à section constante, la vitesse de l'air à l'entrée de la chambre est subsonique.

Pour les statoréacteurs adaptés pour le vol supersonique et hypersonique, les chambres de combustion sont d'une conception beaucoup plus avantageuse et compliquée.

5-2-1 / Paramètres limitatifs et facteurs régissant la combustion :

➤ Pression d'entrée de la chambre de combustion :

La stabilité de la flamme dépend de deux facteurs essentiels qui sont la pression ou la température et la vitesse. La combustion se trouve limitée dans une gamme de dosage réel et des trois paramètres précédents, dans voici le diagramme représentant les limitations d'inflammation :

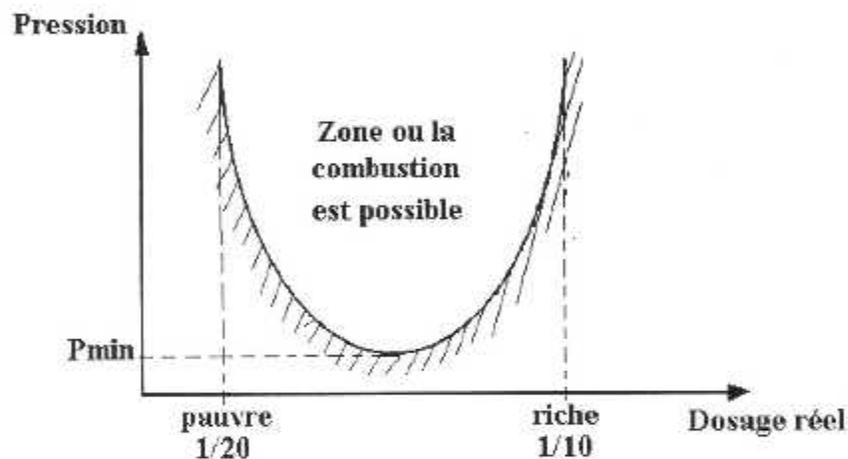


Fig.(1-16) Paramètres limitatifs à la combustion.

Cette courbe montre qu'il n'est possible d'enflammer le mélange qu'au-dessus d'une certaine pression minimale (pression de sortie compresseur pour les turbomachines ou pression de sortie diffuseur pour les statoréacteurs) et à l'intérieure d'une gamme de dosage réel comprise approximativement entre 1/10 et 1/20.

➤ Vitesse de l'écoulement:

Pour que la combustion soit possible il faut que la vitesse de l'écoulement du fluide ne soit pas supérieure à la vitesse de propagation de la flamme, afin qu'elle soit entretenue. Dans le cas contraire nous assisterons au soufflage de la flamme ou l'extinction.

➤ Le temps:

Le facteur temps est lié à la vitesse, car il faut laisser suffisamment de temps pour la réaction chimique pour s'effectuer afin de la rendre la plus complète.

➤ La température:

Il est nécessaire d'avoir une température élevée afin d'obtenir le rayonnement le plus intense possible, qui est liée à la richesse du mélange.

En effet plus la richesse du mélange est plus élevée plus la présence d'imbrûlés est importante.

➤ Les turbulences:

Afin d'avoir un bon mélange homogène (air /carburant) les constructeurs on recourt à des aubages de turbulences pour avoir un meilleur brassage du mouvement de l'air afin d'offrir le plus de contacts possibles avec les fines gouttelettes de carburant sans perturber le fonctionnement de la chambre de combustion.

La combustion doit être maintenue pendant toute la gamme de vitesse et aux différents régimes du moteur.

5-2-2 / Organisme interne liée a la chambre de combustion des statoréacteurs:

Parmi les dispositifs utilisés pour une chambre de combustion de statoréacteur on trouve :

➤ Les accroches-flammes:

Les accroches-flammes sont des obstacles placés à l'entrée de la chambre de combustion, elles sont destinées à créer par leur couche limites un ralentissement local de l'écoulement, ainsi qu'un sillage dans les turbulences qui faciliteront la poursuite de la combustion en aval.

Généralement les accroches-flammes sont constituées sous formes de gouttières ou de poussoirs, disposés suivant un réseau plus ou moins serré ou suivant des rayons.

Lorsque la chambre de combustion est de grande dimension (supérieure à 500 mm) on utilise un ensemble de gouttières, soit une série de couronnes concentriques, soit une superposition de gouttières radiales et de gouttières en anneaux.

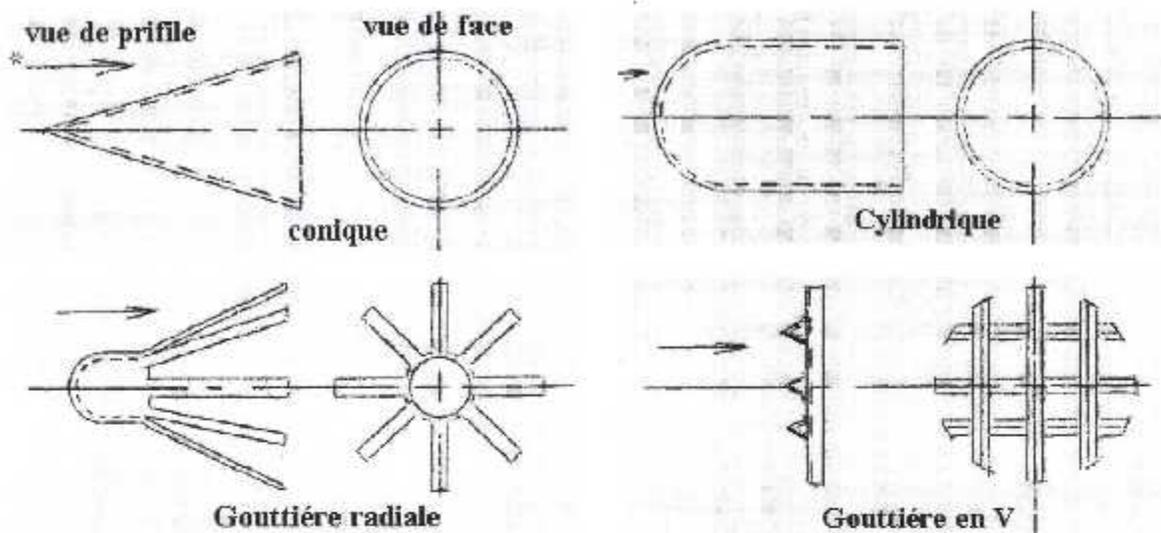


Fig.(1- 17) Différentes types d'accroche- flamme.

Il n'existe pas de règles très précises pour le dimensionnement de ces obstacles mes les expériences on prouva la nécessités d'utilisation de ces dispositifs pour diminuer est maintenir la flamme à l'intérieure de la chambre de combustion.

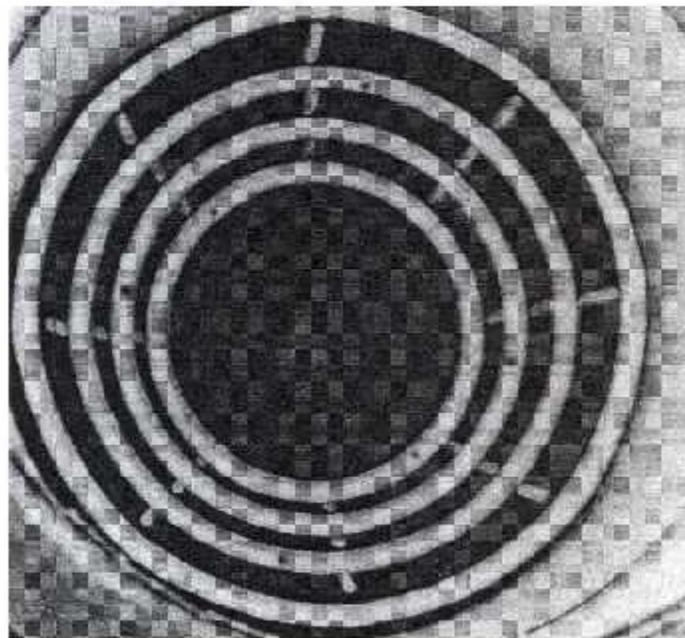


Fig.(1-18) Accroche flammes en série d'anneaux.

➤ Les chambres pilotes:

La vitesse d'écoulement à la sortie de l'entrée d'air est de (60 à 100) m/s, il se trouve difficile d'assurer l'allumage et de maintenir la combustion à l'aide des seuls obstacles qu'on vient de citer.

On a donc recouru à l'utilisation de chambre pilote qui a pour rôle de captée une partie (environ 10%) de l'air sortant du diffuseur pour l'orienter vers une chambre primaire où il se retrouve ralenti considérablement comme dans un turboréacteur avant d'être carburé et brûlé. En suite les gaz chauds de cette combustion primaire sont réinjectés dans l'écoulement principal aux niveaux des accroches-flamme.

➤ L'Injection du carburant:

Si le carburant est emmagasiné sous forme liquide (kérosène), il est mis sous pression, soit par une pompe à carburant, soit à l'aide d'azote comprimé et acheminé vers les injecteurs qui sont des simples orifices calibrés de l'ordre de 0,5 mm, répartis convenablement sur la couronne tubulaire d'injecteurs en amont des accroches-flammes, le jet liquide vient frapper les obstacles au contact desquels, il se vaporise en les refroidissant.

➤ Longueur de tube flamme:

Il y a intérêt de réduire autant que possible la longueur pour que la combustion soit terminée à la station 4 juste avant d'entrer au convergent de la tuyère d'éjection, pour ne pas avoir de combustion incomplète.

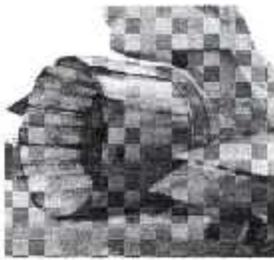
5-3 / Tuyère d'éjection:

La tuyère d'éjection est le lieu où s'effectue la transformation de l'énergie de pression en énergie cinétique considérée comme la détente utile à la propulsion.

Elle a pour rôle d'accélérer les gaz de combustion issus de la chambre de combustion pour les moteurs aérobies (sans compresseur ni turbine) jusqu'à ce que la pression statique dans le jet soit égale à la pression atmosphérique.

Le type le plus simple consiste en un tronçon de cône convergent, le paramètre régissant le fonctionnement de la tuyère est le rapport de compression des gaz entre l'entrée et la sortie tuyère. Pour des valeurs de compression supérieures à deux, il devient nécessaire de remplacer la tuyère convergente par une tuyère convergente - divergente présentant un col où la vitesse de l'écoulement est sonique.

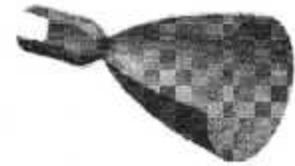
Pour les moteurs supersoniques les tuyères sont souvent à géométrie variable.



Géométrie variable



Convergente



Convergente-divergente

Fig.(1-19) Différentes types de tuyères d'éjection.

5-1 / Fonctionnement d'une tuyère d'éjection:

La plupart des avions sont équipés d'une tuyère simple convergente, dans nous contenterons d'étudier.

La tuyère se propose de faire le raccord entre deux milieux, un milieu amont qui est la sortie de la chambre de combustion où règne les conditions T_{t4} , P_{t4} et un milieu aval qui est l'atmosphère où règne les paramètres T_{t0} , P_{t0} , T_0 , P_0 , V_0 .

Théoriquement dans le canal d'éjection le travail est nul car nous nous disposant d'aucune machine, Si on considère que l'évolution est isentropique et les gaz comme parfait se la conduira à la conservation des paramètres d'impacts qui sont la température totale ($T_{t0} = T_{t4} = \text{cte}$) et la pression totale ($P_{t0} = P_{t4} = \text{cte}$).

Chapitre 2

Pulsoréacteur .

1. Introduction et description :

Le pulsoréacteur est un propulseur atypique à flux discontinue, il a été utilisé pour entraîner la célèbre bombe allemande (V-1) qui a fait tant de victimes pendant la deuxième guerre mondiale (1944-1945). De conception très simple mais ayant de performances extrêmement limitées, il n'a plus été utilisé depuis. Sa principale qualité est le coût très réduit et une grande robustesse.



Fig.(2-1) La bombe volante (V-1).

- Principe :

C'est à Huygens que l'on doit la découverte d'un phénomène de base utilisé dans les pulsoréacteurs : une capacité brusquement ouverte se vide au delà de l'équilibre avec le milieu extérieur et s'établit transitoirement en dépression. La chambre de combustion du pulsoréacteur utilise cet effet de dépression assurant ses remplissages successifs et une combustion approximativement à volume constant.

Donc la combustion dans un pulsoréacteur s'apparente à celle d'un moteur 2 temps à piston, plutôt qu'à celle d'un turboréacteur où elle est continue.

2. Différents types de pulsoréacteurs:

En réalité les pulsoréacteurs sont classés en deux catégories qui sont :

- Les pulsoréacteurs à valves mobiles,
- Les pulsoréacteurs sans valves ou à valves aérodynamiques.

3 / Pulsoréacteur à valves mobiles :

3-1 / Description :

Considérant un pulsoréacteur classique tel que nous l'avons représenté ci dessus.

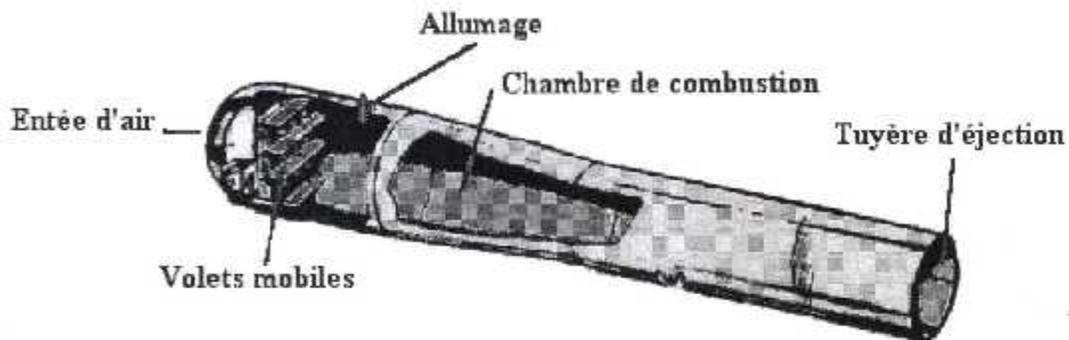


Fig.(2-2) Pulsoréacteur classique avec valves.

Généralement le pulsoréacteur est composé comme pour le statoréacteur d'une entrée d'air, d'une chambre de combustion, d'une tuyère d'éjection et d'une grille de valves mobiles fabriquée à partir d'un métal élastique très rigide considérée comme la seule partie différente entre ses deux dernier.

On peut facilement reconnaître un pulsoréacteur grâce à la longue tuyère d'éjection qui lui donne une forme beaucoup plus allongée par rapport à la forme du statoréacteur qui est moins compacte.

3-2 / Cycle de fonctionnement :

Le fonctionnement du pulsoréacteur est discontinu, ce qui est à l'origine des vibrations dont il est indispensable de pouvoir réduire les effets.

- Admission :

L'air entre de l'avant, à travers une section convergente divergente, fonctionnant sans compresseur ou autre compresseur préalable ; la compression est obtenue grâce au ralentissement de l'air à l'entrée.

Au début du cycle, les volets sont ouverts; l'air entre et pénètre dans la chambre de combustion grâce à la dépression qui règne à l'intérieure, au même temps du carburant est additionner sous forme de fines gouttelettes .

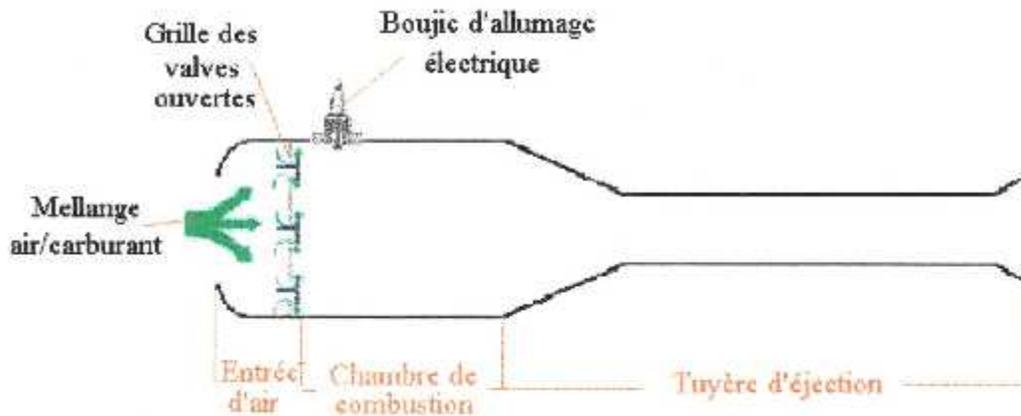


Fig.(2-3) La phase d'admission.

- **Explosion :**

Le mélange est enflammé soit au moyen de la bougie de démarrage, soit au contact des gaz brûlés restant dans la tuyères ou des parties chaudes de la paroi de la chambre de combustion; sa pression augmente brutalement, et les clapets se ferment, s'opposant ainsi au retour vers l'avant des gaz brûlés; la pression régnant autour des injecteurs étant supérieure a la pression d'alimentation du carburantes injecteurs ne débitent plus.

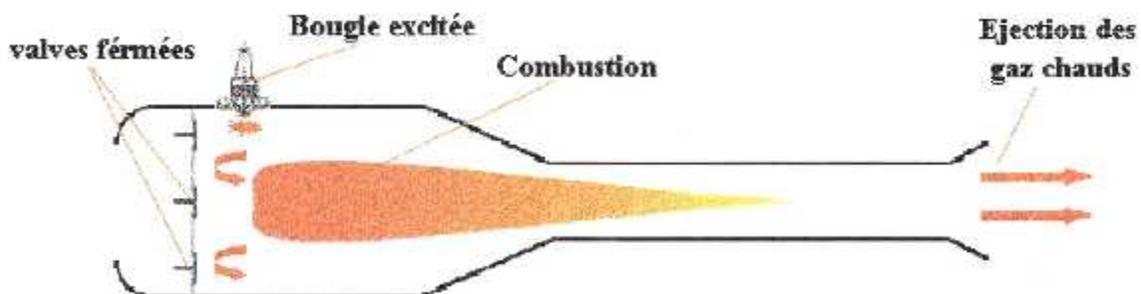


Fig.(2-4) La phase d'explosion.

Les gaz chauds se détendent alors en poussent vers l'arrière la colonne gazeuse contenue dans la tuyère ; ainsi, une masse de gaz correspondant à la masse d'air admise pendant le temps d'ouverture se trouve éjectée vers l'arrière. après détente des gaz, la pression diminue dans la chambre de combustion.

- Réadmission :

Suite à l'inertie créer par le fluide en mouvement dans la longue partie cylindrique de la tuyère, la diminution de pression en arrière de la grille d'obturation, par rapport à la pression ambiante atteint une valeur importante, les volets s'ouvrent à nouveau, et le cycle recommence.

Ceci à une fréquence de 200 à 300 fois par seconde ce qui explique le bruit sourd de ce type de propulseur.

Tel est brièvement exposé, le principe de fonctionnement de pulsoréacteur: la présence de volettes mobiles limite considérablement sa durée de vie.

3-3 / Fonctionnement des valves d'obturations :

L'air comprimé rencontre alors une grille munie de volets mobiles constituer de lames élastiques en acier appelés aussi valves, qui à pour rôle soit de permettre le passage de l'air comprimer dans la chambre de combustion, soit de l'arrêter empêchant ainsi l'évacuation des gaz brûlés en sen inverse.

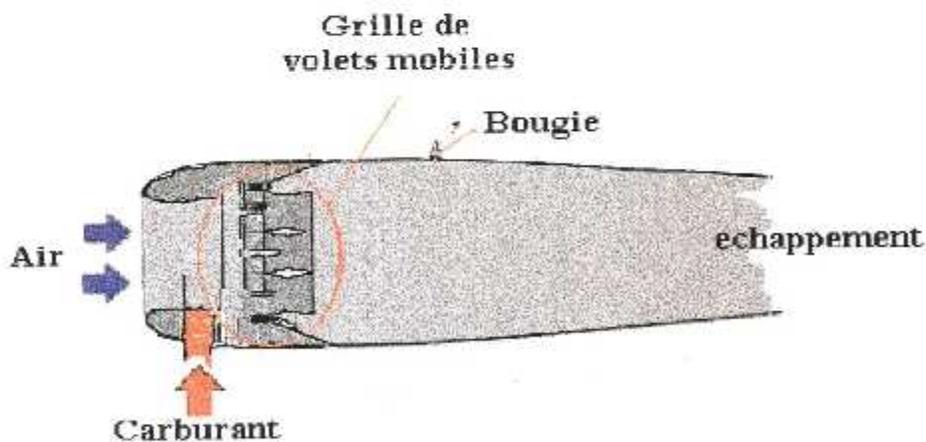


Fig. (2-5) Emplacement des valves d'obturations.

Les injecteurs de carburant sont répartis sur la partie aval de la grille pour une meilleure dilution du carburant finement pulvérisé avec l'air d'admission.

Le fonctionnement des voles mobiles est représenté schématiquement sur la figure ci dessus :

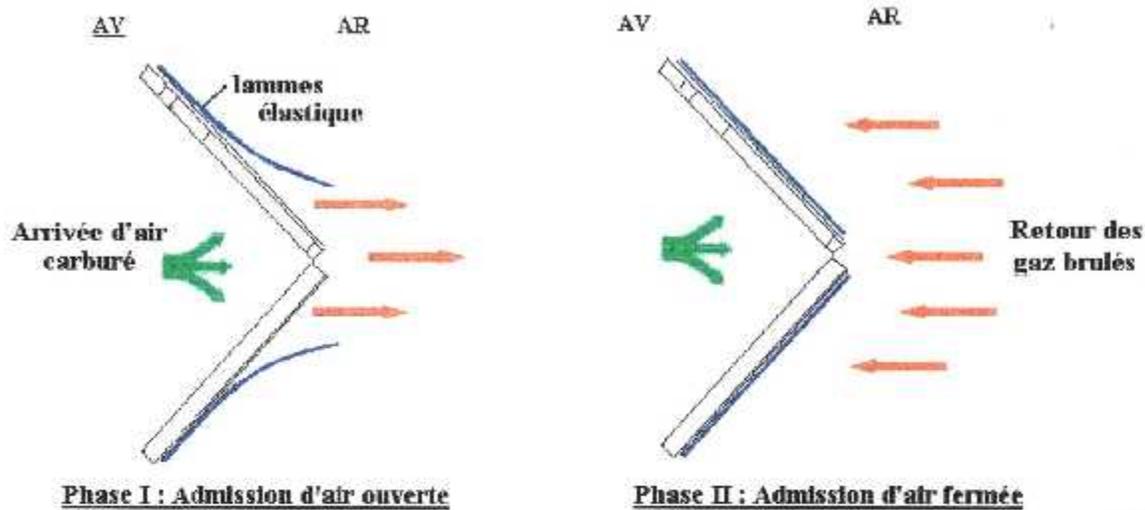


Fig.(2-6) Fonctionnement des valves d'obturation.

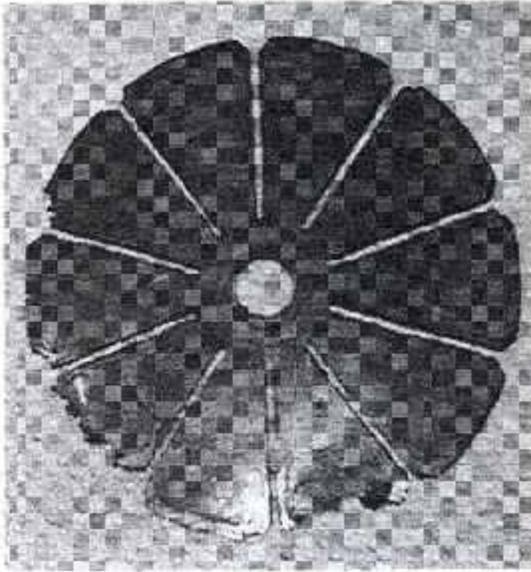
Les lames élastiques servent alternativement pour ouvrir et fermer l'admission d'air, ce qui évite alors tout retour des gaz brûlés vers l'avant, la durée d'un cycle complet est d'environ 1/45 de seconde.

À savoir que la fabrication des valves est la partie la plus difficile, car trouver un alliage ou une quelconque matière qui puisse être légère et exposé à un grand abus risque d'être irréaliste, donc les valves doivent satisfaire des demandes incompatibles :

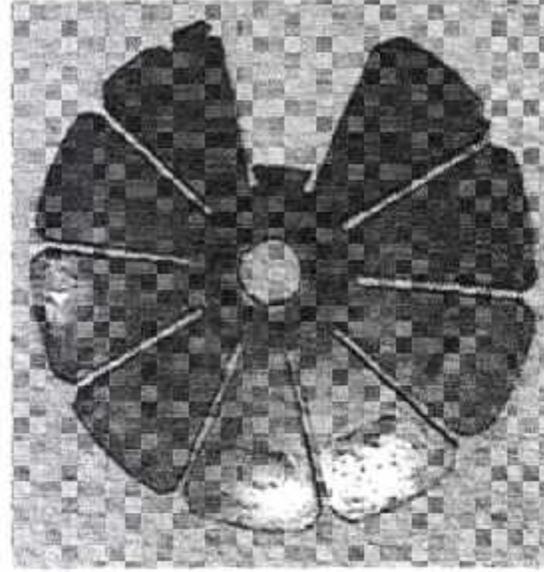
- ☞ Ouvrir et fermer largement et rapidement (dans l'intérêt d'efficacité).
- ☞ Elles doivent être aussi légères que possible, pour pouvoir supporter les énormes contraintes mécaniques (ouverture, fermeture ultra rapide).
- ☞ une grande résistance à la chaleur, à cause des hautes températures de la chambre de combustion.

3-4 / Problèmes et solutions :

Les valves d'obturations des pulsoréacteur sont donc des accessoires fragiles et consommables suites aux énormes sollicitations physiques et thermiques dont elle sont victimes, et dans voici quelques résultats (dégâts) fréquents causés par les forces d'impacts excessives :



A)- Les dommages causés par l'impact de la chaleur.



B)- Les dégâts causés par la fatigue.

Fig.(2-7) Effets des énormes sollicitations physiques et thermiques sur les valves d'obturations.

Donc, il y a deux principaux facteurs qui affectent la vie de la valve et qui sont :

- Les forces physiques
- La température

Si la magnitude et l'influence de ces deux facteurs peut être minimisée, la vie des valves sera étendue en conséquence. Il y a aussi la fatigue du métal qui est un autre effet inévitable. Si la valve fléchie dépasse les limites d'élasticité de la matière alors une fissure sera créée entraînant ainsi une rupture totale rapidement.

Solutions aux problèmes :

Parmi les solutions trouvées pour remédier à ses problèmes qui consistent à rendre les valves d'obturations moins vulnérables sont :

- Gardez le mouvement de la valve à un minimum :

Pour réduire la course de l'extrémité de la valves en mouvement on doit utiliser des valves plus grandes au lieu, d'utiliser de petites valves qui exigent une grande course par rapport à sa taille.

- Fournir des surfaces de contacts lisses :

Pour que les valves adhèrent sur leurs sièges correctement et d'une manière saine, il faut que les deux surfaces soient lisses et ne présentent aucune bosse, dont le cas contraire leur présence peut créer des dommages énormes dans la valve. L'air présent entre les deux surfaces amortit le claquement et diminue le bruit.

- Protèges les valves du souffle direct :

Parmi les meilleures solutions adaptées pour prolonger la durée de vie des valves. D'après l'ingénieur New Zélandais **Bruce Simpson**, serait de protéger les valves du souffle direct des flammes de combustion, comme il l'a démontré sur son moteur équipé de valves qui ne présente aucun problème visible malgré la durée de vol qui était d'une douzaine d'heures.

3-5 / Différents formes de valves :

Les valves d'obturation existent sous plusieurs formes, les plus courantes sont les valves en forme de marguerite (fleur) qui sont les plus utilisées grâce à leur simplicité de fonctionnement et leur facilité de concevoir.

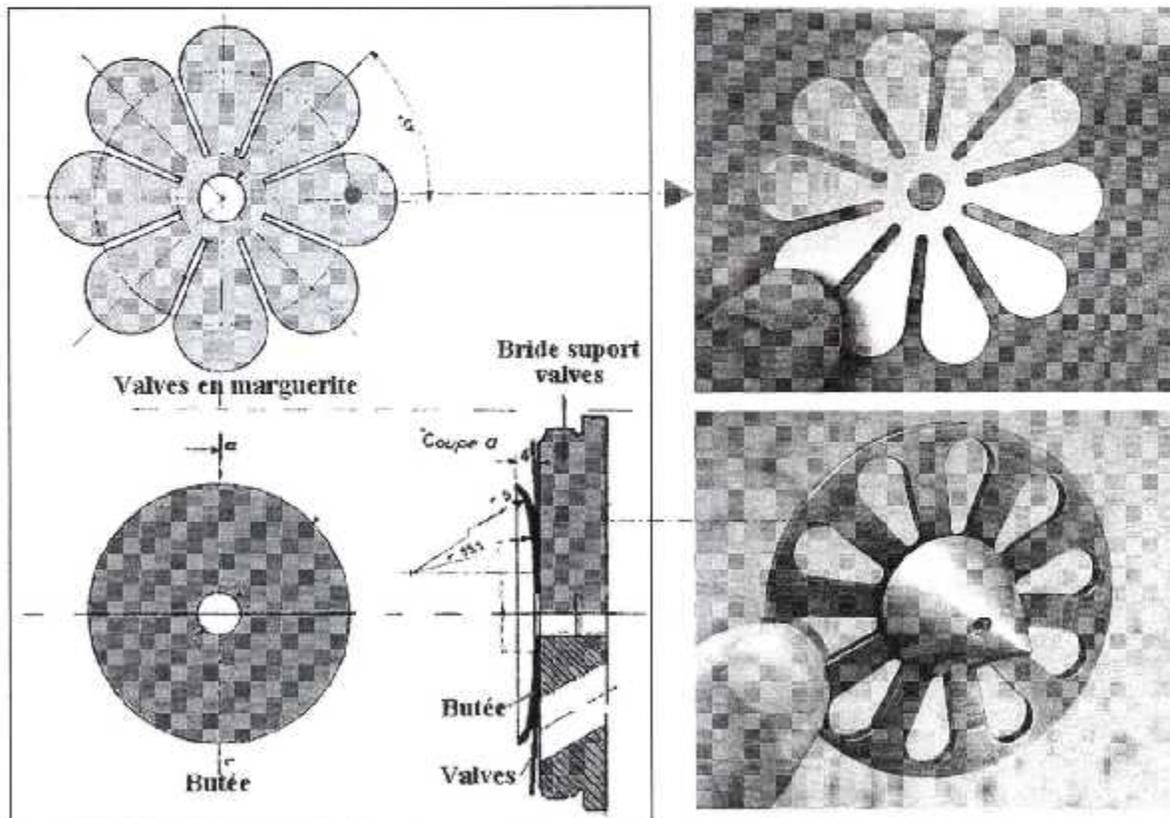


Fig.(2-8) Valves en forme de marguerite.

Le dixième type de valves est plus encastré par rapport à celui cité précédemment car, il a été utilisé pour la propulsion des célèbres bombes volantes allemandes V2 pendant la deuxième guerre mondiale .

Se type de dispositif d'obturation est très compliqué puis qu'il comporte plusieurs grilles de valves ressorts ainsi que le système d'injection de carburant .

Le principe de fonctionnement est tout a fait le même.

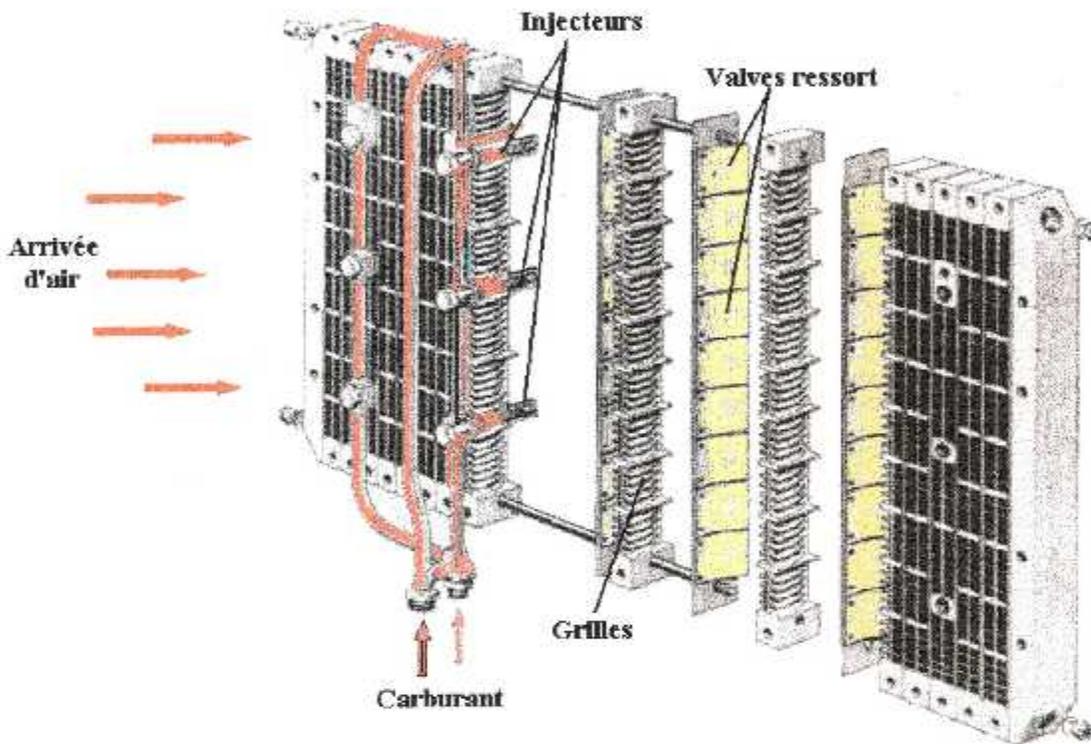


Fig.(2-9) Grille de valves ressorts .

3-6 / Différents applications des pulsoréacteurs :

Les pulsoréacteurs existe sous plusieurs forme a cause de sa simplicité à concevoir et de ces divers applications et utilisations.

Sons utilisation la plus fréquente et sûrement l'hélicoptère a pulsoréacteur dans le quelle en fait montée un pulsoréacteur au bout de chaque pale, la mise en rotation simple du rotor est assurée grâce à la poussée produite par chaque pulsoréacteur.

Le seul inconvénient présent sont les vibrations correspondantes a la fréquence du cycle d'ouverture et fermeture des volets. Par contre l'utilisation des pulsoréacteur offre un gain de pois considérable et une consommation du carburant beaucoup trop réduite par apport à un moteur à explosion.

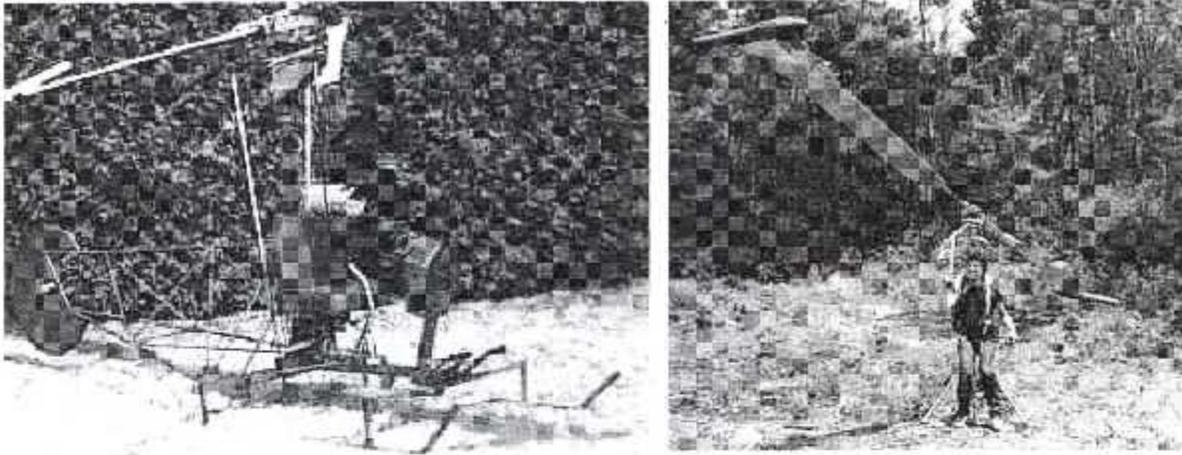


Fig.(2-10) Hélicoptères à pulsoréacteurs.

Les pulsoréacteurs sont utilisées aussi pour la propulsion des modèles d'avions à échelles réduites, des voiture de fabrication amateur et d'autre engins bizarres.

- Exemple d'applications :

Voici quelque exemple d'utilisation des pulsoréacteur:

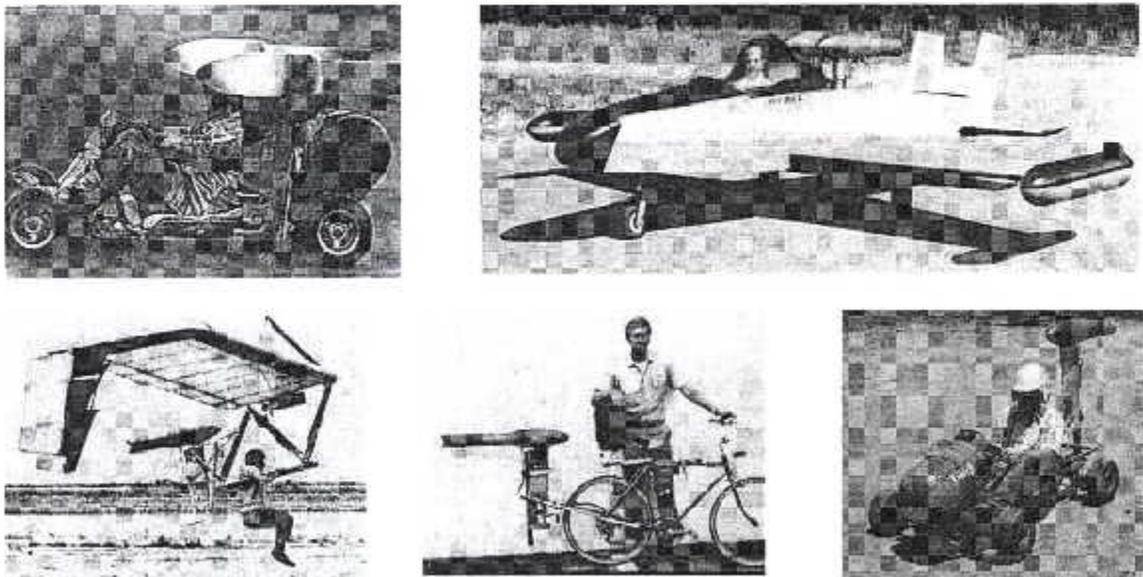


Fig.(2-11) Quelques types d'applications des pulsoréacteurs.

4/ Pulsoréacteur sans valves ou à valves aérodynamique :

La fonction des valves dans les pulsoréacteurs est d'empêcher l'inversion de l'écoulement à l'admission et le transport négatif d'élan quand la pression de chambre de combustion devient plus haute que la pression externe. Ce même but peut être réalisé sans valves par l'utilisation appropriée du même phénomène de pulsations dans deux conduites d'admission liée à longueurs proportionnées.

4-1 / Pourquoi un pulsoréacteur sans valves ?

Etant donné que le problème majeure des pulsoréacteur est la courte durée de vol qui varie entre 20 et 30 minutes d'exploitation en continu sur les plus grands moteurs et ca a cause des sollicitations physiques et thermiques épuisante que subissent les valves et qui exigent un remplacement régulier.

Pour remédier ce problème, l'idée la plus simple était de concevoir et construire un pulsoréacteur sans valves aussi simple qu'un statoréacteur.

Durant les années 1950 et 1960, quelque travaux préparatoires on été fait sur le concept de la pulsation sans valves aux états unis par deux chercheurs Lockwood et Hiller, mais se n'est qu'en 1967 que leurs pulsoréacteur sons valves à été brevetée.

L'image ci dessus représente l'un des moteur Hiller-Lockwood . Ce moteur particulier pèse seulement 30 livres et produit 300 livres de poussée.

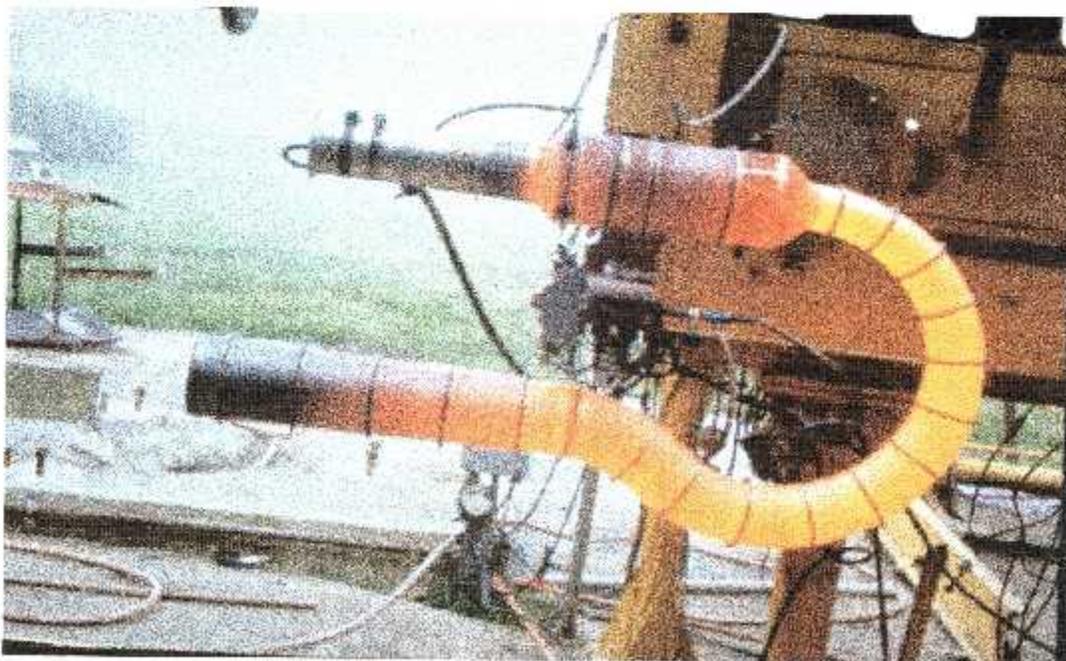


Fig.(2-12) Pulsoréacteur sans valves
(Lockwood & Hiller)

L'une des plus grandes qualités de ce moteur était l'immunisation parfaite contre les corps étrangers qui peuvent être introduits à l'intérieur. Chose qui n'est évidente pour les turboréacteurs qui sont vulnérables aux objets qui sont sucés dans leurs prises d'air très facilement. En fait, beaucoup d'avions de ligne commerciaux exigent des réparations majeures de moteur chaque année à cause des FOD qui sont généralement des oiseaux.

4-2 / Description:

Généralement le corps du pulsoréacteur sans valves est une sorte de conduite en U à sections variables dans les extrémités sont ouvertes. La chambre de combustion est facilement repérable grâce à sa forme apparente sur l'une des conduites dans laquelle sont introduits l'injecteur de carburant et la bougie d'allumage électrique.

Par contre il n'y a pas d'entrée d'air ou de tuyère d'éjection spécifiques, car les deux conduites servent au même temps d'entrée pour l'admission d'air frais et d'échappement pour l'évacuation des gaz brûlés.

- Les pulsoréacteur sans valves sont équipés de multiplicateur de poussée servent à augmenter le rendement de propulsion.

4-3 / Cycle de fonctionnement :

Comme son nom l'indique déjà, le pulsoréacteur sans valves est avant tout un moteur à pulsation qui a pratiquement le même cycle de fonctionnement que ce lui d'un pulsoréacteur classique.

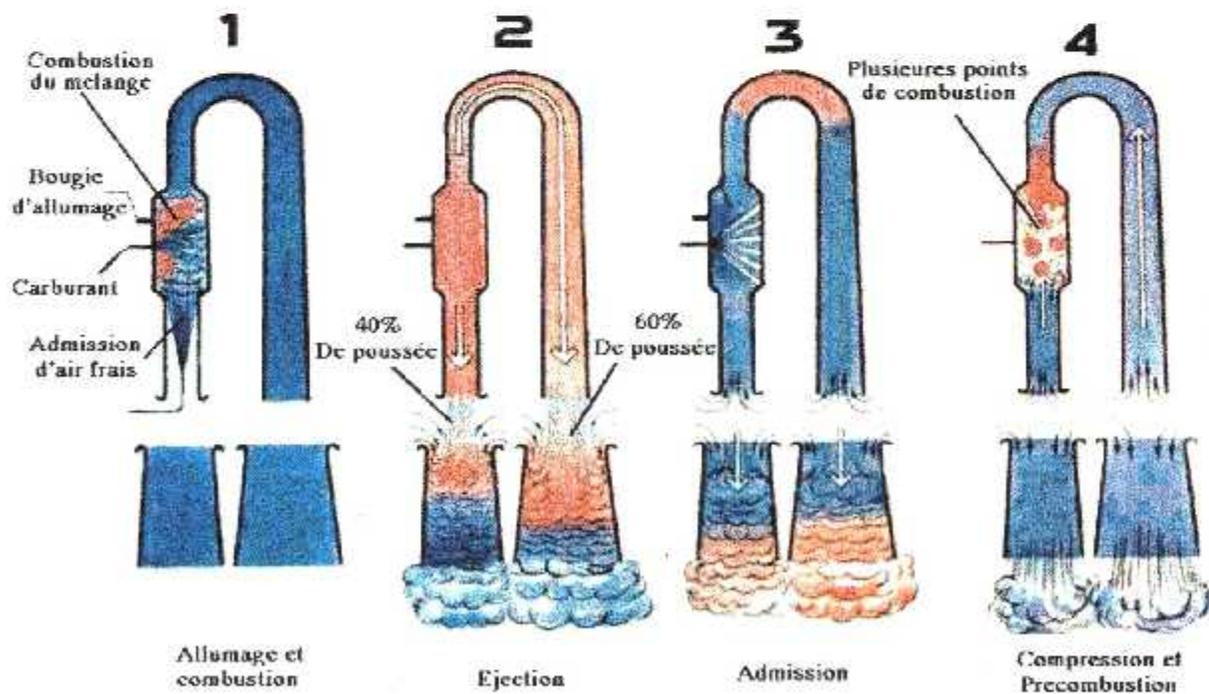


Fig.(2-13) Cycle de fonctionnement d'un pulsoréacteur sans valves.

Le diagramme Précédent représente la théorie de base de fonctionnement des pulsoréacteurs sans valves et l'effet des multiplicateur de poussée adaptée par Mr Hiller et Mr Loockwood.

1- Allumage et combustion :

Le mélange d'air/carburant est admis dans la chambre de combustion est brûlée instantanément. L'allumage au démarrage est obtenu grâce à une bougie d'allumage électrique, mais après la combustion scras indépendante de cette dernière car elle sera obtenue par les gaz chaud résiduel qui revient d'en bas le long du tube des gaz d'échappement.

2- Ejection:

La combustion du mélange carburée entraîne une brusque augmentation de chaleur et de pression à l'intérieure de la chambre, les gaz en expansion commencent à se dépêcher dehors à travers les deux canaux d'éjections produisant ainsi une poussée et beaucoup de bruit.

3- Admission :

Comme un poids attaché à un morceau d'élastique, l'inertie du gaz chaud évacuit vers l'extérieur, provoque aux gaz de combustion restant à l'intérieure des tubes un allongement de volume supérieure au volume normale entraînant ainsi une dépression brusque à l'intérieur, offrant en conséquence une inversion d'écoulement à l'air frais vers l'intérieure .

4- Compression et précombustion du mélange vigoureux :

Donc l'air entrant continue à être tiré par le vide relatif et la dépression dans le moteur en même temps le combustible est injecté dans la chambre de combustion. Réellement La plupart de l'air entre à travers la courte prise d'air parce qu'il a moins de distance à parcourir, le reste chargée des gaz d'échappements résiduels se dépêcher vers l'intérieur par la plus longue tuyère. Ces deux colonnes d'air entrent en collision dans la chambre de combustion pour comprimer le nouveau mélange air/combustible et commencé à nouveau un nouveau cycle .

5 / Comparaison entre le statoréacteur et le pulsoréacteur :

Enfin, malgré que les deux moteurs sont des moteurs aérobies, il y a plusieurs différences entre le statoréacteur est le pulsoréacteur que se soit du point de vue technologique ou de point de vue fonctionnement dont les voici :

- ☞ La combustion chez les pulsoréacteur est effectuée sous volume constant par contre elle est sous pression constante chez les statoréacteur.
- ☞ La combustion est discontinue dans les pulsoréacteur sous formes d'explosions répétées, par contre elle est continue pour les statoréacteur.

- ☞ Une petite quantité d'air est aspirée et utilisée pour la combustion chez les pulsoréacteurs, par contre le statoréacteur est traversé par le flux d'air d'une manière continue.
- ☞ Au points de vue technologiques nous pouvons facilement reconnaître un pulsoréacteur grâce à la tuyères d'éjection qui est beaucoup plus longue par rapport à celle du statoréacteur.
- ☞ L'absence des valves d'obturation pour les statoréacteurs.
- ☞ Le cycle du travail du pulsoréacteur est beaucoup plus proches à celui d'un moteur à explosion interne (moteur à pistons) qu'à celui d'un turboréacteur, contrairement aux statoréacteurs.

Chapitre 3

Etude

Thermodynamique

1 -/ Etude thermodynamique d'un statoréacteur classique :

Le statoréacteur est le moteur d'avion le plus simple il est constitué d'une entrée d'air ou diffuseur, d'une chambre de combustion et d'une tuyère d'éjection.

La vitesse de l'air relatif est ralentie de V_0 (vitesse du vol) à V_2 au niveau de l'entrée d'air du moteur entraînant ainsi une augmentation de la pression statique de (P_0 à P_2) ainsi que pour la température statique (T_0 à T_2). Dans la chambre de combustion du carburant est ajouté, d'où l'énergie chimique est convertie en énergie thermique grâce au processus de combustion du mélange air carburant, l'addition de l'énergie thermique entraîne une augmentation de la température statique T_2 jusqu'à T_4 sous une pression presque constante.

Les gaz d'échappement se détendent dans la tuyère jusqu'à la pression atmosphérique P_9 , ramenant ainsi la température T_4 jusqu'à la température ambiante T_9 .

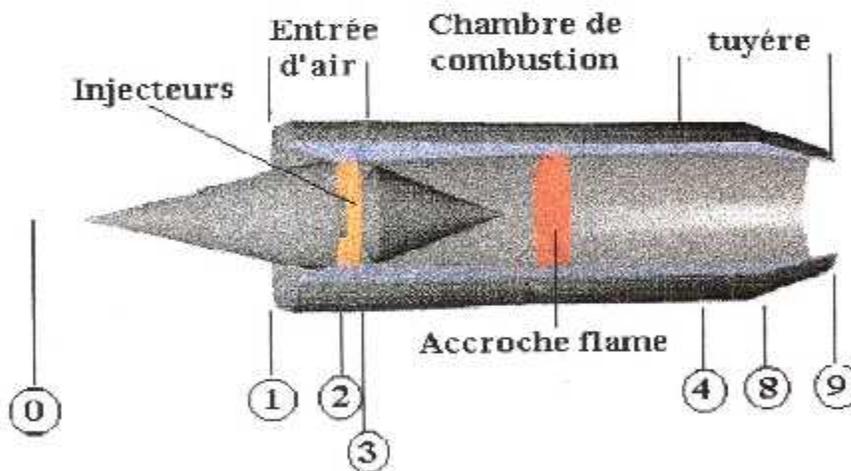


Fig. (3-1) Numérotation des stations du statoréacteur.

Les stations numérotées correspondes aux zones suivantes:

- * Station 0 : L'atmosphère.
- * Station 1 : Entrée diffuseur (entrée d'air).
- * Station 2 et 3 : Sortie entrée d'air, entrée chambre de combustion.
- * Station 4 et 8 : Sortie chambre de combustion entrée tuyère d'éjection.
- * Station 9 : Sortie tuyère d'éjection.

Le diagramme de Brayton suivant représente toutes les transformations (T-S) pour un cycle idéal d'un statoréacteur :

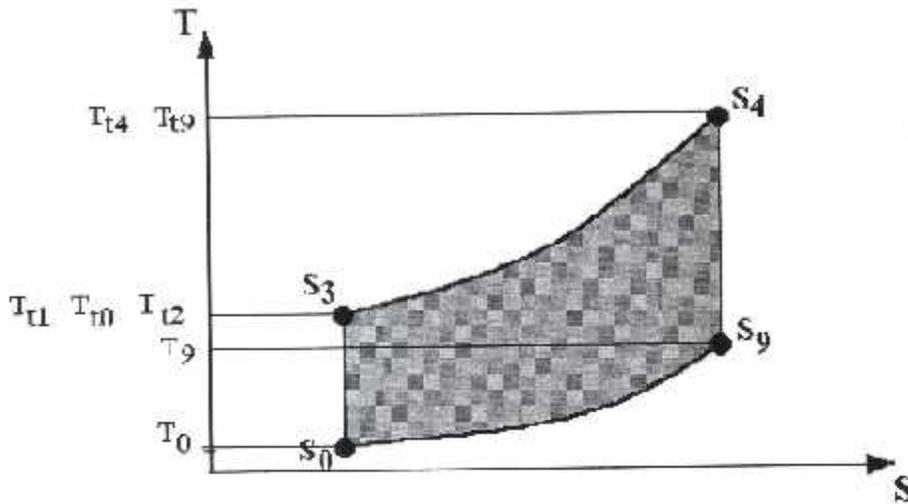


Fig.(3-2) Diagramme (T-S) du cycle idéal d'un statoréacteur.

1-1 / Entrée d'air subsonique divergente :

Nous allons considérer que le statoréacteur est équipée d'une entrée d'air divergente type tube de pitot.

Généralement les entrées d'air des avions subsonique sont caractérisées par une section (S_1) qui représente la section d'entrée des filles d'air, et une section (S_2) qui représente la section intermédiaire entre l'entrée d'air et la chambre de combustion.

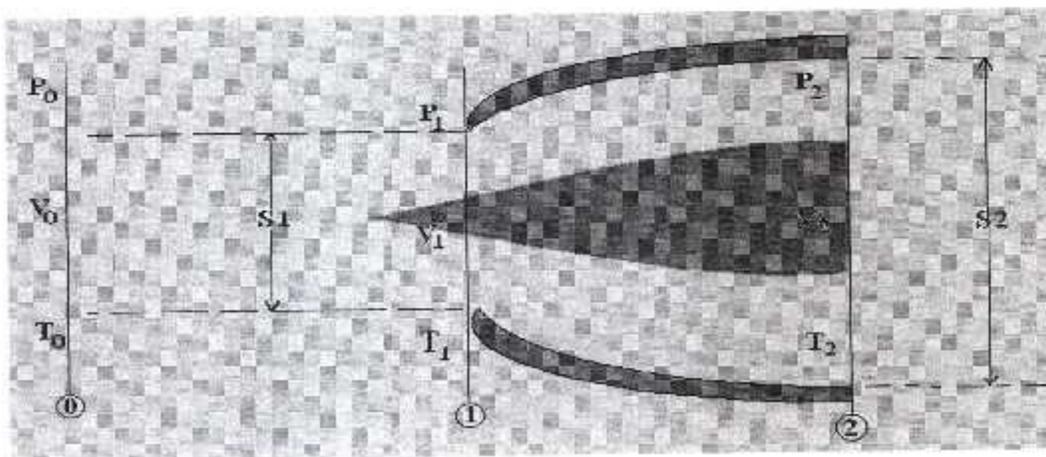


Fig.(3-3) Paramètres de l'entrée d'air.

Entre les deux sections, l'air accéléré subit une détente isentropique (adiabatique est réversible) donnant la relation suivante :

$$P_{t1} = P_1 \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$P_{t2} = P_2 \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_2^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Théoriquement les paramètres d'impacts T_t et P_t se conservent seul les paramètres vitesse V et pression statique P vont changer, mais réellement seulement la température total se conserve.

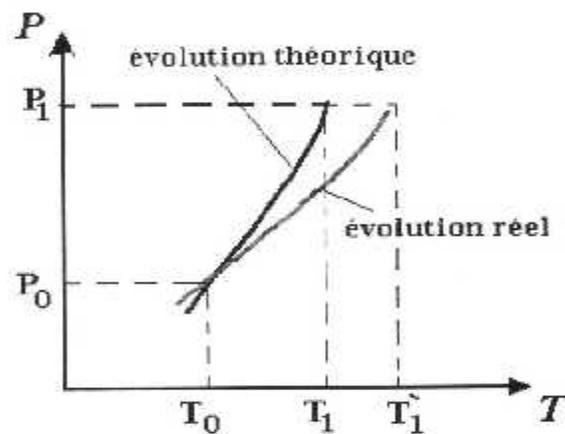


Fig.(3-4) Evolution réel est théorique de l'entrée d'air.

Pour une évolution idéal dans l'entrée d'air on a :

$$T_{t0} = T_{t1} = T_{t2} \quad \text{et} \quad P_{t0} = P_{t1} = P_{t2}$$

On peut définir aussi le rapport de température τ_d :

$$\tau_d = \frac{T_{t2}}{T_0} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2$$

Sachons bien que le processus est adiabatique alors on peut déduire le rapporte de pression π_d :

$$\pi_d = \frac{P_{t2}}{P_{t0}} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$\tau_d = \pi_d^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

et :

$$\pi_d = (\tau_d)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Dans une évolution réel, on définit un rendement de l'entrée d'air comme suite selon le diagramme (T-S).

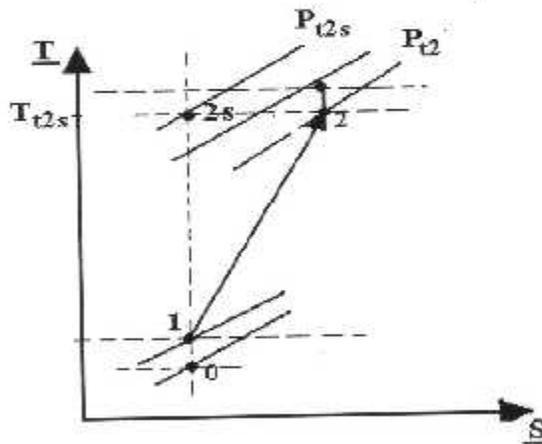


Fig.(3-5) Evolution réel de l'entrée d'air.

Nous avons la définition du rendement de l'entrée d'air :

$$\eta_d = \frac{T_{t2s} - T_0}{T_{t2} - T_0}$$

D'où le rapport réel de température entre l'entrée et la sortie :

$$\frac{T_{i2s}}{T_0} = 1 + \eta_d \left(\frac{T_{i2}}{T_0} - 1 \right)$$

Pour un processus adiabatique isentropique le rapport de pression entre les deux sections s_1 et s_2 :

$$\frac{P_{i2}}{P_0} = \left[1 + \eta_d \left(\frac{T_{i2}}{T_0} - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

avec :

$$\eta_d = [0,7 - 0,9]$$

1-2 / La chambre de combustion :

Les carburéacteurs utilisés pour le processus de combustion ont un comportement voisin des alcanes répondant à la formule générale chimique ($C_n H_m$).

La réaction de combustion théorique avec l'oxygène s'écrit alors :



Cette équation très simple s'équilibre en ayant :

- $y = n$
- $z = \frac{m}{2}$
- $x = \frac{n + \frac{m}{4}}{2}$

Etant donnée que l'air est composé essentiellement d'azote et d'oxygène avec des proportions de 0,232 % pour (O_2) et 0,768 % pour l'azote (N_2), la quantité d'air théorique nécessaire donc pour entamer une combustion théorique complète est :

- $A_{th} = \frac{\left(n + \frac{m}{4} \right)}{0,232}$

Exemple:

Pour une combustion de l'heptane dans de l'oxygène la réaction s'écrit :



Ce qui veut dire qu'on a besoin de 11 volumes d'oxygène pour un volume de carburant, autrement dit :

$$O_{2th} = 11 * 2(x) = 11 * 2(16) = 352 (g) \text{ d'oxygène.}$$

Equivalent à une masse d'air théorique :

$$A_{th} = 352 / 0.232 = 1517 (g).$$

Sachons que la masse d'une molécule d'heptane est de 100(g) donc la quantité d'air nécessaire pour consommée tout le carburant est 1517 (g), ou le dosage théorique seras alors :

$$f_{th} = \frac{1}{15}$$

La combustion s'effectue dans une enceinte ouverte est sous pression constante. Théoriquement elle est supposer isobare ou sous pression constante ($P_3=P_4$) et l'inflammation du mélange porte la température T_3 à une température beaucoup plus supérieure T_4 . Mais réellement la présence des turbulences et le refroidissement entraîne des pertes de charge qui sont généralement entre 4% et 5%.

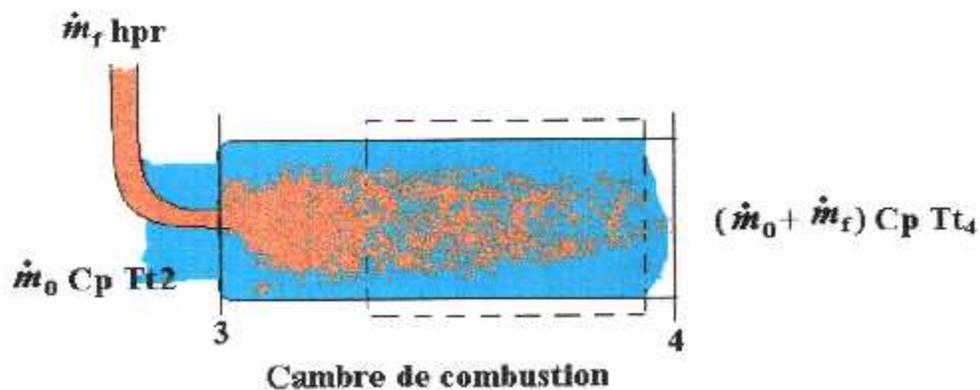


Fig.(3-6) L'addition du débit carburant au débit d'air.

Nous aurons donc une pression de sortie P_4 légèrement inférieure à P_3 , comme le montre le diagramme suivant de l'évolution réelle et théorique du fluide dans la chambre de combustion et l'entrée d'air.

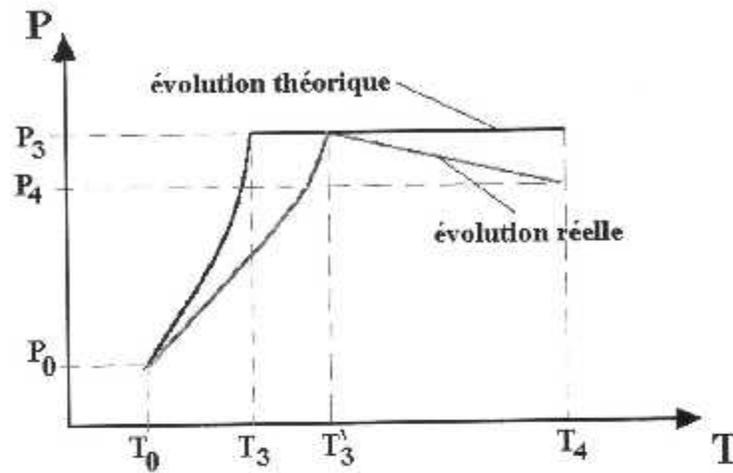


Fig.(3-7) Evolution réelle et théorique dans la chambre de combustion

D'autre part suites à des pertes thermiques et au processus incomplet de la combustion l'énergie chimique contenue dans le carburant n'est pas totalement délivrée à l'écoulement d'air c'est pourquoi on définit le rendement du carburant η_b et qui représente le rapport de l'énergie réel délivrée sur celle théoriquement contenue.

Le rendement de la chambre de combustion:

$$\eta_b = \frac{m_4 C p_4 T_{t4} - m_3 C p_3 T_{t3}}{mf . h_{pr}}$$

$$\eta_b \approx 0,95$$

- h_{pr} : pouvoir calorifique.

- $\tau_b = \frac{h_{t4}}{h_{t3}}$ et $\pi_b = \frac{P_{t4}}{P_{t3}}$

Remarque:

Pour un même rendement de la chambre de combustion et pour une même température maximale donner si le taux de compression augmente la température T_{13} augmente, il faut pour satisfaire l'équation que la consommation spécifique horaire diminue d'où l'accroissement important de la compression ces dernières années.

Expression du dosage carburant (f):

Le dosage carburant f est le rapport entre la masse du carburant sur le comburant (air):

$$f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_0}$$

$$\eta_b \cdot m_f \cdot h_{pr} = (m_0 + m_f) \cdot C_{p4} \cdot T_{t4} - M_0 \cdot C_{p3} \cdot T_{t3} \quad (1)$$

En divise (1) par M_0 :

$$\frac{\eta_b \cdot m_f \cdot h_{pr}}{m_0} = \frac{(m_0 + m_f) \cdot C_{p4} \cdot T_{t4}}{m_0} - \frac{m_0 \cdot C_{p3} \cdot T_{t3}}{m_0}$$

en aura :

$$\eta_b \cdot f \cdot h_{pr} = (1 + f) \cdot C_{p4} \cdot T_{t4} - C_{p3} \cdot T_{t3}$$

puis en divise sur $C_{p4} T_{t4}$ pour avoir l'expression du dosage suivante :

$$f = \frac{C_{p4} T_{t4} - C_{p3} T_{t3}}{\eta_b h_{pr} - C_{p4} T_{t3}}$$

$$f = \frac{1 - \frac{C_{p3} T_{t3}}{C_{p4} T_{t4}}}{\frac{\eta_b \cdot HPR}{C_{p4} T_{t4}} - 1} \quad \left(\frac{\text{Kg/S(Car)}}{\text{Kg/S(air)}} \right)$$

1-3 / Tuyère d'éjection:

La plupart des avions sont équipés d'une tuyère simple convergente, dans nous nous contenterons d'étudier.

La tuyère se propose de faire le raccord entre deux milieux, un milieu amont (sortie chambre de combustion entrée tuyère) (4) où règne les conditions T_{t4} , P_{t4} et un milieu aval (sortie tuyère d'échappement) (9) où règne les paramètres T_{t9} , P_{t9} , T_9 , P_9 , V_9 .

Théoriquement dans le canal d'éjection la détente est isentropique et le travail est nul car nous nous disposant d'aucune machine, Si on considère que l'évolution est isentropique et les gaz comme parfait se la conduira à la conservation des paramètres d'impacts qui sont la température totale ($T_{t9}=T_{t4}=cte$) et la pression totale ($P_{t9}=P_{t4}=cte$).

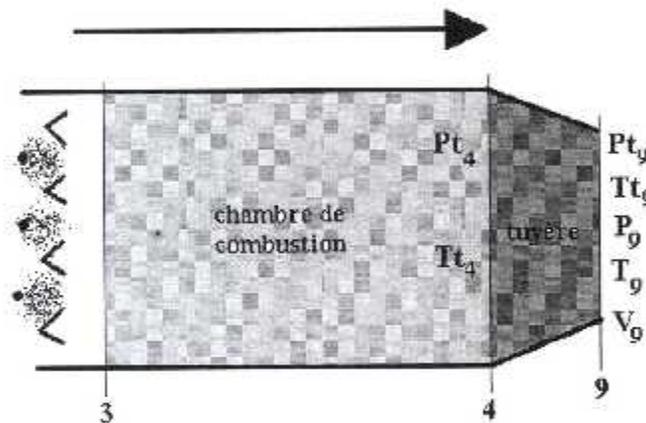


Fig.(3-8) Les paramètres en amont et en aval de la tuyère.

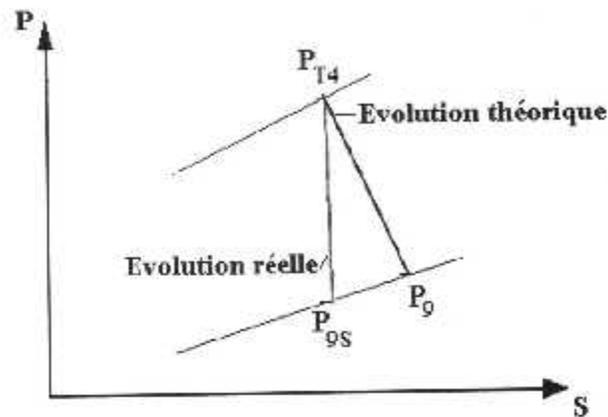
Donc nous avons entre la température statique et la pression statique les relations suivantes :

$$\bullet \left[\frac{P_4}{P_9} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_4}{T_9} \quad \text{et} \quad \begin{matrix} \tau_n = 1 \\ \pi_n = 1 \end{matrix}$$

Mais réellement la transformation n'est pas vraiment réversible, elle est donc polytropique conduisant ainsi à la modification des équations précédentes :

$$\bullet \tau_n = \frac{h_{t9}}{h_{t4}} = 1$$

$$\pi_n = \frac{P_{t9}}{P_{t4}} < 1$$



Le rendement de la tuyère d'éjection (η_n) :

$$\eta_n = \frac{T_{t4} - T_9}{T_{t4} - T_{9S}}$$

L'expression de la vitesse d'éjection à la sortie de la tuyère d'éjection :

$$M_9 = \frac{V_9}{\sqrt{\gamma R T_9}}$$

ou :

$$h_{t9} = h_9 + \frac{1}{2} V_9^2$$

$$Cp_9 \cdot T_{t9} = Cp \cdot T_9 + \frac{1}{2} \cdot V_9^2$$

donc :

$$V_9 = \sqrt{2Cp_9 \cdot (T_{t9} - T_9)}$$

Si le rendement de la tuyère est inférieur à 1 ($\eta_n < 1$) en auras donc :

$$\bullet V_9 = \sqrt{2 \cdot \eta_n \cdot Cp \cdot (T_{t9} - T_9)}$$

ou :

$$\bullet V_9 = \sqrt{2 \cdot \eta_n \cdot Cp_9 \cdot T_{t9} \left(1 - \frac{T_9}{T_{t9}}\right)}$$

Nous avons :

$$\begin{aligned} \bullet T_{t9} &= T_{t4} \\ \bullet P_9 &= P_0 \end{aligned}$$

Donc :

$$\bullet V_9 = \sqrt{2 \cdot \eta_n \cdot Cp_9 \cdot T_{t4} \left(1 - \frac{P_0}{P_{t9}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad \underline{m/s}$$

1-4 / Performances du statoréacteur classique:

La poussée (N) :

$$F = (\dot{m}_9 V_9 - \dot{m}_0 V_0) + (P_9 - P_0) A_9$$

Si, $P_9 = P_0$ on a :

$$F = (\dot{m}_9 V_9 - \dot{m}_0 V_0)$$

La poussée spécifique (N.kg/s):

$$\frac{F}{m_0} = [(1 + f)V_9 - V_0]$$

$$Fs = \frac{V}{M_0}$$

La consommation spécifique:

Représente la quantité de comburant par unité de temps consommé pour produire un Newton de poussée (1N).

$$C_s = \frac{m_f}{F} = \frac{m_f / m_0}{F / m_0} = \frac{f}{F / m_0} \quad (\text{kg/s/N})$$

La puissance utile :

Représente le travail développé par le flux de gaz .

$$W_u = V_9^2 - V_2^2 \quad (\text{N})$$

La puissance calorifique :

$$Q_{in} = m_f \cdot h_{pr} \quad (\text{N})$$

Le rendement thermodynamique:

Représente la puissance utile sur la puissance calorifique .

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q_{in}} = \frac{V_9^2 - V_2^2}{m_f \cdot h_{pr}}$$

Le rendement de propulsion:

Représente la puissance de propulsion sur la puissance dynamique.

$$\eta_{pr} = \frac{P_b}{P_d} = \frac{F \cdot V_0}{\frac{1}{2} m_0 (V_9^2 - V_0^2)} = \frac{2 \cdot (F / m_0) V_0}{V_9^2 - V_0^2}$$

Le rendement globale :

Il est obtenue par la multiplication du rendement thermodynamique et propulsion

$$\eta_{global} = \eta_{pr} \cdot \eta_{th}$$

$$\eta_{global} = \eta_{pr} \cdot \eta_{th}$$

2 -/ Etude thermodynamique d'un pulsoréacteur à valves :

Pour faire l'étude thermodynamique du pulsoréacteur à valves nous allons refaire le travail du statoréacteur.

Tout d'abord nous allons numérotées les stations du pulsoréacteur. Les stations du pulsoréacteur sont numérotées suivant les conditions qui règnent à l'intérieur car dans chaque station règnent des conditions précises (Pression, température, vitesse.....) et qui ont tendance à changée d'une station a l'autre.

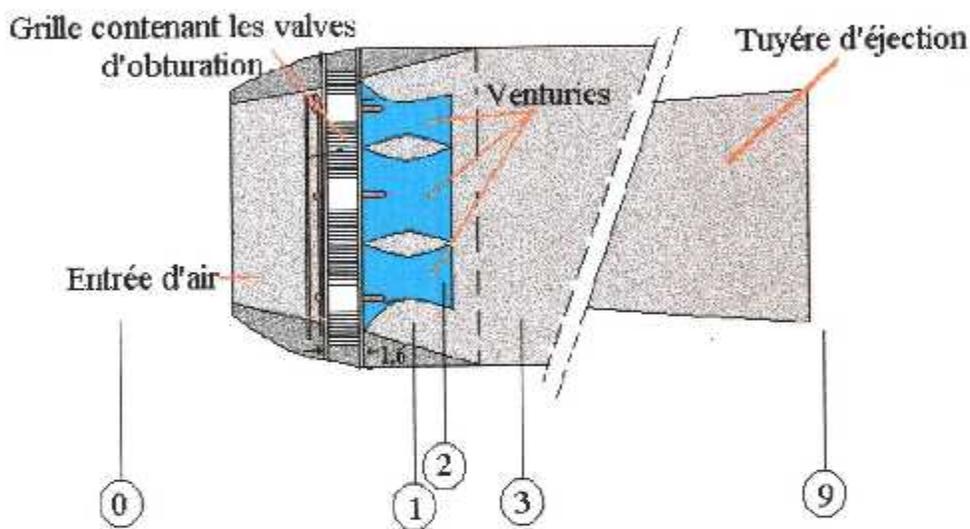


Fig.(3-9)
Numérotation des stations du pulsoréacteur .

- Station 0 : conditions correspondantes à l'atmosphère libre.
- Station 1 : corresponde aux conditions de stagnation quand les valves sont fermées.
- Station 2 : corresponde aux conditions dans la chambre de combustion à la fin du processus de compression.
- Station 3 : conditions à la fin de combustion.
- Station 9 : conditions à la fin de la phase d'éjection .

La compression du fluide d'air P_0 à la pression total de stagnation P_{t1} est l'inverse de l'expansion isentropique. Les conditions qui règnent dans la chambre de combustion correspondent maintenant aux conditions de stagnation de la station (1) .

Donc nous avons:

$$\frac{P_{t1}}{P_0} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$\frac{T_{t1}}{T_0} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2$$

Quand les valves sont ouvertes, il y a une précipitation accélérée d'air dans la chambre de combustion grâce à la dépression qui règne à l'intérieure.

La vitesse dans le col du venturi doit être même près de la vitesse du son et la pression P_{t2} est à moitié inférieure à P_{t1} . Une très petite quantité de l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression.

Donc nous pouvons supposer cela :

$$P_{t2} = \frac{1}{2} P_{t1}$$

La température T_{t2} est la représentation de l'énergie totale des gaz au repos, elle doit être égale à T_{t1} puisque aucune perte de chaleur n'est appréciable.

Donc :

$$T_{t2} = T_{t1}$$

La combustion est portée à volume constant.

Le débit carburant est négligé devant le débit d'air :

$$\dot{m}_f \ll \dot{m}_0$$

Donc, si le débit carburant supplémentaire est négligé, la quantité de chaleur h ajouté s'exprime :

$$Q = C_v (T_{t3} - T_{t2}) = \frac{1}{\gamma} C_p T_{t3} \left(1 - \frac{T_{t2}}{T_{t3}} \right)$$

et :

$$\frac{T_{t2}}{T_{t3}} = \frac{P_{t2}}{P_{t3}}$$

Où T_{t3} et P_{t3} correspondent respectivement à la température et à la pression total après la combustion.

Par conséquent :

$$Q = \frac{1}{\gamma} C_p T_{t3} \left(1 - \frac{P_{t2}}{P_{t3}}\right)$$



Pour le calcul du processus d'écoulement nous supposons que sa vitesse à chaque instant est la même, de même pour l'expansion isentropique de la pression P_{t2} et P_{t3} de la chambre de combustion à la pression atmosphérique P_0 .

La précipitation des gaz de combustion vers la sortie provoque une dépression dans la chambre de combustion.

L'expression de la vitesse d'éjection qui correspond à la pression $P_{t\max}$ des gaz atteinte dans la chambre de combustion est :

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_{t\max}}{\rho} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{t\max}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}$$

L'impulsion engendrée par l'éjection de la masse de gaz est obtenue suite à la relation suivante :

$$dI = V dm$$

Si m est la masse des gaz avant l'éjection, alors le rapport de la densité dans la chambre de combustion après l'éjection de dm est :

$$\frac{m - dm}{m}$$

De même pour le rapport de pression déduit par :

$$\frac{P + dP}{P}$$

on considérons le processus isentropique dans la chambre de combustion on a alors :

$$\frac{P + dP}{P} = \left(\frac{m - dm}{m}\right)^\gamma$$

on prenant les termes d'ordre 1 on aura :

$$\gamma \frac{dm}{m} = -\frac{dP}{P}$$

Cela montre que pendant l'éjection des gaz de combustion la pression dans la chambre diminue. Etant donnée que $m = \rho v$ où v est le volume de la chambre de combustion, donc nous pouvons remplacer dm par dP dans l'équation exprimant l'impulsion I qui s'écrit :

$$dI = -\sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \frac{1}{\gamma} \rho v \frac{dP}{P}$$

Pour trouver l'impulsion total due à l'éjection, nous devons faire l'intégration de dI pour la variation de la pression, de la pression initiale de fin de combustion P_3 , à la pression final atmosphérique P_0 :

D'où :

$$I = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} v \int_{P_0}^{P_3} \frac{P}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \frac{\rho}{P} dP$$

Ou encore : en prenant le changement de variable $\eta = \frac{P}{P_3}$ nous aurons :

$$I = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} (v\rho_3) \sqrt{\frac{P_{t3}}{\rho_3}} \int_{\frac{P_0}{P_3}}^1 \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \cdot \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right]} d\eta$$

Ou :

- $V\rho_3$ est la mass total dans la chambre de combustion au début de l'éjection ,
- $\gamma \frac{P_3}{\rho_3}$ est la vitesse du son ,
- a_3 corresponde aux conditions dans la chambre de combustion .
-

On auras l'expression de la vitesse effective d'éjection Ve :

$$\frac{Ve}{a_3} = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \int_{\frac{P_0}{P_3}}^1 \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \cdot \frac{1}{\eta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right] d\eta$$

L'intégrale obtenue est compliquée a résoudre , la méthode la plus simple est la méthode numérique

Pour $\gamma = \frac{4}{3} = 1,333$ nous avons le résultat de l'intégrale [Ref.] donnée comme suit :

$$\frac{Ve}{a_3} = \frac{6\sqrt{6}}{7} \sqrt{1 - \left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{1}{4}}} \left[1 - \frac{1}{5} \left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{1}{4}} - \frac{4}{15} \left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{8}{15} \left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{3}{4}} \right] *$$

Le résultat est obtenue par un développement limite de Macormac.

La consommation spécifique Cs du carburant est :

$$Cs = \frac{3600Q}{778hpr\eta_b(Ve - Vo)}$$

ou :

- Ve :est la vitesse effective d'éjection .
- Vo :est la vitesse du vol .
- η_b :est le rendement de la combustion .

Après avoir remplacé la valeur de la quantité de chaleur Q on auras :

$$Cs = \frac{3600a_3 \left(1 - \frac{P_{t2}}{P_{t3}}\right)}{778hpr\eta_b \left[\frac{Ve}{a_3} - M_0 \left(\frac{a_0}{a_3}\right)\right]} \frac{1}{\gamma(\gamma-1)}$$

Le rapport de vitesse $\frac{a_3}{a_0}$ est donner par la formule suivante :

$$\left(\frac{a_3}{a_0}\right)^2 = \frac{\gamma' R' T_3}{\gamma R T_0} = \frac{Cp' \gamma' - 1}{Cp \gamma - 1} \left(\frac{P_3}{P_2}\right) \left(\frac{T_1}{T_0}\right)$$

Cependant, nous pouvant facilement déterminée la valeur de la consommation spécifique du carburant ,si nous connaissant la valeur du rapport $\frac{P_2}{P_3}$ et le rendement de la combustion η_b pour les autre paramètres il sont constants.

$$\begin{aligned} Cp' &= 0.276 \\ Cp &= 0.243 \\ \text{Avec : } \gamma' &= 1.403 \\ \gamma &= 1.333 \\ hpr &= 18.700 \\ \eta_b &= 95\% \end{aligned}$$

Pour les mêmes valeurs de $\frac{P_3}{P_2}$ la consommation spécifique varier de la même manière avec la vitesse de vol.

Nous allons considéré que le pulsoréacteur est une conduite fermée du cotés des valves d'obturation et ouverte de l'autre cotés , la pulsation dans la tuyère peut être considérée comme le quart de la longueur de l'onde oscillatoire avec l'amplitude maximum de la pression (P_{max}) du coté fermé(coté valve), par conte de l'autre coté l'amplitude de la pression est nul mais l'amplitude de la vitesse est au max.

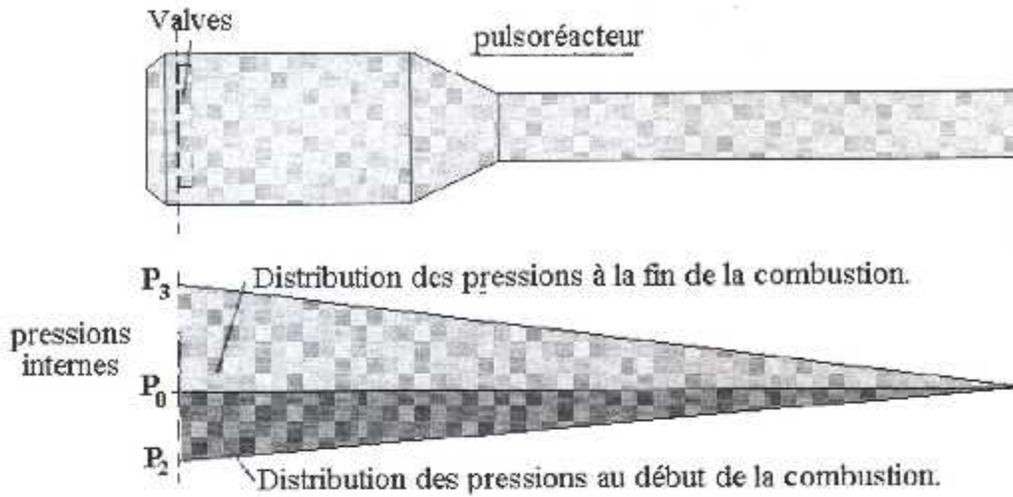


Fig.(3-10)

Distributions des pression statiques tout au long du pulsoréacteur.

Dans ce cas la fréquence f de oscillation est:

$$f = \frac{a^*}{4L} \quad \text{cycle par seconde.}$$

Avec:

- a^* : est la vitesse de propagation du son,
- L : longueur de la tuyère d'éjection (tube).

La température des gaz a la fin de leurs expansions (sortie tuyère) est :

$$T_3 = \left(\frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}$$

La valeur moyenne de la vitesse du son a^* correspondante aux condition moyenne de l'écoulement dans le pulsoréacteur.

$$a^* = a_3 \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{P_0}{P_{t3}} \right)^{\frac{\gamma'-1}{2\gamma'}} \right]$$

$$a^* = a_0 \left(\frac{a_3}{a_0} \right) \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{P_0}{P_{t3}} \right)^{\frac{\gamma'-1}{2\gamma'}} \right]$$

Par exemple si : $\frac{P_{t3}}{P_0} = 4$, $\frac{P_{t2}}{P_0} = 2$ et $\gamma' = \frac{4}{3}$ on aura donc :

$$a^* = 1,849 a_0$$

La rapport de pression au début de la combustion ainsi que la vitesse sont considérées maintenues, donc la poussée de l'engin est proportionnelle a la pression atmosphérique alors nous aurons la relation suivante:

$$F' = F \left(\frac{P_0'}{P_0} \right)$$

- F' est la poussée correspondante à la pression P_0' , et F corresponde à P_0 .

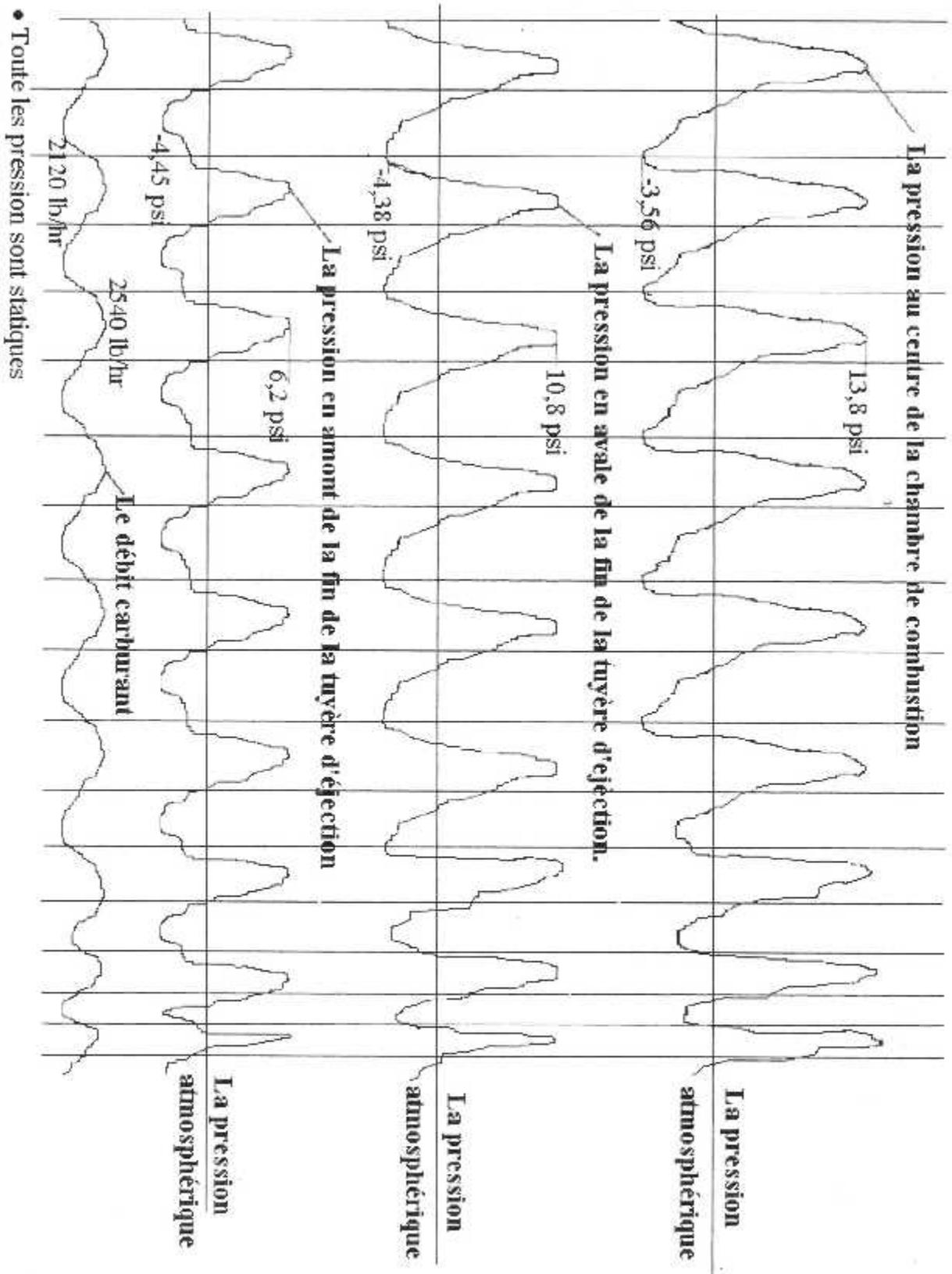


Fig.(3-11)
Evolution des pressions statiques en fonction du temps dans différentes zones du pulsoréacteur.

Le graphe précédent est le résultat expérimental d'un test sur le fonctionnement d'un pulsoréacteur.

A travers se graphe qui vas nous servir d'exemple, nous allons mieux comprendre le comportement réel de ce dernier .

D'après l'allure de la courbe en voie bien que la variation de la pression statique est sous la forme de pulsation qui se répète successivement

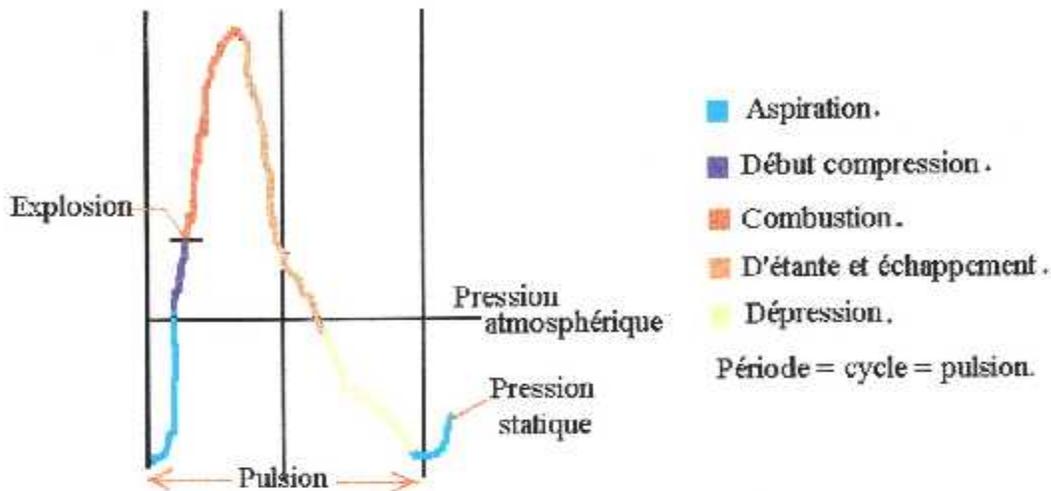


Fig.(3-12)
Variation de la pression statique pendant un cycle de travail.

La figure représente une pulsation dans la quelle le cycle de fonctionnement est accomplie .

Le cycle commence avant le début de la combustion par l'aspiration du mélange (air + carburant) obtenue dans l'entrée d'air ou une légère compression est obtenue. Pendant cette phase les valves d'obturation sont ouvertes.

En suite la pression augmenteras brusquement après l'explosion du mélange pour atteindre la valeur maximal. Pendant ce temps les valves se trouve plaques à leurs brides faisant obstacle au gaz de combustion du coté de l'entrée d'air. le pic représente la pression statique maximum atteintes, au même moment elle est au maximum tout au long du canal (chambre de combustion + tuyère) .

D'autre parts le débit carburent varies d'une manière proportionnelle est similaire a la variation de la pression statique à l'intérieure du canal .

Une foie la combustion est accomplie il y auras la détente des gaz de combustion et l'évacuation vers l'extérieure à travers la tuyère d'éjection donnant naissance à la poussée .

L'évacuation des gaz de combustion entraîne une diminution de la pression statique, et une accélération des gaz vers l'extérieure ; la dépression a l'intérieure du canal toute entier; oblige ainsi l'ouverture des valves pour l'admission d'air pour un nouveau cycle. Ce cycle se répète plusieurs centaines de fois par minute .

Chapitre 4

Ventilateur .

1/ Définition :

Un ventilateur est une turbomachine réceptrice, permettant de transférer une puissance mécanique au fluide pour obtenir un écoulement continue et une élévation de pression .

2/ Constituant d'un ventilateur :

Généralement, les ventilateurs sont constitués par les éléments suivants :

- Une bride d'aspiration,
- Une volute,
- Un redresseur suivi d'un divergent,
- La roue,
- La pivoterie,
- Les garnitures d'étanchéité,
- Le socle,
- Le moteur d'entraînement.

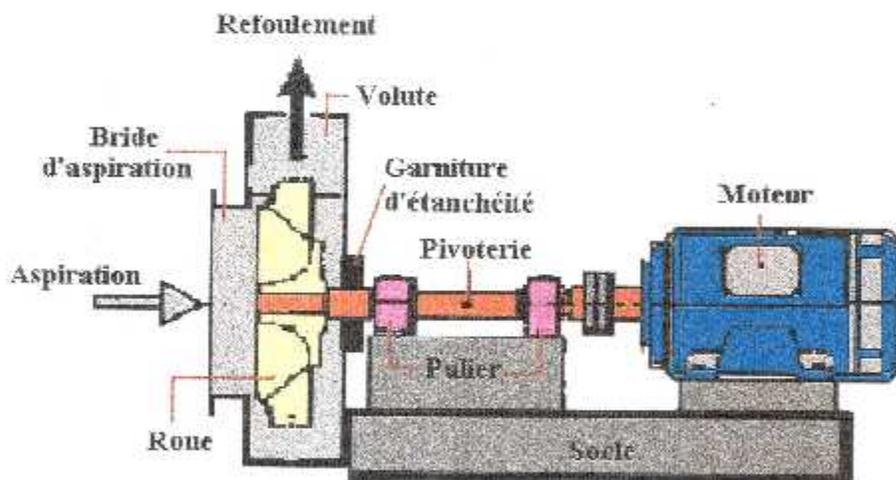


Fig. (4.1)

Les éléments constituant un ventilateur.

a) - La bride d'aspiration :

C'est un anneau qui permet le raccordement de l'enveloppe du ventilateur au conduit placé à l'aspiration.

b) - La volute :

C'est la partie intérieurement lisse et cintrée en forme de spiracle ; limité par les flasques de l'enveloppe du ventilateur.

c)- Le redresseur :

Dispositif constitué par l'ensemble des aubes directrices lorsqu'elle sont placées à l'aval de la roue. Dans le cas contraire, il est appelé distributeur.

d) - La roue :

C'est la partie tournante qui est essentiellement composé par des pales qui peuvent être : inclinées vers l'avant, inclinées vers l'arrière en forme de cuillère et radiale, ces dernière transmettent au fluide l'énergie mécanique apportée à la machine par un moteur. fig. (4.2).

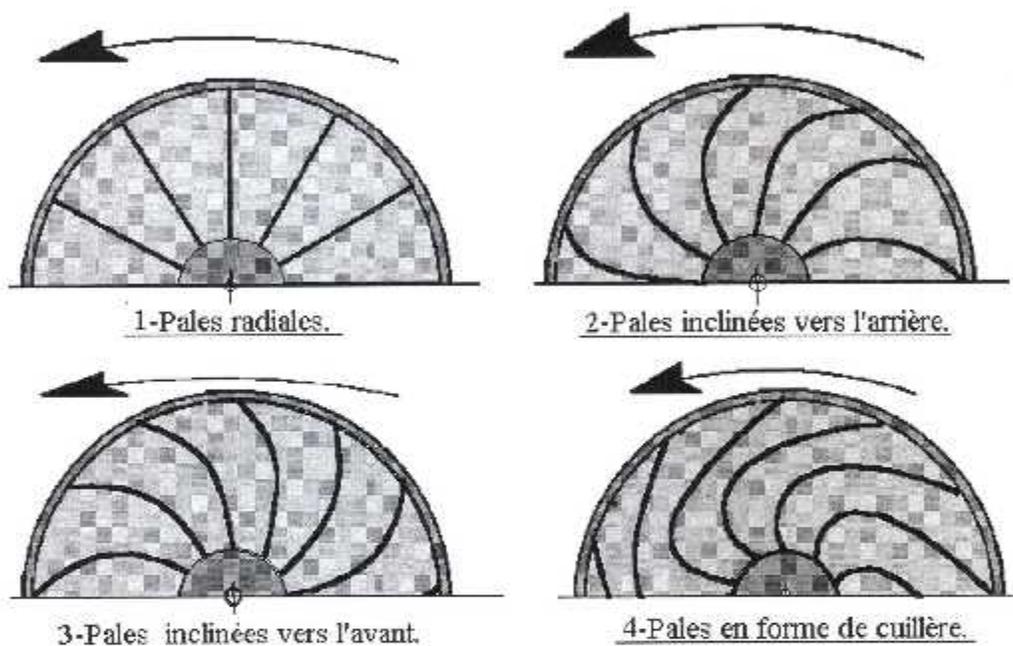


Fig. (4.2)

Les différents formes de pales.

e) - La pivoterie :

L'arbre ou la pivoterie est constitué essentiellement d'un arbre portant la roue d'une extrémités, tandis que l'autre extrémité présente, soit une transmission par courroies et poulie, soit un accouplement semi-élastique permettant un entraînement direct par moteur électrique.

f)- Les garnitures d'étanchéités :

Les garnitures d'étanchéité dépendent du gaz véhiculé . En effet ,si celui-ci n'est pas toxique, elles peuvent être réduites à une simple tôle présentant un jeu autour de l'arbre. Si le gaz est toxique les fuites vers l'extérieur ne sont pas tolère, c'est pourquoi on utilise généralement des boîtes à garnitures pouvant contenir des bagues en graphique frottant sur l'arbre ayant éventuellement un système de lubrification.

g) - Le socle ou le tabouret :

Supporte la pivoterie, la volute, le diffuseur, et peut se prolonger pour servir également de support au moteur d'entraînement .

h) - Le moteur d'entraînement :

Le moteur a pour rôle essentiel de fournir la puissance primaire nécessaire à l'entraînement du ventilateur. Dans la majorité des cas, les moteurs utilisés sont des moteurs électrique de puissance .

De manière générale les ventilateurs se distingues entre eux selon des critère de considération qui peuvent être réduites comme suites :

- l'utilisation et le mode de raccordement,
- la position dans le circuit,
- la trajectoire du fluide dans la roue,
- l'augmentation relative de la pression ,
- l'application,
- le mode d'entraînement.

3 / Classification :

3-1) - Classification suivant l'utilisation et le mode de raccordement :

Suivant leur utilisation ,les ventilateurs peuvent être raccordés de façon différente cependant on peut distinguer trois modes principaux d'utilisation des ventilateurs.

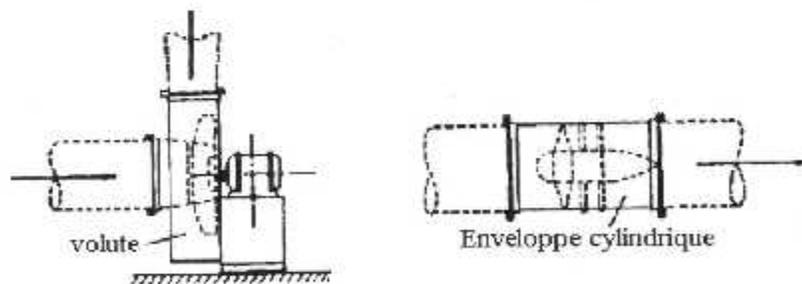


Fig.(1) Ventilateurs à enveloppes

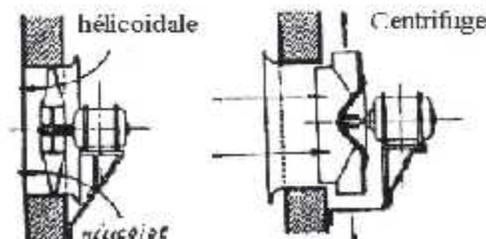


Fig.(2) Ventilateur de paroi

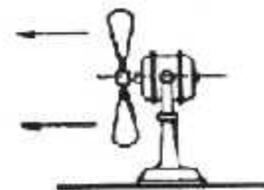


Fig.(3) Ventilateur brasseur d'air

Fig. (4.3)

Les ventilateurs classer suivant l'utilisation et le mode de raccordement.

- Ventilateur à enveloppe,
- Ventilateur de paroi,
- Ventilateur brasseur d'air.

3-2) - Classification suivant la position dans le circuit :

La position d'un ventilateur dans un circuit dépend de type de l'installation, on distingue généralement trois types de position possible :

- Ventilateur aspirant, Fig.(1)
- Ventilateur refoulant, Fig.(2)
- Ventilateur aspirant refoulant, Fig.(3)

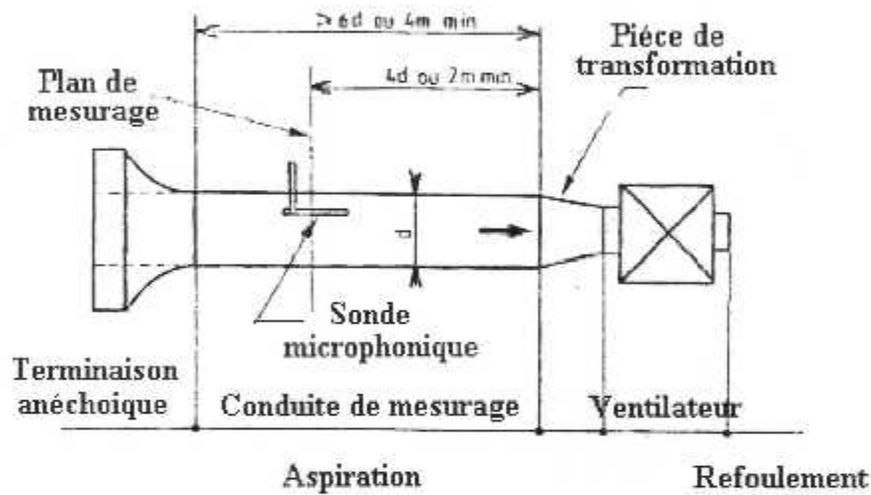


Fig.(1)

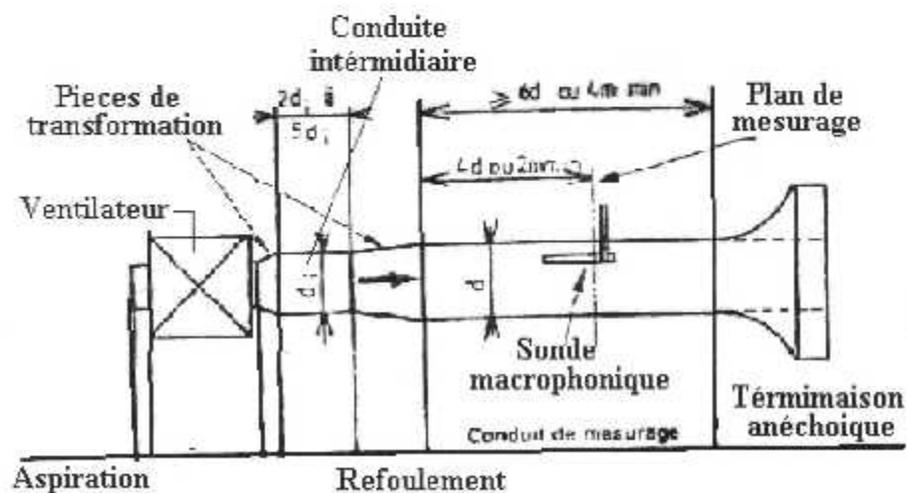


Fig.(2)

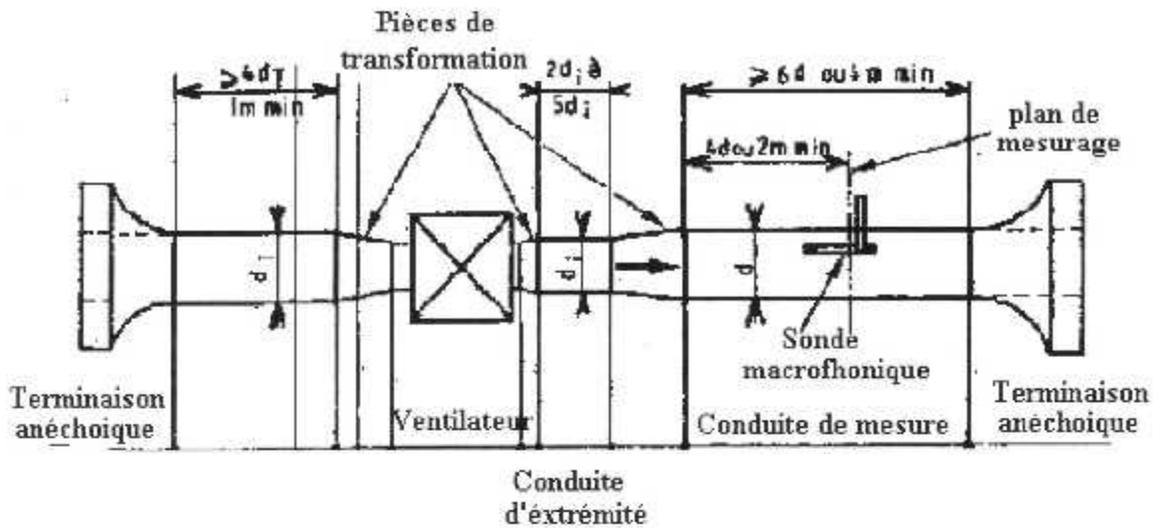


Fig.(3)

Fig. (4.4)

Les ventilateurs classer suivant la position dans le circuit.

3-3) - Classification suivant la trajectoire du fluide dans la roue :

Suivant la forme de la trajectoire du fluide dans la roue ,on distingue trois types de ventilateurs :

a)- Ventilateur centrifuge :

Le fluide entre dans la roue avec une vitesse essentiellement axiale ,et sort avec une vitesse dont la composante axiale est nulle.

b)- Ventilateur hélicoïde :

La composante radiale de la vitesse de fluide est presque nulle dans toute la traversée de la roue.

c)- Ventilateur helico-centrifuge :

Correspond à des cas intermédiaire dans la roue entre celui des ventilateurs centrifuges et celui des ventilateurs hélicoïdes.

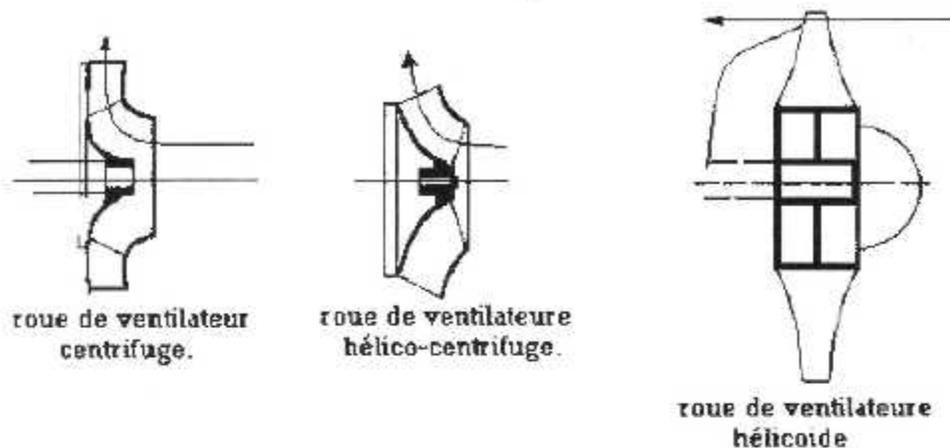


Fig. (4.5)
Les types de ventilateurs.

3-4) Classification suivant l'augmentation relative de la pression :

D'après l'augmentation relative de la pression dans un circuit, on distingue trois catégories :

a)- Les ventilateurs à basse pression :

Ces ventilateurs fournissent à leur vitesse de rotation maximale, et au point de rendement optimal, un travail massique inférieur au 600 J/Kg, et une élévation relative de pression environ 0.07 m de colonne d'eau pour un ventilateur qui transforme de l'air normal.

b)- Les ventilateurs à moyenne pression :

Les ventilateurs à moyenne pression fournissent à leur vitesse de rotation maximale, et à leur rendement optimal, un travail massique compris entre le 600 J/Kg et 3000 J/Kg ; et une élévation de pression comprise entre 0.07m à 0.35m de colonne d'eau pour un ventilateur qui transfère de l'air normal.

c)- Les ventilateurs à haute pression :

Ces ventilateurs fournissent un travail massique compris entre 3000 J/Kg et 25000 J/Kg, et une élévation de pression comprise entre 0.3m à 3m de colonne d'eau.

3-5) Classification suivant le mode d'entraînement :

On peut distinguer les principaux modes d'entraînement suivants (Fig.4-6) :

a)- Entraînement direct par l'arbre du moteur :

La roue est calée sur le prolongement de l'arbre.

b)- Entraînement par accouplement rigide coaxial :

La roue est calée sur un arbre sensiblement coaxial à l'arbre du moteur ,et lié à lui de façon rigide par l'intermédiaire d'un accouplement direct.

c)- Entraînement par accouplement glissant coaxial :

La roue est calée sur un arbre sensiblement coaxial à l'arbre du moteur et lié à lui par l'intermédiaire d'un accouplement glissant.

d)- Entraînement par renvoi d'angle :

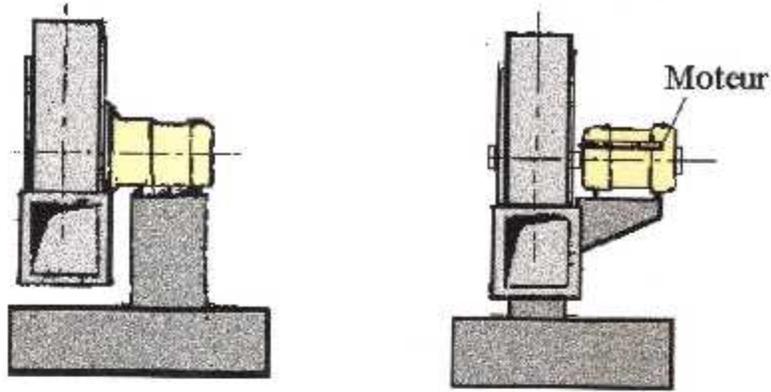
La roue est calée sur un arbre non coaxial à celui du moteur, les deux arbres étant liés en rotation par un renvoi d'angle.

e)- Entraînement par courroies :

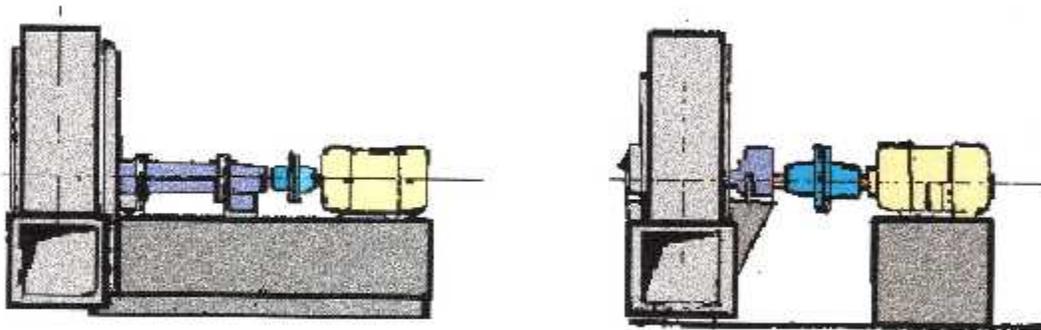
Les deux arbres de la roue et du moteur sont montés parallèlement et reliés par un dispositif de courroie qui assure l'entraînement du ventilateur.

f)- Entraînement par moteur à rotor extérieur :

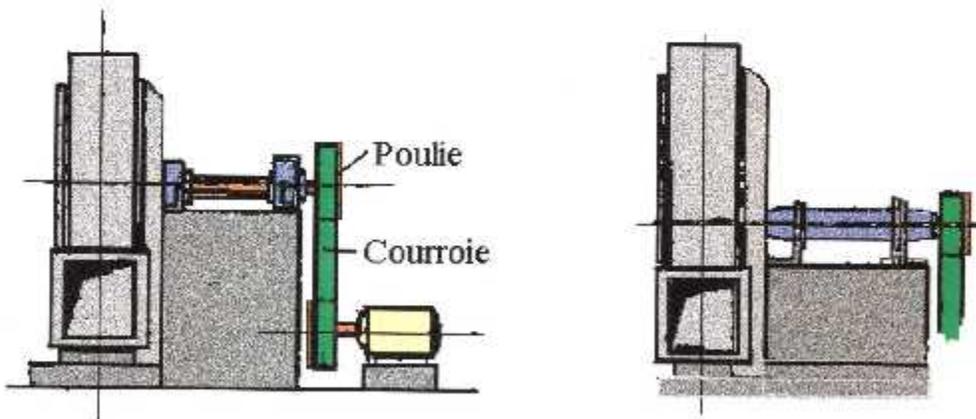
La roue est calée sur le rotor d'un moteur spécial au rotor extérieur.



1- Entraînement direct.



2- Entraînement coaxial par accouplement rigide ou glissant.



3- Entraînement par poulie et courroie.

Fig.(4-6)
Différents mode d'entraînement des ventilateurs.

4)- Les caractéristiques d'un ventilateur :

Les caractéristiques sont des données fondamentales pour choisir un ventilateur ,ils sont divisés en caractéristiques primaires ,et caractéristiques secondaires.

4-1/ Les caractéristiques primaires :

a) Le débit d'un ventilateur :

Le débit est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une Section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.

- Le débit massique Q_m :

Il représente la masse volumique d'air qui traverse le ventilateur par unité de temps

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad \text{l'unité est : (Kg/S) ou (Kg/ h).}$$

D'ou :

- Δm : La masse de fluide.
- Δt : Le temps .

- Le débit volumique moyen $Q_{v.m}$:

Il représente le volume d'air qui traverse le ventilateur par unité de temps. On l'exprime par mètre cube par seconde ou par heure .

Le débit volumique moyen $Q_{v.m}$ est donnée par la relation suivante.

$$Q_{v.m} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{m}^3/\text{S}) \text{ ou } (\text{m}^3/\text{h})$$

Ou :

- Δv : Le volume de fluide .
- Δt : le temps.

- La relation entre Q_m et $Q_{v.m}$ est :

$$Q_m = \rho \times Q_{v.m}$$

ou :

ρ : La masse volumique moyenne de fluide.

b) La pression d'un ventilateur :

C'est la différence algébrique entre les pressions totales moyennes à la bride de refoulement ,et à la bride d'aspiration d'un ventilateur .

$$\Delta P = P_{t2} - P_{t1} \quad (\text{Pascal})$$

On peut aussi l'exprimée sous la forme d'une hauteur (h) de colonne d'eau .

$$\Delta P = \rho g h \quad (\text{mm d'eau})$$

Elle est mesurée par un manomètre en U avec un tube de Pitot.

c) La vitesse de rotation (ω) :

La vitesse angulaire du ventilateur s'exprime en fonction du nombre de tour N de la roue par la relation si dessus

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (\text{rd /S})$$

La vitesse périphérique tangentielle U_t est :

$$U_t = \omega \times R \quad (\text{m/s})$$

R est le rayon de la roue du ventilateur .

d) La puissance d'un ventilateur :

Elle se devise en :

- Puissance fournie par le moteur d'entraînement, et qui s'exprime en Watt ou en cheval W (w) ou (ch).

- La puissance utile ou la puissance disponible à la sortie du ventilateur W_u et qui est donnée par la relation suivante :

$$W_u = \Delta P \times Q_{v.m} \quad (w)$$

e) Le rendement d'un ventilateur :

Le rendement du ventilateur est le rapport entre la puissance utile, et la puissance fournie par le moteur d'entraînement :

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{\Delta P \times Q_{v.m}}{W}$$

4-2/ Les caractéristiques secondaires :

a) Le bruit d'un ventilateur :

Par convention, le bruit d'un ventilateur est défini par la moyenne des niveaux sonores mesurés en un certain nombre de point précis autour d'un ventilateur.

b) L'échauffement d'un ventilateur :

Il représente l'augmentation du température de l'air entre l'aspiration et le refoulement ; cette augmentation du température résulte à une augmentation du pression de l'air et du frottement à l'intérieur.

c) Le phénomène de pompage :

Ce phénomène est défini par la constante du vitesse de rotation qui provoque l'écoulement de l'air ,de prendre un caractère pulsatoire , qui entraîne des variations de pression et de bruit dans l'installation.

d) Le phénomène de giration :

On dit qu'un ventilateur présente un phénomène de giration d'ensemble, lorsque à l'écoulement normal de l'air parallèlement à l'axe de l'orifice de refoulement ou d'aspiration ,s'ajoute un mouvement de rotation permanent autour de cet axe .

e) Sens de rotation de la roue :

Il est recommandé au constructeur de disposer une flèche dans le Sens pépiphérique de rotation de la roue ,tant sur l'enveloppe que sur le moyeu de la roue.

5/ Triangle de vitesse dans un ventilateur centrifuge :

Les caractéristiques sont des données fondamentales pour choisir un ventilateur ,ils sont divisés en caractéristiques primaires ,et caractéristiques secondaires.

5-1/ A l'entrée du ventilateur station (1):

On peut définir :

- La vitesse absolue V_1 telle que :

$$V_1 = \frac{Q_v}{S} \Rightarrow V_1 = \frac{Q_m}{\rho_1 \times S_1}$$

Avec :

$$S_1 = 2\pi R_1 L_1$$

- La vitesse d'entraînement U_1 telle que :

$$U_1 = R_1 \times \omega$$

- Le triangle se ferme alors par la vitesse relative W_1 .

D'une manière générale :

$$V_1 = U_1 + W_1$$

5-2)- A la sortie de la roue la station (2) :

On a également :

- La vitesse absolue V_2 se décompose en vitesse débitante V_{2m} (projection de V_2 sur le rayon) ; et en vitesse tangentielle V_{2u} (projection de V_2 sur la tangente de la roue)
- La vitesse d'entraînement U_2 telle que :

$$U_2 = R_2 \times \omega$$

- La vitesse relative W_2 avec :

$$V_2 = U_2 + W_2$$

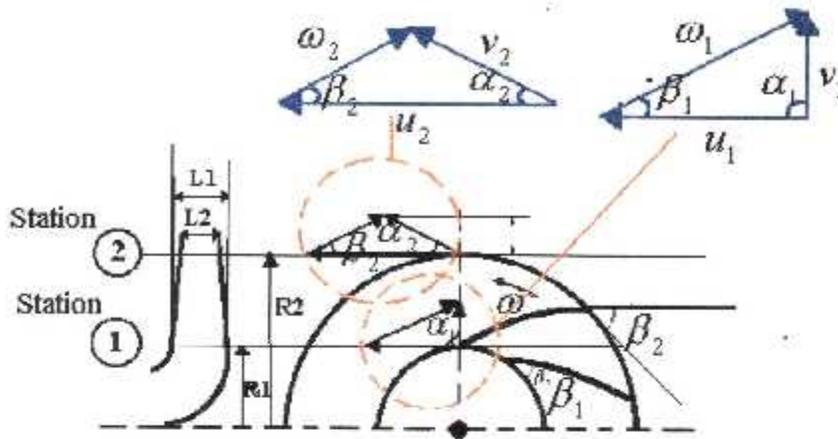


Fig.(4-7) le triangle des vitesses

6 / Les courbes caractéristiques d'un ventilateur :

Ces courbes représente les variations des principales caractéristiques qui sont : la différence de pression, la puissance utile, et le rendement en fonction du débit.

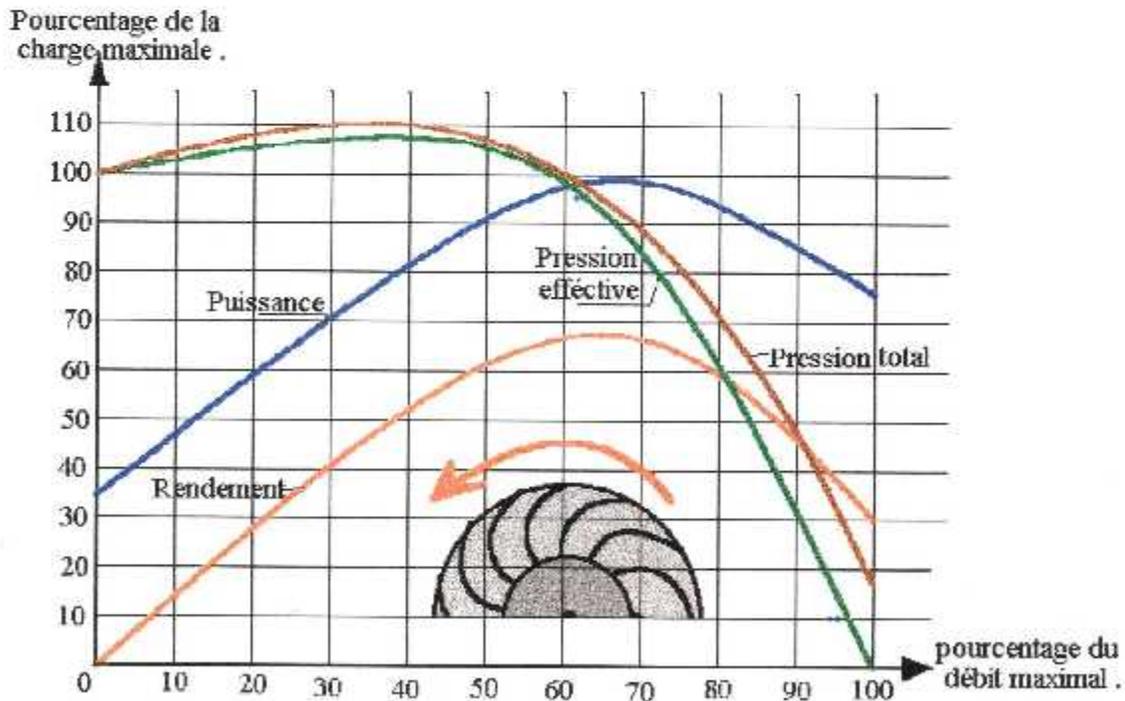


Fig.(4-8) Courbes caractéristiques d'un ventilateur centrifuge à pales Orientées vers l'arrière.

On considère généralement :

- La courbe débit-pression,
- La courbe débit-puissance utile,
- La courbe débit-rendement,

La vitesse de rotation de la roue, et la masse volumique du fluide, sont en relation avec les caractéristiques qui sont : la pression, la puissance , et le rendement . Donc ces caractéristiques influent sur les courbes du ventilateur.

Pour représenter les courbes caractéristiques du ventilateur graphiquement, on considère que la vitesse de rotation et la masse volumique comme étant des constantes ; En variant le débit, on obtient des valeurs correspondants de pression, puissance et de rendement qui doivent être utiliser pour tracer les courbes caractéristiques .

Chapitre 5

Instruments de mesures .

1/ Introduction :

Pour la détermination des caractéristiques du ventilateur et les paramètres du statoréacteur, une série de mesure est entreprise en utilisant des appareils de mesure adéquat. En effet le choix de l'instrument est d'une importance selon le domaine d'application.

Les grandeurs a mesurés sont notamment : la pression, le débit, la vitesse et la température .

2/ Mesure de pression :

Pour les mesures de pressions plusieurs instruments sont utiliser les plus réponsus sont les tubes de Pitot et les manomètres de pression

2-1)- Les manomètres :

Le manomètre est un instrument de mesure autonome, qui fournit la valeur de la pression grâce à un dispositif indicateur ou de lecture.

Il existe différent types de manomètre qu'on peut les classer en deux catégories :

2-2)- Les manomètres à déformation de solide:

Les manomètres a déformation de solide existe sous différents types, les plus réponsus sont :

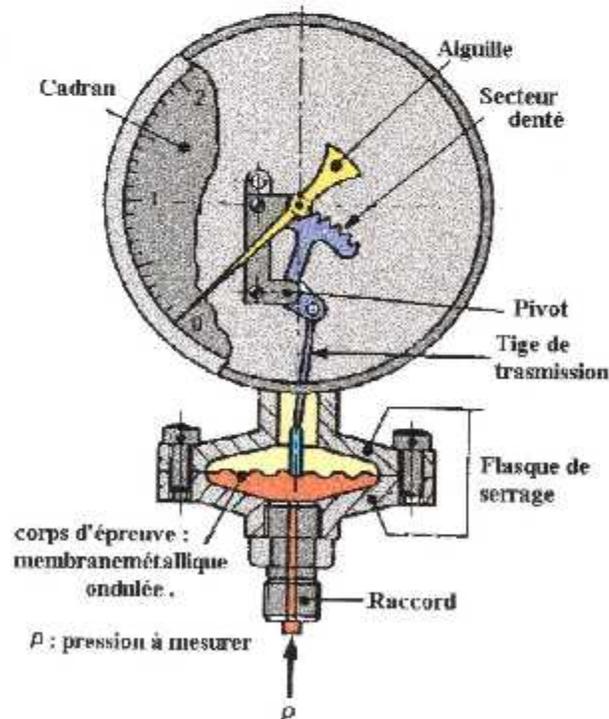


Fig.(5-1)
Manomètres à membrane.

- Manomètre à membrane , fig.(5-1).
- Manomètre à capsule,
- Manomètre à soufflet,
- Manomètre à tube de bourdon,

2-3)- Les manomètres à liquide :

Ils dérivent plus ou moins du tube piézométrique en U, sont principe de mesure dépend de la dénivellation de liquide dans les deux branches de tube en U.

Ce genre des manomètres est le plus utilisée pour les mesures des pressions des fluides (pour nos mesures, on a utilisée des manomètres en U)

• Réalisation du tube en U :

C'est la réalisation la plus simple et la plus classique . Le tube en U peut être constitue, soit par un seul tube transparent coudé en verre ou en matière plastique rigide ou souple, soit par deux tubes rectilignes parallèles verticaux réunis par un socle assurant leurs communication.

2-4)- Principe de mesure :

Le tube en U conduit par principe à la mesure d'une différence de niveau ; il faut donc à chaque mesure lire le niveau de deux branches et faire la différence entre eu , cette différence est mesurée à l'aide d'une réglette millimétrée coulissante dont on ajuste à chaque fois le zéro sur le niveau le plus bas.

a) Mesure de la pression statique P_s :

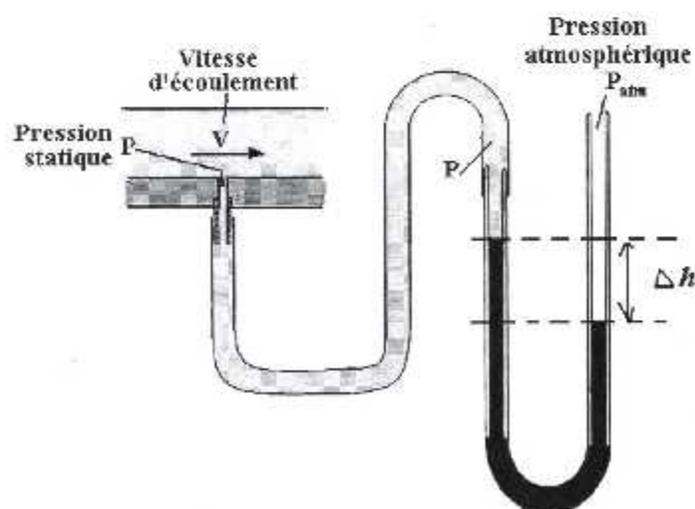


Fig.(5-2)
Mesure de la pression statique.

La pression statique sur une surface frontière du fluide peut être mesuré au moyen de trou fin percés sans bavures, perpendiculaire à la surface frontière . En raccordant le trou à un manomètre de tube en U et on mesure la pression statique par rapport à la pression atmosphérique.

b) Le tube de Pitot :

C'est une sonde qui permet de mesuré les pressions statiques est totales dans un point. la lecture de la mesure peut être effectuer par lecture soit avec deux tubes piézométriques soit sur un manomètre différentielle.

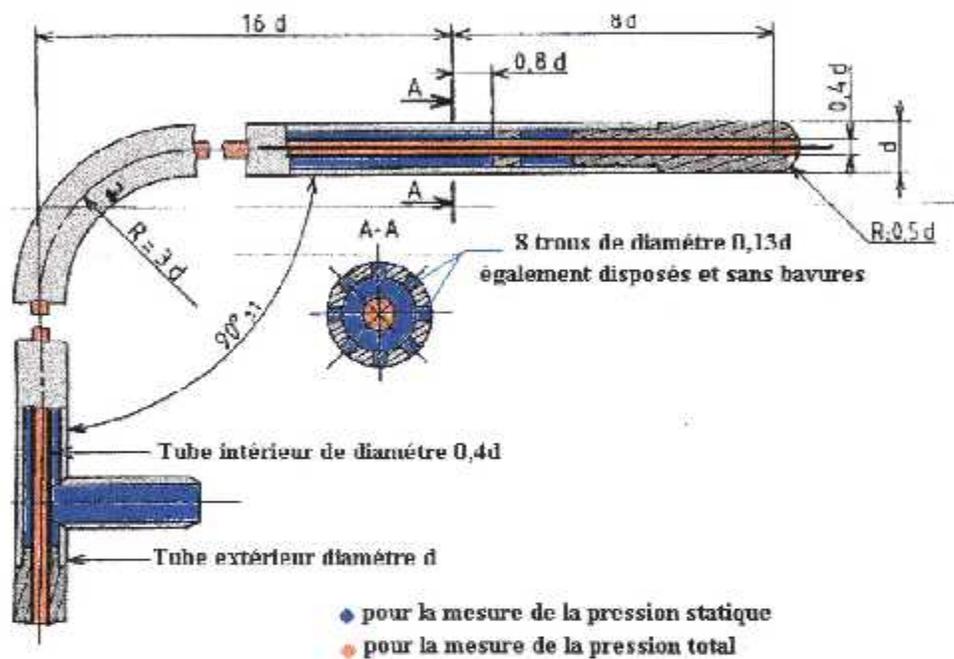


Fig.(5-3)
Tube de Pitot.

Dans un écoulement permanent uniforme , on oriente le tube de Pitot parallèlement et opposé aux lignes de courant de telle sorte que son introduction n'apporte qu'un minimum de perturbation, Fig.(5-4).

La pression différentielle sur un manomètre représente la pression dynamique P_d se qui nous permet de déterminé la vitesse de l'écoulement en se point.

Nous aurons :

$$P_t = P_s + \frac{1}{2} \rho V^2 \Rightarrow P_t - P_s = \frac{1}{2} \rho V^2 .$$

Donc :

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

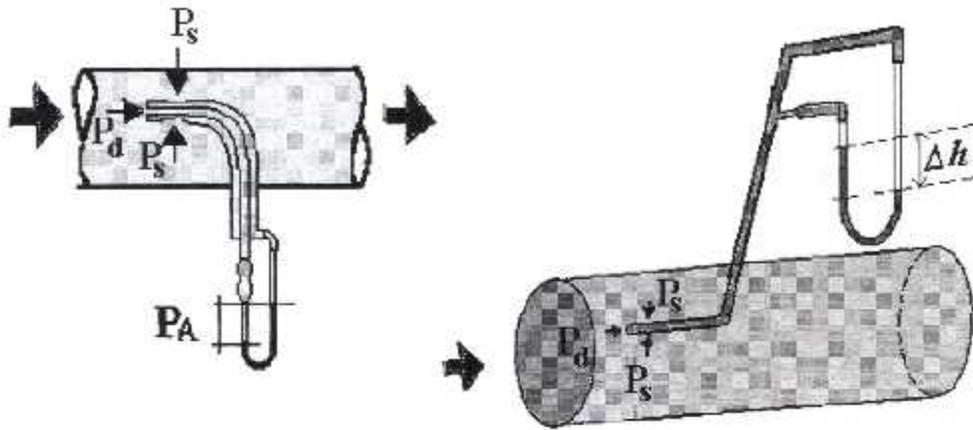


Fig.(5-4)

Mesure de la pression dynamique.

On peut déterminer les pressions par les mm d'eau en exprimant donc la dénivellation Δh du manomètre en mm d'eau.

$$P_t - P_s = \rho g(\Delta h)$$

Donc :

$$V = \sqrt{\frac{2(\Delta h)}{\rho}} \quad (m/s)$$

c) Mesure de la pression totale P_t :

La pression totale ou la pression au point d'arrêt est la Somme de la pression statique et la pression dynamique :

$$P_t = P_d + P_s$$

Elle est mesurée au moyen d'une sonde de Pitot. En raccordant cette dernière avec un manomètre en U, la dénivellation du liquide dans les deux branches de manomètre représente la pression totale.

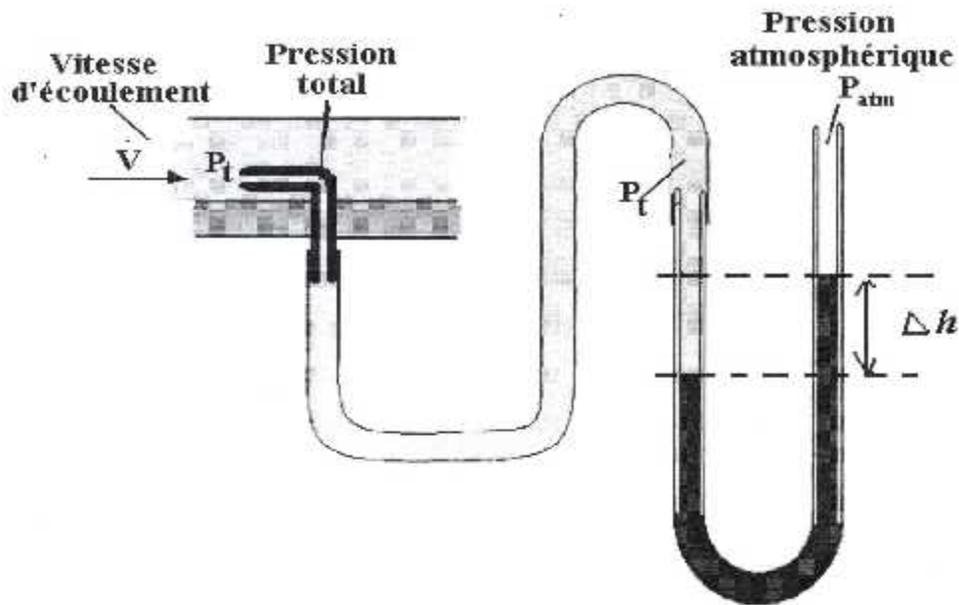


Fig.(5-5)
Mesure de la pression totale.

3- Mesure du débit :

Pour mesurer le débit d'un fluide s'écoulant dans une conduite, il existe plusieurs moyens de mesures parmi eux on a :

- Débitmètre à pression différentielle (à orifice déprimogène, Rotamètre),
- Débitmètre à turbine,
- Débitmètre électromagnétique,
- Débitmètre de type oscillant,

3-1) Le débitmètre à orifice déprimogène :

C'est un dispositif utilisé pour mesurer le débit du fluide dans une conduite entre deux points. Il comprend deux dispositifs :

- un organe déprimogène : créant la différence de pression .
- un dispositif de mesure permettant la mesure en permanence de la différence de pression pour traduire automatiquement en valeur de débit instantané l'appareil de mesure peut être à aiguille, graphique d'enregistrement, indicateur numérique ou d'une lecture sur manomètre.

Les différents types d'organe déprimogène se divisent en trois types principales

a) Le diaphragme :

Le diaphragme est un joint plein mince, percé d'un trou dont le centre coïncide généralement avec l'axe de la conduite. On mesure la différence de pression entre les deux faces.

b) La tuyère :

La tuyère est un diaphragme profilé de manière à mouler au mieux la veine fluide dans sa contraction. La section la plus étroite appelée col, est prolongée par une partie cylindrique. On mesure la différence de pression entre l'amont et l'aval.

c) Le venturi :

Elle est formée par deux troncs de cône réunis par leur petite base. Cet ensemble constitue un étranglement dans la partie la plus étroite, dite également col, la vitesse est grande et la pression est faible. On mesure la différence de pression entre l'entrée et le col.

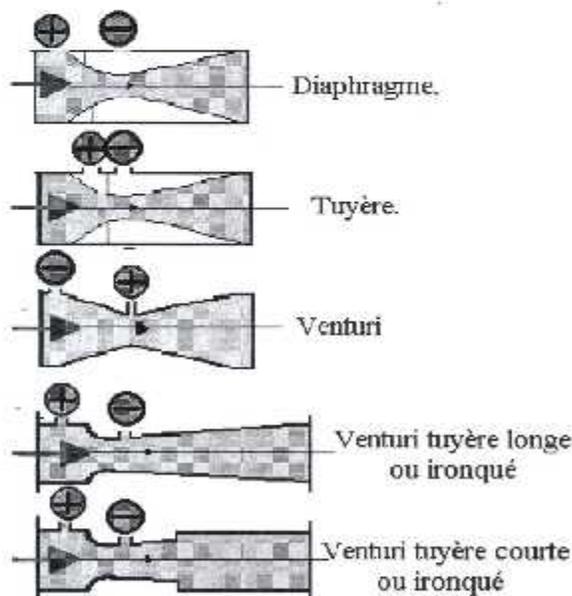


Fig.(5-6)

Les principaux types d'organes déprimogènes.

3-2) Les prises des pressions dans un appareil déprimogène :

L'emplacement des prises de pressions est dépend de types d'élément primaire utilisé.

Dans le cas des diaphragmes :

Dans ce cas , trois types de prises de pressions sont actuellement utilisés de façon courante :

Les prises dites dans les angles ou 0/0 :

Implantées à distance nulle des faces amont et aval.

Les prises dites à la bride ou 25/25 :

L'axe de prélèvement de pression est situé à 25 mm des faces amont et aval de la plaque diaphragme.

La prise vena contractée ou à section contractée :

Largement utilisé dans le cas de la vapeur. Pour les autres éléments primaire , l'emplacement des prises de pressions est souvent unique :

- Dans les angles pour la tuyère ;
- Au niveau du cylindre d'entrée (amont) et du col (aval)
Pour les venturis ;

3-3) Principe de mesure par la différence de pression :

Pour mesurer la différence de pression permettant d'obtenir le débit, on applique le théorème de Bernoulli entre deux points de conduit, on utilise pour cela le tube de venturi comme instrument de mesure .

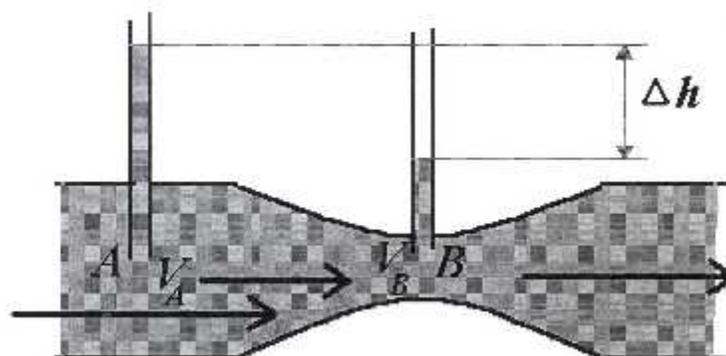


Fig.(5-7)

Mesure de la pression différentielle, (Tube de venturi).

Dans les sections S_1 et S_2 , le tube est muni de trous capables de capter la pression statique P_1 et P_2 . Le débit masse d'un écoulement incompressible s'obtient de la manière suivante :

Selon la continuité et l'équation de Bernoulli, on a :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2)$$

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 = Q_m$$

$$V_1 = V_2 \frac{S_2}{S_1}$$

$$Q_m = \rho S_1 \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho} \times \frac{1}{\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1}}$$

Pour mesurer le débit de gaz utilisé pour allumer le statoréacteur, On utilise le débitmètre à flotteur.

3-4) description du débit mètre a flotteur :

On donne ici la description ou bien la partie constitutive d'un débitmètre à flotteur. La carcasse de l'appareil est constituée par deux montures s'adaptant solidement sur deux pièces d'extrémité, servant en même temps d'entrée et de sortie le fluide. Les raccords peuvent être filetés ou à brides et sont orientables pour s'adapter à la configuration des tuyauteries extérieures.

L'ensemble tube / flotteur, comprenant butées inférieure et supérieure s'engage intérieurement dans les pièces d'extrémités et bute contre le raccord supérieur sous l'action du ressort placé dans le raccord inférieur.

L'étanchéité est réalisée au moyen de joints torique. Certains constructeurs recourent aussi au presse-étoupe classique, mais c'est seulement avec les joint toriques qu'il est aisé de changer l'ensemble tube / flotteur sans avoir à démonter la carcasse de l'appareil, et par conséquent, sans avoir à enlever l'appareil de la tuyauteries sur laquelle il est installé.

Dans un tel montage, les efforts exercés par la tuyauteries sur l'appareil sont absorbés par la carcasse sans être transmis au tube grâce à la souplesse des garnitures à joints toriques.

Enfin, deux encadrement vitrés, antérieur et postérieur, peuvent être prévus sur les montures pour protéger le tube contre les chocs extérieurs et, aussi bien, pour protéger l'extérieur en cas de bris du tube sous l'action de fluide. (voir la figure.(5-8))

• **Principe de l'appareille :**

Dans sa forme élémentaire, un débitmètre à flotteur est constitué par un tube tronconique en verre dont la section s'accroît vers le haut et un flotteur dont diamètre est légèrement inférieur au diamètre de base du tube (d).

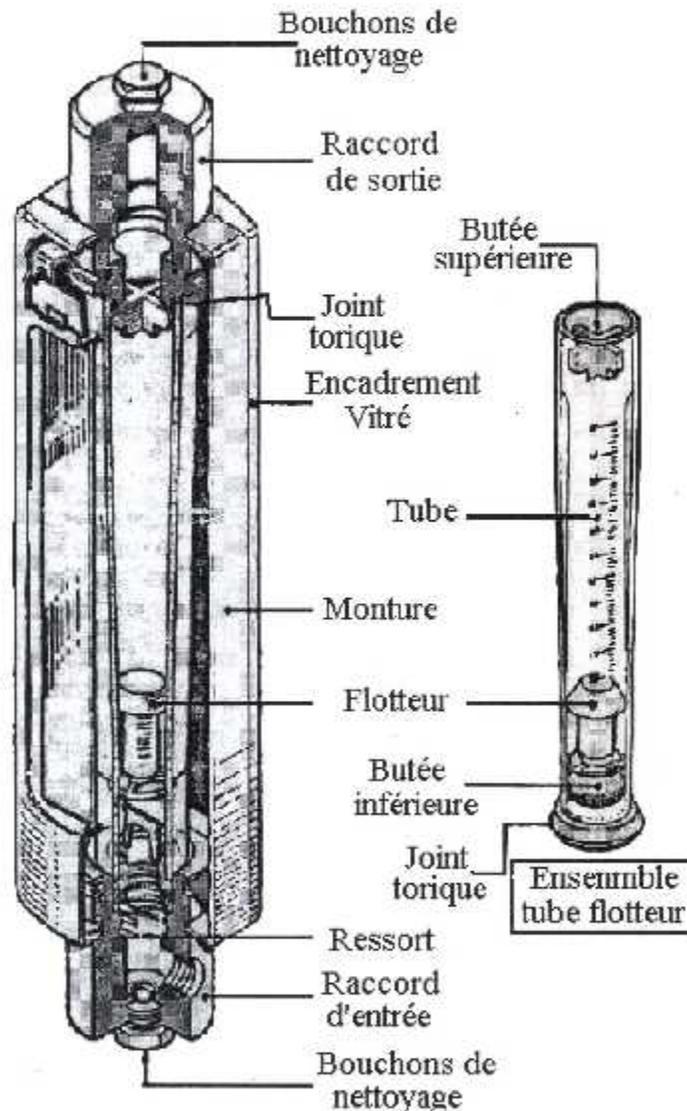


Fig.(5-8)
Débitmètre à flotteur.

Le fluide arrive par le bas et traverse l'appareil verticalement. La section de passage constituée par l'espace annulaire entre le flotteur et le tube s'accroît quand le flotteur se déplace vers le haut. Pour un débit donné, le flotteur se met dans une position telle que la force due à la pression différentielle créée par le débit au travers de l'espace annulaire, augmentée de la poussée d'Archimède s'il s'agit d'un liquide, équilibre le poids du flotteur.

Dans ces conditions l'élévation du flotteur au-dessus de la base du tube constitue une indication de la mesure.

4)- Mesure de la vitesse :

Afin de pouvoir mesurer la vitesse de statoréacteur par rapport à l'air qui l'entoure, deux dispositifs peuvent être différemment employés, le tube de Pitot ou le tube de venturi. On rencontre le plus souvent le premier dispositifs que le second.

4-1) Le tube de Pitot :

La mesure de la vitesse d'un écoulement à l'aide de tube de Pitot est Une application de la loi de Bernoulli.

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P - \rho g z = \text{cte}$$

Le tube de Pitot comporte deux prises de pressions : une face à l'écoulement P_t , l'autre, perpendiculaire à l'écoulement P_s .
Pour une ligne de courant horizontale, ou pour de l'air dont le poids peut être négligé, on a pour la ligne de courant qui arrive au point d'arrêt :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + P_s = P_t$$

La vitesse de l'écoulement est alors donnée par :

$$V = \sqrt{2(P_t - P_s) / \rho}$$

La vitesse dépend donc de la différence entre la pression d'arrêt et la pression statique. Cette différence est appelée Pression Dynamique.

4-2) Le tube de venturi :

Le principe consiste à mesurer la différence de pression entre l'entrée du convergent et le col.

Soit :

- S1 la section à l'entrée du convergent .
- S2 la section au col du convergent.
- V1 la vitesse d'écoulement à l'entrée .
- V2 la vitesse d'écoulement au col .

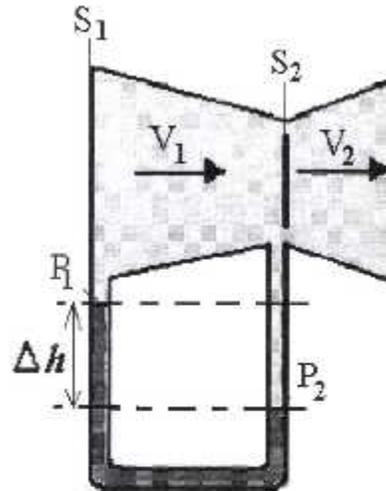


Fig.(5-10)

Principe de mesure de la vitesse (tube de venturi)

La loi de continuité permet d'écrire :

$$S1 V1 = S2 V2 \rightarrow V2 = (S1/S2) V1$$

La loi de Bernoulli permet d'écrire :

$$P1 + 1/2 \rho V1^2 = P2 + 1/2 \rho V2^2$$

$$P1 - P2 = 1/2 \rho (V2^2 - V1^2)$$

En remplaçant V2 par sa valeur :

$$P1 - P2 = 1/2 \rho ((S1/S2) V)^2 - V1^2) = \Delta P$$

$$\Delta P = P1 - P2 = 1/2 \rho V1^2 ((S1/S2)^2 - 1)$$

d'où :

$$V1^2 = 2\Delta P / \rho ((S1/S2)^2 - 1)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right]}}$$

Comme S_1 , S_2 , et ρ sont connus posons :

$$K = \sqrt{\frac{2}{\rho \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right]}}$$

D'où :

$$V_1 = K \sqrt{\Delta P}$$

5/ - Mesure de la température :

Cette mesure est effectuée à l'aide d'un instrument de mesure de température le plus couramment utilisé et qui s'appelle **le thermocouple**.

5-1) Définition :

Un thermocouple est un capteur thermique qui se compose de deux conducteurs de métaux différents. Quand ces deux conducteurs sont soudés à leur extrémités et que celles-ci sont portées à des température différentes, une force électromotrice apparaît et un courant s'établit (en l'absence de tout générateur).

Cette f.e.m thermoélectrique $E_{a/b}(T,t)$ est fonction de la nature des métaux et proportionnelle à la variation de la température. Le circuit de mesure est donc constitué de deux jonctions l'une appelées jonction de soudure chaude, c'est la jonction de mesure qui sera située dans le milieu dont on veut mesurer la température, l'autre appelée jonction de soudure froide, c'est la jonction de référence (théoriquement à 0°C , pratiquement mesurer).

Deux conditions sont nécessaires pour qu'il y ait formation d'une f.e.m :

- La présence au moins de deux conducteurs de nature différente.
- Une différence de température entre les deux jonctions.

$$E_{a/b}(T,t) = E_{a/b}(T) - E_{a/b}(t)$$

De cette expression il faut retenir que l'on mesure toujours une f.e.m produite par la différence de température.

L'ensemble des thermocouples aujourd'hui couramment utilisés permet de couvrir un large domaine de température allant de -250°C à 26000°C .

5-2) Différents types de thermocouples :

Il existe deux catégories de thermocouple selon le type de métaux employés :

- Les thermocouples en métal précieux à base de platine :

Les plus stables mais aussi les plus chers et les moins sensibles.

- Les thermocouples en métaux communs :

Les moins stables mais aussi les moins chers et les plus sensibles.

5-3) Mesure de la température par thermocouple :

En théorie, lorsqu'un conducteur électrique subit un gradient de température, l'énergie reçue crée un mouvement d'électrons générant ainsi une force électromotrice (f.e.m) dont la valeur et le sens dépendront du matériau conducteur et aussi de l'amplitude et de la direction du gradient de température.

La tension résultante aux extrémités de ce conducteur sera la somme des f.e.m . produites tout le long du conducteur. Dans la pratique cette mesure sur un conducteur unique n'est pas réalisable, car il est trop faible.

Si on place deux conducteurs composés de métaux de caractéristiques thermoélectriques très différentes reliés entre eux par une extrémité on peut alors obtenir des valeurs amplifiées de (f.e.m), mesurables par l'application d'un gradient de température à partir du point de jonction de mesure (soudure chaude).

Les deux extrémités permettant la lecture de la f.e.m . entre les deux conducteurs différents seront appelées jonction de référence (soudure froide). Ce type de circuit thermoélectrique est appelé **thermocouple**.

- REMARQUES :

- La valeur de température de la soudure chaude sera facile à déduire si la température de la soudure froide est connue .
- Si les conducteurs électriques de thermocouple sont homogènes sur la section de mesure la f.e.m. sera inchangée même s'ils traversent des zones de températures différentes entre jonctions.

- Il est possible d'introduire dans un circuit thermoélectrique des conducteurs de nature différente sans modifier la f.e.m. résultante si ces conducteurs sont deux à deux à la même température. Ceci rend donc possible l'insertion d'un appareil de mesure dans le circuit.

Chapitre 6

Le banc d'essais .

LE BANC D'ESSAIS

1. Introduction :

Ce chapitre sera dédié à l'étude expérimentale sur la remise en fonctionnement d'un statoréacteur classique et d'un pulsoréacteur sur banc d'essais effectuée par nos soins à l'atelier de propulsion.

Les moteurs utilisés pour l'expérimentation sont de vieux moteurs récupérés sur des bancs d'essais dans un état dégradés, donc des actions de réhabilitation et de maintenance ont été nécessaire pour pouvoir les exploiter .

Le banc d'essais se compose essentiellement de deux parties distinctes qui sont le socle et le ventilateur. Le socle servira de support pour les moteurs (Statoréacteur, pulsoréacteur) et le ventilateur permet le soufflage de l'air pour actionner les moteurs .



Fig.(6-1) Le banc d'essais vue de derrière .

2. Le ventilateur :

Le ventilateur est du type centrifuge a pale inclinée vers l'arrière et de moyen puissance, il porte la marque et le numéro de série suivant :



Fig.(6-2) Identification du ventilateur.

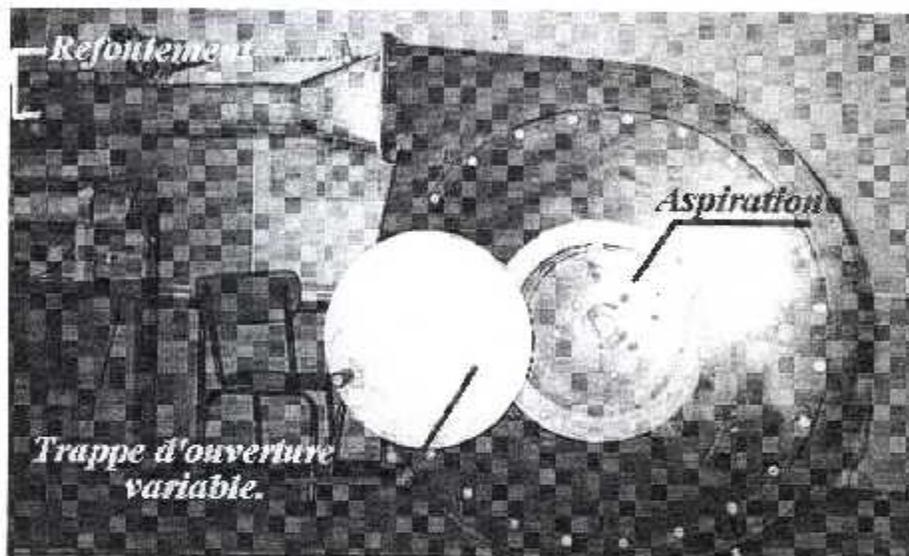


Fig.(6-3) Le ventilateur.

Le ventilateur est entraîné par un moteur électrique très puissant dans voici les caractéristiques et les performances :

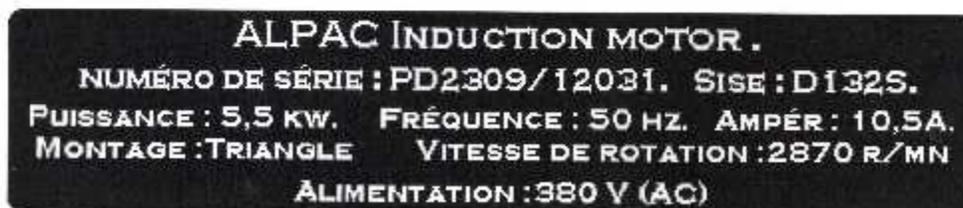


Fig.(6-4) Identification du moteur électrique.

Le type de montage triphasé est en triangle (Δ).

Les aubes de la roue du ventilateur sont de type inclinés en arrière, présentant les valeurs d'angles respectives à l'aspiration (α) et au refoulement (β), comme indiquée sur la figure suivante :

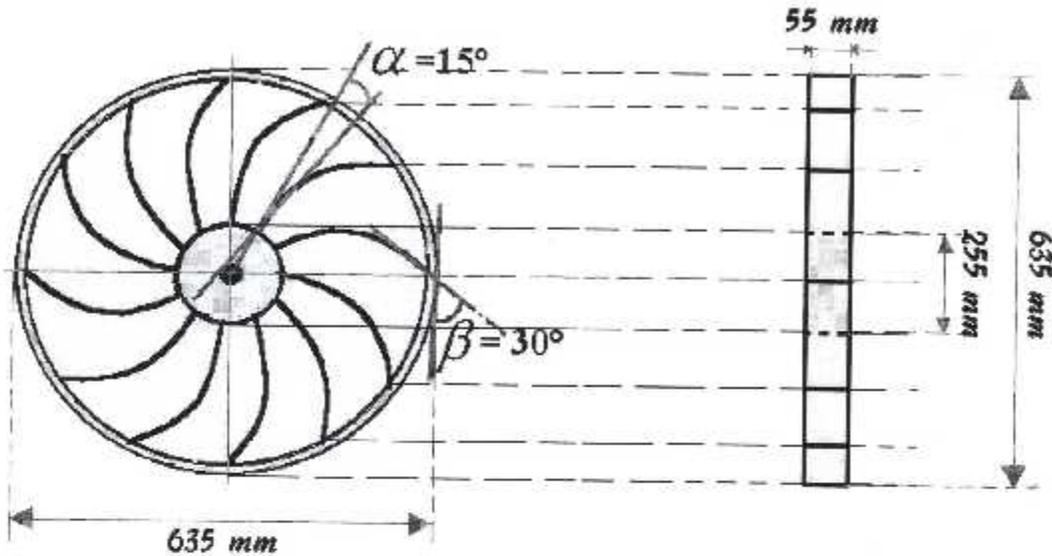


Fig.(6-5) La roue du ventilateur.

3. Le socle :

La conception du socle a été parmi les étapes les plus importantes à réaliser et déterminante pour la suite de l'expérimentation, car le socle devrait contenir les éléments ci-dessous :

- * L'un des deux moteurs à expérimenter, soit le statoréacteur ou le pulsoréacteur.
- * Le circuit d'alimentation en carburant (gaz de butane).
- * Le circuit d'allumage électrique.
- * Les instruments de mesures.

Pour la construction du socle, on a utilisés des tubes en fer a section carrés suffisamment résistants pour supporter les moteurs et protéger l'opérateur. Le travail de réalisation du socle et du support moteur ont été entrepris au niveau de l'atelier de propulsion, ou des opérations de soudages et d'assemblages on eu lieux .

Une épaisse plaque métallique de (2 mm) d'épaisseur est fixée sur la face avant par boulonnerie servant de support aux instruments de contrôles et de mesures d'une part et d'une autre part de barrière de protection contre d'éventuelle retour de flamme sur l'opérateur.



Fig (6-6) Le banc d'essais vue de Face.

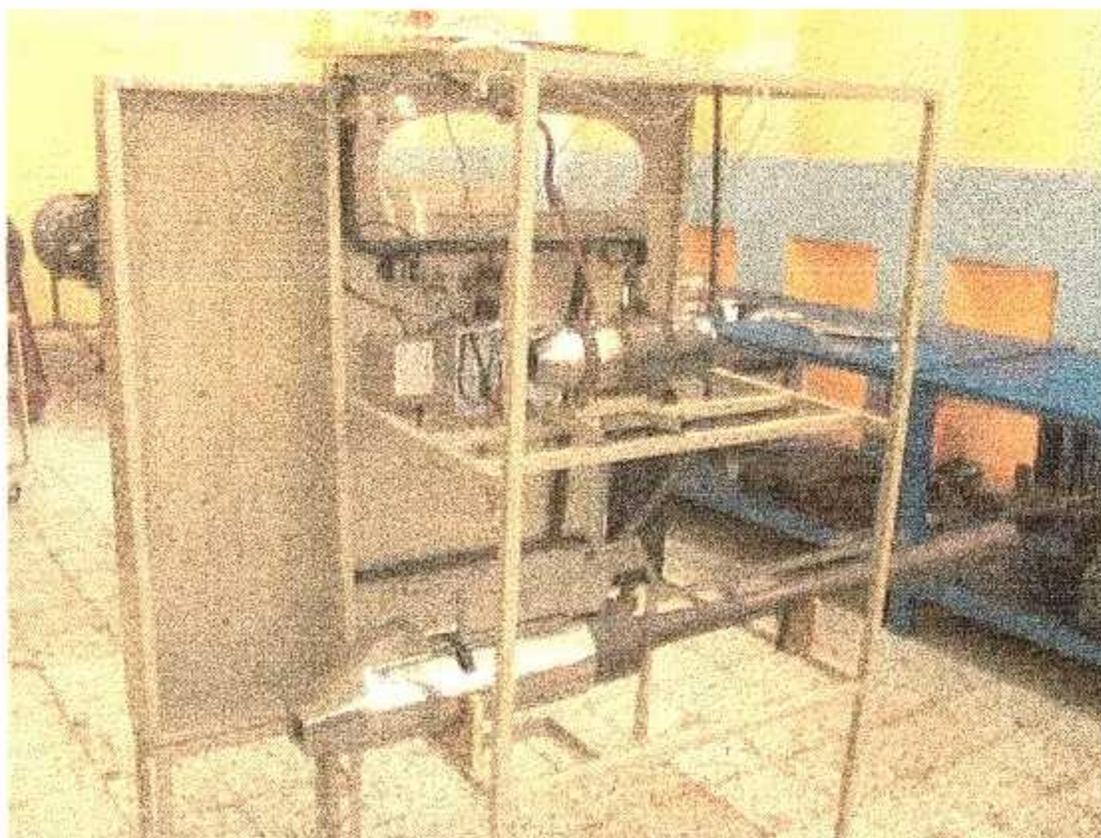


Fig (6-7) Le banc d'essais vue de derrière.

Dimension des tubes découpés :

∅	Section des tubes	:	2,5 x 2,5	mm.
∅	Longueur des tubes coupés	:	4 x 165	cm.
		:	6 x 63	cm.
		:	7 x 87	cm.
		:	2 x 91	cm.
∅	Dimension plaque métallique	:	91 x 121	cm.

4. Le statoréacteur :

Le statoréacteur utilisé est un statoréacteur subsonique classique qui fonctionne avec du gaz, et dans voici l'identification :



Fig.(6-8) Identification du statoréacteur.

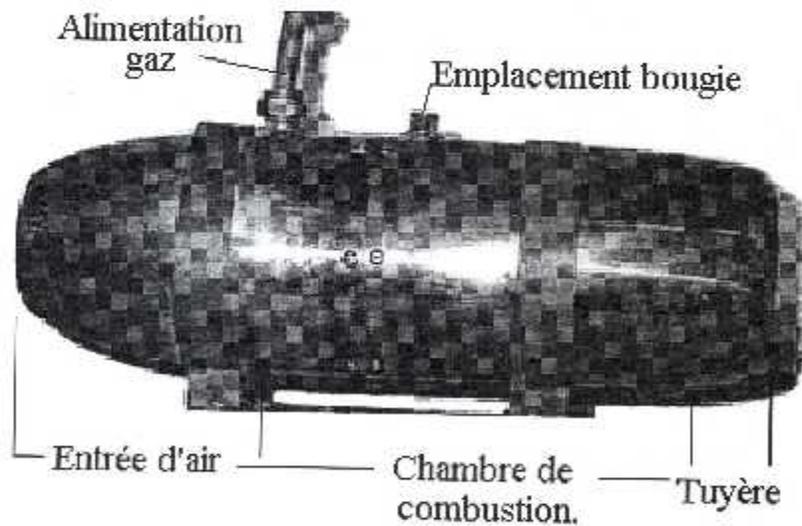


Fig.(6-9) Le statoréacteur classique.

Le statoréacteur ayant les dimensions suivants :

∅	Longueur	:	380	mm
∅	Diamètre d'entrée	:	100	mm
∅	Diamètre sortie	:	63	mm
∅	Diamètre Max. (entrée et sortie)	:	125	mm

Remarque :

Pour différencier entre l'entrée et la sortie du flux, il y a lieu de se rapporter aux diamètres des sections.

Le diamètre de la section sortie est toujours supérieure au diamètre de la section entrée.

Le corps du statoréacteur est composé des parties suivantes :

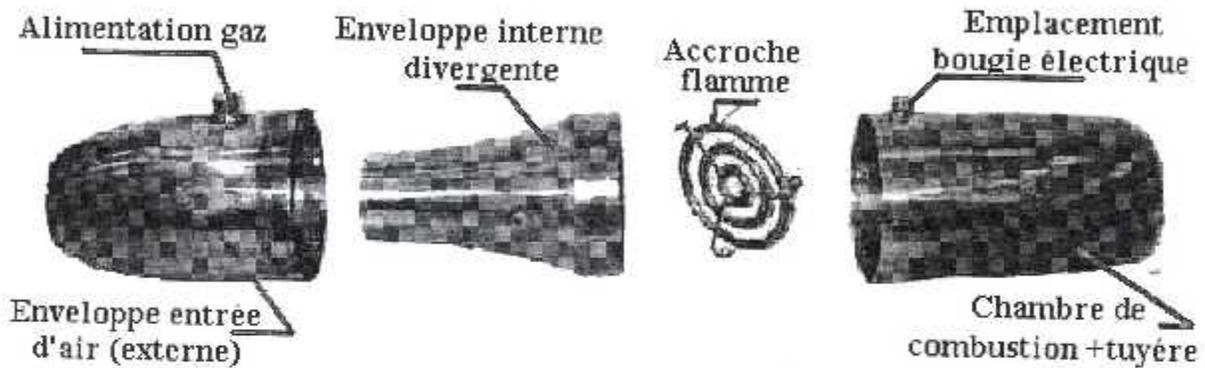


Fig.(6-10) Vue explosé du statoréacteur

a) L'entrée d'air :

L'entrée d'air utilisée est une composition de deux divergences concentriques, permettant de capturer l'air soufflé et de le renvoyer vers la chambre de combustion.

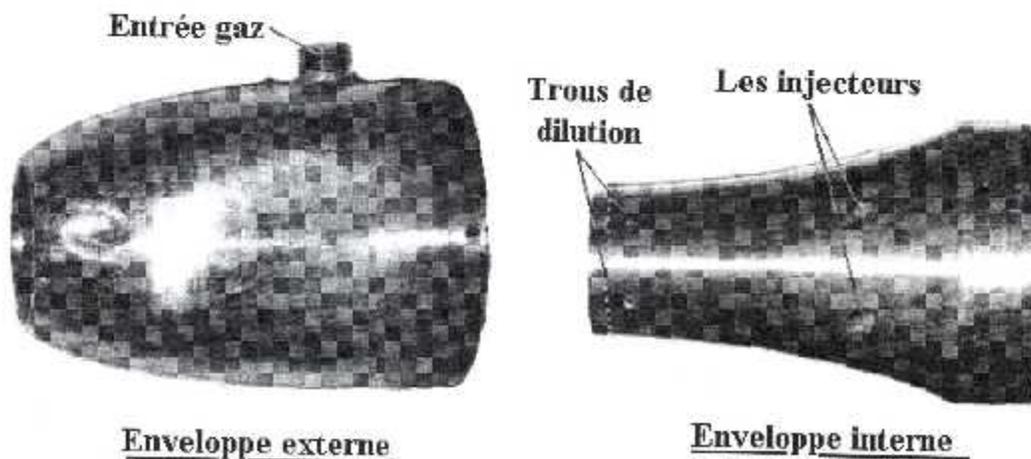


Fig.(6-11) Les deux enveloppes de l'entrée d'air.

L'espace composé par l'assemblage des deux enveloppes sert à l'alimentation du carburant par un orifice de 21 mm de diamètre le gaz sera ensuite distribué vers 6 injecteurs à travers des orifices de 6 mm de diamètre situés à une profondeur de 115 mm de l'entrée.

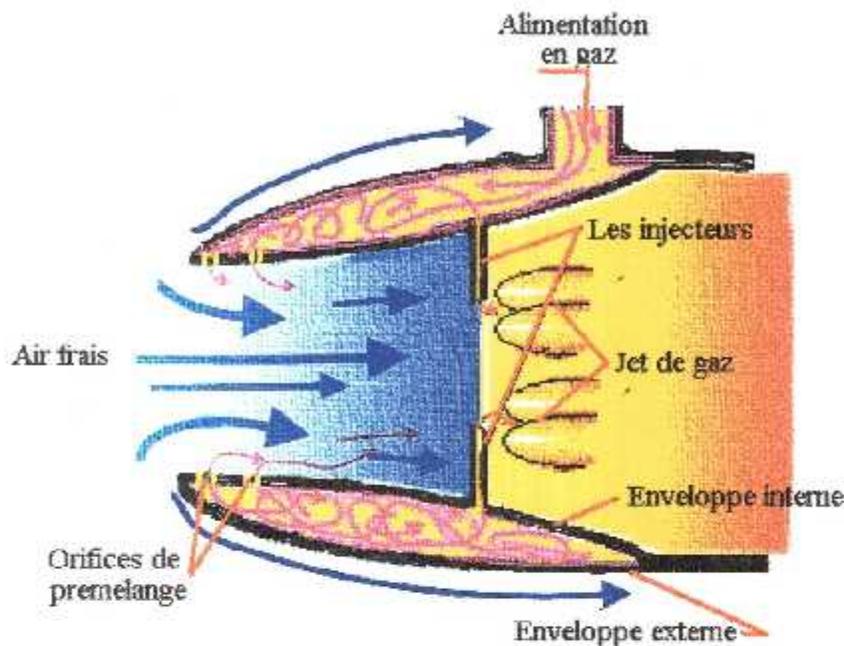


Fig.(6-12) Fonctionnement de l'entrée d'air.

Dans la partie primaire de l'entrée il existe des orifices de 1 mm de diamètre. Disposés tout autour permettant de réaliser un prémélange de gaz et d'air nécessaire au démarrage pour assurer la combustion et l'accrochage de la flamme.

Dimensions d'entrée d'air :

☛ Enveloppe interne :

- Longueur : 188 mm
- Diamètre entrée : 67 mm
- Diamètre sortie : 126 mm

☛ Enveloppe externe :

- Longueur : 178 mm
- Diamètre entrée : 67 mm
- Diamètre sortie : 126 mm

Remarque :

La configuration de l'entrée d'air divergente est utilisée dans la plupart des moteurs d'avion commerciaux, parce que sa plus courte longueur offre moins de traînée (résistance au mouvement à travers l'atmosphère).

b) La chambre de combustion :

La chambre de combustion est un cylindre creux à section constante comportant à l'intérieur une grille d'accroche flammes constituée de trois anneaux de diamètre décroissant et un orifice est disposé au début pour permettre d'introduire une bougie d'allumage .

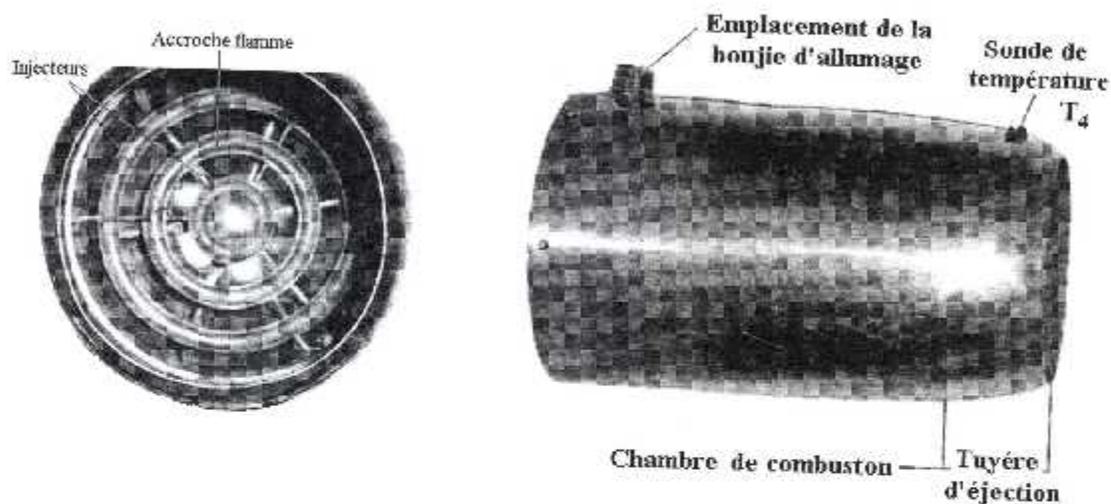


Fig.(6-13) La chambre de combustion vue de l'intérieure et de profile.

Dimension de la chambre de combustion :

☞ Longueur	: 189 mm
☞ Diamètre entrée	: 126 mm
☞ Diamètre sortie	: 126 mm

L'accroche flamme annulaire a pour rôle de créer une zone de régulation autour, permettant ainsi de générer des turbulences afin de produire une zone d'ancrage assurant à la flamme une continuité est un accrochage quand le régime de soufflage est augmenté.

Dans le cas d'absence d'accroche flamme le mélange air carburant sera brûlé plus loin et la flamme sera soufflée vers l'extérieur du tube.

Remarque :

La longueur de la chambre de combustion est obtenue, selon une bonne " règle empirique " , en multipliant par trois le diamètre de l'entrée d'air.

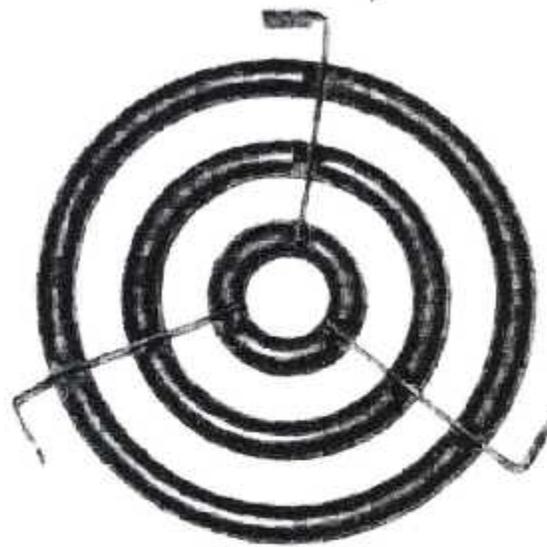


Fig.(6-14) L'accroches flammes.

c) La tuyère d'éjection :

La tuyère d'éjection du statoréacteur est une conduite convergente d'une section de sortie supérieure à celle de l'entrée d'air. Elle nous permet de réaliser la détente du gaz et l'accélération des gaz d'éjections.

Comme le statoréacteur est destiné à des fins didactiques la poussée produite ne sera pas d'une grande importance, de même les performances seront médiocres.

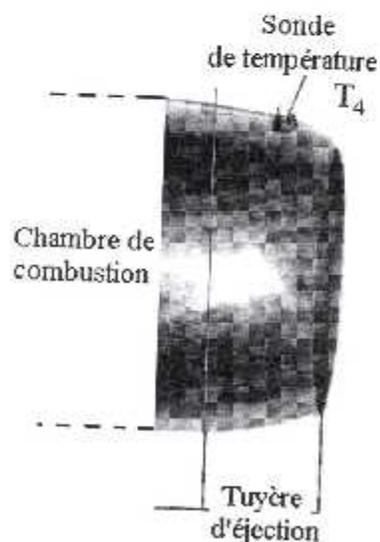


Fig.(6-15) La tuyère d'éjection

La tuyère d'éjection est équipée d'une sonde de température statique de la chambre de combustion.

Dimension de la tuyère d'éjection :

∅ Longueur	: 17 mm
∅ Diamètre entrée	: 126 mm
∅ Diamètre sortie	: 99 mm

d) Mode de fonctionnement :

L'air soufflé du ventilateur est dirigé directement dans l'axe du statoréacteur, ou il sera admis à l'entrée d'air pour être mélangé au carburant (propane) avec un certain rapport air/carburant appelé dosage.

Ce dernier à un débit donné du gaz on doit ajuster le soufflage d'aire pour attendre un dosage stœchiométrique pour assurer une combustion complète et rentré dans les limites d'inflammabilité du gaz.

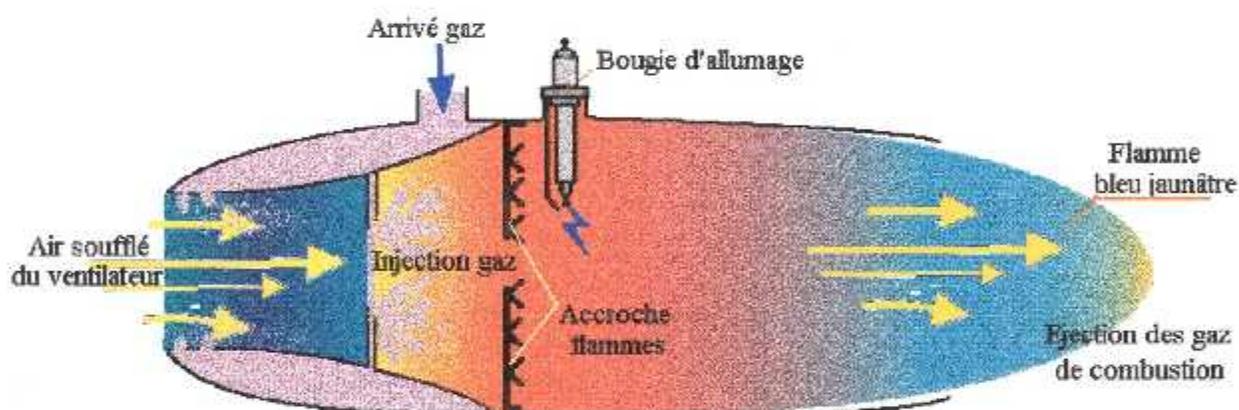


Fig.(6-16) Mode de fonctionnement du statoréacteur subsonique.

Le mélange air/gaz est allumé par une bougie d'allumage électrique qui déclenche le processus de combustion .

L'augmentation de la température nous permet de récupérer de l'énergie dans la tuyère pour éjecter les gaz vers la sortie avec une vitesse supérieur à celle de l'entrée.

5. Le pulsoréacteur :

Le pulsoréacteur est une machine à réaction pulsatoire assuré par un mouvement d'air oscillatoire obtenu par un moyen aérodynamique au niveau de l'entrée d'air remplaçant les valves élastiques d'obturation d'air. Il se subdivise en trois

parties essentielles ; l'entrée d'air, la chambre de combustion et une longue tuyère d'éjection ou de détente.

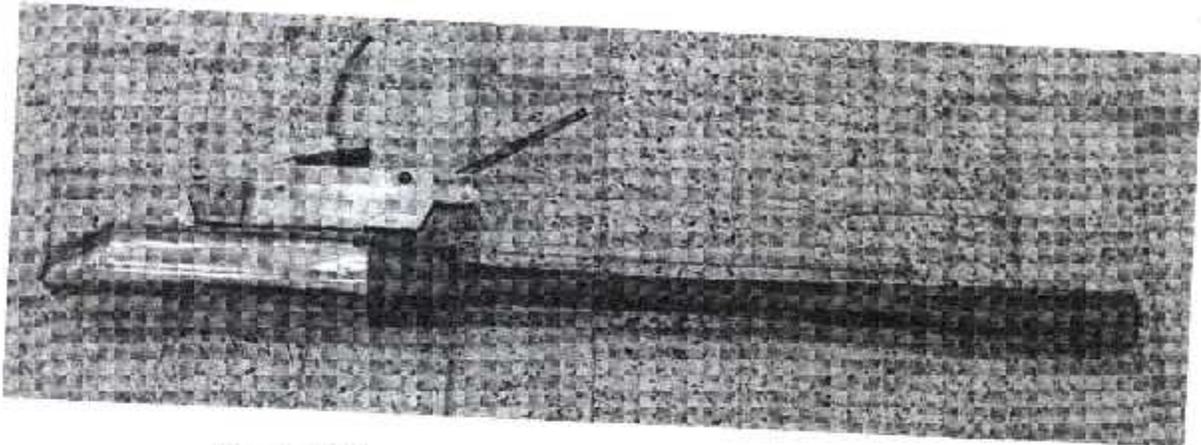


Fig.(6-17) Le pulsoréacteur a valves aérodynamiques.

Comme pour le statoréacteur le pulsoréacteur à sa propre plaque d'identification :



Fig.(6-18) Identification du pulsoréacteur .

Le corps du pulsoréacteur utilisé se compose de quatre parties distinctes assemblées entre elles par boulonneries est qui sont :

- Une entrée d'air à valves aérodynamique,
- Un manche de raccordement + une bride,
- Une rompe d'injecteurs a gaz,
- Une chambre de combustion + tuyère d'éjection.

a) L'entrée d'air :

Différent des entrées d'air subsonique rencontrées sur les pulsoréacteurs classiques à valves D'obturations, l'entrée aérodynamique de ce pulsoréacteur est de section rectangulaire convergente présentant un dispositif qui assure la création d'une onde pulsatoire dans le mouvement de l'air qui représente l'idée de base du principe de fonctionnement d'un pulsoréacteur.

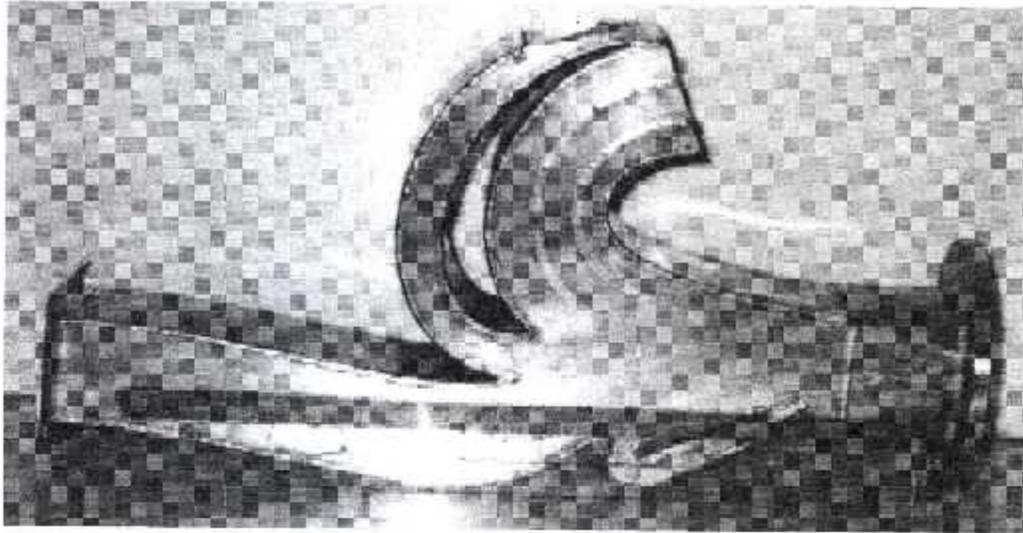


Fig.(6-19) Entrée d'air à valves aérodynamiques .

En effet, La présente entrée d'air dispose d'une sorte de cavitation destinées à générer des palpitations durant le mouvement d'accélération de l'air . Ce dernier permet de contourner une partie de l'écoulement durant la phase de blocage vers une déviation que rejette l'air bloqué vers l'arrière du pulsoréacteur .

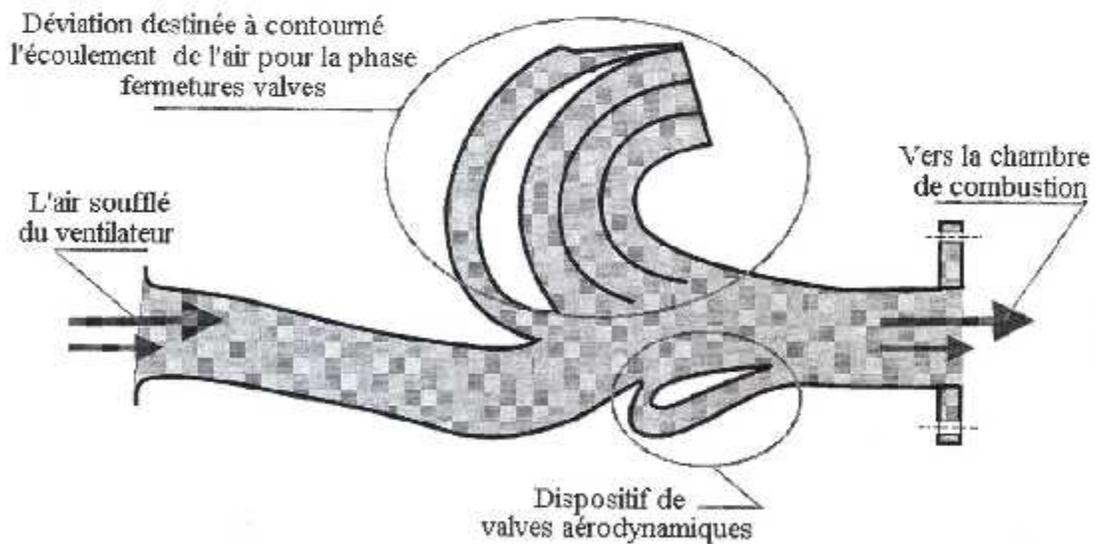


Fig.(6-20) Vue de coupe de l'entrée d'air à valves aérodynamiques .

Les trois schémas suivants représentent le mode de fonctionnement des valves aérodynamiques suivant les différentes phases du cycle de fonctionnement du pulsoréacteur.

- Admission et compression :

Pendant la phase d'admission, l'air soufflé du ventilateur entre dans l'entrée d'air directement vers la chambre de combustion en passant par la partie divergente de l'entrée d'air l'air se trouve ralenti (V diminue) et comprimé (P augmente).

La dépression provoquée par l'écoulement de l'air à travers l'entrée d'air entraîne une aspiration d'air au niveau de la déviation.

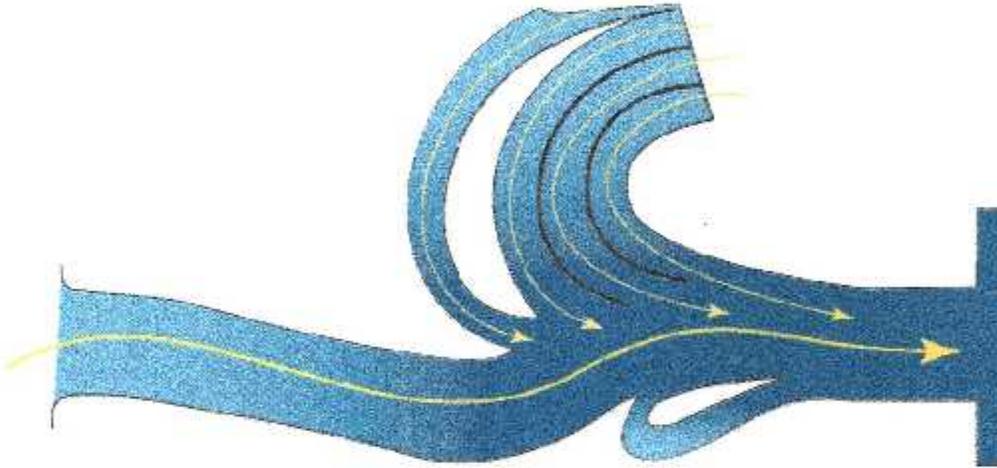


Fig (6-21) La phase d'admission .

- Allumage et combustion :

Une fois que l'air est admis à la chambre de combustion, du carburant (gaz) est injecté et brûlé instantanément provoquant ainsi une augmentation de chaleur et de pression brusque.

La détente et l'éjection des gaz de combustion s'effectue dans les deux sens, à ce moment les valves aérodynamiques vont créer des obstacles sous formes d'ondes de choc provoquant ainsi des palpitations dans le mouvement de l'air empêchant ainsi le passage des gaz de combustion dans le sens inverse.

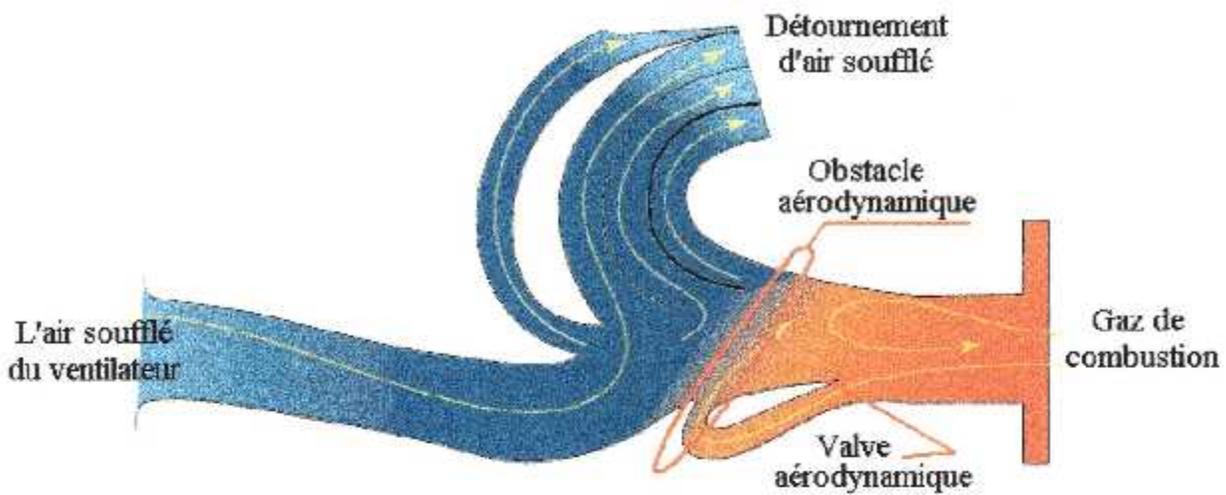


Fig.(6-22) La phase d'allumage est combustion .

- Réadmission :

Après la détente des gaz dans la tuyère d'éjection une dépression est créée à l'intérieur de la chambre de combustion permettant ainsi l'aspiration de l'air pour un nouveau cycle de fonctionnement .

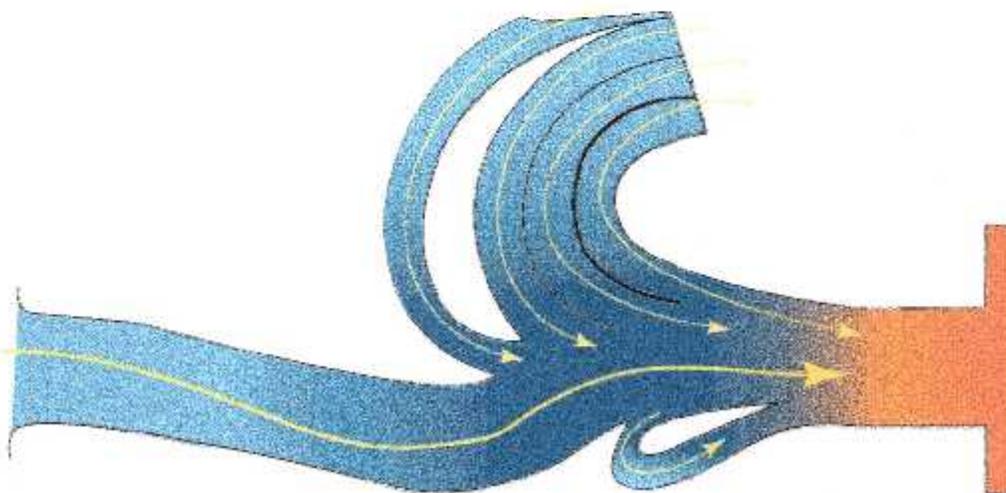


Fig.(6-23) La phase de réadmission .

b) Le manche de raccordement :

Le manche de raccordement est un cylindre creux en acier qui assure le raccordement de l'entrée d'air à la rampe d'injecteurs comportant à l'intérieur un tourbillonneur qui se trouve freiné par une bride frein .

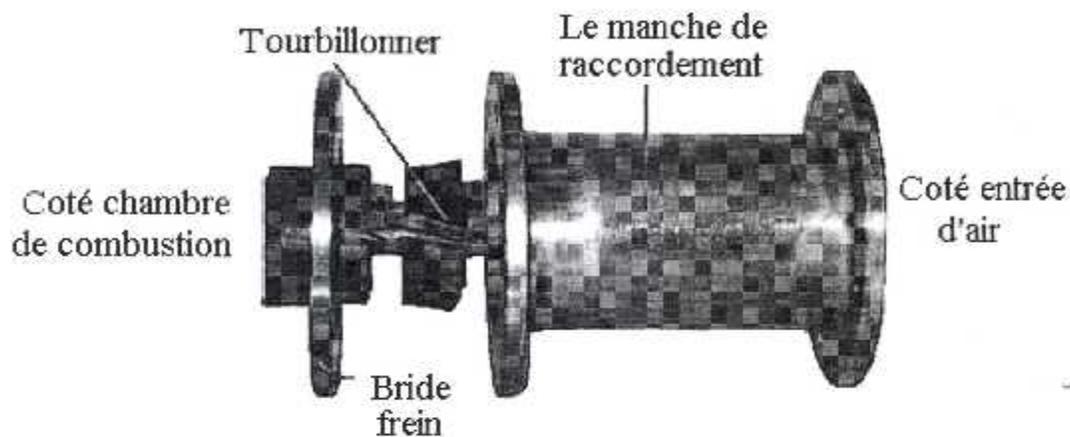


Fig.(6-24) La rallonge.

Le tourbillonneur a pour rôle de faire tourbillonner le mouvement de l'air provenant de l'entrée grâce à ses aubes métalliques. Le mouvement hélicoïdale de l'air permet d'avoir une meilleure dilution du mélange air/ gaz dans la chambre de combustion .

Dimensions du manche de raccordement :

∅ Longueur	: 115 mm
∅ Diamètre entrée	: 60 mm
∅ Diamètre sortie	: 60 mm

c) La rampe d'injection :

La rampe d'injection est un collecteur recevant du gaz (butane ou propane) à l'intérieur de sa cavité pour le distribuer ensuite d'une manière uniforme sur les 12 buses d'injecteurs injecteurs de gaz en bronze.

Les injecteurs sont disposés tout autour de l'écoulement de l'air frais en formant un jet convergent , d'autre parts les injecteurs sont disposés d'une manière alternante 6 par 6 d'un diamètre de buse de 0.2mm à 0.4mm assurant un débit faible et un débit fort respectivement.

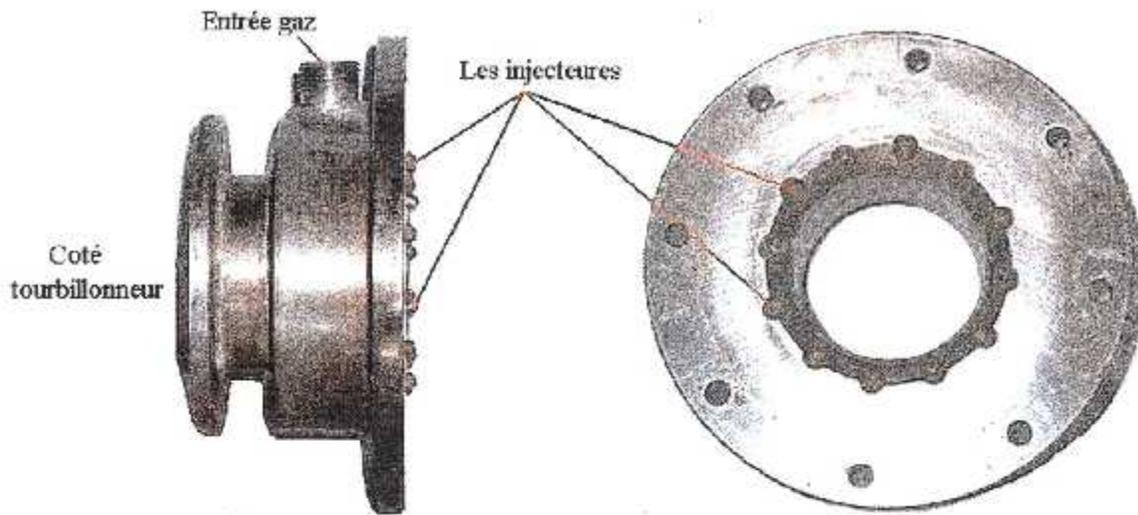


Fig. (6-25) La rompe d'injecteurs.

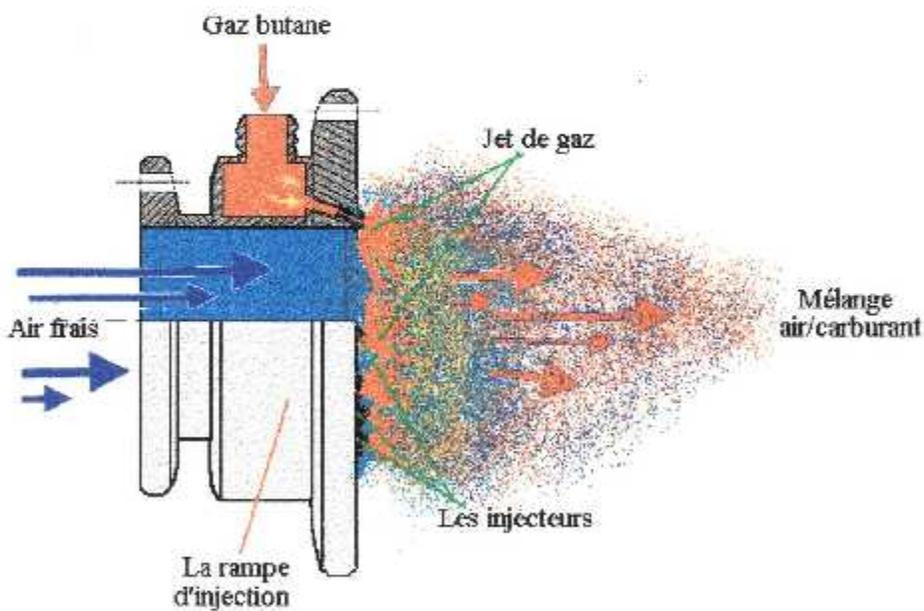


Fig. (6-26) L'injection du gaz.

d) La chambre de combustion :

La chambre de combustion est un tube cylindrique à sections constantes en acier spéciale , elle comporte un orifice dans lequel est introduite une bougie d'allumage électrique , l'orifice est situé sur la partie supérieure de la chambre à l'extrémité du tube .

La chambre de combustion est l'endroit où s'effectue la réaction de combustion, elle permet le raccordement entre la rampe d'injection et la tuyère d'éjection .

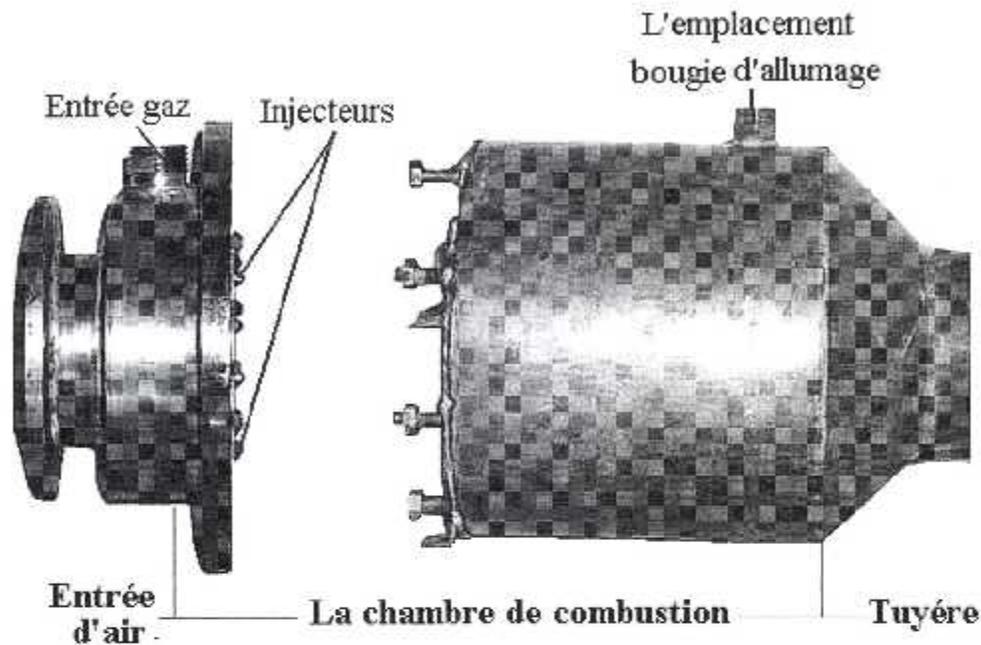


Fig.(6-27) La chambre de combustion .

La chambre de combustion est fabriquée à partir d'un métal réfractaire résistant aux températures trop élevées d'une épaisseur de 3 mm , elle est réalisée par roulage et jointe par soudage à haute efficacité d'étanchéité.

La chambre de combustion présente un léger convergent permettant le raccordement à la tuyère d'une part et pour accélérer les gaz d'une autre part .

Dimension de la chambre de combustion :

∅ Longueur	: 130 mm
∅ Diamètre entrée	: 155 mm
∅ Diamètre sortie	: 155 mm

e) La tuyère d'éjection :

Le canal d'éjection est un convergente divergente, réalisée en tôle réfractaire similaire à celle de la chambre de combustion . Réalisée par roulage puis par soudage étanche, chaque partie est réalisée a part puis l'assemblage total est raccordé au convergent de la chambre de combustion .

En réalité la chambre de combustion et le canal d'éjection forment une seule pièce.

Le canal d'éjection se divise en quatre parties, un convergent, un cylindre, un premier divergent aigu et un deuxième plus large pour donner la forme d'une tuyère convergente divergente dont voici les dimensions.

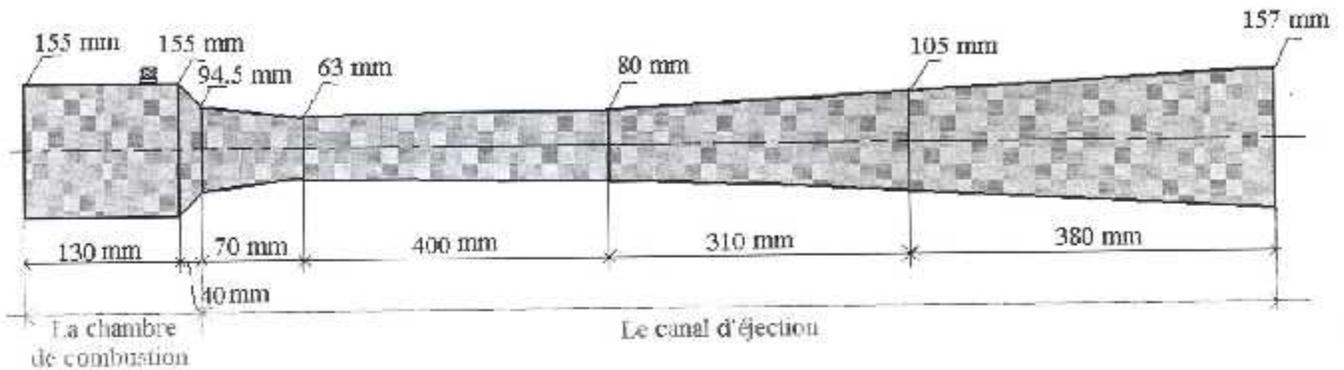


Fig.(6-28) Dimensionnement de la tuyère d'éjection .

La matière recommandée pour la fabrication des deux moteurs est l'acier inoxydable Type 310, 321, ou 347 qui est le plus convenable .

f) **Mode de fonctionnement :**

L'air est soufflé du ventilateur à un débit modéré vers l'axe du pulsoréacteur pour assurer le démarrage. A l'entrée le passage de l'air à travers le dispositif des valves aérodynamiques crée un mouvement oscillatoire du à l'ouverture et fermeture du passage à une fréquence rapide .

Le carburant injecté (gaz) se trouve mélangé avec l'air à la chambre de combustion qui accumule une certaine quantité de gaz. Au déclenchement de l'allumage une forte détonation a lieu forçant ainsi le processus de détente des gaz vers l'extérieur .

De cette manière une dépression est créée au niveau de la chambre de combustion , ce qui ramène une nouvelle quantité d'air pour le prochain cycle .

L'augmentation du débit de soufflage provoque une accélération de la fréquence de pulsation permettant ainsi une création d'une onde sonore similaire à celle du BUZER de la fameuse bombe volante allemande V1 .

6. Le circuit d'alimentation carburant :

Le circuit d'alimentation en carburant est le même pour les deux moteurs, il a pour rôle d'assurer l'alimentation du moteur en gaz pendant toute la durée de fonctionnement sans interruption avec un débit défini par rapport à celui de l'air soufflé.

Le carburant utilisé est du gaz butane/ propane très disponible et facile à manipuler et ne nécessitant pas de pompe pour la distribution et l'alimentation en gaz. Il est délivré dans des bouteilles de 25 kg à une pression de travail 2.5 à 3 bar .

En réalité d'autant plus la pression est grande plus on a du débit et un bon régime de fonctionnement et de meilleures performances . C'est pourquoi il est conseillé d'utiliser une bouteille de propane de 30 kg qui est à usage industrielle et permet de délivrer 4 bar à 6 bar de pression de gaz à la sortie .

La pression de travail nécessaire se situe entre 1,5 et 3 bar, si la pression descend à 1 bar cela veut dire que la bouteille est vide et ne doit pas être utilisée. -

Le système de carburant est composé des éléments suivants :

- ☞ Une bouteille de gaz de butane : (réservoir).
- ☞ Un débit mètre à flotteur : Pour la mesure du débit du gaz allant vers la consommation .
- ☞ Un manomètre de pression : Pour le prélèvement de la pression du gaz à la sortie de bouteille du gaz .
- ☞ Un manette de gaz : servant au réglage du débit et à l'arrêt du gaz vers l'injection fermeture du gaz en cas de fuite ou de problèmes.
- ☞ Pour le raccordement de l'ensemble des éléments précités, nous avons utilisé des tubes en cuivre ($\varnothing 12$ mm) résistants à la chaleur et à la corrosion . les tubes sont recouverts d'une gaine protectrice contre la condensation des vapeurs à la surface.

Le fonctionnement du circuit carburant est très simple car il ne comporte ni pompe ni régulateur ni filtre, le réservoir est la bouteille elle-même équipée d'un robinet de fermeture et d'ouverture.

Le gaz se trouve à l'intérieur de la bouteille sous forme liquide à une pression élevée , après l'ouverture du robinet (bouteille) le gaz passe à travers le débit mètre pour la mesure du débit avant de s'injecter dans la chambre de combustion pour être brûlé

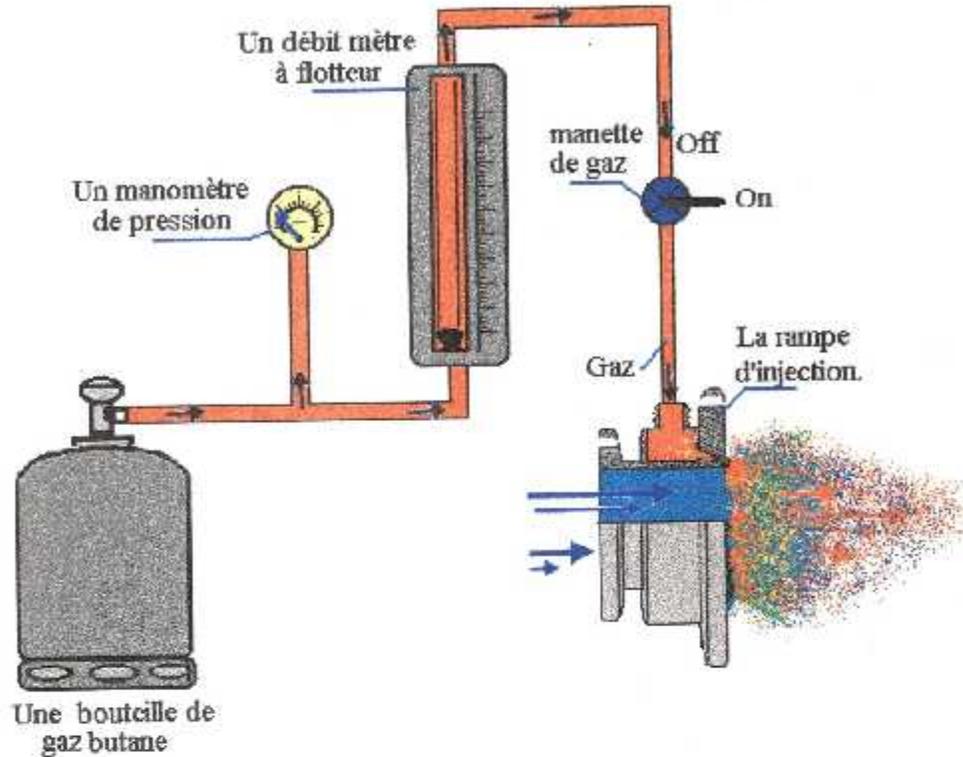


Fig. (6-29) Circuit alimentation carburant (gaz butane).

Pour avoir la pression du de travail nécessaire sortant de la bouteille un manomètre de pression est utilisé entre le débit mètre et la bouteille . Pour avoir la lecture exacte de la pression interne de la bouteille il faut que son robinet soit ouvert complètement , par contre la vanne située au dessus du débitmètre doit être complètement fermée.

Mesures de sécurités :

Il faut prendre toutes les précautions nécessaires avant et pendant les expériences car la moindre fuite peut être fatale, dans se cas aucune fuite de gaz n'est tolérable.

Pour plus de sécurité nous disposant de deux extincteurs a CO_2 en parfaite états de marche . Très important, nous devant veiller à ce que les essais se ne fasse qu'en présence d'un minimum de quatre personne pour bien contrôler le moindre problème:

- Deux personnes pour l'utilisation des deux extincteurs.
- Une troisièmes personnes pour la fermeture de la vanne d'arrivée gaz.
- une quatrième pour ouvrir complètement la trappe du ventilateur pour soufflée la flamme.

7. Le circuit d'allumage électrique :

Le dispositif d'allumage est un appareillage électrique permettant d'assurer l'allumage du mélange air/gaz par la génération d'une étincelle d'une puissance nécessaire pour déclencher le processus de la réaction en chaîne de la combustion .

Le circuit d'alimentation électrique est le même pour les deux moteurs ,il comporte les éléments suivantes :

- ☞ Une bobine électrique 12 v,
- ☞ Une bougie d'allumage,
- ☞ Un transformateur électrique (220 V AC ~ 12 V DC),
- ☞ Une plaque électronique d'allumage commandée.

$$F = 150 \text{ N}$$

$$C_s = 40 \text{ mg/s.N}$$

$$m_0 = 0,87 \text{ mg/s}$$

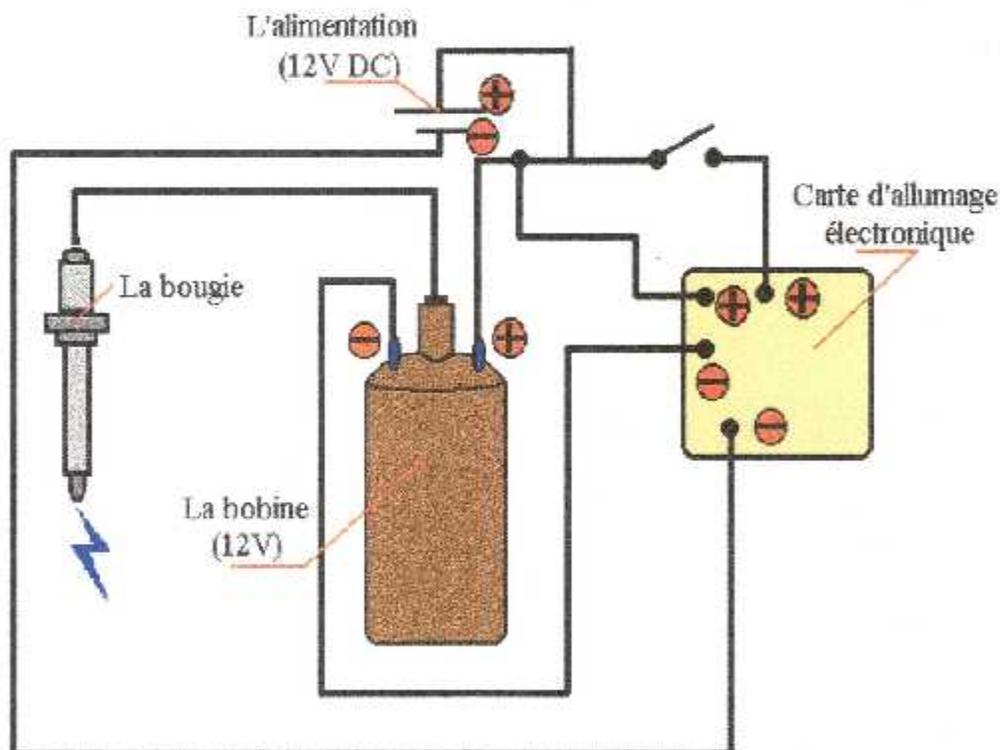


Fig.(6-30) Le circuit d'allumage électrique .

Le circuit de commande est un circuit électronique basé sur un micro processeur NE555, une base de temps qui permet de fournir un signal carré périodique à une certaine fréquence .

Le schémas électrique correspondant est décrit dans le schéma ci dessous :

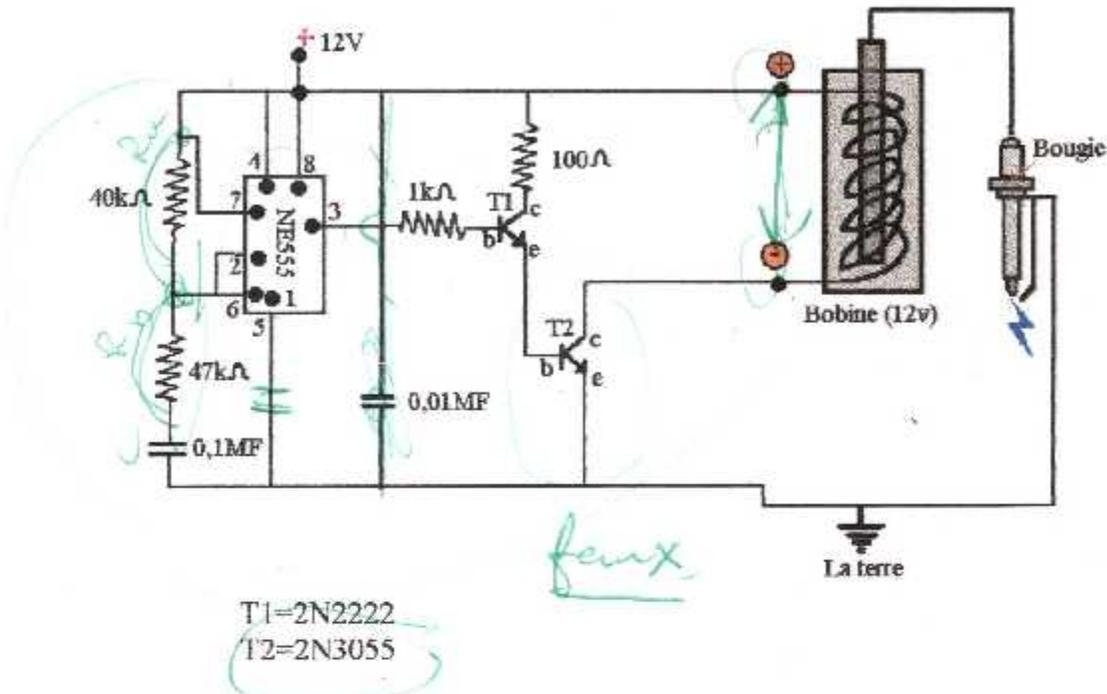


Fig.(6-31) Schéma électronique de la plaque d'allumage.

La plaque électronique d'allumage commandée est conçue dans le but de transformer le signal continue sortant de la bobine en signal carré à la sortie, et ca grâce à l'action répétée d'un condensateur qui se charge est se décharge successivement.

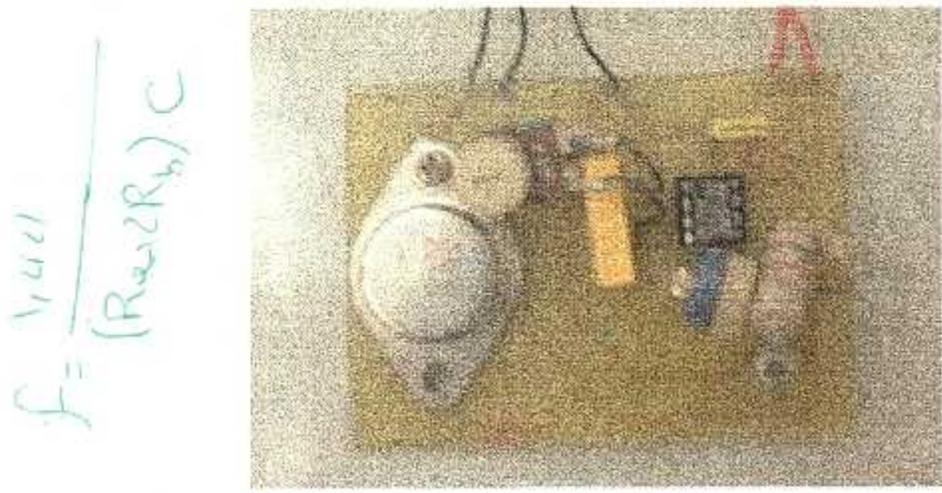


Fig.(6-32) La plaque d'allumage électrique.

La plaque est réaliser puis implantée dans le boîtier électrique elle nous permet de gérer un signal automatique et cyclique d'étincelle , la fréquence de l'étincelle peut être contrôlée à l'aide des résistances variables de 47 kΩ a bon ajustage, nous permet d'avoir une certaine puissance de l'étincelle et une périodicités voulue .

8. Le système de contrôle :

Le système de contrôle nous permet de contrôler tout les paramètres de fonctionnement dans le quelle se déroule l'expérimentation parmi eux la pression et la température .

Dans le banc d'essais les paramètres à contrôler sont :

- ☞ La pression de travail gaz,
- ☞ La température de la chambre de combustion,
- ☞ La pression totale et statique d'éjection ,
- ☞ Les pression statiques correspondantes à l'ouverture de la trappe ,
- ☞ Le débit gaz.

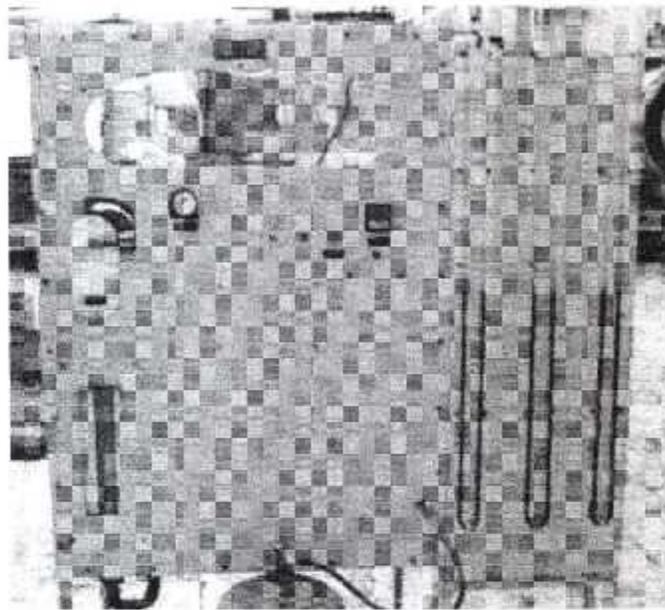


Fig.(6.33) Le panneau de contrôle .

Les mesures de pression , température de la chambre de combustion sont assurer respectivement par une sonde de pression (tube de pitot) en titane pour la pression ,et par un thermocouple de type k pour la mesure de température à la chambre de combustion .

Après les essais de la mise en marche des moteurs la suite du travail expérimentale consiste a effectuer des mesures pour le calcule des performances, pour cela il a fallut équiper le banc d'essais d'instruments de mesures tel que les manomètres et les sondes de température.

Les mesures suivantes sont importantes pour le calcule des performances du moteur et aussi du ventilateur.

NB: Les mesures de pression statique ne peuvent pas être prisent sur le pulsoréacteur avec le dispositif car la pression est oscillatoire .

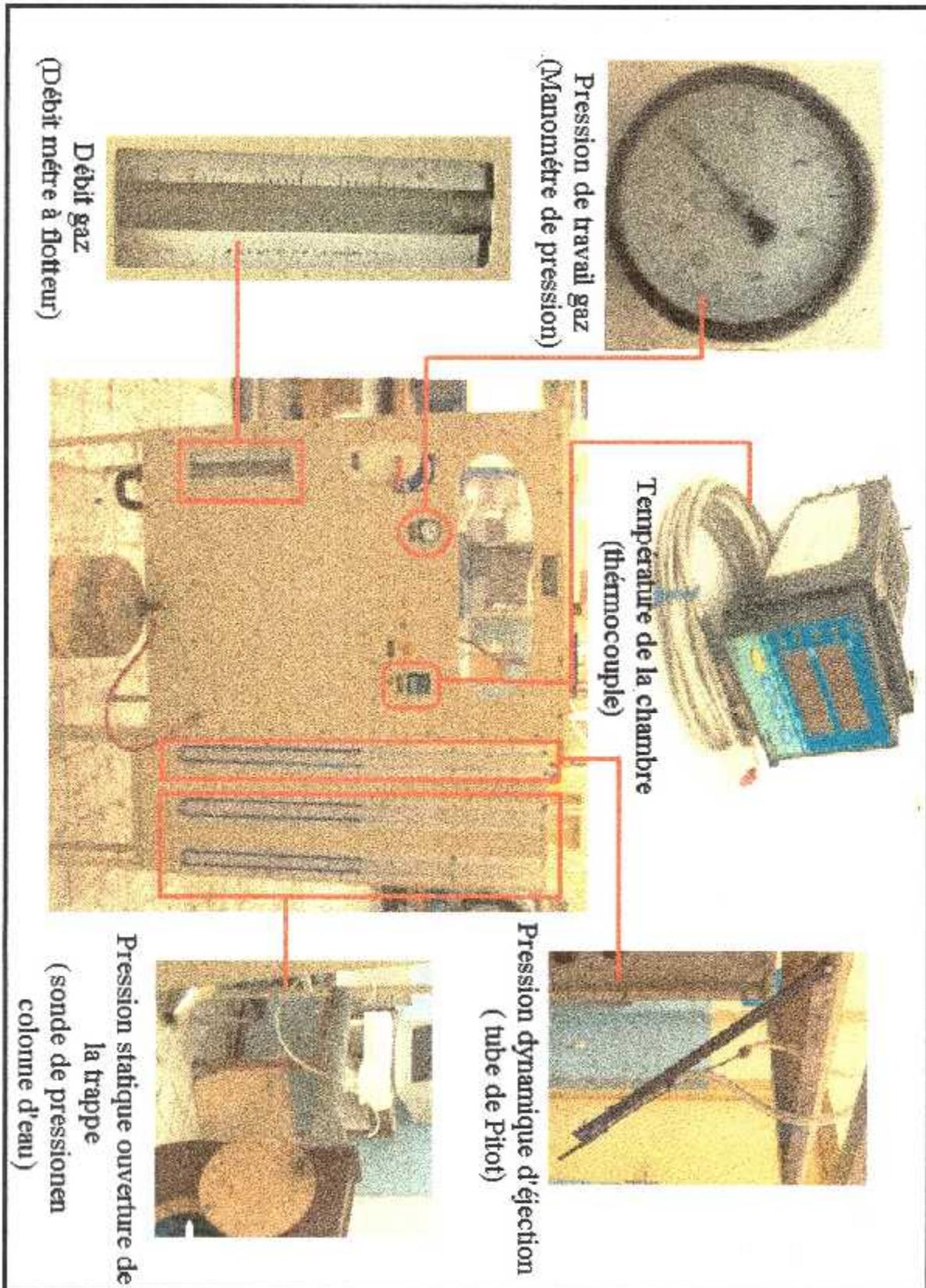


Fig (6-34) Les instrument de mesures .

9. Les mesures de sécurités :**a) A l'arrêt :**

- ☞ S'assurer que l'allumage est off.
- ☞ Ventilateur à l'arrêt.
- ☞ L'extincteur dégoupiller et prêt à l'utilisation.
- ☞ Robinet gaz fermé.
- ☞ Le débit mètre vide .
- ☞ La bouteille est déconnecter du circuit .

b) En fonctionnement :

- ☞ Ne jamais se placer près de la bouche d'aspiration du ventilateur , risque d'entraînement des vent par la roue ventilateur .
- ☞ Attention à la haute tension 380 V pour le démarrage du ventilateur.
- ☞ Ne pas se placer l'axe d'éjection des gaz chaud .
- ☞ Mettre les protection du bruit .
- ☞ Ne pas toucher le fil de la bobine en fonctionnement ni a l'arrêt avant décharge .
- ☞ Ne jamais utiliser une bouteille au dessous de 1,5 bar (pression de travail).
- ☞ Ne pas ouvrir le robinet de la manette des gaz brusquement risque de soufflage de flamme .
- ☞ S'assurer de la bon étanchéité des fuites de gaz avant l'allumage .
- ☞ Ne jamais allumer sans soufflage d'air (ventilateur).

10. Les procédures de démarrage stato et pulso :

- 1) Après vérification de toutes les mises en garde a l'arrêt , connecter la bouteille de gaz.
- 2) Assurer vous pour des éventuelles fuites importantes .
- 3) Installer le moteur à tester et assurer la connexion .
- 4) Ouvrir le robinet de la bouteille gaz. en gardant la manette fermée .
- 5) Assurer vous qu'il y a après un moment une quantité de gaz dans le débit mètre et le manomètre présente 3 bar de pression.
- 6) Régler la trappe du ventilateur a une ouverture réduite enverront 1 cm au max.
- 7) Lancer le moteur du ventilateur.
- 8) Assurer vous que l'air est souffler dans l'axe du moteur et qu'il est au moins loin, enverront 50 cm pour le pulsoréacteur et 80 cm pour le statoréacteur est qu'il sort a faible vitesse.
- 9) Actionner l'allumage et vérifier qu'il y a une étincelle en regardent de loin dans la chambre ou en entendant du bruit .
- 10) Mettez vous hors de portée de la flamme.

- 11) Commencer à ouvrir la manette des gaz progressivement en regardant le manomètre de pression jusqu'à apparition de la flamme , au début elle aura une couleur rouge.
- 12) Ouvrir progressivement la trappe d'aspiration du ventilateur jusqu'à ce que la flamme devient bleu jaunâtre.
- 13) Veiller à ce que la pression ne descende pas au dessous de 1.5 bar .
- 14) A ce moment la flamme est accrochée et la combustion s'accroît, arrêter l'allumage.

NB: Pour plus de perceptions la durée des essais ne dépasse jamais les 10 minutes car on ignore la résistance limite du métal aux températures tropes élevées.

11. Phase d'accélération :

Après avoir accroché la flamme on veut augmenter la puissance en rajoutant du carburant à l'air admis tout en réglant la quantité d'air soufflé au moteur.

Donc parallèlement on fait augmenter la quantité de gaz et d'air de telle manière à ce que la flamme ne change pas de couleur (bleu jaunâtre).

12. Extinction :

Pour l'arrêt du moteur on doit arrêter l'arrivée de gaz de la bouteille et vider le contenu du débitmètre en le consommant jusqu'à extinction flamme.

Augmenter le débit soufflé aux max. (trappe complètement ouverte) pour refroidir le moteur, ouvrir la vanne manette gaz afin de vider complètement le gaz contenu dans le circuit pendant 5 minutes, puis fermer la manette et arrêter le ventilateur.

13. Manipulation :

a) Caractéristiques ventilateur :

But :

Pour avoir les caractéristiques du ventilateur tel que la différence de pressions (ΔP) et le rendement (η) en fonction du débit soufflé, on a mis un dispositif en contre plaquée graduer en différentes sections pour varier l'ouverture de la bouche de soufflage du ventilateur a différentes sections en gardent la trappe d'aspiration complètement ouverte.

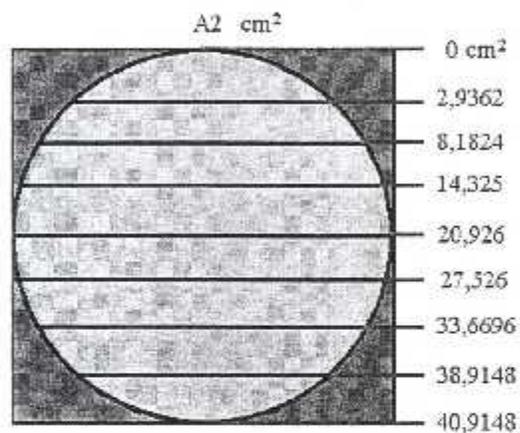


Fig.(6-35) Partage des sections de la bouche de soufflage ventilateur.

En suite en actionnant le ventilateur en auras des lectures sur les deux manomètres de pression statiques, indiquant des hauteurs variables en fonctions des ouverture A_2 correspondantes au sections d'ouverture de la buse de soufflages du ventilateur.

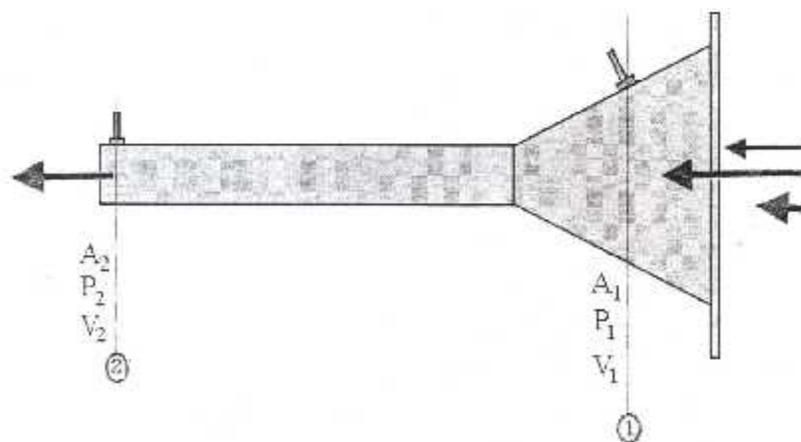


Fig.(6-36) les deux stations de la buse de soufflage.

Ensuite ses valeurs seront traduites en valeurs de pression (pascal) pour être utiliser dans un petit programme (feuille de calcules) pour les calcules des performances et des caractéristiques du ventilateur suivantes :

H1(mm)	H2(mm)	P1 (Pas)	P2 (Pas)	A2 (cm2)	V1 m/s	V2 m/s
650	670	101300	101300	2,9362	0,33855	17,4442
650	655	101300	101300	8,1824	0,47233	8,73325
640	650	101300	101300	14,325	1,17299	12,3883
640	645	101300	101300	20,926	1,2179	8,8051
630	610	101300	101300	27,526	3,2271	17,737
620	520	101300	101300	33,6696	8,90252	40,0023
600	340	101300	101300	38,9148	16,7383	65,0737
580	180	101300	101300	39,9148	21,3341	80,8633
560	36	101300	101300	40,9148	25,0774	92,7284

Fig.(6-37) Les lectures des stations Λ_1 et Λ_2 et leurs paramètres correspondant.

Pour les calcules des performances on a utilisée les principes de la mécanique des fluides ainsi que les relations de Bernoulli cités dans le chapitre ventilateur.

La section $A_2 = 40,83 * 10^{-4} \text{ m}^2$.

La section $A_1 = 151,29 * 10^{-4} \text{ m}^2$.

Les performances du ventilateur suivantes sont aussi obtenue par l'utilisation des équations citée dans le chapitre ventilateur .

Q (m3/s)	Pts (Pas)	DP (pas)	Wu (watt)	Rod
0,005121971	108068,97	6768,9739	34,670486	0,006304
0,007145892	107774,74	6474,7439	46,267822	0,008412
0,017746179	107775,49	6475,4875	114,91516	0,020894
0,018425552	107677,46	6377,4567	117,50816	0,021365
0,048822793	107487,02	6187,0171	302,06745	0,054921
0,134686188	107433,32	6133,3194	826,0734	0,150195
0,253233041	107366,71	6066,7091	1536,2912	0,279326
0,322764067	107283,37	5983,3686	1931,2164	0,35113
0,379396289	107199,23	5899,2257	2238,1443	0,406935

Fig.(6-38) Performances du ventilateur.

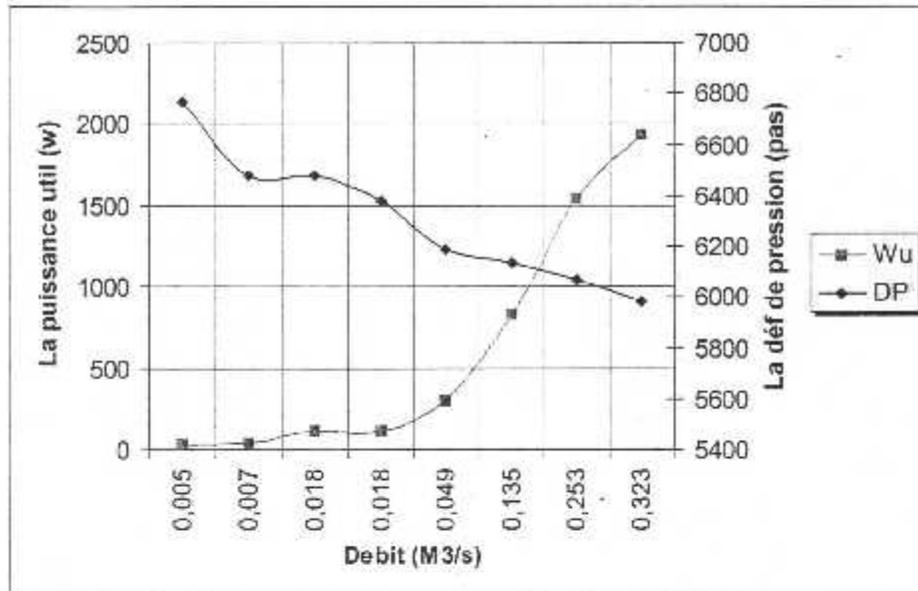


Fig.(6-39) La variation de la différence de pression et de la Puissance en fonction du débit soufflé .

La variation du débit soufflée par le ventilateur est proportionnelle a la puissance utile par contre la différence de pression varie d'une façon inverse au débit .

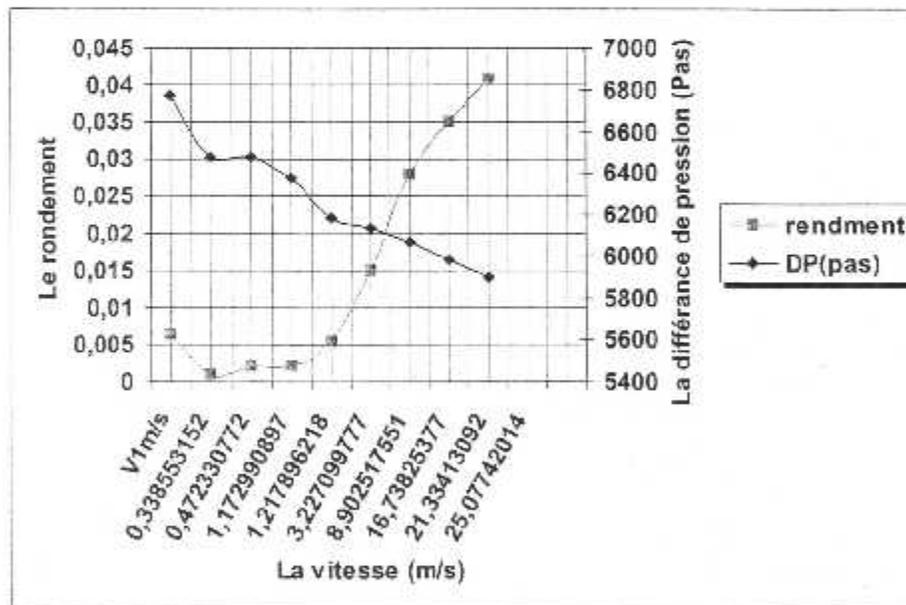


Fig.(6-40) La variation de la différence de pression et du rendement en fonction de la vitesse .

Le rendement varie d'une manière proportionnelle a la vitesse, contrairement a la différence de pression qui varie d'une façon inverse a la vitesse .

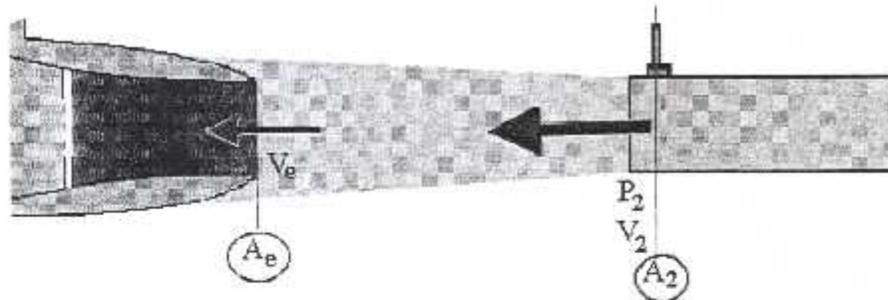
b) Détermination de la vitesse de soufflage entrée moteur stato :

Fig.(6-41) L'écoulement de l'air à l'entrée de statoréacteur .

Supposant que l'écoulement de l'air à l'entrée du statoréacteur se réalise dans un tube de courant directe , qui aura la même vitesse que celle obtenue a la station A_2 .

On peut déterminer la vitesse en effectuant les lecture des hauteurs manométriques pour une ouverture de la trappe donner, car chaque variation de la section d'ouverture d'aspiration correspond à une hauteur manométrique précise .

Les hauteurs manométriques seront traduite en pressions statiques est en vitesses par l'utilisation des équations citées dans le chapitre ventilateur ,et dans les resulta sont présentés dans le tableau suivant :

$H1$ (mm)	$H2$ (mm)	$P1$ (Pas)	$P2$ (pas)	$V1$ m/s	$V2$ m/s	Q (m ³ /s)
-15	0	101153	101300	0,2932	15,1071	0,00444
-5	0	101251	101300	0,47233	8,73325	0,00715
40	-5	101692	101251	2,48829	26,2795	0,03765
110	-6	102379	101241	5,86616	42,411	0,08875
180	-10	103066	101202	9,94659	54,669	0,15048
230	-15	103556	101153	13,9346	62,6135	0,21082
270	-18	103949	101123	17,6165	68,4881	0,26652
350	-20	104734	101104	20,5185	77,7718	0,31042
400	-22	105224	101084	22,5047	83,2153	0,34047
440	-24	105616	101065	24,2221	87,429	0,36646
480	-26	106009	101045	25,9503	91,484	0,3926
500	-30	106205	101006	27,2337	93,8222	0,41202
540	-32	106597	100986	28,9979	97,676	0,43871
560	-36	106794	100947	30,3251	99,9218	0,45879

Fig.(6-42) Détermination des vitesses sortie ventilateur .

L'utilisation de se tableau permet de la traduction de chaque hauteurs manométriques en vitesse de sortie ventilateur V_2 et en débit d'air souffler Q .

La vitesse de sortie ventilateur V_1 est considérer la même que celle de l'entrée statoréacteur V_e .

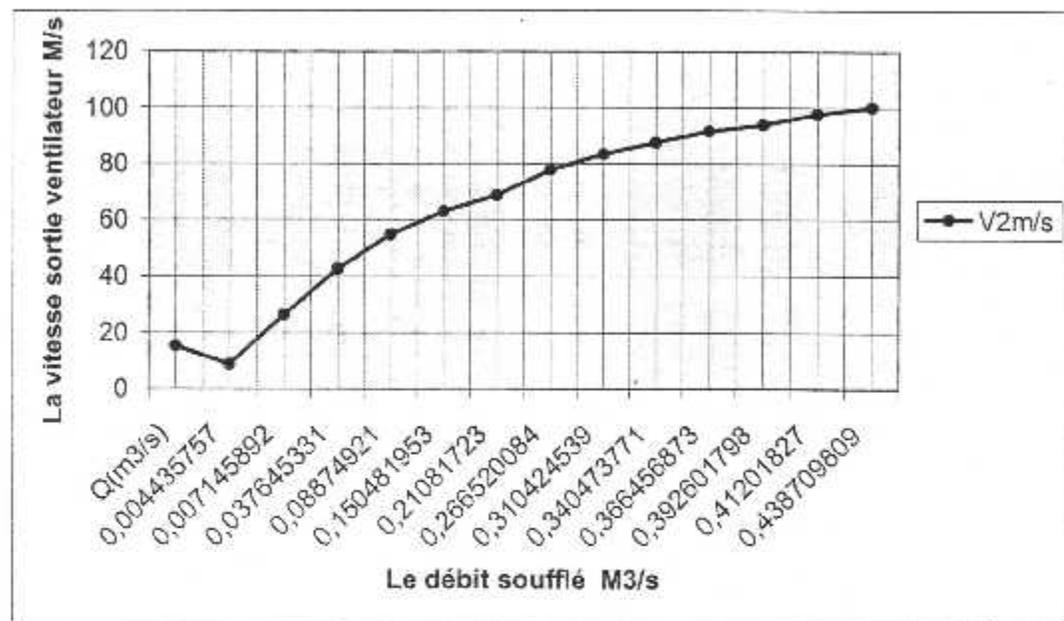


Fig.(6-43) La variation de la vitesse en fonction du débit.

La variation du débit est proportionnelle à la vitesse de sortie ventilateur et à l'ouverture de la trappe d'aspiration.

La vitesse maximale correspondante à l'ouverture complète de la trappe d'aspiration est $V_{2max} = 99,9218 \text{ m/s} = 359,71 \text{ km/h}$ pour un débit d'air de $Q_{max} = 0,45879 \text{ m}^3/\text{s}$.

La vitesse minimale favorable aux démarrages se situe entre $V_2 = 8,73 \text{ m/s}$ et $26,27 \text{ m/s}$ correspondant à un débit faible de $Q = 0,007 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$.

c) Détermination des performances du statoréacteur :

Les performances à déterminer chez le statoréacteur sont la poussée spécifique (F/m), la consommation spécifique (C_s), Le rendement thermodynamique (η_{th}) et le rendement de propulsion (η_p). Pour ce la nous allons se baser sur les mesure établit pour le calcul des différents paramètres en utilisons les équations citées dans le chapitre étude thermodynamique du statoréacteur.

Les mesures effectuer sont la température de la chambre de combustion T_4 la pression des gaz d'éjection P_9 est le débit carburant Q_f .

Les résultats sont obtenus grâce à un petit programme effectuer dans une feuille de calcul Excel et dans voici le résultat :

P_0 (Pas)	T_0 (K°)	A_e (m ²)	A_3 (m ²)	Roe
101300	288,2	0,00302	0,0095	1,22471

Fig.(6-44) les constante utilisées .

$P_0 = 1 \text{ atm} = 101300 \text{ Pas} .$

$A_e = 0.00301907 \text{ m}^2 .$ (Section de l'entrée d'air stato) .

$A_3 = 0.00950832 \text{ m}^2 .$ (section de l'entrée et sortie chambre de combustion .

$R = 287 \text{ j/kg} .$

$\gamma = 1,4 .$

• Paramètres correspondent à la station 0 :

Le calcul des paramètres est effectué pour quatre valeurs de vitesse et de débit choisies dans le tableaux précédent déterminent les vitesse de soufflage entrée motcur stato .

V_e m/s	M_0	T_{t0} K°	P_{t0} pas
77,77	0,22854	291,211	105052
68,48	0,20124	290,534	104201
62,61	0,18399	290,151	103371
42,41	0,12463	289,095	102247

Paramètres correspondent a la station 0
(atmosphérique) .

☞ Pour la détermination de M_2 deux expression sont utilisées :

$$\frac{A_2}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad \text{et} \quad \frac{A_2}{A^*} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{A_1}{A^*}$$

A_1/A^*	A_2/A_e	A_2/A^*
2,58628	3,147763	8,14099
2,94579	3,147763	9,27266
3,20925	3,147763	10,102
4,68629	3,147763	14,7513

Les rapportes de section entrée d'air
Pour la détermination de M_2 .

- Paramètres correspondant à la station 2 :

La station 2 représente la sortie de l'entrée d'air et l'entrée de la chambre de combustion . Les paramètres correspondant à cette station sont mentionnés dans le tableau suivant :

$M2$	$T2/Tt2$	$P2/Pt2$	$Tt2 \text{ } k^\circ$	$T2 \text{ } k^\circ$	$V2 \text{ m/s}$
0,07	0,99902	0,99658	291,211	290,925	23,9445
0,06	0,99928	0,99748	290,534	290,325	20,5
0,05	0,9995	0,99825	290,151	290,006	17,0721
0,05	0,9995	0,99825	289,095	288,951	17,041

Paramètres correspondant a la station 2
Sortie entrée d'air .

- Paramètres correspondant à la station 4 :

La station 4 correspond a la sortie chambre de combustion qui la même station entrée canal d'éjection .

Les paramètres correspondant a cette station sont la température statique T_4 qui est mesurée directement par la sonde de température et la température total T_{t4} qui est calculée grâce a l'équation suivante .

$$T_{t4} = T_4 + \frac{1}{2} \frac{V_2^2}{C_p}$$

avec :

$$C_p = 1,015 \text{ kJ/kg .}$$

Le troisième paramètre est le dosage f du carburant sur la masse de l'air(comburant) et dans voici les résultats :

$Tt4 \text{ } k^\circ$	f
1100	0,01899
1000	0,01666
700	0,00962
377	0,00206

Paramètres correspondant a la station 4
(chambre de combustion)

• Paramètres correspondent à la station 9 :

La station 9 correspond a la sortie du canal d'éjection. La pression P_9 est obtenue directement par la sonde de pression (tube de Pitot) les autres paramètres a déterminés sont calculés:

Tt_9 k°	Pt_9 Pas	P_9 Pas	V_9 m/s
1100	105052	101300	145,396
1000	104201	101300	122,198
700	103371	101300	86,6092
377	102247	101300	43,1202

Paramètres correspondent à la station 9

• Les performances du statoréacteur :

Les différentes performances du statoréacteur à calculées sont dans le tableau suivant :

F/m (N/kg/s)	C_s (kg/s/N)	W_u (N)	R_{oth}	R_{op}	R_{og}
67,626374	0,0002808	2414,467	0,012651	0,511437	0,00647
53,718335	0,0003101	1500,167	0,010177	0,506972	0,00516
23,999244	0,000401	681,4035	0,008752	0,416825	0,00365
0,7101702	0,0029065	100,4434	0,00888	0,038393	0,00034

Les performances du statoréacteur .

d) Interprétation des résultats :

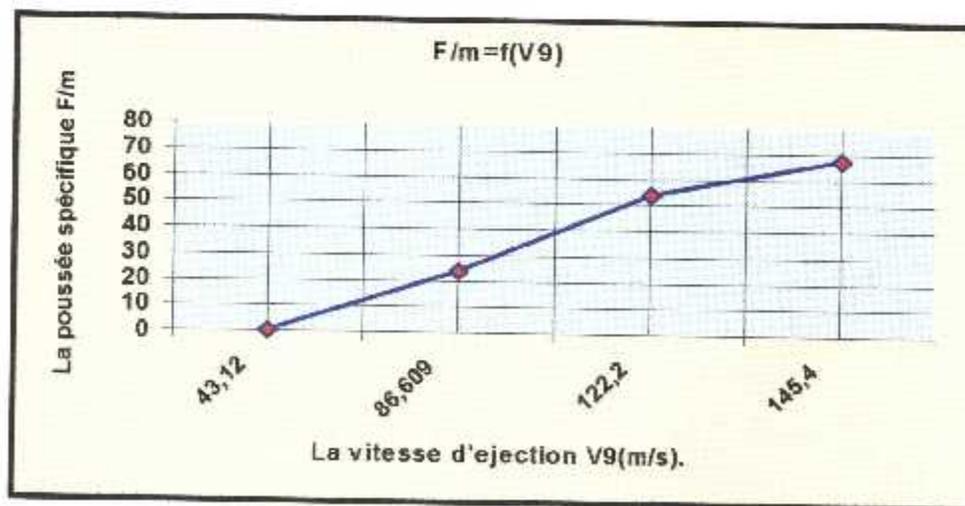


Fig.(6-45)La variation de poussée spécifique en fonction de la vitesse d'éjection V_9 .

La fig (6-45) représente la variation de la poussée spécifique qui est définie étant a poussée nette sur le débit , et qui varie d'une façon inverse a la vitesse d'éjection V_9 .

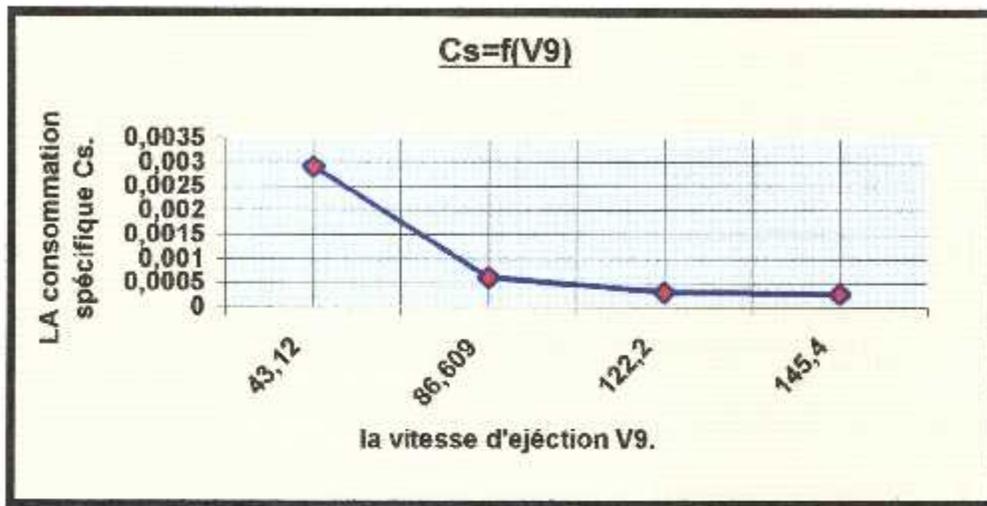


Fig.(6-46)La variation de la consommation spécifique en fonction de la vitesse d'éjection V_9 .

La variation de la consommation spécifique est proportionnelle a la vitesse d'éjection V_9 et au débit , les grandeur atteinte par la consommation spécifique prouvent que le statoréacteur est un moteur avare .

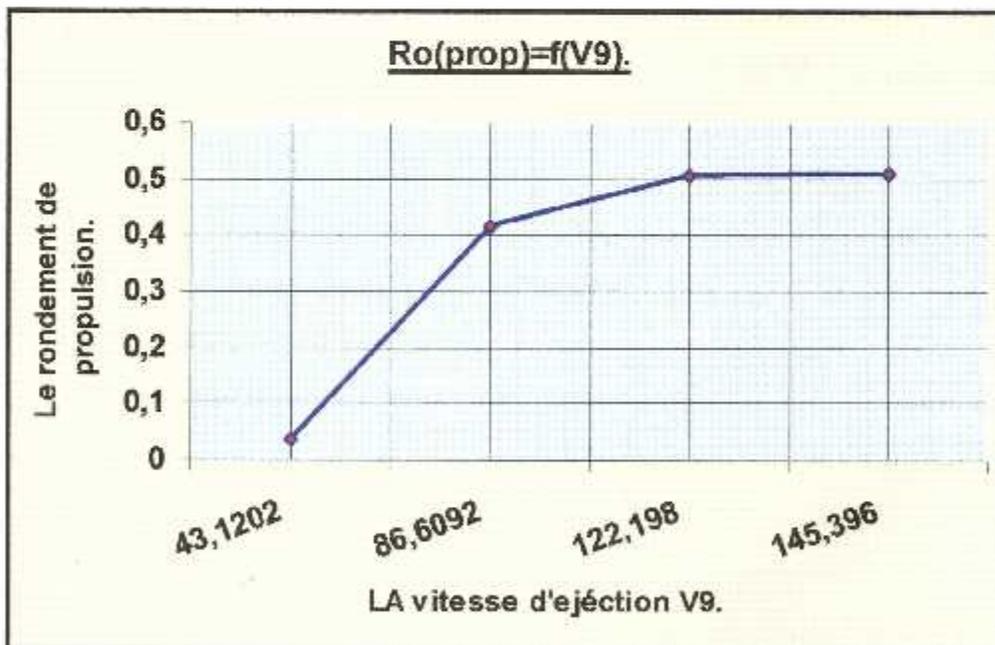


Fig.(6-47)La variation du rondement de propulsion en fonction de la vitesse d'éjection V_9 .
Le rendement de propulsion est proportionnel à la vitesse d'éjection V_9 .

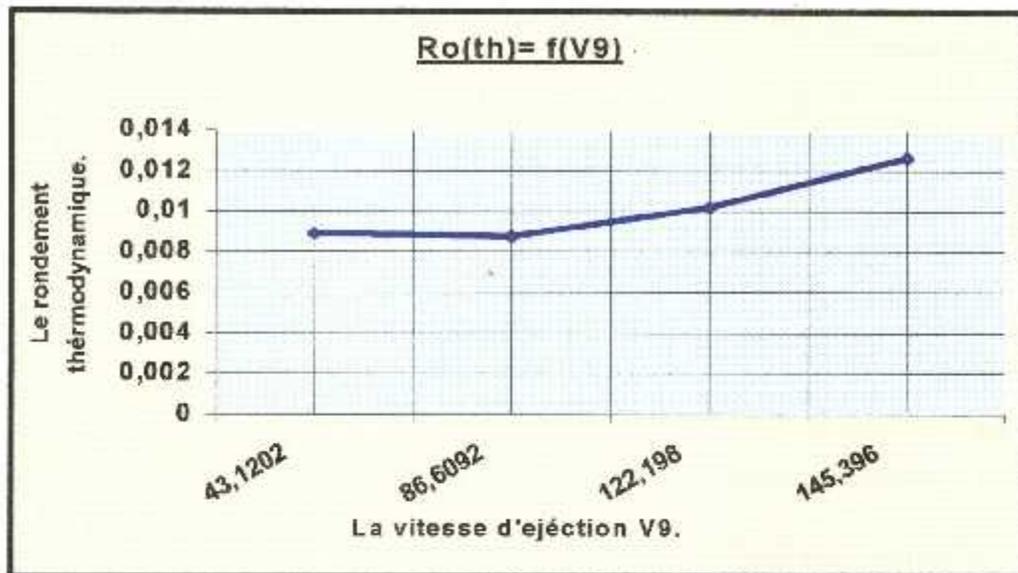


Fig. (6-48) La variation du rendement thermodynamique en fonction de la vitesse d'éjection V_9 .

Même chose pour le rendement thermodynamique qui est proportionnel à la vitesse d'éjection V_9 et au débit.

Conclusion

CONCLUSION

Cette étude nous a permis de maîtriser et de comprendre le fonctionnement de deux types de moteurs, le statoréacteur et le pulsoréacteur d'une part. D'autre parts, la réalisation du banc d'essais nous a servie de moyen technique pour enrichir nos connaissances pratiques.

Nous espérons que ce banc d'essais va apporter une aide fructueuse dans la compréhension du principe de fonctionnement pour nos futurs techniciens supérieurs et au moins de pouvoir réaliser des applications à caractères pédagogiques.

Pour les suggestion, nous proposons l'examen de la possibilité de la réalisation d'une alimentation en propane afin d'augmenter les performances ainsi que l'amélioration de l'application en apportant des systèmes de mesures de vitesse, de poussée, de pression totale et de température totale .

Liste des symboles :

- P : Pression statique / (Pas).
- P_t : Pression total / (Pas).
- P_d : Pression dynamique / (Pas) .
- T : Température statique / (k).
- T_t : température total / (k).
- M : Nombre de Mach .
- V : Vitesse / (m/s).
- a : Vitesse du son (m/s).
- m_a : Débit d'air / (kg/s).
- m_f : Débit carburant / (kg/s).
- C_p : Chaleur spécifique sous pression constante / (j/kg.K°) .
- C_v : Chaleur spécifique sous volume constant / (j/kg.K°) .
- I_s : Impulsion spécifique .
- V_e : Vitesse d'éjection / (m/s) .
- V_g : vitesse d'éjection / (m/s) .
- h : L'enthalpie / (j/kg).
- ρ : Masse volumique / (kg/m³) .
- γ : Coefficient de détente isentropique .
- R : Constante des gaz .
- A : section de passage dans un repère Absolue / (m²) .
- W : Vitesse relative / (rad /s) .
- U : Vitesse de rotation / (tr/mn) .
- f : La richesse ou le dosage / ((kg_{car}/s)/(kg_{air}/s)).
- F : Poussée / (N) .
- F_s : La poussée spécifique / (n/(kg/s)) .
- C_s : la consommation spécifique / ((kg/s)/n) .
- W_u : La puissance util / (N) .
- Q_{th} : La puissance calorifique / (N) .
- η_{pr} : Le rendement de propulsion .
- η_p : Le rendement de propulsion .
- η_s : Le rendement global .

Bibliographie :

- P.CARRIERE et R.MARGUET. " AERODYNAMIQUE INTERNE DES REACTEURS " - troisième partie " STATOREACTEUR ".
De l'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace -1975-
- Jack D. MATTINGLY. " ELEMENTS OF GAZ TURBINE PROPULSION " -
McGRAW-Hill, INC . Edition -1997-
- P.CARRIERE " AERODYNAMIQUE INTERNE DES TURBOREACTEURS "
- " TECHNOLOGIE DES TURBOREACTEURS " . ENAC - IAB .
- THCHNIQUE DE L'INGENIEUR . Vol II, Vol III - IAB .
- G.PORCHET : " CHAUFFAGE ET CLIMATISATION " - Edition : TCP
- "JET PROPULSION - AIR TECHNICAL SERVICE COMMAND " .
Daniel Guggenheim Aeronautical Laboratory .
CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGIE , PASADENA. - 1946 -
- MR BENTRADE HOCINE "COURS ET TD - DE PROPULSION ET DE TECHNOLOGIES DES MOTEURS " / 2001-2002.
- SITES WEB :
 - http://www.Home_made_jet_&_pulsejet_engine.com.
 - <http://www.Pulse-jet.com>.
 - http://www.hlastwavejet_com-pulsejet.com.
 - <http://www.Geocities.com/area51/rampart/9722/welcom.htm>.
 - <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12>.
 - <http://www.dynopower.freemove.co.uk>.
 - <http://www.aardvark.co.nz/pjet>.