

Cours Thermopropulsion Chambre de Combustion.



Rôle de la chambre de combustion.

- ✓ Augmenter l'énergie totale de l'air par combustion.
- ✓ Assurer la transformation de l'énergie chimique contenue dans le mélange air-carburant en énergie thermique.
- ✓ Refroidir les gaz brûlés avant la turbine.

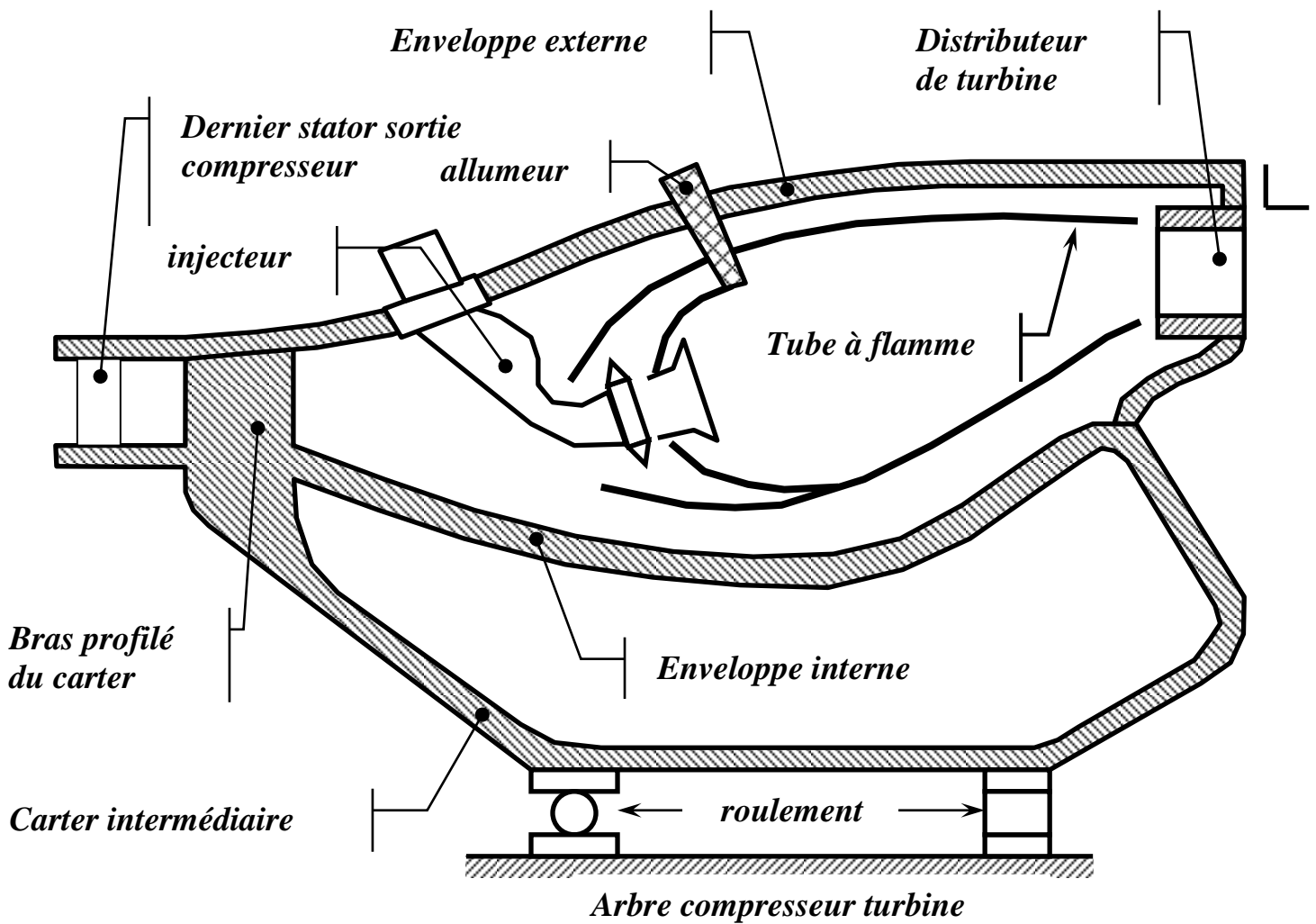
Problèmes posés par la combustion.

La chambre de combustion est très difficile à concevoir et à réaliser car les modélisations numériques des phénomènes aérodynamiques et thermiques qui prennent place dans la chambre sont très délicates à mettre en oeuvre.

Contraintes de réalisation de la chambre de combustion.

- ✓ Diminuer les polluants en sortie de chambre.
- ✓ Réduire les émissions de carbone (fumées).
- ✓ Diminuer le poids et l'encombrement de la chambre.
- ✓ Augmenter la résistance aux contraintes thermiques de la chambre et diminuer les pertes de charges.
- ✓ Assurer un bon rendement et une bonne stabilité de la combustion.
- ✓ Obtenir une combustion quel que soit l'altitude et le régime de fonctionnement du moteur.
- ✓ Diminuer la température des gaz brûlés.

Description de la chambre de combustion.



Composition.

- **Carter intermédiaire** : participe à la rigidité du moteur et de la chambre. Assure le support des enveloppes de la chambre et du distributeur de turbine.
- **Roulements** : assurent la rotation de l'ensemble tournant turbine compresseur.
- **Une enveloppe externe et une enveloppe interne.**
- **Un ou plusieurs tube à flamme.**
- **Système d'injection carburant et un système de mélange air / carburant.**
- **Dispositif d'allumage qui assure l'établissement de la flamme au démarrage du turboréacteur.**

Etude de la combustion dans une turbomachine.

Hypothèse : la combustion se fait à pression constante.

Remarque : Dans la réalité la complexité de la structure interne d'une chambre est responsable de perte de charge qui provoque une diminution de la pression de l'ordre de quelque %.

✓ **Stabilité de la flamme dans la chambre.**

Pour une bonne stabilité de la flamme, il faut :

- ❑ Assurer une alimentation régulière en air : débit d'air constant indépendant des conditions de vol (compresseur).
- ❑ Assurer une alimentation régulière en carburant : injecteurs adaptés.
- ❑ Eviter dans la mesure du possible les turbulences de l'écoulement.

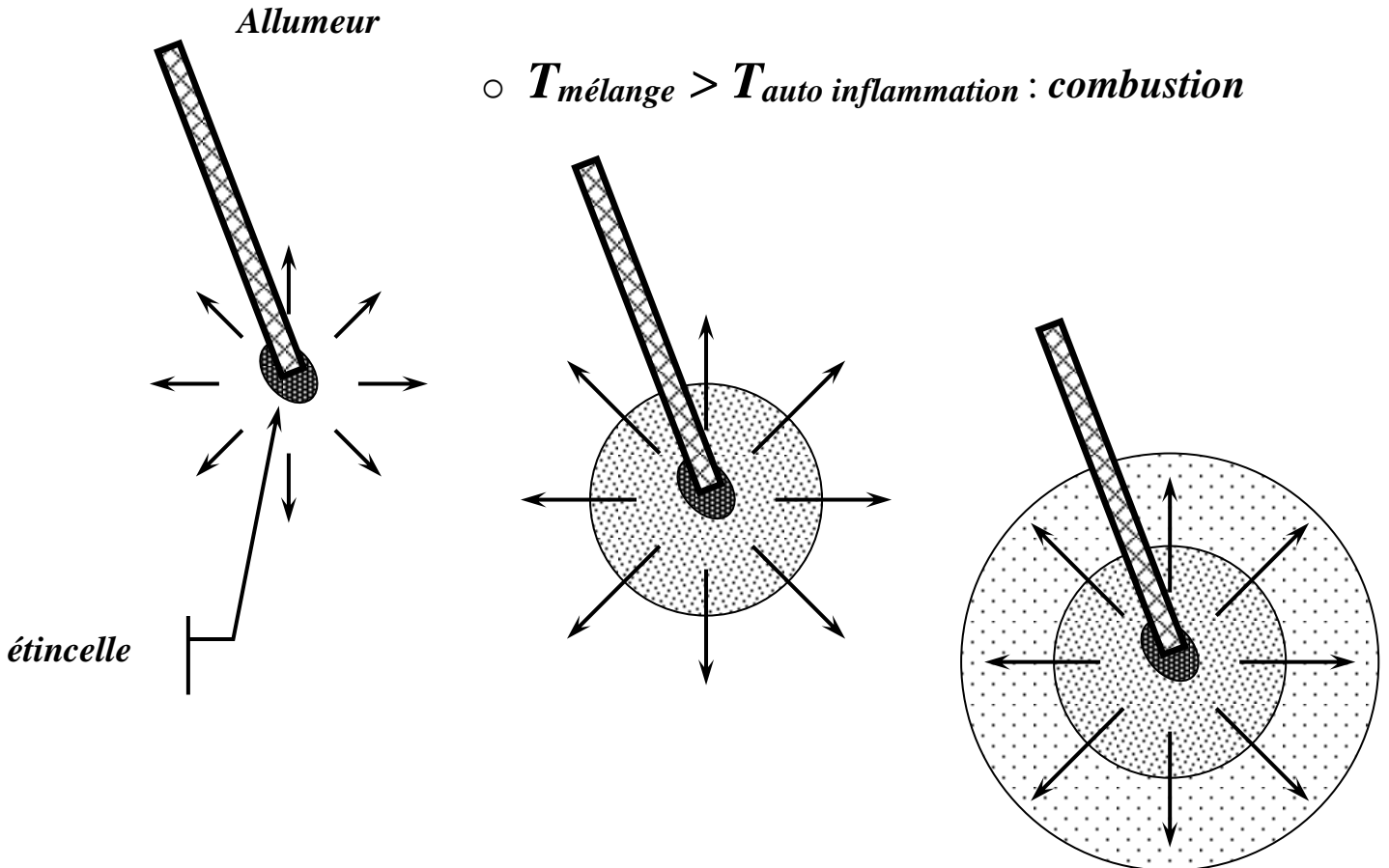
Etude de la combustion dans une turbomachine.

Propagation de la flamme

Allumage :

Pour l'allumage du mélange, il faut augmenter la température de celui-ci (allumeur) pour l'amener à dépasser sa température d'auto inflammation (point éclair).

- la zone de mélange est réchauffée par rayonnement.



- La chaleur se propage par rayonnement. La température des couches voisines augmente et la flamme se propage de proche en proche.

Lorsque la combustion est établie, elle s'auto entretien, si l'alimentation en air et carburant est régulière.

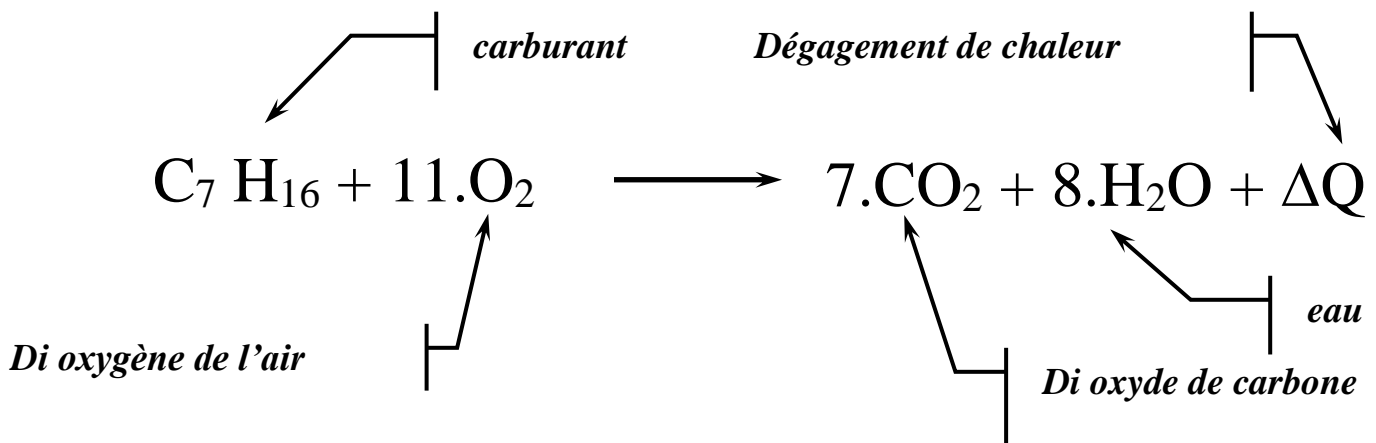
La bougie n'est utilisée qu'au démarrage.

Etude de la combustion dans une turbomachine.

Dosage air carburant.

Composition chimique des carburants de réacteur : $C_7 H_{16}$.

Equation chimique de la combustion.



Masse molaire de l'oxygène: 16 grammes

Masse molaire de l'hydrogène : 1 gramme

Masse molaire du carbone : 12 grammes

Un volume d'air contient environ 23,5 % d'oxygène.

Rapport massique du mélange air carburant :

$$dosage_{théorique} = \frac{masse.carburant}{masse.air} = \frac{100}{1500} = \frac{1}{15}$$

On appelle richesse du mélange le rapport r :

$$r = \frac{dosage_{réel}}{dosage_{théorique}}$$

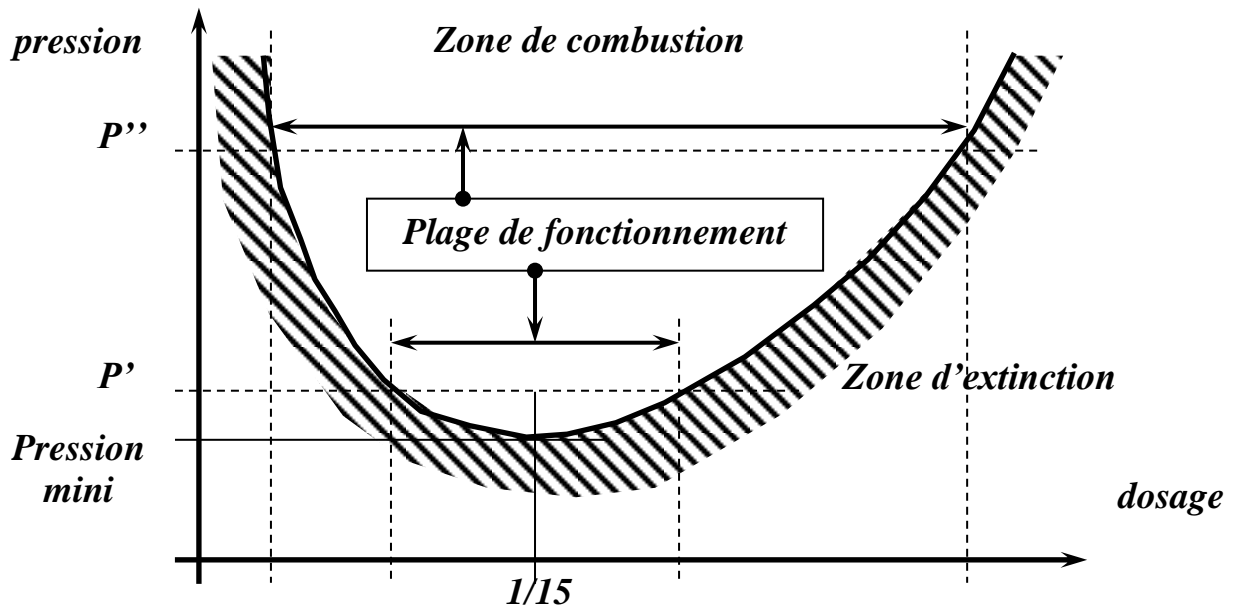
Si $r < 1$ alors $d_{réel} < d_{théorique}$: mélange est pauvre.

Si $r > 1$ alors $d_{réel} > d_{théorique}$: mélange est riche.

Etude de la combustion dans une turbomachine.

Température et pression d'inflammation.

On définit le domaine de stabilité de la flamme en fonction de la pression et du dosage en faisant varier ces deux paramètres jusqu'à provoquer l'extinction.



- ✓ La plage de fonctionnement augmente avec la pression et la température.

Dans la pratique la marge de fonctionnement dépend :

- Du dosage air carburant,
- Du régime réacteur et de l'altitude.

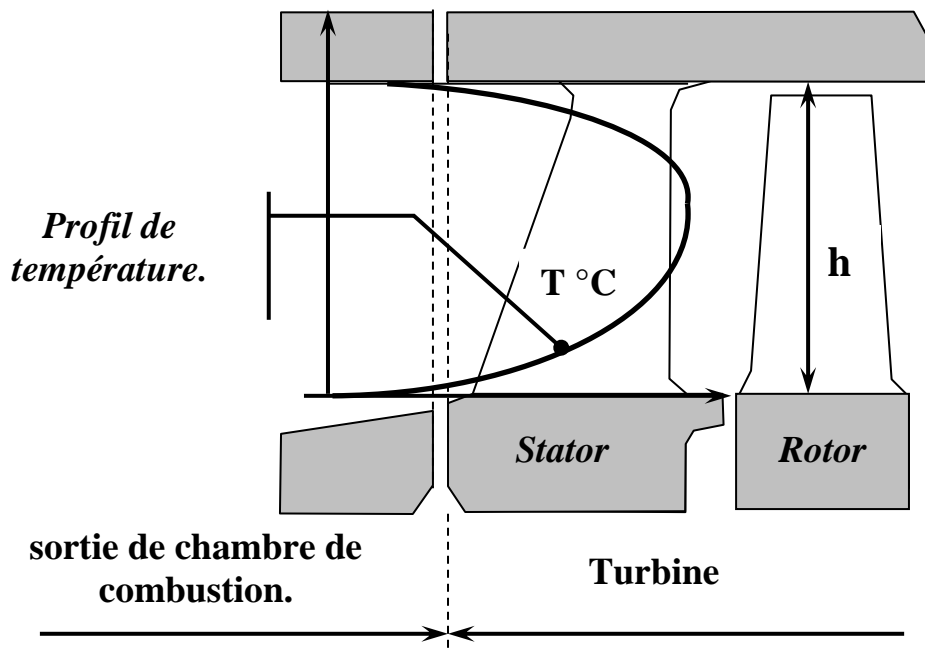
Le régime réacteur détermine le taux de compression du compresseur P_2 / P_1 :
 P_1 est fonction de l'altitude.

- ✓ La vitesse de propagation de la flamme augmente avec la pression.
- ✓ La vitesse de propagation de la flamme augmente avec la température : température d'inflammation spontanée.

Remarque : pour assurer un bon fonctionnement du réacteur, le régime de rotation toléré (ralenti minimum) doit augmenter avec l'altitude.

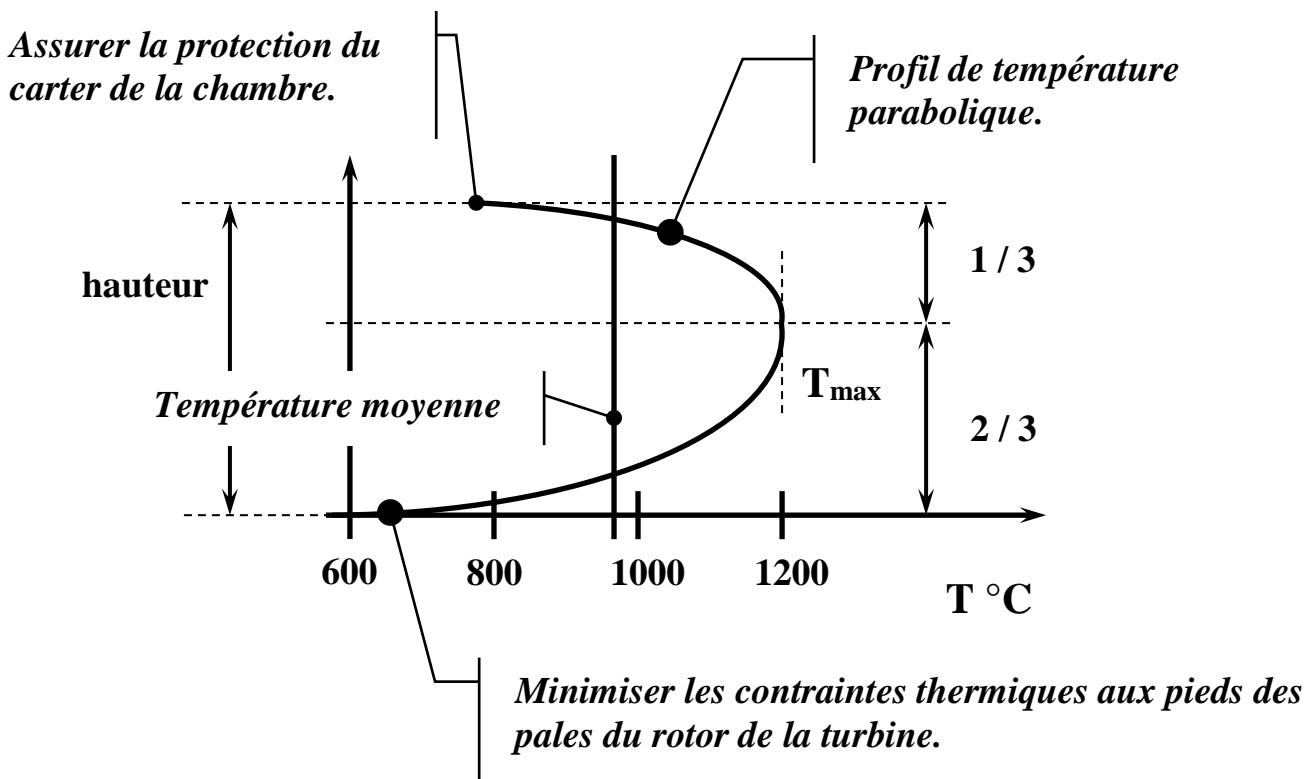
Répartition de température.

La hauteur de passage des gaz brûlés en sortie de chambre de combustion doit être égale à la hauteur en entrée de turbine.



La distribution des températures en sortie de chambre de combustion doit être le plus homogène possible.

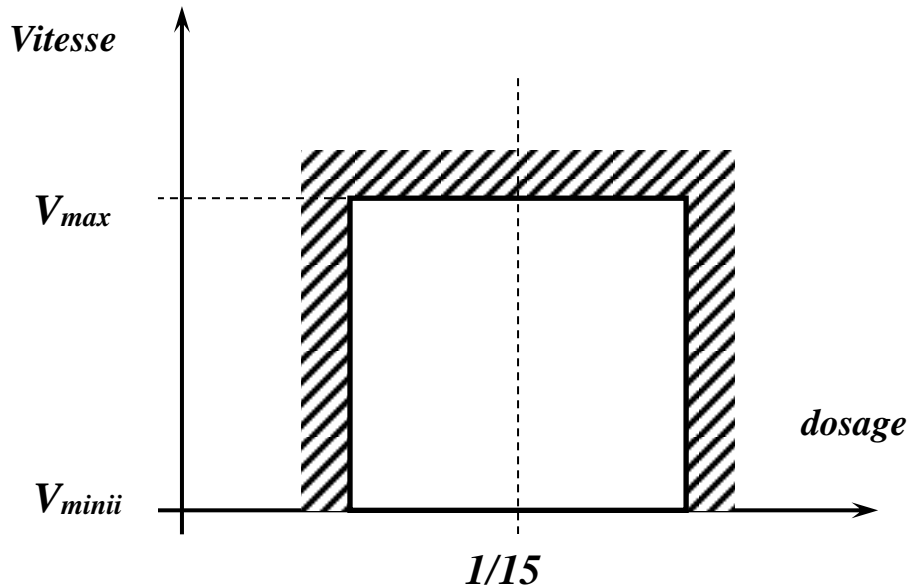
Schéma du profil de température en sortie de chambre de combustion.



Vitesse de l'écoulement.

La combustion a lieu dans un environnement où le gaz est en mouvement (il traverse la chambre).

La flamme ne peut se stabiliser et s'entretenir que si la vitesse de l'écoulement est égale à la vitesse de propagation de la flamme.



Vitesse > V_{max} risque d'extinction.
Vitesse < V_{minii} risque d'extinction.

Trubulence.

- ✓ Le caractère turbulent du mélange en terme d'écoulement participe à la propagation de la flamme. Les échanges thermiques sont meilleurs dans un un écoulement turbulent que dans un écoulement laminaire.
- ✓ Des grilles de turbulence sont disposées autour des l'injecteurs pour brasser et homogénéiser le mélange.
- ✓ Les turbulences génèrent des pertes de charges qui peuvent perturber le fonctionnement de la chambre : nécessité de trouver un compromis entre turbulence et perte de charge.

✓ **Perte de charge.**

Les pertes de charges sont inévitables. Elles sont essentiellement dues aux turbulences de l'écoulement dans la chambre de combustion et aux frottements visqueux sur les parois.

Les pertes de charges dans la chambre de combustion doivent être réduites au maximum. Les pertes de charges entraînent des pertes de performance du moteur.

Estimation :

$$\frac{\Delta P}{P_e} = \frac{P_e - P_s}{P_e} = 4..à..5\%$$

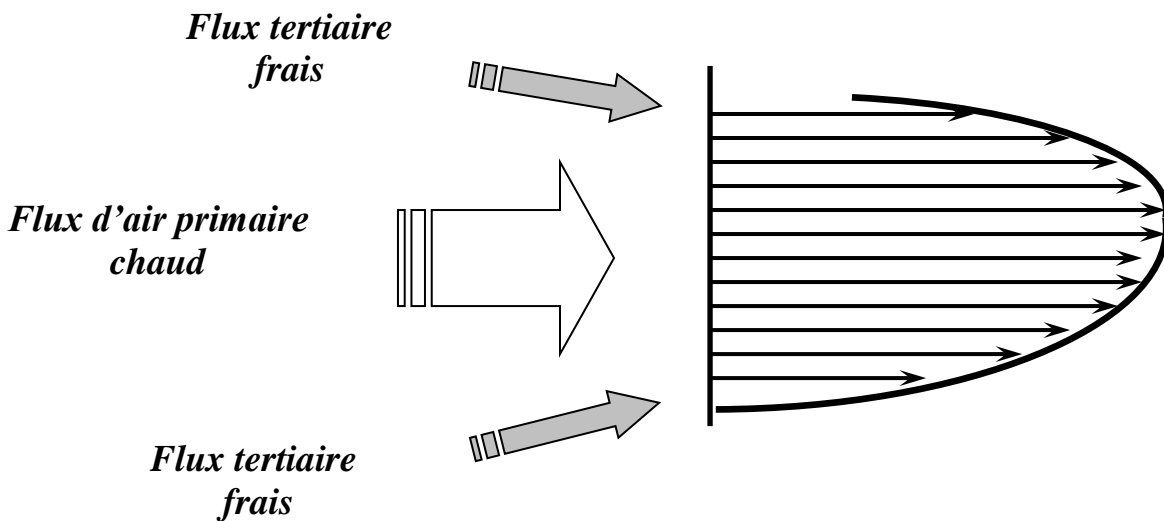
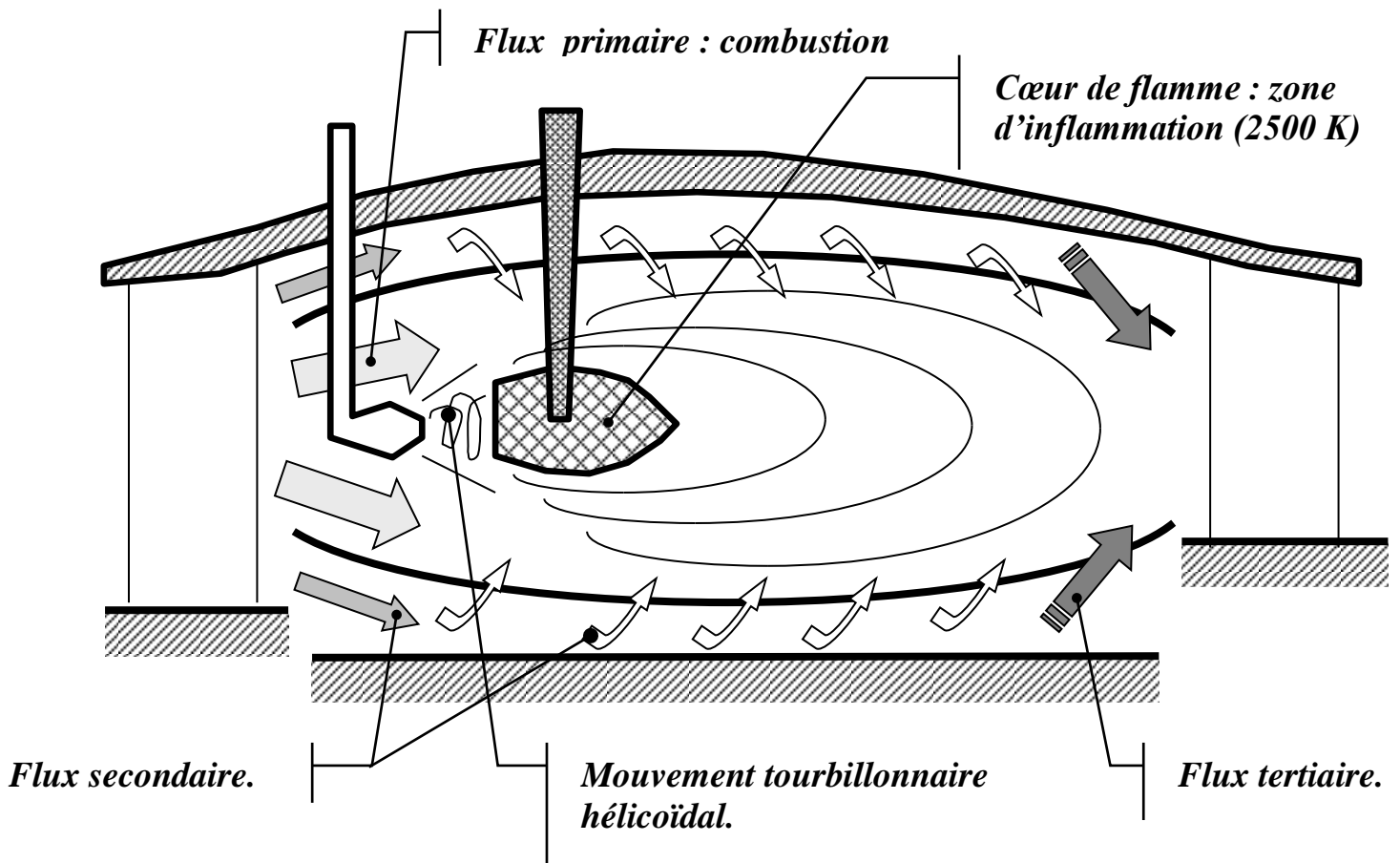
✓ **Les points chauds.**

Il faut éviter les points de température hétérogènes sur les parois : les points chauds. Cela entraîne la fragilisation des matériaux par développement de contraintes thermiques.

✓ **Recommandations**

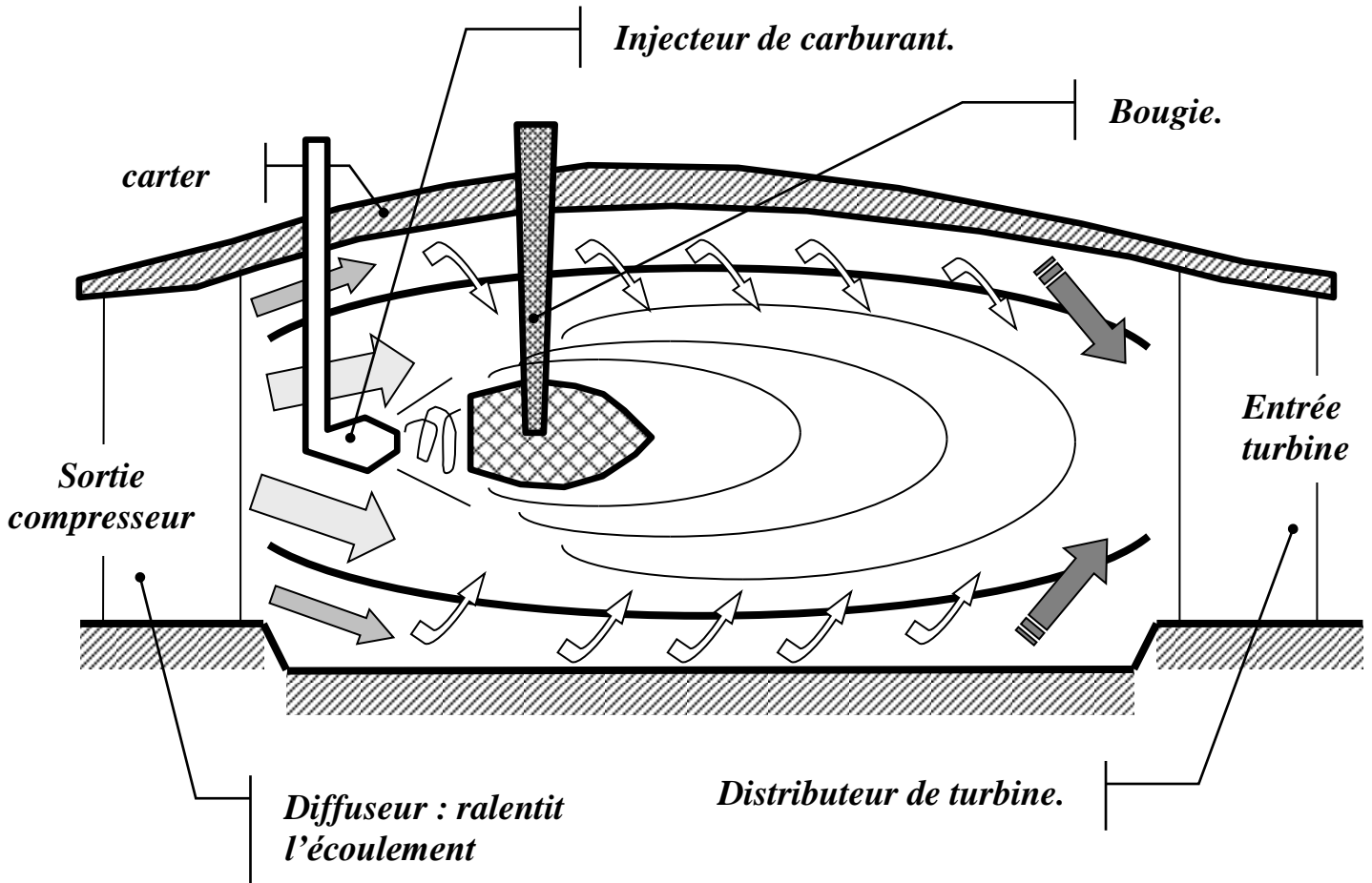
- Assurer un bon guidage de l'écoulement pour éviter la génération de structures turbulentes.
- Assurer le maintien de la flamme par un dessin adapté de la chambre de combustion.
- Eviter les excès de vitesse (les zones de survitesse) à l'entrée de la chambre de combustion : il peuvent entraîner un soufflage de la flamme et donc l'extinction de combustion.

Profil de la chambre de combustion.



Génération du profil de vitesse parabolique en sortie de chambre.

Profil de la chambre de combustion.

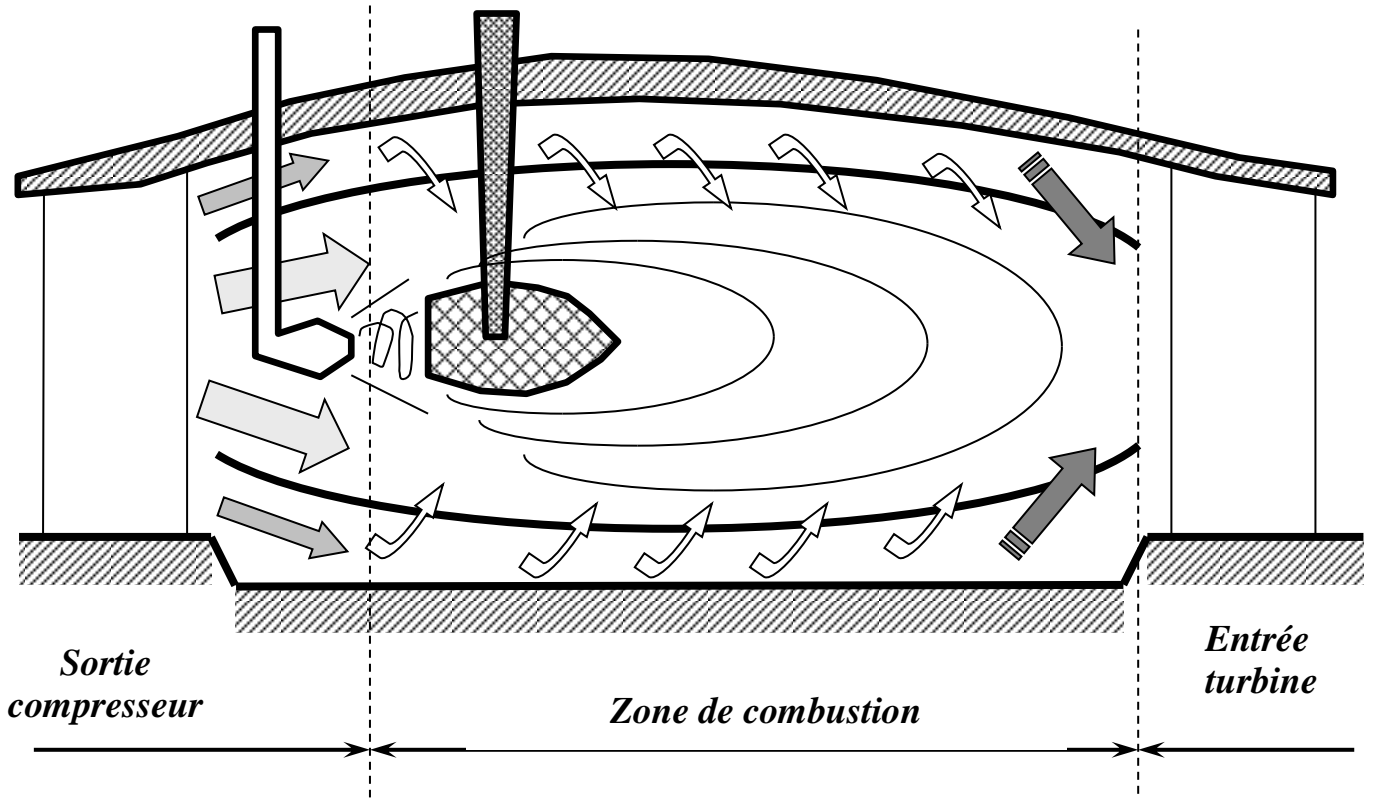


- ✓ Flux primaire : participe directement à la combustion.
- ✓ Flux secondaire : l'injection d'air secondaire permet de refroidir le carter et fait diminuer progressivement la température dans la chambre de combustion. Il permet d'assurer un bon dosage du mélange air carburant.
- ✓ Flux tertiaire : il participe à la génération d'un profil de vitesse homogène parabolique en sortie de chambre.
- ✓ La température maximum au niveau du distributeur de turbine doit être de l'ordre de 1300 °C.

Relations entre les différents débits passant dans la chambre :

$$Q_{\text{secondaire}} + Q_{\text{tertiaire}} = 3,5 \cdot Q_{\text{primaire}}$$

Evolution des paramètres dans la chambre de combustion.



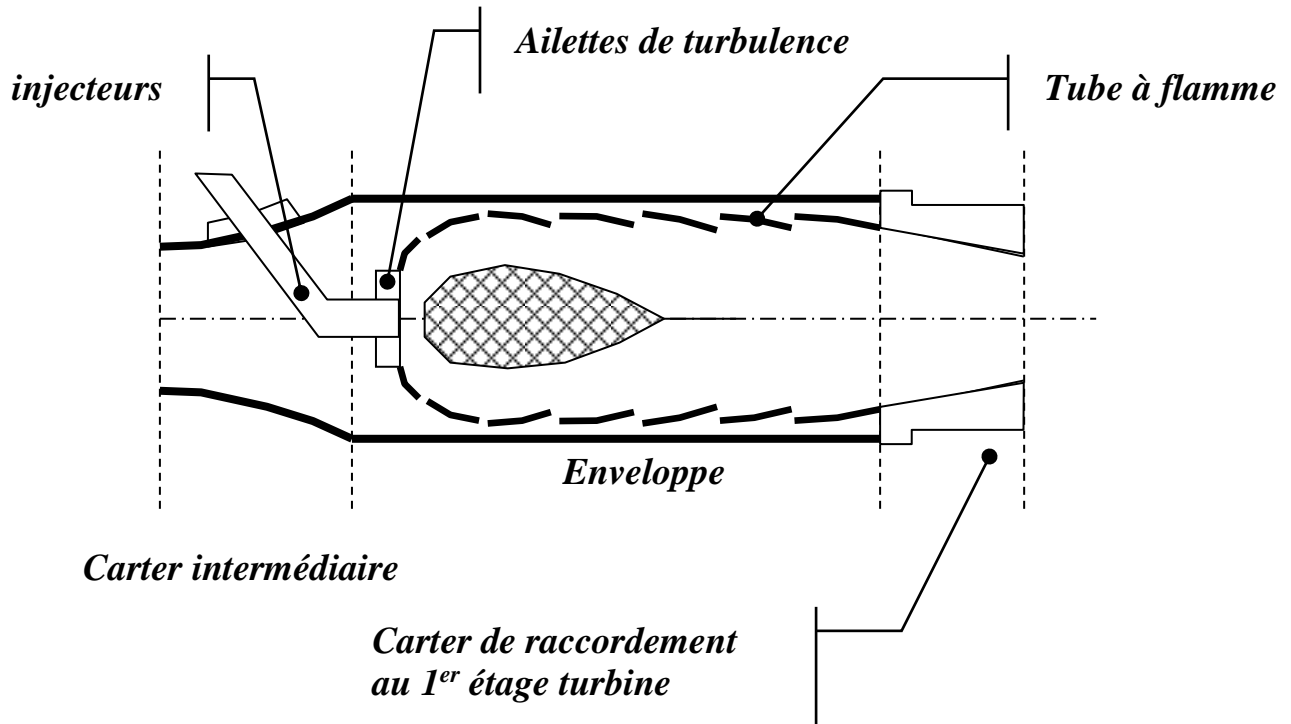
	<i>Sortie compresseur</i>	<i>Zone de combustion</i>	<i>Entrée turbine</i>	<i>Chambre de combustion.</i>
<i>Vitesse V</i>				
<i>T_{statique}</i>				
<i>P_{statique}</i>				
<i>T_{totale}</i>				
<i>P_{totale}</i>				

Chambre de combustion

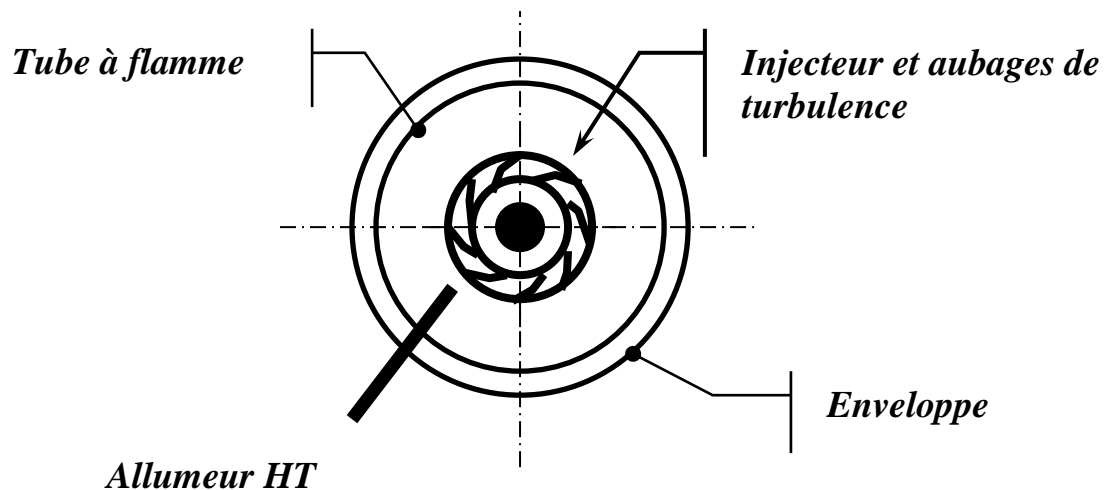
Il existe trois types de chambre de combustion :

- ✓ *Chambre de combustion à chambres séparées ou individuelles,*
- ✓ *Chambre de combustion annulaire,*
- ✓ *Chambre de combustion mixte.*

Chambre de combustion à chambres séparées (individuelles).

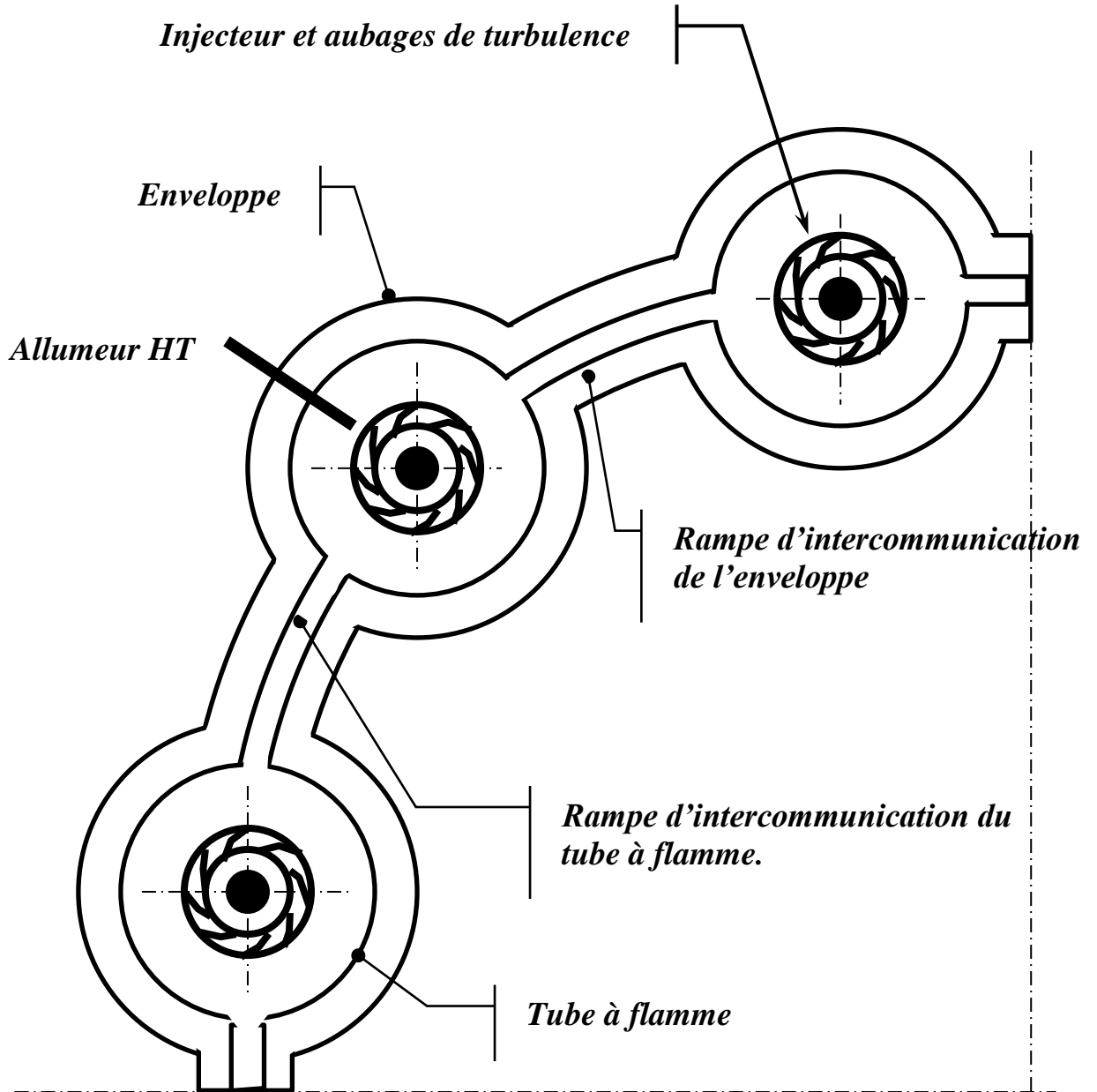


Coupe longitudinale d'un tube à flamme et de son enveloppe.



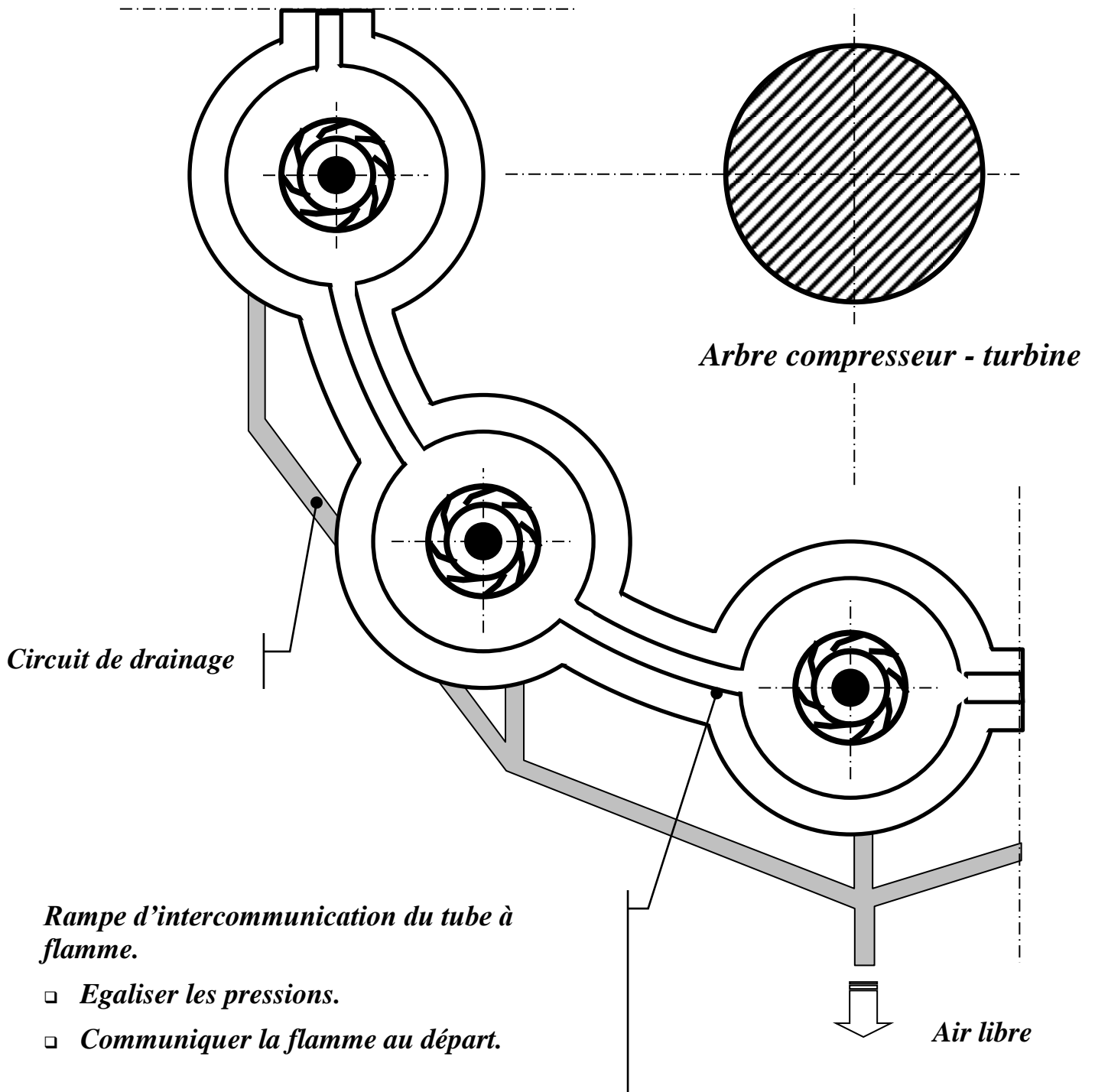
Coupe transversale d'un tube à flamme et de son enveloppe.

Chambre de combustion à chambres séparées (individuelles).



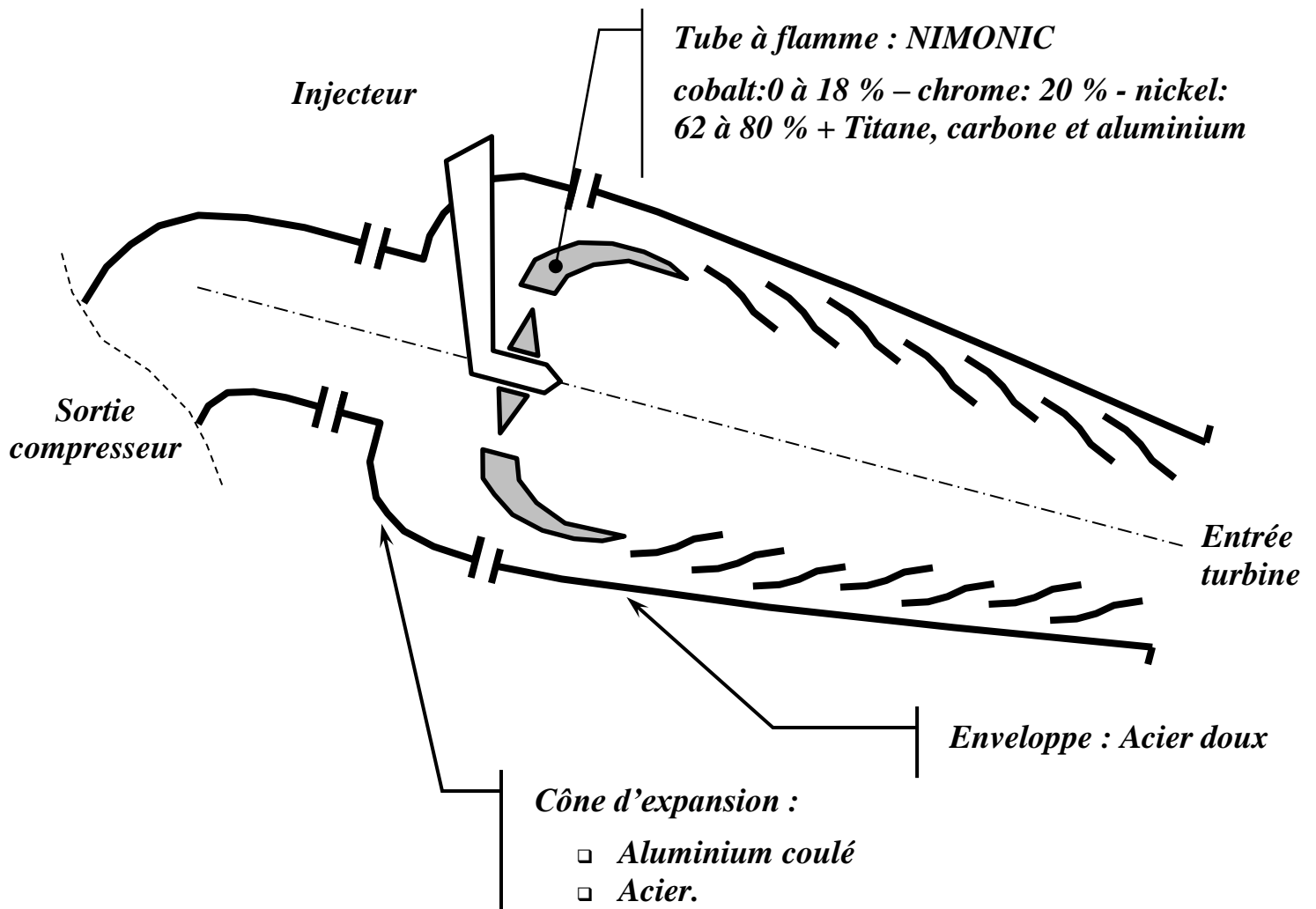
Quatre de coupe transversale chambres séparées.

Chambre de combustion à chambres séparées (individuelles).



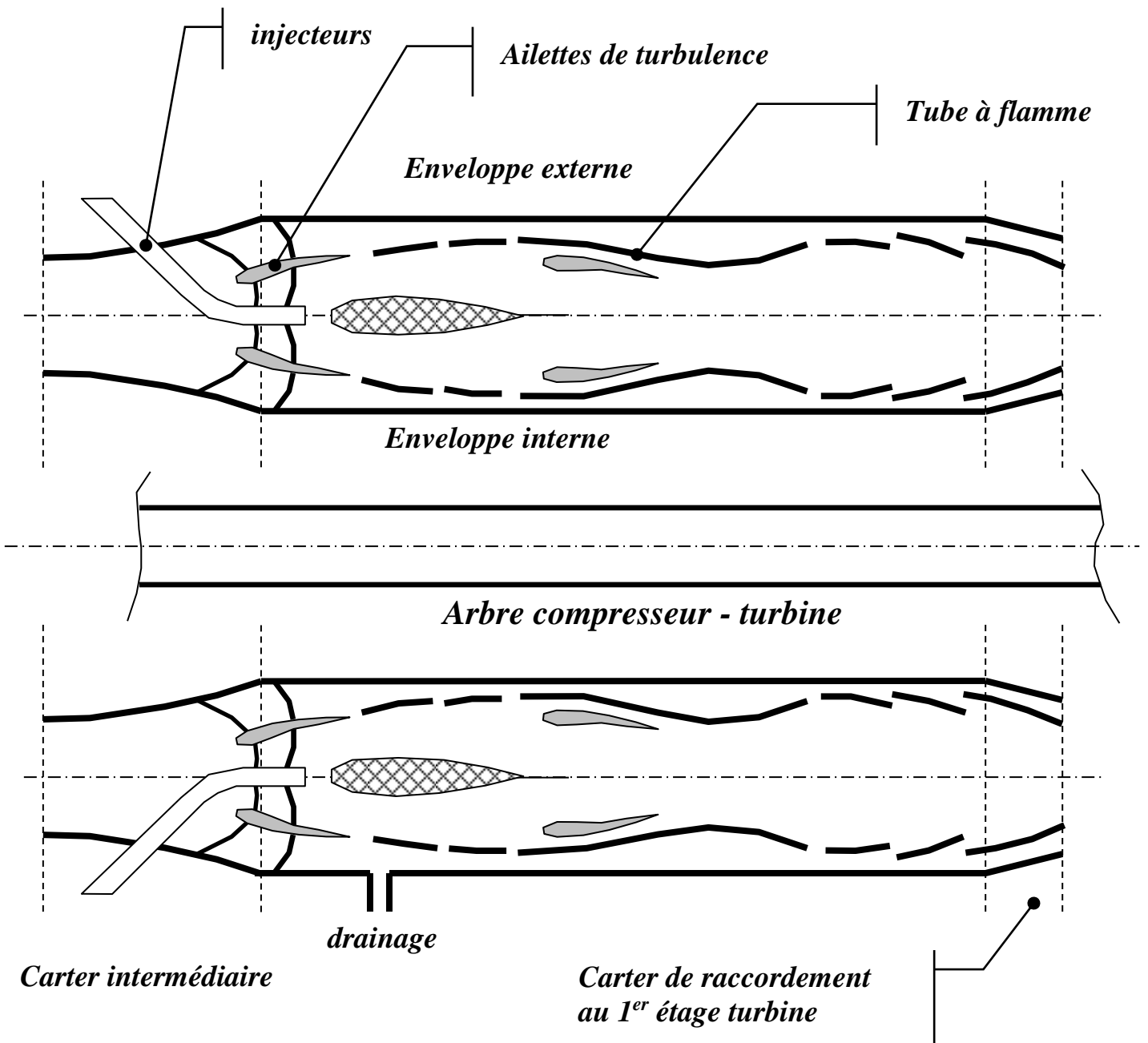
Remarque : les chambres de combustion séparées furent les premières à être mise en fonction dans les groupes turboréacteurs modernes.

Chambre de combustion à chambres séparées (individuelles).



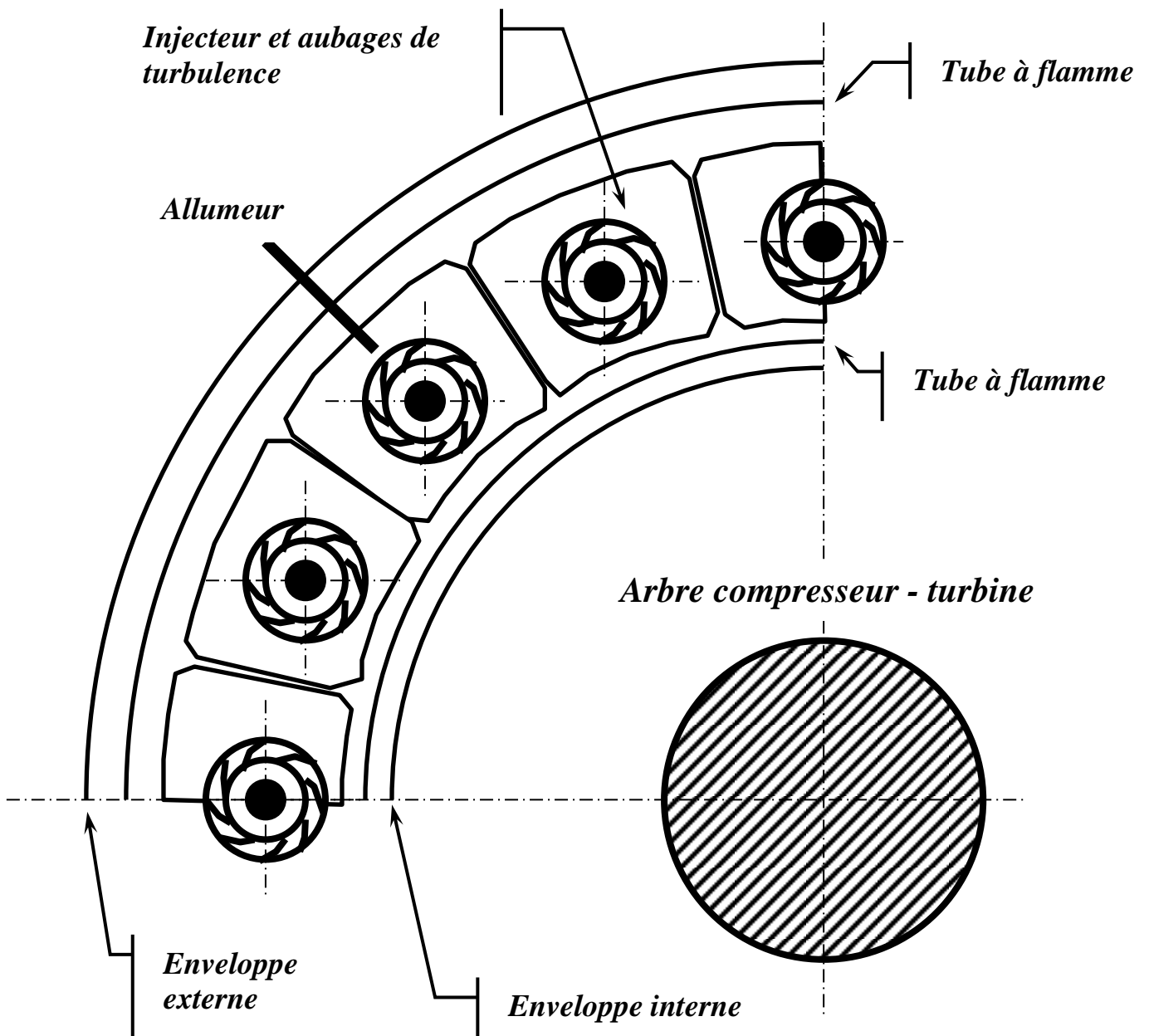
AVANTAGES	INCONVENIENTS
<i>Conception simple</i>	<i>Poids important (comparativement)</i>
<i>Maintenance aisée</i>	<i>Encombrement diamétral important</i>
<i>Mise au point relativement simple</i>	<i>Pertes de charge importantes</i>
<i>Bon contrôle de la combustion</i>	<i>Ne participe pas à la rigidité du moteur</i>

Chambre de combustion annulaire.



Coupe longitudinale d'un tube à flamme et de son enveloppe.

Chambre de combustion annulaires.

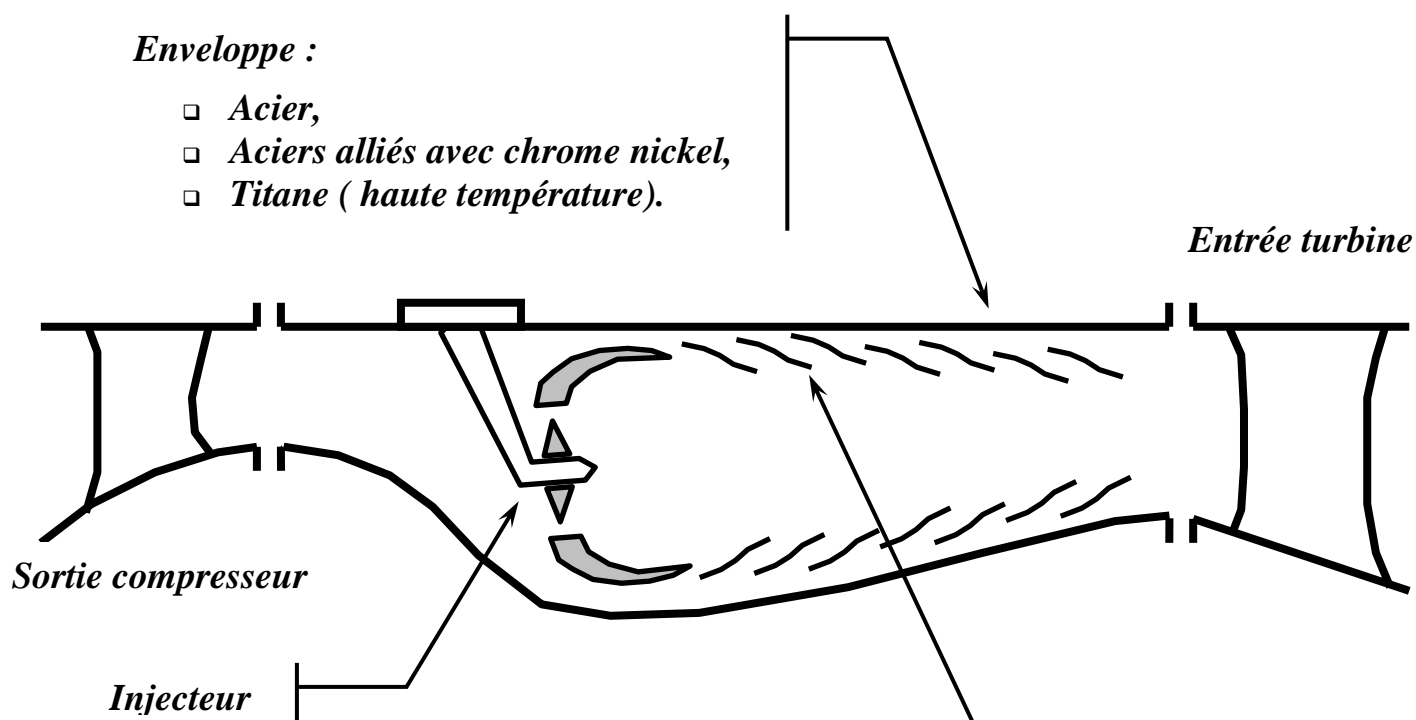


1/4 de coupe transversale : chambre annulaire.

Chambre de combustion annulaires.

Enveloppe :

- ❑ *Acier,*
- ❑ *Aciers alliés avec chrome nickel,*
- ❑ *Titane (haute température).*



Tube à flamme : Alliage réfractaire à base de :

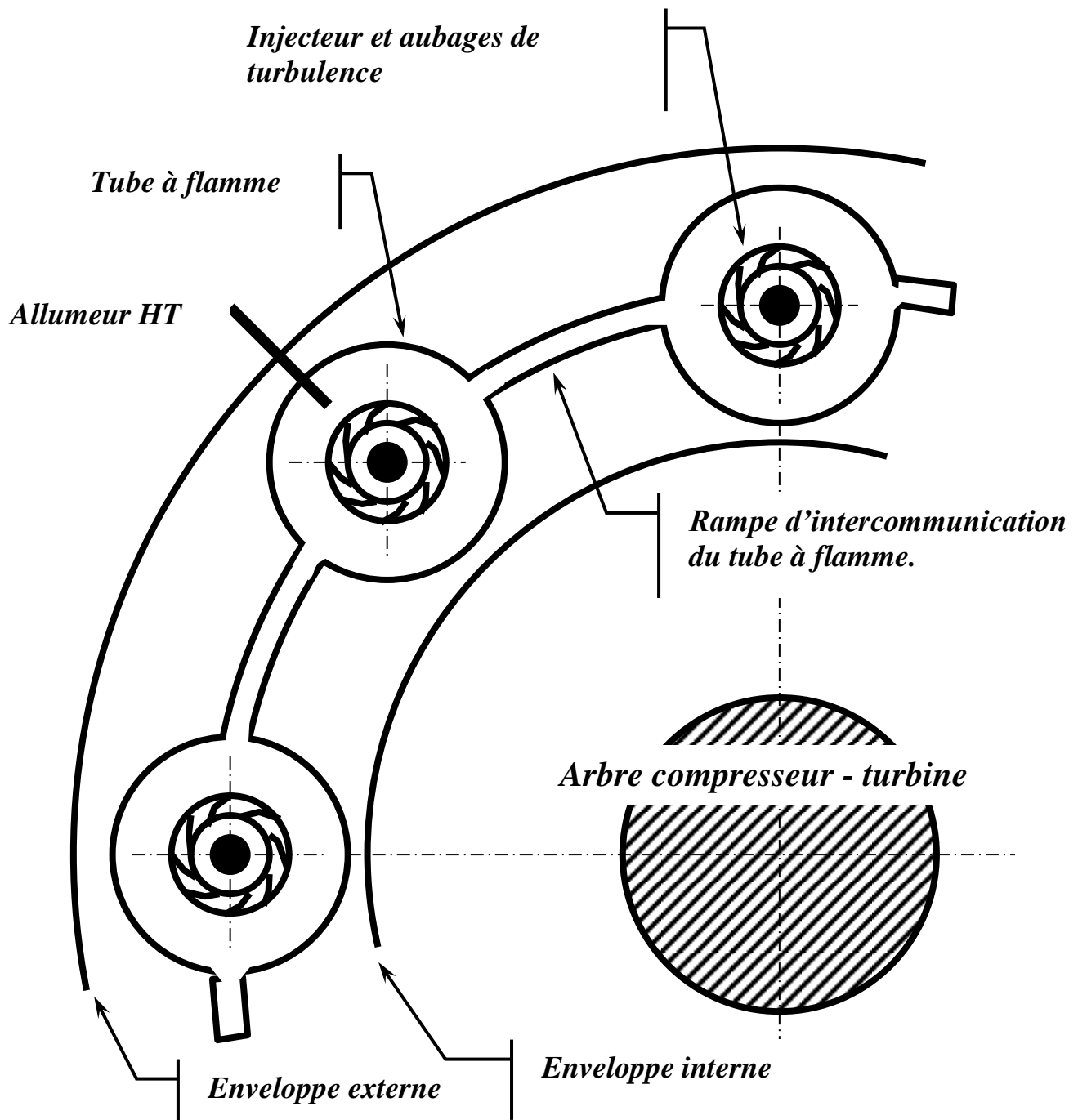
- *nickel - chrome - cobalt + molybdène, fer, tungstène (Nimonic ou Hastelloy)*
- *cobalt - nickel - chrome et tungstène.*

<i>AVANTAGES</i>	<i>INCONVENIENTS</i>
<i>Faible poids (légèreté).</i>	<i>Maintenance lourde de mise en œuvre.</i>
<i>Faibles pertes de charge.</i>	<i>Mise au point complexe.</i>
<i>Rapport puissance / volume le plus intéressant des trois conception.</i>	<i>Contrôle de la combustion délicate.</i>
<i>Participe à la rigidité du moteur.</i>	
<i>Faible encombrement diamétral.</i>	

Chambre de combustion mixtes.

La chambre de combustion mixte est une chambre de combustion de conception technologique intermédiaire entre la chambre séparée et la chambre annulaire.

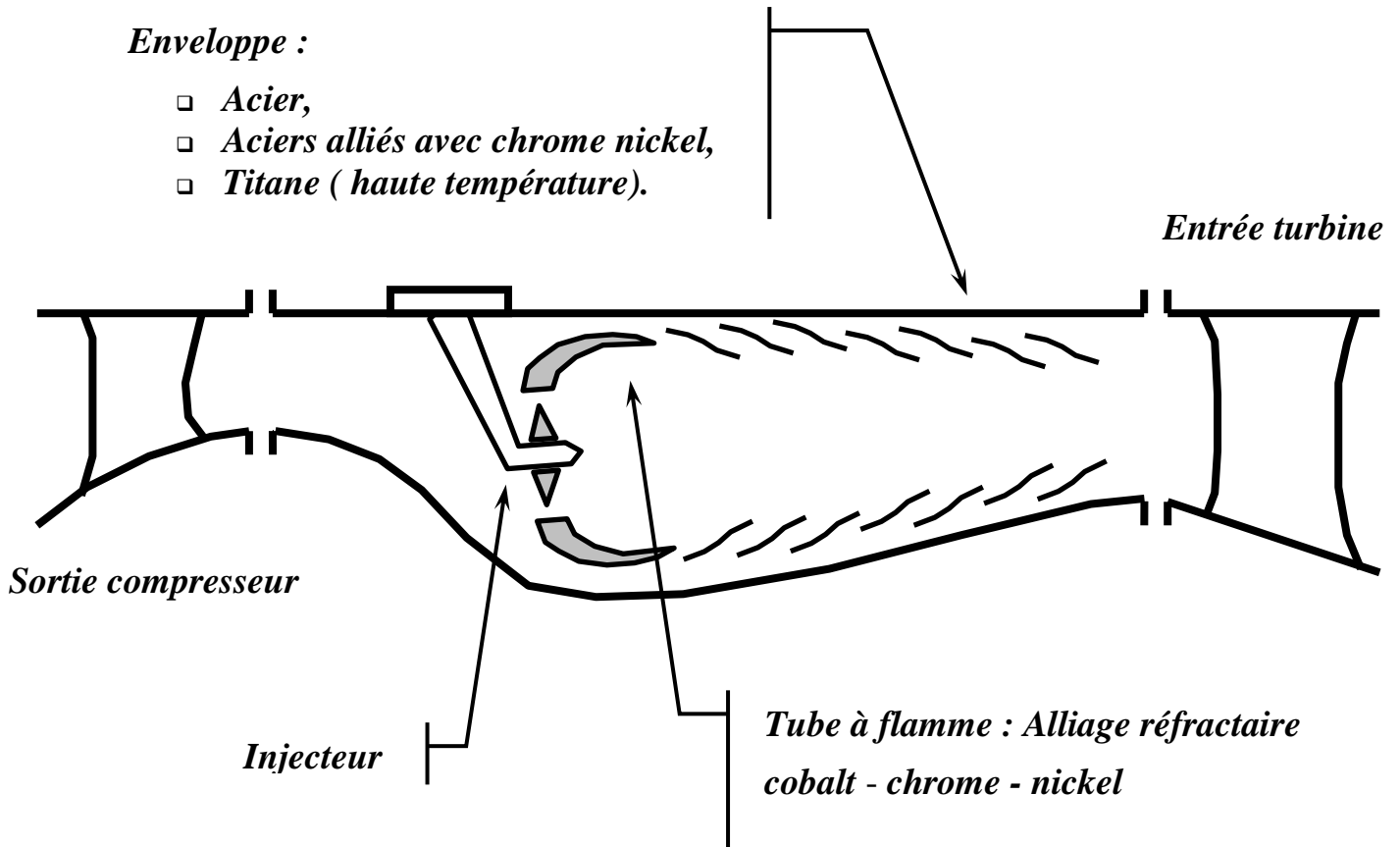
La chambre de combustion mixte présente un compromis qui rassemble les avantages conjugués des chambres séparées et des chambres annulaires.



1 / 4 de coupe transversale : chambre mixte.

Chambre de combustion mixtes.

Coupe longitudinale : même que chambre annulaire.



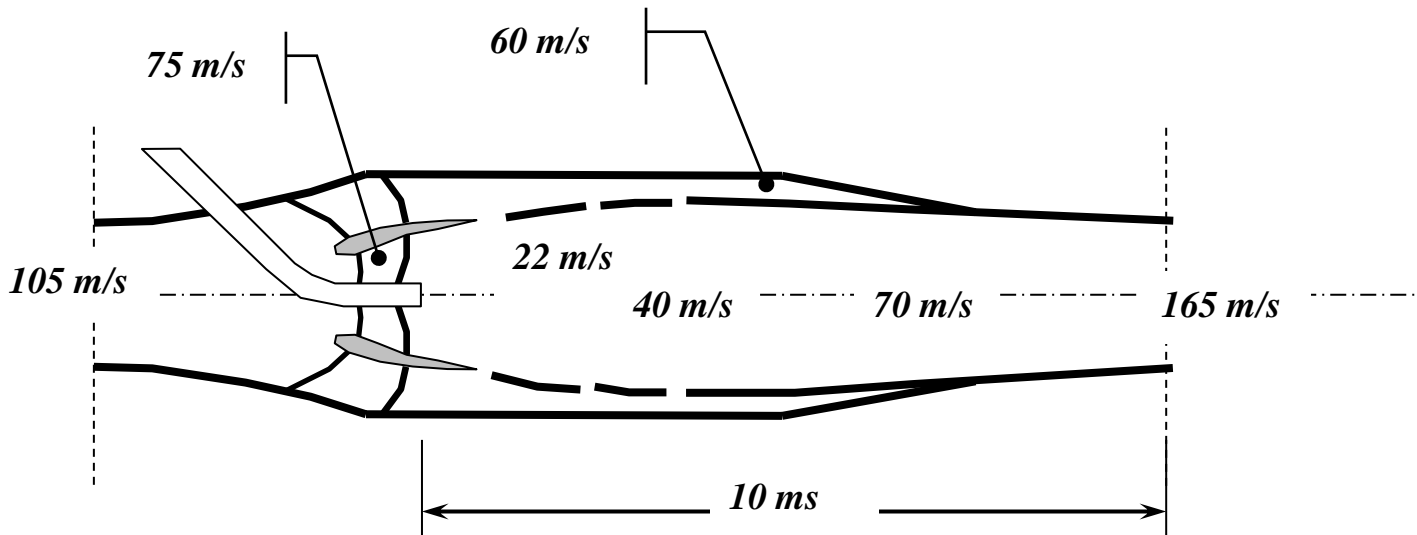
<i>AVANTAGES</i>	<i>INCONVENIENTS</i>
<i>Faible encombrement diamétral.</i>	<i>Poids > poids chambre annulaire</i>
<i>Participe à la rigidité de l'ensemble moteur.</i>	<i>Pertes de charges > Pertes de charges chambre annulaire.</i>
<i>Bon contrôle de la combustion.</i>	<i>Maintenance lourde de mise en œuvre.</i>
<i>Interchangeabilité des tubes à flamme.</i>	
<i>Meilleurs refroidissement.</i>	
<i>Mise au point relativement simple.</i>	

Avantages et inconvénients des différents types de chambre de combustion

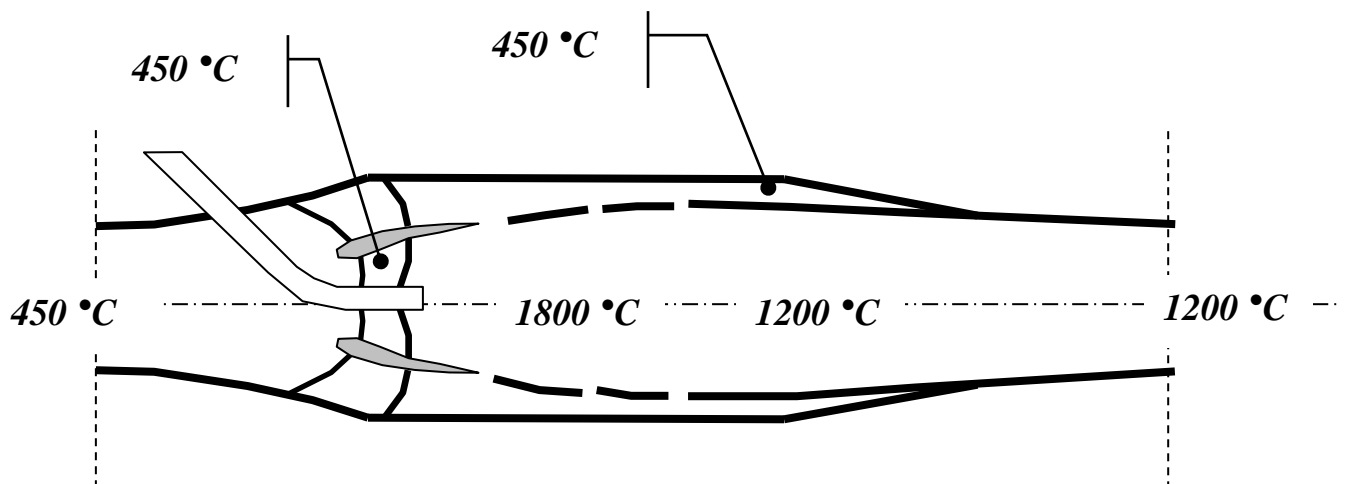
<i>chambre</i>	<i>Avantages</i>	<i>inconvénients</i>
<i>Séparées</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Facilité de mise au point,</i> ▪ <i>Facilité d'intervention,</i> ▪ <i>Combustion facile à contrôler.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Lourdes</i> ▪ <i>Encombrantes : maître couple important,</i> ▪ <i>Perte par frottement importantes,</i> ▪ <i>Carter résistant pour liaison compresseur turbine.</i>
<i>Annulaires</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Légères,</i> ▪ <i>Maître-couple faible,</i> ▪ <i>Peu de perte par frottement,</i> ▪ <i>Puissance, important volume,</i> ▪ <i>Carters contribuent à la rigidité de l'ensemble.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Difficultés d'intervention,</i> ▪ <i>Difficultés de mise au point,</i> ▪ <i>Combustion difficile à contrôler.</i>
<i>Mixtes compromis</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Facilité de mise au point,</i> ▪ <i>Changement tube à flamme unitaire,</i> ▪ <i>Combustion facile à contrôler,</i> ▪ <i>Carters contribuent à la rigidité de l'ensemble,</i> ▪ <i>Maître-couple faible.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Plus de perte par frottement que l'annulaire,</i> ▪ <i>Difficultés d'intervention,</i> ▪ <i>Plus lourdes que l'annulaire.</i>

Chambres de combustion – évolution des paramètres.

Evolution de la vitesse longitudinale.

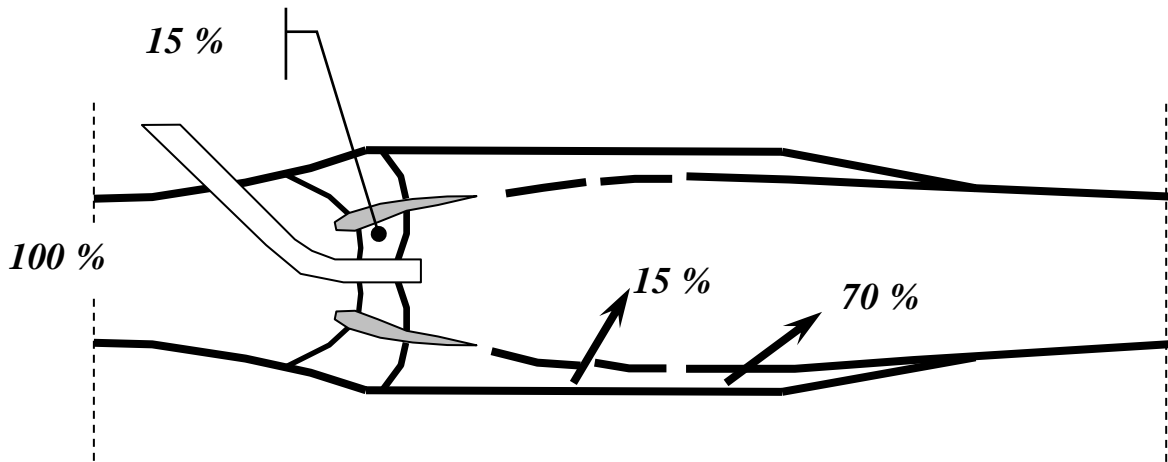


Evolution de la température.

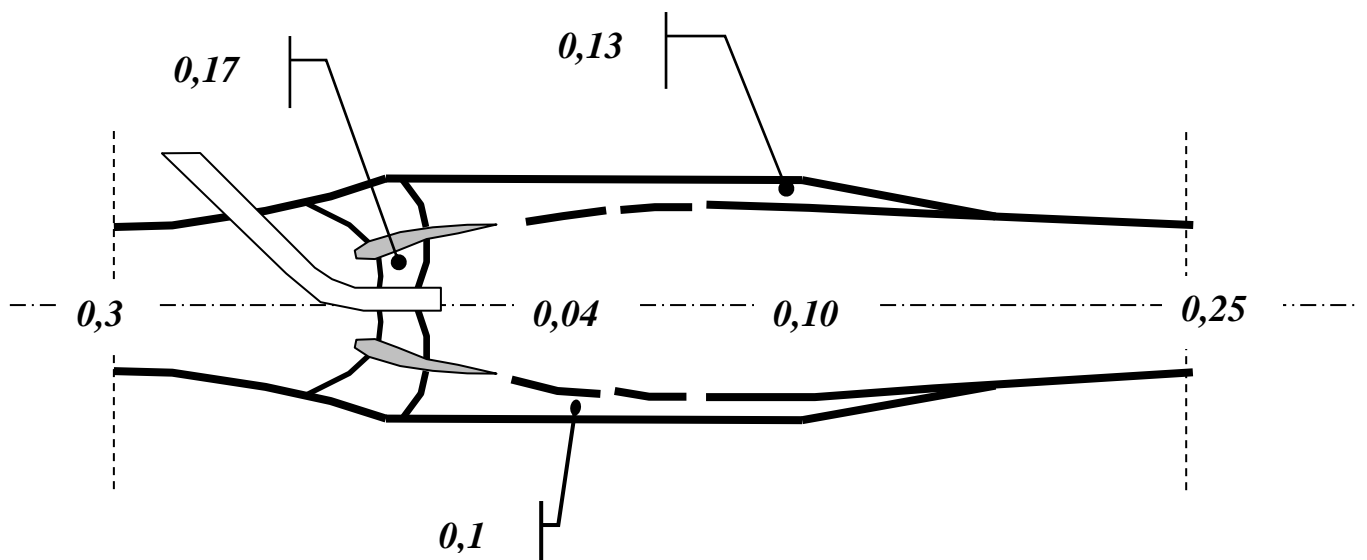


Chambres de combustion – évolution des paramètres.

Pourcentage du débit total.

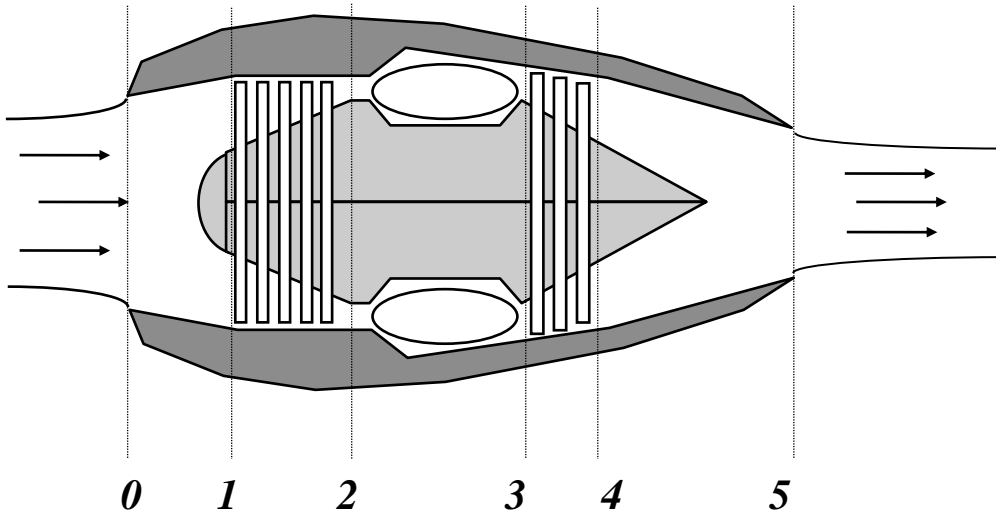


Evolution du nombre de MACH.

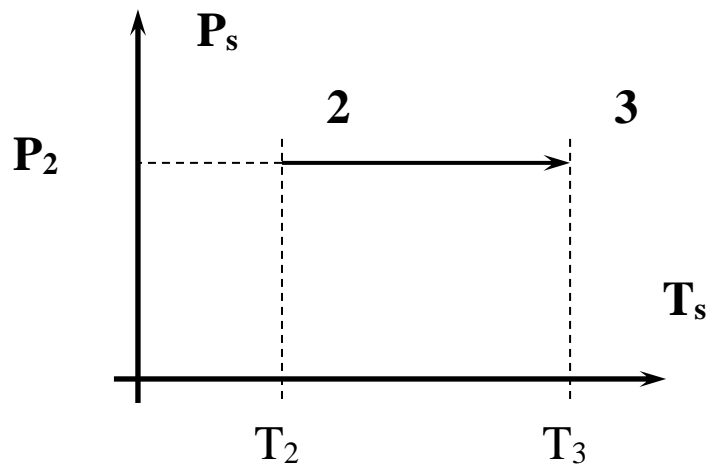


Chambres de combustion – Etude thermodynamique

Position de la chambre de combustion dans le turboréacteur.



Etude théorique dans le plan pression – température statiques.



La combustion s'effectue à pression constante et augmente la température du fluide.

Chambres de combustion – Etude thermodynamique

Premier principe de la thermodynamique.

Premier principe appliqué à un système ouvert :

$$(W_T + Q)_2^3 = H_3 - H_2 + \frac{1}{2}(V_3^2 - V_2^2) + g(z_3 - z_2)$$

hypothèses :

- $H = C_p T$ gaz parfait,
- $Z_2 = Z_3$ pas de variation de hauteur,
- $V_2 = V_3$ conservation de la vitesse dans la chambre,
- $W_T = 0$ pas de production de travail (pas de pièce mécanique).

$$(Q)_2^3 = C_P (T_3 - T_2)$$

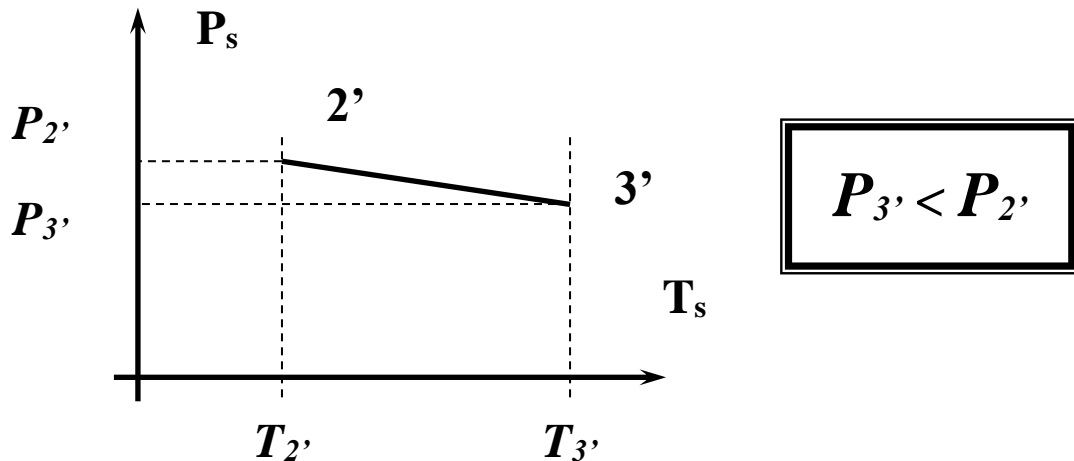
Q ; quantité de chaleur délivrée au fluide par unité de masse : J / Kg

Puissance de combustion théorique.

$$P_{CThéorique} = (Q_a + Q_c).C_P (T_3 - T_2)$$

Chambres de combustion – Etude thermodynamique

Evolution réelle dans le plan pression – température statiques.



Dans la réalité il existe des pertes de charge dans la chambre de combustion, ordre de grandeur 4 à 5 %.

Origine des pertes de charge :

- Turbulences aérodynamiques,
- Dilution air / carburant,
- Refroidissement dans la chambre.

La température d'entrée de chambre est la température de fin de compression.

La température d'entrée turbine T_3' est la même que la température théorique T_3 pour des raisons de limitations technologique.

Puissance de combustion réelle.

$$T_2' > T_2$$

$$P_{\text{Créelle}} = (Q_a + Q_c) \cdot C_p (T_3 - T_2')$$

Chambres de combustion – Etude thermodynamique

Rendement de combustion.

$$\eta_{cc} = \frac{P_{créelle}}{P_{théorique}} = \frac{T_3 - T_2'}{T_3 - T_2} = 0,98$$

Rendement théorique et réel de la chambre.

Puissance calorifique du carburant :

$$P_c = Q_c \cdot P_{ci}$$

- Rendement théorique de la chambre de combustion :

$$\eta_{CThéorique} = \frac{Q_a + Q_c}{Q_c P_{ci}} C_p (T_3 - T_2)$$

- Rendement réel de la chambre de combustion :

$$\eta_{Créel} = \frac{Q_a + Q_c}{Q_c P_{ci}} C_p (T_3 - T_2')$$

Evolution des chambres de combustion.

Objectifs.

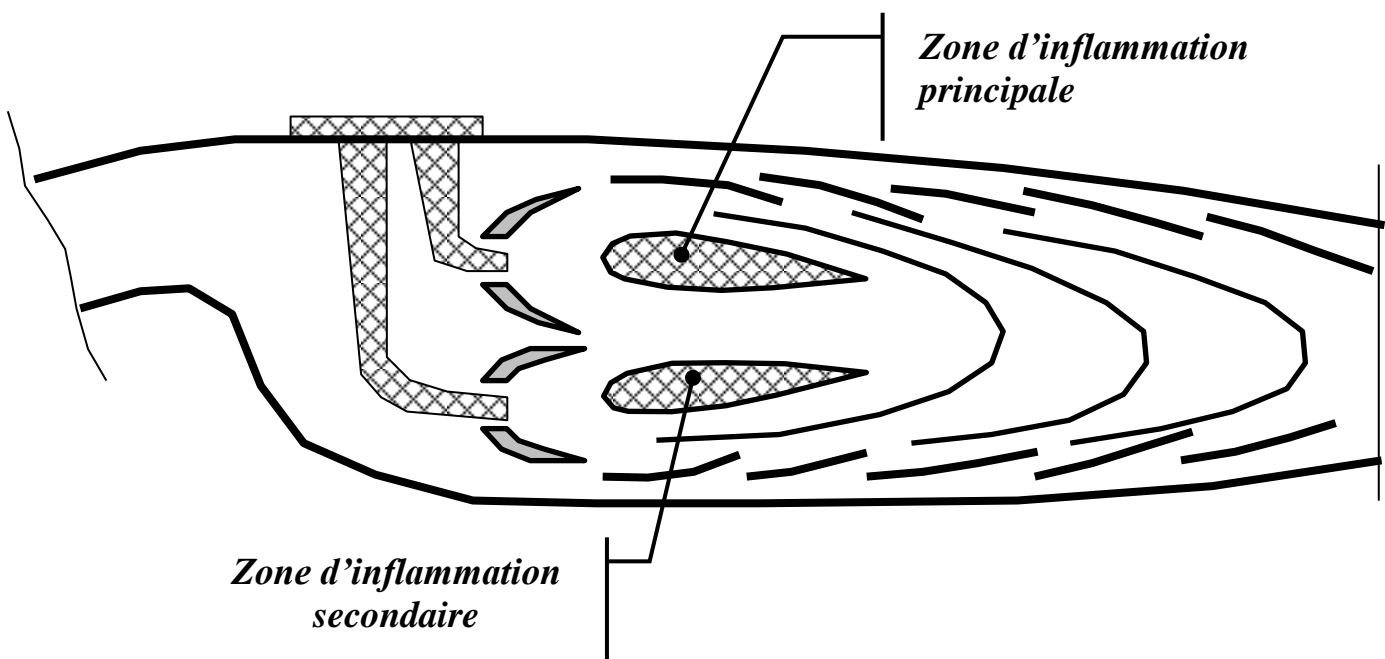
- Diminuer le niveau de pollution,
- Limiter les émissions de fumée,
- Réduire la taille et le poids des chambres de combustion,
- Augmenter l'endurance thermique des tubes à flamme,
- Augmenter le rendement de combustion aux régimes partiels,
- Augmenter la stabilité de la combustion.

Conception actuelle.

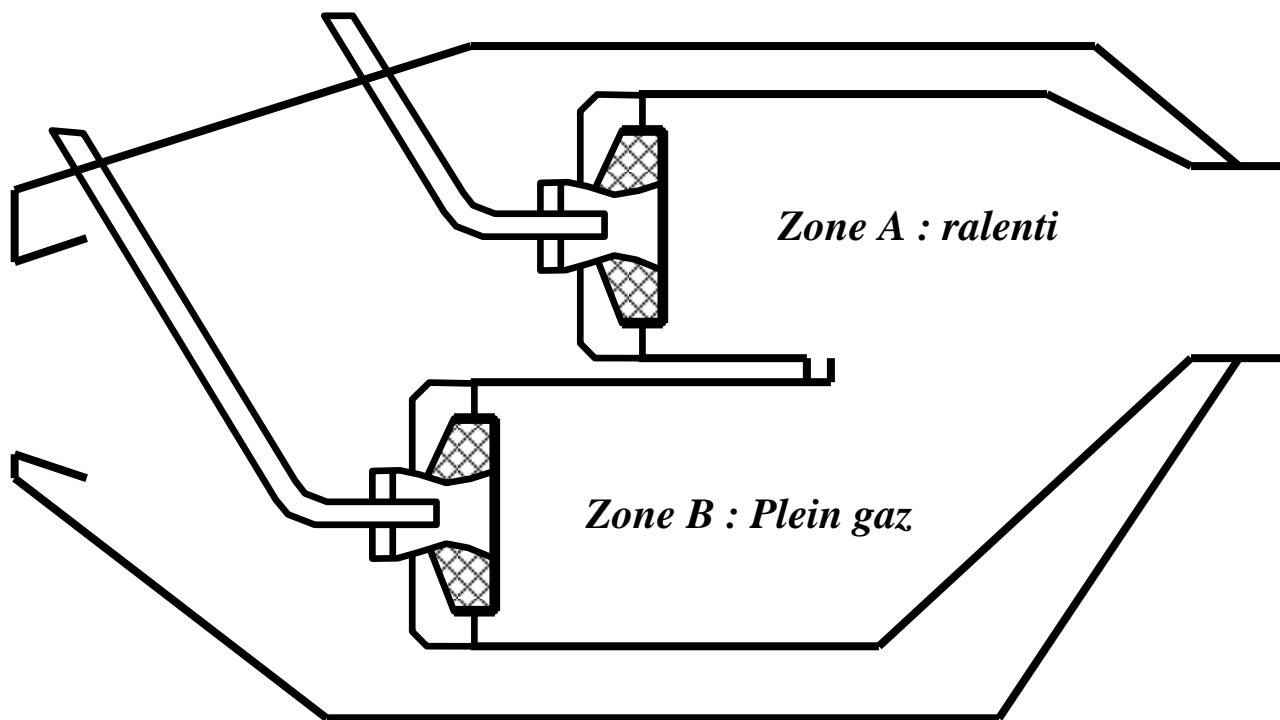
- Injecteur mécanique,
- Chambre à une seule zone de combustion,
- Refroidissement des tubes à flamme par film protecteur et multi-perforation.

Avenir

- *Chambre à deux zones de combustion (CFM56)*



Evolution technologique : chambre à deux zones.



- ✓ **Zone A** : adaptée aux conditions de *régime réduit* (ralenti). Réduction des polluants **NO** et **CH₄**.
- ✓ **Zone B** : adaptée aux conditions de *plein régime* (plein gaz). Réduction des polluants **NO**.

□ **Injecteur aérodynamique : utilisation de deux tourbillons d'air**

(CFM 56)

La propagation de la flamme est fonction du type et du délai de pulvérisation du carburant.

✓ **Le rendement et la stabilité de la combustion réclament une pulvérisation complète et homogène du carburant :**

- Complète : tout le carburant doit être valorisé.
- Homogène : la taille des gouttelettes doit être la même partout.

✓ **Contrainte de construction de l'injecteur :**

- Avoir un orifice de pulvérisation calibré très précisément,
- Pulvériser le carburant le plus finement possible (minimiser la taille des gouttelettes)
- Brasser énergiquement le mélange air / carburant (homogénéiser le mélange)
- Pas de parties mobiles au niveau de l'orifice de sortie du carburant.

✓ **Le débit masse du carburant q_{mc} est donné par la formule suivante :**

$$q_{mc} = K.S.\sqrt{\Delta P}$$

K : coefficient constant fonction de la viscosité du fluide et de la forme de l'injecteur.

S : section de l'orifice de l'injecteur.

ΔP = pression amont – pression avale au niveau de l'orifice de l'injecteur.

✓ *Contraite de fonctionnement de l'injecteur :*

L'injecteur doit fonctionner de façon optimale de sorte que le rapport suivant soit vérifié :

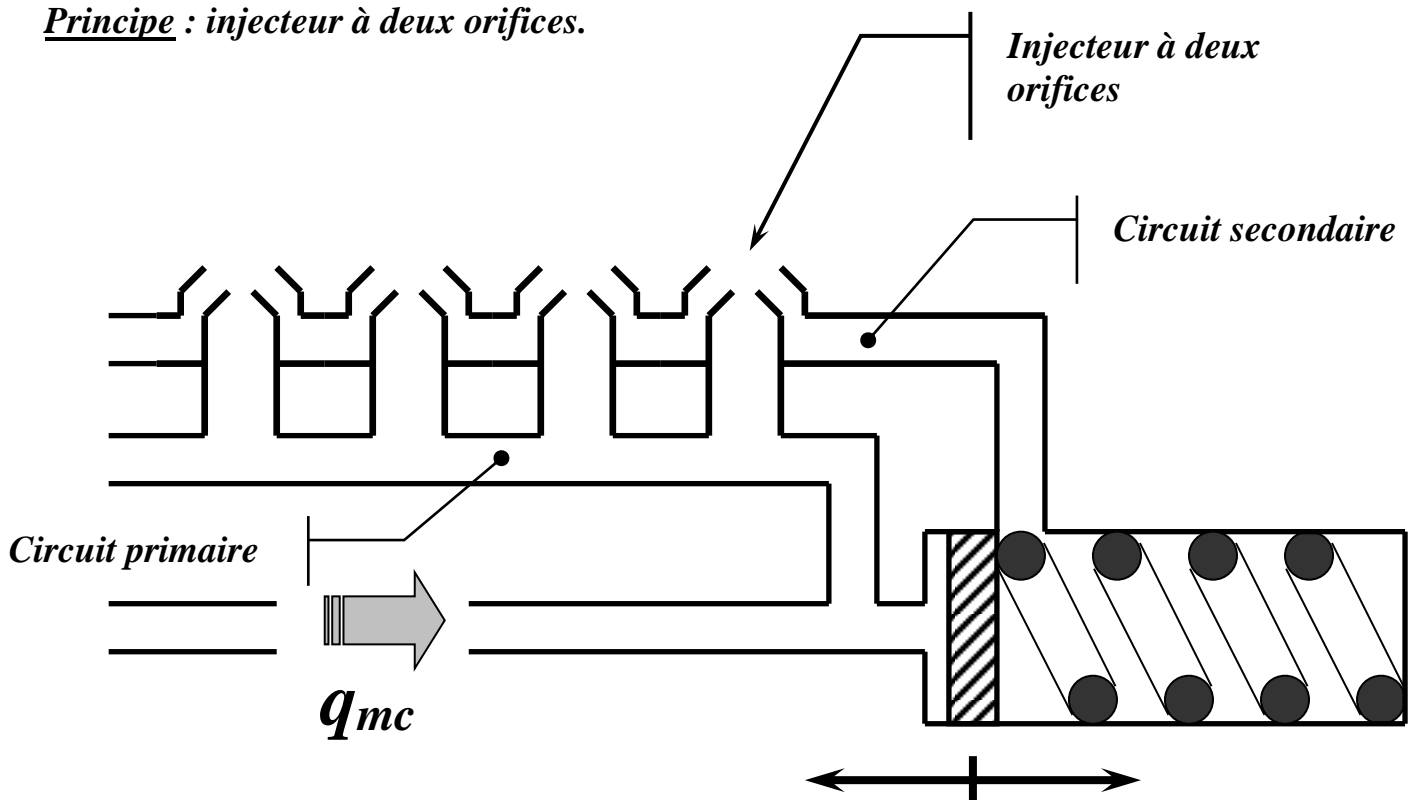
$$\frac{q_{mc.ralenti}}{q_{mc.maximum}} = \frac{1}{30}$$

q_{mc} varie de 1 à 30 si ΔP varie de 1 à 900

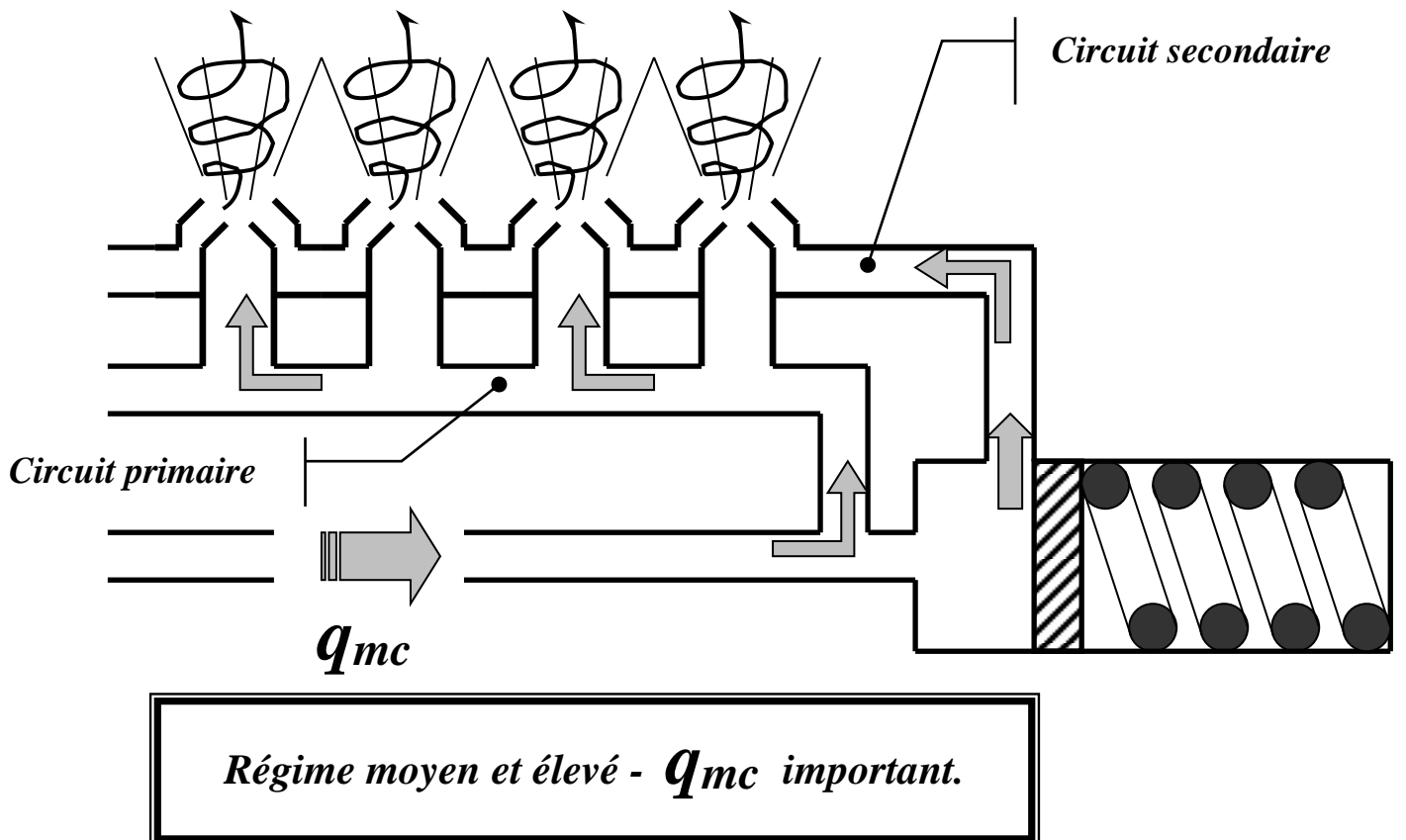
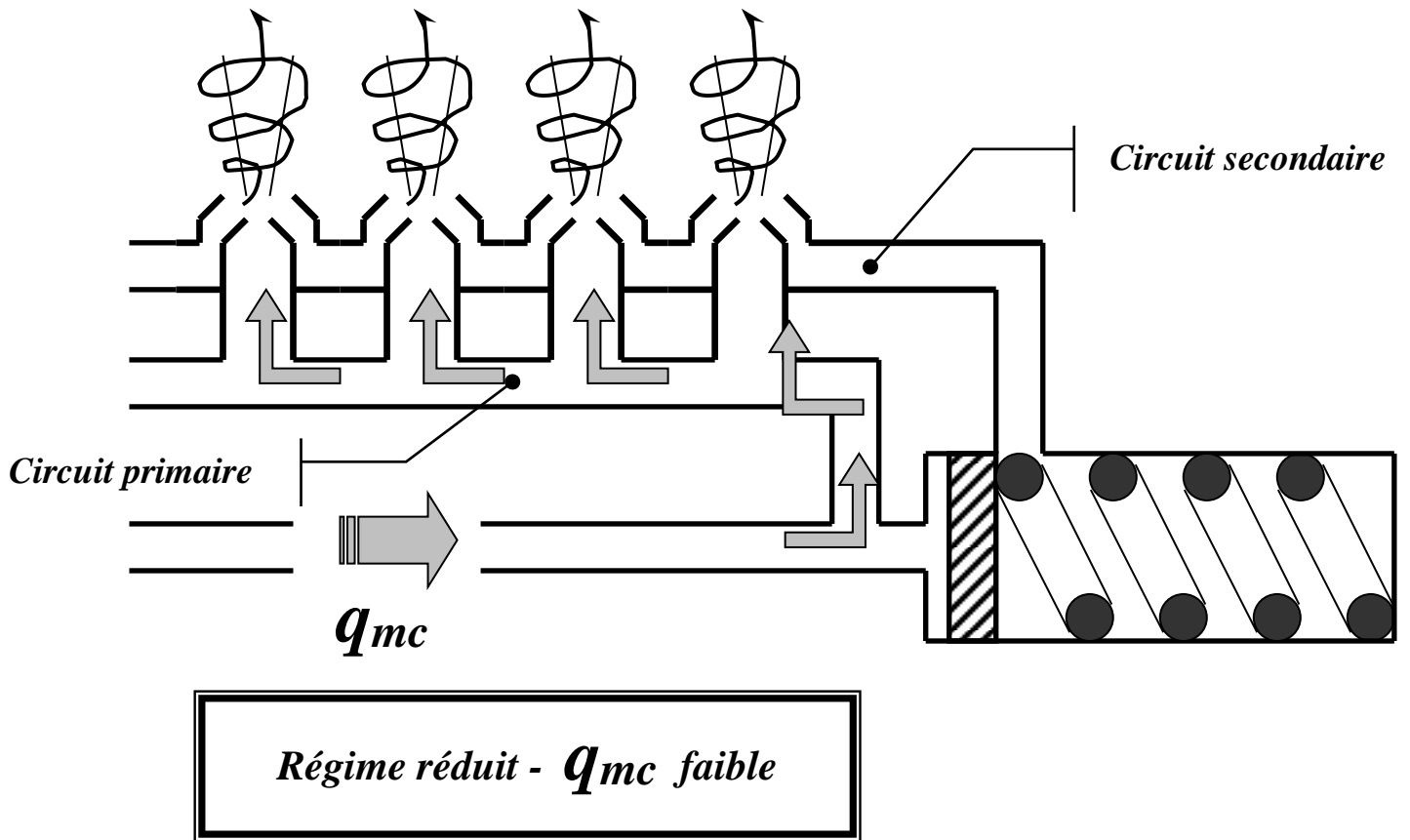
Pour éviter de choisir entre éclater les tuyauteries à haut régime ou avoir une mauvaise combustion à bas régime, les constructeurs ont mis au point un système d'injection à deux circuits.

- ✓ *Circuit primaire* : utilisé aux régimes ralenti : section d'injection petite.
- ✓ *Circuit secondaire* : en service aux régimes élevés : section d'injection grande.

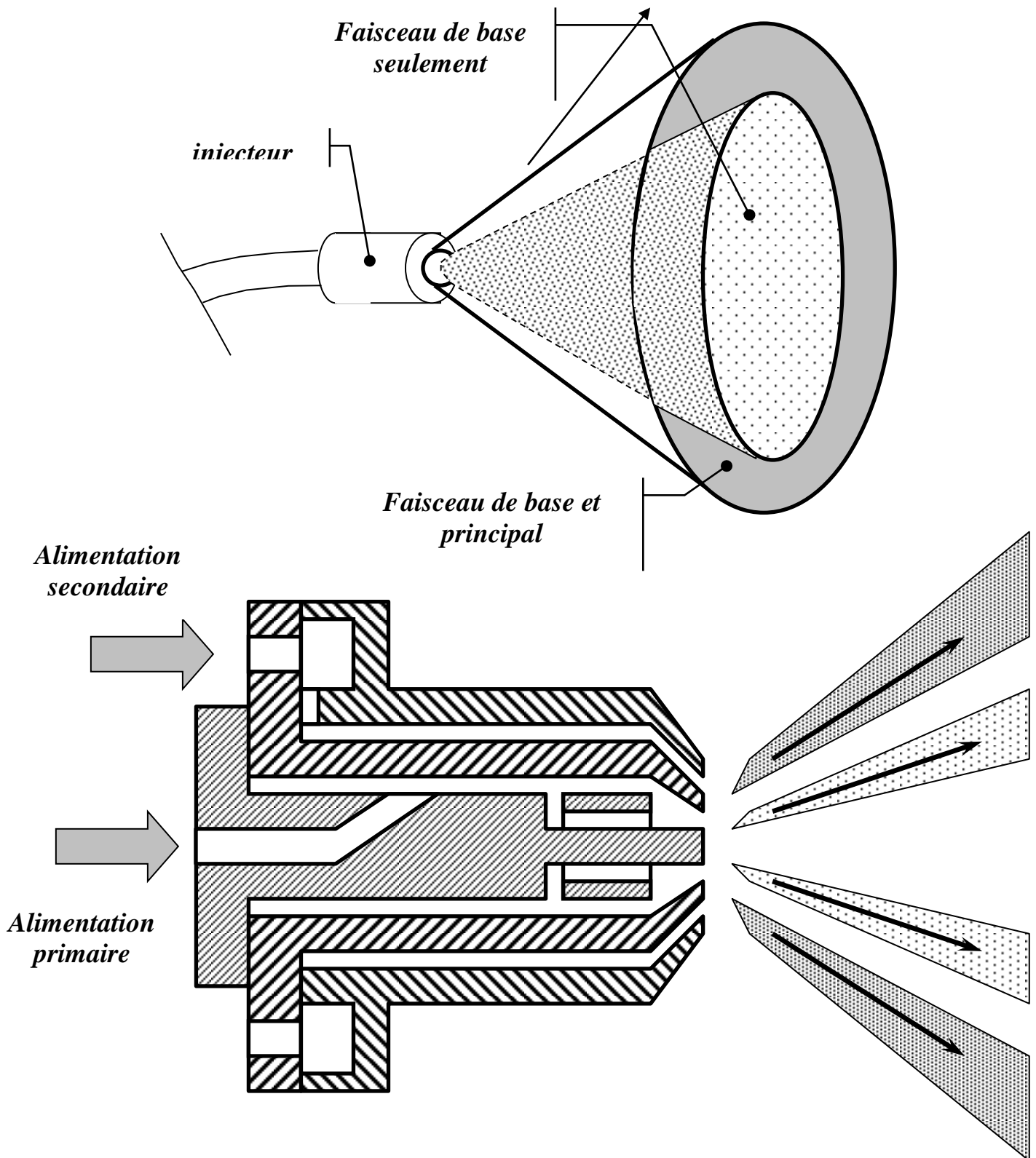
Principe : *injecteur à deux orifices.*



Principe de fonctionnement.

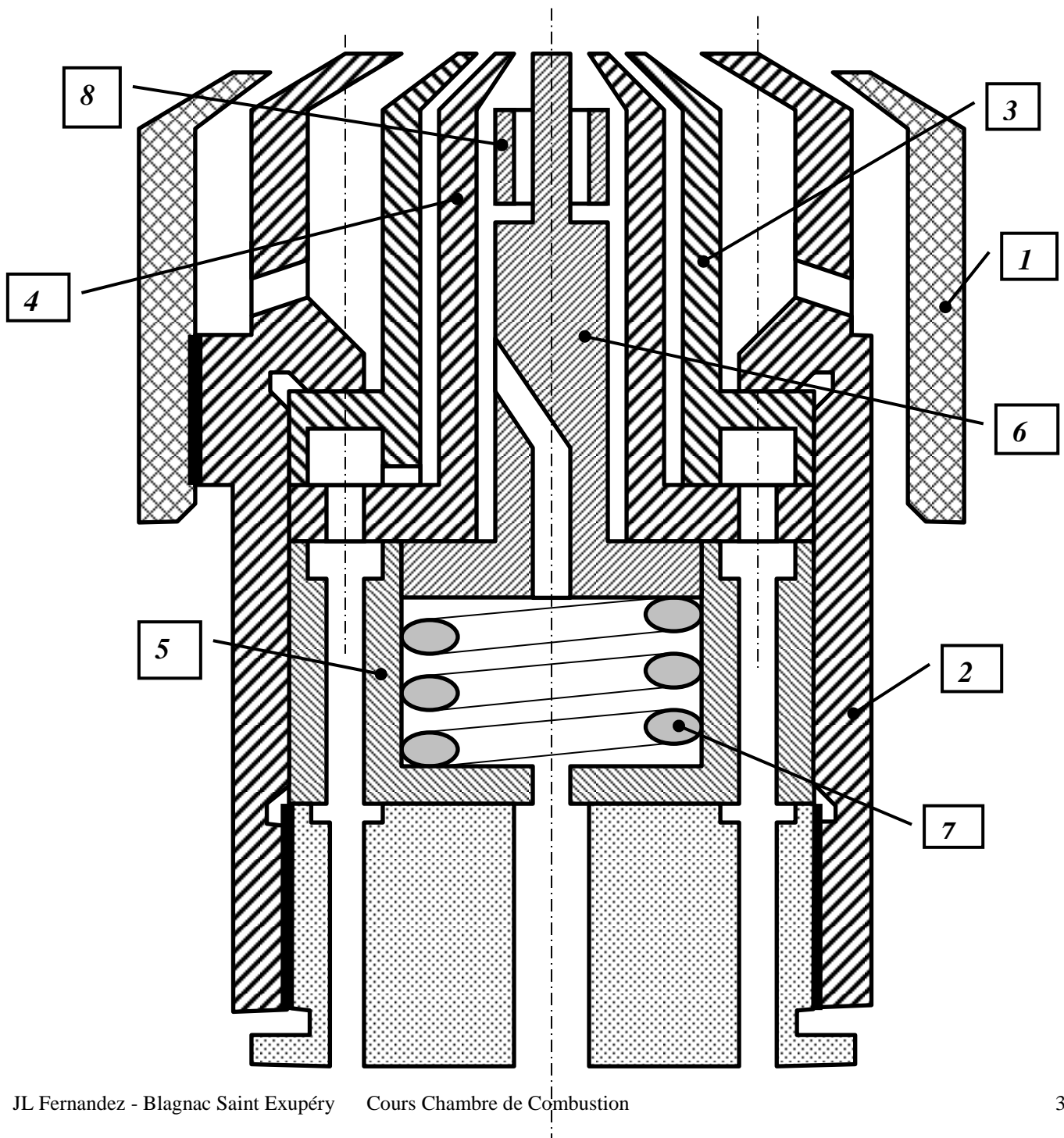


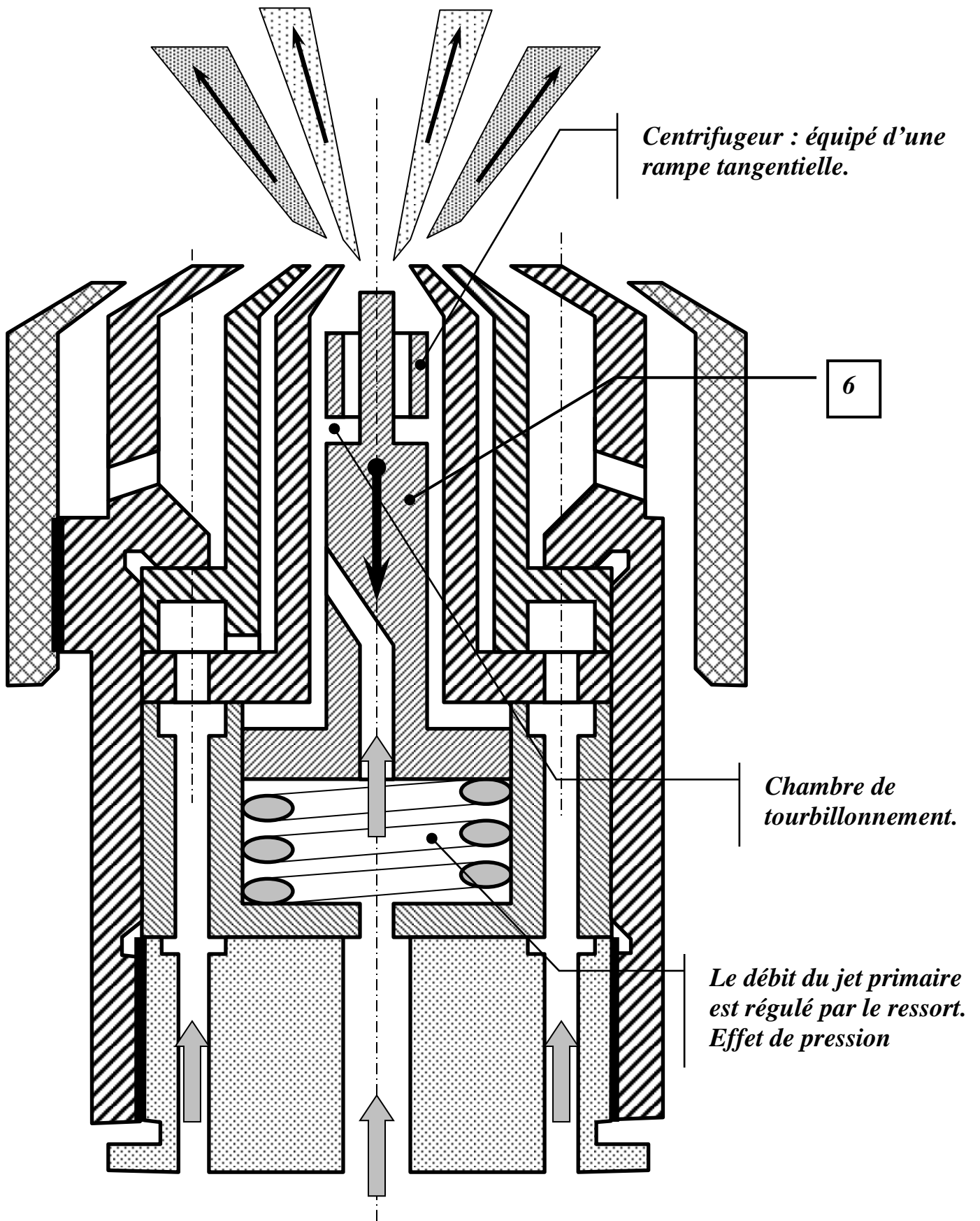
- ✓ *Aspect du faisceau pulvérisé par un injecteur à deux orifices (injecteur bidirectionnel)*



Vue de l'intérieur d'un injecteur : technologie RA AVON

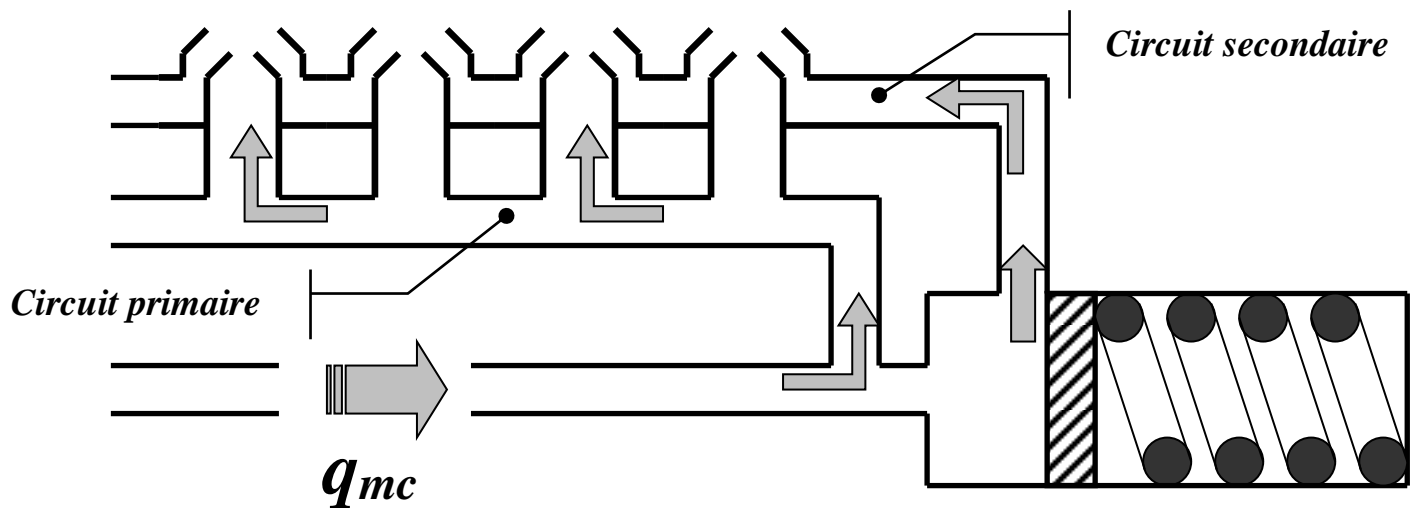
N°	Nature de la pièce	matière
1	coiffre	
2	écrou	
3	Orifice secondaire	
4	Orifice primaire	
5	Corps de l'injecteur	
6	Buse de régulation débit primaire	
7	Ressort de regularisation	
8	centrifugeur	





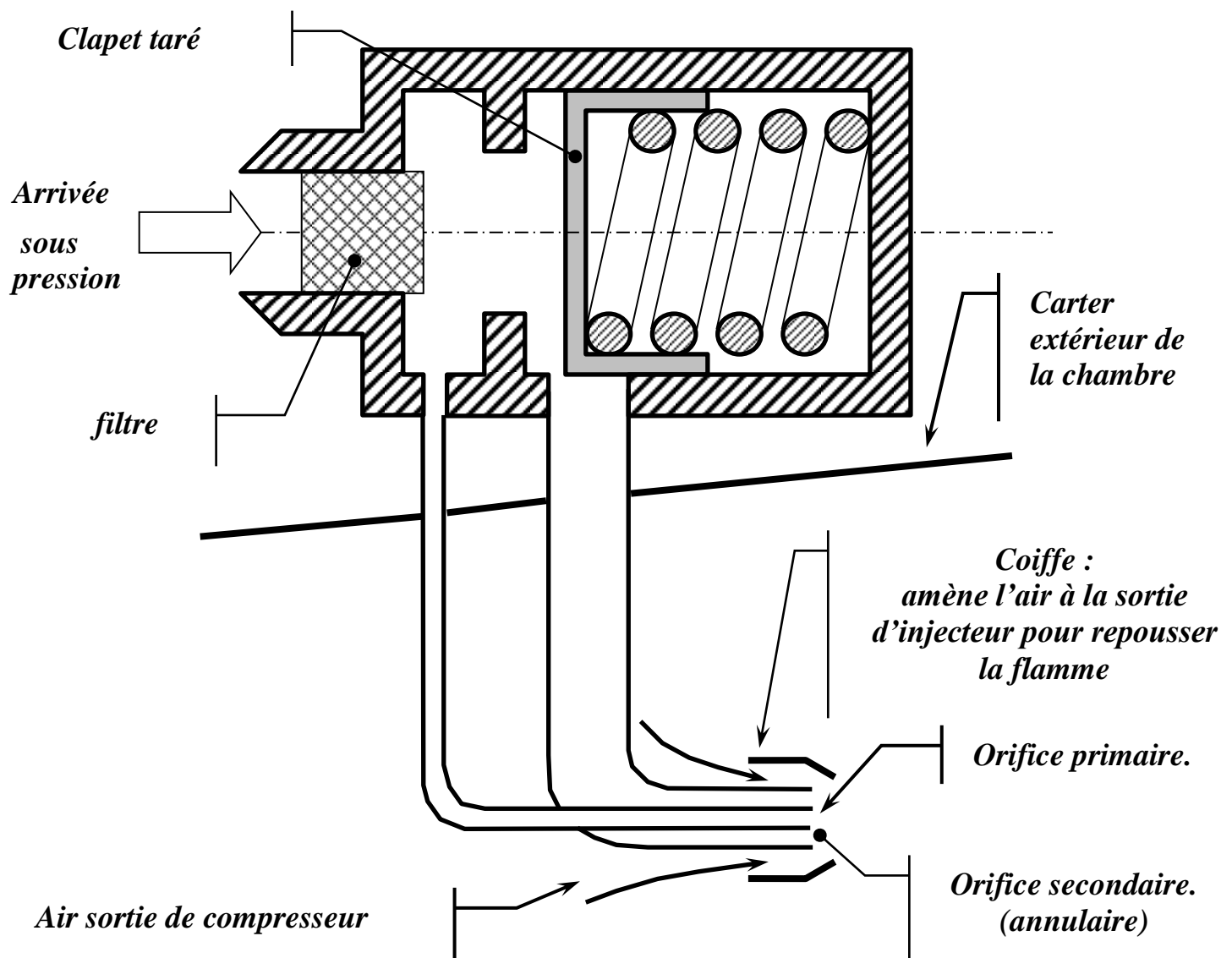
Pression primaire augmente : pièce 6 descend, orifice et débit primaire augmentent.

Injection double débit: clapet taré.

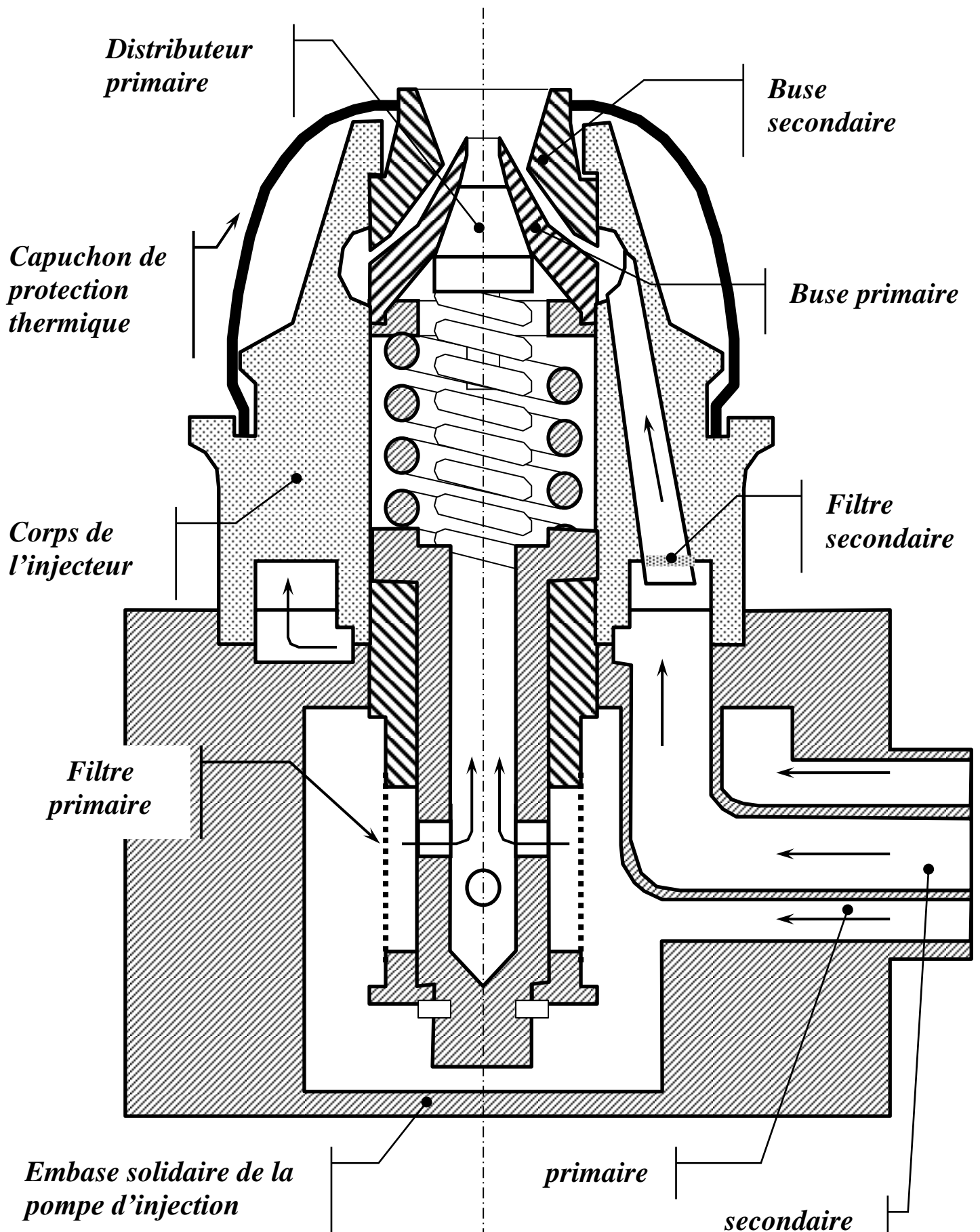


L'injection double débit n'est pas toujours obtenue grâce au clapet taré (valve de distribution) commun à tous les injecteurs et situé à l'entrée des rampes d'injection.

Dans certains cas le clapet est individuel et intégré au corps même de l'injecteur.

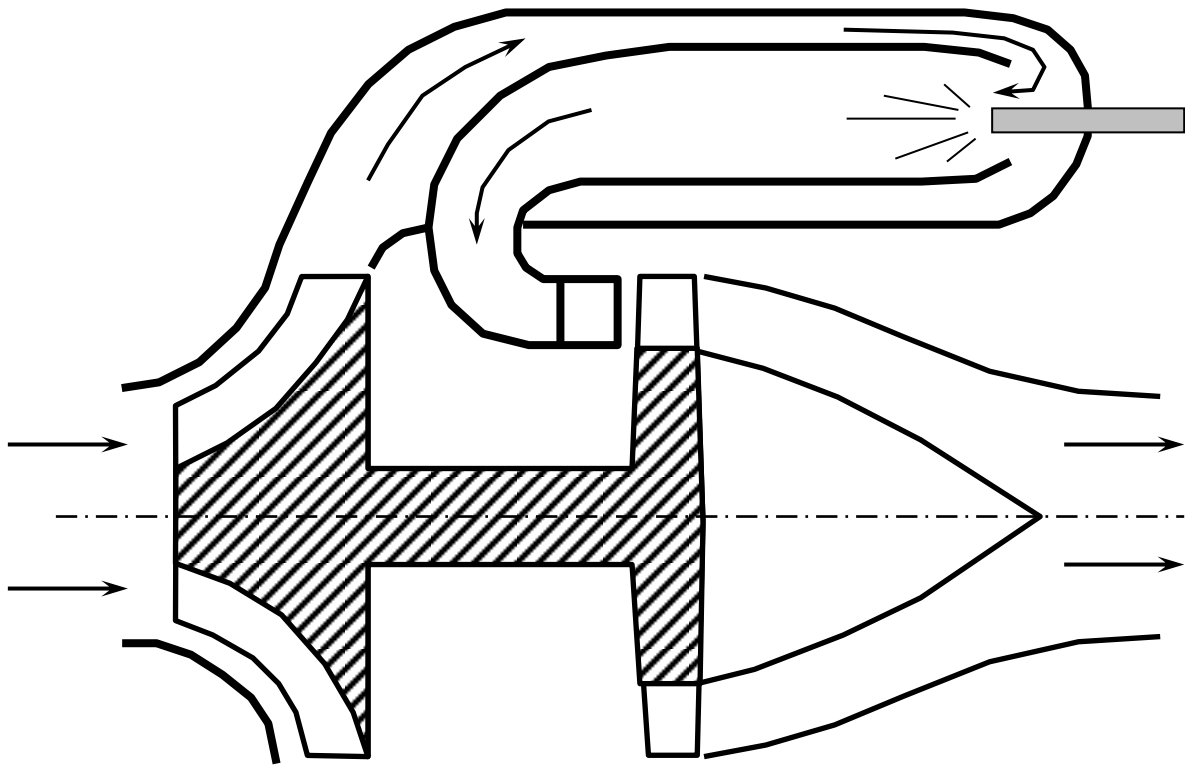


Injecteur : technologie JT4

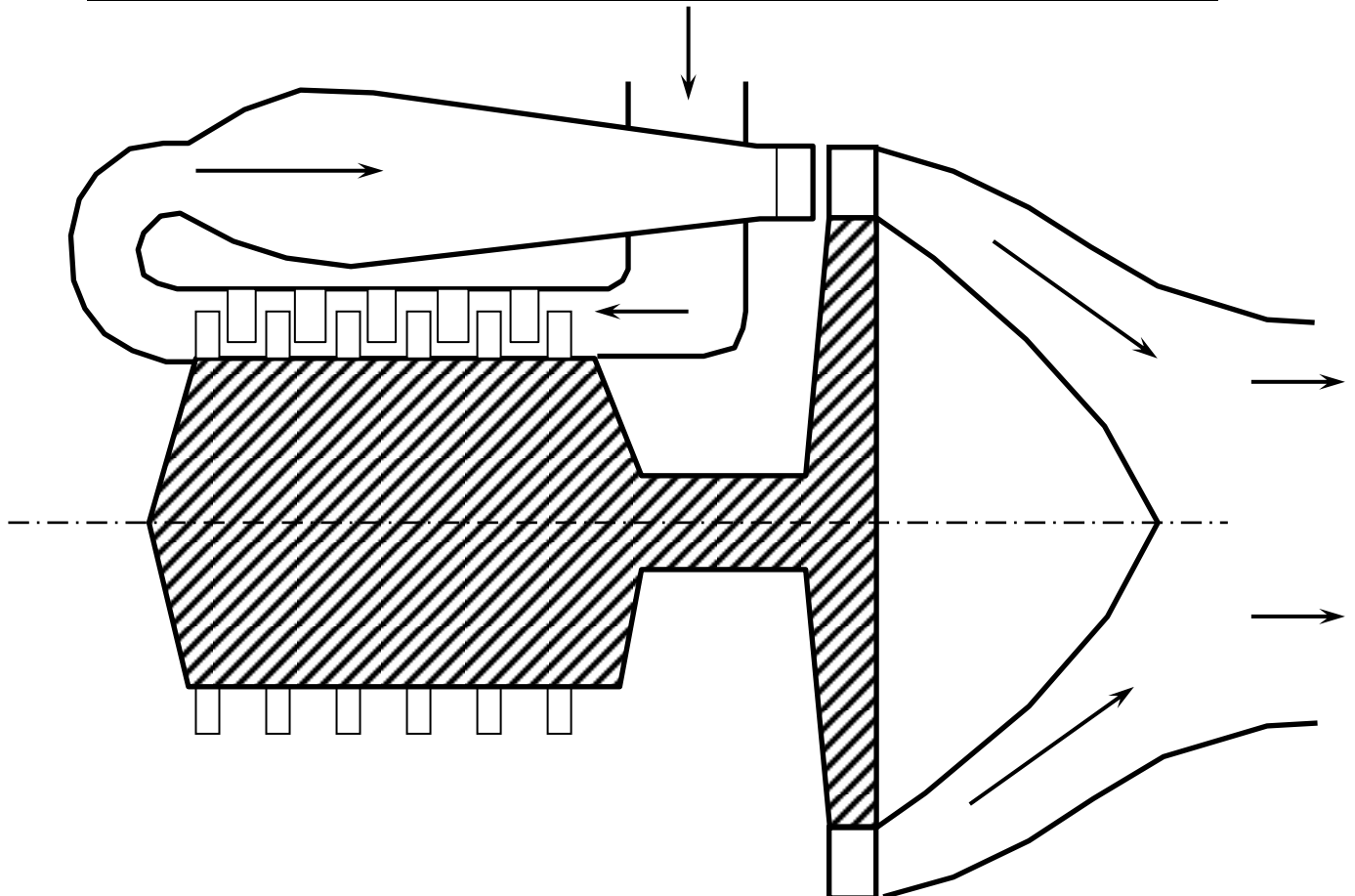


Moteurs compacts : chambre annulaire.

Solution permettant de diminuer la longueur de l'arbre turbine compresseur.



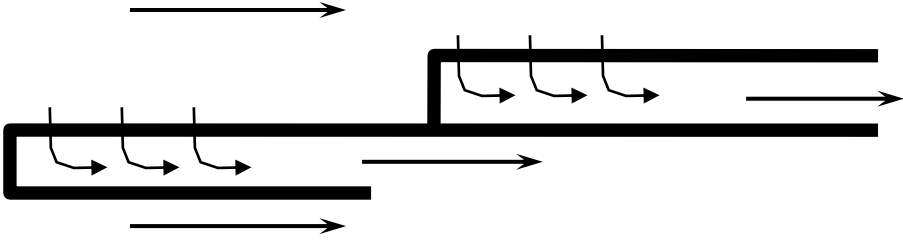
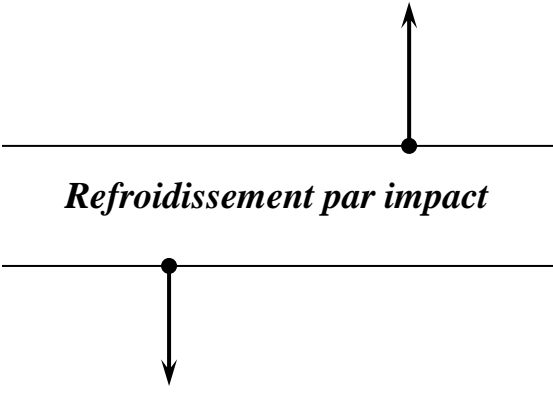
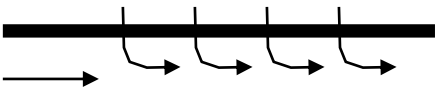
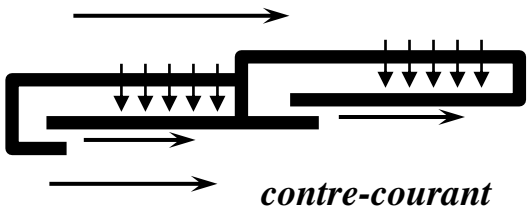
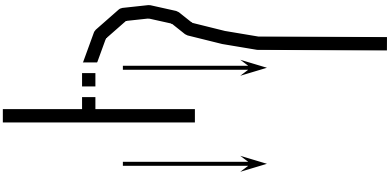
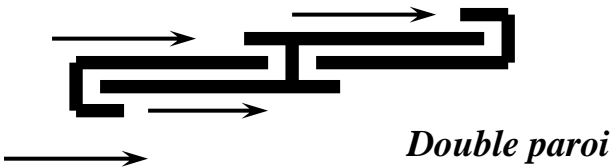
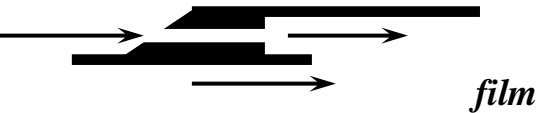
Ecoulement à retour avec chambre de combustion inversé : moteur JT15D.



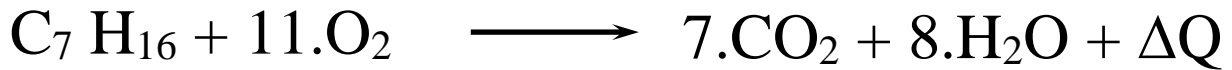
Evolution technologique : techniques de refroidissement des parois.

Technique actuelle

Evolution.



Courant direct + barrières thermiques



Dans la pratique, la combustion n'est pas complète. On trouve dans les gaz d'échappement en plus du gaz carbonique et de la vapeur d'eau les éléments suivants :

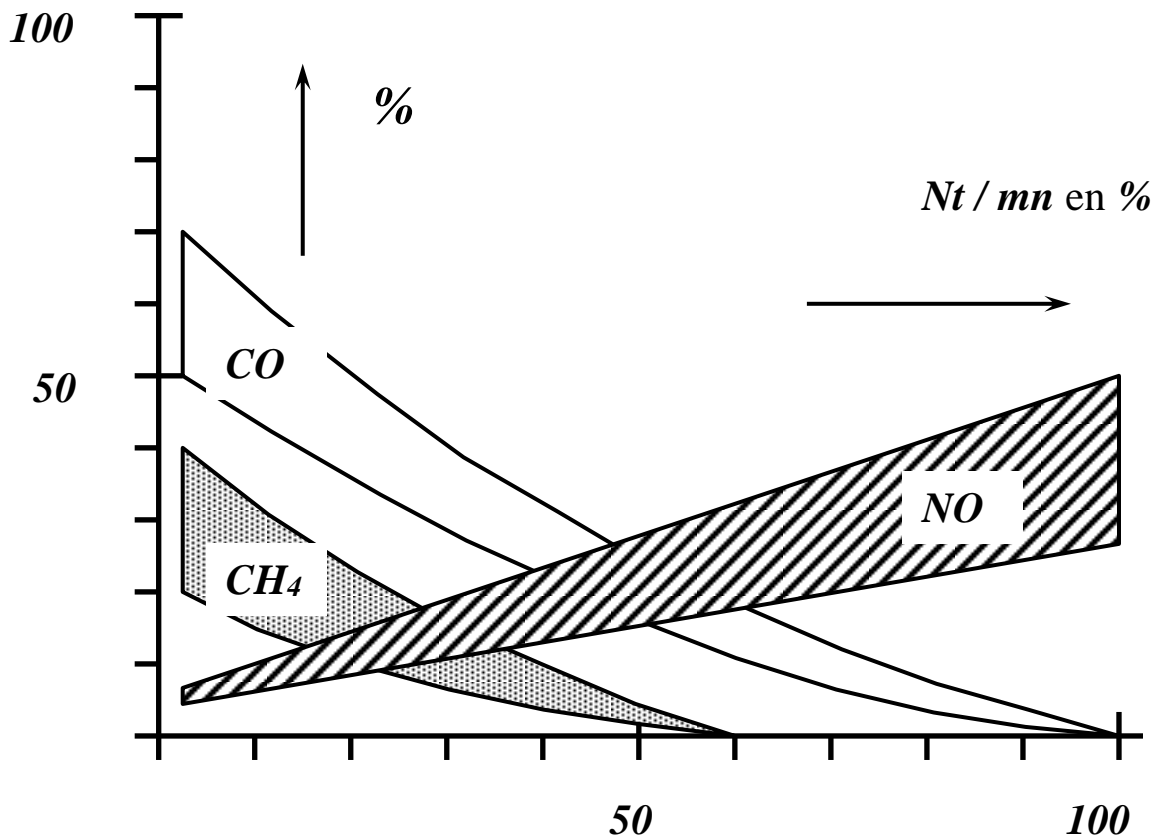
- L'oxyde de carbone **CO** : très toxique à faible régime.
- Des hydrocarbures inbrûlés allant du méthane **CH₄** au kérosène.
- De l'oxyde d'azote **NO** et **NO₂**,

N₂ en grande proportion dans l'air se combine à l'oxygène aux hautes températures : $N_2 \longrightarrow NO_2$

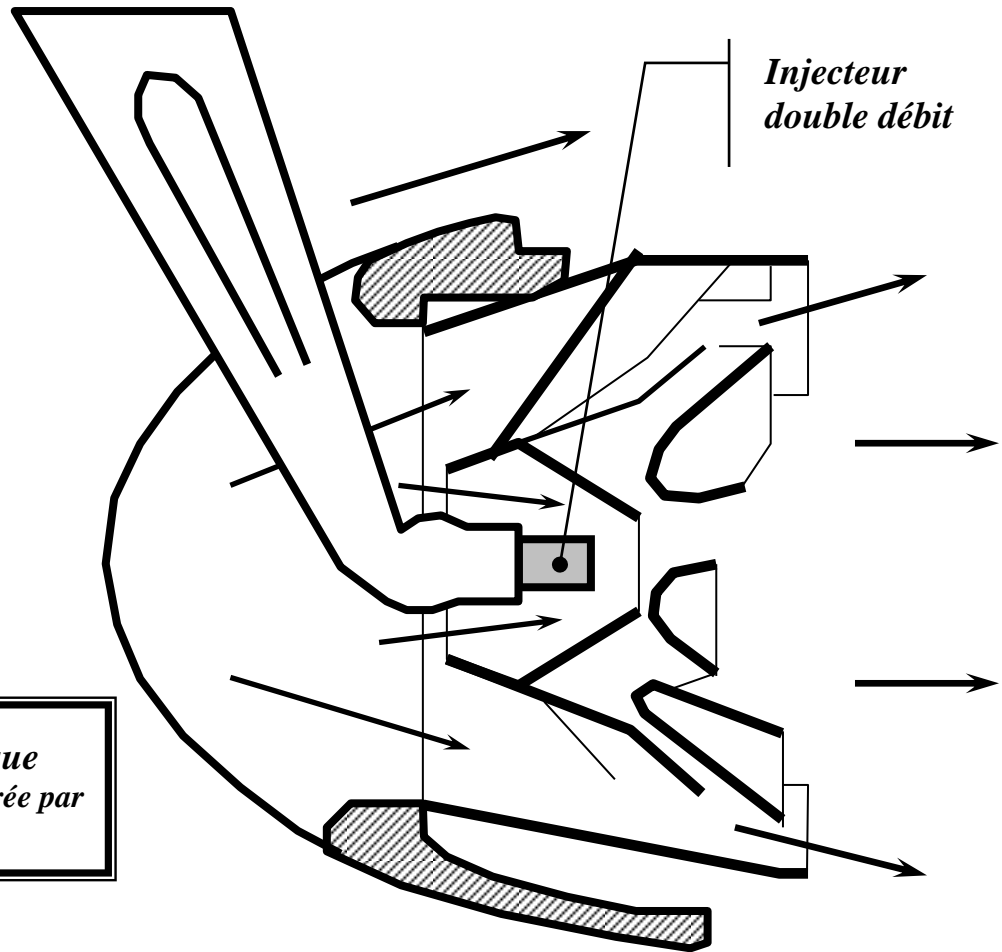
NO₂ augmente avec la température dans la zone primaire de combustion.

NO très toxique apparaît aux hauts régimes.

- Des fumées (particules de carbone),
- Produits soufrés < 0,2 % de la masse de carburant.

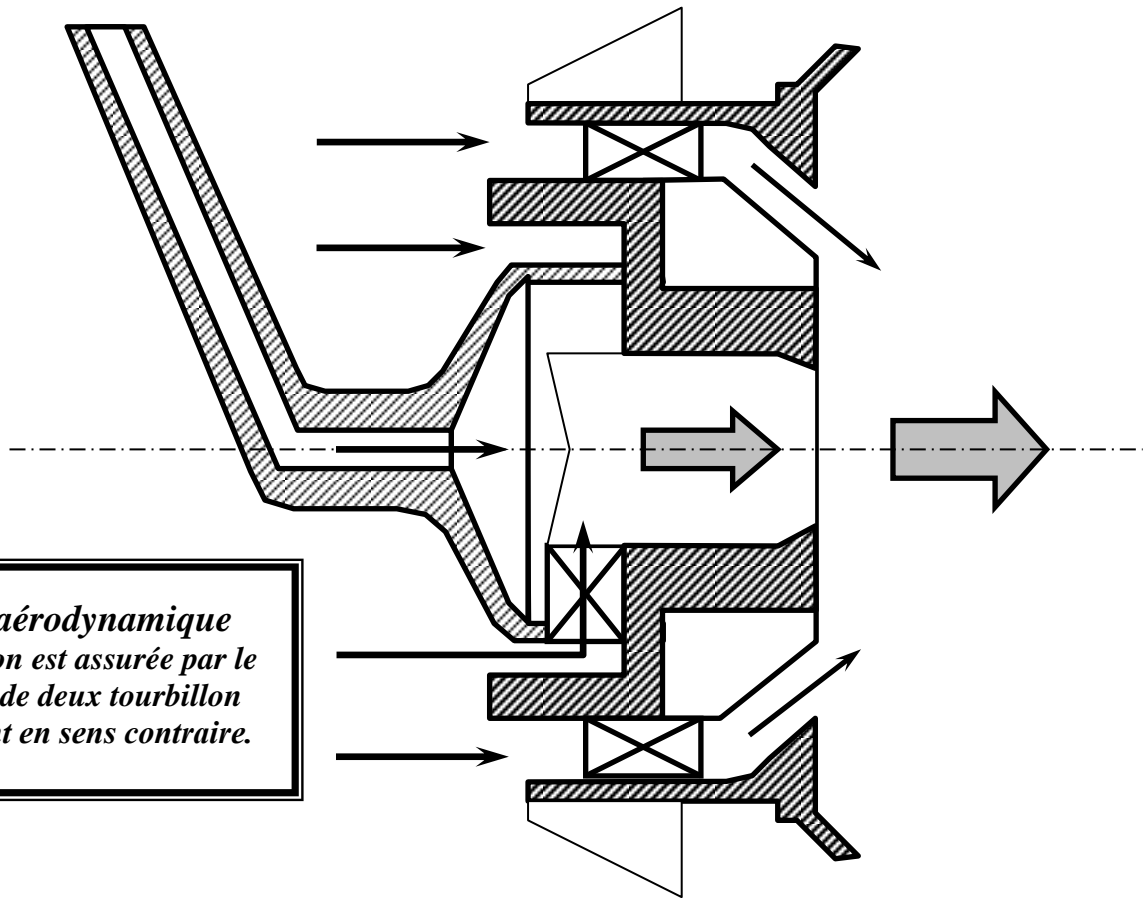


*Injecteur mécanique
la pulvérisation est assurée par
la pression*



*Injecteur
double débit*

*Injecteur aérodynamique
la pulvérisation est assurée par le
cisaillement de deux tourbillon
d'air tournant en sens contraire.*



Amélioration de l'injection du carburant : réduction des polluants - rendement meilleur.