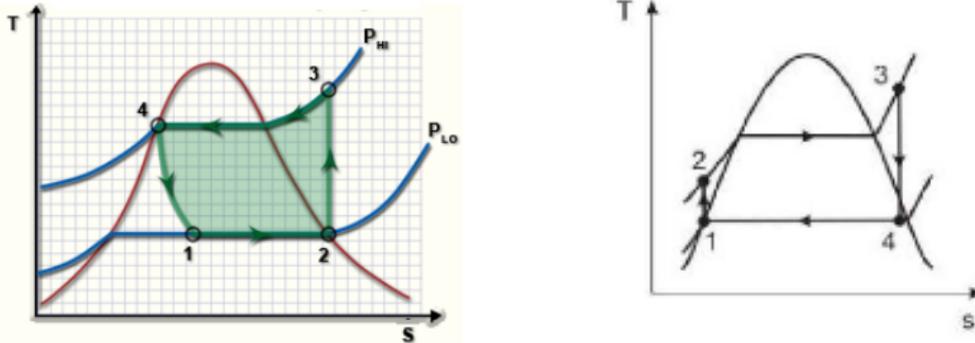


Application directe du cours

Exercice 1 Moteur ou récepteur ?

1 ) Pour un cycle réversible, quel est le lien entre  $q_{\text{cycle}}$  (transfert thermique massique reçu par le fluide) et  $A_{\text{cycle}}$  (aire du cycle dans un diagramme (T,s)) ?

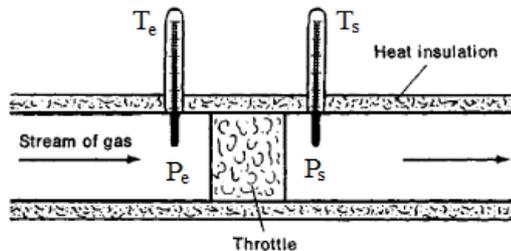
2 ) Pour les deux cycles ci-dessous, indiquer le signe de  $q_{\text{cycle}}$  et de  $w_{\text{cycle}}$  (travail massique reçu par le fluide). En déduire s'il s'agit d'un cycle moteur ou récepteur.



3 ) Pour chacun des cycles, indiquer le signe de  $q_C$  et  $q_F$  (transferts thermiques massiques échangés avec la source froide et la source chaude).

Exercice 2 Détente de Joule-Thomson

La détente de Joule-Thomson est une transformation idéale, souvent utilisée pour modéliser le fonctionnement d'un détendeur réel. Un fluide s'écoule avec une vitesse négligeable dans une canalisation horizontale calorifugée, sans pièces mobiles, qui présente un obstacle poreux. Cet obstacle provoque une diminution de la pression sans modifier notablement la vitesse du fluide.



1 ) Ecrire le premier principe "industriel" puis simplifier en tenant compte des hypothèses effectuées. Pourquoi qualifie-t-on cette détente d'*isenthalpique* ?

On s'intéresse d'abord au cas particulier d'un **gaz parfait**.

2.a) Quelle est la relation entre la variation d'enthalpie massique  $\Delta h$  et la variation de température  $\Delta T$  pour un gaz parfait ? En déduire si l'on a  $T_s < T_e$ ,  $T_s > T_e$  ou  $T_s = T_e$  à la sortie du détendeur pour un gaz parfait.

2.b) Exprimer la variation d'entropie massique  $\Delta s$  du gaz parfait au cours de la détente en fonction de  $P_s$  et  $P_e$ .

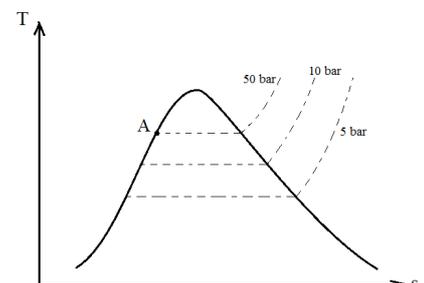
*Aide* entropie massique d'un gaz parfait :  $s(T, P) = s(T_0, P_0) + c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - \frac{R}{M} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$

2.c) Montrer que la détente de Joule-Thomson d'un gaz parfait est irréversible.

On s'intéresse désormais à un **fluide réel**, décrit par son diagramme (T,s).

3.a) Pour le fluide associé au point A du diagramme, représenter l'allure d'une détente de Joule-Thomson (isenthalpique) pour une pression finale de 5 bar. Sous quelle forme le fluide se trouve-t-il à la fin de cette détente ?

3.b) Justifier graphiquement que pour un fluide réel, la détente de Joule-Thomson est irréversible.



**Exercice 3** Convecteur dans un chauffage central

Un convecteur (improprement appelé "radiateur") en fonte est traversé par de l'eau liquide s'écoulant avec un débit de 30 L/h. On mesure pour l'eau les températures  $T_1 = 60^\circ\text{C}$  à l'entrée et  $T_2 = 30^\circ\text{C}$  à la sortie.

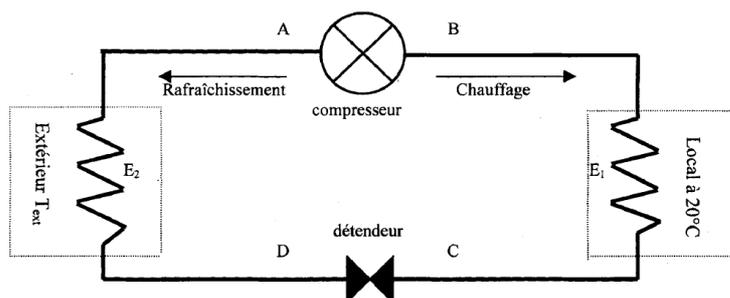
Données  $c_{\text{eau}} = 4,2. \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$   $\mu_{\text{eau}} = 1,0.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

- 1 ) Calculer le transfert thermique massique  $q$  reçu par l'eau lors de la traversée du convecteur.
- 2 ) En déduire la puissance thermique  $P_{\text{ch}}$  apportée à l'air contenu dans la pièce à chauffer.

**Exercice 4** Etude d'une pompe à chaleur

La pompe à chaleur étudiée ici a pour rôle de maintenir la température d'un local à  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  toute l'année. On s'intéresse ici à son fonctionnement en hiver (chauffage), avec  $T_{\text{ext}} = 0^\circ\text{C}$ , et on considère que le régime permanent est atteint. Le fluide caloporteur est l'ammoniac, son diagramme (T,s) est fourni en annexe ; on indique les pressions de vapeur saturante de  $\text{NH}_3$  pour les deux températures :  $P_{\text{sat}}(0^\circ\text{C}) = 4,3 \text{ bar}$  et  $P_{\text{sat}}(20^\circ\text{C}) = 8,2 \text{ bar}$ .

Le circuit comporte deux parties isobares : côté local (entre B et C), la pression est égale à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $20^\circ\text{C}$ . Côté extérieur (entre D et A), la pression est égale à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $0^\circ\text{C}$ . Dans toute la suite, on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur.



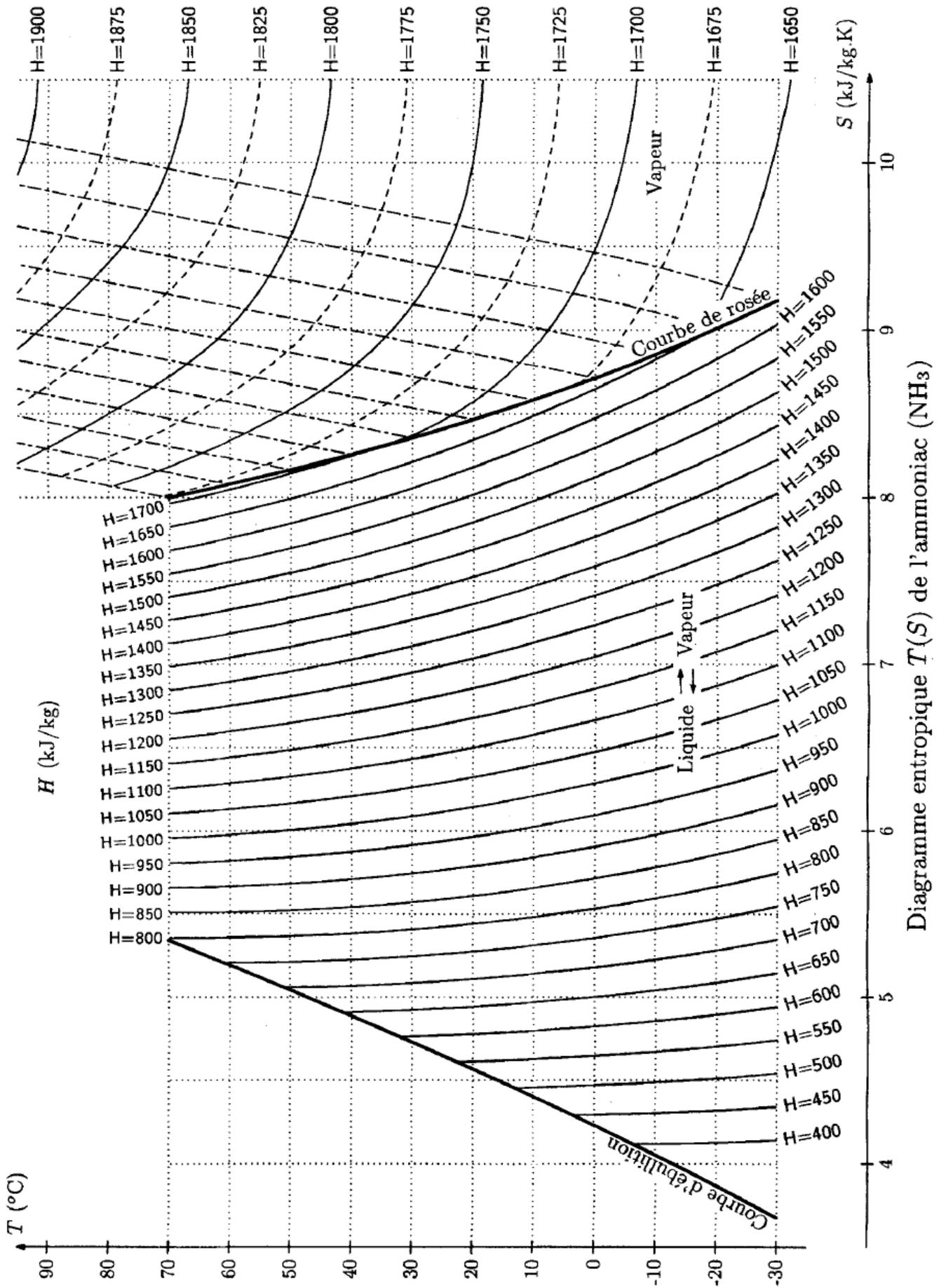
L'échangeur  $E_1$  est un condenseur ; l'ammoniac y entre en B sous forme de vapeur sèche et en sort en C sous forme de liquide saturant à  $T_0$ .  $E_1$  ne présente pas de pièces mécaniques mobiles, on note  $q_1$  le transfert thermique massique reçu par le fluide dans  $E_1$ .

L'échangeur  $E_2$  est un évaporateur : le mélange liquide-vapeur qui entre en D se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante en A à  $T_{\text{ext}}$ .  $E_2$  ne présente pas de pièces mécaniques mobiles. On note  $q_2$  le transfert thermique massique reçu par le fluide dans  $E_2$ .

Le compresseur est calorifugé, on considère qu'il fonctionne de façon réversible. Le travail massique indiqué reçu par le fluide dans le compresseur est noté  $w_c$ .

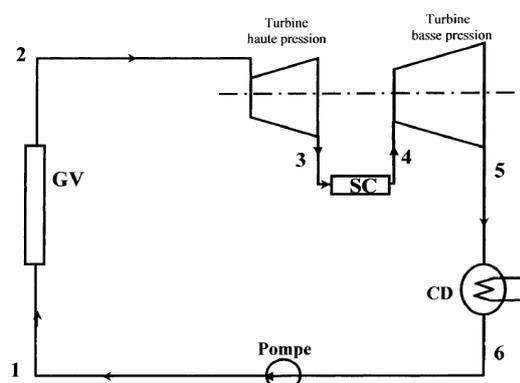
Le détendeur est calorifugé et ne présente pas de pièces mécaniques mobiles.

- 1 ) Sur le diagramme (T,s), représenter (ou surligner) les isobares correspondant à  $P_{\text{sat}}(0^\circ\text{C})$  et à  $P_{\text{sat}}(20^\circ\text{C})$  dans la partie vapeur sèche et dans la partie liquide-vapeur.
- 2 ) En appliquant le premier principe au détendeur, montrer que  $h_D = h_C$ . En appliquant le second principe au compresseur, montrer que  $s_B = s_A$ .
- 3 ) Placer les états A, B, C et D sur le diagramme. Déterminer graphiquement  $T_B$  (température de l'ammoniac à la sortie du compresseur).
- 4 ) En appliquant le premier principe aux transformations  $A \Rightarrow B$ ,  $B \Rightarrow C$  et  $D \Rightarrow A$ , déterminer  $q_1$ ,  $q_2$  et  $w_c$  à l'aide du diagramme. Existe-t-il une relation simple entre ces trois grandeurs ?
- 5 ) Définir et calculer numériquement l'efficacité de cette pompe à chaleur.



**Exercice 5** Etude du circuit secondaire d'une centrale nucléaire

Le cycle subi par l'eau dans une centrale nucléaire, décrit ci-dessous, est une variante améliorée du cycle de Rankine. Le diagramme entropique de l'eau et un extrait d'une table thermodynamique sont fournis en annexe.



- À la sortie du condenseur (point 6), l'eau, à l'état de liquide saturant sous une pression de 0,05 bar, est comprimée isentropiquement par la pompe jusqu'à  $P_1 = 74$  bar (point 1) ; le travail apporté par la pompe à l'eau, qui reste à l'état liquide, est négligeable.
- Dans le générateur de vapeur (GV), l'eau liquide subit, au contact thermique du circuit primaire, un réchauffement isobare jusqu'à la température de  $290^\circ\text{C}$ , puis se transforme, toujours à la pression  $P_1$ , en vapeur saturante sèche à la température de  $290^\circ\text{C}$  (point 2).
- La vapeur subit ensuite une première détente adiabatique réversible dans la turbine haute pression jusqu'à  $P_3 = 11$  bars et  $T_3 = 185^\circ\text{C}$  (point 3).
- La vapeur humide (système diphasé) est ensuite séchée et surchauffée à pression  $P_3$  constante jusqu'au point 4 (vapeur sèche à la température  $T_4 = 267^\circ\text{C}$ ). On suppose que la puissance thermique reçue dans le surchauffeur (noté SC sur le schéma précédent) par l'eau provient également du circuit primaire.
- Puis la vapeur subit une deuxième détente adiabatique réversible dans la turbine basse pression -jusqu'au point 5 (mélange liquide-vapeur à la pression  $P_5 = 0,05$  bar).
- Enfin la vapeur se condense de façon isotherme-isobare au contact du circuit de refroidissement (condenseur CD sur le schéma) : transformation 5 – 6.

- 1 ) Représenter l'allure du cycle sur le diagramme (le point 1 sera placé de façon approximative).
- 2 ) Uniquement par le calcul (sans aucune lecture graphique, pour plus de précision), compléter le tableau ci-dessous en s'aidant des données du tableau fourni sur l'annexe.

points	P (bar)	T ( $^\circ\text{C}$ )	s	h	x
2					
3					
4	11	267	7,0123	2859	-----
5					
6					

$h$  : enthalpie massique en  $\text{kJ.kg}^{-1}$  ;  $s$  : entropie massique en  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;  $x$  : titre massique en vapeur .

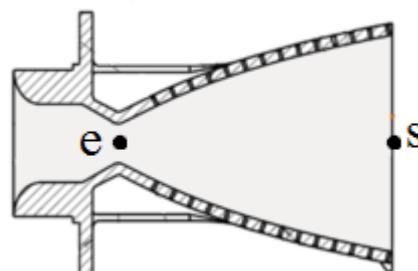
On cherche à limiter à 15% le taux d'humidité (titre massique en **liquide** lorsque le fluide est diphasé) dans les turbines pour éviter la corrosion des parties métalliques.

- 3 ) Cette limite est-elle respectée à la sortie des deux corps de turbines ?
- 4 ) Quelle serait la valeur du taux d'humidité en sortie de turbine en l'absence de surchauffeur ? Conclure sur l'intérêt de la surchauffe.



**Exercice 6** Tuyère

On étudie l'écoulement stationnaire d'un gaz dans une tuyère horizontale calorifugée (schéma) ne comportant pas de pièces mobiles. On assimile le gaz à un gaz parfait de coefficient isentropique  $\gamma = 1,4$  et de masse molaire  $M = 30 \text{ g.mol}^{-1}$ . La vitesse du gaz à l'entrée de la tuyère est négligeable.

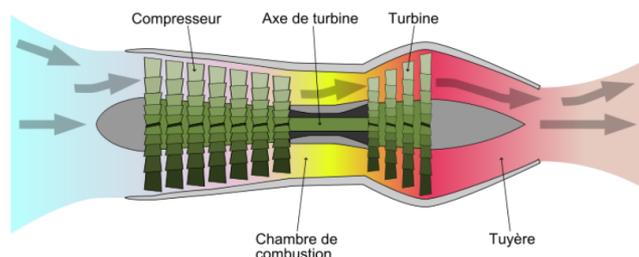


Données :

- température du gaz à l'entrée :  $T_0 = 1350^\circ\text{C}$
- température du gaz en sortie :  $T_1 = 400^\circ\text{C}$
- pression en sortie :  $P_1 = 1 \text{ bar}$

- 1 ) Rappeler (ou retrouver) l'expression de  $C_p$  (capacité thermique à pression constante) en fonction de  $n$ ,  $R$  et  $\gamma$  pour un gaz parfait.
- 2 ) En déduire la valeur numérique de  $c_p$  (capacité thermique massique à pression constante) pour le gaz étudié, puis calculer la variation  $\Delta h = h_s - h_e$  de l'enthalpie massique du gaz.
- 3 ) En appliquant le premier principe industriel, calculer la vitesse du gaz à la sortie de la tuyère.
- 4 ) En supposant que la transformation subie par le gaz est réversible, calculer la pression  $P_0$  du gaz à l'entrée.
- 5 ) Un étudiant propose le raisonnement suivant : "Entre e et s la section de l'écoulement augmente donc les lignes de courant s'écartent, donc la vitesse en sortie doit être plus faible qu'en entrée." Quelle erreur a-t-il commise ?

**Exercice 7** Compresseur



On étudie ici un compresseur, qui constitue l'un des organes principaux d'un turbopropulseur. L'air pénètre dans le compresseur à  $T_0 = 7^\circ\text{C}$  et  $P_0 = 1,0 \text{ bar}$ . A la sortie du compresseur, la pression de l'air est  $P_1 = 10 P_0$ . On néglige les transferts thermiques avec l'extérieur. Le débit de cet écoulement stationnaire est de  $50 \text{ kg.s}^{-1}$ .

Données :

Pour l'air (assimilé à un gaz parfait diatomique) :  $M = 29,0 \text{ g.mol}^{-1}$        $\gamma = 1,4$        $c_p = 1,0.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

On fait tout d'abord l'hypothèse d'un fonctionnement réversible.

- 1 ) Calculer la température de sortie  $T_{1,\text{rév}}$  dans cette hypothèse.
- 2 ) Grâce au premier principe, calculer le travail indiqué massique  $w_{i,\text{rév}}$  reçu par le fluide (on négligera les variations d'énergie cinétique).

En pratique, le fonctionnement du compresseur n'est pas réversible ; on définit le rendement adiabatique  $\eta$  comme le rapport entre le travail indiqué réellement reçu par le fluide et le travail indiqué théorique calculé

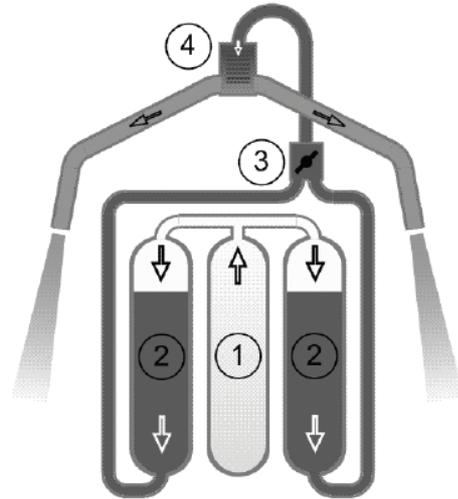
pour un fonctionnement réversible :  $\eta = \frac{w_{i,\text{réel}}}{w_{i,\text{rév}}}$  . Pour ce compresseur,  $\eta = 80\%$

- 3 ) Déterminer la température réelle  $T_{1,\text{réelle}}$  de l'air à la sortie du compresseur.
- 4 ) Calculer la puissance fournie par le compresseur au fluide.
- 5 ) Pourquoi les données indiquent-elles le débit massique de l'écoulement, et pas le débit volumique ?

**Exercice 8** Propulseur à eau oxygénée



1 Photo extraite du film *Thunderball* de Terence Young



2 Schéma, issu de l'article anglais *Bell Rocket Belt* de wikipedia.org

La *rocketbelt* de James Bond

Dans certains films (figure 1), les personnages utilisent des ceintures fusées (ou *rocketbelts* en anglais) pour se déplacer. Ces ceintures utilisent une solution concentrée d'eau oxygénée comme carburant.

**Document 1 – Description et caractéristiques réelles**

La figure 2 schématise une ceinture fusée et distingue quatre éléments constitutifs principaux. Lorsque la valve régulatrice 3 est ouverte, le diazote  $N_{2(g)}$  gazeux, comprimé à  $P_i = 35,0$  bar dans la bouteille 1, chasse l'eau oxygénée  $H_2O_{2(l)}$ , concentrée à 90 % en masse, contenue dans les bouteilles 2. Un catalyseur 4 (une grille d'argent  $Ag_{(s)}$  solide) accélère la décomposition de l'eau oxygénée selon la réaction totale



On rappelle que cette réaction est lente en l'absence de catalyseur.

La décomposition de la solution concentrée d'eau oxygénée produit des gaz à haute température ( $T_c = 1\,350$  °C). Ces gaz passent dans une tuyère calorifugée où ils sont accélérés par détente et refroidissement jusqu'à une température  $T_f = 400$  °C. Étant donné la dimension de la ceinture fusée, la variation d'énergie potentielle de pesanteur des gaz est négligeable par rapport à la variation de leur énergie cinétique.

Chacune des deux bouteilles 2 (figure 2) contient initialement un volume  $V_{H_2O_2} = 19,0$  L d'eau oxygénée. La puissance mécanique développée par une ceinture fusée est  $\mathcal{P} = 1\,500$  ch (soit 1,10 MW) pendant une durée  $\Delta t = 21,0$  s. Elle permet au pilote d'atteindre une vitesse approchant  $v_{pilote} = 15,0$  m.s<sup>-1</sup>.

Document 2 – Hypothèse simplificatrice et données thermodynamiques

On considèrera que l'eau oxygénée utilisée est pure et introduite à  $T_i = 25,0$  °C. À cette température, elle est liquide et sa masse volumique est  $\mu_{\text{H}_2\text{O}_2} = 1,44 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Dans les conditions imposées par la ceinture fusée, on donne les enthalpies standard de formation  $\Delta_f H^\circ$  et les capacités thermique molaires à pression constante  $C_{P,m}$  suivantes (toutes les grandeurs sont supposées indépendantes de la température) :

Espèce chimique	H <sub>2</sub> O <sub>2(l)</sub>	O <sub>2(g)</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>
$\Delta_f H^\circ$ en kJ.mol <sup>-1</sup>	-187		-285
$C_{P,m}$ en J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>		29,4	64,6

On rappelle les masses molaires :

- de l'hydrogène  $M_H = 1,01 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;
- de l'oxygène  $M_O = 16,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

**a.** Exprimer et calculer numériquement l'enthalpie standard  $\Delta_r H^\circ(298 \text{ K})$  de la réaction (5) de décomposition de l'eau oxygénée à 298 K. Commenter qualitativement quant à la possibilité d'utiliser l'eau oxygénée comme carburant d'une ceinture fusée.

**b.** Construire le tableau d'avancement de la réaction (5), pour la décomposition d'une mole d'eau oxygénée.

**c.** On suppose que l'enthalpie  $\Delta_r H(T, P)$  de la réaction (5) est indépendante de la pression et de la température :  $\Delta_r H(T, P) = \Delta_r H^\circ(298 \text{ K})$ . Exprimer le transfert thermique molaire  $Q_m$  algébriquement fourni par la décomposition de l'eau oxygénée à la pression constante  $P_i = 35 \text{ bar}$  ; faire l'application numérique. En déduire la valeur numérique du transfert thermique massique  $q$  correspondant.

**d.** Quel est le rôle joué par le catalyseur ? Aurait-on pu ne pas l'utiliser ? Justifier.

**e.** Rappeler l'énoncé du premier principe de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire unidimensionnel d'un système à une entrée et une sortie. Expliquer alors qualitativement pourquoi le passage des gaz de combustion dans la tuyère provoque leur accélération.

**f.** Quelle relation la vitesse de sortie maximale  $v_{\text{gaz,max}}$  des gaz vérifie-t-elle alors ?

**g.** Compte-tenu de la variation de température des gaz lors de leur passage dans la tuyère et en utilisant la relation précédente, déterminer la valeur numérique de la vitesse des gaz  $v_{\text{gaz,max}}$  en sortie de la tuyère.

**h.** Justifier que le rendement de cette ceinture fusée puisse s'écrire

$$\eta = \frac{v_{\text{gaz}}^2}{2q} \quad (6)$$

Calculer numériquement le rendement maximal  $\eta_{\text{max}}$ . Commenter.

Pour répondre aux deux questions suivantes, on utilisera toutes les données numériques disponibles (données dans les documents ou calculées dans les questions précédentes). On s'attachera à justifier les réponses par un raisonnement dont les étapes seront clairement détaillées.

**i.** Évaluer numériquement la puissance thermique  $\mathcal{P}_{\text{th}}$  fournie par la décomposition de l'eau oxygé dans la ceinture fusée dont les caractéristiques sont données dans le document 1 (page 8).

**j.** En déduire la valeur numérique du rendement réel  $\eta_{\text{réel}} = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{\text{th}}}$  de cette ceinture fusée. Le comparer au rendement maximal  $\eta_{\text{max}}$  calculé précédemment ; comment peut-on expliquer la différence ?