

Air humide et conditionnement

BTS Productique bois 2003

Dans cet problème, on s'intéresse au système de chauffage d'un séchoir haute température représenté en annexe. La source de chaleur est un brûleur à gaz, à flamme directe. Le gaz utilisé est du propane. La flamme est en contact direct avec l'air qui circule à travers les piles de bois.

Le mélange carburant - comburant (propane- oxygène) est réalisé grâce à un ventilateur centrifuge. Les deux autres ventilateurs assurent la circulation de l'air à travers les piles de bois.

Caractéristique du séchoir

- capacité de séchage : 27 m^3 de bois

Caractéristiques du brûleur

- puissance thermique $P_{th} = 700 \text{ kW}$
- rendement énergétique $r = 87,5$

Temps de séchage.

On veut sécher 27 m^3 de pin maritime duquel il faut retirer 11 tonnes d'eau.

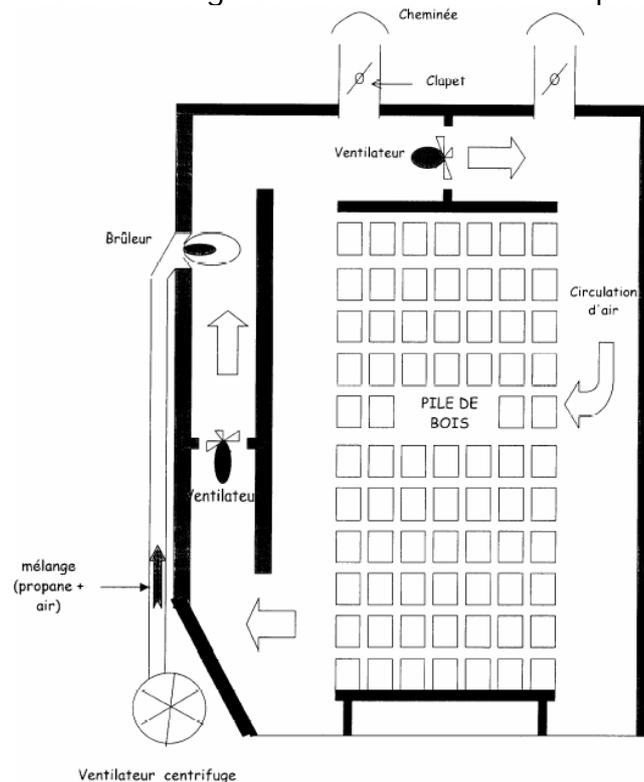
On ne tient pas compte ici de la phase de préchauffage qui a permis de chauffer le bois de la température ambiante jusqu'à 100°C .

On part donc du bois humide à 100°C . L'eau se vaporise à 100°C . Sa chaleur latente de vaporisation est L_v .

On donne : $L_v = 2260 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1. Calculez l'énergie calorifique Q_{27} nécessaire pour sécher les 27 m^3 de pin. Exprimez le résultat en mégajoules.
2. Calculez le temps de séchage des 27 m^3 de pin.

Système de chauffage d'un séchoir haute température



BTS Economie Sociale et Familiale 2000

Etude de fer à repasser

1. Chauffage de l'eau du réservoir

Sous une pression de 3 bars, la température de vaporisation de l'eau est de 132°C .

- 1.1. Calculer la quantité de chaleur Q_1 nécessaire à l'échauffement d'1,5 litre d'eau liquide de 20°C à 132°C .

- 1.2. Déterminer la quantité de chaleur Q_2 nécessaire à la vaporisation de cette eau.
- 1.3. L'énergie électrique consommée est de 1,4 kWh. Calculer le rendement de l'appareil.

2. Caractéristiques hygrométriques de l'air ambiant

La pièce fermée dans laquelle on effectue le repassage a pour dimensions $3\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2,50\text{ m}$, la température de l'air ambiant est de 20°C et l'humidité relative de l'atmosphère de la pièce est de 50%.

- 2.1. Définir : « humidité relative de l'atmosphère ».
- 2.2. A l'aide des données
 - déterminer la masse d'air sec contenu dans la pièce,
 - déduire la masse de vapeur d'eau qui entraînera la saturation de l'atmosphère de ce local.
- 2.3. Donner la valeur de l'humidité relative après deux heures de repassage qui auront libéré dans la pièce une masse de vapeur d'eau égale à 1,5 kg.

Données

- Température de l'air dans la pièce:	$\theta_{\text{air}} = 20^\circ\text{C}$
- Température de l'eau stockée dans la pièce :	$\theta_{\text{eau}} = 20^\circ\text{C}$
- Masse volumique de l'eau à 20°C :	$\rho_e = 1,0\text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$
- Masse volumique de l'air à 20°C :	$\rho_a = 1,2\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Masse de vapeur d'eau saturante à 20°C (pour 1 kg d'air)	$m_s = 14,7\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Capacité thermique massique de l'eau:	$c_{\text{eau}} = 4,18\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Chaleur latente de vaporisation de l'eau :	$L_v = 2260\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

BTS Domotique 1991

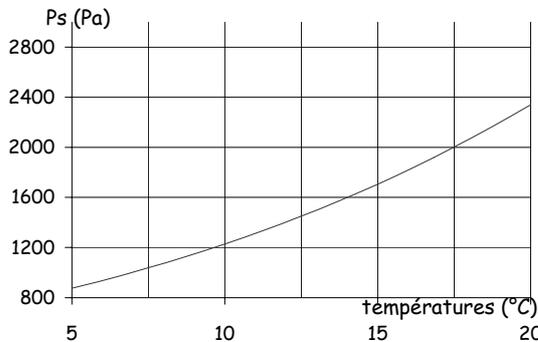
On considère une baie vitrée de surface $S = 10\text{ m}^2$, qui sépare un appartement où la température est $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, de l'extérieur où la température est $\theta_o = -10^\circ\text{C}$.

On utilise un double vitrage constitué par un ensemble de 2 glaces de 5 mm d'épaisseur, séparées par une lame d'air de 12 mm.

La température de la face interne du vitrage est $\theta = 10^\circ\text{C}$

Un hygromètre placé dans la pièce indique 46 % d'humidité relative, (h_r) quelle est la valeur du point de rosée ? Se produit-il une condensation sur le vitrage ?

Donnée

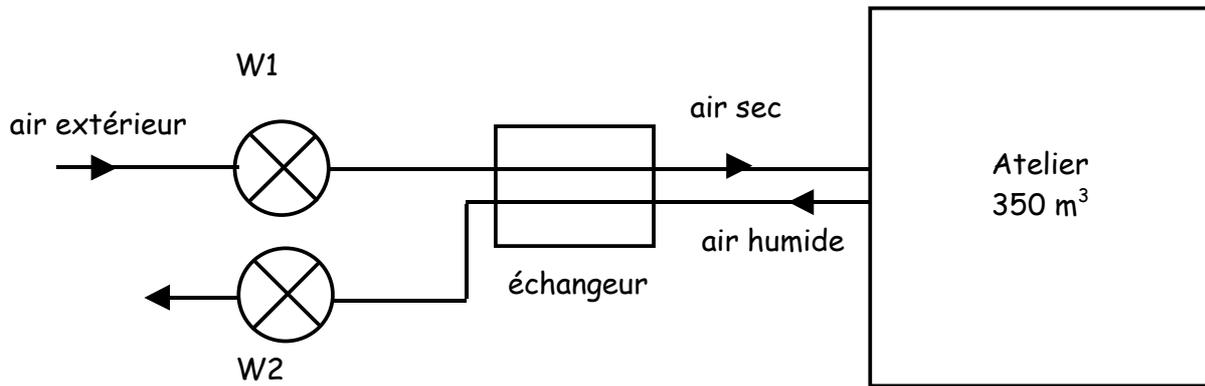


Pression de vapeur saturante de l'eau (Pascal) : p_s

On rappelle que $h_r = \frac{\text{pression de vapeur saturante au point de rosée}}{\text{pression de vapeur saturante à la température ambiante}}$

BTS Techniques Physiques pour l'Industrie et le Laboratoire 2001

L'objet du problème est l'étude du contrôle de l'humidité de l'air dans un atelier de fabrication de tapis synthétiques. L'humidité doit être maintenue constante pour assurer la régularité de la fabrication. L'installation est schématisée sur la figure ci-dessous.



W1 et W2 ventilateurs

On prendra $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (constante des gaz parfaits).

Dans cette partie on étudie l'hygrométrie de l'air contenu dans l'atelier, de volume 350 m^3 .

- Quels sont les deux principaux gaz entrant dans la composition de l'air sec ?
Dans la suite du problème ce mélange est considéré comme un corps pur de masse molaire $M_{\text{air}} = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- A l'intérieur de l'atelier la température de $\theta_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$, la pression est $p = 101,3 \text{ kPa}$.
 - Dans un premier temps on suppose que l'atmosphère de l'atelier ne contient que de l'air sec, considéré comme un gaz parfait.
Donner l'expression littérale et numérique de la masse m_{sec} de cet air.
 - Dans un deuxième temps on tient compte de l'humidité.
L'air humide est considéré comme un mélange idéal de gaz parfaits, le premier est l'air sec de masse molaire M_{air} et le deuxième est la vapeur d'eau de masse molaire $M_{\text{eau}} = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
On définit l'humidité relative H_r (ou degré hygrométrique) par $H_r = \frac{p_v}{p_s}$ où p_v est la pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange et p_s la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température.
On donne la pression de vapeur saturante de l'eau à $21 \text{ }^\circ\text{C}$: $p_s = 2,505 \text{ kPa}$.
Sachant que l'humidité relative de l'atelier est $H_r = 0,4$, calculer littéralement puis numériquement
 - Les pressions partielles de la vapeur d'eau p_v et de l'air sec p_a
 - Les masses de vapeur d'eau m_v et d'air sec m_a .
 - La masse d'air humide m_{humide} dans l'atelier.

- Durant la nuit, l'atelier n'étant plus chauffé, la température intérieure descend à $\theta_2 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, la pression restant constante.
On donne la pression de vapeur saturante de l'eau à $5 \text{ }^\circ\text{C}$: $p'_s = 0,8721 \text{ kPa}$.
 - Si toute l'eau restait sous forme de vapeur, quelle serait la pression p'_v de la vapeur ?
 - En réalité la pression partielle de la vapeur d'eau ne peut pas dépasser la valeur p'_s et il y a donc condensation. Calculer la masse d'eau condensée m_e .
 - Quelle est alors l'humidité relative de l'atmosphère de l'atelier à cette température ?

BTS Bâtiment 1994

Les murs latéraux d'un local industriel maintenu à la température constante $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Le local dont le volume global est $V = 1600 \text{ m}^3$ contient de l'eau à l'état de vapeur.

On assimilera la vapeur d'eau à un gaz parfait de masse molaire $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

- On constate que la pression de la vapeur d'eau à l'intérieur du local est égale à $10,8 \text{ mm}$ de mercure. Déterminer la valeur de cette pression en unité internationale.
- Exprimer puis calculer la masse d'eau à l'état de vapeur contenue dans le local.

Données:

- masse volumique du mercure $\rho = 13600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
- constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

BTS Industries céramiques 2003

Un fabricant commercialise de la faïence préparée par le procédé suivant :

Délaiage → filtre pressage → séchage → concassage

Séchage de galettes filtre-pressées

La masse des galettes filtre-pressées est de 1587 kg.

L'humidité moyenne des galettes est de 20% sur sec, à l'entrée du séchoir. On souhaite obtenir une humidité finale de 2% sur sec.

1. Ces galettes sont placées dans le séchoir, calculer la masse d'eau à évacuer.
2. L'air nécessaire au séchage des galettes est aspiré de l'extérieur par un ventilateur, passe par un réchauffeur d'air et est ainsi porté à une température plus élevée .
Cet air chaud traverse le séchoir, y absorbe l'eau et le quitte dans un certain état (air évacué).
La pression dans le séchoir est de 99000 Pa.

Etat de l'air	Température	Humidité relative
Air extérieur	19°C	0,7
Air chaud	90°C	
Air évacué	30°C	0,9

- 2.1. Calculer le pouvoir séchant de l'air. On rappelle la définition du pouvoir séchant de l'air : c'est la masse d'eau évacuée par unité de masse d'air sec utilisé dans le séchoir.
- 2.2. Calculer la masse d'air extérieur nécessaire au séchage des galettes.
- 2.3. Calculer la quantité d'énergie nécessaire au séchage d'une galette.

On supposera que c'est la quantité d'énergie nécessaire pour porter l'air de l'extérieur de 19°C à 90°C avec la même humidité absolue.

Données

Constante des gaz parfaits $R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Masse molaire de l'eau = 18 g mol^{-1}

Masse molaire de l'air = 29 g mol^{-1}

$$\text{Humidité absolue : } x = \frac{18}{29} \frac{\varepsilon \cdot p_{\text{VS}}}{p - \varepsilon \cdot p_{\text{VS}}}$$

- avec ε : humidité relative
- p_{VS} : pression vapeur saturante de l'eau
- p : pression totale

Pour une masse d'air sec de 1 kg, l'enthalpie de l'air humide est de la forme

$$\Delta H = C_{\text{air}} \cdot \Delta \theta + x \cdot (C_{\text{vapeur d'eau}} \cdot \Delta \theta + L_v) \text{ avec } \Delta \theta = \theta - \theta_0 \text{ et } \theta_0 = 0^\circ \text{C}$$

C_{air} : chaleur massique de l'air = $1,00 \text{ kJ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$C_{\text{vapeur d'eau}}$: chaleur massique de l'eau = $1,90 \text{ kJ kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

L_v : chaleur de vaporisation de l'eau à $0^\circ\text{C} = 2500 \text{ kJ kg}^{-1}$

Pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température

T (en °C)	p_s (en Pa)
19	2196
30	4241
90	70110

BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 2000**Etude du réfrigérant d'une centrale nucléaire (tranche 1450 MW)****Description des circuits**

L'ensemble des valeurs numériques nécessaires se trouve sur les schémas.

Dans le circuit secondaire, la vapeur produite par les générateurs entraîne la turbine. L'eau condensée est recyclée après passage dans des réchauffeurs.

La pression dans la partie secondaire des générateurs de vapeur ① est de 71 bar. L'eau peut ainsi bouillir au contact des tubes du générateur de vapeur, eux-mêmes parcourus par l'eau du circuit primaire. Elle en sort à l'état de vapeur saturée sèche.

La vapeur se détend dans la partie haute pression de la turbine ②. La détente de la vapeur en fait baisser la température. Des gouttelettes de condensation apparaissent. Il faut les séparer car leur impact à grande vitesse endommagerait aubes et directrices. Cette opération est faite à la sortie du corps haute pression, dans un « sécheur-surchauffeur » ③. La vapeur se détend ensuite dans les parties moyenne et basse pression de la turbine.

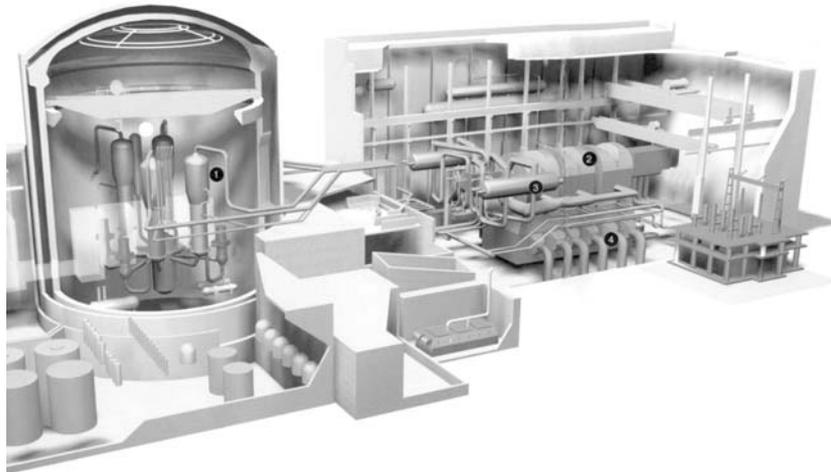
Des prélèvements de vapeur sont effectués à divers niveaux, pour réchauffer les flux retournant à la turbine.

A l'échappement de la turbine, la vapeur se condense sur les tubes du condenseur ④.

A la sortie du condenseur, l'eau du circuit secondaire est reprise par des pompes d'extraction, placées en contrebas du condenseur, au fond d'un puits de plus de 10 m de profondeur. D'autres pompes font monter la pression jusqu'à celle d'alimentation du générateur de vapeur.

L'eau de refroidissement du circuit secondaire est alors dirigée vers le réfrigérant atmosphérique (⑤) où elle est dispersée en fines gouttelettes en pluie face à un courant d'air ascendant. Une faible proportion de cette eau est évaporée, cédant ainsi de la chaleur à l'air.

La centrale nucléaire 1450 MW



① Générateur vapeur (x 4)

- hauteur : 21,90 m
- diamètre supérieur : 4,76 m
- diamètre inférieur : 3,70 m
- masse : 421 tonnes

② Turbine « Arabelle »

- longueur : 51,205 m
- largeur (hors tout) : 12,80 m
- masse : 2810 tonnes

③ Sécheur surchauffeur (x2)

- longueur : 24,80 m
- diamètre : 4,70 m
- masse : 370 tonnes
- température : 180°C
- pression : 10 bar

④ Condenseur

- longueur : 37,10 m
- largeur : 21,50 m
- hauteur : 15,49 m
- masse vide : 1893 tonnes
- nombre de tubes : 128856
- surface d'échange : 103227 m²
- débit eau refroidissement : 48,35 m³/s
- temp. entrée eau : 21,5°C
- temp. sortie eau : 35°C

Source : EdF (extraits de la brochure N4)

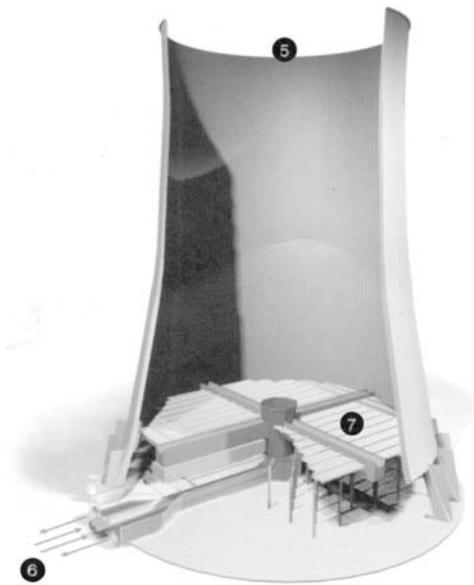
1 Les numéros font référence à l'éclaté de la centrale

Etude du réfrigérant atmosphérique

Données : masse volumique de l'eau liquide $\rho_{\text{eau}} = 1,0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

masse volumique de l'air à 18°C $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$

1. La chaleur enlevée au condenseur est évacuée dans le réfrigérant atmosphérique. Relever le pourcentage et le débit volumique d'eau évaporée. Quelle est le débit massique d'eau évaporée ?
2. Nous ferons l'hypothèse d'une arrivée d'air à 18°C et 30 % d'humidité relative. Cet air ressort à 34°C et 100 % d'humidité relative. Relever sur le diagramme psychrométrique les titres massiques en eau de l'air entrant et sortant. En déduire le débit massique de l'air nécessaire pour évacuer l'eau évaporée.
3. Relever sur le diagramme psychrométrique les enthalpies de l'air entrant et sortant, par kg d'air sec. En déduire la puissance évacuée par évaporation dans le réfrigérant atmosphérique.
4. Calculer le débit volumique de l'air entrant (en assimilant l'air entrant à de l'air sec). Déduire des caractéristiques géométriques du réfrigérant atmosphérique la vitesse de l'air entrant, en m s^{-1} et en km h^{-1} .



Le réfrigérant atmosphérique

⑤ Réfrigérant atmosphérique

- diamètre base coque : 134,45 m
- diamètre sortie : 87,83 m
- hauteur entrée d'air : 14,10 m
- hauteur totale : 172 m
- épaisseur de la coque de 1,71 m (base) à 0,27 m (sortie)

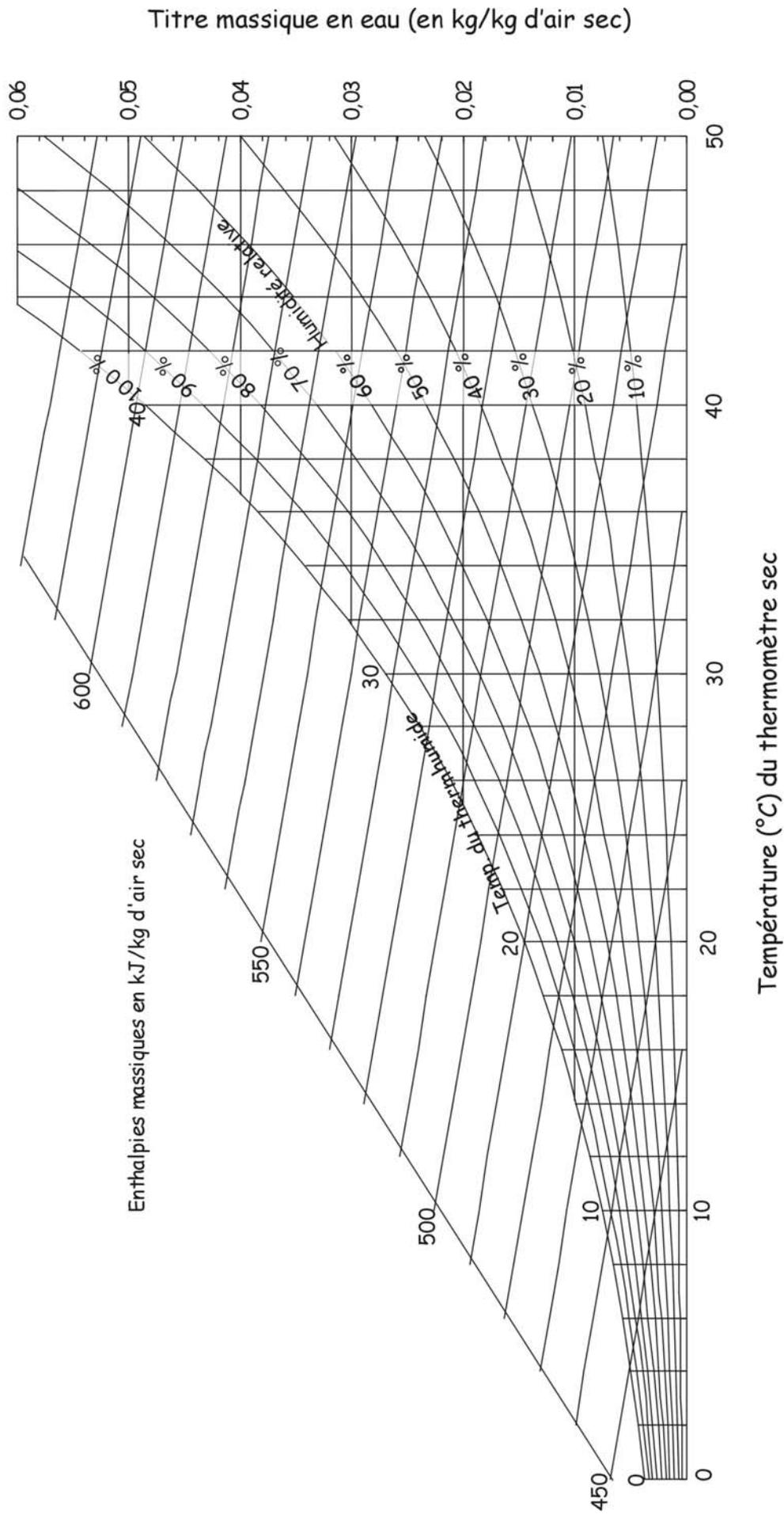
⑥ Entrée-sortie d'eau de refroidissement

⑦ Zone d'échange eau/air

- débit d'eau à refroidir : 174000 m^3/h (48,35 m^3/s)
- température d'eau chaude (entrée) : 35°C
- température d'eau refroidie (sortie) : 21,5°C
- perte par évaporation : 0,75 m^3/s (soit 1,5 %)

Source : EdF (extraits de la brochure N4)

Diagramme psychrométrique



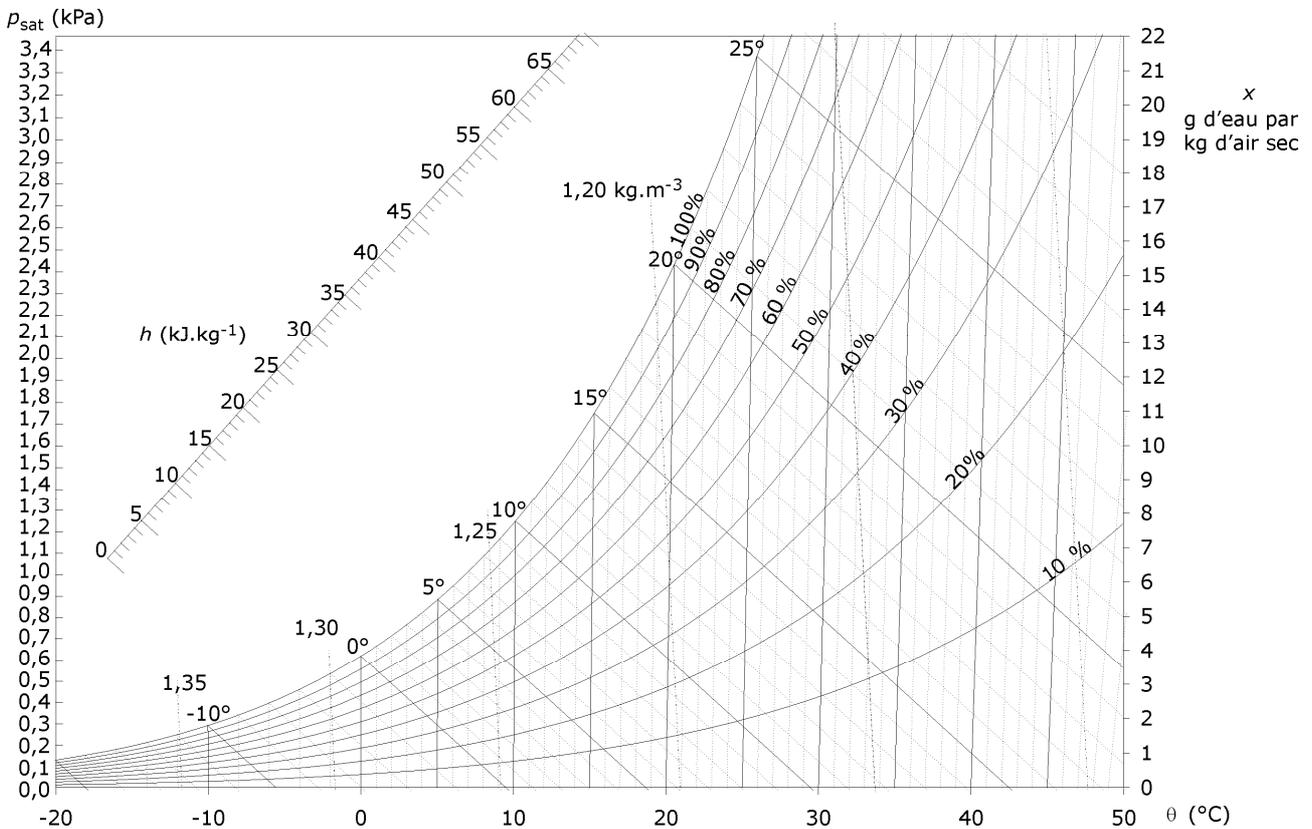
BTS Industries papetières 2004

Exploitation du diagramme de l'air humide

L'air d'un atelier contenant une machine à papier est renouvelé.

Il entre de l'air frais et relativement sec : $\theta_A = 10^\circ\text{C}$; humidité relative HR_A ou $\phi_A = 60\%$; pression atmosphérique normale (1013 mbar).

1. Situer cet état (A) sur le diagramme de l'air humide..
2. En déduire la masse de vapeur d'eau par kilogramme de cet air (humidité absolue HA_A ou teneur en eau x_A) et son humidité saturante HS_A à cette température.
3. Au contact de la machine à papier cet air se réchauffe et absorbe de la vapeur: sa température passe à $\theta_B = 26^\circ\text{C}$ et son humidité relative à $HR_B = 85\%$.
 - 3.1. Situer cet état (B)
 - 3.2. Quelle masse de vapeur d'eau aura absorbé 1 kg de cet air entre les états (A) et (B) ?
 - 3.3. Déduire du graphe la variation d'enthalpie de cet air entre ces deux états.
4. Cet air monte dans l'atelier et vient en contact avec les tôles du toit à $\theta_t = 10^\circ\text{C}$.
 - 4.1. En utilisant le diagramme montrer que le refroidissement de l'air au contact des tôles doit se traduire par un phénomène de condensation.
 - 4.2. A quelle température θ_c cette condensation commencera-t-elle ?
 - 4.3. Déterminer la masse d'eau condensée par kg d'air si la température de l'air chute jusqu'à $\theta_D = 15^\circ\text{C}$.



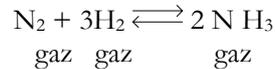
Dynamique des fluides compressibles

BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1988

Cette épreuve est composée d'un problème comportant deux parties.

Le document n°2 est à rendre avec la copie.

La synthèse du gaz ammoniac est réalisée dans un réacteur chimique. L'équation-bilan de la réaction est la suivante



Pour obtenir un bon rendement, on réalise cette synthèse sous pressions relativement élevées.

1. Dans cette partie, on négligera la vitesse de l'ammoniac dans le dispositif expérimental schématisé sur le document n°1, et on considère une masse d'ammoniac de un kilogramme.

1.1. L'ammoniac est produit avec un débit de 1500 kg h^{-1} . Il sort du réacteur à une température $t_1 = 150^\circ\text{C}$ et sous une pression $p_1 = 75 \text{ bar}$.

Il traverse alors une vanne, en effectuant une détente isenthalpique, qui amène sa pression à une valeur $p_2 = 25 \text{ bar}$.

1.1.1. Sur le diagramme de Mollier ci-joint (document n°2), placer le point A représentant l'état du gaz à la sortie du réacteur.

1.1.2. A l'aide de ce même diagramme placer le point B représentant l'état du gaz à la sortie de la vanne.

1.1.3. En déduire la température t_2 du gaz à cette sortie.

1.2. L'ammoniac traverse ensuite un réfrigérant dans lequel il est refroidi sous pression constante p_2 jusqu'à atteindre un taux de vapeur $x = 0,25$. Il est alors stocké dans un réservoir placé dans une grande enceinte pressurisée à une pression $p_{\text{ext}} = 6 \text{ bars}$, pour des raisons de sécurité, les rejets de l'ammoniac dans l'atmosphère étant interdits.

1.2.1. Placer le point C , représentant l'état du gaz à la sortie du réfrigérant sur le diagramme de Mollier. En déduire la température t de l'ammoniac dans le réservoir de stockage.

1.2.2. Toujours à l'aide du diagramme, calculer la quantité de chaleur cédée par l'ammoniac au réfrigérant, en kilojoules par kilogramme.

N.B. A chaque utilisation du diagramme de Mollier, il est demandé de justifier les réponses et les valeurs trouvées.

2. On a fixé sur le réservoir une soupape de sécurité qui doit permettre d'évacuer la totalité du débit d'ammoniac produit dans le réacteur, en cas d'incident. On peut assimiler cette soupape de sécurité à une tuyère convergente et considérer la détente dans la soupape comme isentropique.

A la suite d'un incident, l'ammoniac liquide s'est entièrement vaporisé dans le réservoir, sous la pression de 25 bars, et l'on est en présence de vapeur saturante d'ammoniac.

2.1. Quelle est la pression p_4 de l'ammoniac au col de la tuyère, après la détente ?

On rappelle l'expression de la pression critique p_c d'une vapeur au col d'une tuyère convergente :

$$p_c = p_r \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \text{ avec } p_r : \text{ pression dans le réservoir, } \gamma : \text{ rapport des capacités calorifiques massives}$$

respectivement à pression constante et à volume constant. On prendra $\gamma = 1,30$.

En déduire la température t_4 au col de la tuyère.

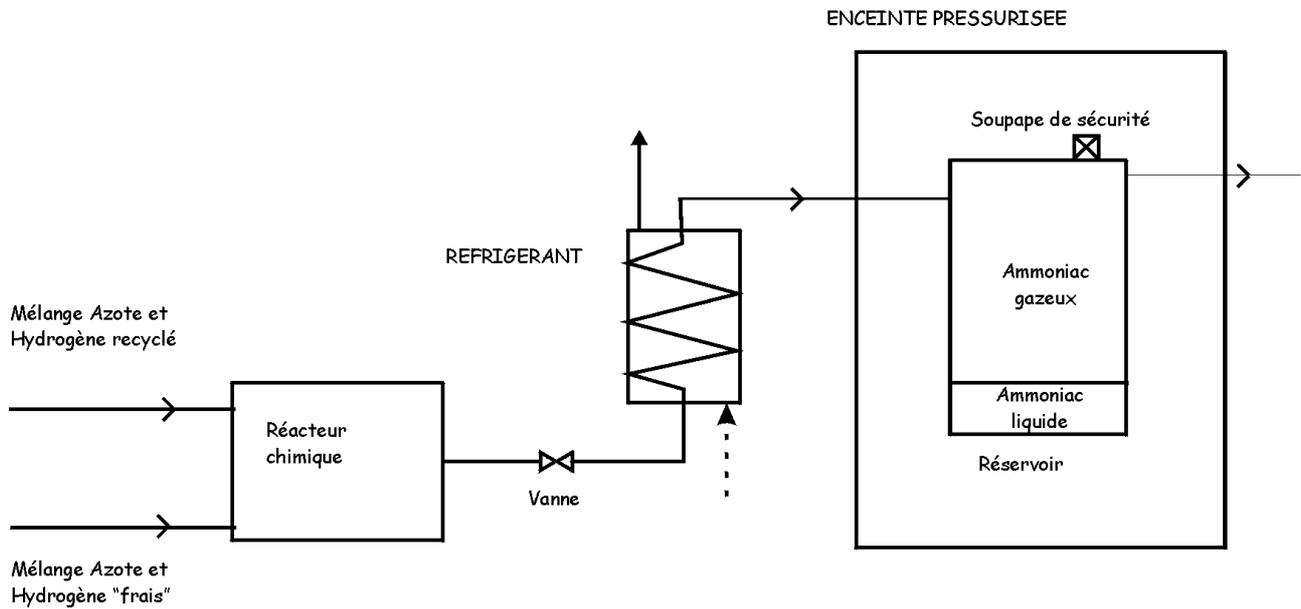
2.2. Calculer, à l'aide du diagramme de Mollier, la masse volumique de l'ammoniac au niveau du col.

2.3. Calculer la vitesse de l'ammoniac au niveau du col. (on négligera la vitesse de l'ammoniac gazeux dans le réservoir). On utilisera l'équation de conservation de l'énergie (théorème de Barré de St Venant).

2.4. En déduire la section du col de la tuyère.

DOCUMENT N°1

SCHEMA DE PRINCIPE SIMPLIFIE D'UNE INSTALLATION DE PRODUCTION D'AMMONIAC



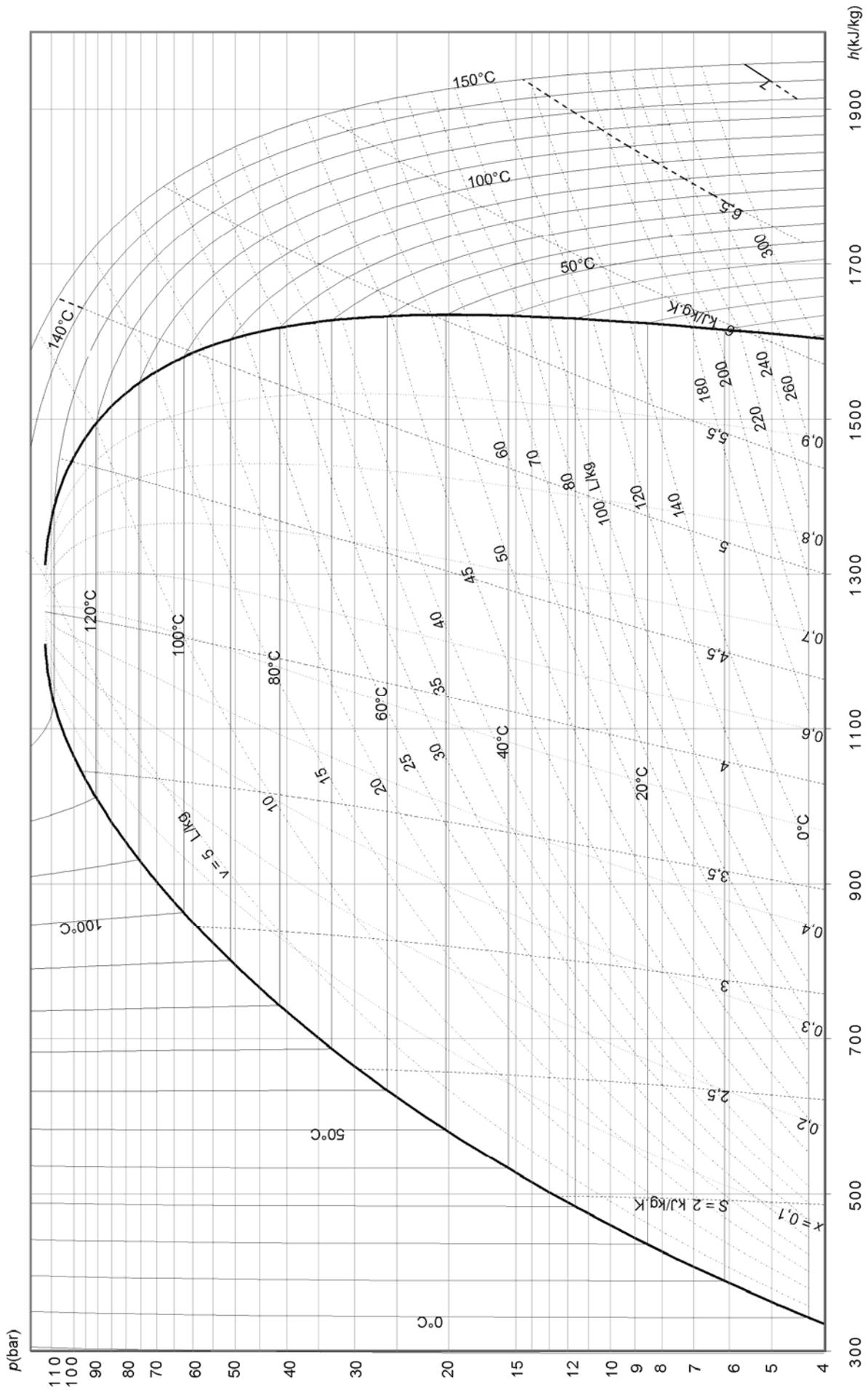


Diagramme de l'ammoniac

BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1990

L'air qui pénètre dans un turboréacteur (voir figure) subit une compression (dans le compresseur), puis passe dans la chambre de combustion où est injecté le combustible (kérosène). Les gaz brûlés se détendent dans la turbine (qui entraîne le compresseur), puis dans la tuyère,

On admet qu'il n'y a pas de différence notable, du point de vue thermodynamique, entre l'air aspiré et les gaz rejetés par le réacteur (la combustion s'effectue toujours avec un excès d'air important et on peut négliger la masse du carburant injecté devant celle de l'air),

On raisonne donc sur de l'air assimilé à un gaz parfait décrivant le cycle théorique de Joule suivant :

- 1 → 2 compression isentropique, $T_1 = 300 \text{ K}$; $p_1 = 1 \text{ bar}$; $p_2 = 5 \text{ bar}$
- 2 → 3 combustion isobare, $T_3 = 1080 \text{ K}$
- 3 → 5 détente isentropique dans la turbine (3 → 4), puis dans la tuyère (4 → 5)
- 5 → 1 transformation isobare "de retour",

On suppose que le réacteur- est au banc d'essai, donc fixe, et on néglige toutes les vitesses hormis la vitesse d'éjection C_5 au niveau de la tuyère,

On prendra : $\gamma = c_p/c_v = 1,4$

1. Donner l'allure du cycle sur les diagrammes (p, v) et (T, S) ,
2. Calculer les températures T_2 et T_5 ,
- 3.

3.1. Calculer le rendement thermodynamique du cycle en fonction des températures T_1, T_2, T_3, T_5 .

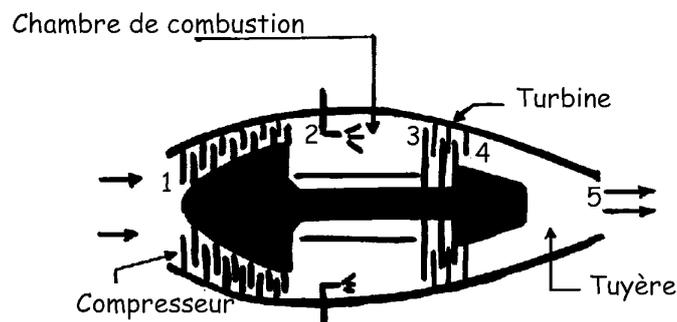
3.2. Application numérique,

Dans le compresseur et la turbine, ont lieu des transformations thermodynamiques dites "avec transvasement" : le fluide pénètre dans la machine, échange avec elle du travail et de la chaleur, puis quitte le dispositif,

On peut montrer que, pour le compresseur (transformation 1→2), la variation d'enthalpie massique de l'air peut s'écrire : $\Delta h_{12} = h_2 - h_1 = w_c + q_c$

De même, pour la turbine (transformation 3→4), on écrira à $\Delta h_{34} = h_4 - h_3 = w_T + w_T$

4. Calculer le travail w_c fourni par les aubages du compresseur à l'unité de masse du fluide,
5. En admettant que le compresseur restitue exactement le travail que lui a fourni la turbine, calculer l'enthalpie massique h_4 de l'air dans l'état 4 et sa pression p_4 ,
6. En appliquant à la tuyère l'équation de conservation de l'énergie pour les écoulements isentropiques, calculer la vitesse c_5 d'éjection des gaz brûlés,
7. Le théorème des quantités de mouvement appliqué au système air- turboréacteur, permet de montrer que la poussée du réacteur peut s'écrire $F = q_m c_5$, q_m étant le débit massique de l'air. Calculer F pour $q_m = 40 \text{ kg.s}^{-1}$
8. Pour accroître la poussée, on peut injecter du kérosène dans le gaz d'échappement pour une nouvelle combustion utilisant l'oxygène encore disponible (postcombustion). Si, dans ces nouvelles conditions, on atteint une température $T_4 = 1680 \text{ K}$, quelle sera la nouvelle poussée du réacteur ?
(pour cette question on prendra $c_p = 1,1 \text{ kJ.kg}^{-1}$,



Propriétés de l'air

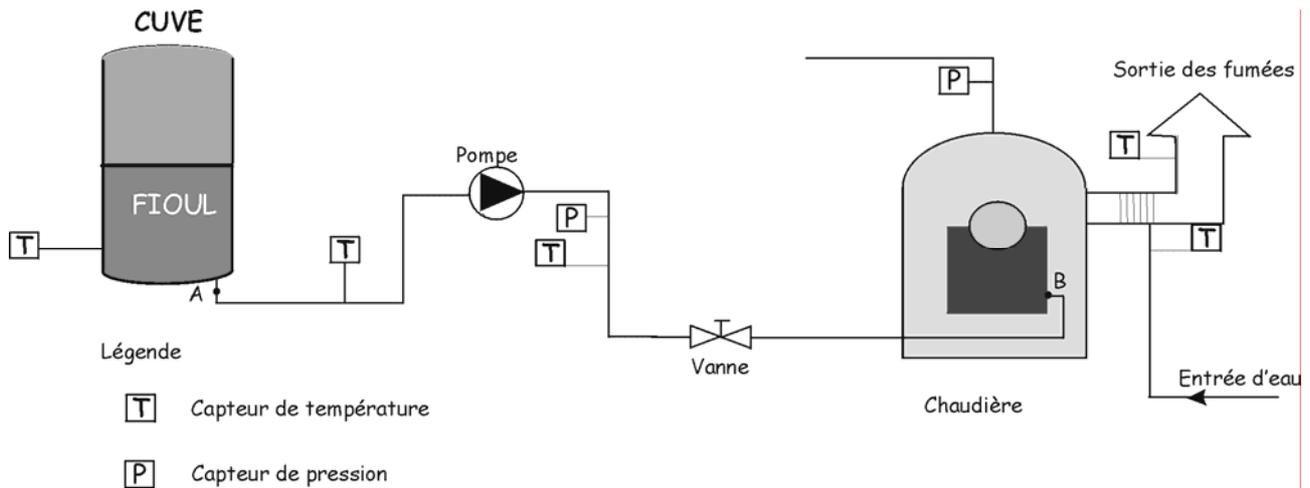
T	h	T	h	T	h
K	kJ kg^{-1}	K	kJ kg^{-1}	K	kJ kg^{-1}
100	99,76	490	492,74	880	910,56
110	109,77	500	503,02	890	921,75
120	119,79	510	513,32	900	932,94
130	129,81	520	523,63	910	944,15
140	139,84	530	533,98	920	955,38
150	149,86	540	544,35	930	966,64
160	159,87	550	554,75	940	977,92
170	169,89	560	565,17	950	989,22
180	179,92	570	575,57	960	1000,53
190	189,94	580	586,04	970	1011,88
200	199,96	590	596,53	980	1023,25
210	209,97	600	607,02	990	1034,63
220	219,99	610	617,53	1000	1046,03
230	230,01	620	628,07	1020	1068,89
240	240,03	630	638,65	1040	1091,85
250	250,05	640	649,21	1060	1114,85
260	260,09	650	659,84	1080	1137,93
270	270,12	660	670,47	1100	1161,07
280	280,14	670	681,15	1120	1184,28
290	290,17	680	691,82	1140	1207,54
300	300,19	690	702,52	1160	1230,9
310	310,24	700	713,27	1180	1254,34
320	320,29	710	724,01	1200	1277,79
330	330,34	720	734,20	1220	1301,33
340	340,43	730	745,62	1240	1324,89
350	350,48	740	756,44	1260	1348,55
360	360,58	750	767,30	1280	1372,25
370	370,67	760	778,21	1300	1395,97
380	380,77	770	789,10	1320	1419,77
390	390,88	780	800,03	1340	1443,61
400	400,98	790	810,98	1360	1467,5
410	411,12	800	821,94	1380	1491,43
420	421,26	810	832,96	1400	1515,41
430	431,43	820	843,97	1420	1539,44
440	441,61	830	855,01	1440	1563,49
450	451,83	840	866,09	1460	1587,61
460	462,01	850	877,16	1480	1611,8
470	472,25	860	888,28	1500	1635,99
480	482,48	870	899,42		

*BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 2001***Etude d'un réseau vapeur**

On veut étudier une installation de chauffage industrielle constituée de 5 chaudières dont les rôles sont différents.

Dans cette étude, on s'intéressera uniquement à une des chaudières à vapeur.

On donne sur le **document n° 1** le schéma de principe de l'installation simplifiée.



Document 1 : schéma de l'installation

La chaudière est alimentée en fioul lourd, stocké dans une cuve cylindrique d'une capacité de 900 m³. Il est acheminé vers les chaudières par une pompe centrifuge à travers une conduite de diamètre $D = 65$ mm. Pendant son transfert il traverse un échangeur à plaques (non représenté sur le schéma) qui élève la température jusqu'à 65 °C.

Cette opération est nécessaire car elle augmente considérablement la fluidité du fioul, évitant des problèmes liés à une trop forte viscosité lors de l'acheminement dans la conduite et l'injection dans le brûleur.

La viscosité cinématique moyenne du fioul à la température de 65 °C est égale à $\nu = 45 \times 10^{-6}$ m² s⁻¹, sa masse volumique $\rho = 883$ kg/m³

Pour alimenter une telle installation, le débit volumique nécessaire est de 1,2 m³/h La pression en A est à un instant donné égale à $p_A = 1,6$ bar.

La pression en B au niveau de l'injecteur à plein régime est quant à elle égale à $p_B = 20$ bar.

L'eau liquide est injectée dans le ballon supérieur (repère 1), puis circule à travers des tubes (rep. 2) jusqu'au ballon inférieur (rep. 3). L'eau passe de nouveau dans des tubes (rep. 4) pour rejoindre le ballon supérieur et se transformer à sa sortie en vapeur.

Les tubes sont placés dans le foyer de combustion afin d'être en contact direct avec la source de chaleur créée par le brûleur et ainsi faire bouillir l'eau pour produire de la vapeur.

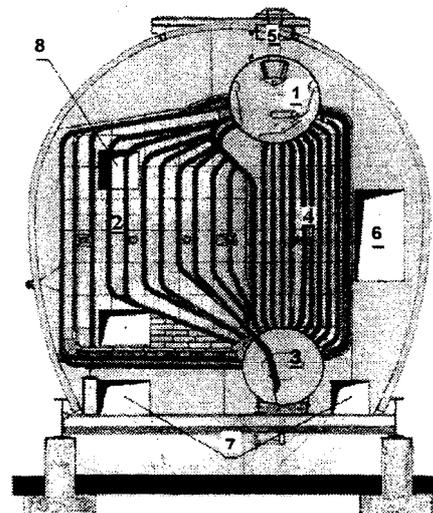
Les bouches (rep. 6 et 7) permettent d'évacuer les fumées produites par la combustion.

En cas de surchauffe dans le foyer, une soupape de sécurité (rep. 8) permet l'évacuation de la vapeur sous pression.

Dans le régime normal de fonctionnement de la chaudière, l'eau qui entre dans la chaudière est vaporisée de façon isobare sous une pression de 6 bar.

Elle ressort de la chaudière à l'état de vapeur saturante sèche (document).

Document : vue en coupe d'une chaudière vapeur



1. Sur le diagramme de Mollier **à rendre avec la copie**, placer le point D correspondant à la vapeur en sortie de chaudière et préciser la température T_D . Justifier.

2. Une sécurité placée sur le dispositif vapeur permet en cas de surpression d'évacuer la vapeur dans l'atmosphère, la pression seuil d'ouverture de la soupape est tarée à $p_s = 10$ bar.

Pour tester ce dispositif on bloque la vapeur dans la chaudière et on maintient le chauffage, la transformation peut alors être considérée comme isochore.

La vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait.

Montrez que dans ces conditions la température T_s de cette dernière, au moment de l'ouverture de la soupape est voisine de 450 °C.

3. Placez le point S sur le diagramme de Mollier.

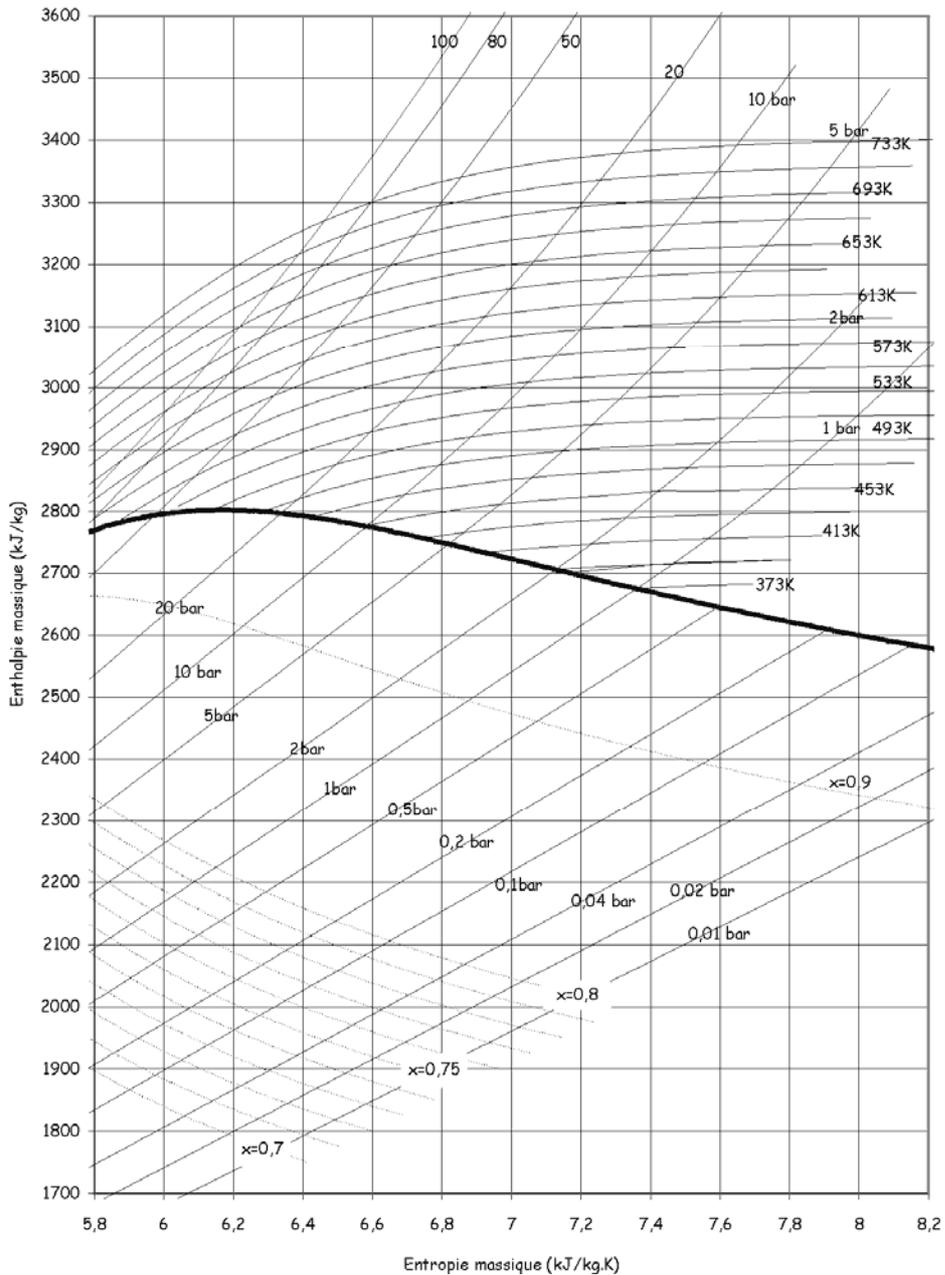
La soupape peut-être assimilée à une tuyère convergente, la pression critique au niveau du col est donnée par la formule

$$p_c = p_s (2/(\gamma+1))^{1/\gamma-1}$$

Pour cette question on donne $\gamma = 1,22$. Calculez p_c .

4. Si l'on admet que la détente est isentropique, placez le point E sur le diagramme de Mollier, en déduire l'état de la vapeur en fin de transformation (nature, température).

Diagramme de Mollier de l'eau



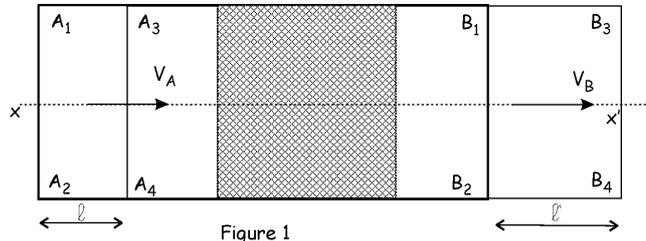
BTS Techniques Physiques pour l'Industrie et le Laboratoire 1999

On considère un écoulement stationnaire dans une conduite présentant une symétrie de révolution autour de l'axe $x'x$. L'écoulement est supposé unidimensionnel, c'est à dire que les paramètres du gaz ne dépendent que de l'abscisse x .

Dans tout le problème, le gaz considéré sera supposé parfait d'équation d'état $\frac{p}{\rho} = r.T$, où p désigne la pression, ρ la masse volumique, T la température et $r = \frac{R}{M}$ (avec R la constante molaire des gaz et M la masse molaire du gaz). On désigne par U l'énergie interne, H l'enthalpie, q_m le débit massique, c_p et c_v les capacités thermiques massiques à pression et volume constant, supposées indépendantes de la température et $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

1. Donner la définition de l'enthalpie.
 - 1.1. Rappeler l'unité des capacités thermiques massiques.
 - 1.2. Expliquer pourquoi on peut écrire, dans le cas d'un gaz parfait :

$$dU = m.c_v.dT \text{ et } dH = m.c_p.dT.$$



2. Écoulement avec perte de charge à travers une conduite de section constante.

Dans le tube de section S (figure 1), un tampon de laine de verre crée une chute de pression dans le gaz en mouvement. On admet qu'à une distance suffisante du tampon l'écoulement est laminaire : on appelle P_A la pression en amont du tampon et P_B la pression en aval.

On s'intéresse à la transformation $(A) \rightarrow (B)$ qui fait passer le gaz du volume délimité par $A_1A_2B_2B_1$ au volume délimité par $A_3A_4B_4B_3$.

 - 2.1. Montrer que les vitesses d'écoulement, \vec{v}_A en zone amont et \vec{v}_B en zone aval, sont uniformes.
 - 2.2. Montrer que la masse m du gaz de la tranche de fluide $A_1A_2A_4A_3$ de largeur ℓ est égale à celle de la tranche de fluide $B_1B_2B_4B_3$ de largeur ℓ' .
 - 2.3. Calculer le travail W_{AB} reçu par le gaz au cours de la transformation $(A) \rightarrow (B)$ en fonction de P_A, P_B, S, ℓ, ℓ' .
 - 2.4. Établir la relation entre la variation d'énergie interne $(U_B - U_A)$ du gaz, le travail W_{AB} et la quantité de chaleur Q reçus par le gaz au cours de la transformation $(A) \rightarrow (B)$.
 - 2.5. En posant $V_A = S\ell$ et $V_B = S\ell'$, montrer que $(U_B + P_B.V_B) - (U_A + P_A.V_A) = Q$.
 - 2.6. Que peut-on dire des températures amont T_A et aval T_B si l'écoulement est rendu adiabatique ? Quelle est la fonction d'état ainsi conservée ?

3. Écoulement dans une tuyère de section variable

On suppose que la modification de diamètre d'une section décrite est assez lente pour que la vitesse du fluide qui s'écoule soit pratiquement parallèle à $x'x$ et de même valeur pour toutes les particules du gaz situées dans la tranche d'épaisseur δx d'abscisse x .

On suppose que la variation de la surface perpendiculaire à $x'x$ est assez lente pour que la vitesse du fluide qui s'écoule soit pratiquement parallèle à $x'x$ et de même valeur $v(x)$ pour toutes les particules du gaz situées dans la tranche d'épaisseur dx d'abscisse x .

On appelle (π_A) et (π_B) (figure 2) les plans d'abscisses x_A et x_B , le gaz entrant par (π_A) et sortant par (π_B) .

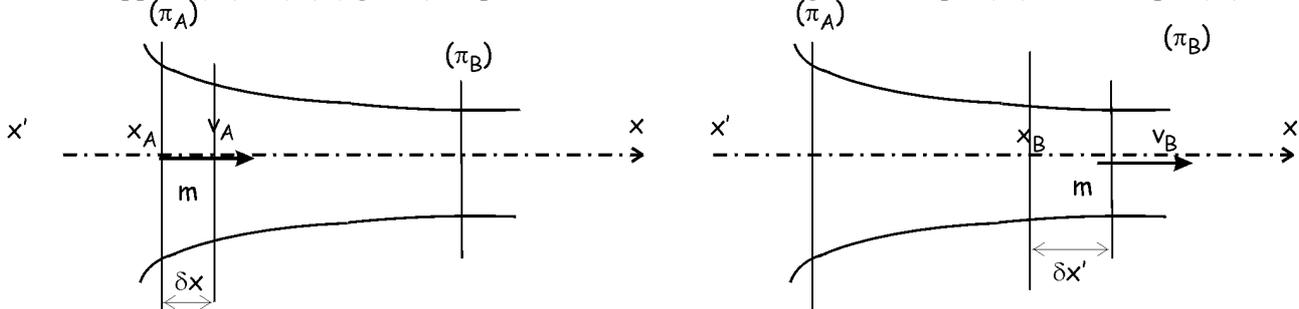


Figure 2

- 3.1. Évaluer le travail W_{AM} des forces de pression sur la tranche de masse m au cours de son passage du plan (π_A) au plan (π_B) . On l'exprimera en fonction de la pression P_A , de la vitesse v_A , de la section S_A en A et des quantités analogues en B . Montrer que $W_{AB} = \left(\frac{P_A}{\rho_A} - \frac{P_B}{\rho_B} \right) m$.

3.2. Montrer que l'on peut écrire : $(H_B + \frac{1}{2} m v_B^2) - (H_A + \frac{1}{2} m v_A^2) = Q$

où Q est la quantité de chaleur reçue par la masse de gaz m entre les abscisses x_A et x_B .

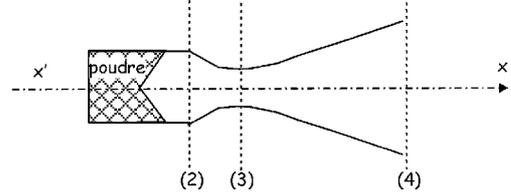
4. Ecoulement d'un gaz dans une tuyère d'un propulseur à poudre :

On se propose d'étudier l'écoulement d'un gaz dans une tuyère d'un propulseur à poudre. L'écoulement est assez rapide pour qu'aucun échange de chaleur n'ait lieu : $Q = 0$.

Les indices seront relatifs à l'abscisse de la section et les vitesses du gaz sont prises relativement au propulseur.

Le gaz chaud est produit par la combustion de la poudre.

Dans la chambre de combustion, la pression et la température sont uniformes. Elles sont égales respectivement à p_2 et T_2 , valeurs prises par ces paramètres à la section (2) d'entrée de la tuyère, la vitesse des gaz étant pratiquement nulle en (2) et en amont de (2) : $v_2 = 0$.



Le gaz est ensuite détendu dans la tuyère à symétrie de révolution autour de l'axe $x'x$. Elle est dite «convergente-divergente» et possède donc un col (3). Le gaz sort de la tuyère en (4) à la pression p_4 . L'écoulement dans la tuyère sera supposé permanent et isentropique.

Pour des raisons non étudiées ici, la vitesse du gaz au col est égale à la célérité du son en ce point : $v_3 = c(T_3)$.

Les applications numériques seront effectuées avec $r = 500 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; $\gamma = 1,25$; $p_4 = 10^5 \text{ Pa}$; conditions de fonctionnement : $p_2 = 50 \times 10^5 \text{ Pa}$ et $T_2 = 2450 \text{ K}$.

4.1. Ecrire la différence des enthalpies $H_3 - H_2$ du gaz entre les sections (2) et (3) de deux façons différentes.

4.2. En déduire l'expression de v_3 , vitesse du gaz en (3) en fonction de T_2 , T_3 et c_p . Comment évolue v lorsque l'on se rapproche de la sortie de la tuyère ?

4.3. En utilisant la relation de Mayer : $m(c_p - c_v) = n \cdot R$ avec n le nombre de mole de gaz contenu dans la masse m , montrer que $c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot r$

4.4. Sachant que la vitesse du son dans un gaz de masse molaire M à la température T_3 est :

$$c(T_3) = \sqrt{\frac{\gamma R T_3}{M}} ; \text{ exprimer } T_3 \text{ en fonction de } T_2 \text{ et } \gamma. \text{ Calculer } T_3.$$