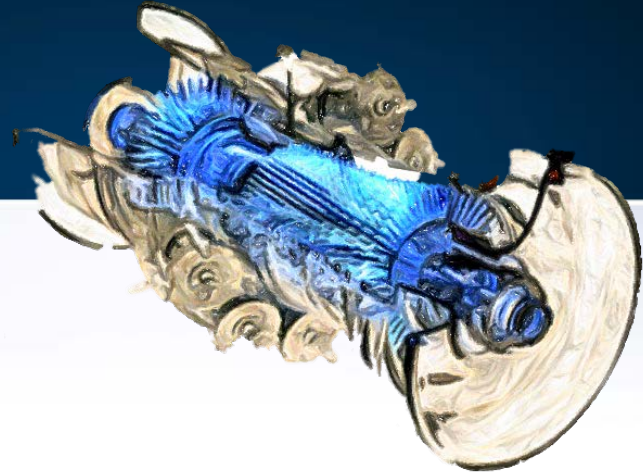
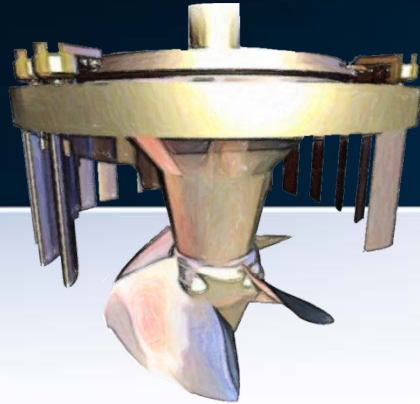


# Turbomachines



**NRJ EN ROTATION**

Débit corrigé

Vitesse corrigée

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m} \sqrt{\theta}}{\delta}$$

$$n_c = \frac{n}{\sqrt{\theta}}$$

Problèmes

# Essai d'une turbine

On connaît des conditions d'opération au point nominal ou de design (***D***) d'une **turbine**.

$$n_D = 58000 \text{ rpm}$$

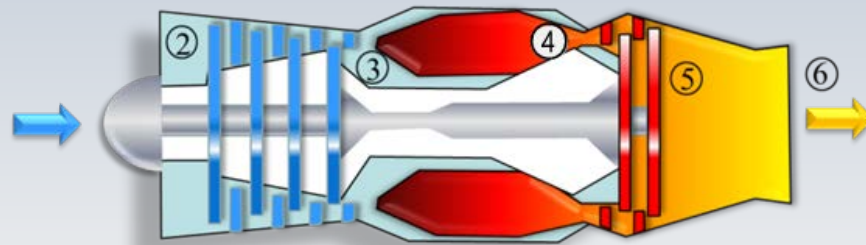
$$\dot{m}_D = 3.8 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$p_{04D} = 12 \text{ bars}$$

$$p_{05D} = 5.4 \text{ bars}$$

$$T_{04D} = 1420 \text{ K}$$

$$\eta_{tt} = 0.86 (\text{étage})$$



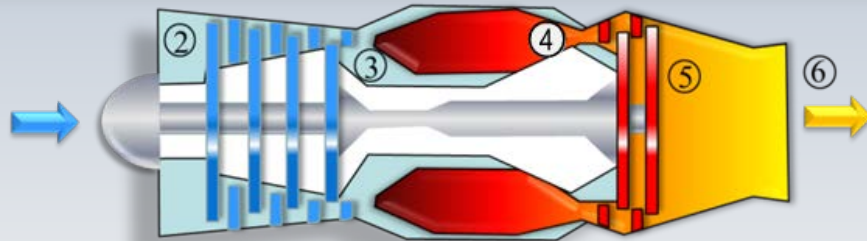
# Essai d'une turbine

On veut calculer le **débit massique** et la **puissance** requise dans un banc d'essais (*be*) connaissant la pression et la température à l'entrée de la turbine.

$$p_{04be} = 2.6 \text{ bars}$$

$$T_{04be} = 388 \text{ K}$$

$$\gamma = 1.4$$



$$\dot{m}_{be}$$

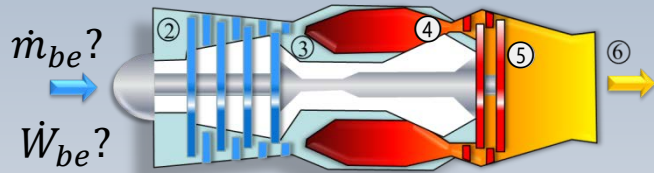
$$\dot{W}_{be}$$



# Débit massique ?

$$\begin{aligned}\dot{m}_D &= 3.8 \text{ kg/s} \\ T_{0s} &= 288 \text{ K} \\ p_{0s} &= 1 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_{04be} &= 2.6 \text{ bars} & T_{04be} &= 388 \text{ K} \\ p_{04D} &= 12 \text{ bars} & T_{04D} &= 1420 \text{ K}\end{aligned}$$



$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta}$$

Pour trouver le débit massique dans le banc d'essais, nous calculerons d'abord les pressions et températures normalisées

$$\theta_{4D} = T_{04D}/T_{0s} = 1420/288 = 4.93$$

$$\delta_{4D} = p_{04D}/p_{0s} = 12/1 = 12$$

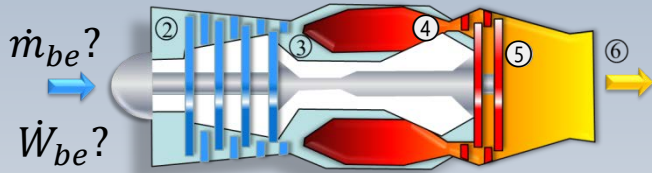
$$\theta_{4be} = T_{04be}/T_{0s} = 388/288 = 1.347$$

$$\delta_{4be} = p_{04be}/p_{0s} = 2.6/1 = 2.6$$

# Débit massique

$$\begin{aligned}\dot{m}_D &= 3.8 \text{ kg/s} \\ T_{0s} &= 288 \text{ K} \\ p_{0s} &= 1 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_{04be} &= 2.6 \text{ bars} & T_{04be} &= 388 \text{ K} \\ p_{04D} &= 12 \text{ bars} & T_{04D} &= 1420 \text{ K}\end{aligned}$$



Alors,

$$m_c = \left( \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_4}}{\delta_4} \right)_{be} = \left( \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_4}}{\delta_4} \right)_D$$

$$\left( \frac{\dot{m} \sqrt{1.347}}{2.6} \right)_{be} = \left( \frac{3.8 \sqrt{4.93}}{12} \right)_D$$

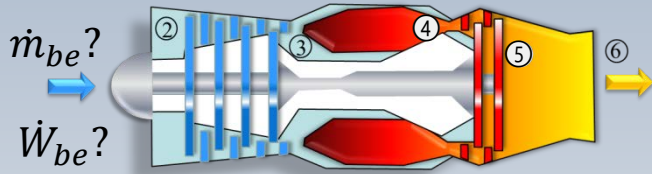


$$\dot{m}_{be} = 1.575 \text{ (kg/s)} \quad \checkmark$$

# Puissance ?

$$\begin{aligned}\dot{m}_D &= 3.8 \text{ kg/s} \\ T_{0s} &= 288 \text{ K} \\ p_{0s} &= 1 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_{04be} &= 2.6 \text{ bars} & T_{04be} &= 388 \text{ K} \\ p_{04D} &= 12 \text{ bars} & T_{04D} &= 1420 \text{ K}\end{aligned}$$



Pour calculer la puissance dans le banc d'essais on doit trouver la température  $T_{05,be}$ .

Pour ce faire, on utilisera le rapport de pression ainsi que le rendement

$$\dot{W}_{be} = \dot{m}_{be} c_p (T_{04} - T_{05})_{be}$$

# Température

$$\begin{aligned} p_{04D} &= 12 \text{ bars} & T_{04be} &= 388 \text{ K} \\ p_{05D} &= 5.4 \text{ bars} & T_{04D} &= 1420 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{p_{04}}{p_{05}}\right)_D = 2.22 = \left(\frac{p_{04}}{p_{05}}\right)_{be}$$

$$\eta_{be} = \eta_D = 0.86 = \frac{1 - \frac{T_{05}}{T_{04}}}{1 - \left(\frac{p_{05}}{p_{04}}\right)^{\gamma-1/\gamma}}$$

La similitude impose que le rapport de pression, et le rendement, soient les mêmes pour les deux modes d'opération

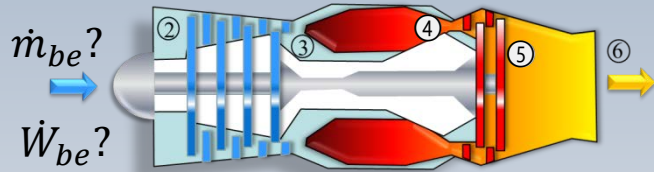
$$\rightarrow T_{05be} = 319.93 \text{ K} \Rightarrow$$



# Puissance

$$\begin{aligned}\dot{m}_D &= 3.8 \text{ kg/s} \\ T_{0s} &= 288 \text{ K} \\ p_{0s} &= 1 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_{04be} &= 2.6 \text{ bars} & T_{04be} &= 388 \text{ K} \\ p_{04D} &= 12 \text{ bars} & T_{04D} &= 1420 \text{ K}\end{aligned}$$



$$\dot{m}_{be} = 1.575 \text{ (kg/s)}$$

$$T_{05be} = 319.9 \text{ K}$$

$$\dot{W}_{be} = \dot{m}_{be} c_p (T_{04} - T_{05})_{be}$$

$$\dot{W}_{be} = 1.575 \times 1004.5 (388 - 319.9)$$



$$\dot{W}_{be} = \mathbf{107.69 \text{ kW}} \quad \checkmark$$

# Essai d'un compresseur

On connaît les conditions d'opération d'un **compresseur** en régime de croisière (cr) et on veut calculer **la vitesse de rotation et le couple** sur un banc d'essais (be) à des conditions de pression et de température connues. On dispose également de la **carte du compresseur**.

$$\dot{W}_{cr} = 836.0 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{cr} = 3.8 \text{ kg / s}$$

$$p_{02cr} = 0.235 \text{ bars}$$

$$T_{02cr} = 216 \text{ K}$$

$$\eta_{tt} = 0.80$$

$$p_{02be} = 1 \text{ bar}$$

$$T_{02be} = 288 \text{ K}$$

$$\eta_{tt} = 0.80$$

$$\gamma = 1.4$$

$$c_p = 1.005 \text{ kJ / kg}$$

$$n_{be} [\text{rpm}]?$$

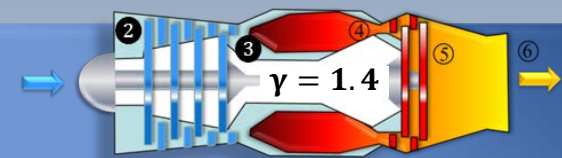


$$\text{Couple}_{be} [\text{N} \cdot \text{m}]?$$

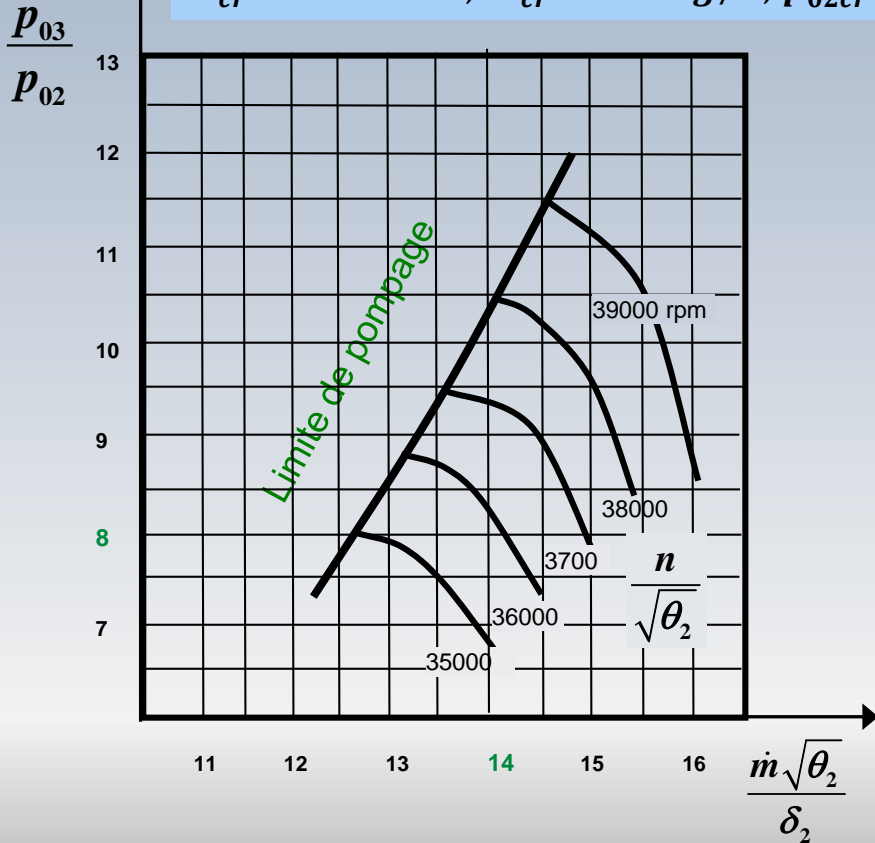
# $r_p / m_c$ et $n_c$

$n_{bc} [rpm]?$  ?

Couple  $_{bc} [N \cdot m]?$



$\dot{W}_{cr} = 836.0 \text{ kW}$ ,  $\dot{m}_{cr} = 3.8 \text{ kg/s}$ ,  $p_{02cr} = 0.235 \text{ bars}$ ,  $T_{02cr} = 216 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.80$ ,  $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg}$



Pour le calcul de la vitesse de rotation nous trouverons d'abord la vitesse de rotation corrigée

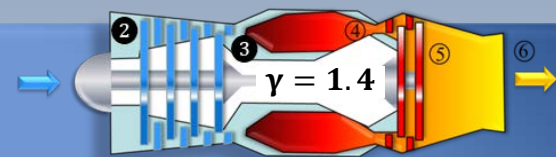
Celle-ci est un paramètre représenté dans la carte du compresseur

Avec le **rapport de pression** et le **débit massique corrigé**, nous déterminerons  $n/\sqrt{\theta_2}$

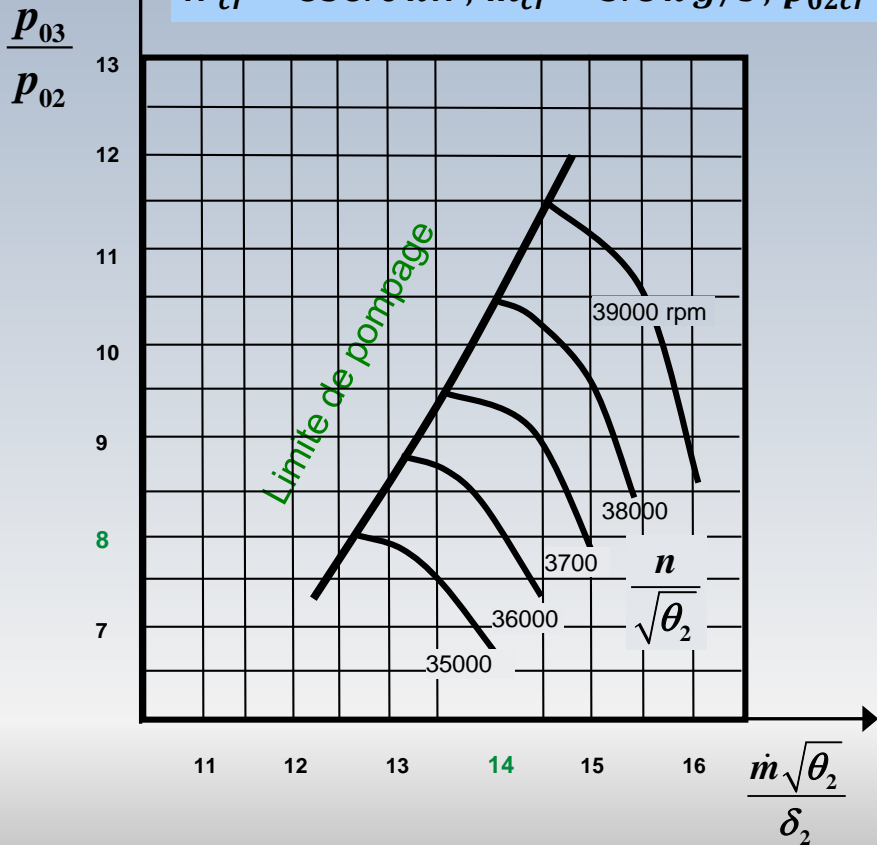
# $r_p / m_c$ et $n_c$

$n_{bc}$  [rpm]? ?

Couple  $_{bc}$  [N - m]?



$\dot{W}_{cr} = 836.0 \text{ kW}$ ,  $\dot{m}_{cr} = 3.8 \text{ kg/s}$ ,  $p_{02cr} = 0.235 \text{ bars}$ ,  $T_{02cr} = 216 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.80$ ,  $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg}$



Afin d'obtenir le rapport de pression, nous regardons la puissance en régime de croisière

$$\dot{W}_{cr} = \frac{\dot{m}_{cr} c_p T_{02cr}}{\eta_{tt}} \left[ \left( \frac{p_{03}}{p_{02}} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right]$$

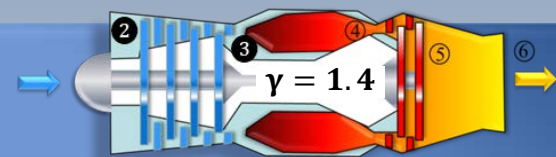
$$\Rightarrow \left( \frac{p_{03}}{p_{02}} \right) = 8$$

Ce rapport c'est le même que celui sur le banc d'essais

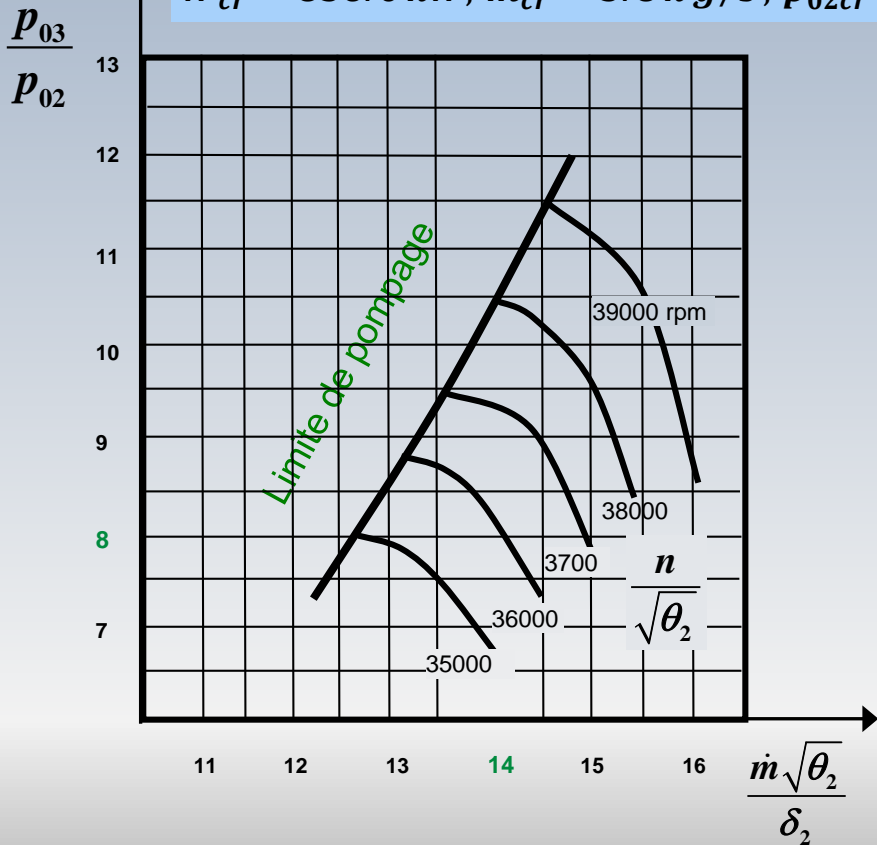
# $r_p / m_c$ et $n_c$

$n_{bc}$  [rpm]? ?

Couple  $_{bc}$  [N - m]?



$\dot{W}_{cr} = 836.0 \text{ kW}$ ,  $\dot{m}_{cr} = 3.8 \text{ kg/s}$ ,  $p_{02cr} = 0.235 \text{ bars}$ ,  $T_{02cr} = 216 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.80$ ,  $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg}$



Le débit massique corrigé est trouvé à l'aide de la formule:

$$\left( \dot{m}_c = \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_2}}{\delta_2} \right)_{cr} = 3.8 \times \frac{\sqrt{216/288}}{0.235/1}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_c = 14.0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Nous pouvons maintenant trouver la vitesse de rotation corrigée

# $r_p / m_c$ et $n_c$

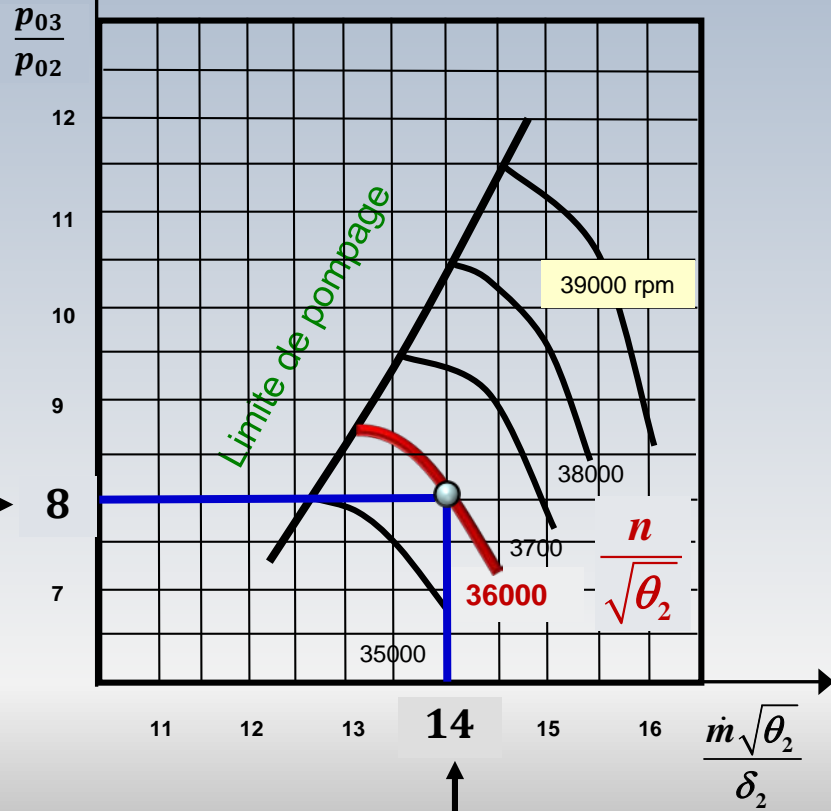
$n_{bc}$  [rpm]? ?

Couple  $_{bc}$  [N·m]?

$\gamma = 1.4$      $p_s = 1 \text{ bar}$ ,  $T_s = 288 \text{ K}$

$p_{02be} = 1 \text{ bar}$ ,  $T_{02be} = 288 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.80$

$\dot{W}_{cr} = 836.0 \text{ kW}$ ,  $\dot{m}_{cr} = 3.8 \text{ kg/s}$ ,  $p_{02cr} = 0.235 \text{ bars}$ ,  $T_{02cr} = 216 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.80$ ,  $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg}$



$$n_c = \frac{n}{\sqrt{\theta_2}} = 36000 \text{ rpm}$$

$$\theta_{2be} = \left( \frac{T_{02}}{T_s} \right) = \frac{288}{288} = 1$$

$$n = 36000 \text{ rpm}$$

Pour trouver le couple  $M$  dans le banc d'essais, nous calculerons la puissance:  $\dot{W} = M\omega$

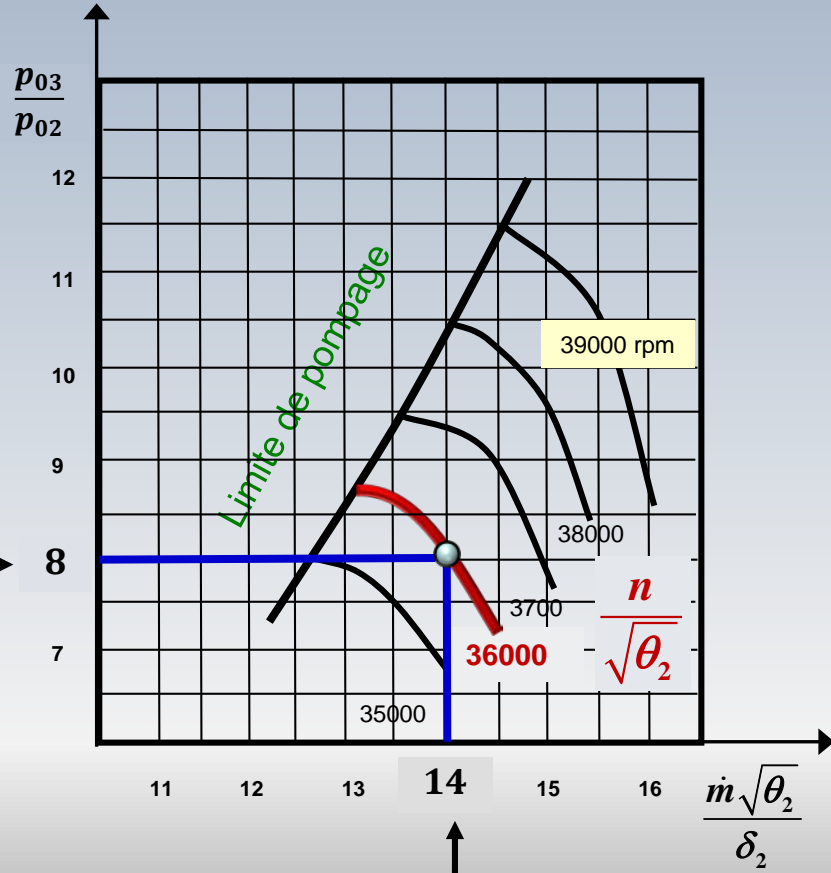
# $r_p / m_c$ et $n_c$

$n_{bc}$  [rpm]? ?

Couple  $_{bc}$  [N·m]?

$\gamma = 1.4$      $p_s = 1 \text{ bar}$ ,  $T_s = 288 \text{ K}$

$p_{02be} = 1 \text{ bar}$ ,  $T_{02be} = 288 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.80$



Cette quantité requiert du débit massique que nous trouverons à partir de


$$\left( \dot{m}_c = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta_2}}{\delta_2} \right)_{be} = \left( \frac{\dot{m}\sqrt{\theta_2}}{\delta_2} \right)_{cr} = 14 \text{ kg/s}$$

avec

$$(\delta_2)_{be} = \left( \frac{p_{02}}{p_s} \right) = 1 \quad \theta_{2be} = \left( \frac{T_{02}}{T_s} \right) = 1$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{be} = 14.0 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

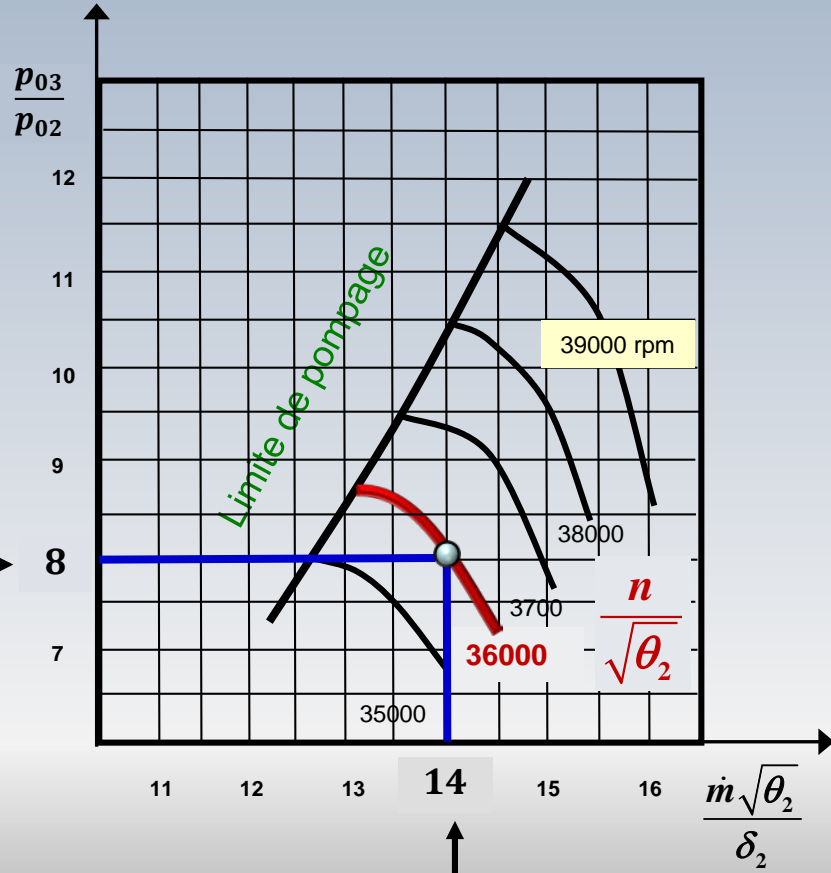
# $r_p / m_c$ et $n_c$

$n_{bc}$  [rpm]? 

Couple  $_{bc}$  [N·m]?

$$\gamma = 1.4 \quad p_s = 1 \text{ bar}, T_s = 288 \text{ K}$$

$$p_{02be} = 1 \text{ bar}, T_{02be} = 288 \text{ K}, \eta_{tt} = 0.80$$



La puissance est donnée par la formule


$$\begin{aligned} \dot{W}_{be} &= \frac{\dot{m}_{be} c_p T_{02be}}{\eta_{tt}} \left[ \left( \frac{p_{03}}{p_{02}} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right] \\ &= \frac{14 \times 1005 \times 288}{0.8} [(8)^{0.2857} - 1] \\ &= 4.1101 \times 10^6 \text{ W} \end{aligned}$$

et la vitesse angulaire  $n = 36000 \text{ rpm}$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 3.7699 \times 10^3$$



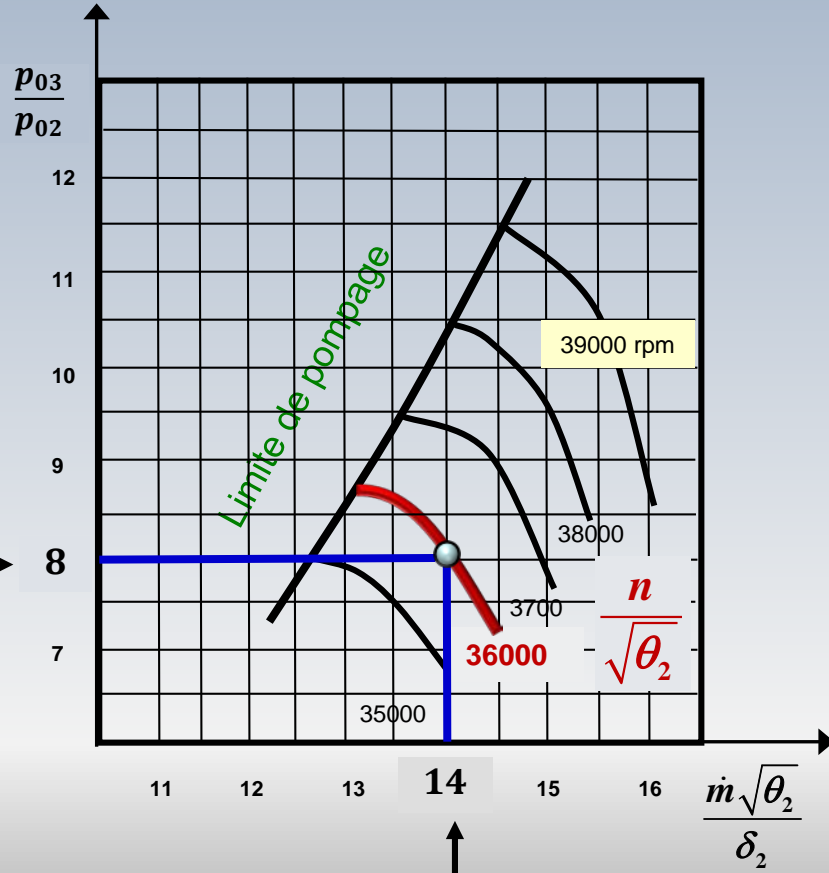
$$M = \dot{W} / \omega$$

$n_{bc}$  [rpm]? 

Couple  $_{bc}$  [N - m]?

$\gamma = 1.4$      $p_s = 1 \text{ bar}$ ,  $T_s = 288 \text{ K}$

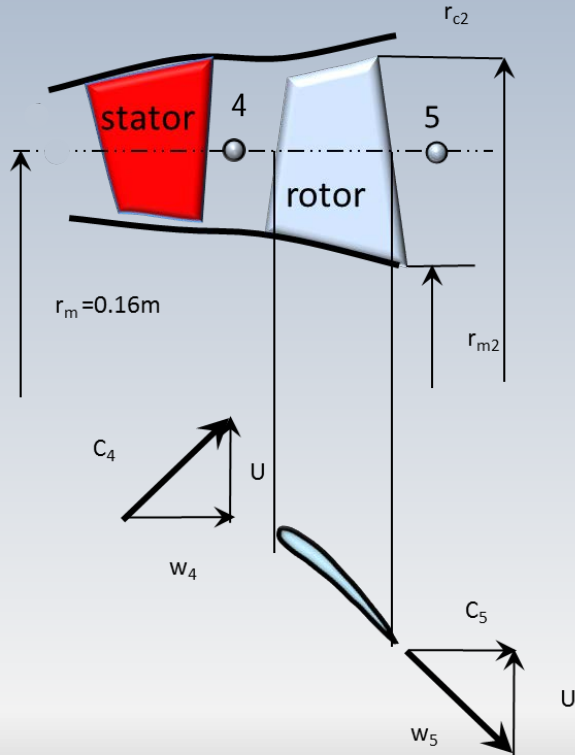
$p_{02be} = 1 \text{ bar}$ ,  $T_{02ber} = 288 \text{ K}$ ,  $\eta_{tt} = 0.8$



Finalemment le couple demandé est

$$M = \frac{\dot{W}_{be}}{\omega} = 1090.2 \text{ N - m}$$

# Problème: turbine



On connaît les conditions d'opération d'une **turbine** en régime de croisière (*cr*) et la pression et la température à l'entrée dans un banc d'essais (*be*). On veut calculer, **le débit massique et la puissance** en régime de croisière. On dispose de la carte de la turbine

$$p_{04cr} = 8.5 \text{ bars}$$

$$T_{04cr} = 1020 \text{ K}$$

$$\eta_{tt} = 0.81 (\text{étage})$$

$$W_e = 200 \text{ kJ / kg}$$

$$c_{4u} = U (\beta_4 = 0^0)$$

$$c_{5u} = 0 (\alpha_5 = 0^0)$$

$$\gamma = 1.365$$

$$d_m = 0.32 \text{ m}$$

$$p_{04be} = 4.8 \text{ bars}$$

$$T_{04be} = 625 \text{ K}$$

$$\dot{m}_{cr} = ?$$

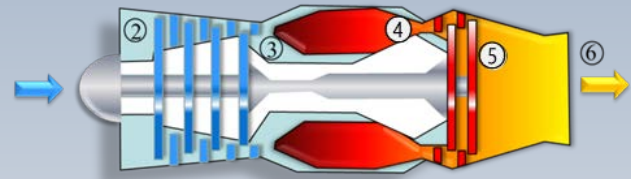
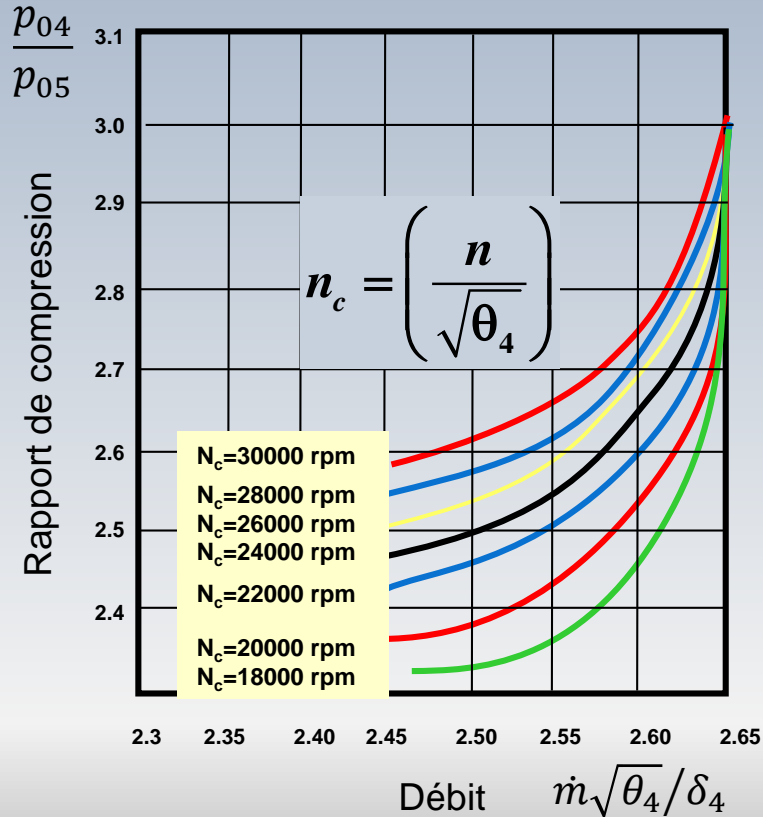
$$\dot{W}_{cr} = ?$$



# Problème: turbine

$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

?



Tuyau:

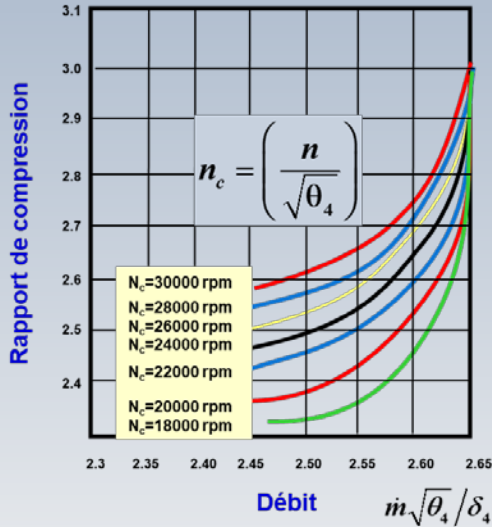
Un niveau de  $n/\sqrt{\theta_4}$  et le rapport  $p_{04}/p_{05}$  permettent de trouver  $\dot{m}\sqrt{\theta_4}/\delta_4$

# Détente

$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

?

- $p_{4cr} = 8.5 \text{ bars}$
- $T_{04cr} = 1020 \text{ K}$
- $\eta_{tt} = 0.81(\text{étage})$
- $W_e = 200 \text{ kJ/kg}$
- $\beta_4 = 0^\circ (c_{4u} = U)$
- $\alpha_5 = 0^\circ (c_{5u} = 0)$
- $\gamma = 1.365$
- $d_m = 0.32 \text{ m}$



Pour obtenir  $n/\sqrt{\theta_4}$  on commence par le calcul de  $n$  qui est fonction de la vitesse  $U$

Cette vitesse apparait dans la formule d'Euler

$$W_e = U(c_{4u} - c_{5u}) = 0$$

$$200 \text{ kJ/kg} = U c_{4u} = U^2$$

↑  
( $c_{4u} = U$ )

$$U = 447.21 \text{ m/s}$$

$$d_m = 0.32 \text{ m}$$

# Détente

$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

?

$$p_{4cr} = 8.5 \text{ bars}$$

$$T_{04cr} = 1020 \text{ K}$$

$$\eta_{it} = 0.81 (\text{étage})$$

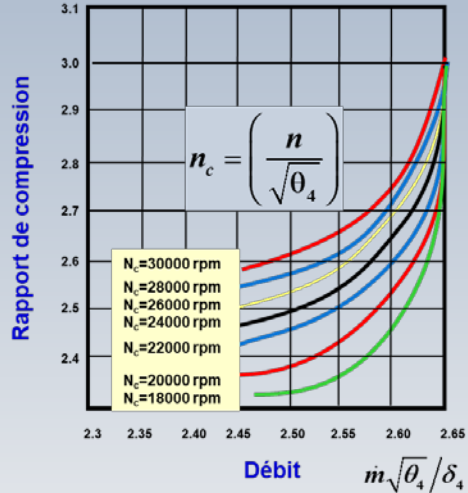
$$W_e = 200 \text{ kJ / kg}$$

$$\beta_4 = 0^0 (c_{4u^*} = U)$$

$$\alpha_5 = 0^0 (c_{5u} = 0)$$

$$\gamma = 1.365$$

$$d_m = 0.32 \text{ m}$$



Alors,

$$n = \frac{60U}{\pi d_m} = 33893 \text{ rpm}$$

et

$$\theta_4 = \left( \frac{1020}{288} \right) = 3.5417$$

$$\left( \frac{n}{\sqrt{\theta_4}} \right) = 18010 \text{ rpm}$$

# Détente

$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

?

$$p_{4cr} = 8.5 \text{ bars}$$

$$T_{04cr} = 1020 \text{ K}$$

$$\eta_{tt} = 0.81 (\text{étage})$$

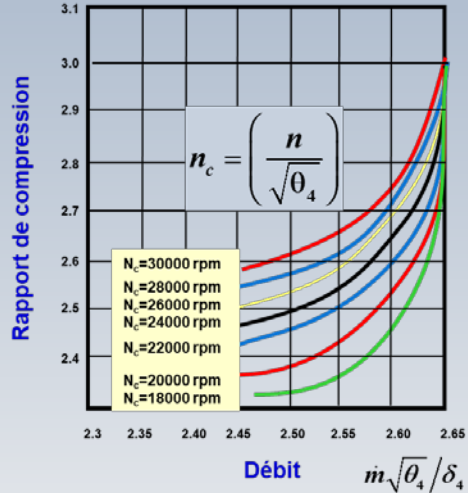
$$W_e = 200 \text{ kJ/kg}$$

$$\beta_4 = 0^\circ (c_{4u^*} = U)$$

$$\alpha_5 = 0^\circ (c_{5u} = 0)$$

$$\gamma = 1.365$$

$$d_m = 0.32 \text{ m}$$



$$c_p = (\gamma R / \gamma - 1) = 1073.3 \text{ (J/kg K)}$$

Il nous faut maintenant trouver le rapport de pression  $p_{04}/p_{05}$   
 Cette quantité apparait dans l'expression pour le travail spécifique

$$W_e = \eta_{tt} c_p T_{04} \left[ 1 - \left( \frac{p_{05}}{p_{04}} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right]$$

$$\left( \frac{p_{04}}{p_{05}} \right) = 2.6$$

Avec  $n/\sqrt{\theta_4}$  et  $p_{04}/p_{05}$  nous pourrions trouver  $\dot{m}\sqrt{\theta_4}/\delta_4$

# Débit corrigé

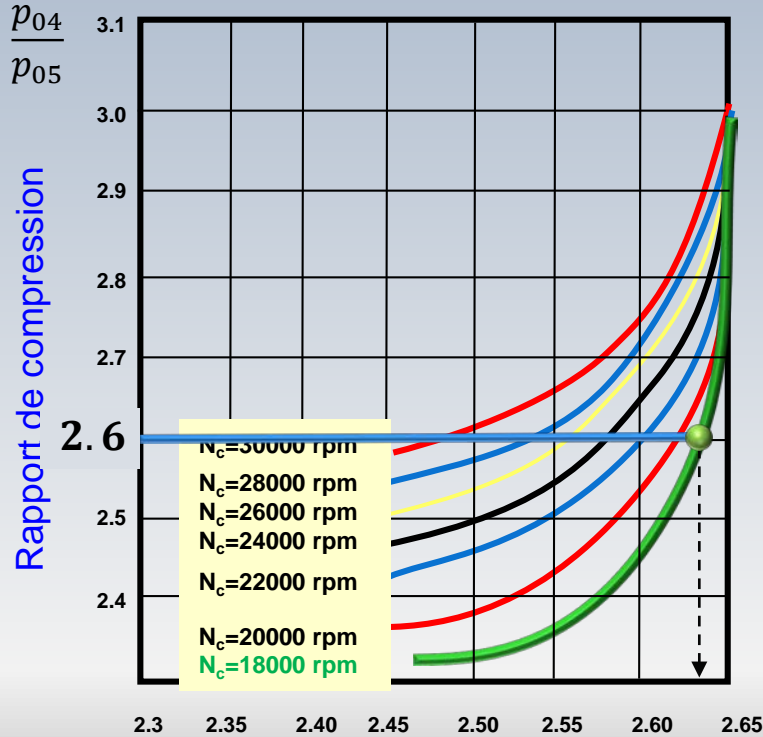
$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

?

$$\left( \frac{p_{04}}{p_{05}} \right) = 2.600$$
$$\left( \frac{n}{\sqrt{\theta_4}} \right) = 18010$$



$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_4}}{\delta_4} = 2.63 \text{ kg / s}$$



$$n_c = \left( \frac{n}{\sqrt{\theta_4}} \right) = 18000 \text{ rpm}$$

$$\frac{\dot{m} \sqrt{\theta_4}}{\delta_4}$$

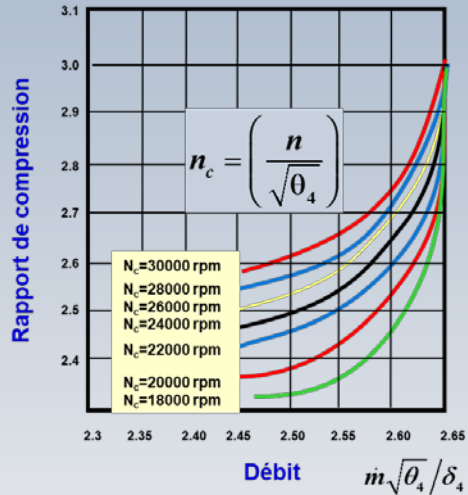
# Détente

$$(T_s = 288 \text{ K}, p_s = 1 \text{ bar})$$

$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

?

$$p_{4cr} = 8.5 \text{ bars}$$
$$T_{04cr} = 1020 \text{ K}$$
$$\eta_{tt} = 0.81 (\text{étage})$$
$$W_e = 200 \text{ kJ / kg}$$
$$\beta_4 = 0^0 (c_{4u} = U)$$
$$\alpha_5 = 0^0 (c_{5u} = 0)$$
$$\gamma = 1.365$$
$$d_m = 0.32 \text{ m}$$



À partir de  $\dot{m}_c$

$$\dot{m}_c = 2.63 \text{ kg/s} = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta_4}}{\delta_4}$$

avec

$$\sqrt{\theta_4} = \sqrt{T_{04cr}/T_s} = 1.882$$

$$\delta_4 = p_{04cr}/p_s = 8.5$$

nous trouvons

$$\dot{m} = 1.88 \text{ kg/s}$$



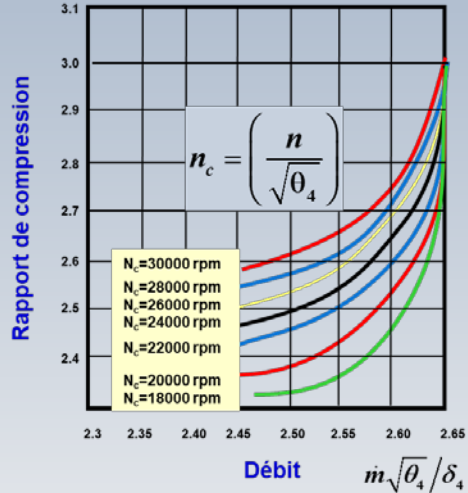


# Détente

$$(T_s = 288 \text{ K}, p_s = 1 \text{ bar})$$

$$\dot{m}_{cr} = ? \quad \dot{W}_{cr} = ?$$

$$\begin{aligned} p_{4cr} &= 8.5 \text{ bars} \\ T_{04cr} &= 1020 \text{ K} \\ \eta_{tt} &= 0.81 (\text{étage}) \\ W_e &= 200 \text{ kJ / kg} \\ \beta_4 &= 0^0 (c_{4u} = U) \\ \alpha_5 &= 0^0 (c_{5u} = 0) \\ \gamma &= 1.365 \\ d_m &= 0.32 \text{ m} \end{aligned}$$



Finalement, la puissance  $\dot{W}_{cr}$  en régime de croisière est

$$\dot{W}_{cr} = \dot{m}W_e = 2376 \text{ kW}$$

**Turbine**

**Compresseur**



**Mariage de  
composantes**



H = 11300 m



$\frac{P_{04}}{P_{05}} ?$

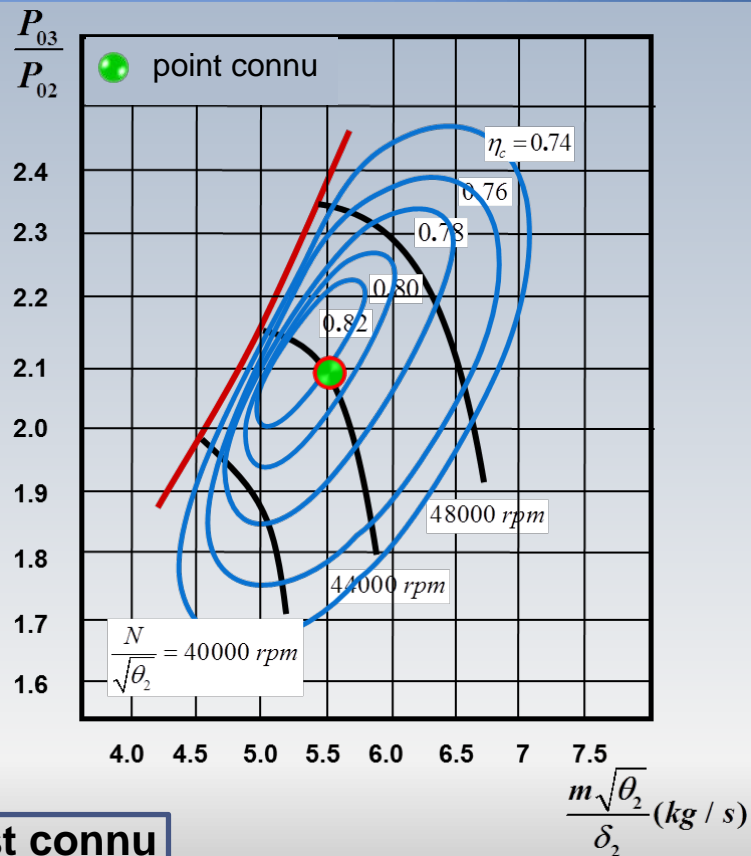
$$p_{env} = 0.21 \text{ bar}, T_{env} = 218 \text{ K}$$

$$M = 0.71, T_{04} = 1244 \text{ K}$$

$$\eta_m = 0.94, \gamma_c = 1.4$$

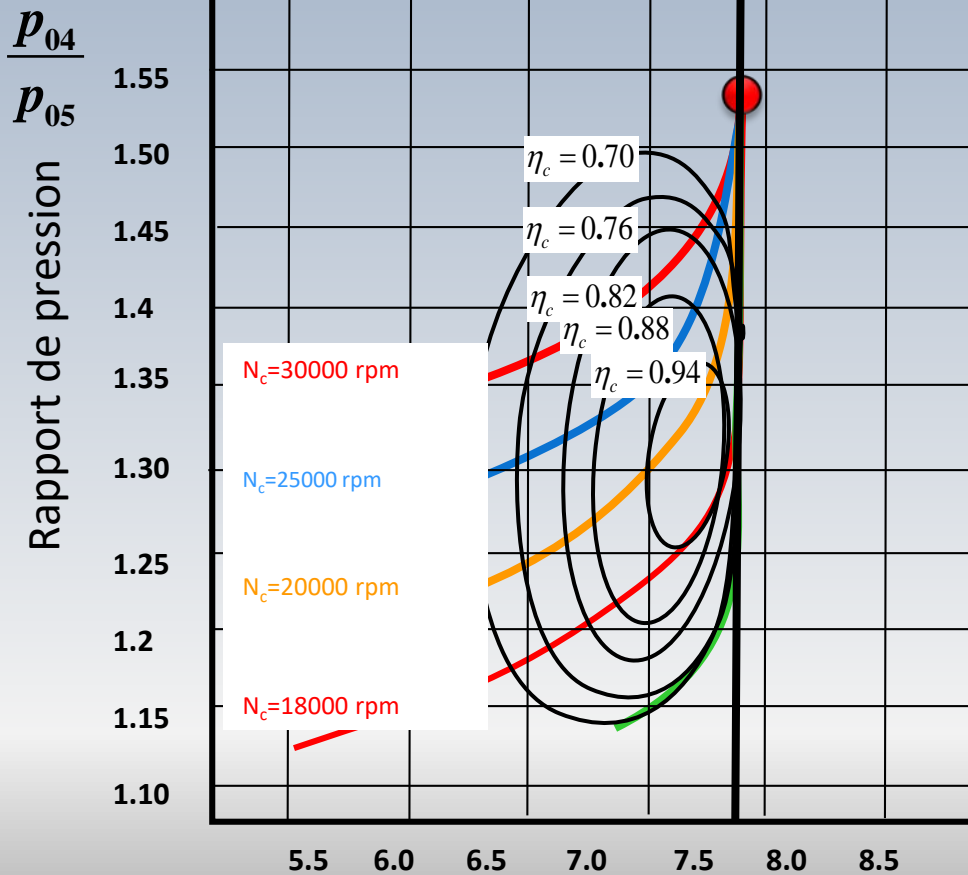
$$\gamma_t = 1.33, \frac{P_{03} - P_{04}}{P_{03}} = 12.5\%$$

$$f = 0.024$$



Le point d'opération ● est connu

# Inconnues



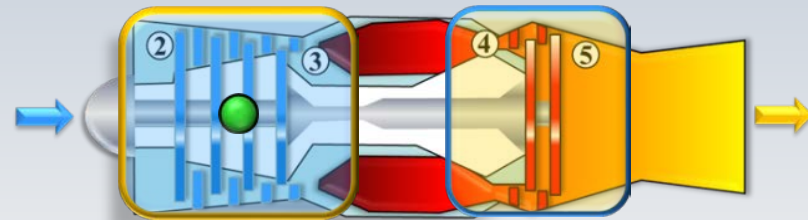
$$\frac{T_{05}}{T_{45}} ?$$

$n_{c4}$  (corrigée)?

$$\frac{p_{04}}{p_{05}} ?$$

$\dot{m}_{c4}$  (corrigé)?

On cherche le rapport de détente dans la turbine

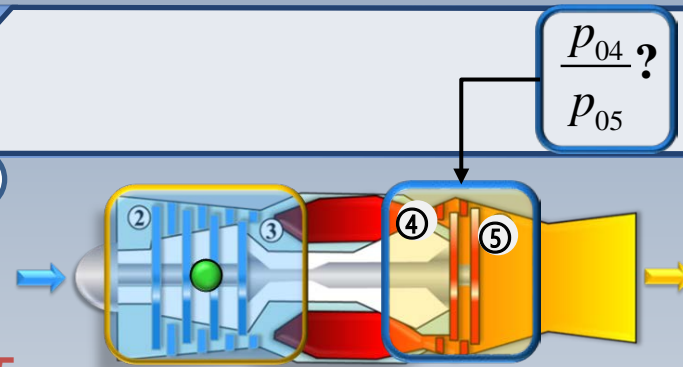
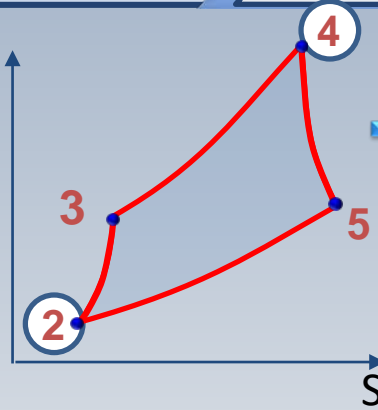


$$\frac{m \sqrt{\theta_4}}{\delta_4} \text{ (kg / s)}$$

# Mariage

Le rapport  $T_{05}/T_{04}$  est issue du bilan d'énergie

$$w_{e/c} = \eta_m (1 + f) w_{e/t}$$



$$\frac{T_{05}}{T_{04}} = 1 - \frac{1}{\eta_m (1 + f)} \frac{c_{p/c}}{c_{p/t}} \frac{T_{02}}{T_{04}} \left[ \left( \frac{T_{03}}{T_{02}} \right) - 1 \right]$$

Il faut chercher d'abord  $T_{02}$  et  $T_{03}$

$$p_{env} = 0.21 \text{ bar}, T_{env} = 218 \text{ K}$$

$$M = 0.71, T_{04} = 1244 \text{ K}$$

$$\eta_m = 0.94, \gamma_c = 1.4$$

$$\gamma_t = 1.33, \frac{P_{03} - P_{04}}{P_{03}} = 12.5\%$$

$$f = 0.024$$

# Lecture

$\frac{P_{04}}{P_{05}} ?$

Lecture de la carte du compresseur

$$\frac{P_{03}}{P_{02}} = 2.1 \quad \dot{m}_{c_2} = 5.5 \text{ kg/s}$$

$$\eta_c = 0.82 \quad \frac{n}{\sqrt{\theta_2}} = 44000 \text{ rpm}$$

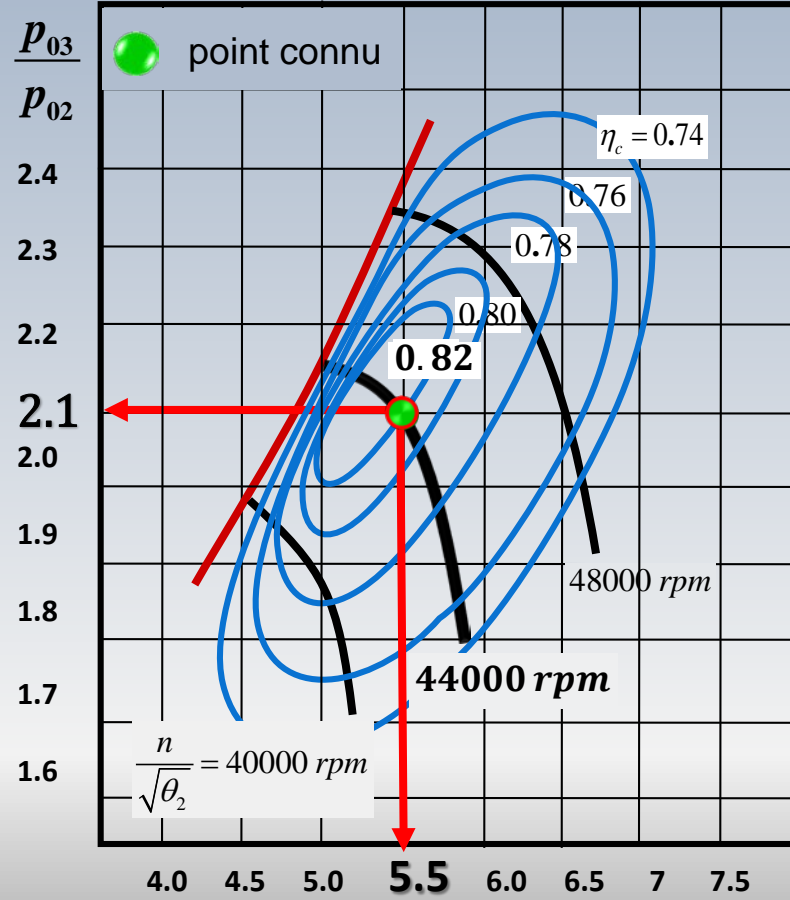
$$p_{env} = 0.21 \text{ bar}, T_{env} = 218 \text{ K}$$

$$M = 0.71, T_{04} = 1244 \text{ K}$$

$$\eta_m = 0.94, \gamma_c = 1.4$$

$$\gamma_t = 1.33, \frac{P_{03} - P_{04}}{P_{03}} = 12.5\%$$

$$f = 0.024$$



$$\frac{\dot{m}\sqrt{\theta_2}}{\delta_2} \text{ (kg/s)}$$

# Compresseur 2-3

$$\frac{T_{05}}{T_{04}} = 1 - \frac{1}{\eta_m} \frac{c_{p,c}}{c_{p,t}} \left[ \frac{T_{02}}{T_{04}} \left( \frac{T_{03}}{T_{02}} \right) - 1 \right]$$

$$\frac{p_{04}}{p_{05}} ?$$

On commence par le calcul des conditions d'arrêt à l'entrée ② du compresseur



$$T_{02} = T_1 \left[ 1 + \left( \frac{\gamma_c - 1}{2} \right) M^2 \right] = 218 \left[ 1 + \left( \frac{0.4}{2} \right) \times 0.71^2 \right] = 239.98 \text{ K}$$

$$T_{02} = 239.8 \text{ K}$$

$$p_{02} = p_1 \left[ 1 + \left( \frac{\gamma_c - 1}{2} \right) M^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0.21 \left[ 1 + \left( \frac{0.4}{2} \right) \times 0.71^2 \right]^{\frac{1.4}{0.4}} = 0.2939 \text{ bar}$$

$$p_{02} = 0.2939 \text{ bar}$$

$$p_{env} = 0.21 \text{ bar}, T_{env} = 218 \text{ K}, M = 0.71, T_{04} = 1244 \text{ K}, \eta_m = 0.94, \gamma_c = 1.4, \gamma_t = 1.33,$$

$$(p_{03} - p_{04}) / p_{03} = 12.5\%, f = 0.024$$

# Compresseur 2-3

$$\frac{T_{05}}{T_{04}} = 1 - \frac{1}{\eta_m} \frac{c_{p/c}}{c_{p/r}} \left[ \frac{T_{02}}{T_{04}} \left( \frac{T_{03}}{T_{02}} \right) - 1 \right]$$

$$\frac{p_{04}}{p_{05}} ?$$

On trouve le rapport de température  $T_{03}/T_{02}$  à partir du rendement du compresseur

$$\eta_c = \frac{T_{03s} - T_{02}}{T_{03} - T_{02}}$$

$$\frac{T_{03}}{T_{02}} = 1 + \frac{1}{\eta_c} \left[ \left( \frac{p_{03}}{p_{02}} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right] = 1 + \frac{1}{0.82} \left[ (2.1)^{0.4/1.4} - 1 \right] = 1.288$$

$$\frac{T_{03}}{T_{02}} = 1.288$$

$\frac{p_{03}}{p_{02}} = 2.1$	$\dot{m}_{c2} = 5.5 \text{ kg/s}$
$\eta_c = 0.82$	$\frac{N}{\sqrt{\theta_2}} = 44000 \text{ rpm}$

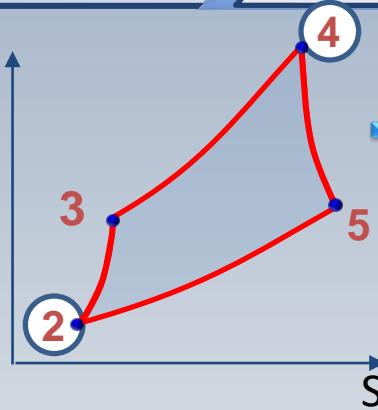




# Mariage

$$\frac{T_{05}}{T_{04}} ?$$

On peut maintenant calculer  $T_{05}/T_{04}$  à partir du mariage



$$\frac{p_{04}}{p_{05}} ?$$

$$\frac{T_{03}}{T_{02}} = 1.288$$

$$T_{02} = 239.8\text{K}$$

$$\frac{T_{05}}{T_{04}} = 1 - \frac{1}{\eta_m (1 + f)} \frac{c_{p|c}}{c_{p|t}} \frac{T_{02}}{T_{04}} \left[ \left( \frac{T_{03}}{T_{02}} \right) - 1 \right] = 0.953$$

$$p_{env} = 0.21 \text{ bar}, T_{env} = 218 \text{ K}, M = 0.71, T_{04} = 1244 \text{ K}, \eta_m = 0.94, \gamma_c = 1.4, \gamma_t = 1.33,$$

$$(p_{03} - p_{04}) / p_{03} = 12.5\%, f = 0.024 \quad c_p = (\gamma R / \gamma - 1)$$

# $n_{c4} (rpm)?$

$T_{02} \approx 240K$     $p_{02} = 0.294bar$

Vitesse corrigée  $n_{c4}$

$$n_{c4} = \left( \frac{n}{\sqrt{\theta_{04}}} \right)_{c4}$$



$p_{env} = 0.21 bar, T_{env} = 218 K$     $M = 0.71, T_{04} = 1244 K, \eta_m = 0.94$   
 $\gamma_c = 1.4, \gamma_t = 1.33, (p_{03} - p_{04}) / p_{03} = 12.5\%, f = 0.024$

$$n_{c4} = n_{c2} \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{04}}} = 44000 \sqrt{\frac{240}{1244}}$$

$$n_{c2} = \left( \frac{n}{\sqrt{\theta_{02}}} \right)_{c2}$$

**$n_{c4} = 19326 rpm$**



$\frac{p_{03}}{p_{02}} = 2.1$     $\dot{m}_{c2} = 5.5 kg/s$   
 $\eta_c = 0.82$     $\frac{N}{\sqrt{\theta_2}} = 44000 rpm$

$\dot{m}_{c4}$  (corrigé)

$$\dot{m}_{corrigé} = \left( \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_0}}{\delta_0} \right)$$

Pour le point 4, il faut trouver  $p_{04}$ .  $T_{04}$  est donnée

$\dot{m}_{c4}?$

$$T_{02} \approx 240K$$

$$p_{02} = 0.294bar$$

$$p_{env} = 0.21 bar, T_{env} = 218 K, M = 0.71, T_{04} = 1244 K, \eta_m = 0.94, \\ \gamma_c = 1.4, \gamma_t = 1.33 \quad (p_{03} - p_{04})/p_{03} = 12.5\%, f = 0.024$$

$$\frac{p_{03}}{p_{02}} = 2.1$$

$$p_{03} = \left( \frac{p_{03}}{p_{02}} \right) \times p_{02} = 2.1 \times 0.294 = 0.617 bar$$

$$p_{04} = (1 - 0.125) \times p_{03} = 0.875 \times 0.617 = 0.54 bar$$

$$p_{04} = 0.54bar$$

(Carte du compresseur)

$$\frac{p_{03}}{p_{02}} = 2.1 \quad \dot{m}_{c2} = 5.5 kg/s$$

$$\eta_c = 0.82 \quad \frac{n}{\sqrt{\theta_2}} = 44000 rpm$$

# $\dot{m}_{c4}$ ?

$$p_{env} = 0.21 \text{ bar}, T_{env} = 218 \text{ K} \quad M = 0.71, T_{04} = 1244 \text{ K}, \eta_m = 0.94$$
$$\gamma_c = 1.4, \gamma_t = 1.33, (p_{03} - p_{04}) / p_{03} = 12.5\%, f = 0.024$$

$$\dot{m}_{c2} = \left( \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_{02}}}{\delta_{02}} \right)$$

$$\dot{m}_{c4} = \left( \frac{\dot{m} \sqrt{\theta_{04}}}{\delta_{04}} \right)$$



$$\dot{m}_{c4} = \dot{m}_{c2} \sqrt{\frac{T_{04}}{T_{02}} \frac{p_{02}}{p_{04}}}$$

$$\dot{m}_{c4} = 5.5 \sqrt{\frac{1244}{240} \frac{0.294}{0.54}} = \mathbf{6.82}$$



(Avec  $f$  négligé)

$$\frac{p_{03}}{p_{02}} = 2.1 \quad \dot{m}_{c2} = 5.5 \text{ kg/s}$$
$$\eta_c = 0.82 \quad \frac{n}{\sqrt{\theta_2}} = 44000 \text{ rpm}$$

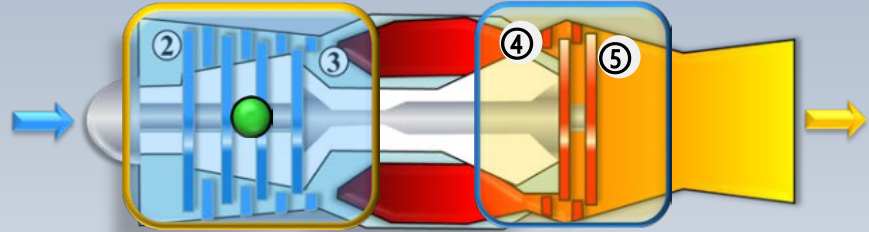
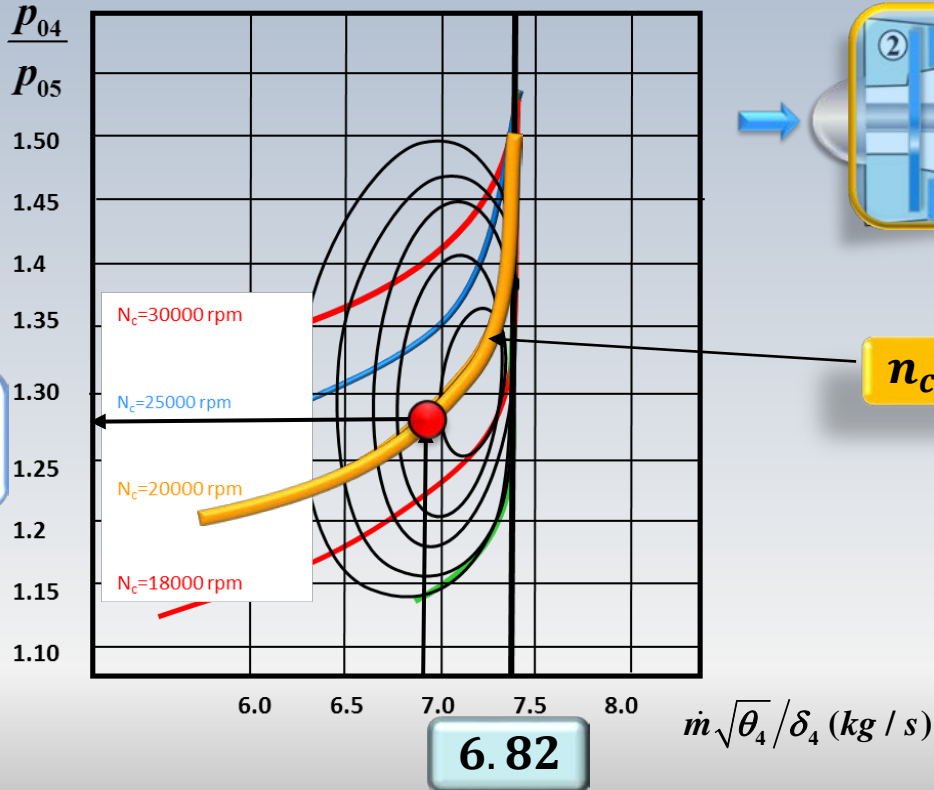
$$T_{02} = 240 \text{ K}$$
$$p_{02} = 0.294 \text{ bar}$$
$$p_{04} = 0.54 \text{ bar}$$

# Point d'opération

$$\frac{P_{04}}{P_{05}} ?$$



$$\frac{P_{04}}{P_{05}} = 1.28$$



$$n_{c4} = 19326 \text{ rpm}$$

# À venir

À venir:  
*Génération de puissance*



Les turbines à gaz sont aussi utilisées pour...