**Exercice N°1**

Déterminer la vitesse du son dans l'air pour un jour chaud d'été lorsque la température est de 38 °C et pour un jour froid d'hiver lorsque la température est de –30 °C.

***Réponse***

Pour un gaz parfait, la vitesse du son s'écrit $C = \sqrt{\gamma . r . T}$ où pour l'air $\gamma = 1{,}4$ et $r = \frac{R}{M} =$

$$r = \frac{8{,}32}{29.10^{-3}} = 287\, J/KgK$$

Donc $C_{38°C} = \sqrt{1{,}4.\,287.\,(273 + 38)} = 353{,}5\, m/s$

$C_{-30°C} = \sqrt{1{,}4.\,287.\,(273 - 30)} = 318{,}8\, m/s$

**Exercice N°2**

Dans un écoulement d'air les caractéristiques en un point sont les suivantes :

- vitesse d'écoulement : $V$ =100 m/s

- pression $P$ = 1,013 bar

- température : $T$= 15°c ;

- Masse volumique $\rho$ = 0,349 Kg/m$^3$

- $\gamma$ = 1,4

On demande de calculer la pression d'arrêt $P_i$.

1) en négligeant la compressibilité de l'air.

2) en tenant compte de sa compressibilité.

***Réponse***

1) En négligeant la compressibilité de l'air, on peut appliquer le théorème de Bernoulli :

$\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + g.Z = \frac{V_i^2}{2} + \frac{P_i}{\rho} + g.Z_i$ , sachant que $V_i = 0\ (point\ d'arret)$ et $Z = Z_i$

Donc : $P_i = P + \frac{1}{2}.\rho.V^2$

**A.N:** $\boldsymbol{P_i = 1.030 bar}$

2) En tenant compte de sa compressibilité, on peut appliquer le théorème de Saint-Venant :

$P_i = P.\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ avec : $a = C = \sqrt{\frac{\gamma.P}{\rho}} = \sqrt{1{,}4\,\frac{1{,}013.10^5}{0{,}349}} = 673{,}46\ m/s$

$M = \frac{V}{a} = \frac{100}{673.46} = 0{,}156$

Donc $P_i = 1{,}013.\left(1+\frac{1{,}4-1}{2}\ 0{,}156^2\right)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} = \mathbf{1.030\ bar}$

**Exercice N°3**

Un avion vole à un nombre de Mach $M$= 0,95 et à une altitude où la pression atmosphérique est $P_{atm}$ = 0,2332 bar et la masse volumique $\rho$ = 0,349 Kg/m$^3$.

1) Calculer la vitesse de l'avion en *Km/h*.

2) Calculer la pression et la température du point d'arrêt sur le bord d'attaque de l'aile.

L'air est assimilé à un gaz parfait : $\gamma$ = 1,4 et $r$ = 287 J/kg.K

***Réponse***

1- $V = M.a = M\sqrt{\gamma.r.T}$

A.N : $V = 290.56\frac{m}{s} = 1046.02\ Km/h.$

2- $P_i = P.\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

A.N : $P_i = 0{,}2332.\left(1+\frac{1{,}4-1}{2}\ 0{,}95^2\right)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} = \mathbf{0{,}416 bar}$

$T_i = T.\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)$ or $r.T = \frac{P}{\rho}$ $(air\ considéré\ gaz\ parfait) \Rightarrow T = \frac{P}{\rho.r} = \frac{0{,}2332.10^5}{0{,}349.287} =$ $232{,}82K$

Donc: $T_i = 232.82.\left(1+\frac{1{,}4-1}{2}0.95^2\right) = 274.84K$

**Exercice N°4**

Un corps céleste en chute libre, freiné par les couches d'air de la haute atmosphère tombe sur terre. A une altitude de 10 km :

- la vitesse du corps $V$=3000 m/s,

- la température de l'air $T$=2230 K,

- la masse volumique de l'air $\rho$ = 0,412 $kg$ / $m^3$

- la pression de l'air $P$=0,265 bar.

On donne $\gamma = 1,4$ .

Travail demandé :

1) Calculer la vitesse du son $a$.

2) Déterminer le nombre de Mach $M$.

3) Quelle est la nature de l'écoulement d'air autour du corps ?

4) Appliquer le théorème de Saint-Venant pour calculer la température $T_i$ et la pression $P_i$ de l'air au point d'arrêt.

***<u>Réponse</u>***

1- Célérité du son : $C = a = \sqrt{\gamma.\frac{P}{\rho}}$ A.N : $C = a = \sqrt{1,4.\frac{26500}{0,412}} = 300\ m/s$

2- Nombre de Mach : $M = \frac{V}{a}$ A.N :$M = \frac{3000}{300} = 10$

3- $M > 1$ donc l'écoulement est supersonique.

4- Température d'arrêt $T_i = T.\left(1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2\right)$ A.N : $T_i = 223.\left(1 + \frac{1,4-1}{2}10^2\right) = 4683K$

5- Pression d'arrêt :

$$P_i = P.\left(1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \text{ A.N : } P_i = 26500.\left(1 + \frac{1,4-1}{2}10^2\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 11246\ Pa$$

**<u>Exercice N°5</u>**

Un réservoir contient de l'air comprimé à une pression $P_i$= 4 bar, supposée pression d'arrêt à l'état initial. L'ouverture d'une vanne dans ce réservoir provoque la détente de l'air vers l'extérieur sous forme d'un jet ayant un diamètre $d$ = 5 mm. Les paramètres extérieurs du jet d'air à l'état final sont : - Pression $P$= 1 bar, - Température $T$=25 °C, On donne $\gamma = 4,1$ et $r$=287 J/Kg. K.

1) Calculer la vitesse du son C à l'extérieur du réservoir en (m/s).

2) Déterminer la masse volumique $\rho$ de l'air à l'extérieur du réservoir en (kg/m$^3$ ). (On suppose que l'air est un gaz parfait.)

3) Ecrire l'équation de Saint-Venant, en terme de rapport de pression, entre un point d'arrêt et un point sur le jet d'air.

4) En déduire le nombre de Mach $M$ au niveau du jet d'air.

5) Quelle est la nature de l'écoulement ?

6) Calculer la vitesse d'écoulement *V* du jet d'air en (m/s).

7) En déduire le débit massique $q_m$ (kg/s).

***Réponse***

1- La vitesse du son : $C = a = \sqrt{\gamma.r.T}$ A. N: $a = C = \sqrt{1{,}4.287.298} = 346\ m/s$

2- Masse volumique : $\rho = \frac{P}{r.T}$ A.N: $\rho = \frac{10^5}{287.298} = 1.169\ Kg/m^3$

3- Equation de Saint-Venant: $1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2 = \left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

4- Nombre de Mach : $M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}\left[\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]}$ A.N : $M = 1{,}558$

5- $M > 1$ donc l'écoulement est supersonique.

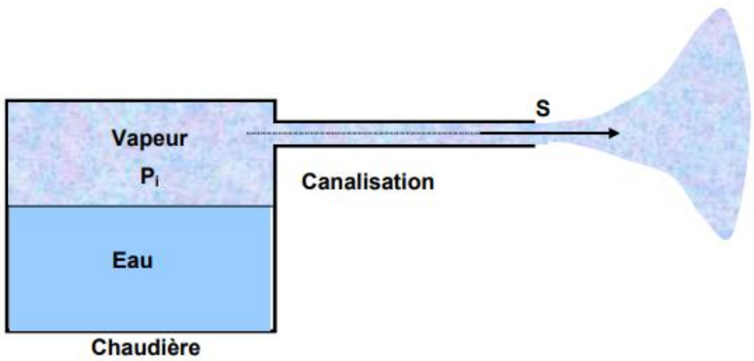
6- Vitesse d'écoulement : $V = M.a$ A.N : $V = 1{,}558.346 = 549.48\ m/s$

7- Débit massique : $q_m = \rho.V.S = \rho.\frac{\pi.d^2}{4}.V$

A.N : $q_m = 1{,}169.\frac{\pi.0.005}{4}.549{,}448 = 2{,}52\ Kg/s$

**Exercice N°6**

La figure ci-dessous représente une chaudière qui produit de la vapeur d'eau à un débit massique $q_m$=13,4 kg/s. Par une canalisation cylindrique, la vapeur arrive dans une section *S* de diamètre *d*=10 cm à une pression *P*=15 bar et une température *T*=541 K. On donne les caractéristiques de la vapeur d'eau : - $\gamma$ =1,3. - *r*=462 J/kgK.




Travail demandé :

1) On suppose que la vapeur est un gaz parfait, calculer la masse volumique $\rho$ de la vapeur d'eau en sortie de la chaudière.

2) Déterminer la vitesse d'écoulement *V*.

3) Calculer la célérité du son *C*.

4) En déduire le nombre de Mach *M*. Préciser la nature de l'écoulement.

5) Ecrire l'équation de Saint-Venant en terme de rapport de pression, et calculer la pression d'arrêt $P_i$ à l'intérieur de la chaudière.

***Réponse***

1) Masse volumique de la vapeur : $\rho = \frac{P}{r.T}$ A.N: $\rho = \frac{15.10^5}{462.541} = 6\ Kg/m^3$
2) Vitesse d'écoulement : $V = \frac{4\ q_m}{\pi.d^2.\rho}$ A.N : $V = \frac{4\ 13,4}{\pi.0.1^2.6} = 284,356\ m/s$
3) Célérité de son : $C = \sqrt{\gamma.r.T}$ A.N : $C = \sqrt{1,4.462.541} = 570,021\ m/s$
4) Nombre de Mach : $M = \frac{V}{C}$ A.N : $M = \frac{284,356}{570,021} 0.5$

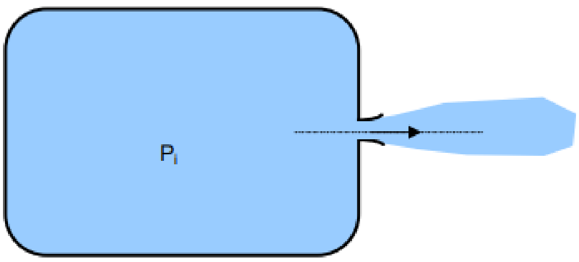
   $M < 1$ Donc l'écoulement est subsonique
5) Equation de Saint-Venant : $\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$

   La pression d'arrêt : $P_i = P.(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$

   A.N : $P_i = 15.10^5.(1 + \frac{1,4-1}{2} 0,5^2)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 1759434\ Ps = 17,594\ bar$

**Exercice N°7**

De l'air comprimé contenu dans un grand réservoir s'échappe vers l'extérieur à travers un orifice à un nombre de Mach *M*=0,77. La détente se produit dans l'atmosphère où règne une pression *P*=*Patm*=1,014 bar. On donne le rapport des chaleurs massiques :$\gamma$ = 4,1 .




Travail demandé :

1) En appliquant l'équation de Saint- Venant, déterminer la pression $P_i$ (en bar) à l'intérieur du réservoir.

2) A partir de quelle pression $P_i$, l'écoulement devient supersonique ?

***Réponse***

1) Equation de Saint-Venant : $P_i = P.(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ donc $P_i = P.(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$

$$P_i = 1{,}014.10^5.(1+\frac{1{,}4-1}{2}0{,}77^2)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} = 150097{,}21\ Ps = 1{,}5\ bar$$

2) $M > 1 \ \rightarrow \ P_i > P.(\frac{\gamma+1}{2})^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$

$$P_i > 1{,}014.10^5.(\frac{1{,}4+1}{2})^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} = 191943 \approx 2\ bar$$

**Exercice N°8**

L'azote est comprimé dans une bouteille dans laquelle règne une pression d'arrêt $P_i$ = 3 bar. Il s'échappe à travers un orifice vers l'extérieur ou la pression ambiante est $P$= 1 bar. On donne $\gamma$= 4,1 .

1) En appliquant l'équation de Saint-Venant, déterminer le nombre de Mach $M$.

2) Préciser la nature de l'écoulement.

***Réponse***

1) Théorème de Saint-Venant : $\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1+\frac{\gamma-1}{2}M^2$

Nombre de Mach : $M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}.\left[\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}-1\right]}$ A.N : $M = \sqrt{\frac{2}{1{,}4-1}.\left[\left(\frac{3}{1}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}-1\right]} = 1{,}357$

2) $M > 1$ donc l'écoulement est supersonique.

**Exercice N°9**

De l'air, supposé gaz parfait, s'échappe par la valve d'une chambre à air d'un pneu. La pression à l'intérieur de la chambre à air est $P_i$ = 1,7 bar. On suppose que la détente de l'air, s'effectue vers l'extérieur à une pression $P$=1 bar et une température ambiante $T$=25 °C.

On donne les caractéristiques de l'air suivantes : - $r$= 287 J/kgK, - $\gamma$=1,4.

Travail demandé :

1) Calculer la célérité du son.

2) En appliquant l'équation de Saint-Venant, déterminer le nombre de Mach.

3) Déterminer la vitesse d'échappement $V$ de l'air.

***Réponse***

1) $C = \sqrt{\gamma.r.T}$ A.N : $C = \sqrt{1{,}4.287.298} = 346\ m/s$

2) Equation de Saint-Venant : $\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2}M^2 \rightarrow M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}.\left[\left(\frac{P_i}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]}$

A.N: $M = \sqrt{\frac{2}{1{,}4-1}.\left[\left(\frac{1{,}7}{1}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} - 1\right]} = 0.9$

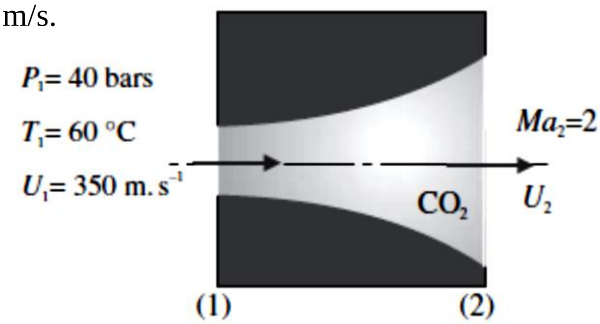
3) $V = M.C \Longrightarrow V = 0{,}9.346 = 311{,}4\ m/s$

**Exercice N°10**

On considère l'écoulement isentropique du dioxyde de carbone dans une tuyère tel représenté sur la figure ci-contre. À la section (1) de cet écoulement, la température est $T_1$=60 °C et la vitesse $V_1$=350 m/s.

Déterminer la vitesse $V_2$ à la section (2) où le nombre de Mach $M_{a2}$ = 2.

Calculer alors le rapport des sections $S_2/S_1$.




***Réponse***

On a $U_2 = M_{a2}a_2 = M_{a2}\sqrt{\gamma r T_2}$

Pour le $CO_2$, $\gamma = 1{,}3\ et\ r = 188{,}9\ J/kgK$.

De plus, d'après l'équation, $\frac{T_{0,2}}{T_2} = 1 + \frac{\gamma-1}{2}M_{a2}^2\ et\ \frac{T_{0,1}}{T_1} = 1 + \frac{\gamma-1}{2}M_{a1}^2$ où pour un écoulement isentropique $T_{0,2} = T_{0,1}$. En divisant ces équations, on obtient alors :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2}M_{a1}^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2}M_{a2}^2}$$

$$M_{a1} = \frac{U}{\sqrt{\gamma r T_1}} = \frac{350}{\sqrt{1{,}3.188{,}9.(273+60)}} = 1{,}22$$

Donc : $T_2 = (273+60)\frac{1+\frac{1{,}3-1}{1{,}3}1{,}22^2}{1+\frac{1{,}3-1}{1{,}3}2^2} = 255K$

Par conséquent $U_2 = 2\sqrt{1{,}3.\,188{,}9\ 255} = 500{,}5\ m/s$

Ce qui entraine :

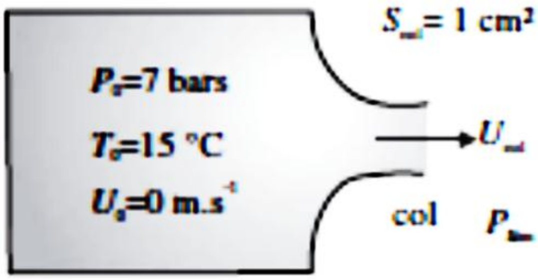
$$\frac{S_2}{S_1}=\frac{\frac{S_2}{S^*}}{\frac{S_1}{S^*}}=\frac{\frac{1}{M_{a2}}\left\{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)\left[1+\frac{\gamma-1}{2}M_{a2}^2\right]\right\}^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}{\frac{1}{M_{a1}}\left\{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)\left[1+\frac{\gamma-1}{2}M_{a1}^2\right]\right\}^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}=\frac{M_{a1}}{M_{a2}}\left[\frac{1+\frac{\gamma-1}{2}M_{a2}^2}{1+\frac{\gamma-1}{2}M_{a1}^2}\right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

Avec : $\frac{\gamma-1}{2}=0{,}15$, $\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}=3{,}83$, $M_{a2}=2$, $M_{a1}=1{,}22$

$$\frac{S_2}{S_1}=\frac{1{,}22}{2}\left[\frac{1+0{,}15.\,2^2}{1+0{,}15.\,1{,}22^2}\right]^{3{,}83}=1{,}71$$

**Exercice N°11**

Un gaz idéal à la pression $P_0$ = 7 bars et à la température $T_0$ = 15 °C s'écoule de façon isentropique à partir d'un grand réservoir de stockage à travers une tuyère convergente directement à l'atmosphère. La surface au col du conduit est de 1 cm$^2$. Déterminer la pression, température, vitesse et débit-masse du gaz au col du conduit si le gaz est (a) de l'air($\gamma=1.4$), (b) du dioxyde de carbone($\gamma=1.3$) et (c) de l'hélium ($\gamma=1.66$).




***Réponse***

S'il y a blocage sonique à la sortie de la tuyère, alors la vitesse du fluide à la sortie est égale à la vitesse du son et la pression est égale à la pression critique $P*$ et par conséquent d'après l'équation :

$$\frac{P_0}{P^*}=\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Si $P^*<P_{atm}$ alors il n'y a pas blocage sonique au niveau du col de la tuyère et $P_{col}=P_{atm}$. Si $P^*>P_{atm}$ alors il y a blocage sonique au niveau du col et $P_{col}=P^*$ . En fait comme montré ci-dessous, dans les deux cas, il y a blocage sonique au niveau du col de la tuyère. Pour l'air γ = 1,4, et donc :

$$P^* = 7.10^5.\left(\frac{2}{2,4}\right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 3,7.10^5 Pa > P_{atm} = 10^5 Pa$$

Donc $P_{col} = P^* = 3,7.10^5 Pa\ et\ M_{col} = 1$

S'après l'équation : $T^* = T_{col} = T_0\frac{2}{\gamma+1} = (273+15).\frac{2}{1,4+1} = 240K$

Soit alors : $U_{col} = M_{col}a_{col} = \sqrt{\gamma r T_{col}} = \sqrt{1,4.287.240} = 310.5\ m/d$

**<u>Exercices N°12</u>**

Un courant d'air s'écoule subsoniquement dans une conduite adiabatique de 2 cm de diamètre. Le coefficient de friction moyen est 0,024. Quelle est la longueur de conduite nécessaire d'accélérer l'écoulement fluide de $M_1$ = 0,1 à $M_2$ = 0.5 ? Quelle longueur complémentaire l'accélérera à $M_3$ = 1.0 ? Supposez γ = 1,4.

Pour cet écoulement interne supposez que, à $M_1$ = 0.1, nous avons $p_1$ = 600kPa et $T_1$ =450K . A la section 2 plus éloignée en aval, $M_2$ = 0.5. Calculez (a) $p_2$ , (b)$T_2$ , (c) $V_2$ et (d) $p_{02}$ .

***<u>Réponse</u>***

Avec les valeurs de $\frac{\bar{f}L^*}{D}$ lises de la table (III) :

$$\bar{f}\frac{\Delta L}{D} = \frac{0.024\,\Delta L}{0.02\,m} = \left(\frac{\bar{f}L^*}{D}\right)_{M=0.1} - \left(\frac{\bar{f}L^*}{D}\right)_{M=0.5}$$

$$= 66.9216 - 1.0691 = 65.8525$$

$$\Delta L = \frac{65.8525(0.02\,m)}{0.024} = 55\,m$$

La longueur complémentaire $\Delta L'$ pour aller de $M$ = 0.5 à $M$ = 1.0 est prise directement de la table (II)

$$f\frac{\Delta L'}{D} = \left(\frac{fL^*}{D}\right)_{M=0.5} = 1.0691$$

$$\Delta L' = L^*_{M=0.5} = \frac{1.0691(0.02\,m)}{0.024} = 0.9\,m$$

Ces calculs sont typiques : Il prend 55 m pour accélérer jusqu'à M = 0.5 et ensuite seulement 0.9 m plus pour arriver entièrement jusqu'au point sonique.

Comme information préliminaire nous pouvons calculer $V_1$ et $p_{01}$ des données :

$$V_1 = M_1 a_1 = 0.1\left[(1.4)(287)(450)\right]^{1/2} = 0.1(425\,m/s) = 42.5\,m/s$$

$$p_{01} = p_1(1+0.2M_1^2)^{3.5} = (600\,kPa)\left[1+0.2(0.1)^2\right]^{3.5} = 604\,kPa$$

Entrez maintenant à la table (III) pour trouver les rapports suivants

| Section | $M$ | $p/p^*$ | $T/T^*$ | $V/V^*$ | $p_0/p_0^*$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.1 | 10.9435 | 1.1976 | 0.1094 | 5.8218 |
| 2 | 0.5 | 2.1381 | 1.1429 | 0.5345 | 1.3399 |

Employez ces proportions pour calculer toutes les propriétés en aval :

$$p_2 = p_1 \frac{p_2/p^*}{p_1/p^*} = (600\,kPa)\frac{2.1381}{10.9435} = 117\,kPa$$

$$T_2 = T_1 \frac{T_2/T^*}{T_1/T^*} = (450\,K)\frac{1.1429}{1.1976} = 429\,K$$

$$V_2 = V_1 \frac{V_2/V^*}{V_1/V^*} = (42.5\,m/s)\frac{0.5345}{0.1094} = 208\,m/s$$

$$p_{02} = p_{01} \frac{p_{02}/p_0^*}{p_{01}/p_0^*} = (604\,kPa)\frac{1.3399}{5.8218} = 139\,kPa$$

**<u>Exercices N°13</u>**

Un mélange air-carburant, supposé comme l'air avec $\gamma = 1,4$, entre à une chambre de combustion de conduite à $V_1$ = 75 *m/s* / , $p_1$ =150 kPa et $T_1$ = 300 *K*. L'ajout de chaleur par la combustion est 900 *kJ/ kg* de mélange. Calculez (a) les propriétés de sortie $V_2$ , $p_2$ et $T_2$ , et (b) la quantité de chaleur totale ajoutée qui aurait causé un écoulement de sortie sonique.

Ce qui arrive à l'entrée de cet 'écoulement si l'ajout de chaleur est augmenté à 1400 *kJ/kg* et la pression et la température de stagnation à l'entrée sont fixées ? Quelle sera la diminution subséquente dans le débit massique de l'écoulement ?

***<u>Réponse</u>***

a) (a) D'abord on calcule $T_{01} = T_1 + \frac{V_1^2}{2C_p} = 300 + \frac{75^2}{[2.2005]} = 303K$. Alors on calcule la variation de la température de stagnation du gaz : $q = C_p(T_{02} - T_{01})$

Ou $T_{02} = T_{01} + \frac{q}{C_p} = 303 + \frac{900000}{1005} = 1199K$

Nous avons assez d'information pour calculer le nombre de Mach initial :

$a_1 = \sqrt{\gamma r T_1} = \sqrt{1{,}4.287.300} = 347\ m/s\ ,\ M_1 = \frac{V_1}{a_1} = \frac{75}{347} = 0{,}216$

Pour ce nombre de Mach, on emplois la table (IV) pour trouver la valeur sonique $T_0^*$:

A $M_1 = 0{,}216$: $\frac{T_{01}}{T_0} \approx 0{,}1992\ ou\ T_0^* = \frac{303}{0{,}1992} \approx 1521K$

Alors le rapport de température de stagnation à la section 2 est $\frac{T_0}{T_0^*} = \frac{1199}{1521} = 0{,}788$, qui correspond dans la table (IV) à un nombre de Mach $M_2 \approx 0{,}573$.

On emplois maintenant la table (IV) à $M_1$ et $M_2$ pour tabuler les rapports de propriétés désirés.

| Section | $M$ | $V/V^*$ | $p/p^*$ | $T/T^*$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.216 | 0.1051 | 2.2528 | 0.2368 |
| 2 | 0.573 | 0.5398 | 1.6442 | 0.8876 |

Les propriétés de sortie sont calculées en employant ces proportions pour trouver l'état 2 de l'état 1 :

$$V_2 = V_1 \frac{V_2/V^*}{V_1/V^*} = (75\,m/s)\frac{0.5398}{0.1051} = 385\,m/s$$

$$p_2 = p_1 \frac{p_2/p^*}{p_1/p^*} = (150\,kPa)\frac{1.6442}{2.2528} = 109\,kPa$$

$$T_2 = T_1 \frac{T_2/T^*}{T_1/T^*} = (300\,K)\frac{0.8876}{0.2368} = 1124\,K$$

b) l’ajout de chaleur maximal permis conduirait le nombre de Mach de la sortie à l'unité :

$$T_{02} = T_0^* = 1521\text{K}$$

$$q_m = C_p(T_0^* - T_{01}) = [1005](1521 - 303) \approx 1{,}22\,J/Kg$$

Pour / $q=1400$ kJ/ kg , la sortie sera étranglée (suffoquée) à la température de stagnation

$$T_0^* = T_{01} + \frac{q}{C_p} = 303 + \frac{1{,}4\ 10^6}{1005} \approx 1696K$$

C'est plus haut que la valeur $T_0^* = 1521K$ dans l'exemple (VII.1), donc nous savons que la condition 1 devra suffoquer vers un nombre de Mach inférieur. La valeur appropriée est trouvée du rapport $\frac{T_{01}}{T_0^*} = \frac{303}{1696} = 0{,}1787$. De la table (IV) pour cette condition, nous lisons le nouveau nombre de Mach d'entrée baissé : $M_{1,nouv} \approx 0{,}203.$ avec $T_{01}$ et $p_1$connu, les autres propriétés d'entrée suivent de ce nombre de Mach :

$$T_1 = \frac{T_{01}}{1+0.2M_1^2} = \frac{303}{1+0.2(0.203)^2} = 301K$$

$$a_1 = \sqrt{\gamma R T_1} = \left[1.4(287)(301)\right]^{1/2} = 348 m/s$$

$$V_1 = M_1 a_1 = (0.202)(348 m/s) = 70 m/s$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{150000}{(287)(301)} = 1.74 kg/m^3$$

Finalement, le nouveau débit massique baissé d'écoulement par unité de surface est

$$\frac{\dot{m}_{nouv}}{A} = \rho_1 V_1 = (1.74 kg/m^3)(70 m/s) = 122 kg/(s.m^2)$$

C'est 7% moins que dans l'Exemple 9.14, dû à la suffocation par l'excès d'addition de chaleur.