

Cours Thermopropulsion Turbines



Rôle.

- ☞ La turbine transforme l'énergie potentiel contenue dans les gaz brûlés en énergie mécanique par détente.
- ☞ La fonction de la turbine est de récupérer l'énergie des gaz en sortie de chambre de combustion pour entraîner le compresseur et les accessoires de la machine.

Description.

- ☞ La turbine est formée d'une grille d'ailette fixe : LE STATOR.
- ☞ La turbine est formée d'une grille d'ailette mobile : LE ROTOR.
- ☞ Un étage de turbine est constitué d'une grille d'ailette fixe suivie d'une grille d'ailette mobile.

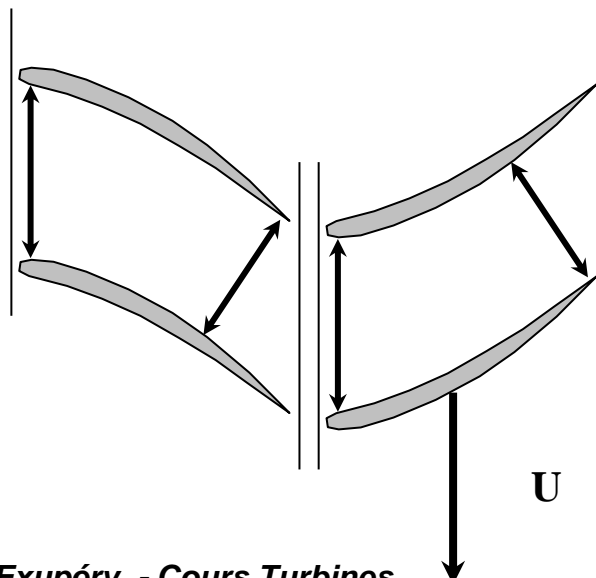
$$ETAGE = STATOR + ROTOR$$

Nombre étage TURBINE \ll < Nombre étage COMPRESSEUR.

La détente dans la turbine est un phénomène naturel : analogie compresseur.

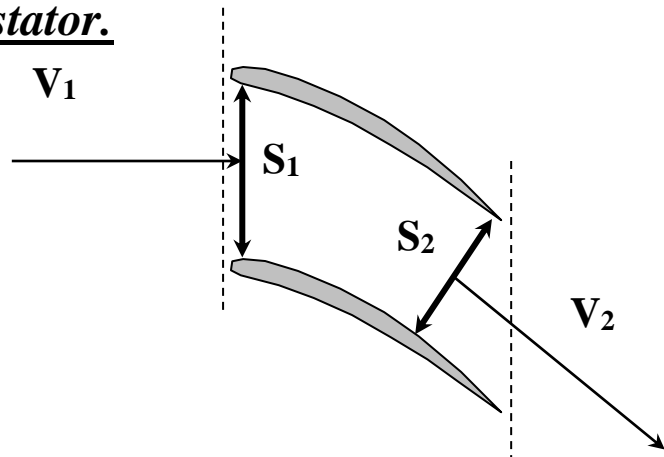
Le taux de détente est à priori illimité.

Schéma d'un étage.



Evolution des vitesses dans le stator.

- ☞ Convergent : $S_1 > S_2$.
- ☞ Conservation du débit : $V_2 > V_1$.
- ☞ Conservation de l'énergie : $P_2 < P_1$

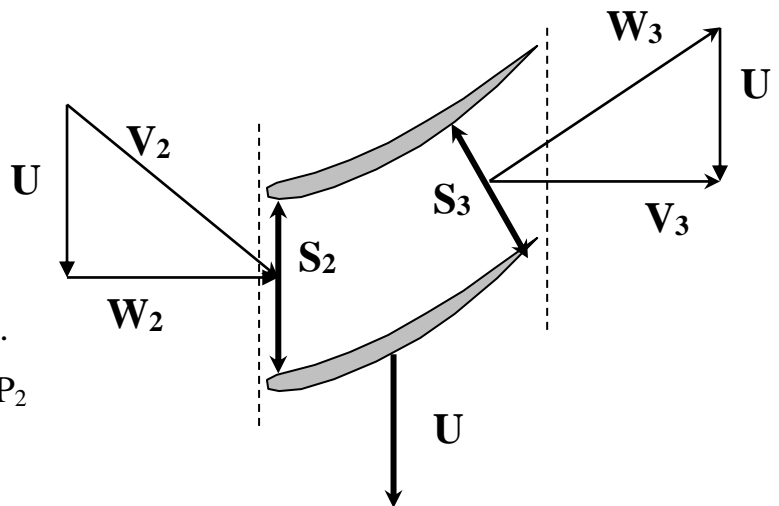


Evolution des vitesses dans le rotor.

- ☞ Convergent : $S_2 > S_3$.

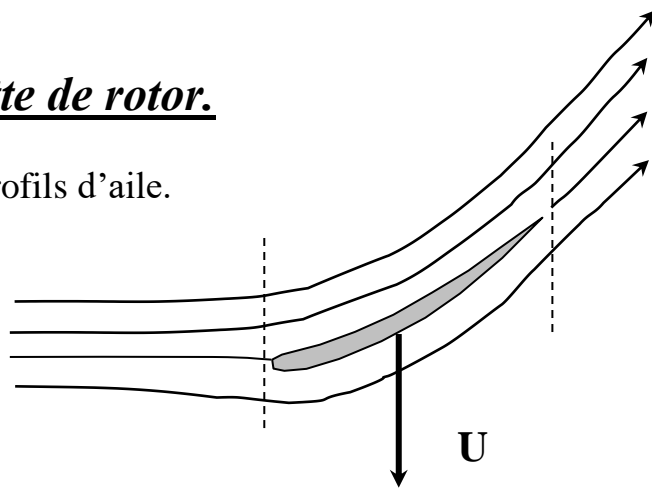
$$\mathbf{V}_i = \mathbf{W}_i + \mathbf{U}$$

- ☞ Conservation du débit : $W_3 > W_2$.
- ☞ Conservation de l'énergie : $P_3 < P_2$



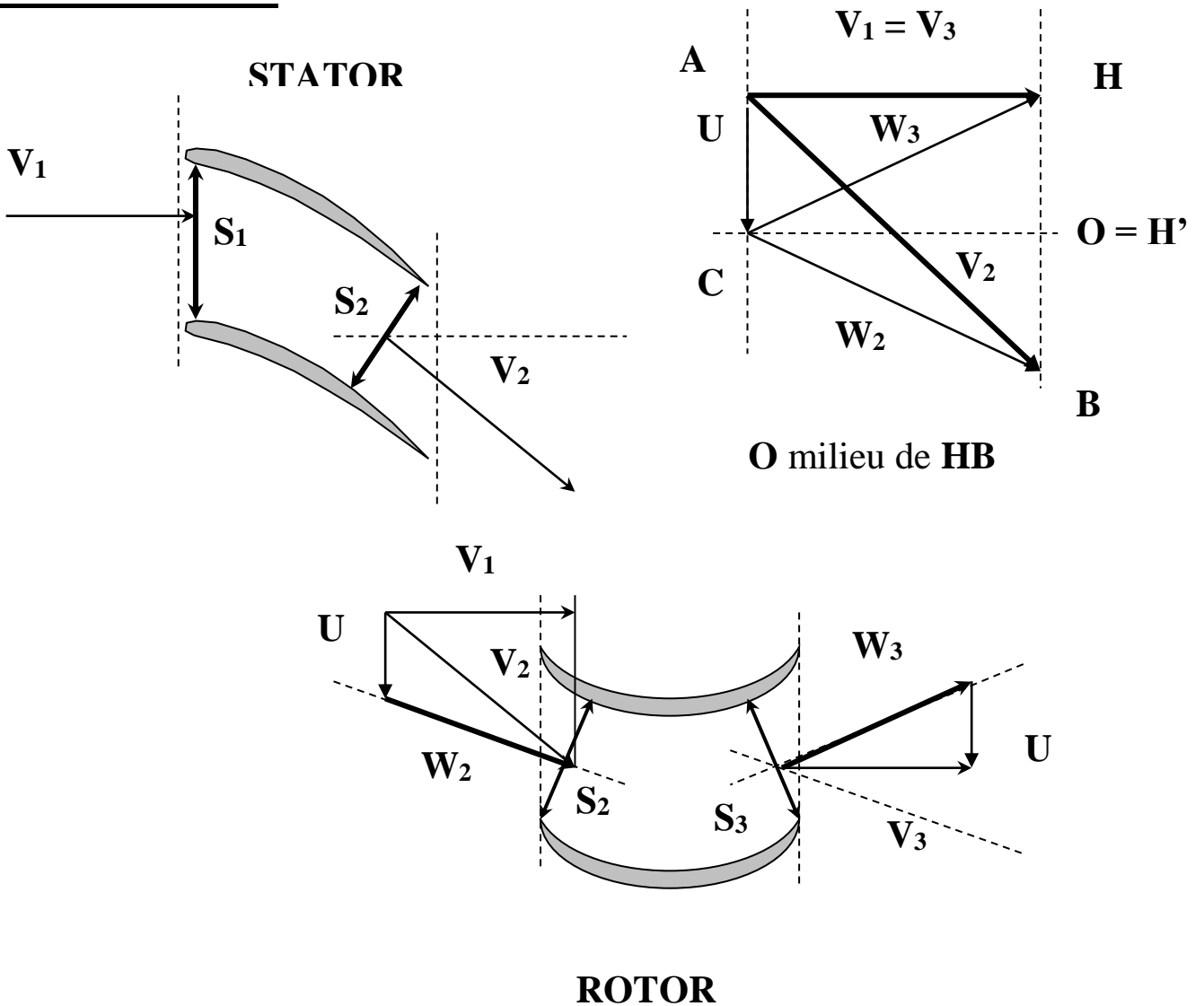
Ecoulement autour d'une ailette de rotor.

Les ailettes se comportent comme des profils d'aile.



Apparition d'une portance aérodynamique qui entraîne le rotor en rotation.

Turbine à action.



α : angle de déviation des vitesses dans le stator.

β : angle de déviation des vitesses dans le rotor.

- ☞ La détente est intégrale dans le stator (mise en vitesse).
Pas de détente dans le rotor.
- ☞ La récupération d'énergie se fait intégralement au niveau du rotor.
Pas de détente dans le rotor.

Efforts sur les profils d'une turbine à action.

☞ STATOR.

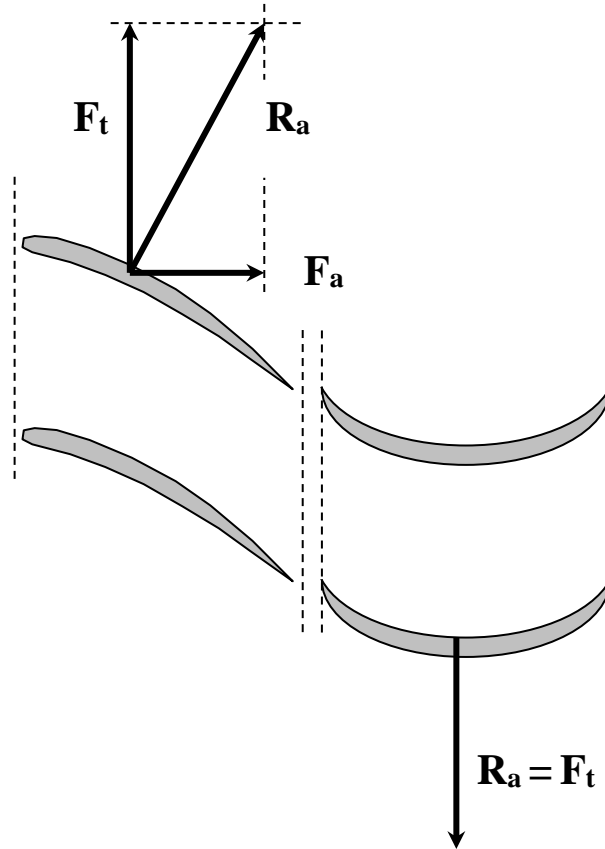
$$\mathbf{R}_a = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_a$$

F_t : effort de flexion.

F_a : effort de torsion.

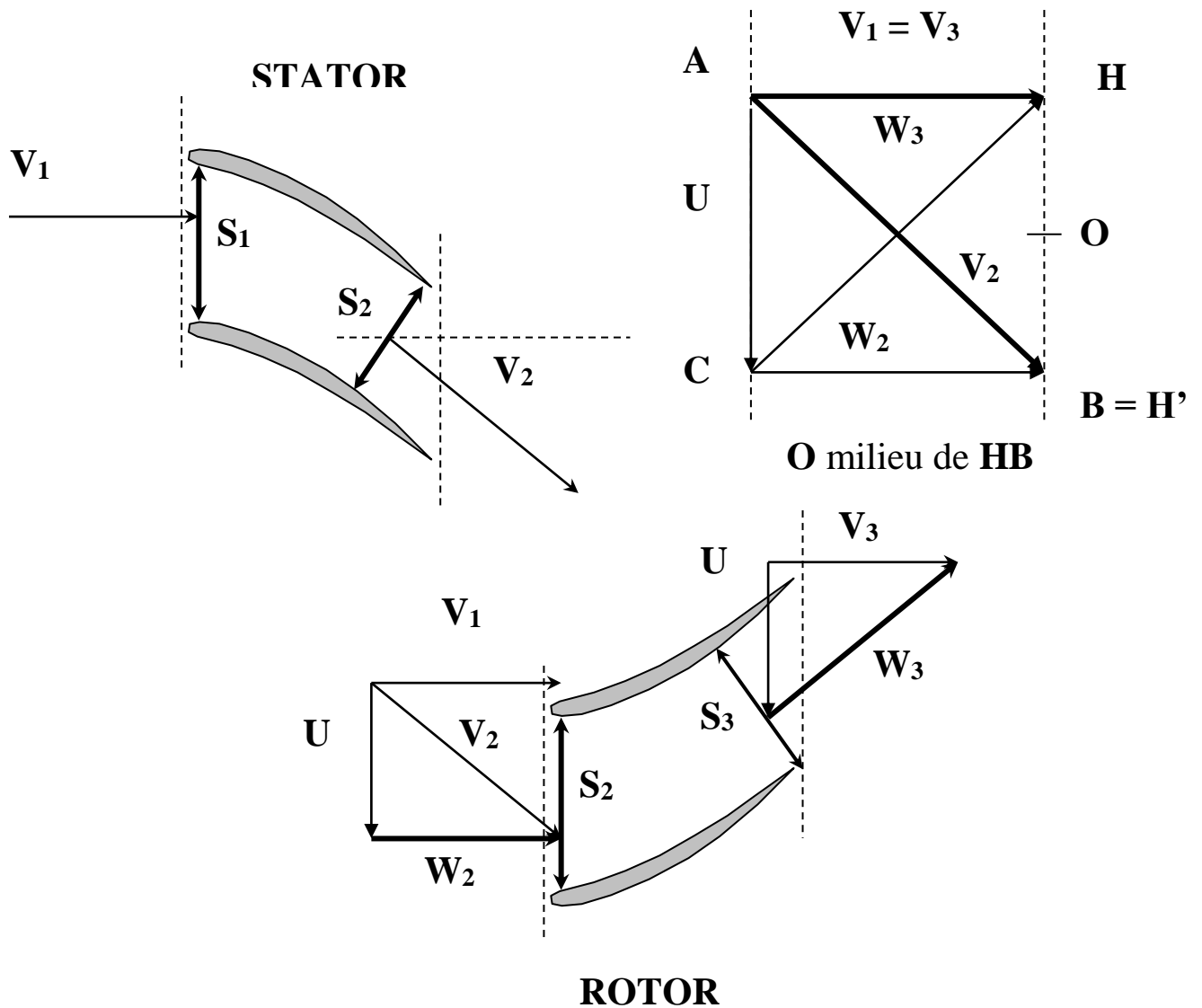
☞ ROTOR.

$$\mathbf{R}_a = \mathbf{F}_t$$



$$\sum F_t \cdot \phi_{\text{moyen}} = \mathbf{Couple}_{\text{moteur}}$$

Turbine à réaction.



☞ $V_1 = W_2$ et $V_2 = W_3$

⇒ les détente sont identiques dans le stator et le rotor.

$$S_1 / S_2]_{\text{stator}} = S_2 / S_3]_{\text{rotor}}$$

☞ La détente n'est que partielle dans le stator. Le rotor est aussi le siège d'une détente par une mise en vitesse ⇒ récupération d'énergie.

☞ Dans la pratique rien n'interdit que le niveau de détente dans le Rotor et le stator soit différent.

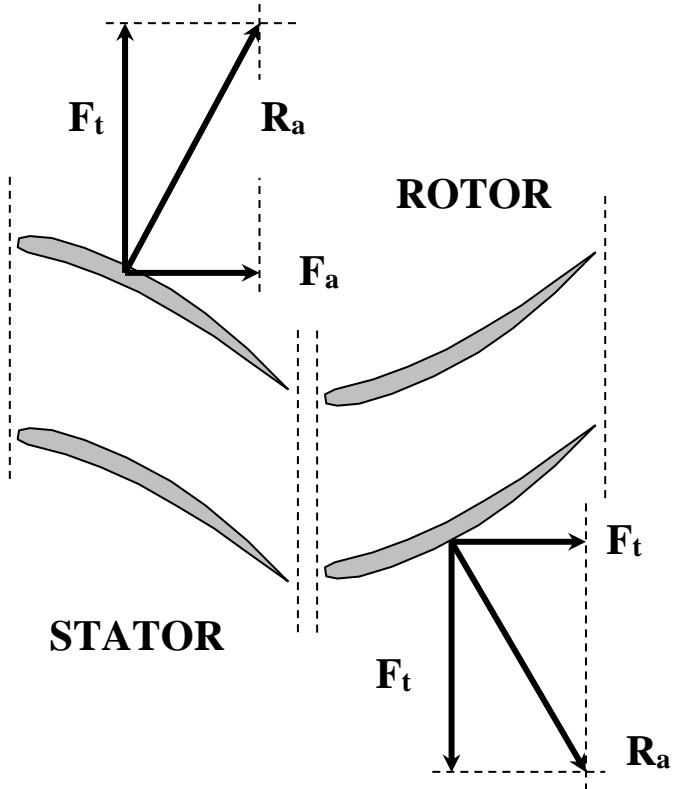
Efforts sur les profils d'une turbine à réaction.

☞ **STATOR**
 Résultante aérodynamique.
 $\mathbf{R}_a = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_a$

F_t : effort de flexion.
 F_a : effort de torsion.

☞ **ROTOR**
 Résultante aérodynamique.
 $\mathbf{R}_a = \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_a$

F_t : effort de flexion.
 F_a : effort de torsion.

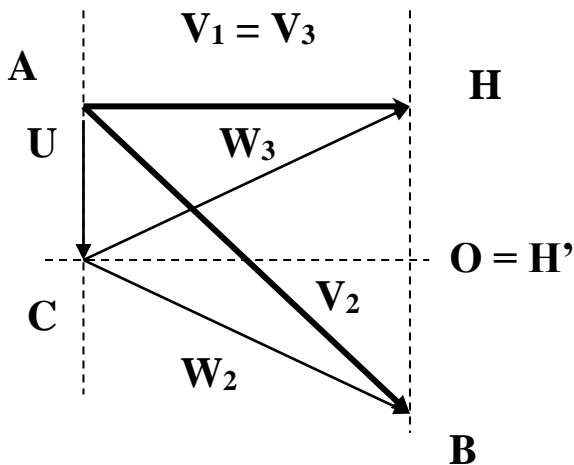


Les efforts aérodynamiques sur les ailettes sont les mêmes dans le rotor et le stator.

$$\sum \mathbf{F}_t \cdot \phi_{\text{moyen}} = \mathbf{C}\text{ouple}_{\text{moteur}}$$

Degré de réaction.

$$\sigma = \frac{\text{Energie de pression perdue dans le rotor}}{\text{Energie de pression perdue dans l'étage}} = \frac{OH'}{HH'}$$



Turbine à action

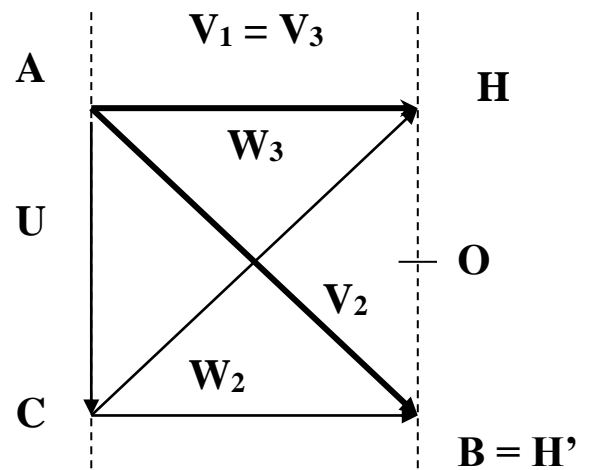
$$\sigma = \frac{OH'}{HH'} = 0 \quad W_2 = W_3$$

Turbine à réaction

$$\sigma = \frac{OH'}{HH'} = \frac{1}{2}$$

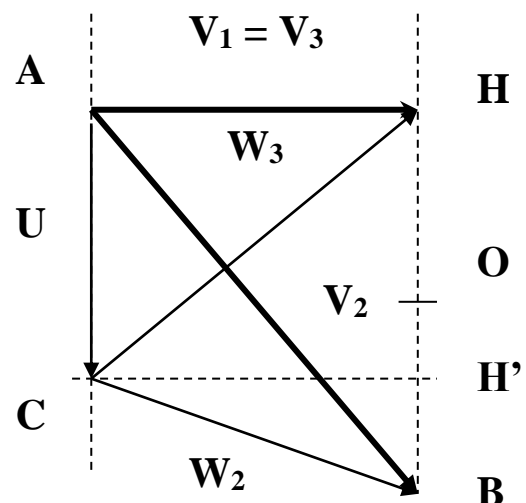
$$V_1 = V_3 = W_2$$

$$V_2 = W_3$$



Turbine à réaction : cas général

$$\sigma = \frac{OH'}{HH'}$$



TURBINE A ACTION	TURBINE A REACTION
<p>☞ La détente est intégrale dans le stator (mise en vitesse)</p> <p>V_2 très élevée → Pb sonique.</p>	<p>☞ La détente n'est que partielle dans le stator.</p> <p>$V_2 _{TR} < V_2 _{TA}$</p>
<p>☞ Récupération d'énergie maximum au niveau du rotor → travail très élevé.</p>	<p>☞ Rotor siège d'une détente (mise en vitesse)</p> <p>Récupération d'énergie partielle.</p>
<p>☞ A même U : ($P = puissance$)</p> <p>$P_{action} > P_{réaction}$</p>	<p>☞ A même puissance P :</p> <p>$U_{réaction} > U_{action}$</p>
<p>☞ Degré de réaction nul : $\sigma = 0$.</p>	<p>☞ Degré de réaction $\sigma \neq 0$.</p>
<p>☞ La température en entrée de rotor est minimum et ΔT dans le rotor est nul.</p>	<p>☞ ΔT dans le rotor $\neq 0$.</p>
<p>☞ Sollicitation simple sur le rotor : flexion seulement.</p>	<p>☞ Sollicitation composée sur le rotor.</p> <p>☞ Composante axiale qui décharge partiellement le roulement avant.</p>

Evolution des paramètres.

-----> Turbine à action.

	STATOR	ROTOR	ETAGE
S			
V			
P_s			
T_s			
T_t			
P_t			

Conicité de la turbine.

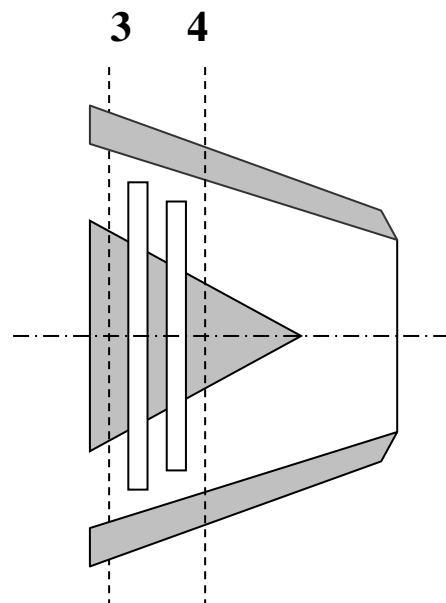
Conservation du débit masse : $\rho.S.V = cte$

Détente : $\rho_3 > \rho_4$

Par construction : $V_3 = V_4$

⇒ $S_3 < S_4$

DIVERGENT



Etude théorique de la turbine.

Evolution théorique dans le plan pression température : Transformation adiabatique.

$$P^{1-\gamma} \cdot T^{\gamma} = \text{Cte.}$$

Puissance théorique de la turbine axiale.

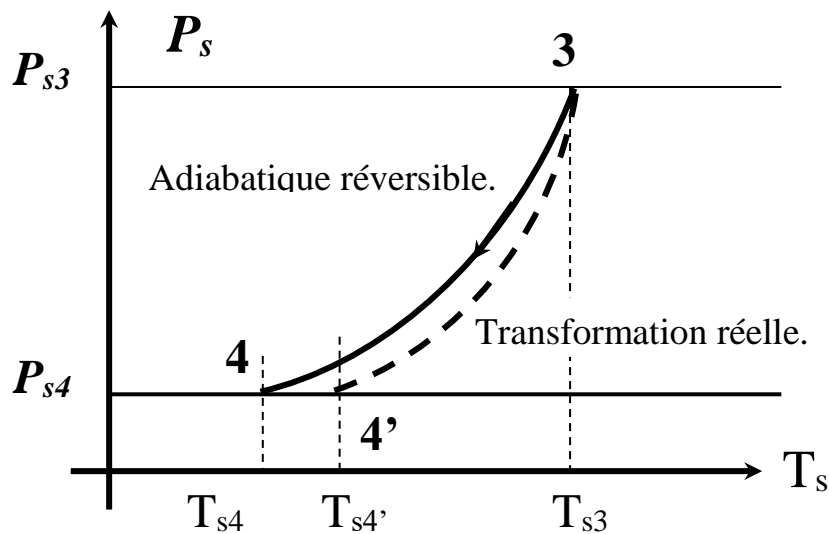
$$[W_T - Q]_3^4 = [H]_3^4 + 0,5.[V^2]_3^4 + g.[z]_3^4$$

Hypothèses :
 $z = \text{cte,}$
 $V = \text{cte,}$
 $Q = 0$ transformation adiabatique.
 $H = C_p.T$ gaz parfait

$$[W_T]_3^4 = [H]_3^4 = C_p \cdot (T_{s4} - T_{s3}) < 0$$

$$P_{th} = (Q_a + Q_c) \cdot C_p \cdot (T_{s4} - T_{s3})$$

Evolution réelle dans le plan pression – température.



$$P_{réelle} = (Q_a + Q_c) \cdot C_p \cdot (T_{s4'} - T_{s3})$$

$$\eta = \frac{T_{s4'} - T_{s3}}{T_{s4} - T_{s3}} \approx 0,85$$

Equilibre compresseur / turbine

En régime de rotation stabilisé, on peut écrire au niveau du couple turbine / compresseur :

$$P_{turbine} |_{th} = P_{compresseur} |_{th}$$

$$(Q_a + Q_c) \cdot C'_p \cdot (T_{s3} - T_{s4}) = Q_a \cdot C_p \cdot (T_{s2} - T_{s1})$$

Hypothèses :

- ☞ $C'_p = C_p$
- ☞ Débit carburant négligeable devant le débit d'air.
- ☞ Puissance absorbée par les accessoires est négligeable.

$$T_{s3} - T_{s4} = T_{s2} - T_{s1}$$

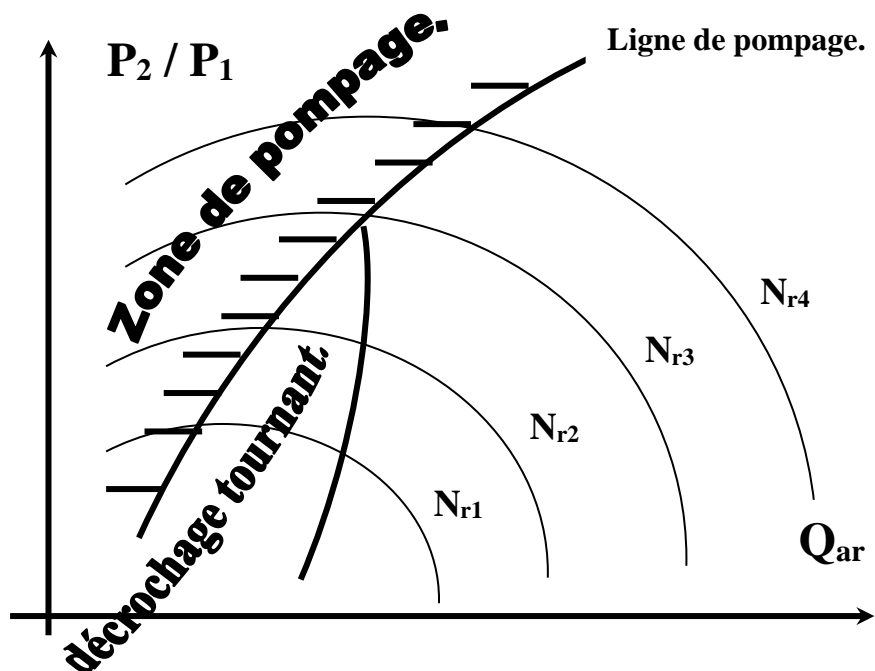
Adaptation Turbine – Compresseur.

Dans un turbo-réacteur, la turbine est accouplée au compresseur. L'attelage ainsi formé est piloté par les paramètres suivants :

- ☞ La puissance des gaz récupérée par la turbine permet d'obtenir la rotation.
- ☞ La rotation communiquée au compresseur assure l'établissement du débit d'air.
- ☞ Le débit d'air généré par le compresseur est utilisé dans la turbine pour recueillir le couple par la puissance des gaz.

Nécessité d'avoir une bonne adaptation entre la turbine et le compresseur.

Courbes caractéristiques du compresseur.



$$Q_{ar} = \frac{Q_a \cdot (T_1)^{1/2}}{P_1 \cdot D^2} \quad \text{et} \quad N_r = \frac{N \cdot D}{(T_1)^{1/2}}$$

Courbes caractéristiques de la turbine.

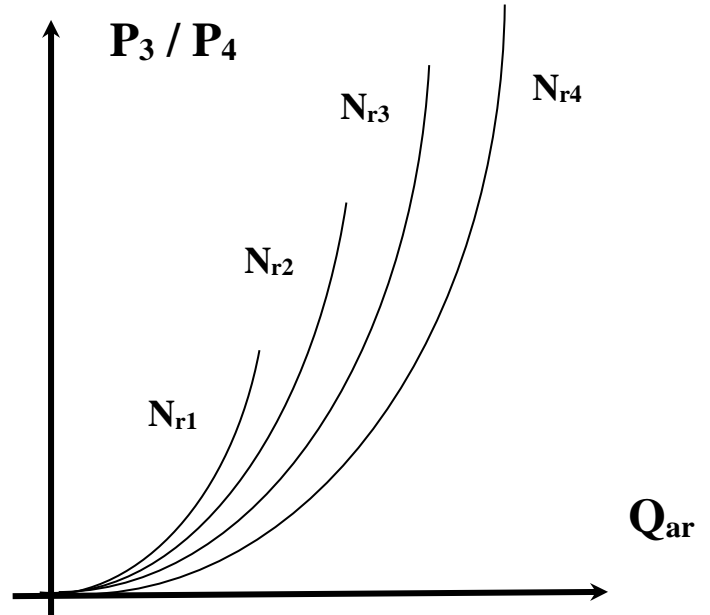
Travail dans le plan débit d'air / rapport manométrique.

La turbine est traversée par un courant gazeux dont on peut faire varier le débit.

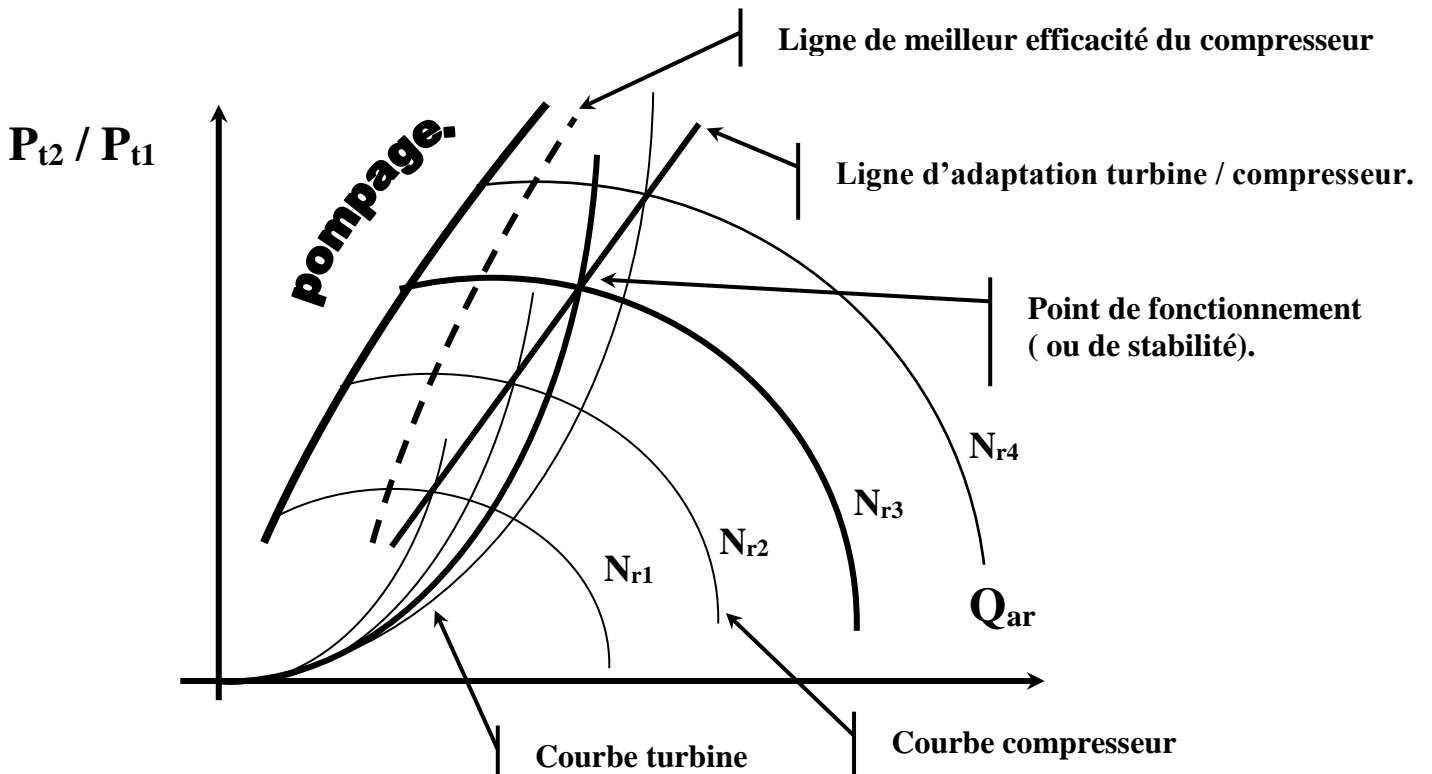
Un frein permet de maintenir la vitesse de rotation de la turbine constante lorsque le débit varie.

Le régime de rotation de la turbine dépend du système de frein qui absorbe l'énergie fournie par la turbine.

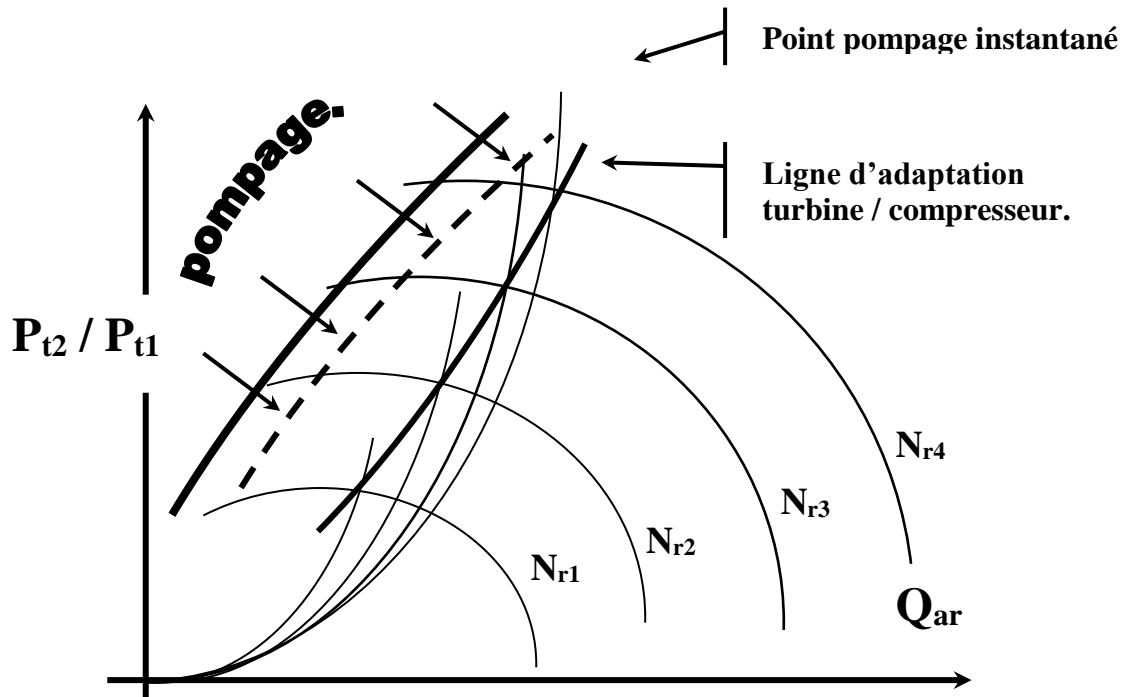
Le régime se stabilise à une valeur telle que la puissance fournie par la turbine à ce régime est égale à la puissance absorbée par le frein à ce même régime.



En couplant la turbine au compresseur, le compresseur freine la turbine et le régime se stabilise à une valeur qui dépend du débit de gaz qui traverse l'attelage.



Limitations : Zone de pompage.



Lorsque l'altitude augmente, les ailettes du compresseur décrochent plus tôt et le risque de pompage augmente.

Le constructeur ne peut donc pas choisir une ligne d'adaptation trop proche de la ligne de meilleur efficacité du compresseur.

A régime élevé du compresseur, lorsque l'altitude augmente, la température devant le compresseur diminue. Le régime $N / (T_1)^{1/2}$ augmente et rencontre la ligne de pompage en un point appelé point de pompage instantané.

Conséquence du pompage en altitude :

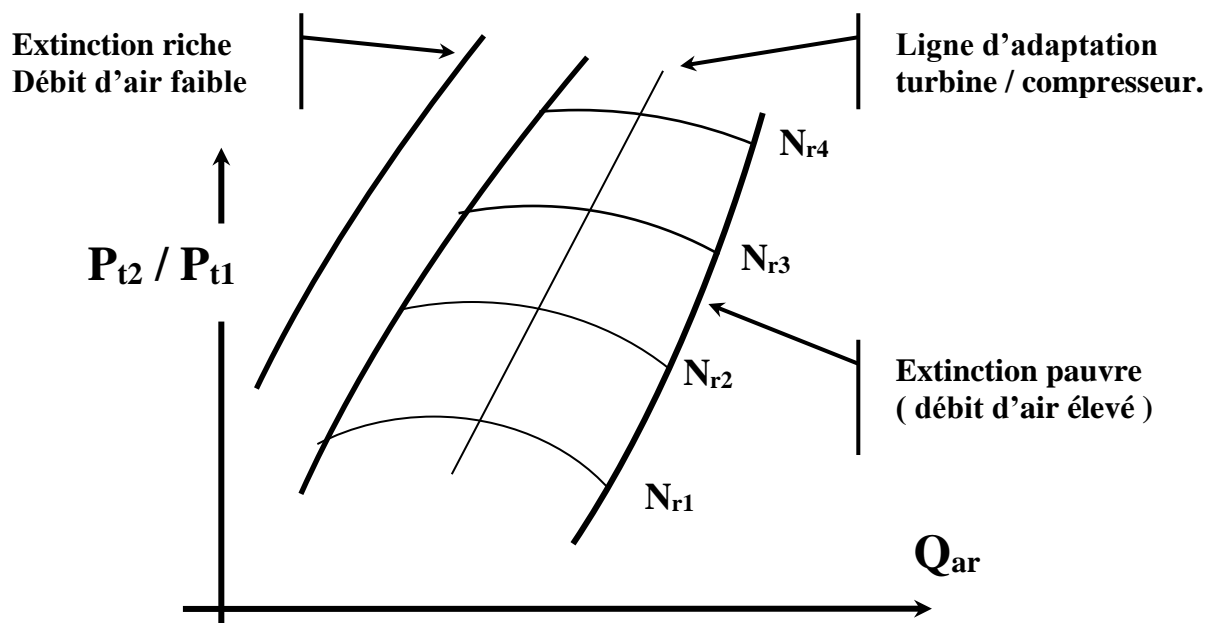
- ☞ Limitation du plafond en altitude. Dans la pratique le constructeur définit cette limite au dessus du plafond de sustentation de l'avion.
- ☞ Limitation d'utilisation en nombre de MACH à haute altitude.

Limitations : zone de combustion.

La chambre de combustion est dimensionnée pour fonctionner dans une gamme de dosage réel avec des valeurs limitatives de pression, température et de vitesse fournies par le constructeur.

Deux limitations apparaissent sur le plan des courbes caractéristiques du compresseur :

- ☞ L'extinction riche.
- ☞ L'extinction pauvre



Le constructeur est amené à considérer ces deux limitations pour positionner correctement la ligne d'adaptation.

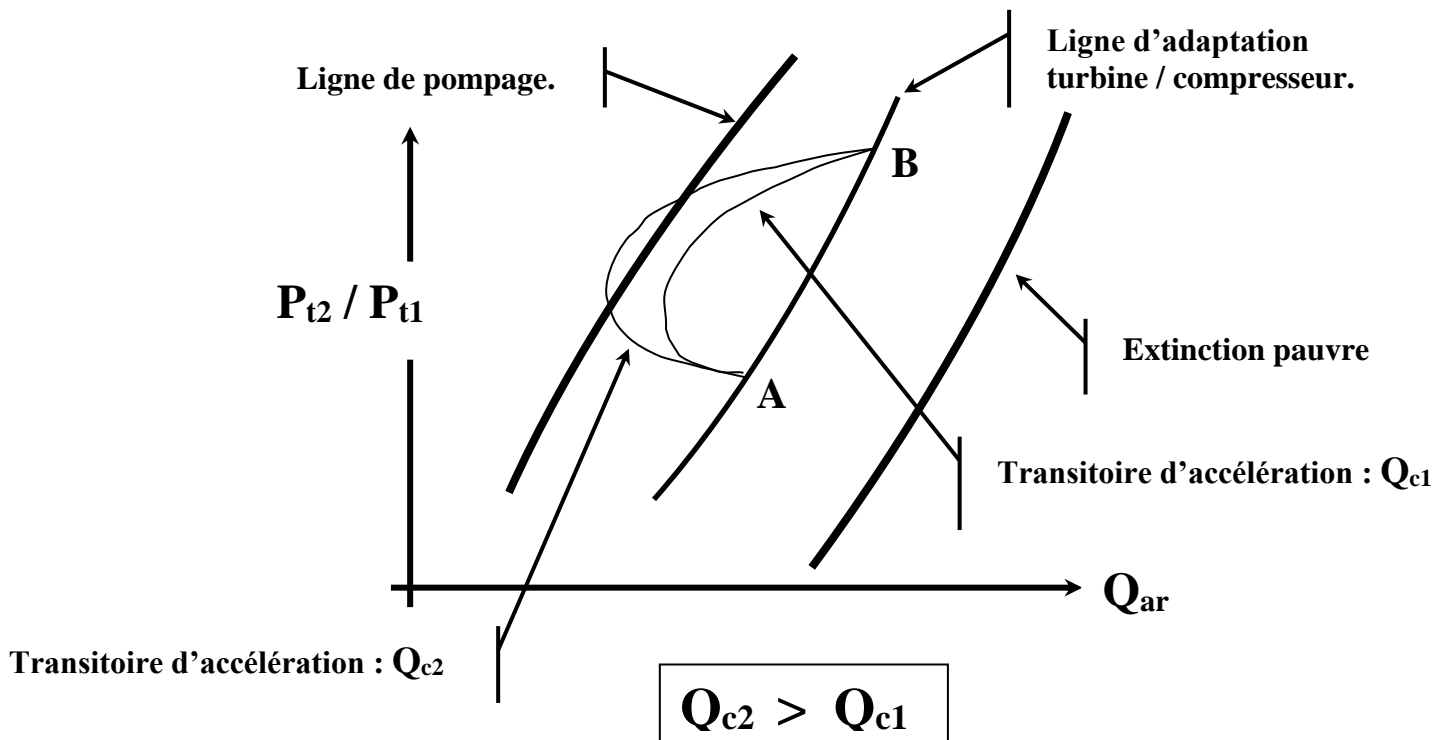
La limite d'extinction riche ne peut être atteinte sans que le point de fonctionnement traverse la zone de pompage.

Pompage en accélération ou obstruction thermique.

Le fonctionnement de l'attelage turbine/compresseur est stable sur la ligne d'adaptation. Il n'est pas possible d'effectuer un changement de régime le long de cette ligne.

L'accélération se fait en augmentant le couple de la turbine par un accroissement du débit carburant.

L'attelage turbine/compresseur quitte le point A de régime stabilisé sur la ligne d'adaptation pour atteindre le point B de régime stabilisé sur la ligne d'adaptation par une succession de points de régimes transitoires.



La trajectoire du régime transitoire s'incurve d'autant plus vers la gauche que l'augmentation du débit carburant est importante.

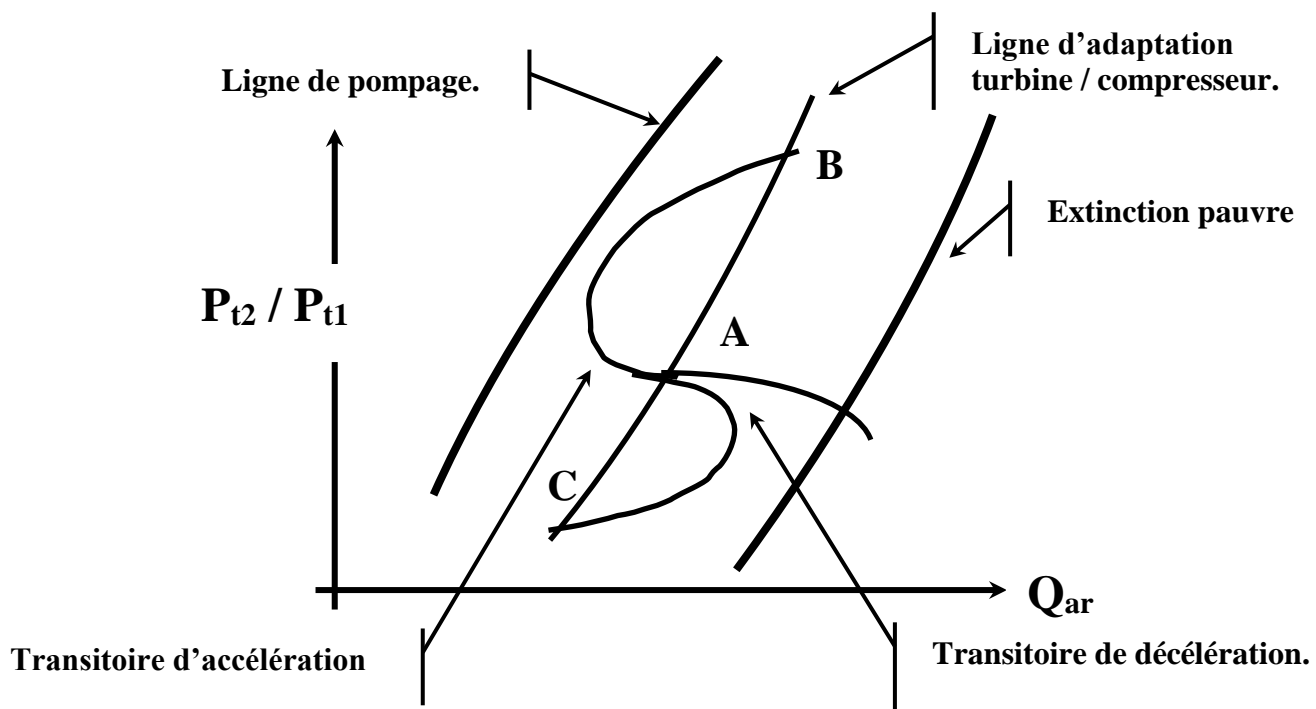
Pour une ligne d'adaptation donnée, si l'augmentation du débit carburant est trop importante, le point de fonctionnement du compresseur risque de traverser la zone de pompage.

Le choix de la position de la ligne d'adaptation est importante. La proximité de cette ligne avec la zone de pompage amène le risque de décrochage du compresseur à chaque accélération.

Régime transitoire en décélération.

La décélération se fait en diminuant le couple de la turbine par une réduction du débit carburant.

L'attelage turbine/compresseur quitte le point A de régime stabilisé sur la ligne d'adaptation pour atteindre le point C de régime stabilisé sur la ligne d'adaptation par une succession de points de régimes transitoires.



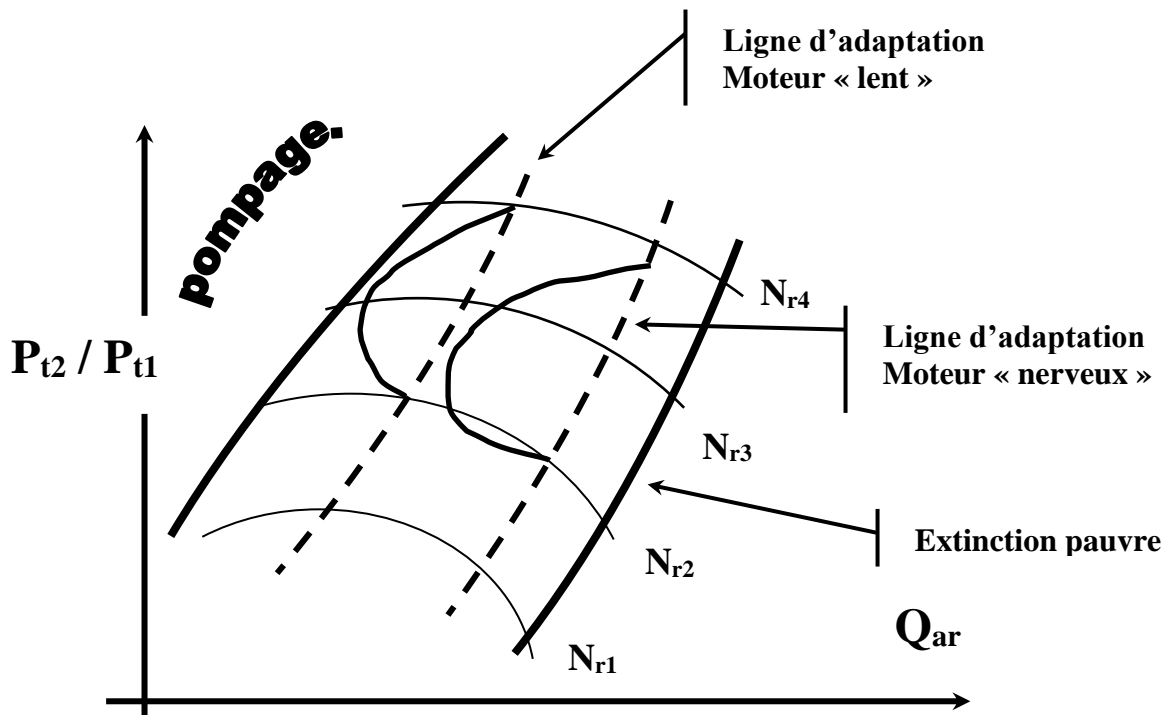
La trajectoire du régime transitoire s'incurve d'autant plus vers la droite que la diminution du débit carburant est importante.

Pour une ligne d'adaptation donnée, si la diminution du débit carburant est trop importante, le régime transitoire peut rencontrer la zone d'extinction pauvre.

Conclusions.

- ☞ Que se soit en accélération moteur ou en décélération moteur, il est nécessaire de limiter l'évolution du débit carburant pour éviter soit le pompage du compresseur soit l'extinction de la chambre.
- ☞ Ce travail de limitation est effectué par le dispositif de régulation carburant qui intègre un « CONTROLEUR D'ACCELERATION ET DE DECELERATION ».

Définition d'un moteur : position de la ligne d'adaptation.



Courbe d'adaptation éloignée de la ligne de pompage.

- ☞ Moteur « nerveux »,
- ☞ Compresseur à rapports manométriques relativement faibles,
- ☞ consommation spécifique élevée.

courbe d'adaptation proche des points de meilleur efficacité du compresseur (proche de la ligne de pompage).

- ☞ Moteur « lent »,
- ☞ Compresseur à rapports manométriques relativement élevés,
- ☞ Consommation spécifique faible,
- ☞ Temps d'accélération important : passage du ralenti au régime maximum en une dizaine de seconde.

Technologie de la turbine.

Contraintes subies par la turbines : sur les ailettes mobiles.

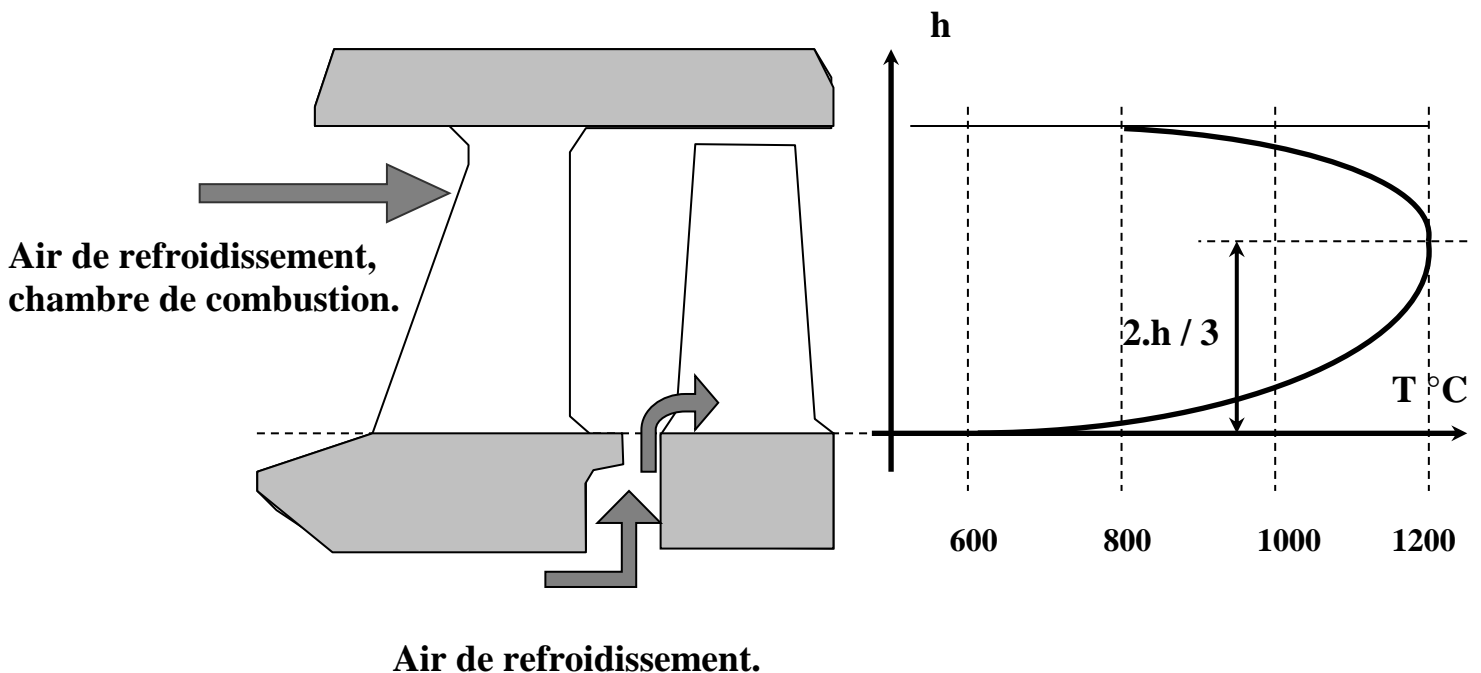
Contraintes mécaniques.

- ☞ Effet de la force centrifuge : effort de traction.
- ☞ Action des gaz : effort de flexion et de torsion.
- ☞ Vibrations : Déséquilibre.
Hétérogénéité de l'écoulement.
Constitution des ailettes.

Contraintes thermiques.

Origine : les gaz provenant de la chambre de combustion.

Répartition théorique de la température sur une ailette.



Le fluage : contrainte thermique + contrainte centrifuge.

Définition : C'est l'allongement progressif d'un matériau sollicité mécaniquement à une température supérieur au 1/3 de sa température de fusion.

Il entraîne une déformation permanente des pièces.

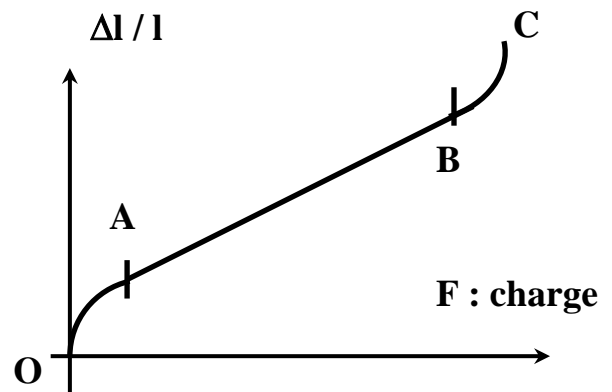
Le fluage dépend de :

- ☞ La charge appliquée,
- ☞ La température à laquelle est soumise la pièce,
- ☞ Temps d'application de la charge.

OA : fluage primaire, allongement instantané.

AB : fluage secondaire, allongement très lent (évolution linéaire).

BC : fluage tertiaire, allongement très rapide et rupture



Contraintes chimiques.

Les contraintes chimiques (oxydation et attaque par résidus de combustion) sont favorisées par l'élévation de température.

- ☞ Liés aux produits de raffinage contenus dans le carburant (soufre et phosphore).
- ☞ Certains constituants des ailettes (Nickel) associés à chaud au soufre et phosphore donnent des produits de moindre résistance (effritement local de l'ailette).
- ☞ Oxydation à chaud.

Contraintes subies par la turbines : sur les ailettes fixes.

Contraintes mécaniques. → *Action des gaz,*
→ *Vibration de la structure.*

Contraintes thermiques.

Contraintes chimiques.

Matériaux dans les turbines.

- Choix repose sur : Résistance à la rupture,
Module d'élasticité,
Module d'élasticité,
Comportement au fluage à chaud.
- Autres facteurs : Résistance à la corrosion par les résidus et à l'oxydation à chaud,
Tenue à l'érosion aux impacts.

Dans le distributeur de turbine.

- ☞ Acier base cobalt, chrome et nickel : KC 25 WN
Cobalt 50 %, chrome 20 % et nickel 15 %.
- ☞ X40 base cobalt : chrome 25 %, nickel 15 %, carbone 0,5 % + silice, manganèse, fer, tungstène.
- ☞ René 80 en turbine BP base nickel.

Dans les ailettes de turbine.

- ☞ Acier base nickel, cobalt,
- ☞ René80 base nickel : chrome 14 %, Cobalt 9,5 %, carbone 0,17 %.
(en turbine BP)
aluminium, titane, silicium, manganèse, fer, tungstène, molybdène, zirconium, bore.
- ☞ René77 base nickel : chrome 14,6 %, Cobalt 15 %, carbone 0,12 %.
(en turbine HP) aluminium, titane, silicium 4,3 %, manganèse, fer, tungstène, molybdène, zirconium, bore.
- ☞ Nimonic 90 (nickel 59 %, Cobalt 16,5 %, chrome 19,5 %)
- ☞ René41 (nickel 55 %, Cobalt 11 %, chrome 19 %)

Dans les disques de turbine.

- ☞ Inconel718 base nickel, chrome 19 %, carbone 0,08 %.
- ☞ aluminium, titane, silicium, manganèse, fer, molybdène, bore.

Les matériaux utilisés aujourd'hui sont des matériaux réfractaires dont la résistance subsiste aux hautes températures. Ils sont à base de :

Nickel, Cobalt, Chrome, Fer et Carbone

Les composants d'addition sont :

**aluminium, titane, silicium, manganèse, tungstène, molybdène,
zirconium, bore, niobium, vanadium, tantale.**

La variation des pourcentages des éléments de base et des composants d'addition permet d'obtenir des alliages de caractéristiques différentes.

Nouveaux alliages pour turboréacteurs développés par General Electric.

René 80 : utilisé pour la fabrication des aubes de turbines.

Le René 80 est un alliage de fonderie à base de nickel (Nickel 60 %, Chrome 14 %, Cobalt 9,5 %, Titane 5 %, Molybdène 4 %, Tungstène 4 %, Aluminium 3%, le reste Carbone, Bore et Zirconium).

Il se caractérise par une excellente résistance à la corrosion et à l'oxydation à chaud, supérieure de 30 % à celle de l'U 700 aux températures habituelles de fonctionnement des aubes de turbine qui oscillent entre 930° et 980°C pour le métal des aubes et 1200° et 1260°C pour les gaz pénétrant dans la turbine.

En outre, des essais de fatigue thermique ont montré que les aubes en René 80 avaient une durée de vie 10 fois plus longue que celles en U 700.

René 95 : utilisé pour la fabrication des disques de compresseurs et de turbines.

Le René 95 est un alliage de forge à base de nickel (Nickel + Chrome 14% Cobalt 8%, Aluminium 3,5 %, Niobium 3,5 %, Molybdène 3,5 %, Tungstène 2,5 %, quelques pourcentages de Carbone, de Zirconium et de Bore).

Il est conçu pour une plage de température de fonctionnement de 480° à 650°C et offre une résistance de 20 à 30 % supérieure à celles des alliages actuellement disponibles.

Cette résistance permettra de réaliser d'importantes réductions de poids et d'augmenter les vitesses périphériques des disques de turbines.

Alliage de cobalt pour turbines à gaz de grande puissance :

Les alliages de cobalt sont actuellement utilisés pour la production, par le procédé à la cire perdue, des aubages de stators de toutes les turbines à gaz de grande puissance.

Exemple - X 40 (base cobalt + 25 % Chrome + 10,5 % Nickel + 7,5 % Tungstène + 2 % Fer ...)

Les alliages de cobalt ont de tout temps été préférés pour les aubages de stators, principalement à cause de leur excellente tenue à la corrosion et à l'oxydation à chaud.

Les meilleurs de ces alliages sont toutefois difficiles à mettre en forme, sauf par moulage.

Les segments réalisés en cet alliage sont donc moulés par le procédé à la cire perdue et leur confère d'ailleurs une grande précision dimensionnelle, ainsi que l'état de surface nécessaire à l'écoulement aérodynamique des gaz brûlés.

Ajoutons que ce procédé convient particulièrement bien à l'obtention des sections minces et des configurations complexes qui caractérisent les segments d'aubages.

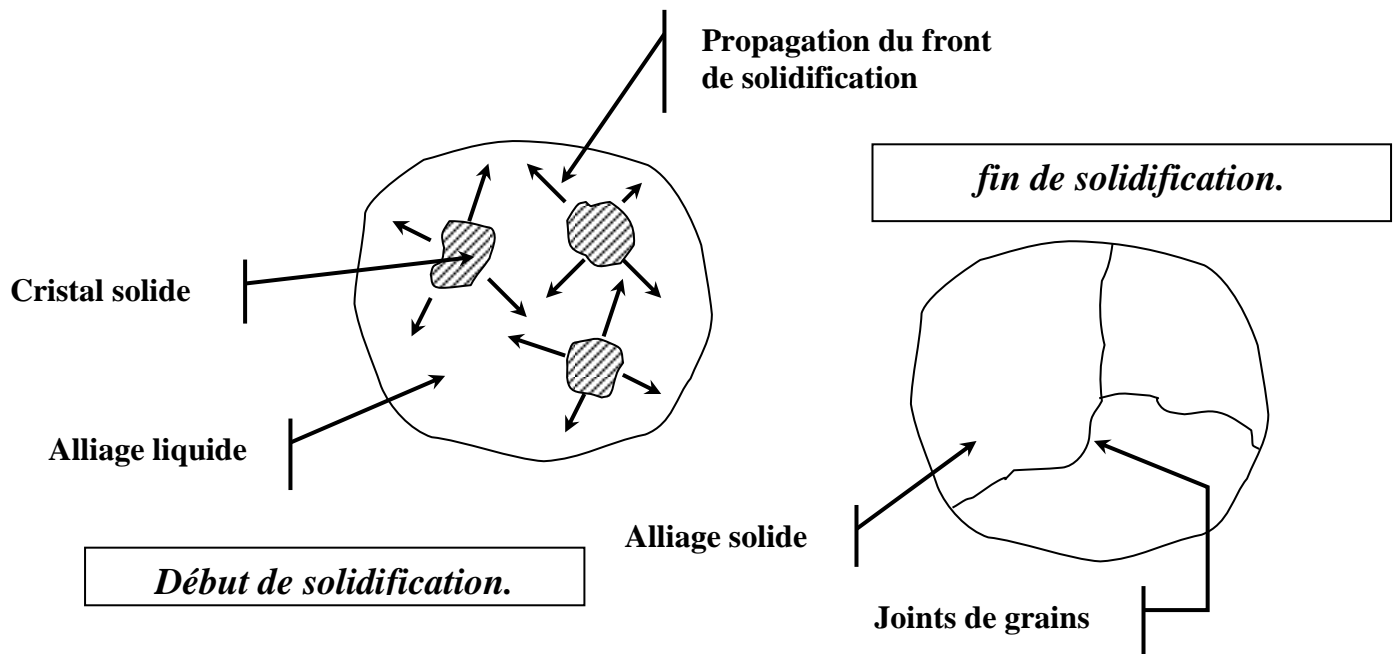
Techniques permettant d'augmenter la température en entrée de turbine (TET).

Augmenter la TET entraîne :

- ☞ Une augmentation de la puissance du moteur donc une augmentation de la poussée.
- ☞ Une augmentation du rendement thermique et du rendement globale du moteur.

Technique de cristallisation : solidification « libre » - à l'air et sans contrôle.

Améliorer les technique de cristallisation permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux qui constituent les ailettes de la turbine.



Joints de grains: surfaces de discontinuité dans les liaisons internes de l'alliage.

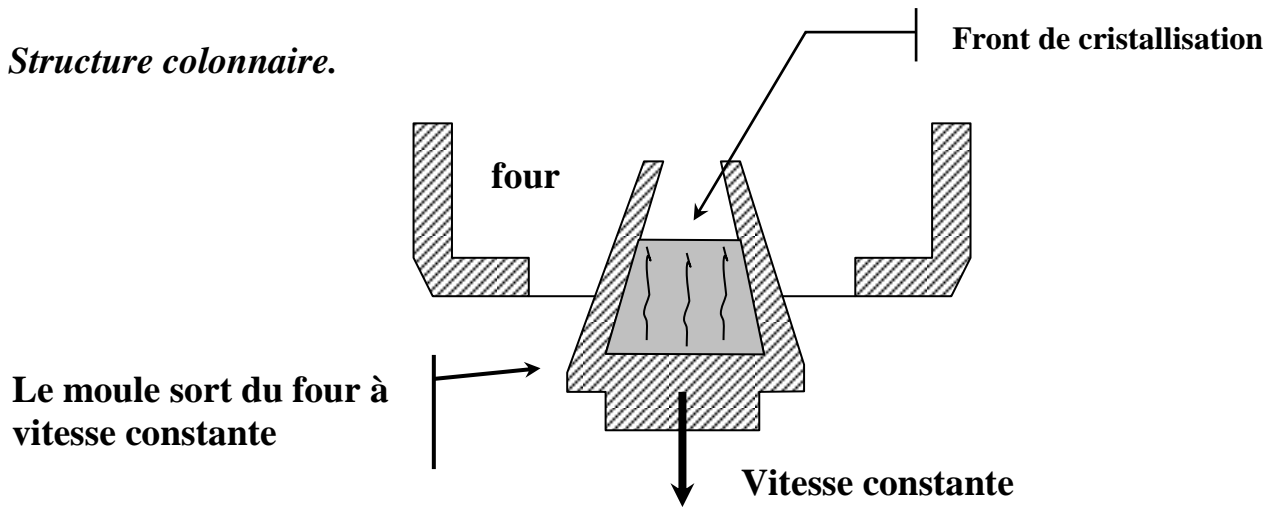
Zones fragilisées encore appelées **zone de rupture**.

Les divers sollicitations mécaniques et thermiques peuvent entraîner la rupture d'une ailette.

S'il y a rupture, elle aura lieu au niveau d'un joint de grain.

Technique de cristallisation : solidification « dirigées ».

Structure colonnaire.



On cherche à supprimer les joints de grains perpendiculaires au champ centrifuge.

Lors de la solidification, on fait apparaître des cristaux en forme de colonne parallèle au bord d'attaque et de fuite de l'ailette.

Structure mono cristalline.

L'obtention d'un monocristal se fait à partir du même dispositif. La partie inférieure du moule possède un « appendice » au niveau duquel début la solidification. Sa forme est telle qu'un seul grain s'y développe et à partir de celui-ci toute l'aube de façon régulière.

Cette technique vise à supprimer tous les joints de grains de telle sorte que :

une ailette = un cristal solide

Avantages des deux solutions :

- ☞ Augmente la TET. Avec ces techniques les ailettes peuvent supporter des températures $> 1500\text{ °C}$, contre 980 °C avec les super alliages.
- ☞ Augmente la résistance au fluage.
- ☞ Augmente la durée de vie des ailettes :
 - Solidification libre ≈ 2500 heures.
 - Solidification colonnaire ≈ 5000 heures.
 - Solidification mono cristalline ≈ 10000 heures.
- ☞ Diminue le débit d'air de refroidissement au niveau de la turbine : moins de piquage sur le compresseur.
- ☞ Augmente le rendement global de la machine.

Autres techniques permettant d'augmenter la température en entrée de turbine (TET).

Matériaux composites : COTAC.

Le COTAC est un super alliage renforcé par une faible fraction volumique de carbure de niobium de type mono cristallin. Ce traitement augmente la tenue à la fatigue thermique, mécanique et vibratoire. Cela augmente aussi la stabilité structurale.

Ce matériau dispose d'un effet de mémoire des longueurs. On peut par un traitement thermique approprié rétablir les caractéristiques et les dimensions initiales d'une ailette après un fluage.

Avantages :

- Augmente la TET (T° matériau $\approx 1100^{\circ}\text{C}$).
- Diminue le débit d'air de refroidissement.
- Augmente le rendement global.
- Augmente la durée de vie de l'ailette.

Les céramiques.

On réalise une association à froid de poudre métallique plus des liants qui permettent d'avoir une forme définie.

Par FRITTAGE : cuisson sous haute pression. La pièce obtient ses caractéristiques dimensionnelles et mécaniques définitives.

Avantages :

- Augmente la TET.
- Suppression des techniques de refroidissement.
- Gain de poids au niveau de la turbine.
- Diminution du prix de réalisation.

Inconvénients :

- Technique de production lourde,
- Peu résistant aux chocs,
- Elasticité \approx nulle,
- Conductibilité thermique mauvaise.

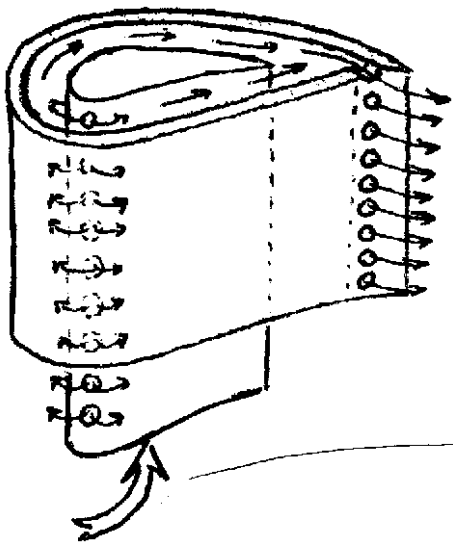
Techniques de refroidissement des ailettes.

But : Evacuer la quantité de chaleur accumulée dans les ailettes et protéger les aubes contre les gaz chauds.

Convection interne.

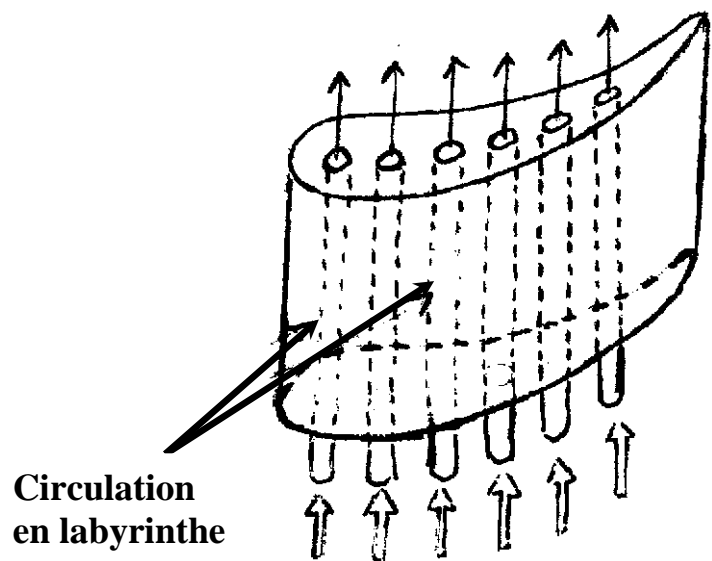
La technique est de provoquer une circulation d'air à haute pression dans les ailettes pour évacuer la chaleur dégagée par convection.

Par chemisage dans le stator.



Air haute pression.

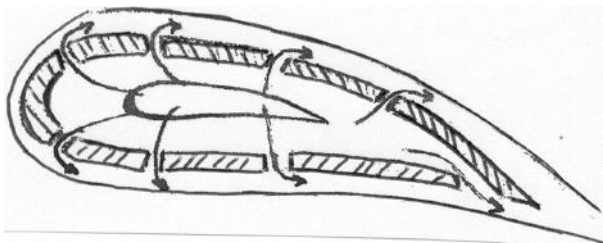
Par canaux parallèle dans le rotor.



Circulation
en labyrinthe

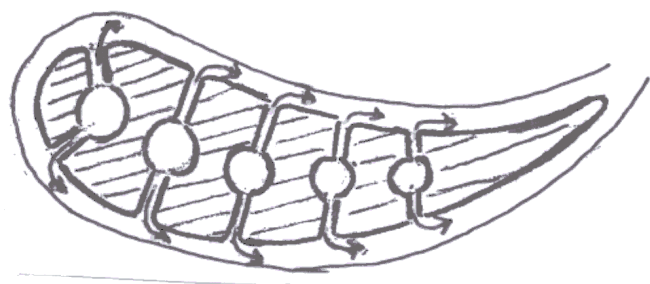
Air haute pression.

Refroidissement par film protecteur.



Le débit de refroidissement est élevé.

Pour une TET gaz de 1300 °C, avec de l'air HP, on obtient 900 °C de température métal avec 6% du débit d'air total pour le refroidissement.



Limitations dues à la turbine et mesure de la température de turbine.

Limitations.

La turbine est un élément du moteur qui travaille dans des conditions critiques.

- ☞ Force centrifuge élevée MAXI
- ☞ TET élevée MAXI (la plus restrictive).
- ☞ Atmosphère corrosive pas de limitation car difficilement contrôlable.

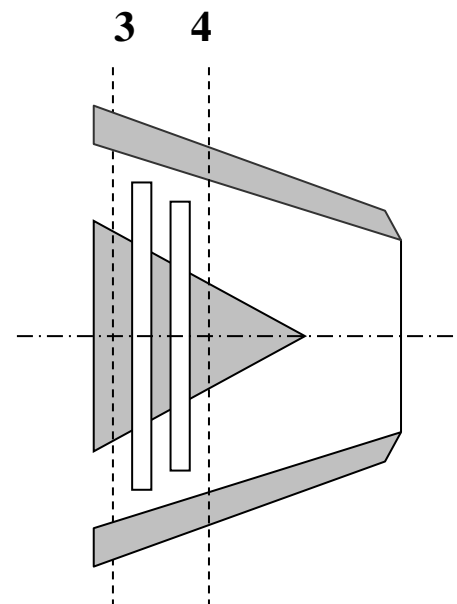
Remarque :

La température de la turbine n'est pas une limite absolue, son dépassement n'amène pas forcément à la rupture, mais plus généralement cela diminue la durée de vie de la turbine.

Mesure de la température dans la turbine.

On mesure la température de la turbine soit en sortie de la turbine soit entre deux étages.

- ☞ EGT : Exhaust Gas Temperature,
- ☞ TGT : Total Gas Temperature,
- ☞ ITT : Interstage Temperature Turbine.
- ☞ T_4



Matériaux utilisés en aéronautique. Informations générales

Nickel : Élément métallique de numéro atomique $Z = 28$ et de masse atomique 58,71 (symbole Ni).

Métal (Ni) blanc de densité 8,9, qui fond à 1455 °C et bout vers 2900 °C. Le nickel entre dans la composition de nombreux alliages, notam. des aciers inoxydables.

Le nickel possède d'excellentes propriétés mécaniques. Il résiste aux agents atmosphériques et à la plupart des agents chimiques, et il est doué de propriétés magnétiques. On l'utilise pour protéger les métaux contre la corrosion. Ses alliages sont très employés (fabrication des monnaies, orfèvrerie, industrie).

Cobalt : Élément métallique de numéro atomique $Z = 27$, de masse atomique 58,93 (symbole Co).

Métal blanc, ferromagnétique, de densité 8,9, qui fond vers 1450 °C et bout vers 2900 °C. Le cobalt entre dans la composition d'aciers destinés à la fabrication d'outils de coupe ultrarapides.

Le cobalt entre dans la composition de nombreux alliages spéciaux (ferrocobalt, notamment) destinés à la fabrication d'outils de coupe, de résistances électriques et de pièces polaires d'électroaimants. L'isotope 60, radioactif, sert en médecine à soigner les tumeurs («bombe au cobalt», effectuant la cobalthérapie).

Chrome : Élément métallique de numéro atomique $Z = 24$ et de masse atomique 51,996 (symbole Cr).

Métal blanc, très dur, de densité 7,19, qui fond à 1875 °C et bout à 2665 °C. Le chrome entre dans la composition des aciers inoxydables.

Dans la nature, le chrome se rencontre sous la forme de chromite FeCr_2O_4 . Il se prépare par réduction de l'oxyde Cr_2O_3 . Le chrome a une grande affinité pour l'oxygène. Il fournit des composés chromeux, chromiques et des chromates et bichromates, dérivant respectivement des oxydes CrO , Cr_2O_3 et CrO_3 . Ses alliages avec le fer (ferrochromes) sont utilisés en sidérurgie dans la fabrication des aciers ordinaires et des aciers spéciaux. Les aciers au chrome servent à fabriquer des roulements et des outils.

Fer : Élément métallique de numéro atomique $Z = 26$ et de masse atomique 55,85 (symbole Fe).

Métal (Fe) gris-blanc, ductile, ferromagnétique, de densité 7,86, qui fond à 1535 °C et bout à 2750 °C.

Le fer constitue près de 5 % de la croûte terrestre (hématite, magnétite, pyrite) et se trouve en abondance, avec le nickel, dans le noyau terrestre. Le fer est un métal ferromagnétique. Il se combine avec tous les éléments non métalliques (sauf l'hydrogène). Sa combinaison avec le carbone donne la cémentite Fe_3C , qui joue un rôle important dans la qualité des aciers. Avec l'azote, il forme des nitrures qui permettent de durcir la surface des pièces. Les acides dilués attaquent facilement le fer. L'humidité favorise la combinaison du fer et

de l'oxygène sous la forme d'une pellicule de rouille qui, perméable à l'air, n'empêche pas l'attaque du métal sous-jacent. On peut éviter la corrosion du fer en le protégeant par un composé moins oxydable que lui.

La métallurgie du fer, ou sidérurgie, a pour objet la fabrication du fer et de ses alliages, l'acier notamment, qui a une importance industrielle et économique considérable. La fabrication de l'acier passe par l'élaboration de la fonte (carbure de fer contenant entre 3 et 6 % de carbone) au haut fourneau. La fonte est décarburée par oxydation du carbone au convertisseur (le plus souvent avec soufflage à l'oxygène) ou au four Martin, ce qui permet d'élaborer les aciers courants. Les aciers de qualité sont produits au four électrique.

Carbone : Élément non métallique de numéro atomique $Z = 6$ et de masse atomique 12,01 (symbole C). La masse atomique du carbone 12, isotope ^{12}C ($M = 12$), a été choisie comme base pour le calcul des masses atomiques des éléments.

Non-métal (C), qui fond à 3600 °C et bout à 4800 °C.

Fibre de carbone, obtenue par pyrolyse de matières acryliques, et que l'on incorpore dans une matrice en résine époxy ou en alliage léger pour obtenir un matériau composite de très haute résistance.

Tungstène : Élément métallique de numéro atomique $Z = 74$, de masse atomique 183,85 (symbole W, de wolfram, son minerai).

Métal (W) gris, de densité 19,3, qui fond vers 3410 °C et bout vers 5660 °C. Hautement réfractaire, le tungstène est employé notam. dans la fabrication des filaments de lampe à incandescence.

tungstène

Le tungstène possède le point de fusion le plus élevé de tous les métaux. Ce caractère et ses excellentes propriétés mécaniques en font un matériau de choix dans l'industrie. Conférant à l'acier une grande résistance à l'usure, il entre, avec le vanadium et le chrome, dans la composition d'aciers utilisés pour fabriquer des outils à grande vitesse de coupe.

Molybdène : Élément métallique de numéro atomique $Z = 42$ et de masse atomique 95,94 (symbole Mo).

Métal (Mo) blanc, qui fond à 2620 °C et bout à 4612 °C. Le molybdène est utilisé pour la fabrication d'aciers inoxydables.

molybdène

Les propriétés du molybdène sont voisines de celles du chrome et du tungstène. Sa masse volumique est de 10,2. Il possède une grande résistance mécanique à chaud. Il est utilisé sous forme de ferromolybdène pour l'élaboration d'aciers spéciaux (aciers de coupe rapide et aciers inoxydables).

Titane : Élément métallique de numéro atomique $Z = 22$, de masse atomique 47,90 (symbole Ti).

Métal (Ti) de densité 4,54, qui fond vers 1660 °C et bout vers 3290 °C. Blanc de titane: dioxyde de titane, utilisé en peinture.

titane

Le titane possède des qualités mécaniques analogues à celles des aciers, mais il est beaucoup plus léger que ceux-ci. Il est utilisé en peinture sous forme de dioxyde de titane (blanc de titane) à fort pouvoir couvrant. L'industrie aérospatiale l'utilise sous forme d'alliages avec l'aluminium, l'étain et le molybdène. Les structures des avions supersoniques conçus pour des vitesses supérieures à Mach 2,2 doivent être constituées d'une forte proportion de titane pour résister à l'échauffement aérodynamique.

Niobium : Élément métallique de numéro atomique $Z=41$, de masse atomique 92,906 (symbole Nb).

Métal (Nb) gris et brillant, qui fond à 2468 °C et bout à 2742 °C. Très rare, le niobium est toujours associé au tantale dans ses minerais.

Zirconium : Élément métallique de numéro atomique $Z = 40$ et de masse atomique 91,22 (symbole Zr).

Métal (Zr) qui fond à 1850 °C et bout vers 4380 °C, et présente de nombreuses analogies avec le titane.

Le zirconium a une masse volumique (6,5) plus élevée que celle du titane. Résistant bien à la corrosion et absorbant peu les neutrons thermiques, il est utilisé pour gainer les éléments fissiles introduits dans les réacteurs nucléaires.

Vanadium : Élément métallique de numéro atomique $Z = 23$ et de masse atomique 50,94 (symbole V).

Métal (V) de densité 6,1, qui fond à 1900 °C et bout vers 3000 °C.

Réducteur, le vanadium possède de nombreux degrés d'oxydation. On l'utilise pour fabriquer des aciers spéciaux résistant à l'usure et aux chocs (ressorts, soupapes, outils à grande vitesse).

Bore : Élément non métallique de numéro atomique $Z = 5$ et de masse atomique 10,81 (symbole B).

Corps simple (B) de densité 2,34, qui fond vers 2079 °C et se sublime vers 2550 °C, utilisé comme élément d'addition dans les aciers pour améliorer certaines de leurs propriétés.

Les propriétés du bore sont voisines de celles du silicium. On l'utilise comme abrasif ou comme élément d'addition dans les aciers, du fait de sa grande dureté.

Aluminium : Élément métallique de numéro atomique $Z = 13$, de masse atomique 26,98 et de symbole Al, l'élément terrestre le plus abondant.

Métal (Al) de densité 2,7, qui fond à 660°C et bout à 2467°C. (Il entre dans la composition d'alliages légers, est utilisé notam. dans la fabrication d'emballages, de matériel de cuisine, de câbles électriques.)

L'aluminium est le métal le plus abondant sur la Terre: il entre pour 7,5 % dans la masse terrestre. C'est un métal peu dense, de masse volumique 2,7 g/cm³ à 20 °C.

Ses propriétés mécaniques sont médiocres, mais sa conductibilité, électrique ou thermique, est très élevée.

Plastique et ductile, il se transforme en feuilles très minces (utilisées pour l'emballage) ou en fils. L'aluminium, très réducteur, présente une grande affinité pour l'oxygène, mais il est inaltérable à l'air car une pellicule protectrice d'alumine se forme sur sa surface. L'aluminium se prépare par électrolyse de l'alumine. Pour obtenir 1 kg d'aluminium, il faut 4 kg de bauxite (fournissant 2 kg d'alumine), 1 kg de soude, 1 kg de coke de pétrole utilisé comme électrode, 10 kg de carbone et 15 kWh d'énergie électrique.

Les utilisations de l'aluminium, pur ou sous forme d'alliages, sont très nombreuses: gaines de barreaux d'uranium dans les réacteurs nucléaires (aluminium à 99,998 %), réservoirs de stockage des acides sulfurique et nitrique concentrés (99,5 %), matériel de cuisine, câbles électriques, etc. Les alliages d'aluminium, duralumin, par ex., sont utilisés dans l'industrie automobile, l'aviation, les constructions navales et le bâtiment.

Tantale : Élément métallique de numéro atomique $Z=73$, de masse atomique 180,947 (symbole Ta).

Métal (Ta) blanc, de densité 16,65, qui fond vers 2850°C et bout vers 6000°C.

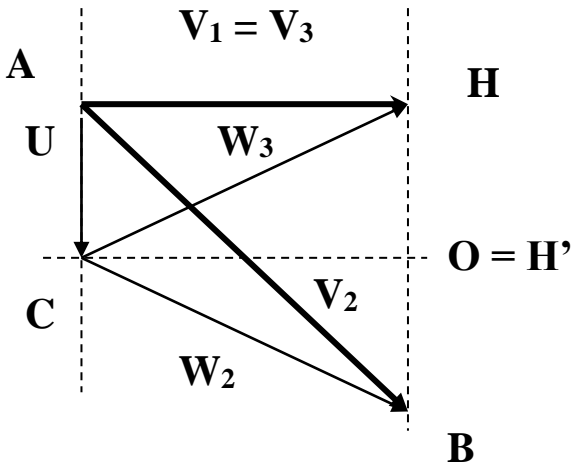
Manganèse : Élément métallique de numéro atomique $Z = 25$ et de masse atomique 54,93 (symbole Mn). - Métal (Mn) gris, de densité 7,2, qui fond à 1260 °C et bout à 2100 °C. Le manganèse entre dans la composition d'alliages avec le fer.

Le manganèse est quasiment inoxydable à la température ordinaire. Il présente de nombreuses analogies avec le fer, le nickel et le cobalt. Il améliore les propriétés mécaniques des aciers et entre dans la composition de nombreux alliages très résistants.

Silicium : CHIM Élément non métallique de numéro atomique $Z = 14$, de masse atomique 28,086 (symbole Si). - Corps simple (Si), de densité 2,33, qui fond vers 1420 °C et bout vers 2700 °C.

Le silicium est, après l'oxygène, l'élément le plus abondant de la lithosphère; il se trouve surtout dans la silice et les silicates. Il brûle dans l'oxygène pour donner la silice par une réaction fortement exothermique. Il résiste aux acides, sauf à l'acide fluorhydrique, et est attaqué par les bases pour donner les silicates. En dehors de ses applications en métallurgie, le silicium est surtout employé dans l'industrie des composants électroniques comme semiconducteur.

Comparaison turbine à action – turbine à réaction.



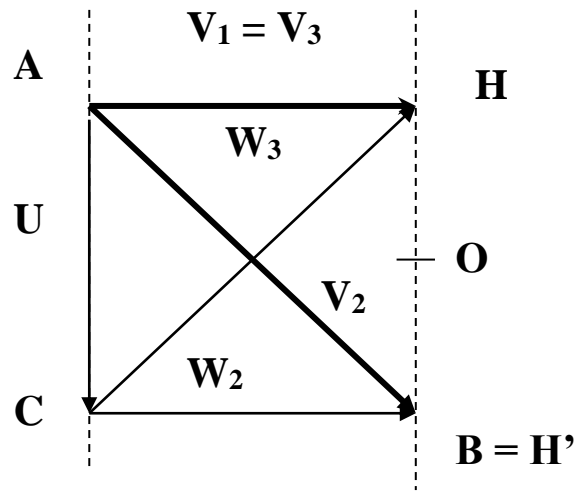
Turbine à action

P : puissance recueillie.

$$P (\sigma = 0) = 2. (q_{ma} + q_{mc}). U_a^2$$

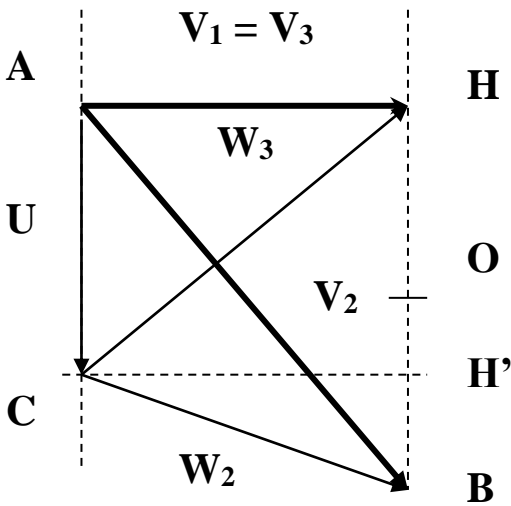
Turbine à réaction

$$P (\sigma = 1/2) = (q_{ma} + q_{mc}). U_r^2$$



Turbine à réaction : cas général

$$\sigma = \frac{OH'}{HH'}$$



☞ A puissance égale : $P (\sigma = 0) = P (\sigma = 1/2) \Rightarrow U_r^2 = 2. U_a^2$

☞ A vitesse tangentielle égale : $U_r = U_a \Rightarrow P (\sigma = 0) = 2.P (\sigma = 1/2)$

☞ Rappel : $U = R. \omega$