

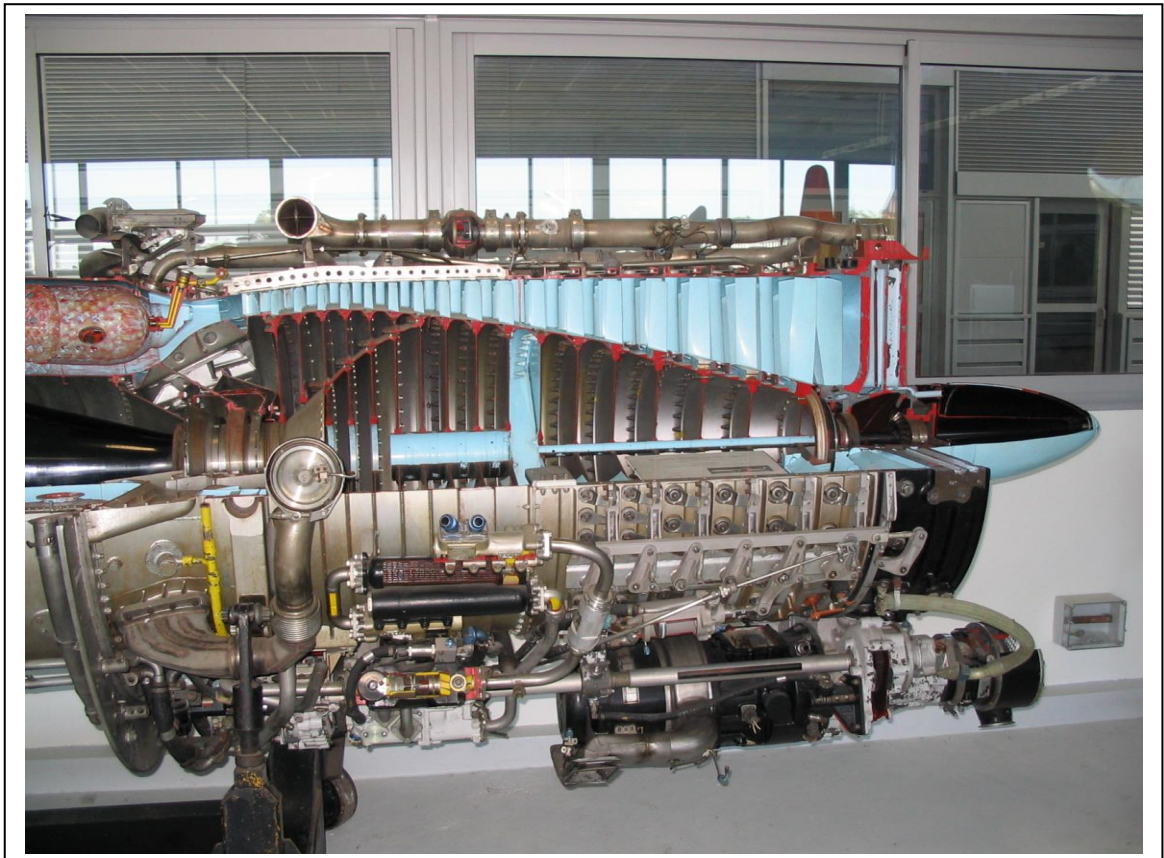
Cours Thermopropulsion COMPRESSEUR



Définition.

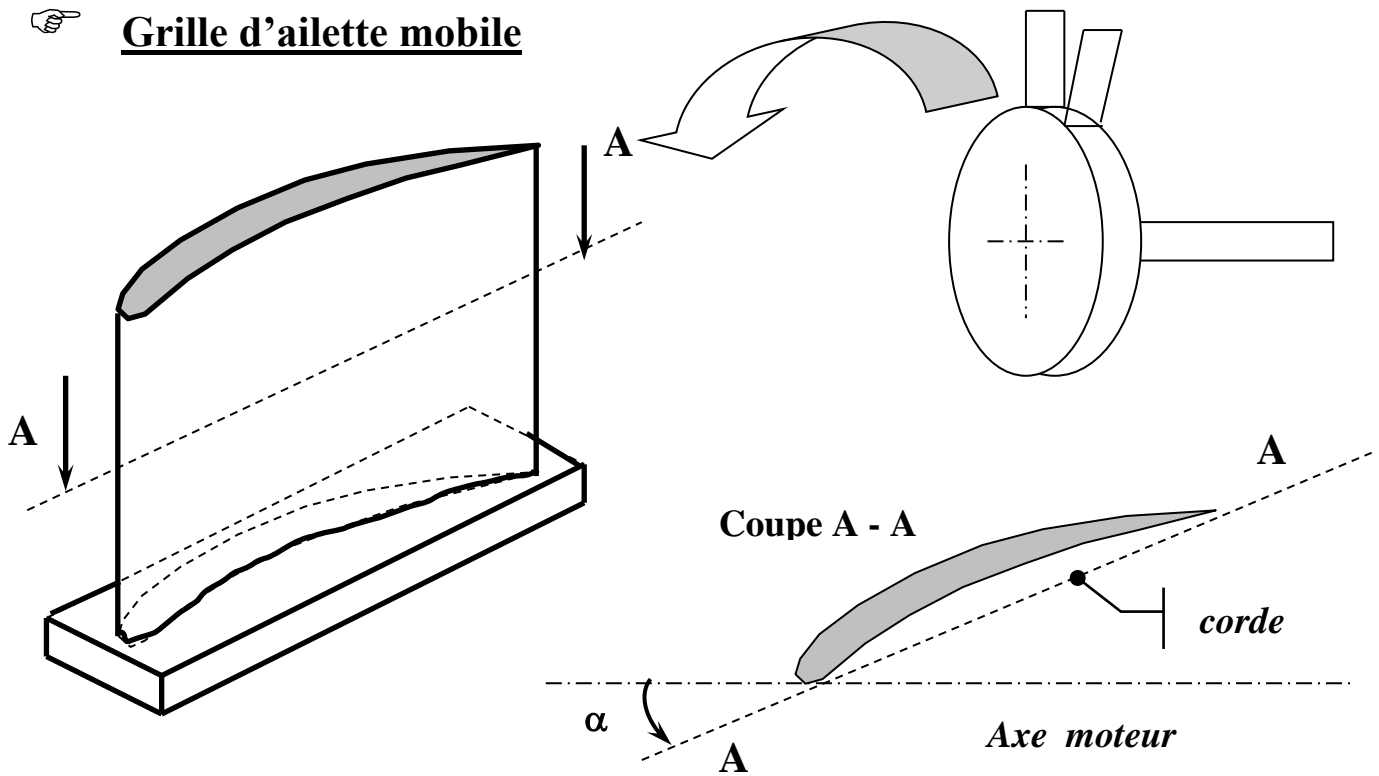
Le compresseur axial est une machine dynamique qui assure :

- ☞ L'établissement d'un débit d'air par mise en vitesse de l'air lorsque la vitesse de l'avion est nulle ou faible.
- ☞ Une vitesse d'écoulement de l'air à l'entrée de la chambre de combustion relativement indépendante de la vitesse de vol de l'avion (bonne stabilité de la combustion).
- ☞ Un apport d'énergie cinétique au niveau du rotor par accélération de la masse d'air qui traverse le compresseur grâce au mouvement de rotation.
- ☞ La transformation de l'énergie cinétique en énergie de pression dans le stator par amortissement de la vitesse de rotation communiquée à l'air par le rotor.

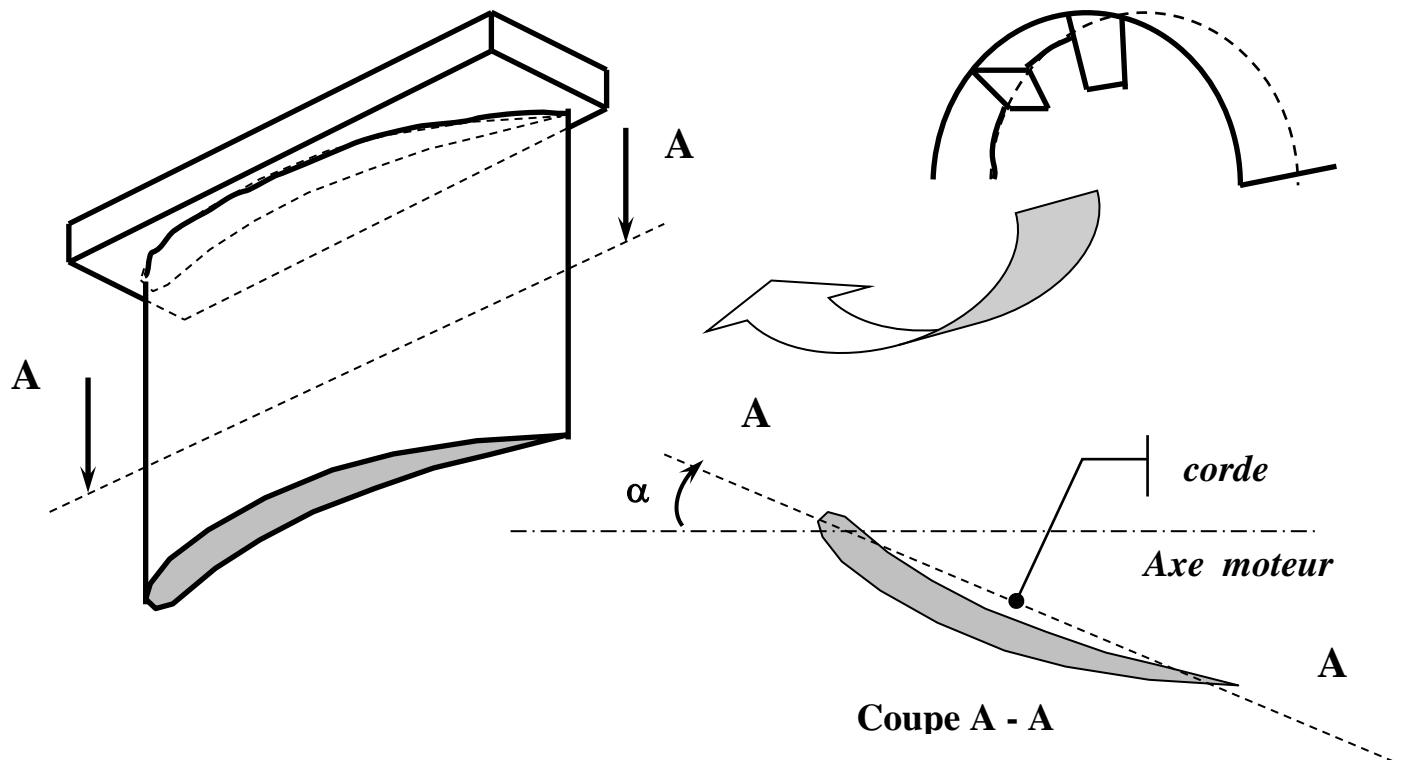


Un compresseur axial est composé d'une succession de grille d'ailette fixe et de grille d'ailette fixe.

Grille d'ailette mobile

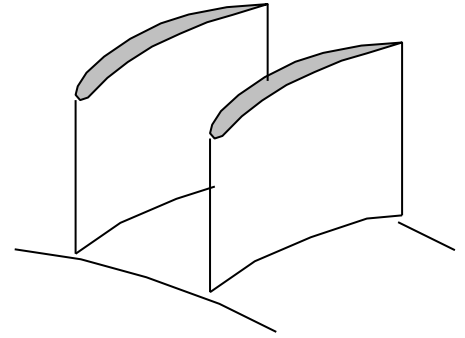


Grille d'ailette fixe.



Différents types de grilles.

Lorsqu'elle est interposée dans un écoulement, une grille de profils constitue, pour le fluide qui la traverse, une suite de canaux qui selon la courbure des profils seront convergent ou divergent.

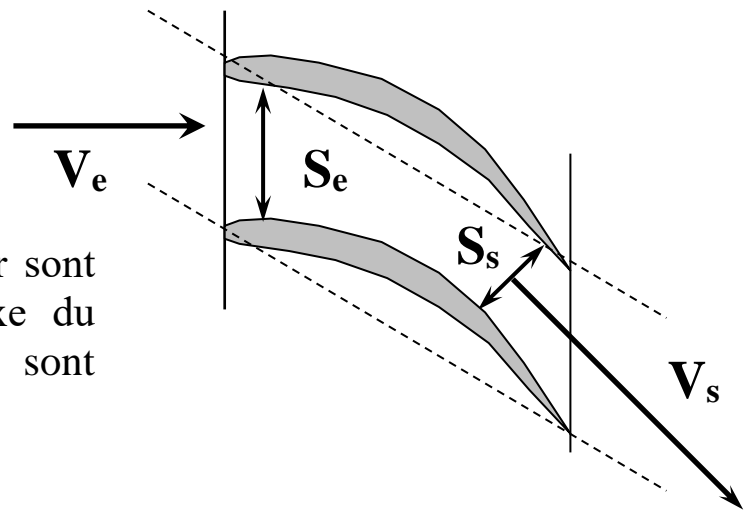


Canal convergent.

Loi de conservation du débit :

$$Q = VS :$$

$S_s \leq S_e \Rightarrow V_s \geq V_e$. Les filets d'air sont accélérés et ils sont déviés de l'axe du moteur. On dit que les profils sont déviateurs.

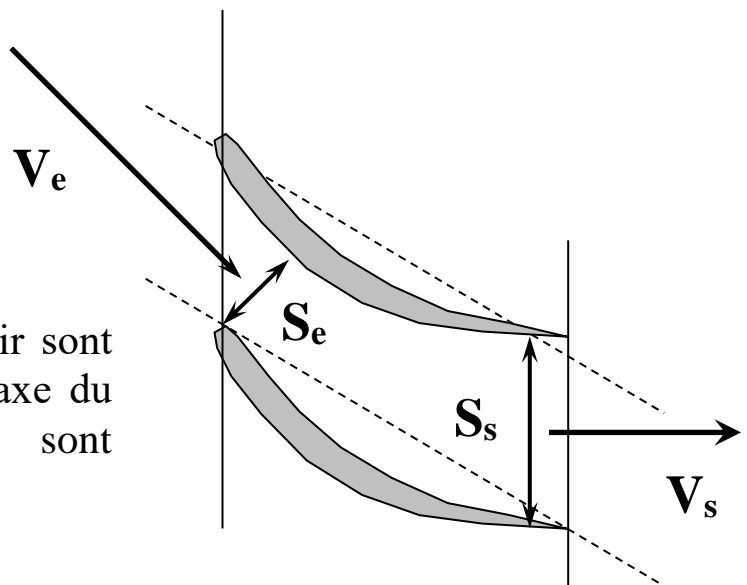


Canal divergent.

Loi de conservation du débit :

$$Q = VS :$$

$S_e \leq S_s \Rightarrow V_s \leq V_e$. Les filets d'air sont ralentis et ils sont redressés dans l'axe du moteur. On dit que les profils sont redresseurs.



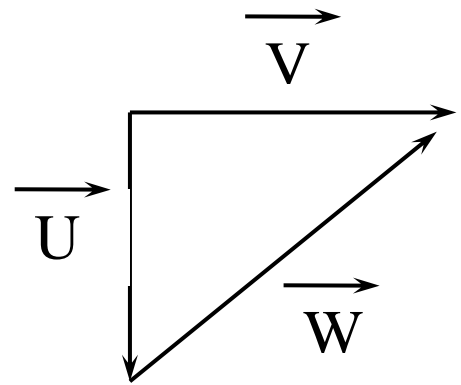
Théorème de composition des vitesses.

Vitesse absolue \vec{V} (observateur fixe).

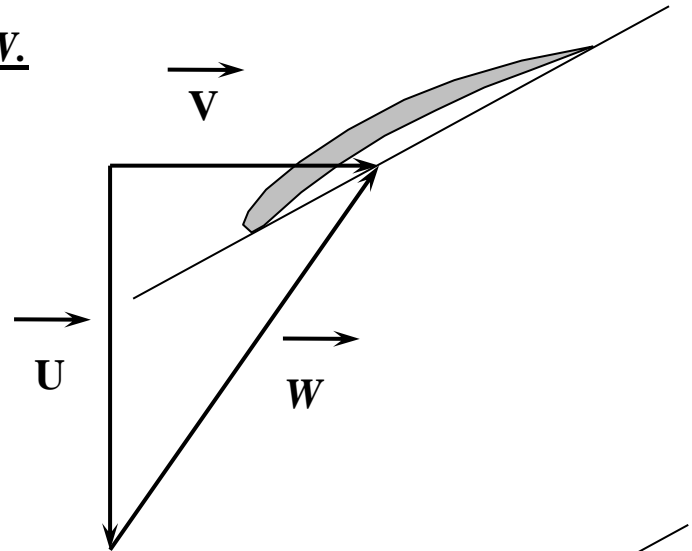
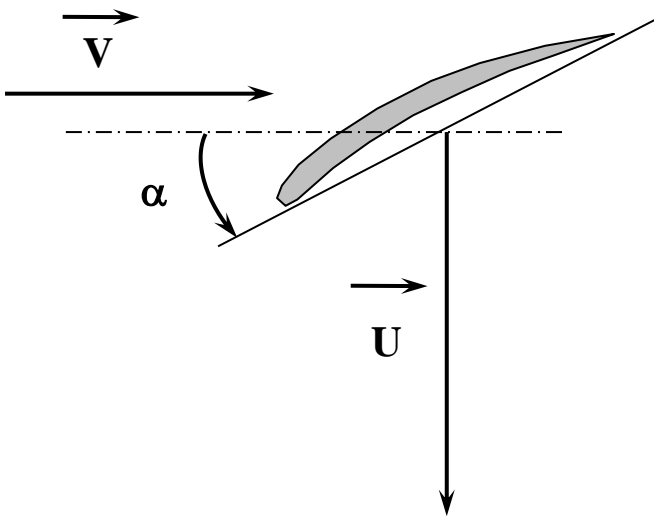
Vitesse relative \vec{W} (observateur solidaire de la pièce mobile).

Vitesse d'entraînement. \vec{U} .

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$$



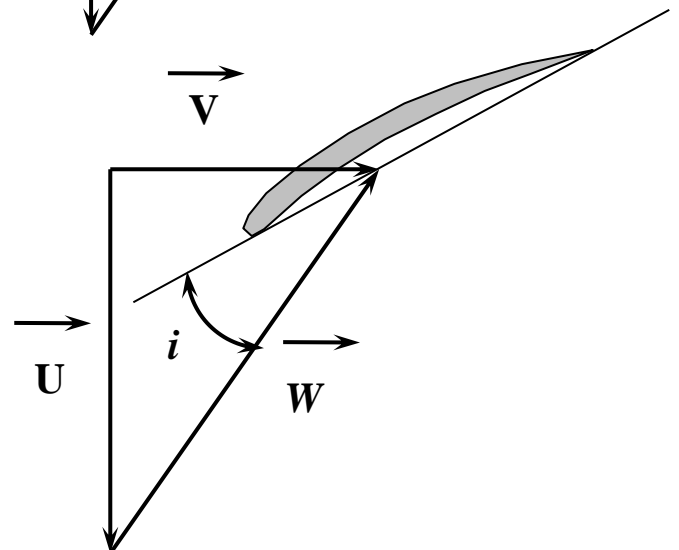
Construction de la vitesse relative W .



Angle d'incidence d'une ailette.

L'ailette fonctionne comme un profil d'aile.

La valeur de l'angle d'incidence i conditionne l'écoulement autour de l'ailette.



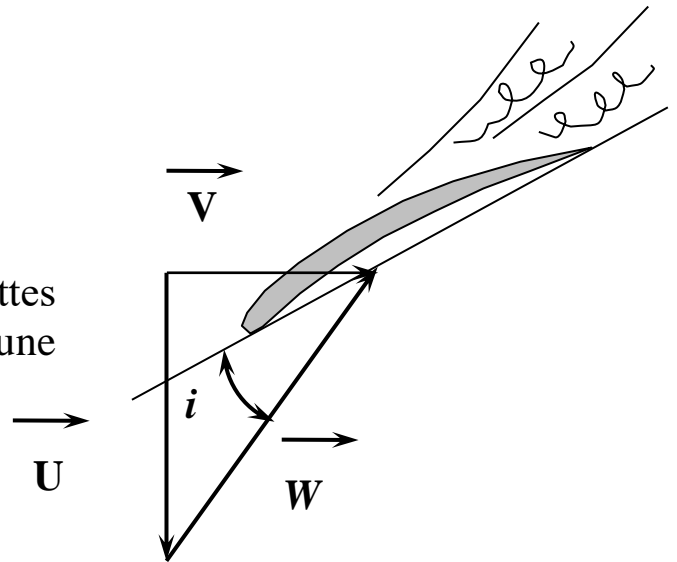
L'efficacité de l'ailette dépend directement de l'angle d'incidence i . Dans les compresseurs actuels $14^\circ \leq i \leq 17^\circ$.

Fonctionnement.

Angle d'incidence trop grand.

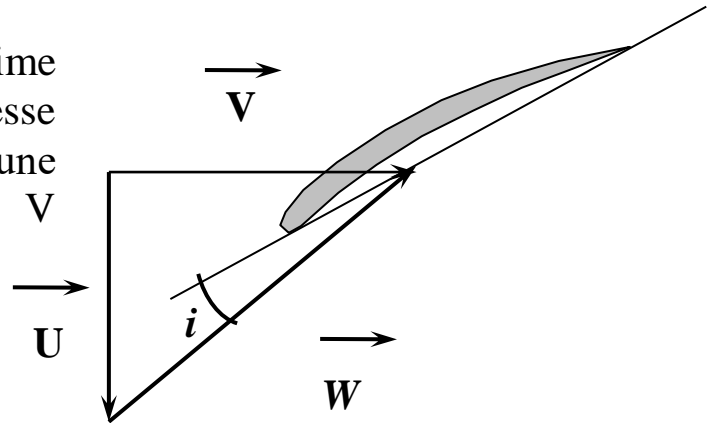
L'écoulement sur l'extrados des ailettes décolle. Ce régime correspond à une diminution de la vitesse d'entrée V .

($U = cte$).



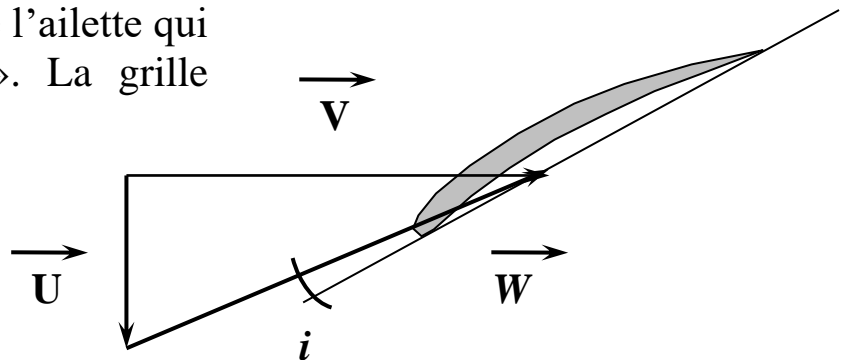
Angle d'incidence trop faible.

L'efficacité de l'ailette diminue. Ce régime correspond à une augmentation de la vitesse d'entrée V ($U = cte$), ou encore à une diminution de U pour une vitesse V constante.



Angle d'incidence négatif.

L'air vient frapper l'extrados de l'ailette qui travaille alors en « moulinet ». La grille d'ailette freine l'écoulement.



Il existe un angle d'incidence i et par conséquent un rapport V / U qui permet d'obtenir la meilleure efficacité du compresseur. Si l'on s'écarte de ce rapport optimum l'efficacité du compresseur diminue et dans des cas extrêmes il y a apparition d'instabilité de fonctionnement du compresseur.

Fonctionnement d'un étage complet.

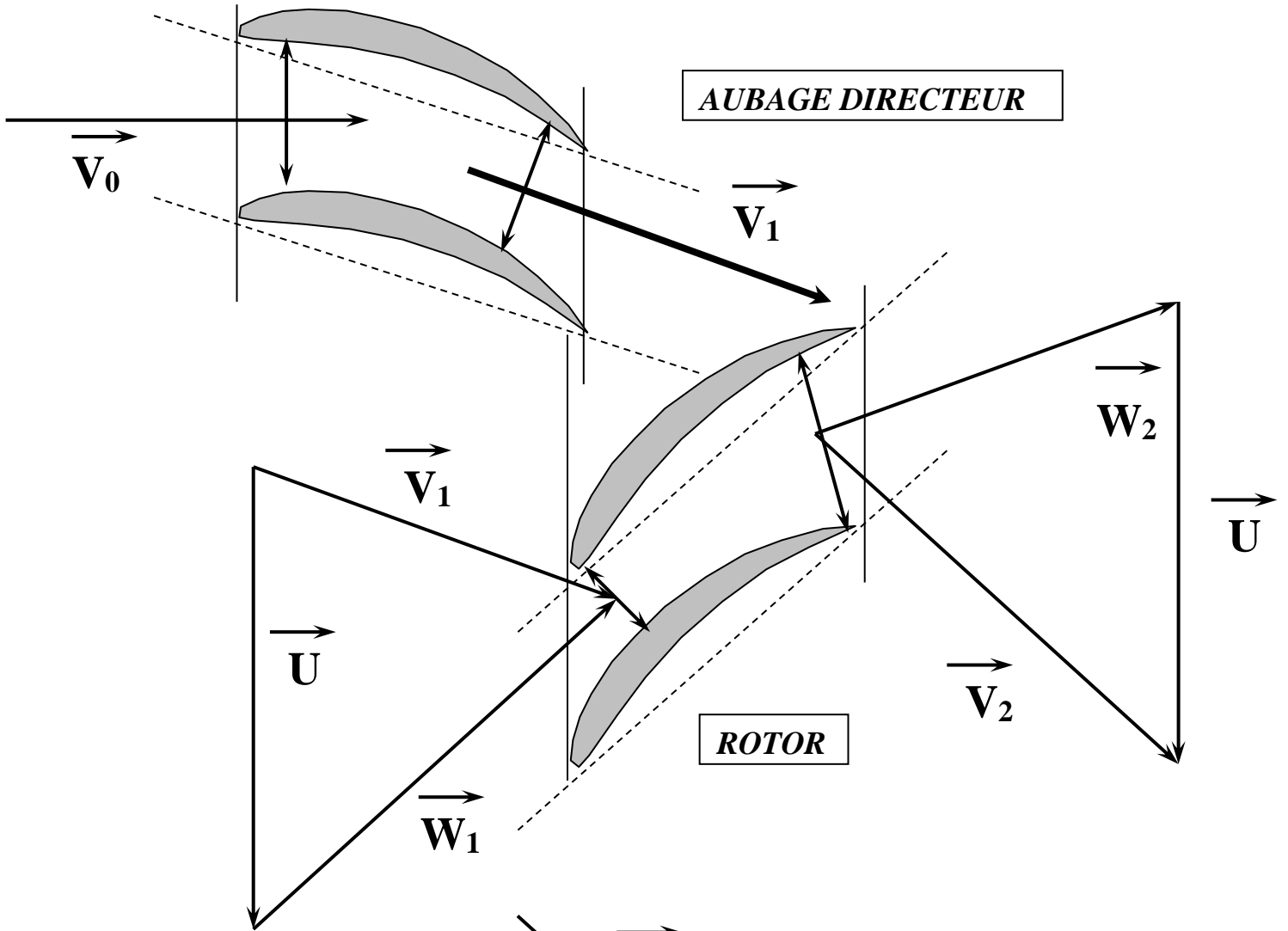
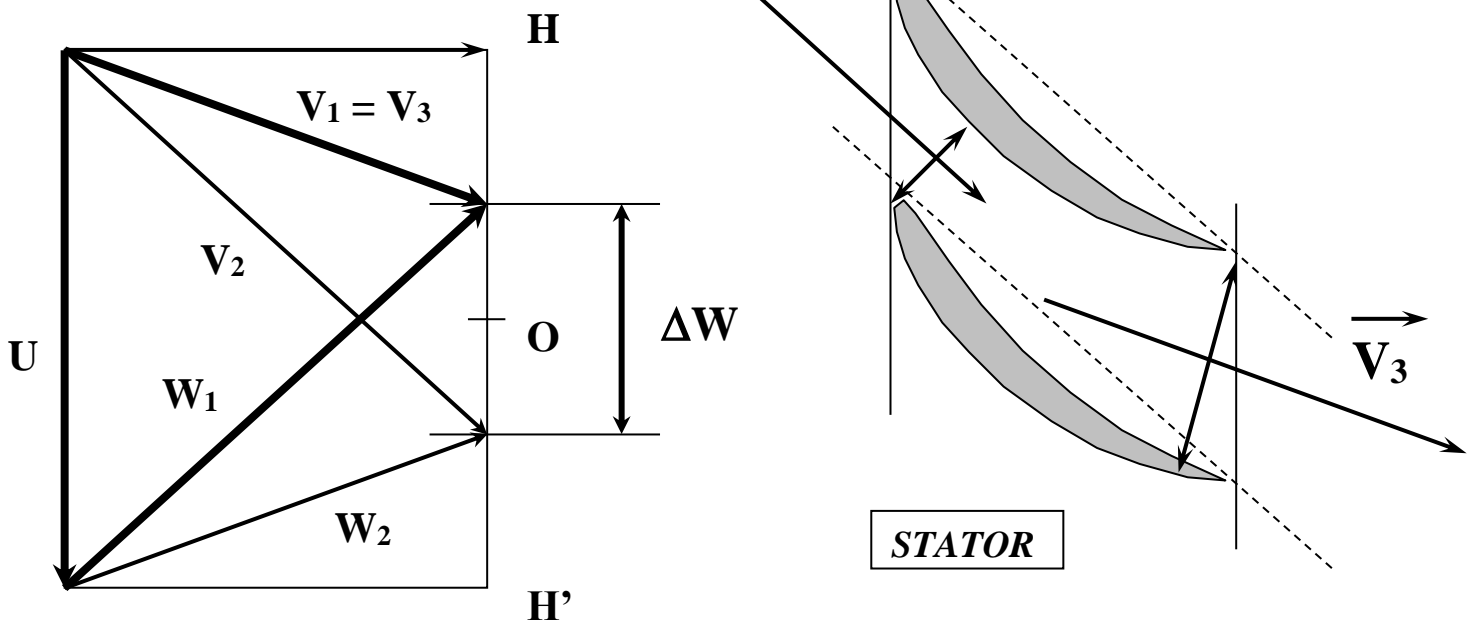


Diagramme des vitesses d'un étage compresseur.



Energie de pression.

On montre que l'énergie de pression gagnée dans un étage s'écrit :

$$P_{s3} - P_{s1} = \rho \cdot U \cdot \Delta W$$

Pour accroître le gain de pression, il suffit d'augmenter soit U soit ΔW .

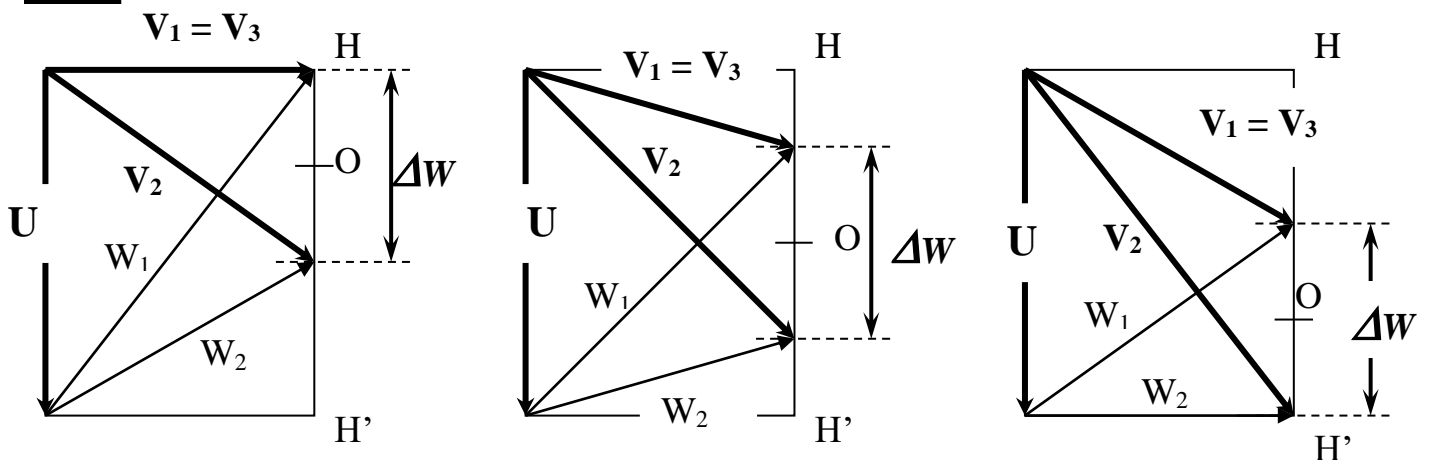
☞ U est limitée par des contraintes d'ordre mécaniques et par des l'apparition de phénomènes soniques en bout d'ailette.

☞ ΔW est limitée par l'apparition d'instabilités de fonctionnement du compresseur.

degré de réaction.

Le produit $U \cdot \Delta W$ ne suffit pas à définir de façon précise un étage de compression.

Schéma :



Dans les trois cas présentés ci-dessus U et ΔW ne varie pas. Le travail de compression reste donc constant. Ce qui diffère, c'est la façon dont est obtenue la compression.

degré de réaction : C'est le rapport entre l'énergie de pression gagnée dans le rotor et l'énergie de pression gagnée dans l'étage.

$$\sigma = OH' / HH'$$

On montre que l'énergie de pression gagnée dans la grille mobile s'écrit :

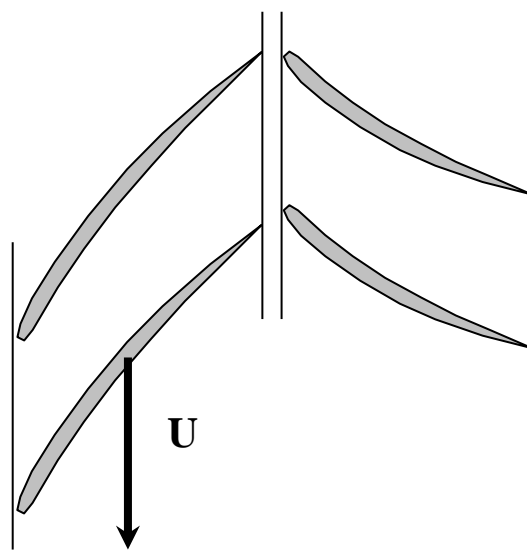
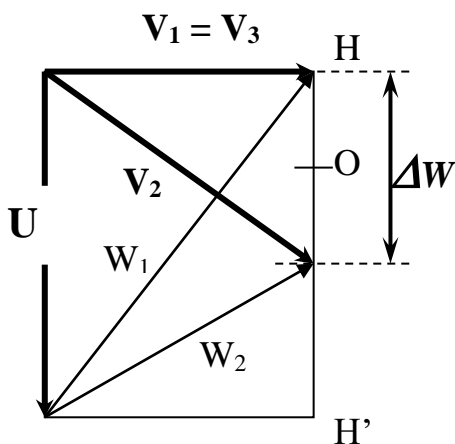
$$P_{s2} - P_{s1} = \rho.OH'.\Delta W$$

On montre que l'énergie de pression gagnée dans la grille fixe s'écrit :

$$P_{s3} - P_{s2} = \rho.HO.\Delta W$$

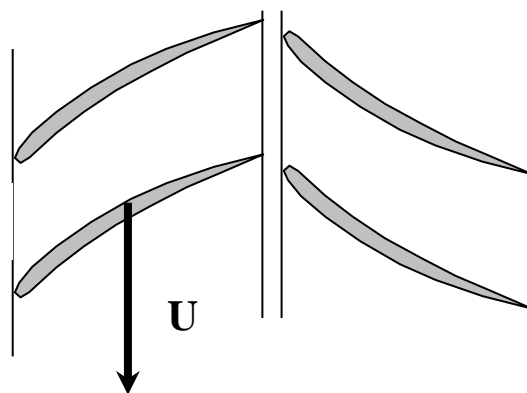
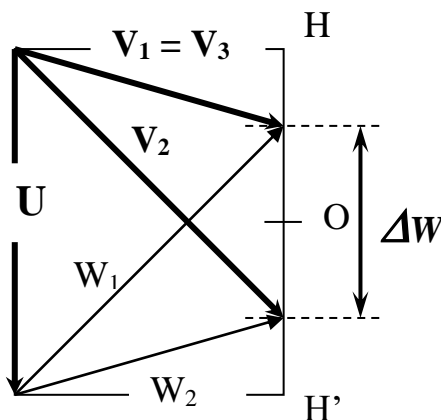
☞ **Cas 1** : $OH' > HO \Rightarrow OH'.\Delta W > HO.\Delta W$:

la compression dans le **rotor** est plus forte que dans le **stator**.



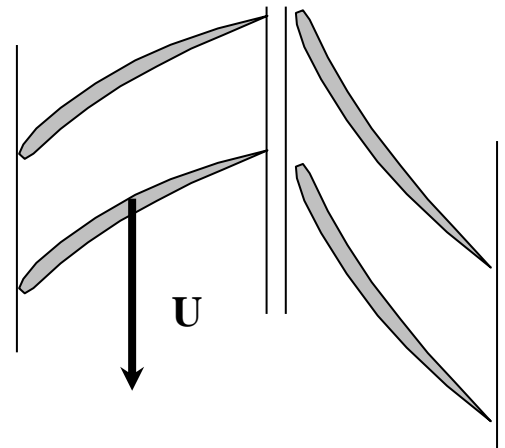
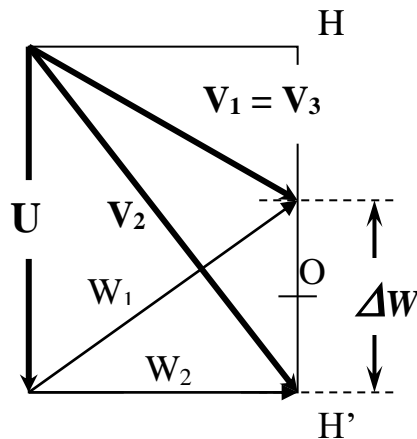
☞ **Cas 2** : $OH' = HO \Rightarrow OH'.\Delta W = HO.\Delta W$:

la compression est la même dans le **rotor** et dans le **stator**.



☞ **Cas 3** : $OH' < HO \Rightarrow OH' \cdot \Delta W < HO \cdot \Delta W$:

la compression dans le **stator** est plus forte que dans le **rotor**.



RESUME

Dans un étage de compresseur, le rotor reçoit en provenance de la turbine de l'énergie mécanique. La fonction du compresseur est de transmettre cette énergie, sous forme d'énergie cinétique et d'énergie de pression, à l'air qui traverse le compresseur.

Dans le ROTOR ; en plus de l'établissement du débit, il y a :

☞ **Augmentation** de l'énergie de pression : $P_{s2} - P_{s1} = \rho \cdot OH' \cdot \Delta W$

☞ **Augmentation** de la vitesse donc de l'énergie cinétique : $\frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)$

Dans le STATOR ;

☞ **Transformation** de l'énergie de vitesse $\frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)$ en énergie de pression $P_{s3} - P_{s2} = \rho \cdot HO \cdot \Delta W$

☞ **Modification** de la direction de l'écoulement de manière qu'en sortie de STATOR, cette direction soit la même que devant le ROTOR de l'étage considéré (compresseur périodique).

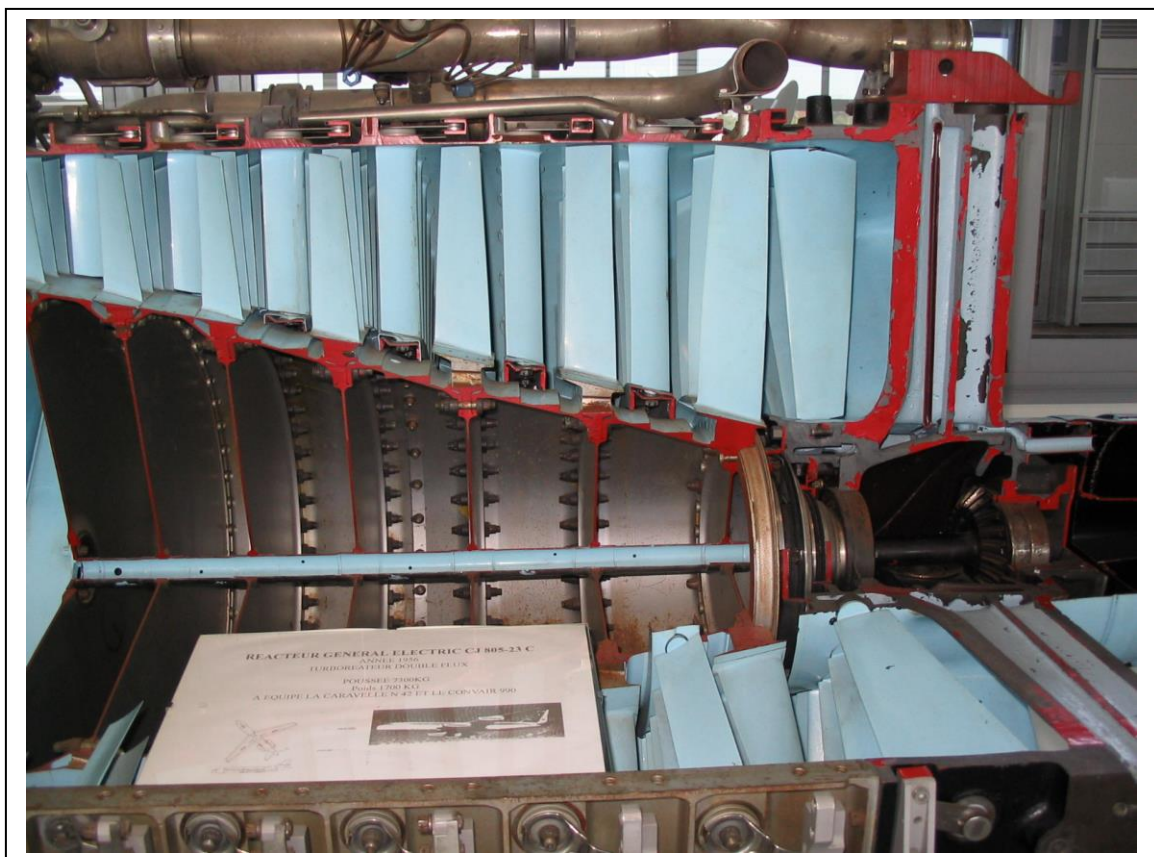
Rapport manométrique par étage .

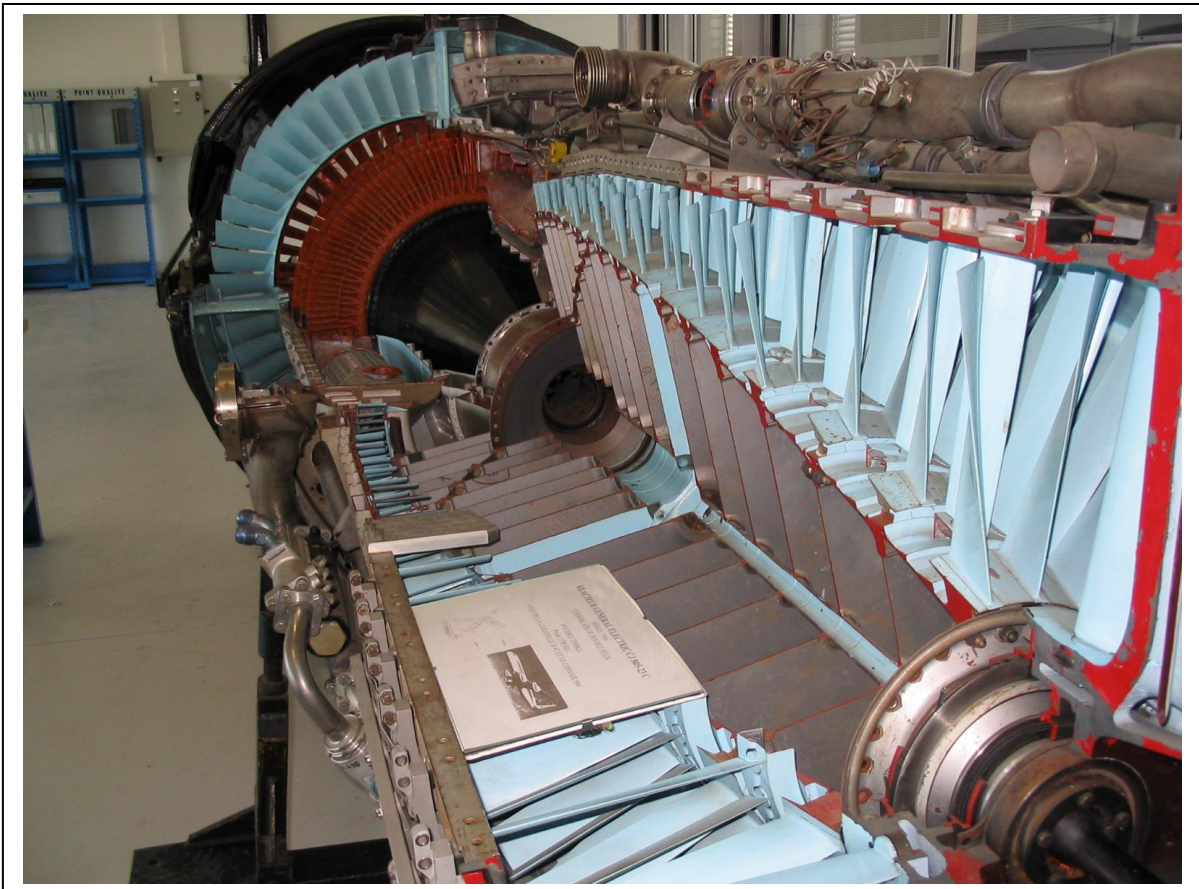
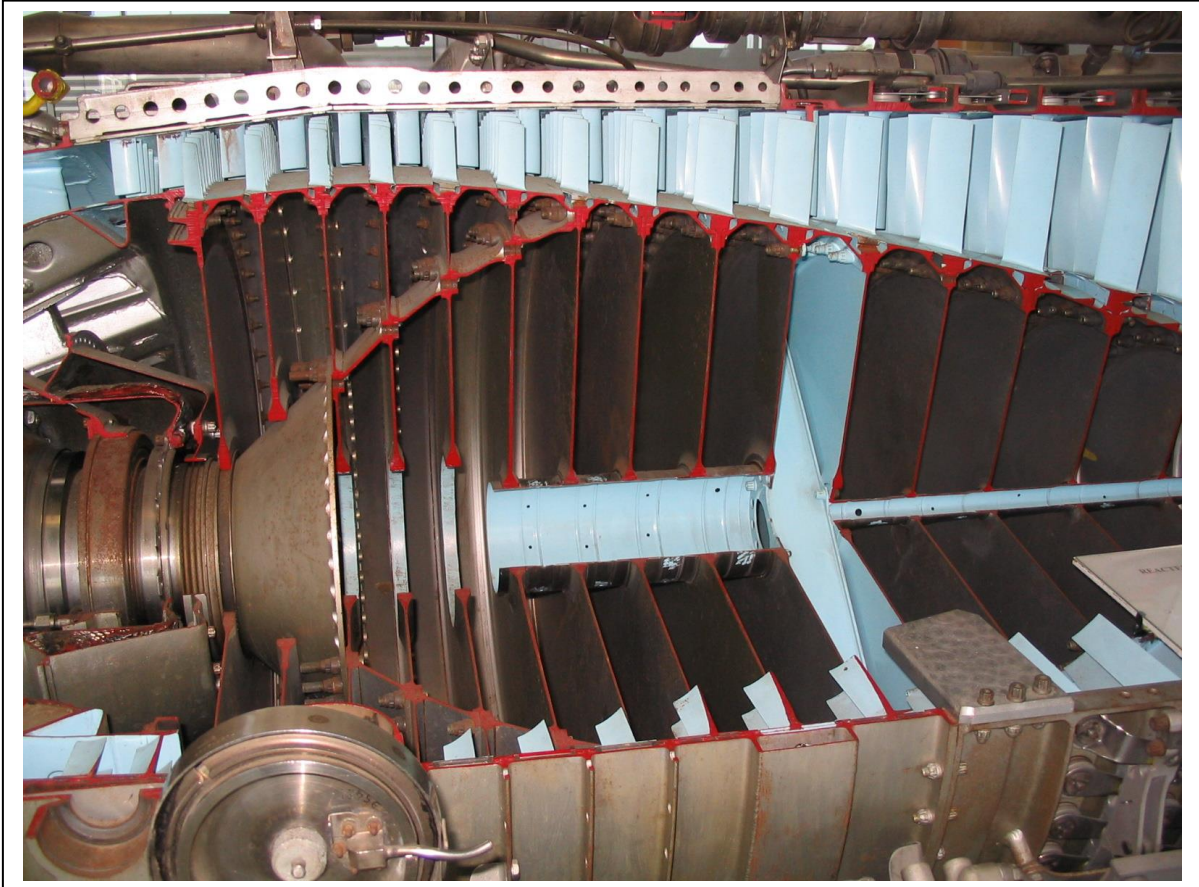
Le taux de compression par étage est limité et ne dépasse guère aujourd'hui

$$\frac{P_{s3}}{P_{s1}} = 1,4$$

S'il y a **n** étages le taux de compression global du compresseur est donné par la formule :

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{P_{s3}}{P_{s1}} \right)^n$$





CONTROLE DE LA VITESSE AXIALE (CONVERGENCE).

Hypothèse : par construction la vitesse axiale est constante tout le long du compresseur.

$$V_1 = V_2$$

Conservation du débit-masse.

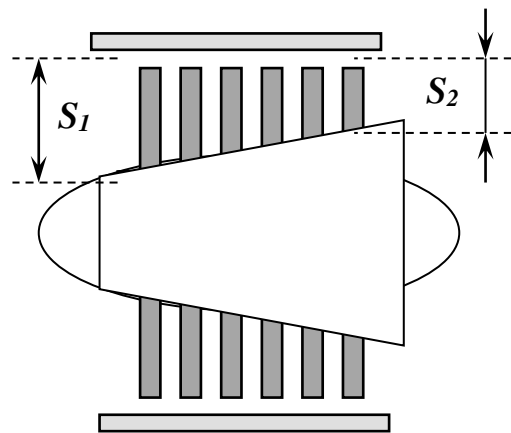
$$\rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2$$

Par construction :

$$V_1 = V_2$$

$$\Rightarrow \rho_1 S_1 = \rho_2 S_2$$

$$\Rightarrow S_1 / S_2 = \rho_2 / \rho_1$$



Conclusion :

lorsque la pression augmente $\Rightarrow P_2 > P_1$

la masse volumique augmente $\rho_2 > \rho_1 \Rightarrow \rho_2 / \rho_1 > 1$

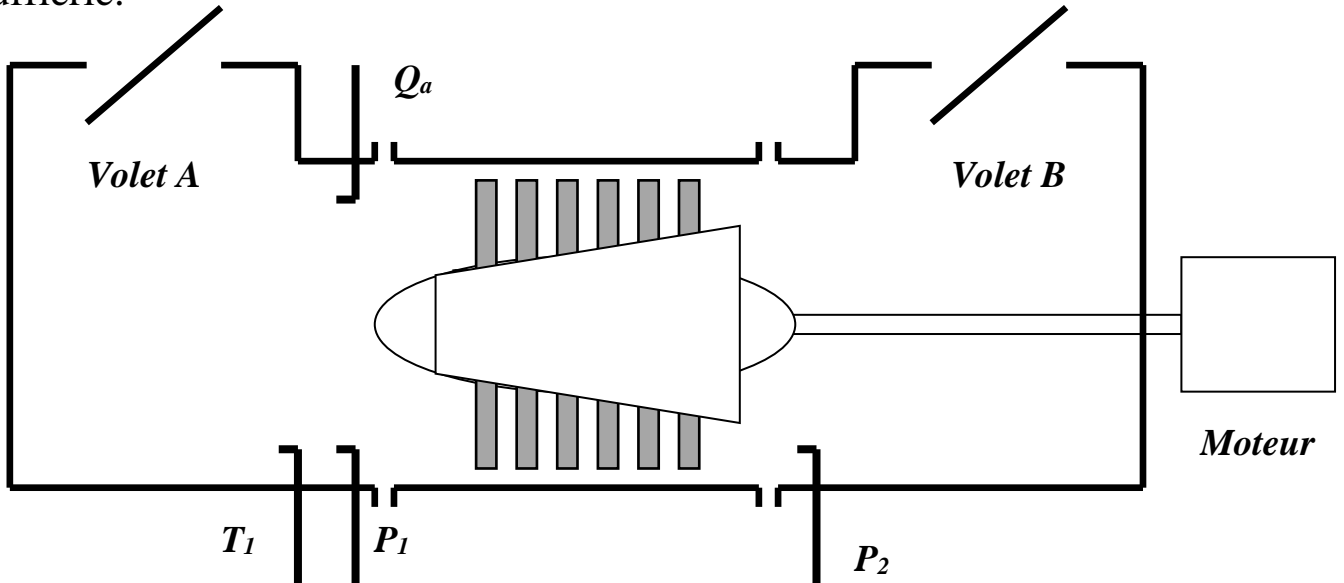
Le rapport des surfaces augmente $\Rightarrow S_1 / S_2 > 1$

$S_1 > S_2 \Rightarrow CONVERGENT.$

COURBES CARACTERISTIQUES .

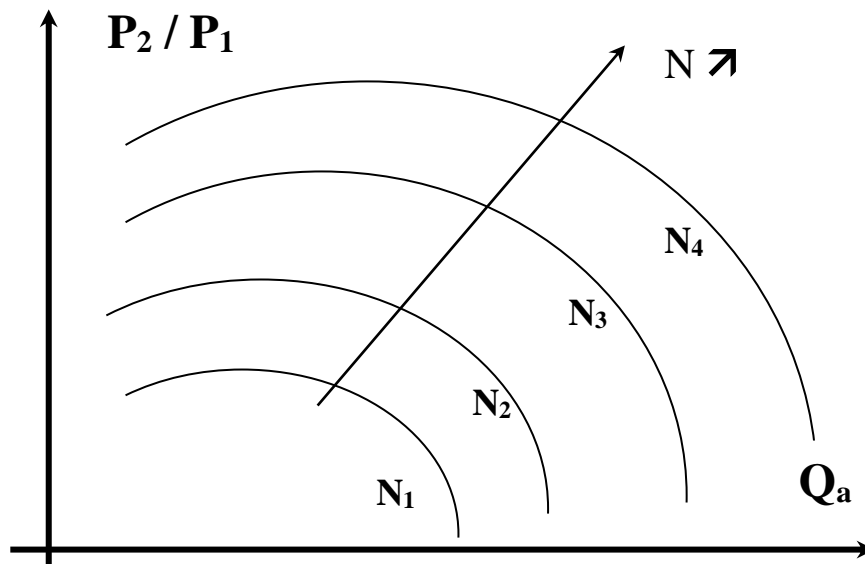
Courbes débit - régime - taux de compression.

Les courbes caractéristiques du compresseur sont établies à partir d'essais en soufflerie.



Le compresseur est entraîné par un moteur qui permet de régler la puissance fournie au compresseur et donc le régime indépendamment du débit d'air qui le traverse.

Schéma :



Le diagramme ainsi tracé n'est valable que pour les conditions d'entrées P_1 et T_1 données : il en existe donc une infinité.

Courbes débit - régime - taux de compression.

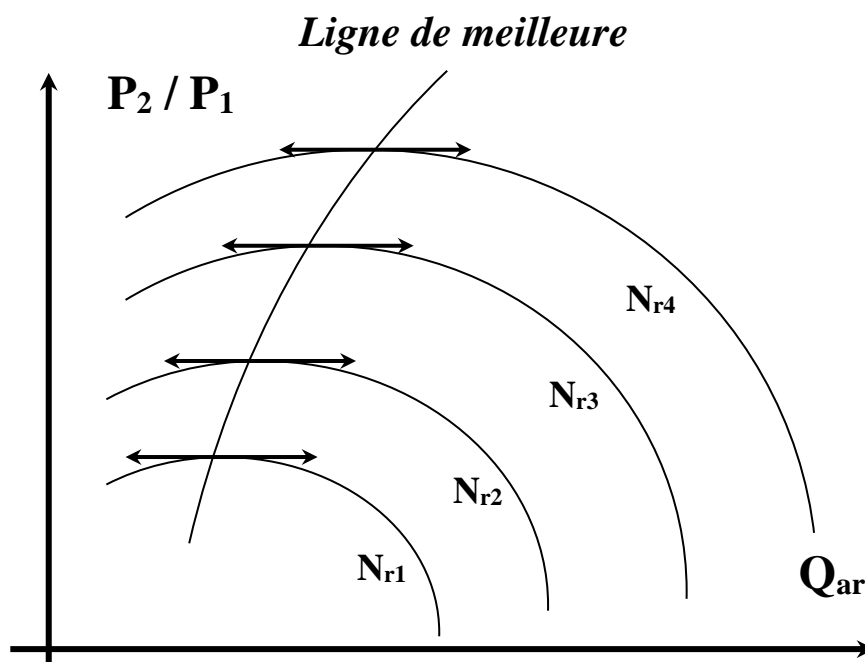
On peut montrer que tous ses diagrammes se réduisent à un seul à condition d'exprimer le taux de compression P_2/P_1 en fonction du débit réduit Q_{ar} et du régime réduit N_r .

$$Q_{ar} = \frac{Q_a \sqrt{T_1}}{P_1 D^2} \quad N_r = \frac{N.D}{\sqrt{T_1}}$$

Q_{ar} et N_r sont des grandeurs sans dimension.

Remarque : $\sqrt{T_1}$ est homogène à une vitesse.

Schéma :



Remarque : La ligne de meilleure efficacité représente l'ensemble des points où pour un régime N_r et un débit Q_{ar} on obtient le taux de compression maximum (sommet des courbes iso-régime).

LE POMPAGE BASSE VITESSE.

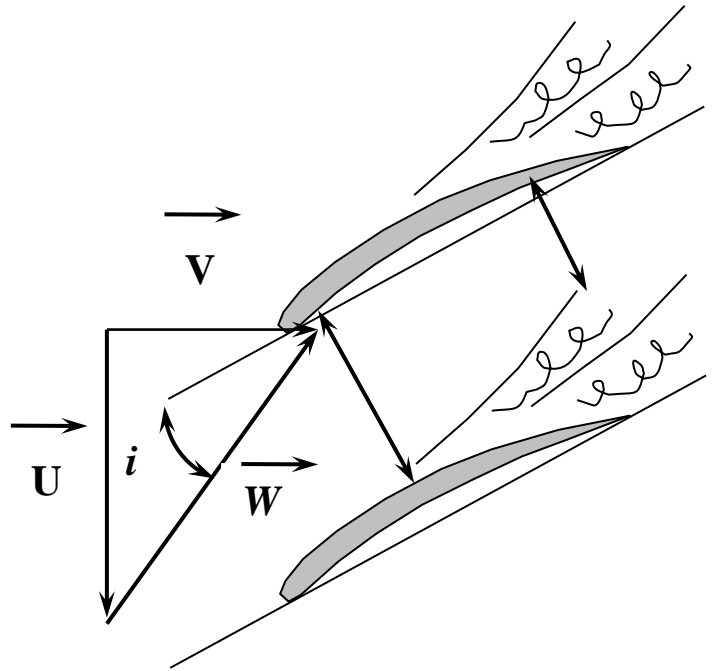
Les effets du pompage sont mis en évidence au banc d'essais et se traduit sur le réseau des caractéristiques du compresseur par une zone de disfonctionnement.

Volet soufflerie partiellement fermé $\Rightarrow Q_a \downarrow \Rightarrow V_1 \downarrow \Rightarrow i \uparrow$

\Rightarrow décrochage aérodynamique de la grille d'ailette du 1^{er} étage du compresseur.

\Rightarrow Canaux interailettes subissent une réduction de leur section efficace.

\Rightarrow Les ailettes ne travaillent plus en compression : $S \downarrow \Rightarrow W \uparrow \Rightarrow P \downarrow$.



Conservation du débit :

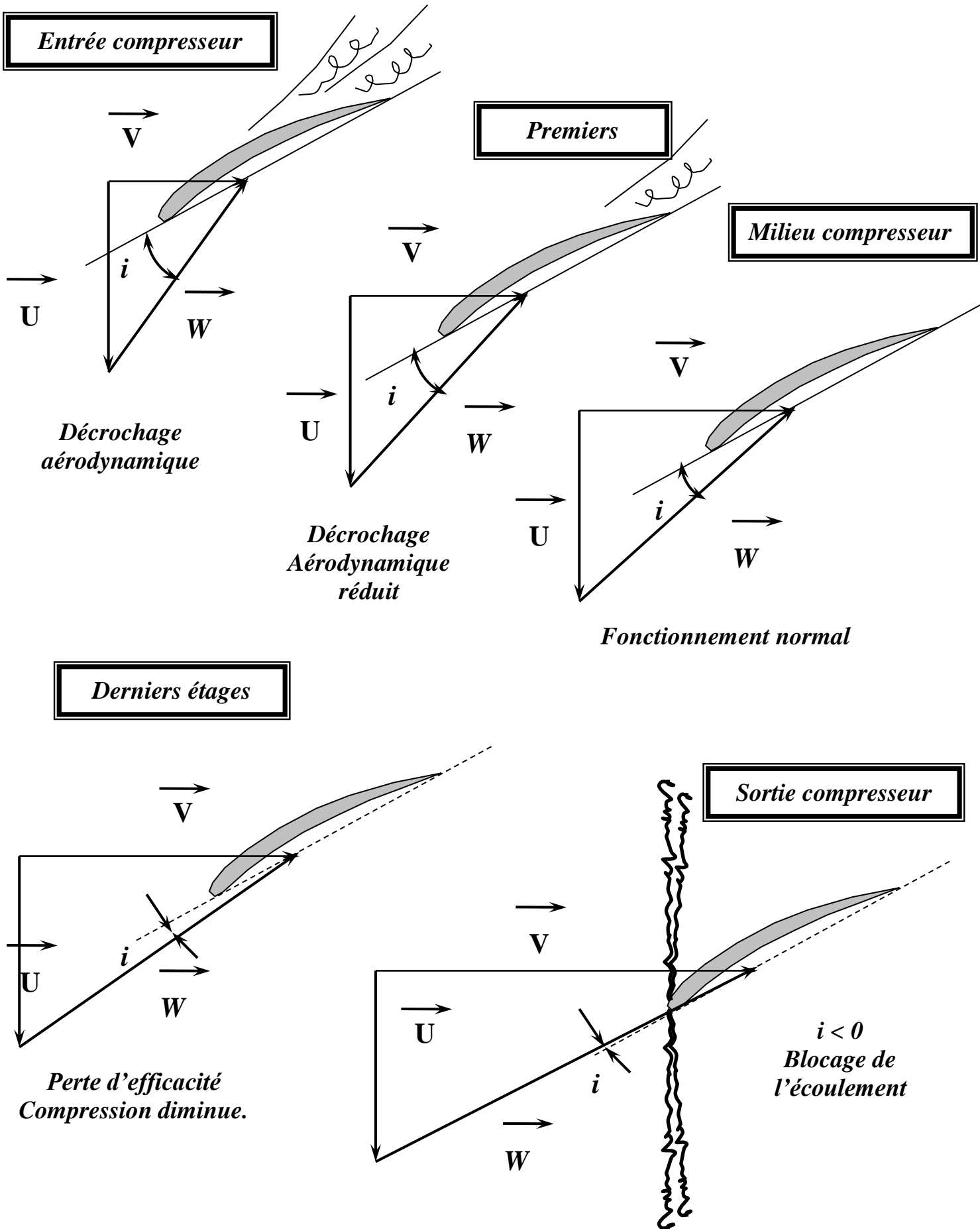
$$\rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2 \quad \Rightarrow \quad V_2 = V_1 \frac{\rho_1 S_1}{\rho_2 S_2}$$

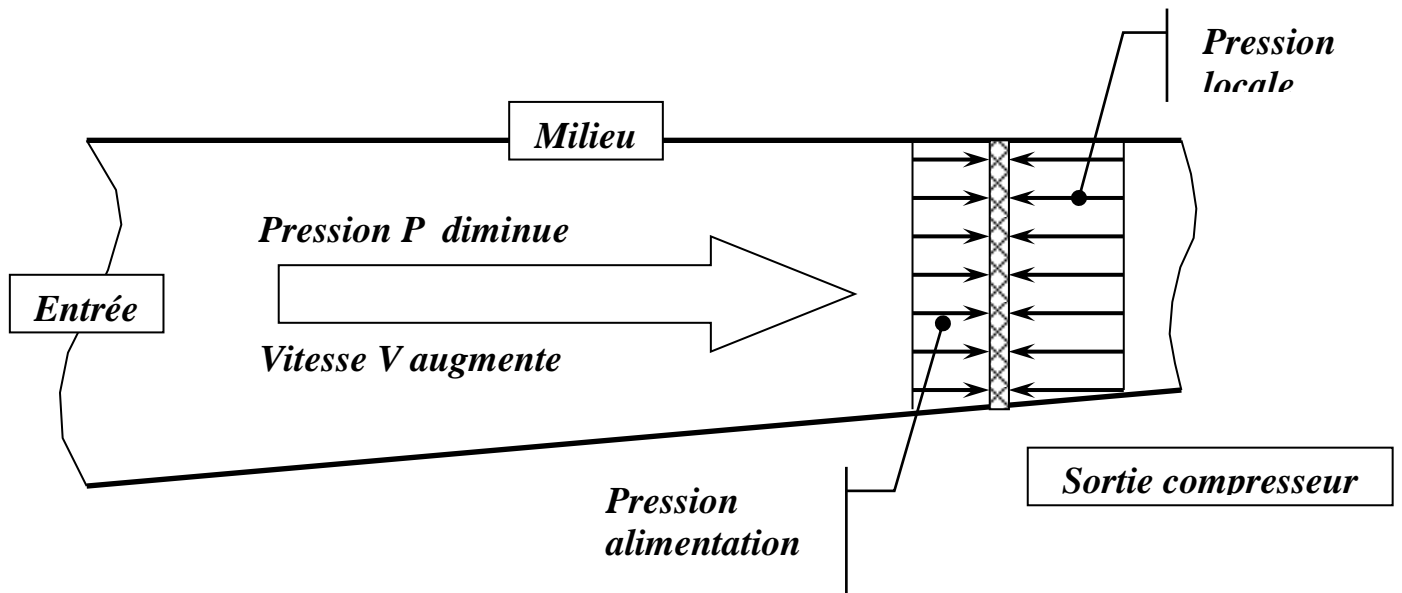
Conicité du compresseur $S_1 > S_2 \Rightarrow S_1 / S_2 > 1$

Pression diminuée $P_2 < P_1 \Rightarrow \rho_2 < \rho_1 \Rightarrow \rho_1 / \rho_2 > 1$

$$\frac{\rho_1 S_1}{\rho_2 S_2} > 1 \quad \Rightarrow \quad V_2 > V_1 : \text{vitesse axiale augmente dans compresseur.}$$

LE POMPAGE BASSE VITESSE : Explication.





Lorsque la pression local $>$ pression d'alimentation , l'air se déplace vers l'avant (débit d'air s'inverse).

Pression locale \downarrow ce qui permet de rétablir l'écoulement. Si la cause du décrochage sur les ailettes du premier étage n'a pas disparu (débit faible), le phénomène se reproduit.

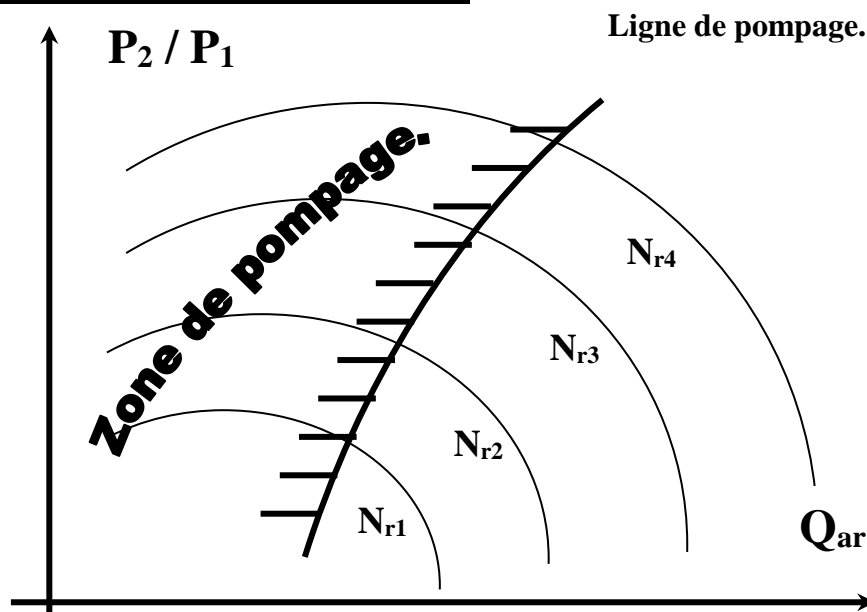
POMPAGE

Conséquences : Mauvaise alimentation en air :

- ☞ Température turbine $\uparrow \Rightarrow$ surchauffe.
- ☞ Diminution des performances du moteur.
- ☞ Risque d'extinction dans la chambre de combustion.

Vibrations \Rightarrow Criques – rupture d'aubage.

Courbe caractéristique du compresseur :

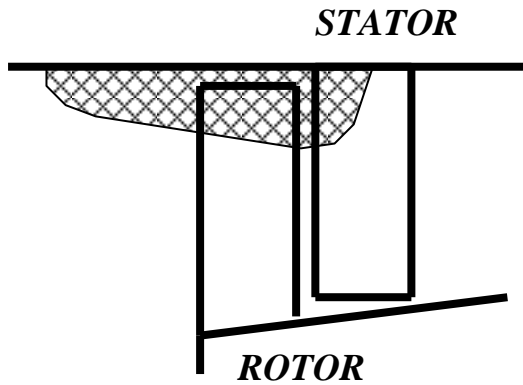
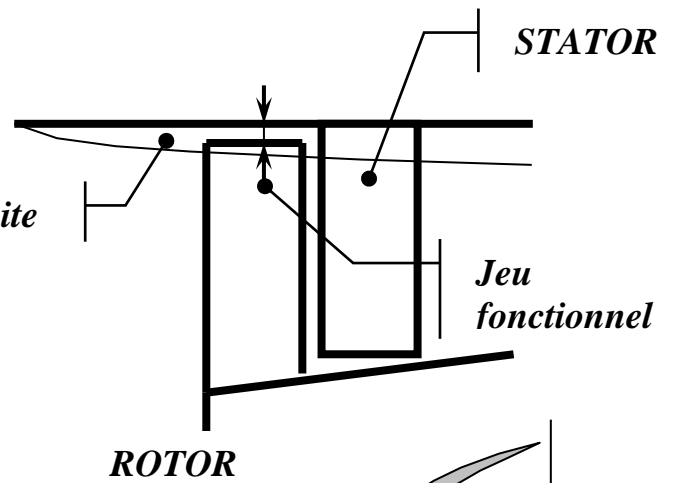


Décrochage tournant.

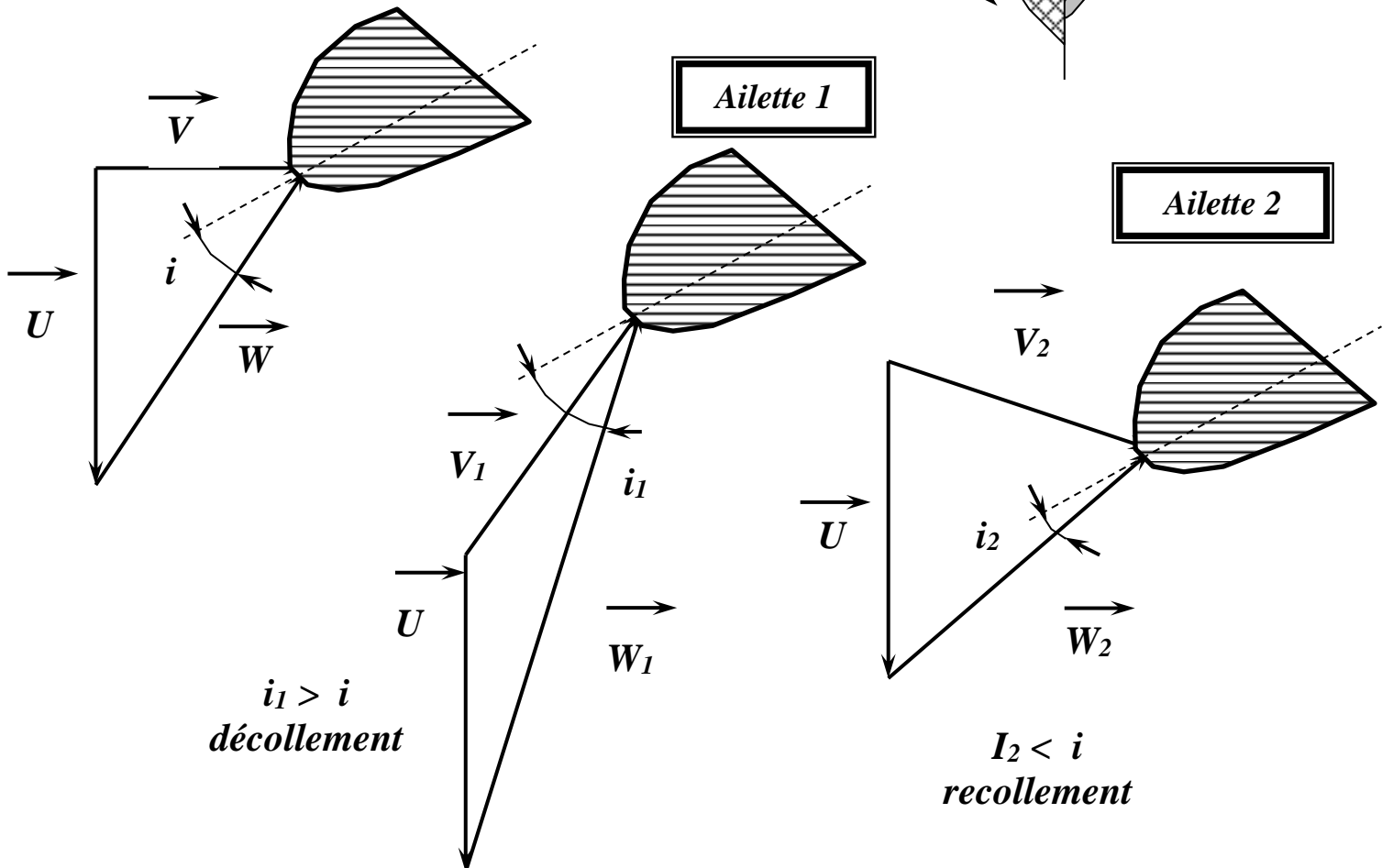
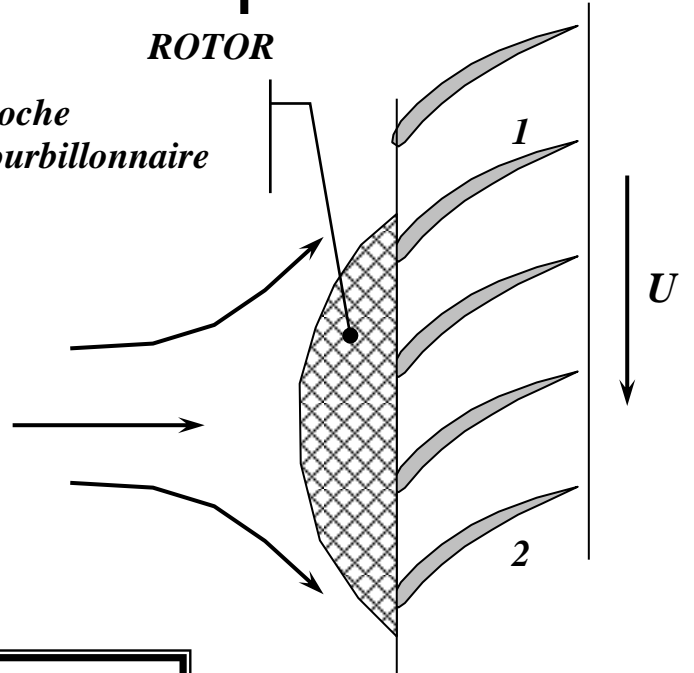
Position du problème :

$Qa \downarrow \Rightarrow$ épaisseur de couche limite \uparrow .

Cisaillement plus intense \Rightarrow tourbillons forment une poche qui remonte en avant de la grille.



Poche tourbillonnaire



La poche se déplace d'une ailette à l'autre \Rightarrow décrochage tournant.

Suivant la diminution du débit, l'expérience met en évidence la présence d'une à trois poches de zone décollées se déplaçant dans le sens de rotation du rotor à environ une vitesse de $N / 2$.

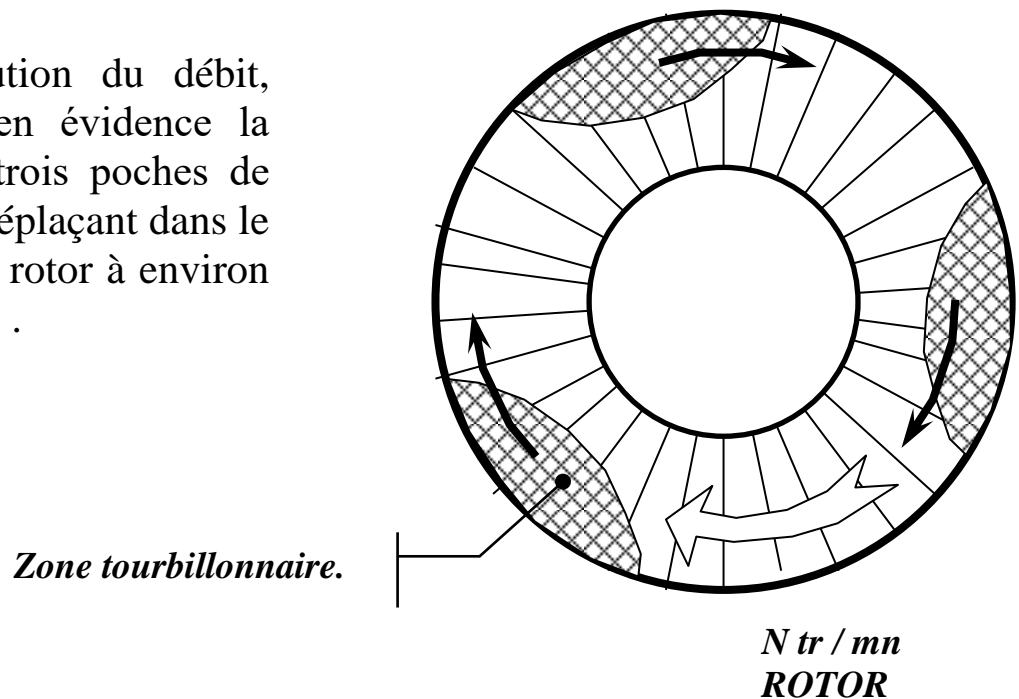
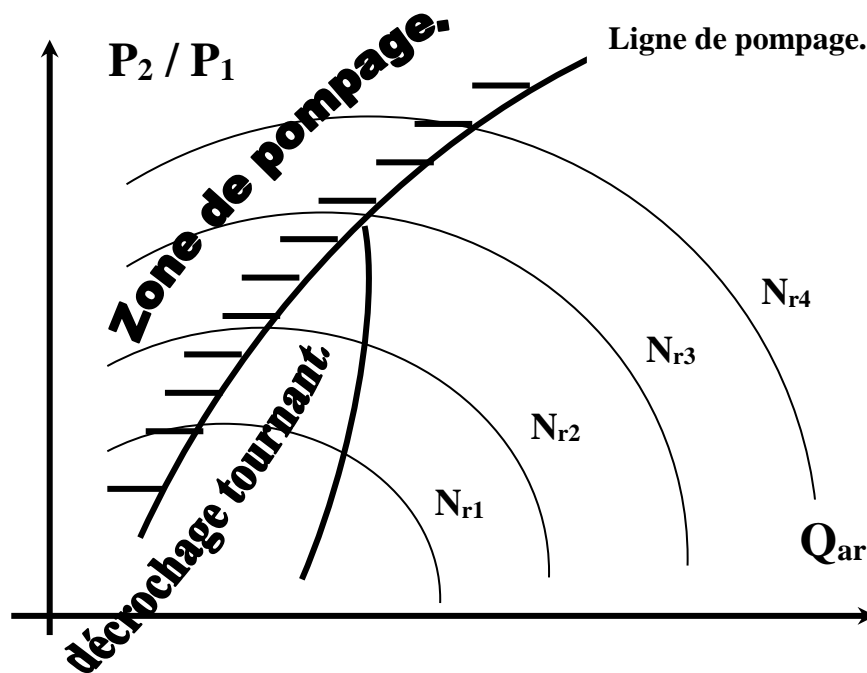


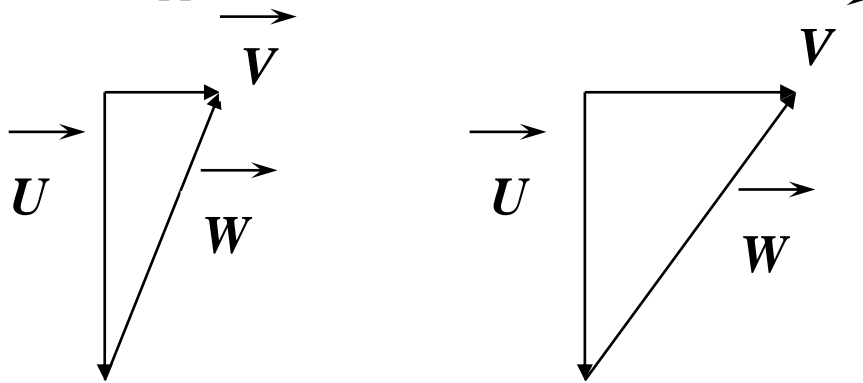
Diagramme des courbes caractéristiques du compresseur.



Pour les valeurs faibles du régime moteur, il apparaît que si le débit diminue suffisamment, le décrochage tournant se transforme en pompage complet du compresseur.

DISPOSITIFS ANTI – POMPAGE.

Aux bas régimes, le rapport V / U est :



Trop faible dans les premiers
Étages.

Trop important dans les derniers
étages.

Les dispositifs mis en œuvre pour éviter le pompage ont pour but d'améliorer le rapport V / U en agissant soit sur V soit sur U .

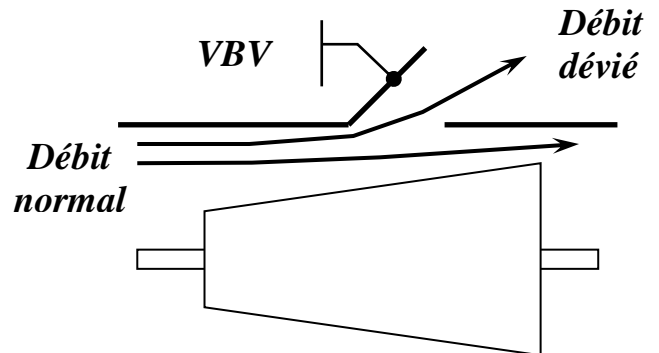
Dispositifs anti - pompe

- ☞ Vannes de décharges : Variable Bleed Valves (VBV).
- ☞ Aubages directeurs d'entrée à calage variable : Inlet Guide Vanes (IGV).
- ☞ Aubages STATOR à calage variable : Variable Stator Vanes (VSV).
- ☞ Compresseur à double ROTOR.

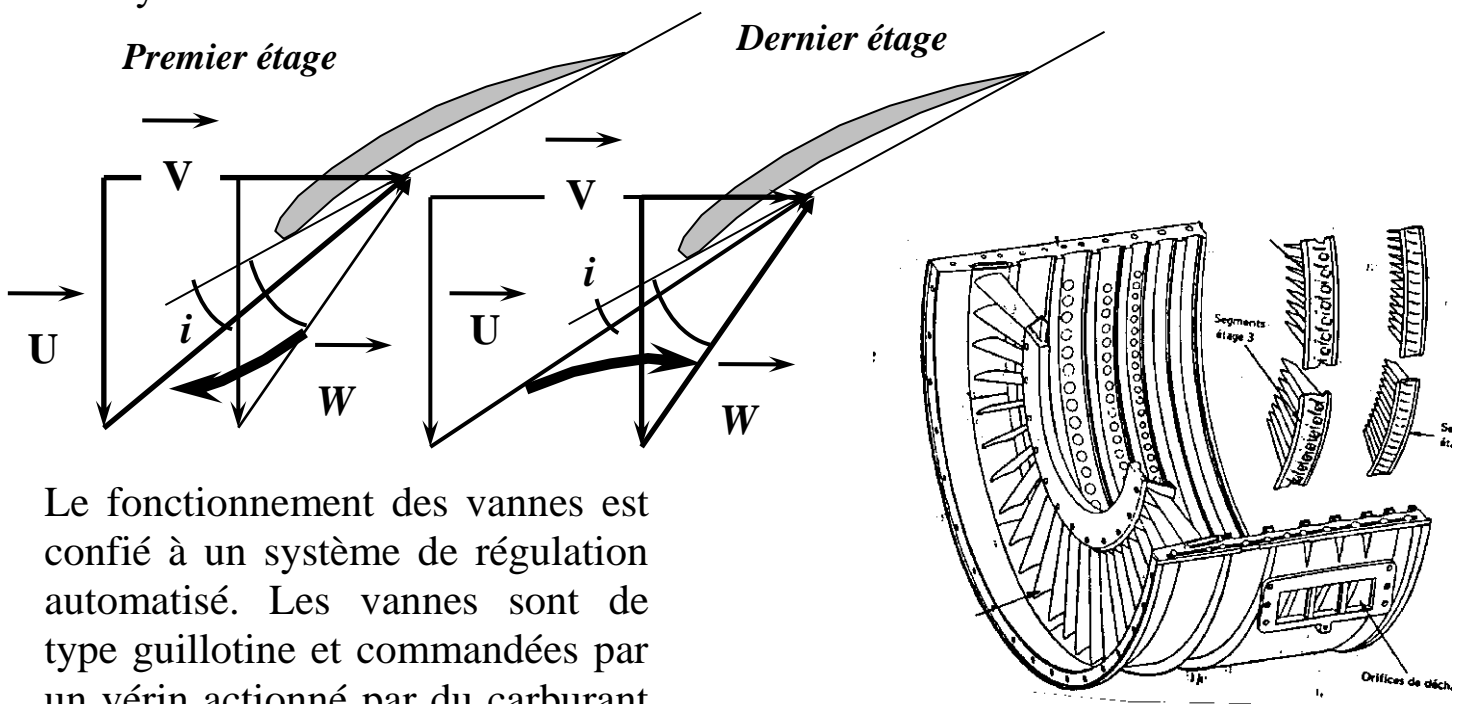
VANNES DE DECHARGE. Variable Bleed Valves (VBV)

Aux faibles vitesses de rotation, comme la section de passage de l'air est trop faible à l'arrière du compresseur pour conserver un débit normal, des vannes (vannes de décharge) s'ouvrent et dérivent une partie de l'air à l'extérieur.

Une certaine quantité d'air est évacuée en pure perte, mais le compresseur fonctionne normalement.



L'ouverture des vannes accélère l'écoulement dans les étages situés en amont de celles-ci $V / U \uparrow$ et ralentit l'écoulement en aval $V / U \downarrow$ puisque moins d'air y circule.



Le fonctionnement des vannes est confié à un système de régulation automatisé. Les vannes sont de type guillotine et commandées par un vérin actionné par du carburant sous pression.

ouverture de 0 à 80 % de N tr/mn.
fermeture à partir de 80 % de N .
fermeture complète à 93 % de N.

réacteur General Electric CF 700
vannes niveau étages 3,4 et 5.

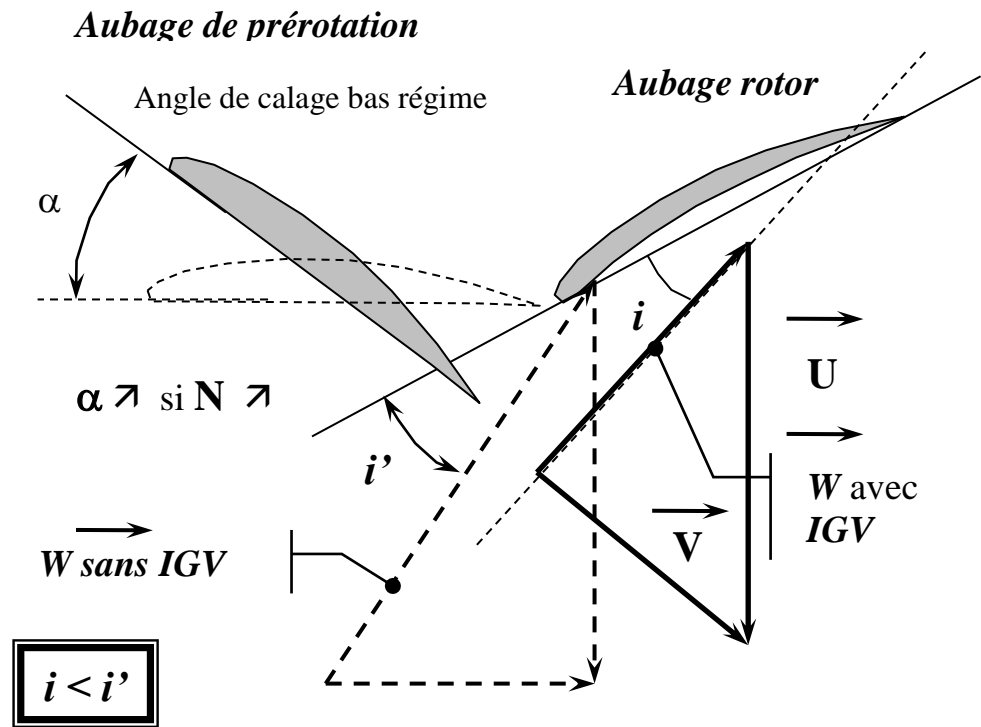
AUBAGES DIRECTEURS D'ENTREE A CALAGE VARIABLE.

Aubages de pré-rotation à calage variable – Inlet Guide Vanes (IGV).

Principe :

Les aubages à l'entrée du rotor permettent de diriger les filets d'air convenablement sur la première grille d'aubage mobile.

En modifiant l'angle de calage des aubages de pré-rotation, aux bas régimes, on peut modifier l'inclinaison du vecteur W et ainsi diminuer l'angle d'incidence i . L'efficacité du premier étage est améliorée et par voie de conséquence celle du compresseur.



A mesure que le régime du moteur \uparrow , l'angle de calage est ajusté jusqu'à ramener l'écoulement dans l'axe. On dit que les aubages « s'ouvrent » $\alpha \downarrow$.

Le fonctionnement des aubages de pré-rotation est confié à un système de régulation automatisé.

Dans la pratique, les deux systèmes, vannes de décharge et aubages de pré-rotation à calage variable, sont couplés et commandés par un même système de régulation.

Rmq : En général un seul dispositif anti-pompage n'est pas suffisant pour réaliser une bonne adaptation du compresseur.

AUBAGES STATOR A CALAGE VARIABLE.

Variable Stator Vanes (VSV).

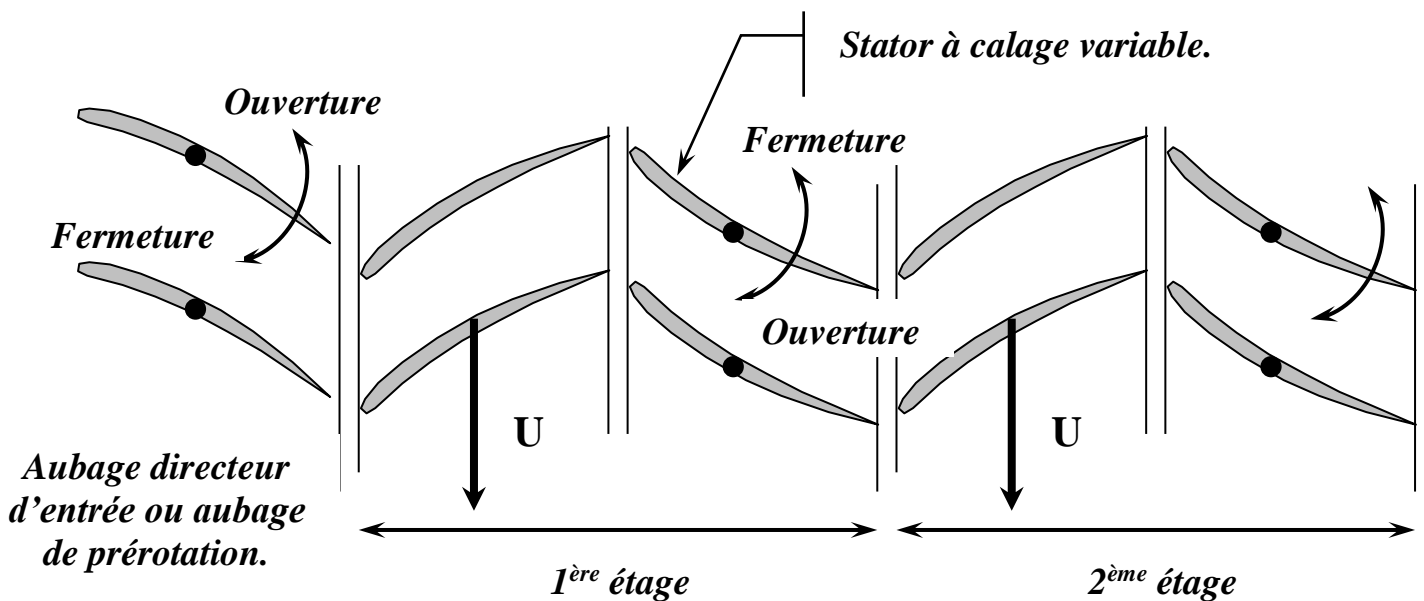
Dans les réacteurs modernes à fortes poussée, il arrive que les deux premiers systèmes anti-pompage ne suffisent pas pour réaliser une bonne adaptation du compresseur.

Solution : mise au point de compresseur équipé de plusieurs étages à aubage de stator à calage variable.

Schéma.

☞ Système d'aubage directeur à calage variable.

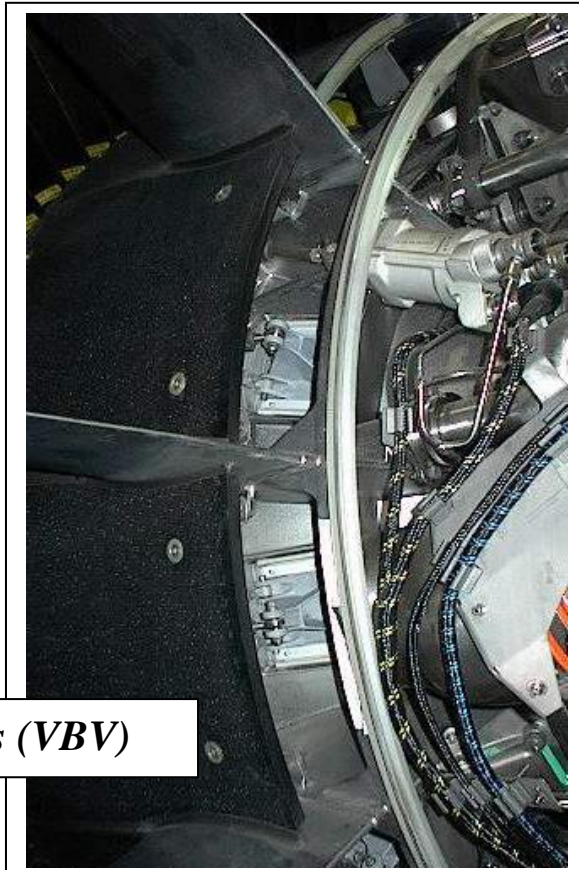
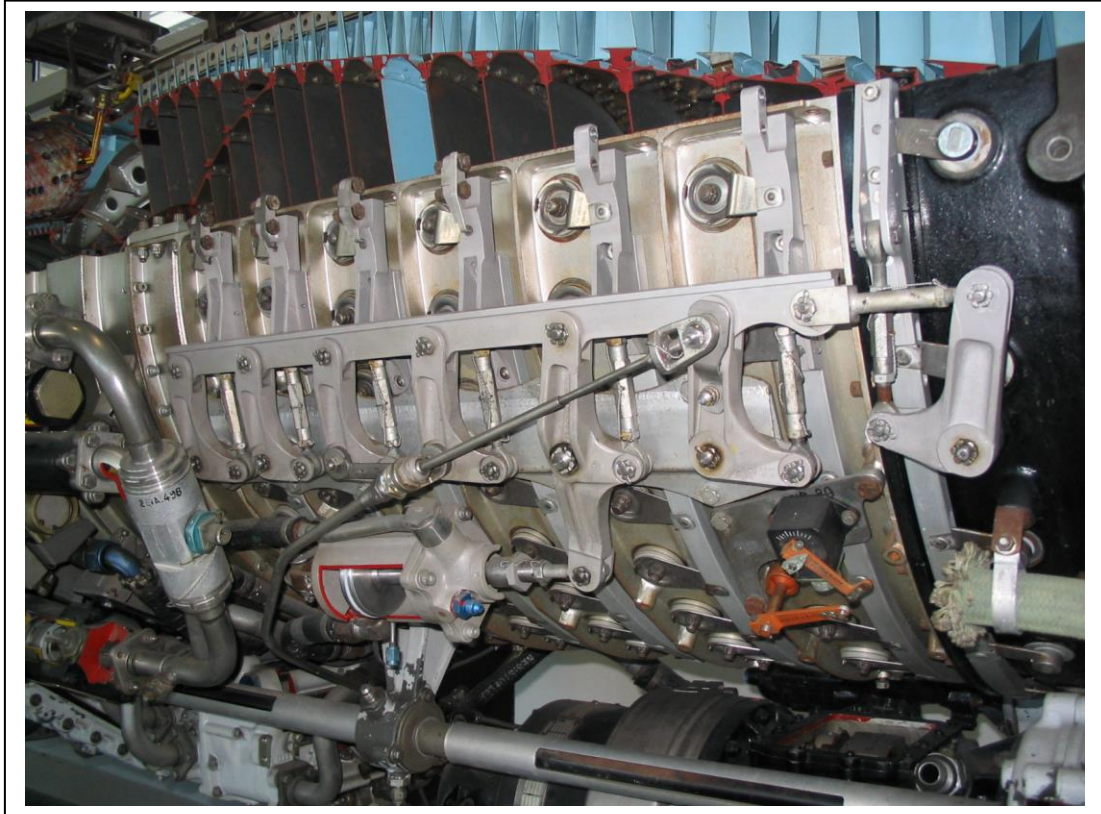
☞ Système d'aubage stator à calage variable.



Le principe de fonctionnement est le même que celui des aubages directeurs d'entrée à calage variable. Ils sont « fermés aux faibles régimes moteur et s'ouvrent progressivement avec N.

Ce dispositif permet d'ajuster (diminuer) l'angle d'incidence des filets d'air sur les premiers étages du compresseur.

Variable Stator Vanes (VSV).



Variable Bleed Valves (VBV)

COMPRESSEUR A DOUBLE ROTOR.

Remarque :

A faible régime, le rapport V / U est trop faible à l'avant du compresseur et trop important à l'arrière.

Solution :

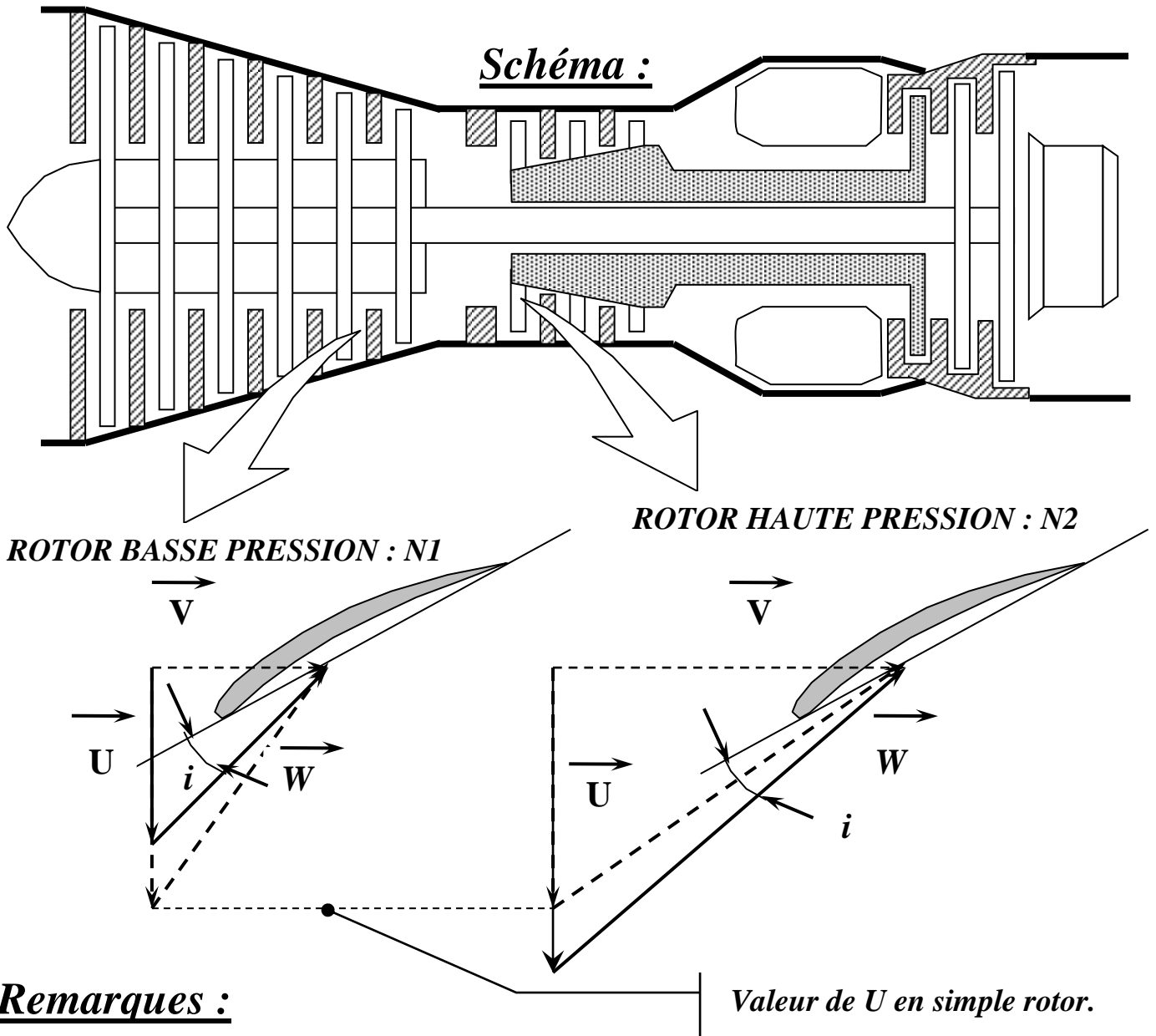
- ☞ diminuer la vitesse U à l'avant du compresseur et l'augmenter à l'arrière.
- ☞ Cette solution n'est pas envisageable sur un compresseur classique.
- ☞ En séparant le rotor en deux parties et en entraînant chaque rotor par un groupe de turbines séparées, les deux attelages indépendants ainsi constitués peuvent tourner à des vitesses différentes : \Rightarrow retard dans l'apparition du POMPAGE.

Explications : sur une hélice, à puissance fournie constante :

- ☞ Angle d'incidence $i \uparrow$ la vitesse de rotation $N \downarrow$.
- ☞ Angle d'incidence $i \downarrow$ la vitesse de rotation $N \uparrow$.

Compresseur à double rotor fonctionnant aux bas régimes.

- ☞ A l'avant du compresseur, $i > i_{\text{adapté}}$ génère un couple résistant important \Rightarrow une diminution du régime de rotation par rapport à un compresseur classique.
- ☞ A l'arrière du compresseur, $i < i_{\text{adapté}}$ voir négatif, génère un couple résistant moins intense \Rightarrow une augmentation du régime de rotation par rapport à un compresseur classique.



- ☞ Les régimes de rotation des différents attelages sont réglés par le mécanisme d'adaptation turbine / compresseur.
- ☞ La diminution de l'angle d'incidence dans les premiers étages est accentuée par l'augmentation du débit d'air, car le compresseur Haute Pression HP tourne plus vite.
- ☞ Le régime de rotation de l'attelage HP est régulé par le débit de carburant.
- ☞ L'attelage bas pression est libre.
- ☞ Aux faibles poussées, le rapport des vitesses de rotation N_1 / N_2 est de l'ordre de $1 / 2$. Lorsque la poussée $\uparrow N_1 / N_2 \rightarrow 1$.

Avantage du Groupe Turbo Réacteur (GTR) à double attelage.

- ☞ Bon rendement de compression jusqu'au bas régimes, du fait des vitesses des attelages BP et HP permettant une meilleure adaptation des aubages.
- ☞ Poussée de ralenti faible et meilleure stabilité de ralenti.
- ☞ Fortes accélérations possibles.
- ☞ Démarrage plus facile : le démarreur entraîne seulement l'attelage HP.

Inconvénients du Groupe Turbo Réacteur (GTR) à double attelage.

- ☞ Poids : plus lourd qu'un GTR simple attelage.
- ☞ complexe et de réalisation technologique délicate.
- ☞ Adaptation N_1 / N_2 délicate : le fonctionnement indépendant des compresseurs entraîne des troubles dans l'écoulement axial particulièrement lors des phases d'accélération et de décélération.

FONCTIONNEMENTS PARTICULIERS

Accélération du régime N_2 .

- ☞ Lors d'une accélération du régime N_2 , la liaison purement aérodynamique entre N_1 et N_2 peut créer une augmentation de la vitesse axiale dans l'attelage N_1 inadaptée au régime trop bas de celui-ci.
- ☞ Le contrôle de l'accélération de l'attelage N_2 se fait par le régulateur de carburant.
- ☞ On favorisera également l'accélération du régime N_1 en diminuant son couple aérodynamique résistant en installant un dispositif **VSV**.

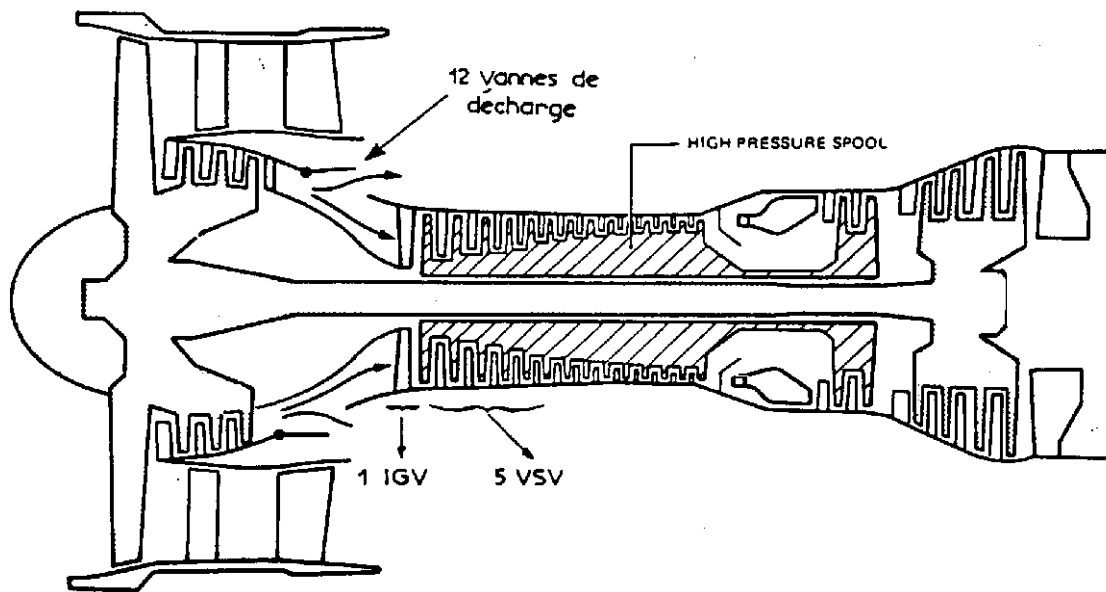
Décélération du régime N_2 .

- ☞ Lors d'une diminution du régime N_2 , l'attelage N_1 qui a une inertie supérieure à l'attelage N_2 , impose à l'ensemble N_2 un débit d'air supérieur à ce qu'il peut évacuer. Cette configuration provoque un bourrage aérodynamique de l'attelage N_2 pouvant conduire au pompage.
- ☞ **Solution** : installation de vannes de décharge entre les deux compresseurs permettant l'évacuation du « trop plein » d'air fourni par le compresseur **BP**.
- ☞ **Solution** : diminuer la décélération du N_2 en diminuant son couple résistant, en équipant les premiers étages de l'attelage N_2 d'aubage de stator à calage variable.

INFORMATIONS

Le GTR General Electric CF6 80 – A3 est équipé de :

- ☞ 1 double attelage : 1 compresseur BP - 1 compresseur HP .
- ☞ 12 vanes de décharge entre le compresseur BP et le compresseur HP.
- ☞ 1 étage d'aubages directeurs d'entrée compresseur HP.
- ☞ 5 étages de stator à calage variable au début du compresseur HP.

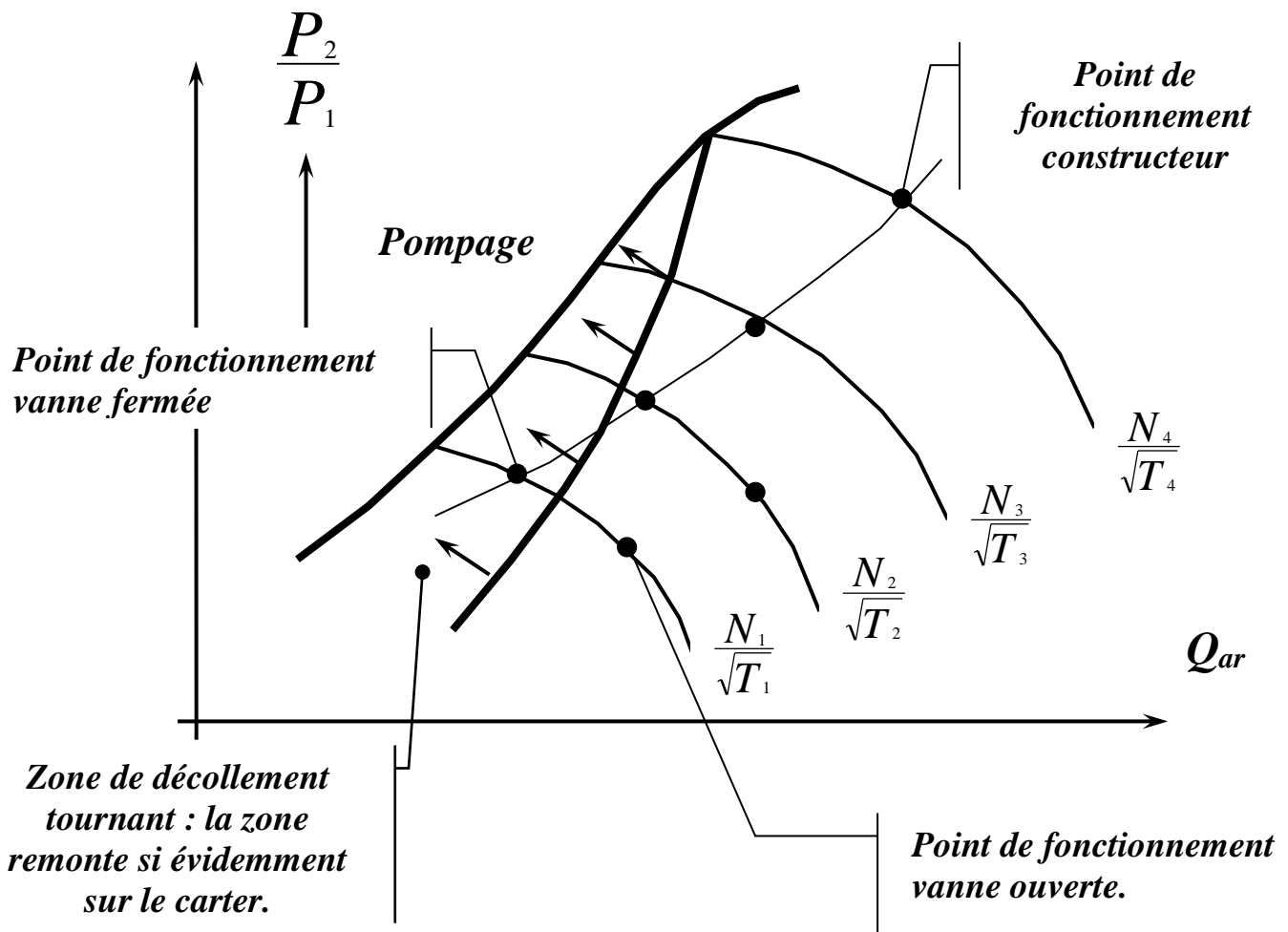


Conclusions

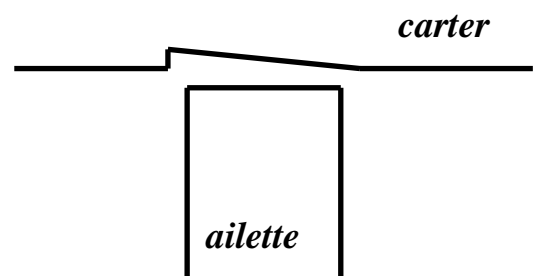
Système anti-pompage bas régimes.	Amélioration <u>directement</u> l'efficacité.
Double rotor.	des premiers et des derniers étages
Vanne de décharge.	
Aubages de pré-rotation à calage variable.	du premier étage.
Stator à calage variable.	des premiers étages.

REMEDES AU POMPAGE TOURNANT

- ☞ Installation de vannes de décharge sur le compresseur qui diminue le taux de compression et recule la marge de pompage.
Les couples « débit - taux de compression » se déplacent sur les courbes iso-régimes lorsque les vannes s'ouvrent.
- ☞ Pratiquer des évidements sur le carter compresseur à la périphérie et en opposition aux ailettes.



Les évidements pratiqués sur le carter du compresseur réduisent l'action de freinage de la couche limite par les ailettes et recule la marge de pompage.

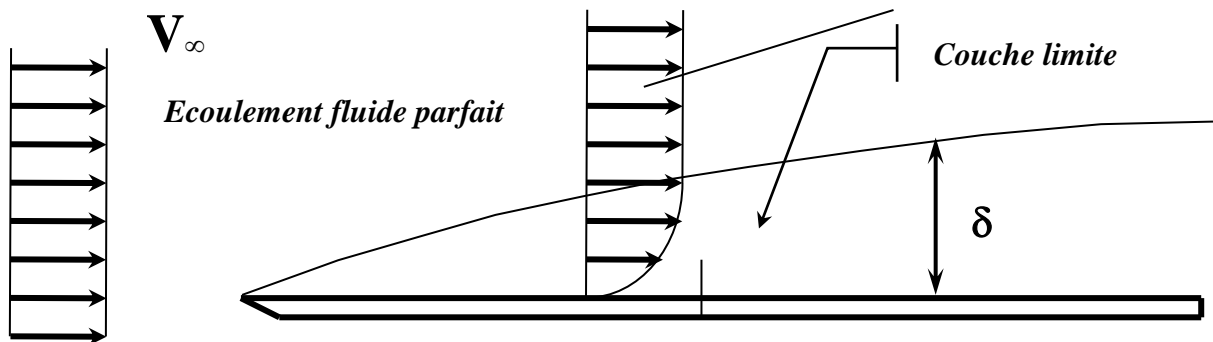


POMPAGE EN ALTITUDE.

Le fonctionnement d'un compresseur stable aux basses altitudes peut devenir instable en haute altitude.

Notion de couche limite.

Concept de couche limite.



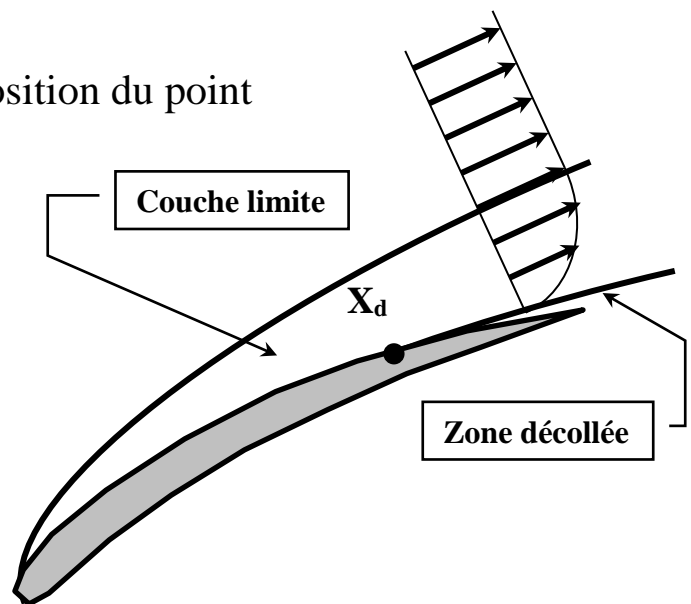
Décollement de la couche limite.

Soit X_D le point de décollement. La position du point de décollement X_D dépend de :

- ☞ L'angle d'incidence : $i > 17^\circ$
- ☞ De la valeur du nombre de **REYNOLDS** :

$$Re = V X_D / \nu$$

ν est la viscosité cinématique de l'air.



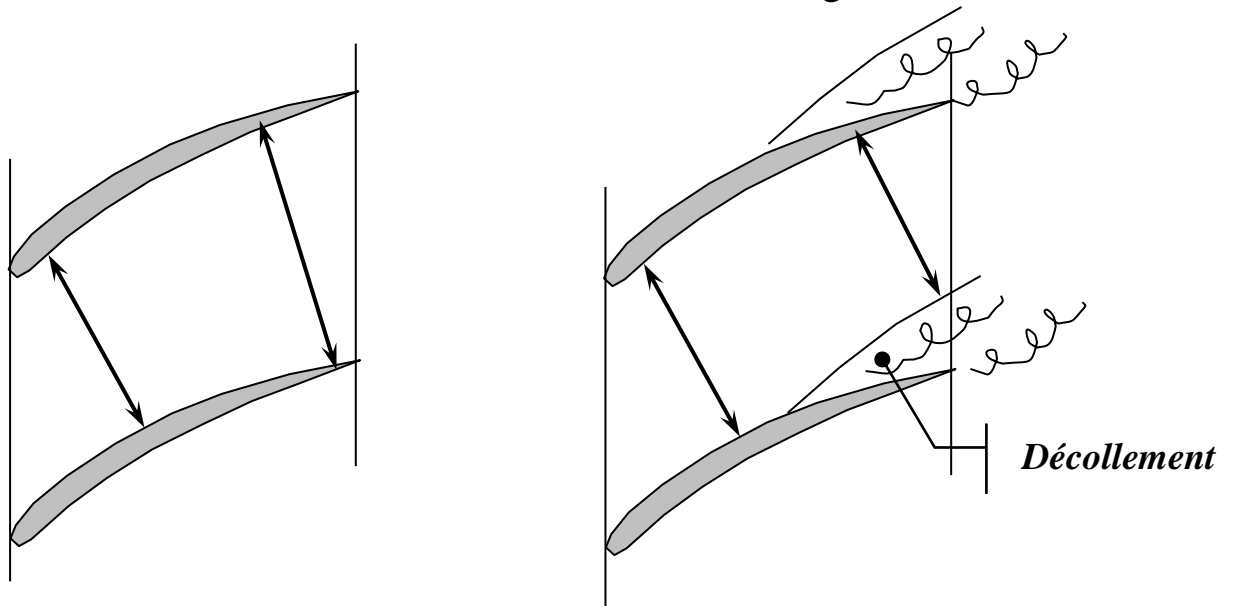
Lorsque Re diminue, par exemple sous l'effet de l'altitude le point de décollement remonte vers l'amont du profil.

Remarque : la viscosité cinématique ν augmente avec l'altitude.

POMPAGE EN ALTITUDE.

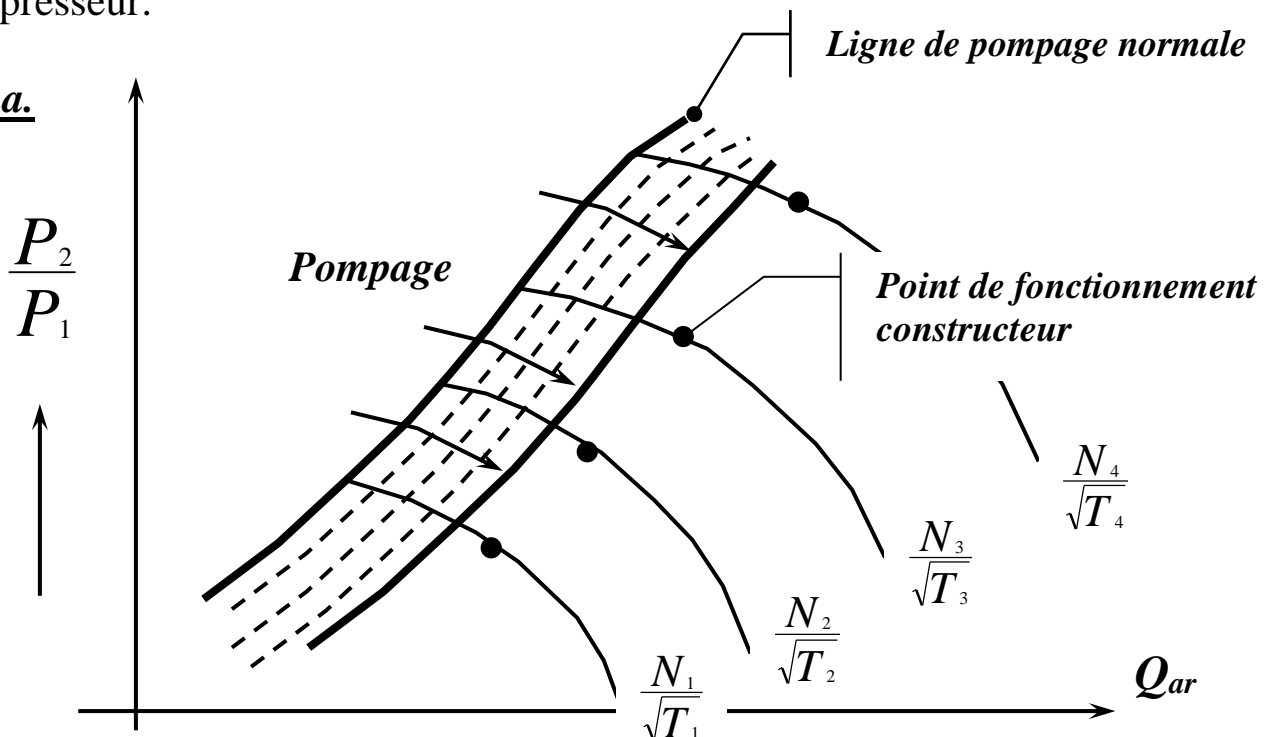
Soit deux ailettes consécutives délimitant un canal convergent.

Schéma.



Sous l'effet de l'altitude, la couche limite décolle sur l'arrière des ailettes \Rightarrow une diminution de la section de passage de l'air \Rightarrow une diminution du débit qui passe dans le canal inter-ailette et donc favorise l'apparition du pompage dans le compresseur.

Schéma.



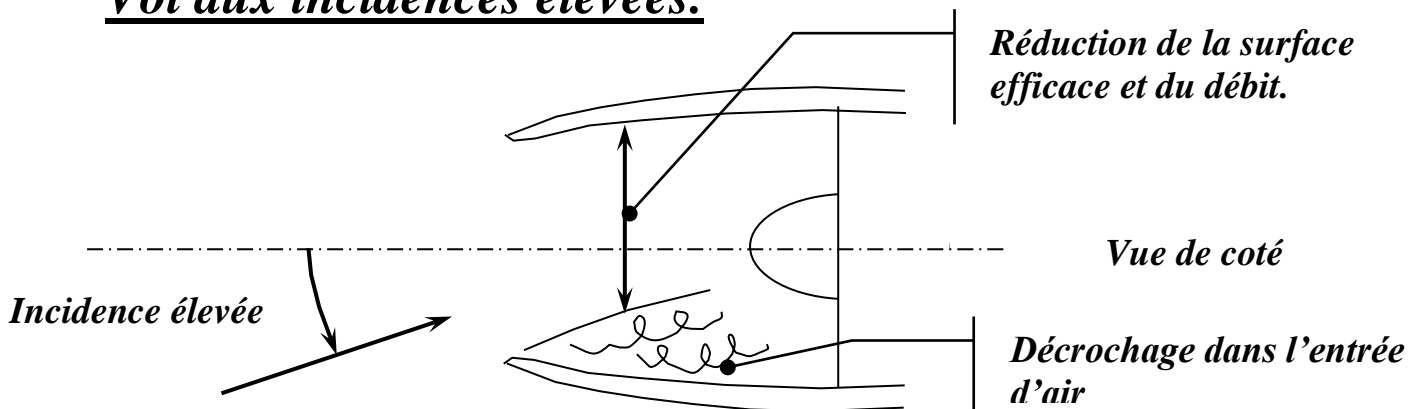
L'altitude provoque le déplacement de la limite de pompage. Elle se rapproche du point de fonctionnement ou passe éventuellement au delà entraînant le pompage du compresseur.

POMPAGE EN CONDITIONS DE VOL PARTICULIERES.

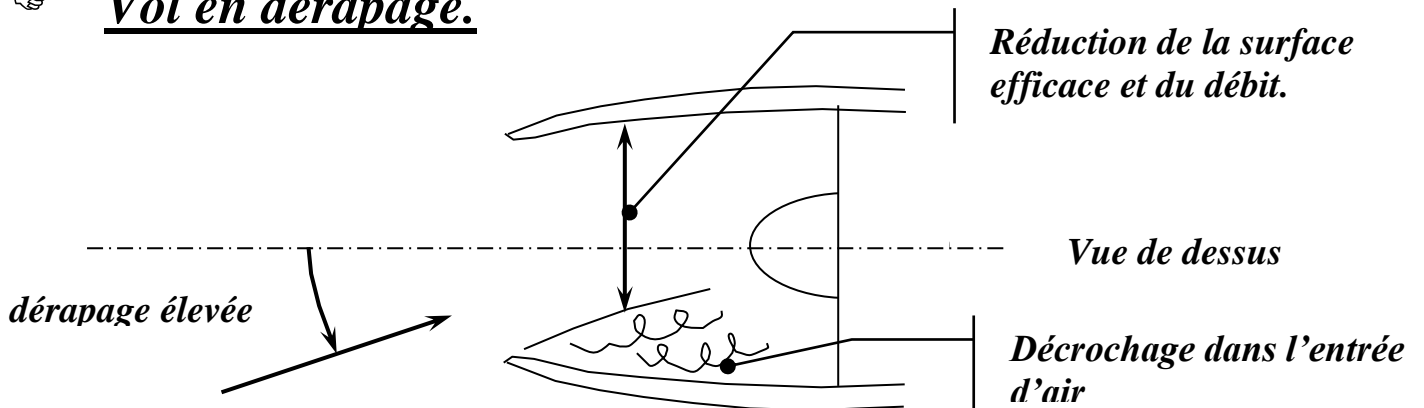
Toute diminution excessive du débit d'air devant le compresseur peut entraîner le décrochage partiel ou complet de la première grille mobile provoquant un pompage tournant ou complet du compresseur.

Certaines configuration de vol conduisent inévitablement au pompage :

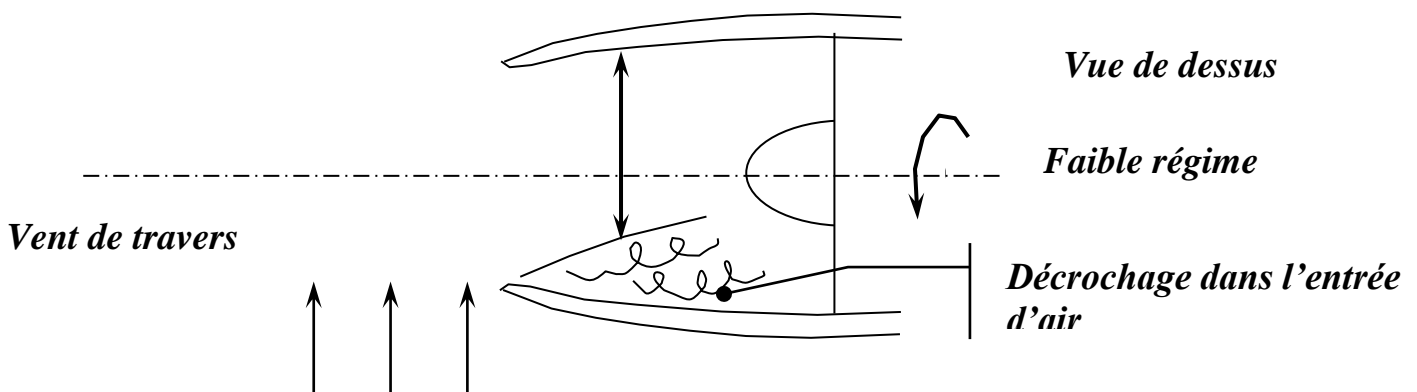
Vol aux incidences élevées.



Vol en dérapage.



Fonctionnement du moteur au sol à faible vitesse avion par fort vent de travers.



POMPAGE DES GTR DOUBLE FLUX à taux de dilution élevé.

Pour les GTR double flux à taux de dilution élevé dont la soufflante est accrochée au compresseur BP, un risque de pompage s'ajoute aux autres ; c'est le pompage provoqué par une décélération rapide.

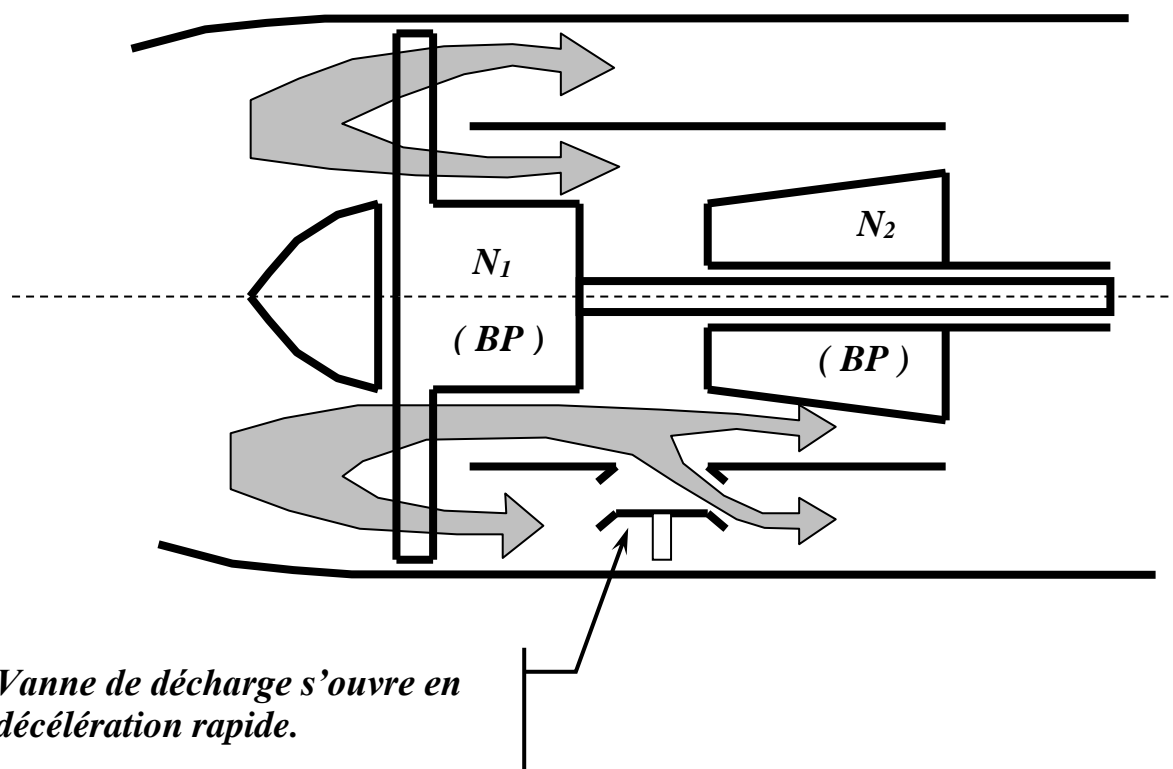
Remarque :

\mathcal{M} inertie attelage HP \ll \mathcal{M} inertie attelage BP + soufflante.

Le débit d'air fourni par le compresseur BP durant la phase de décélération est trop important par rapport aux possibilités d'écoulement à travers le compresseur HP. Le freinage du débit d'air qui en résulte provoque le pompage du compresseur BP.

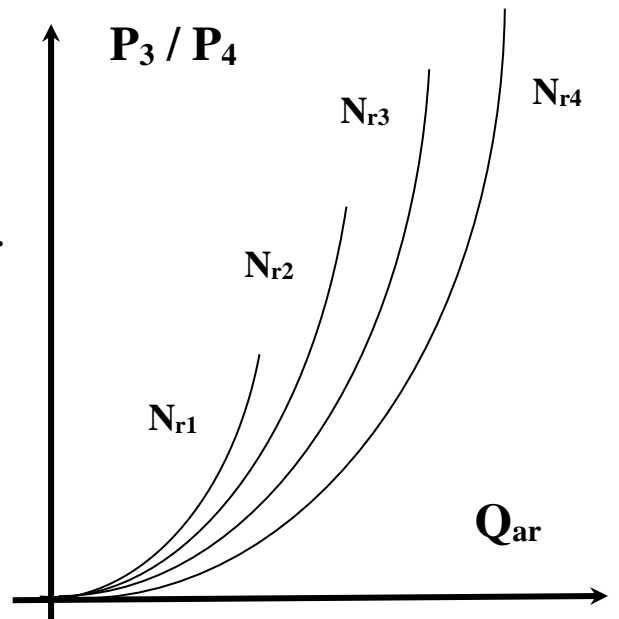
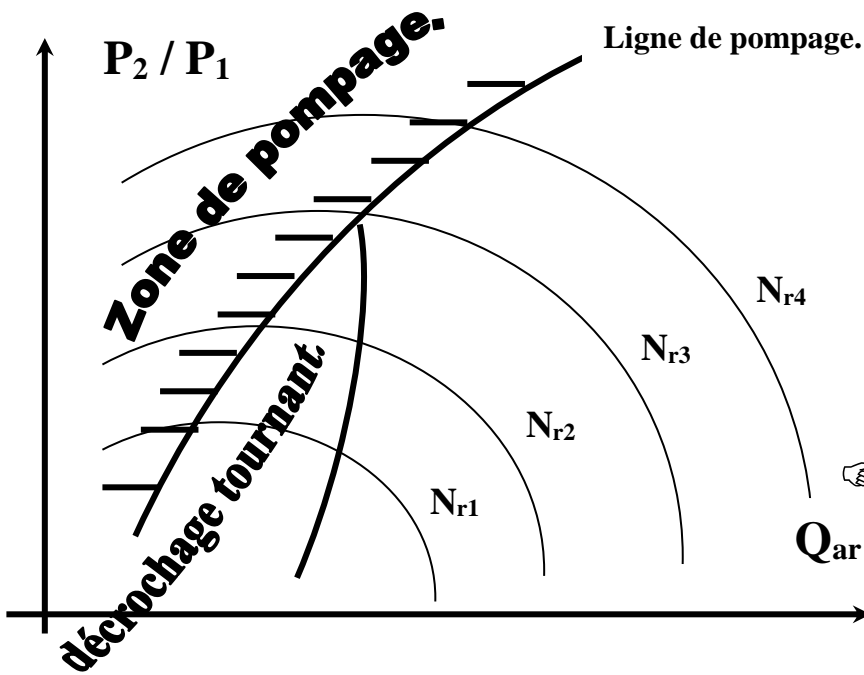
Solution.

Installation de vannes de décharge entre le compresseur BP et le compresseur HP.



ADAPTATION TURBINE-COMPRESSEUR.

☞ Courbes caractéristiques du compresseur.



☞ Courbes caractéristiques de la turbine.

☞ Définition de la ligne d'adaptation turbine-compresseur.

