

V-1. Principe.

Le rendement d'un moteur dépend directement de sa capacité de remplissage des cylindres et de la puissance de l'explosion dans chaque cylindre. Ainsi, on peut se poser la question : comment faire pour augmenter la puissance d'un moteur sans pour autant détériorer sa fiabilité ?

Il existe deux moyens :

✓ Augmenter la cylindrée par un réalésage, mais cela a un inconvénient majeur car cela entraîne un gain de poids considérable et une consommation supérieure donc la puissance gagnée a peu d'intérêt puisqu'on gagne en poids et en encombrement.

✓ Implanter un turbo : sans toucher à la cylindrée on envoie dans le moteur de l'air compressé afin d'améliorer le remplissage, car plus on fait pénétrer de mélange gazeux dans le cylindre, plus la quantité d'énergie libérée est importante donc plus on gagne en puissance et en couple.

Puisque l'air est compressible, on comprime l'air admis dans le moteur afin que sa puissance du augmente.

V-2. Suralimentation par turbocompresseur

Un turbocompresseur comporte trois principaux composants : un compresseur, une turbine reliée au compresseur par un arbre et un ensemble de paliers pour supporter l'arbre.

À ce jour la suralimentation est largement utilisée dans les moteurs à combustion interne. La grande majorité des moteurs Diesel fabriqués aujourd'hui sont équipés d'un turbocompresseur, tandis que les moteurs atmosphériques sont de moins en moins fréquents. Le mot turbocompresseur ou "turbo charger" en anglais, est l'abréviation de "turbo super charger". Le super charger est un compresseur entraîné par le vilebrequin du moteur.

Le turbocompresseur permet d'éviter de prendre de l'énergie au moteur, en étant relié à une turbine alimentée par les gaz d'échappement.

La turbine et le compresseur sont montés sur un arbre en commun. L'énergie cinétique des gaz d'échappement assure la rotation d'une turbine centripète qui entraîne mécaniquement la rotation du compresseur. Dans le cas d'un fonctionnement stable l'énergie fournie par la turbine est égale à l'énergie absorbée par le compresseur.

Dans un moteur suralimenté par un turbocompresseur, la masse volumique de l'air à l'admission est augmentée grâce à la compression et au refroidissement de l'air à travers un échangeur de chaleur placé entre le compresseur et l'admission du moteur. La quantité de l'air à l'admission est réglée par une soupape de décharge (Wastegate).

En l'absence de soupape, la pression d'admission générée par le turbocompresseur varie avec la pression des gaz d'échappement du moteur. La soupape dérive une partie des gaz d'échappement hors de la turbine, pour contrôler la vitesse de rotation de la turbine, qui à son tour contrôle la vitesse de rotation du compresseur. La fonction principale de la soupape de décharge est de régler une pression de suralimentation maximale pour protéger le moteur et le turbocompresseur.

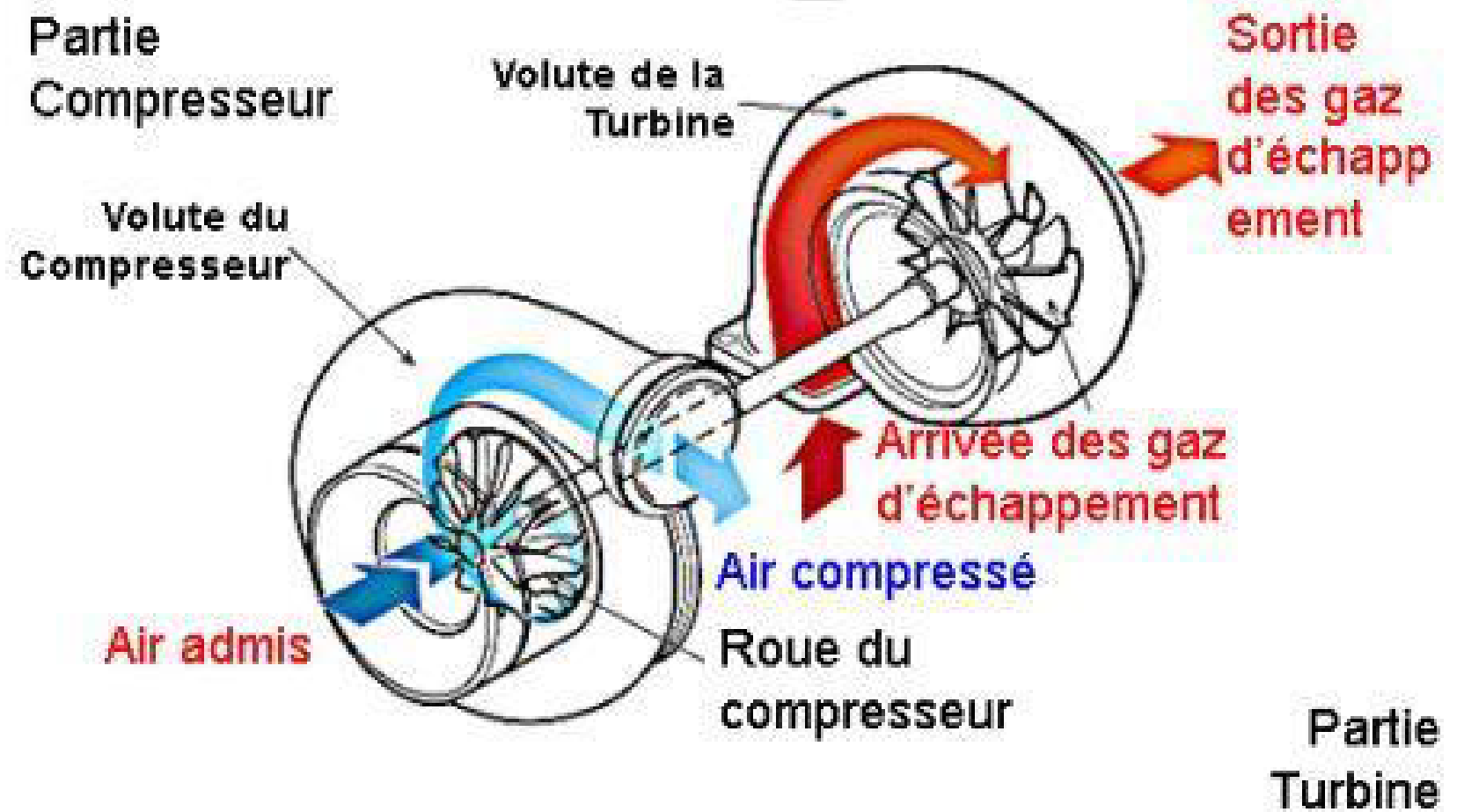
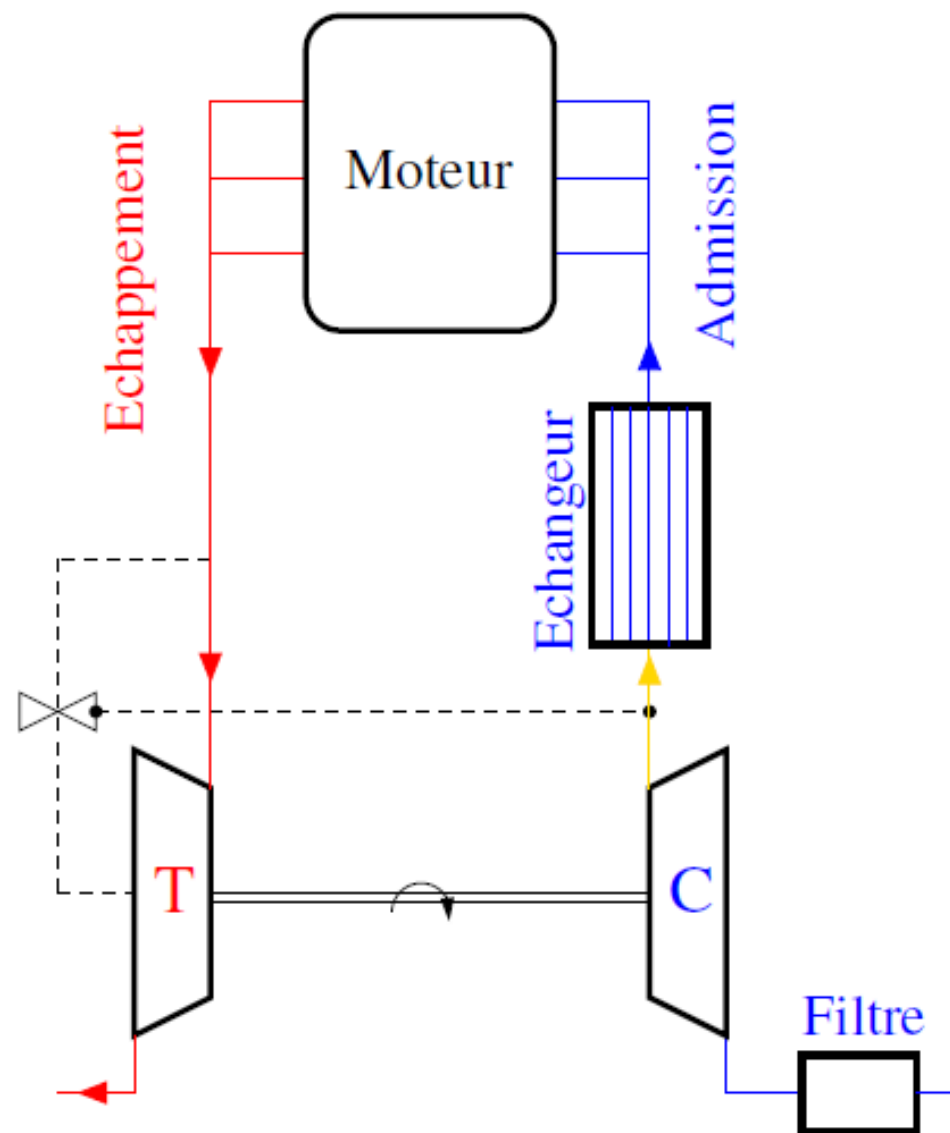


Schéma d'installation d'un moteur alimenté par un turbocompresseur

Sur les moteurs nouvelle génération, cette régulation est entièrement gérée par l'électronique de la voiture et est auto-adaptable aux besoins instantanés du conducteur.

La figure suivante représente un schéma de fonctionnement complet du turbo qui inclue "l'intercooler" c'est à dire l'élément qui permet de refroidir les gaz (réchauffés à cause de la vitesse de rotation et de la compression) qui entrent dans la chambre de combustion afin que la fiabilité et la longévité du moteur soient augmentés. Un problème dû à la forte compression des gaz frais est le cliquetis. Désormais ce problème est résolu grâce à la gestion électronique qui surveille en permanence le moteur et détecte le phénomène pour le contrecarrer.

Mais sur les premiers modèles turbocompressés, on assistait dans la chambre de combustion à un pré-allumage spontané précédant l'étincelle de la bougie (le cliquetis).

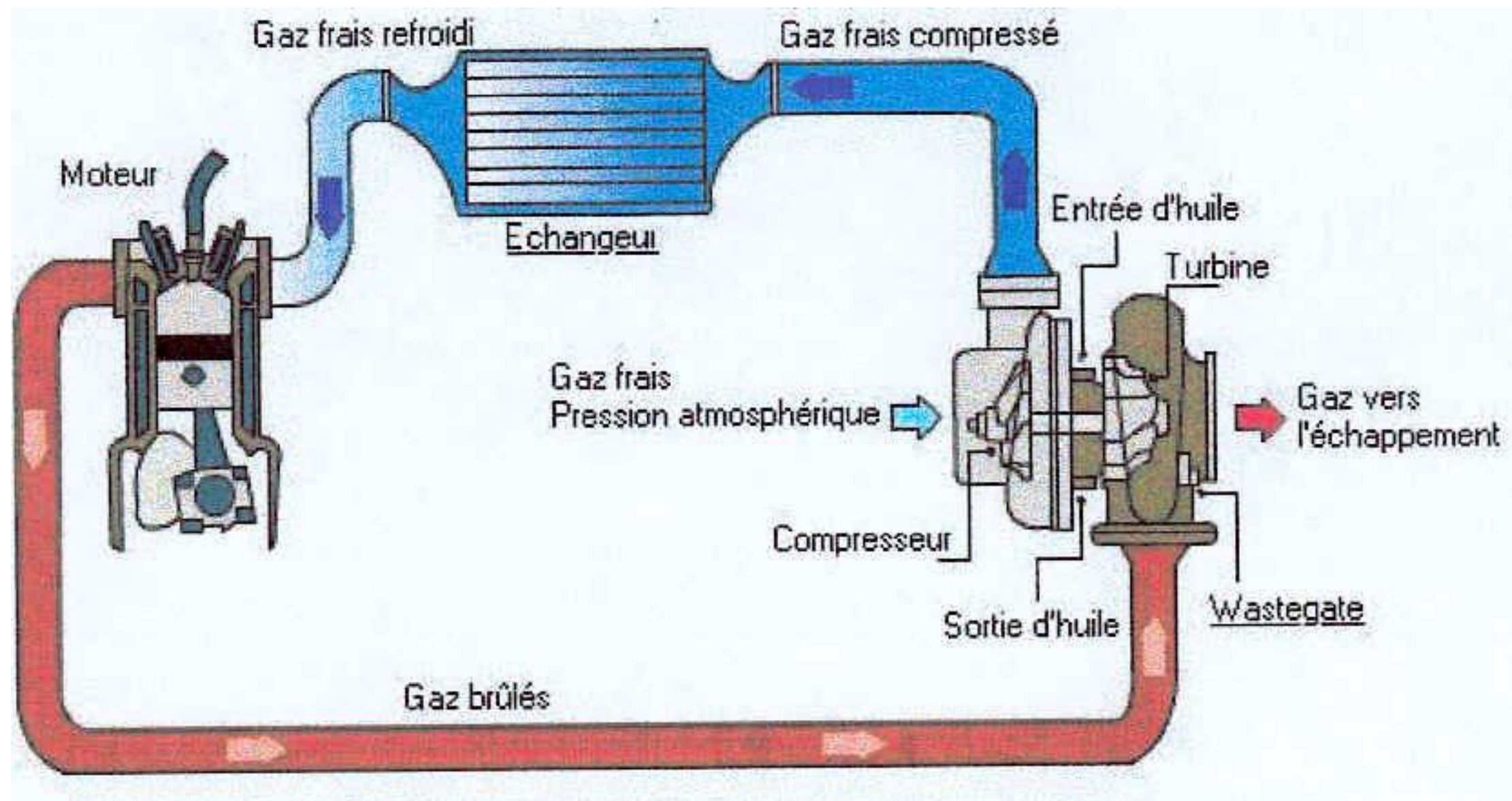


Schéma de fonctionnement complet du turbo avec intercooler

En l'absence de tout système de dépollution le moteur diesel est moins polluant que le moteur essence.

SURALIMENTATION DES MCI PAR TURBOCOMPRESSEUR

V-3. Suralimentation par compresseur

La fonction assurée est strictement la même que celle du turbo. Par contre les moyens diffèrent. Contrairement au turbo qui est entraîné par les gaz d'échappement le compresseur est entraîné mécaniquement par le moteur. Le compresseur volumétrique utilise la variation du volume d'air pour faire varier la pression de l'air. L'air est emprisonné entre deux roues en spirale. Il est obligé de sortir. La pression fournie dépend donc de l'effort rencontré à la sortie et le débit correspond au régime de rotation. Le temps de réponse, caractéristique principale du turbo est donc nul sur un compresseur.

Voici une vue en coupe du compresseur :

Voici une vue en coupe du compresseur :

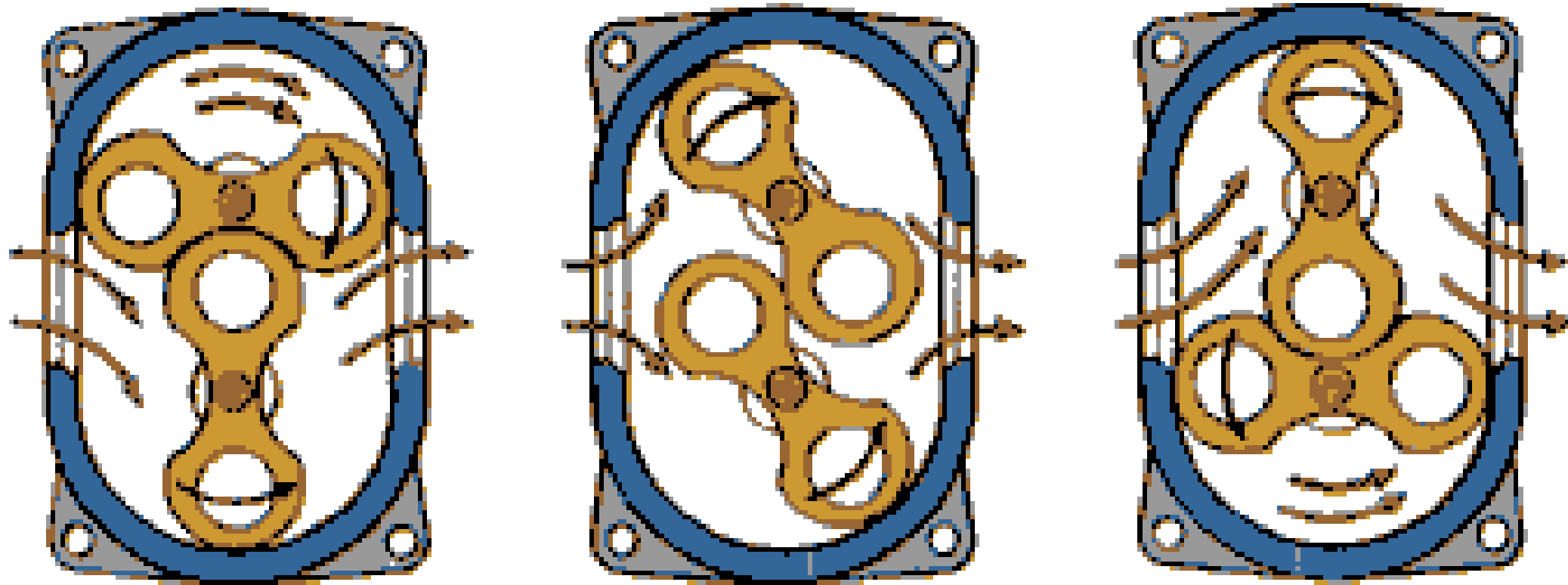


schéma de compresseur volumétrique

Le principal inconvénient de ce système de suralimentation est qu'il absorbe environ une dizaine de chevaux est qu'il fait considérablement monter la consommation. Ce qui explique pourquoi ce système ne peut pas être monté sur des petits moteurs. Jaguar est un grand utilisateur de cette technologie car il dispose de gros moteurs ne craignant pas une surconsommation. Jaguar arrive, grâce à cette technologie, à faire passer la puissance d'un V8 4.0 de 294 à 375 ch.

V-4. Cartographies de turbocompresseurs

V-4-1. Performances d'un turbocompresseur.

Dans les conditions les plus courantes, 7 variables physiques indépendantes sont susceptibles d'affecter les performances d'une turbomachine : une dimension caractéristique (par exemple le diamètre de la roue D), la vitesse de rotation N , le débit massique de fluide $\dot{m}$, les états thermodynamiques à l'aspiration et au refoulement (pressions d'arrêt P_a et P_r , et enthalpies totales h_a et h_r).

Parmi ces 7 variables, interviennent 3 unités fondamentales (Masse, Longueur, Temps). L'application du théorème de Vaschy-Buckingham (*Ce théorème établit que si une équation physique met en jeu n variables physiques, celles-ci dépendant de k unités fondamentales, alors il existe une équation équivalente mettant en jeu $n-k$ variables sans dimension construites à partir des variables originelles*) permet de réduire à $7 - 3 = 4$ le nombre de variables adimensionnelles caractéristiques du fonctionnement de la machine.

Les variables les plus couramment choisies sont :

1) un nombre de Mach relatif à la vitesse débitante C_f :

$$(M_a)_c = \frac{C_f}{C_s}$$

Avec

$$C_f = \frac{\dot{m} V_a}{A} = \frac{4\dot{m} V_a}{\pi D^2} = \frac{4\dot{m} r T_a}{\pi D^2 P_a}$$

et C_s est la vitesse du son dans le fluide $C_s = \sqrt{\gamma r T_a}$ en assimilant le fluide à un gaz parfait

$$(M_a)_c = \frac{4\dot{m} \sqrt{r T_a}}{\pi D^2 P_a \sqrt{\gamma}}$$

2) un nombre de Mach relatif à la roue

$$(M_a)_u = \frac{U}{C_s}$$

Avec

$$U = \frac{\pi DN}{60}$$

$$(M_a)_u = \frac{\pi DN}{60 \sqrt{\gamma r T_a}}$$

3) Le rapport des pressions d'arrêt d'entrée et de sortie $\frac{P_r}{P_a}$

4) L'efficacité isentropique de l'étage $\eta_s = \frac{(h_r)_s - h_a}{h_r - h_a}$ pour un compresseur

ou $\eta_s = \frac{h_r - h_a}{(h_r)_s - h_a}$ pour une turbine

$$\text{ou } \eta_s = \frac{h_r - h_a}{(h_r)_s - h_a} \quad \text{pour une turbine}$$

Lorsqu'on fixe le choix d'une machine et d'un fluide particulier, les nombres adimensionnels $(Ma)_c$ et $(Ma)_u$ deviennent proportionnels à des variables réduites d'expressions plus simples :

$(M_a)_c$ sera proportionnel à $\frac{\dot{m}\sqrt{T_a}}{P_a}$ qu'on appelle débit massique corrigé, et

$(M_a)_u$ sera proportionnel à $\frac{N}{\sqrt{T_a}}$ qu'on appelle vitesse de rotation corrigée

D'autres grandeurs adimensionnelles sont aussi couramment employées par les constructeurs : le facteur de débit ϕ et le facteur d'enthalpie ψ , ou encore les deux coefficients de Rateau μ et δ .

V-4-1-1. Le facteur de débit □

Il est naturel de s'intéresser aux deux nombres de Mach représentatifs des écoulements dans les machines, $(Ma)_c$ et $(Ma)_u$. Le rapport de ces deux grandeurs, indépendant des propriétés du fluide, conditionne la forme du triangle des vitesses, et correspond à une première grandeur adimensionnelle : le facteur de débit □ qui permet d'assurer la similitude cinématique sur la totalité des limites des écoulements

$$\varphi = \frac{(Ma)_c}{(Ma)_u} = \frac{4\dot{m}\sqrt{rT_a}}{\pi D^2 P_a \sqrt{\gamma}} \times \frac{60\sqrt{\gamma r T_a}}{\pi D N}$$

$$\varphi = \frac{(Ma)_c}{(Ma)_u} = \frac{C_f}{U} = \frac{240\dot{V}_a}{\pi^2 N D^3} = \frac{240}{\pi} \delta$$

Ce facteur □ est proportionnel à une autre grandeur adimensionnelle très utilisée : le deuxième coefficient de Rateau

$$\delta = \frac{\dot{V}_a}{\pi N D^3}$$

IV-4-1-2. Le facteur d'enthalpie Ψ

Les turbomachines ont pour fonction, soit de détendre un fluide pour produire de l'énergie, soit de fournir de l'énergie à un fluide. Les écoulements étant proches de l'adiabatique, du fait des faibles surfaces d'échange et des vitesses importantes, il est logique de prendre comme énergie de référence le travail de détente ou de compression isentropique $|\Delta h_s|$.

$$|\Delta h_s| = m C_p (T_r - T_a)$$

Avec $C_p - C_v = R; \frac{C_p}{C_v} = \gamma; PV = nRT$ et $T_r P_r^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_a P_a^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$

On aura
$$|\Delta h_s| = \frac{1}{\gamma-1} P_a V_a \left| \left(\left(\frac{P_r}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right|$$

Le rapport de cette énergie de référence à une énergie cinétique bien choisie constitue une grandeur adimensionnelle intéressante. Une première idée consiste à mettre en évidence dans cette formule la vitesse du son C_s . On obtient :

$$\frac{|\Delta h_s|}{1/2 C_s^2} = \frac{2}{\gamma - 1} \left| \left(\left(\frac{P_r}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \right| = \Omega$$

Mais on prend en général cette énergie cinétique égale à $1/2 U^2$, correspondant à l'énergie cinétique maximale dans le rotor. On définit ainsi le facteur d'enthalpie ψ , égal au double du premier coefficient de Rateau μ .

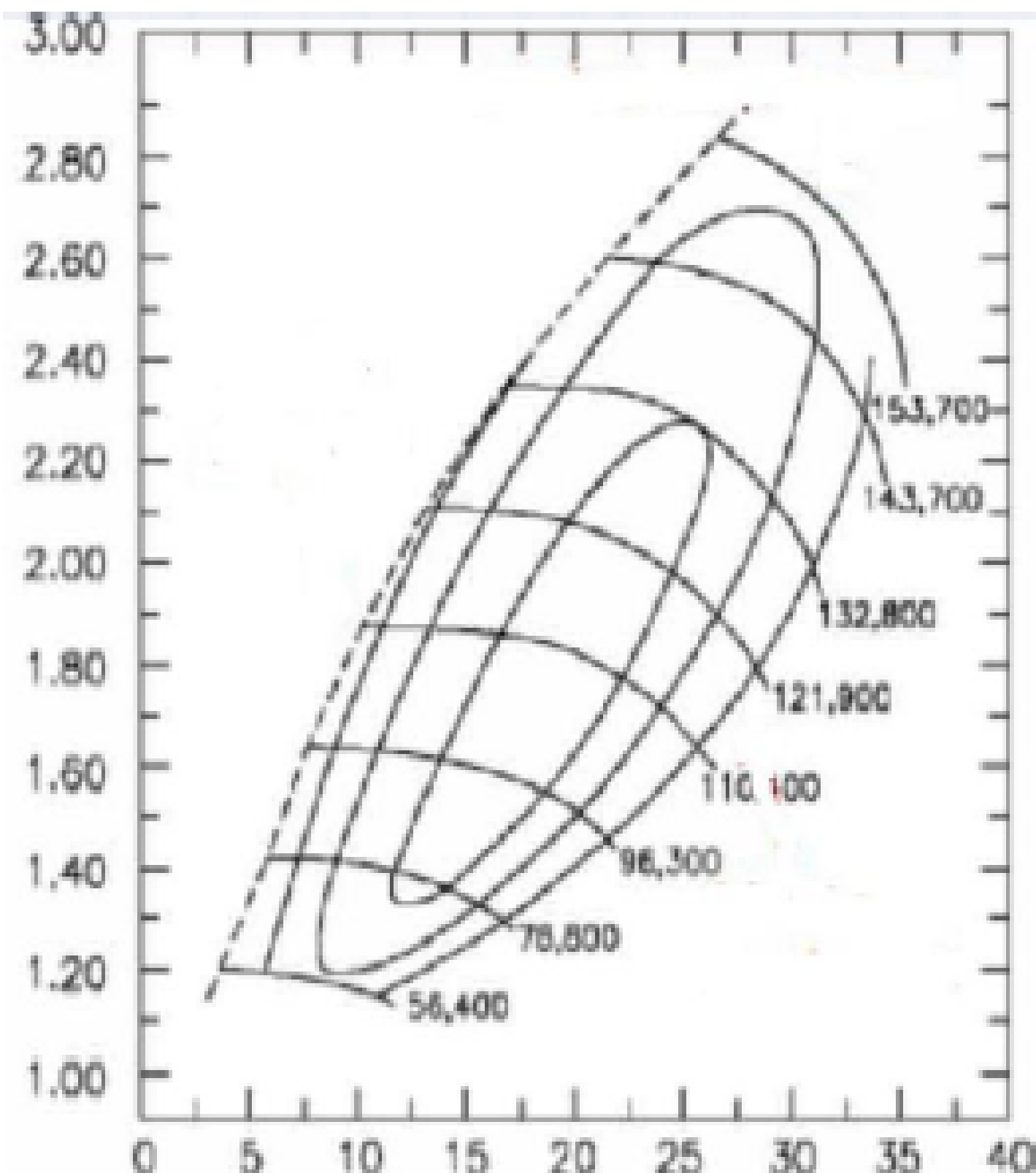
$$\psi = \frac{|\Delta h_s|}{1/2 C_s^2} = 2\mu = \frac{\Omega}{(M_a)_u^2}$$

V-4-2. Présentation générale des performances d'une machine

Dans la pratique, on présente le plus souvent les performances d'une machine sous la forme de courbes caractéristiques (ou cartographies) $\frac{P_r}{P_a} = f(\dot{m}_c)$ pour des valeurs constantes de la vitesse de rotation corrigée N_c :

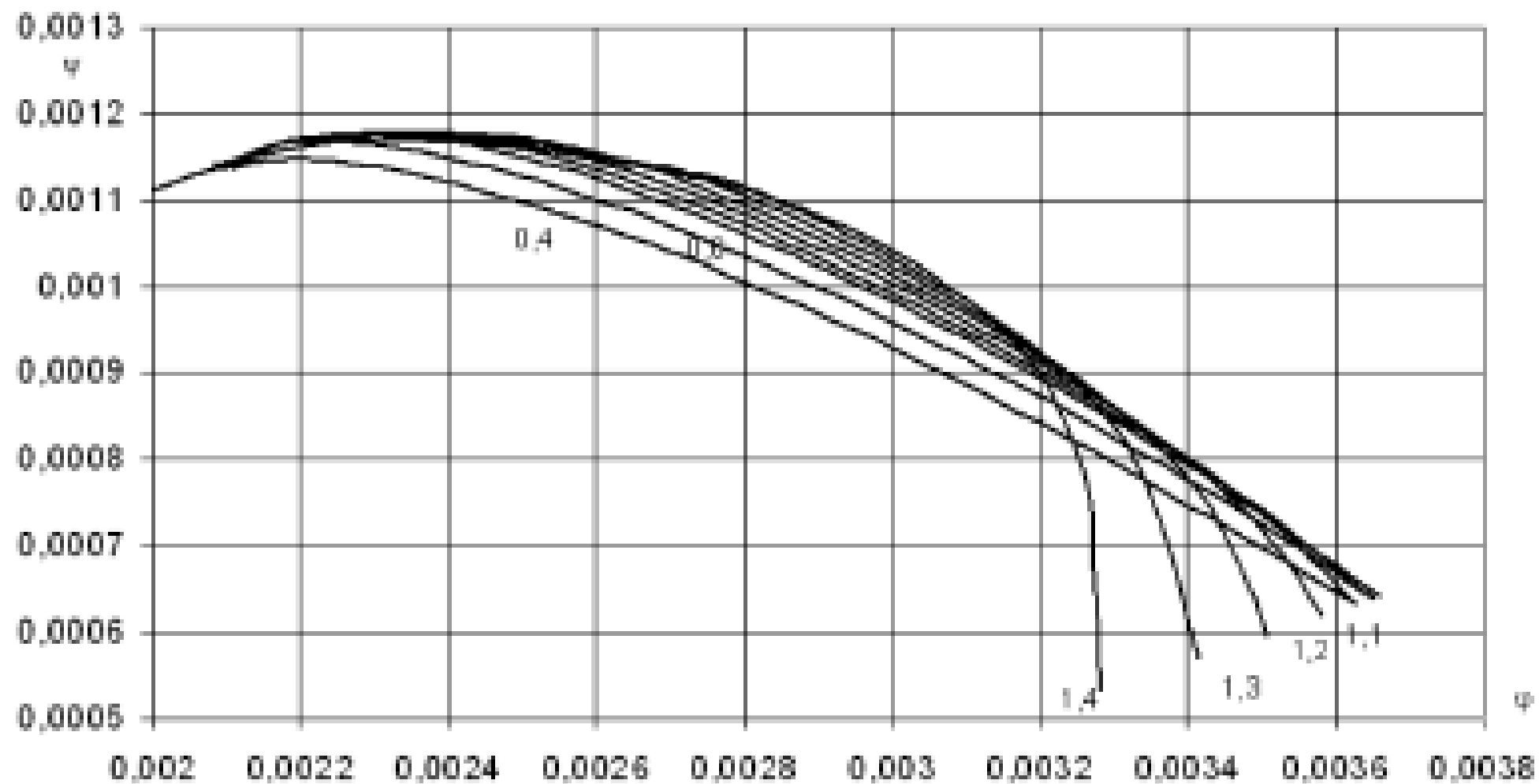
$\frac{P_r}{P_a}$ est le rapport des pressions d'arrêt d'entrée et de sortie

Pour les turbocompresseurs, c'est le débit massique corrigé $\dot{m}_c$ ou le facteur de débit ϕ qui est utilisé en abscisse. En ordonnée, on reporte d'une part le rapport de pression P_r/P_a ou le facteur d'enthalpie ψ ou Ω , et d'autre part le rendement isentropique. La vitesse de rotation corrigée est encore reprise en paramètre. La figure IV.5. nous montre une cartographie de compresseur du turbo T3 trim 60 de Garrett. En abscisse, on trouve le débit traversant le turbo en livre/minute, et en ordonné se trouve le rapport entre la pression sortie compresseur et l'entrée.



Cartographie de compresseur du turbo T3 trim 60

Les représentations de la cartographie d'un tel turbocompresseur dans les autres repères s'obtiennent par simple changement de variable en utilisant les formules précédentes. La représentation dans un repère (ψ, ϕ) de ces caractéristiques conduirait à la figure suivante



Caractéristiques dans le repère (ψ, ϕ)

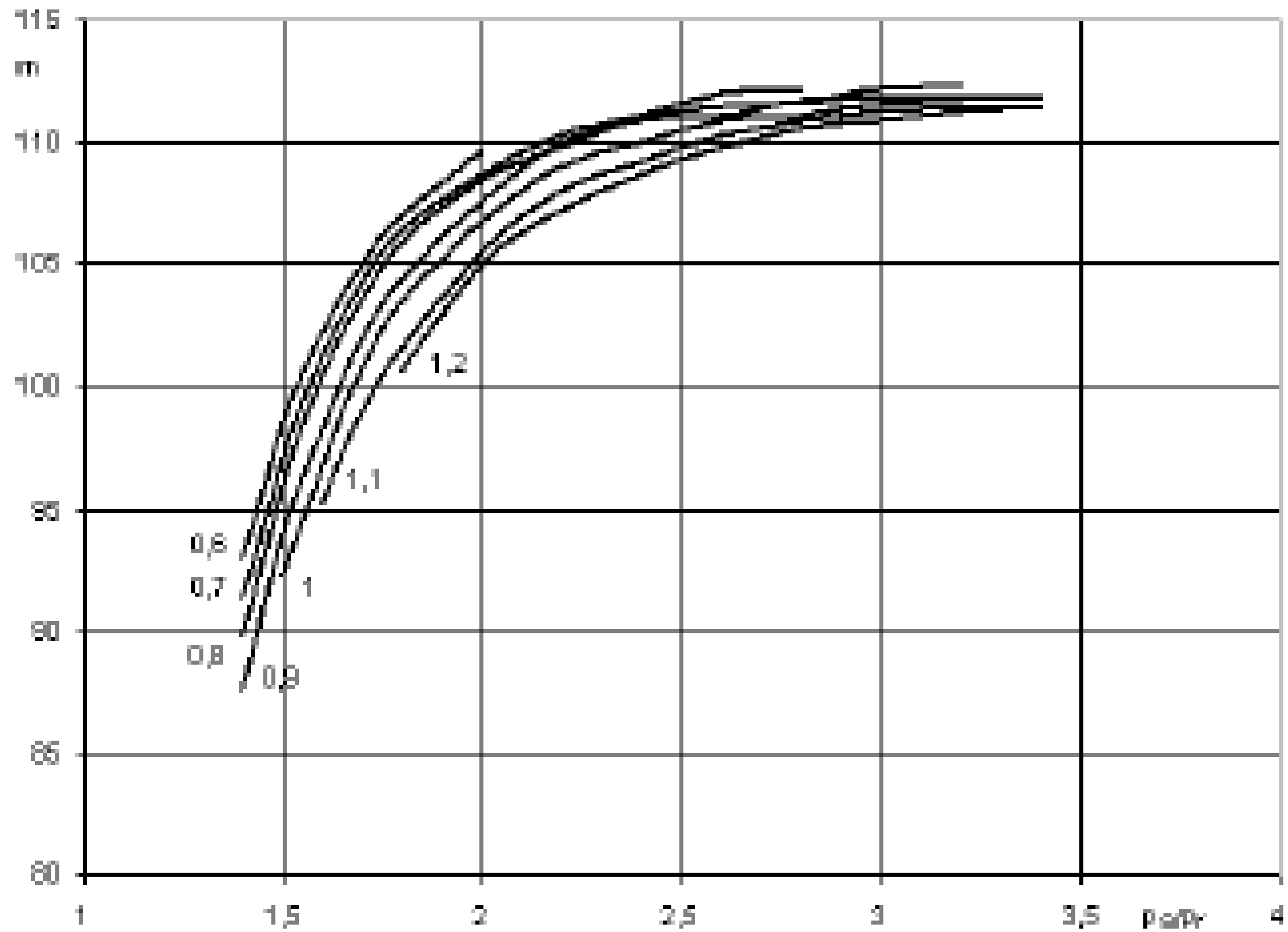
V-5. Cartographies de turbines

Dans le cas d'une turbine, bien qu'il soit aussi possible de retenir le même repère que pour les turbocompresseurs, c'est généralement le rapport de pression qui est utilisé en abscisse. En ordonnée, on trouve le débit massique corrigé ou l'efficacité isentropique de la machine.

Le paramètre des courbes est encore la vitesse de rotation corrigée, mais elle ne joue ici qu'un rôle secondaire : ce n'est que lorsqu'on veut très fortement réduire le rapport de pression ou la vitesse de rotation que les performances tendent à se dégrader. Cette souplesse tient à la stabilité d'écoulement dans les aubages liés au gradient de pression qui y règne.

La figure suivante donne l'allure des caractéristiques d'une turbine aéronautique bi-étagée, pour différentes vitesses de rotation.

CHAPITRE5 SURALIMENTATION DES MCI PAR TURBOCOMPRESSEUR



V-6 Adaptation moteur – turbo

Le moteur suralimenté par turbocompresseur est vulnérable à basse vitesse de rotation en pleine charge car le faible débit de gaz dans la turbine se traduit par un manque d'énergie et donc une pression d'air trop faible par rapport aux besoins du moteur. Dans tous les cas de suralimentation d'un moteur de traction routière, on favorisera l'adaptation du turbocompresseur au régime de couple maximal, éventuellement à une vitesse inférieure et à plein couple.