-PROBLEME DE THERMODYNAMIQUE 1-

• ENONCE :

« Principe d'un turboréacteur »

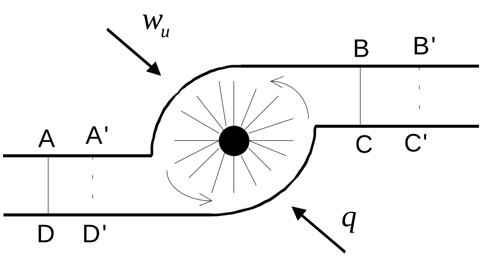
I. PRELIMINAIRES

• Un fluide homogène compressible passe d'une canalisation adiabatique d'entrée où sa pression est p_1, sa température T_1, sa vitesse v_1, son énergie interne massique u_1, son énergie totale massique e_1 (en négligeant l'énergie potentielle massique, on a : $e_1 = u_1 + \frac{v_1^2}{2}$), son enthalpie massique h_1, son entropie massique s_1, son volume massique V_{m1}, à une canalisation adiabatique de sortie où ces grandeurs s'écrivent respectivement : $p_2, T_2, v_2, u_2, e_2, h_2, s_2$ et V_{m2}.

• Les canalisations sont supposées indéformables.

• Au cours du transfert, le fluide traverse une **zone active** (machine) où il reçoit (au sens algébrique) éventuellement du travail et/ou de la chaleur de la part du milieu extérieur (figure ci-dessous) ; on note respectivement w et q le travail et la chaleur reçus par le fluide lorsque l'unité de masse de fluide est transférée de l'entrée vers la sortie.

• Dans la suite, on supposera le **régime permanent établi** (toutes les grandeurs physiques relatives au fluide sont indépendantes du temps, en un point quelconque de la machine).



On considère le système **fermé** (S) constitué par le fluide à l'instant t dans le volume ABCD. Ce volume est délimité par les parois de la machine et des canalisations et par 2 sections droites AD et BC; à l'instant t+dt, ce système qui s'est déplacé, se retrouve dans le volume A'B'C'D'.

1.1) On note δm_1 et δm_2 les masses du fluide contenues respectivement dans les volumes AA'DD' et BB'CC' : écrire la relation entre δm_1 et δm_2.

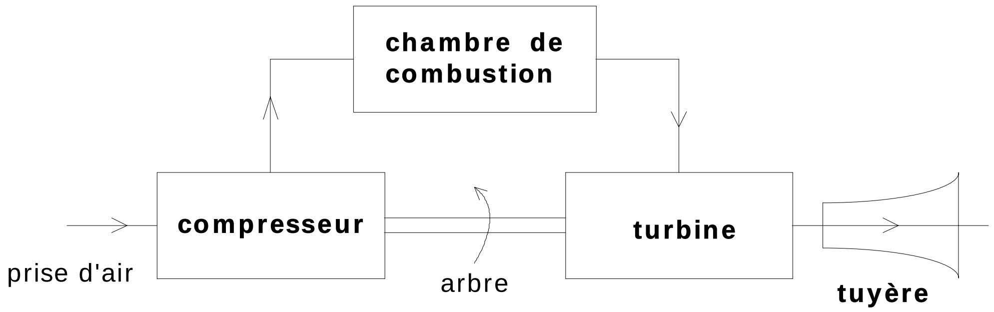
1.2) Effectuer le bilan d'énergie E^F du système fermé (S) entre les instants t et t+dt ; en déduire l'expression de la variation d'énergie dE^F de (S) entre ces deux instants, en fonction de e_1, e_2 et δm_1.

1.3) En appliquant le Premier Principe de la thermodynamique au système fermé (S), et en distinguant les travaux des forces de pression δW_P échangés au niveau des canalisations, du travail δW_u éventuellement échangé dans la zone active de la machine, montrer que l'on a :

$$\boxed{\left(h_2 + \frac{v_2^2}{2}\right) - \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2}\right) = w_u + q}$$

II. TURBOREACTEUR A CYCLE SIMPLE

• Un turboréacteur à simple flux, représenté schématiquement sur la figure ci-dessous, est constitué d'un compresseur, d'une chambre de combustion, d'une turbine à gaz et d'une tuyère. Le compresseur est monté sur le même arbre que la turbine qui lui fournit la puissance nécessaire à son fonctionnement.



• Le cycle **théorique** du turboréacteur est un cycle de Joule-Brayton **réversible** décrit par de l'air que l'on peut assimiler à un **gaz parfait** et dont la capacité thermique massique isobare c_P est supposée constante. Ce cycle comprend :

♦ une **compression isentropique** : l'air, pris à la pression atmosphérique $p_0 = 1\ bar$ et à la température ambiante T_0, est admis dans le turbocompresseur qui l'aspire avec un débit massique D et le comprime isentropiquement jusqu'à la pression p_1 ; on désigne par T_1 la température de l'air à la fin de cette phase de compression.

♦ un **échauffement isobare** : le carburant est injecté sous forme pulvérisée dans l'air comprimé et brûlé sous pression constante dans la chambre de combustion ; on désigne respectivement par p_1 et T_2 la pression et la température du gaz à la fin de la combustion, et par q_C la quantité de chaleur apportée par la combustion à l'unité de masse de fluide.

♦ une **détente isentropique** : les gaz brûlés sont d'abord détendus isentropiquement jusqu'à la pression p_3 et la température T_3, dans les aubages d'une turbine chargée d'entraîner le compresseur.
A la sortie de la turbine, la détente isentropique se poursuit dans une tuyère jusqu'à la pression atmosphérique p_0 et la température T_4 : le gaz acquiert alors une vitesse suffisamment élevée pour assurer la propulsion de l'appareil sur lequel le moteur est installé.

♦ un **refroidissement isobare** : à la sortie de la tuyère, les gaz à la température T_4 subissent, au contact de l'atmosphère, un refroidissement isobare jusqu'à la température ambiante T_0.

• Dans tout ce qui suit, nous supposerons vérifiées les hypothèses suivantes :

♦ étant donnée la grande dilution dans l'air en excès, du combustible tout d'abord (le kérosène) et des gaz brûlés ensuite, on peut ne pas tenir compte des modifications chimiques du fluide moteur et continuer à l'assimiler à de l'air : il suffit pour cela que les caractéristiques physiques comme la capacité thermique massique isobare ou la masse molaire varient très peu.
L'évolution peut alors être considérée comme un **cycle**, la quantité de chaleur q_C fournie par la combustion étant comptée comme un apport **extérieur** de chaleur.

♦ le turboréacteur fonctionne au **point fixe** (sur un banc d'essai par exemple) et à plein régime.

♦ enfin, la vitesse d'écoulement du fluide pourra toujours être **négligée**, **sauf dans la tuyère**.

2.1.1) Représenter le cycle d'évolution de l'air dans le diagramme (p,V_m) ; que représente l'aire sous-tendue par le cycle ?

2.1.2) Trouver l'équation $T(s)$ d'une isobare dans le diagramme entropique (T,s) ; montrer que, dans le cas d'un gaz parfait, une isobare p' se déduit d'une isobare p par une translation de l'isobare p parallèle à l'axe des s dont on précisera l'amplitude.

2.1.3) Représenter le cycle dans le diagramme entropique : que représente l'aire sous-tendue par le cycle ? Comparer avec la question 2.1.1).

2.1.4) Définir le rendement thermique η de ce cycle ; exprimer η en fonction du rapport de compression $\omega = \dfrac{p_1}{p_0}$ et de $\gamma = \dfrac{c_P}{c_V}$, où c_P et c_V sont les capacités thermiques massiques respectivement à pression et volume constants.

Application numérique : on donne $\gamma = 1{,}4$ et $\omega = 5$.

2.1.5) Comparer qualitativement ce rendement à celui η_C d'un cycle de Carnot réversible dont les températures des sources chaude et froide seraient égales aux températures extrêmes du cycle de Joule. Ce résultat est-il en contradiction avec le théorème de Carnot ?

2.2) Exprimer la puissance P_C fournie par le compresseur en fonction du débit d'air D, de γ, T_0, ω et $r = \dfrac{R}{M}$, où R est la constante des gaz parfaits et M la masse molaire de l'air.

Application numérique : on donne $M = 29 g.mol^{-1}$; $R = 8{,}31\, J.K^{-1}.mol^{-1}$; $D = 60\, kg.s^{-1}$; $T_0 = 290 K$.

2.3) La quantité de carburant injecté à plein régime dans la chambre de combustion dépend de la température maximale $T_{2\max}$ admissible, pour des raisons de résistance mécanique des aubes, à l'entrée de la turbine. Calculer le débit maximal $d_{\max}$ de carburant, en fonction de $D, r, \gamma, T_0, T_{2\max}, \omega$ et du pouvoir calorifique q_C du carburant (chaleur libérée par la combustion de l'unité de masse du carburant).

Application numérique : on donne $T_{2\max} = 1100 K$ et $q_C = 45.10^6 J.kg^{-1}$.

2.4) Calculer la température T_3 et la pression p_3 à la sortie de la turbine, sachant que cette dernière fournit juste la puissance nécessaire au fonctionnement du compresseur (en d'autres termes, on néglige les pertes des deux machines).

2.5) Calculer la température T_4 à la sortie de la tuyère en fonction de $T_{2\max}, \omega$ et γ ; A.N.

2.6) Calculer la vitesse d'éjection v des gaz en fonction de γ, r, T_3 et T_4 ; A.N.

III. TURBOREACTEUR A POST-COMBUSTION

A la sortie de la turbine, l'absence de pièces mobiles permet d'envisager de porter le fluide moteur à des températures plus élevées ; pour cela, on réalise une **post-combustion** à **pression constante** dans une seconde chambre de combustion placée après la turbine.

3.1) Représenter le nouveau cycle dans les diagrammes (p,V_m) et (T,s).

3.2) Calculer le débit d' de carburant nécessaire pour obtenir une température maximale $T'_{3\max}$ admissible à l'entrée de la tuyère, en fonction de $T'_{3\max},T_3,r,D,q_C$ et γ ; faire l'application numérique avec $T'_{3\max}=1500K$.

3.3) Calculer la température T'_4 des gaz à la sortie de la tuyère, en fonction de $T_{2\max},T'_{3\max},T_3,\omega$ et γ ; en déduire la nouvelle vitesse d'éjection v' des gaz.

3.4) Comparer l'accroissement relatif de la vitesse d'éjection à l'accroissement relatif de la consommation de carburant ; conclure.

IV. POUSSEE DU TURBOREACTEUR

• On appelle poussée du turboréacteur $\vec{F}_P$ l'opposé de l'action du réacteur sur le gaz, **suivant la vitesse d'éjection**.

• Par un bilan de quantité de mouvement sur un système **fermé**, exprimer la poussée du turboréacteur à post-combustion (en **régime permanent**), en fonction de la vitesse d'éjection v' des gaz et du débit massique d'air D ; faire l'application numérique.

****

D'après le concours ENAC - Ingénieurs 93 , épreuve optionnelle