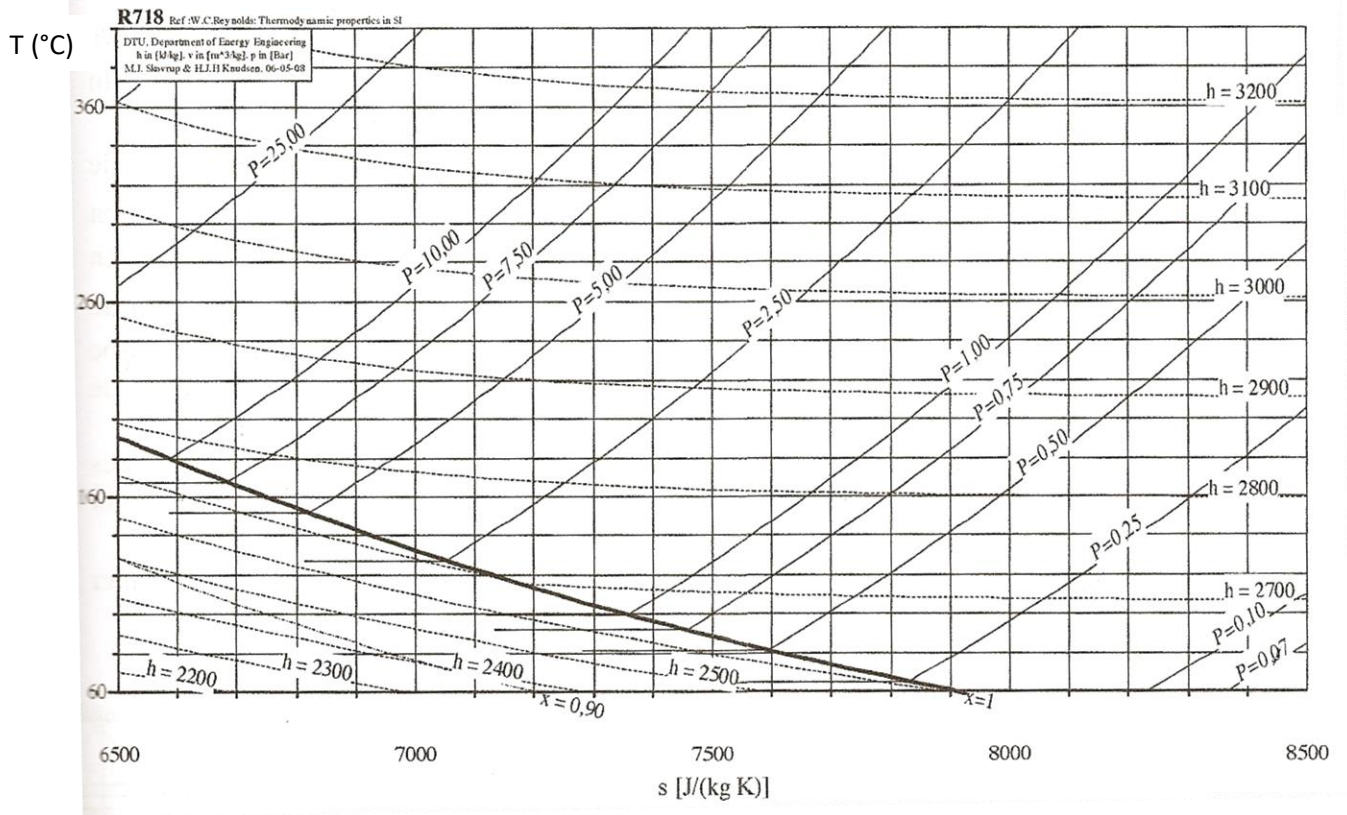


# TD – Th 1 - Ecoulements stationnaires

## Exercice 1\* : Détente adiabatique dans une turbine



Une turbine calorifugée, conçue pour travailler sans liquide, détend une vapeur sèche issue d'un surchauffeur à la température  $T_e = 380^\circ\text{C}$  et à la pression  $P_e = 10\text{bar}$  jusqu'à la pression  $P_s = 1,0\text{bar}$ .

On donne un extrait du diagramme (T,s) de l'eau pure. Les isobares (en bar) sont tracées en trait plein et les isenthalpes (en  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ) en pointillé.

- 1) Que représente la courbe en gras ?
- 2) Positionner le point e représentant la vapeur en entrée.
- 3) La détente est d'abord supposée réversible.
  - a) Tracer sur le diagramme la courbe d'évolution du fluide et le point s correspondant à l'état de sortie.
  - b) La vapeur en sortie est-elle sèche ? Quelle est la température de sortie  $T_s$  ? Quel est le travail massique utile de détente  $w_u$  ? Jusqu'à quelle pression pourrait-on détendre isentropiquement sans faire apparaître de liquide ?
- 4) En réalité la détente est irréversible. Les pressions d'entrée et de sortie sont inchangées mais la température de sortie réelle est mesurée à  $T'_s = 150^\circ\text{C}$ .
  - a) Positionner sur le diagramme le point s' correspondant à l'état de sortie. Mesurer l'entropie massique créée.
  - b) La vapeur en sortie est-elle sèche ? Quel est le travail utile de détente  $w'_u$  ? Calculer un « rendement » isentropique de la turbine défini comme le rapport  $w'_u/w_u$ . Commenter le résultat.



## Exercice 2\*\* ♥ : Réfrigérateur à ammoniac

Pour optimiser l'efficacité d'une machine frigorifique, il faut s'approcher du cycle de Carnot théorique constitué de deux isothermes de températures  $T_1$  et  $T_2$  (avec  $T_1 > T_2$ ) et de deux adiabatiques (une détente dans la turbine et une compression dans le compresseur).

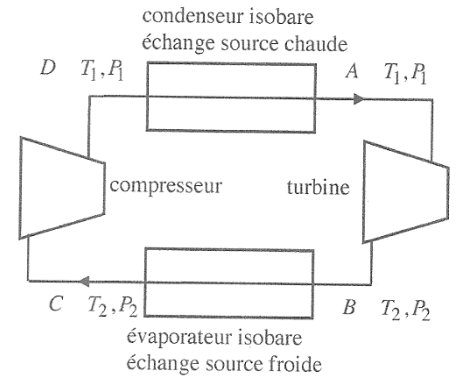
On étudie un réfrigérateur à ammoniac dans lequel le fluide subit le cycle ci-contre :

Le fonctionnement se fait en circuit fermé et en régime permanent avec une circulation d'ammoniac pur de débit massique  $\dot{D}_m$ .

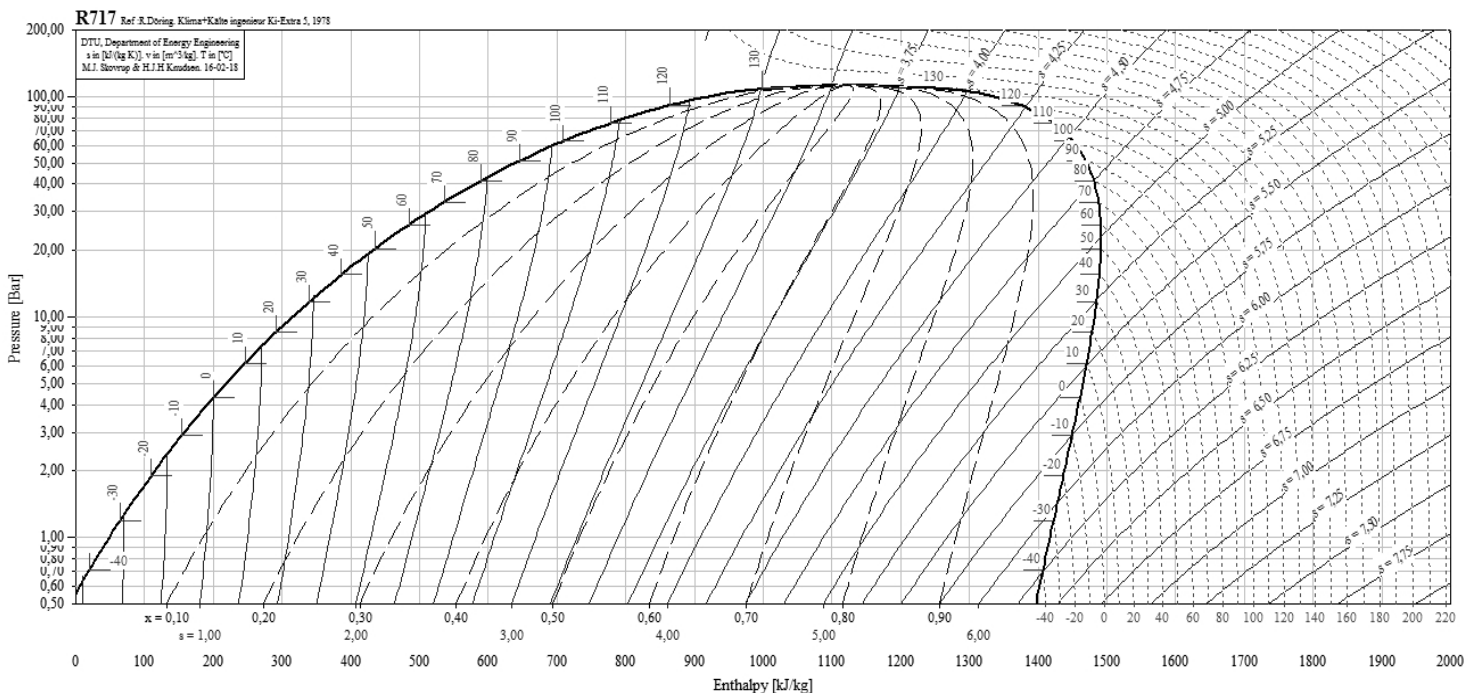
Pour obtenir des transferts thermiques importants, sans utiliser de trop grandes quantités de fluide, on met à profit des changements d'état.

Dans le condenseur l'ammoniac subit l'intégralité du palier de changement d'état à la température  $T_1$ . Les points A et D sont sur la courbe de saturation.

De façon classique, le travail récupéré à la turbine est fourni au compresseur, ce qui limite la dépense pour alimenter ce dernier.



- 1) Placer dans un diagramme  $(T,s)$  la courbe de saturation et tracer le cycle de Carnot théorique ABCD que décrirait le fluide.
- 2) On fixe dans un premier temps les températures  $T_1=40^\circ\text{C}$  et  $T_2=-20^\circ\text{C}$ . Justifier ces valeurs si la source chaude (air extérieur) est à  $30^\circ\text{C}$  et l'intérieur du réfrigérateur à  $-5^\circ\text{C}$ .
- 3) On donne le diagramme  $(\ln P, h)$ , encore appelé diagramme de Mollier des frigoristes, pour l'ammoniac. Les isentropiques ( $s$  en  $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y sont tracées en trait plein, les isothermes en petits pointillés, les isotitres en gros pointillés.



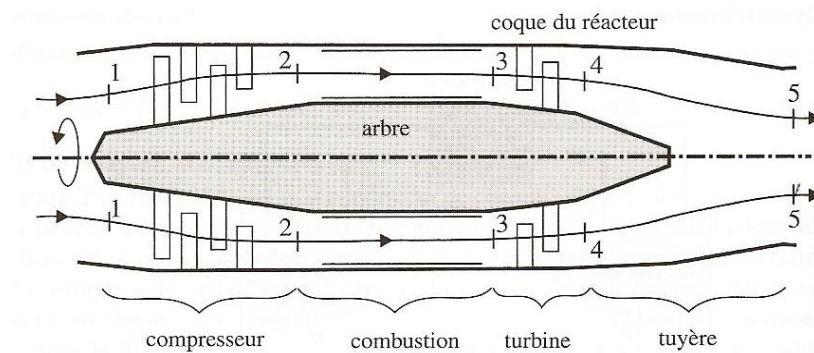
Mesurer les pressions  $P_1$  et  $P_2$  puis tracer le cycle de Carnot ABCD. Calculer l'efficacité de Carnot  $\eta_c$  (ou le coefficient d'efficacité COP) en fonction de  $T_1$  et  $T_2$  et commenter le résultat.

- 4) Dans la pratique, on n'utilise pas de turbine de détente adiabatique : elles ont un mauvais rendement en mélange-vapeur et sont complexes et chères. Bien plus simple est l'utilisation d'un détendeur calorifugé simple, sans pièce mobile (souvent un simple rétrécissement). Montrer que ce détendeur est isenthalpique et tracer la nouvelle portion AB' sur le diagramme.
- 5) On ne comprime pas non plus le mélange diphasé du point C au point D, ceci risquerait d'endommager le compresseur. On préfère décrire l'intégralité du palier d'évaporation à  $T_2$  jusqu'au point C' sur la courbe de rosée avant de comprimer la vapeur sèche de façon adiabatique réversible jusqu'à la pression  $P_1$ . Tracer le nouveau cycle AB'C'D'A décrit par l'ammoniac. Quelle est la température maximale atteinte ?
- 6) Sachant qu'on veut extraire une puissance thermique de  $1,0\text{kW}$  de la source froide, calculer le débit massique du fluide, la puissance électrique à fournir au compresseur dont le moteur électrique a un rendement  $\eta=0,9$ , ainsi que la puissance thermique que doit absorber la source chaude. Calculer l'efficacité (ou le coefficient d'efficacité COP) de ce cycle réfrigérateur.



### Exercice 3\*\* : Turboréacteur

Le turboréacteur est un système de propulsion essentiellement utilisé pour les avions. La poussée résulte de l'accélération de l'air entre l'entrée (manche à air) et la sortie (tuyère), par la combustion d'un carburant, généralement du kérosène, dans l'oxygène de l'air. Une partie de l'énergie produite est récupérée dans une turbine qui sert à faire fonctionner le compresseur au niveau de l'entrée d'air.



On fait les hypothèses de travail suivantes :

- L'air est considéré comme un gaz parfait de  $\gamma = 1,4$  et  $c_p = 1,00 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ .
- L'écoulement d'air est supposé unidimensionnel et le régime est permanent.
- Les variations d'énergie potentielle sont négligées.
- L'énergie cinétique de l'air est négligée sauf, bien entendu, à la sortie de la tuyère.
- Les évolutions dans le compresseur, la turbine et la tuyère sont isentropiques.
- L'évolution dans la chambre de combustion est isobare.
- Le mélange gazeux est assimilé à de l'air avant et après la combustion (mêmes composition, débit,  $\gamma$ ,  $c_p$ ).
- Le pouvoir thermique du carburant utilisé est  $\rho_k = 50.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ .

Les caractéristiques de l'écoulement dans le turboréacteur sont :

- Etape 1  $\rightarrow$  2 dans le compresseur :  $T_1 = 300\text{K}$ ,  $P_1 = 1\text{bar}$ ,  $\tau = \frac{P_2}{P_1} = 10,0$
- Etape 2  $\rightarrow$  3 dans la chambre de combustion : échauffement isobare jusqu'à  $T_3 = 1200\text{K}$ .
- Etape 3  $\rightarrow$  4 : détente partielle dans la turbine
- Etape 4  $\rightarrow$  5 dans la tuyère : poursuite de la détente jusqu'à  $P_5 = P_1 = 1,00\text{bar}$

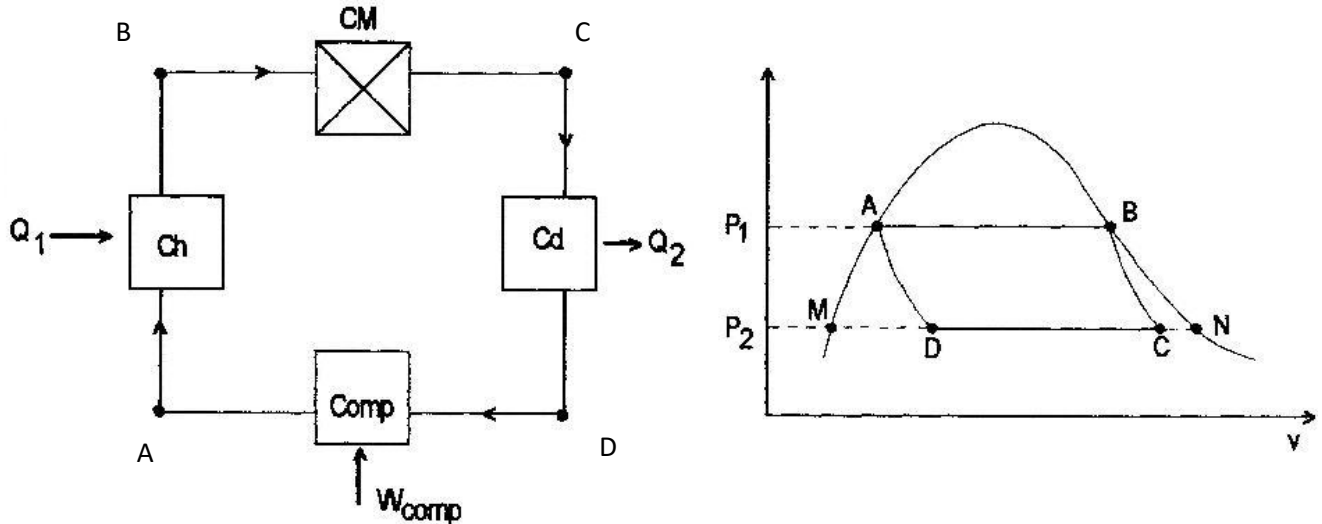
Le débit massique de l'air aspiré (et de l'air refoulé) par le turboréacteur vaut  $D_m = 50,0 \text{ kg.s}^{-1}$ .

- 1) Exprimer littéralement puis calculer numériquement la température  $T_2$  à la sortie du compresseur et le travail utile massique  $w_{u,12}$  mis en jeu dans le compresseur.
- 2) Tout le travail récupéré dans la turbine sert à faire tourner le compresseur. En déduire la température  $T_4$  à la sortie de la turbine.
- 3) Exprimer littéralement puis calculer numériquement la pression  $P_4$  à la sortie de la turbine et la température  $T_5$  à la sortie de la tuyère.
- 4) Par définition la puissance cinétique du turboréacteur est  $P_{cin} = D_m e_{c,5}$  où  $e_{c,5}$  est l'énergie cinétique massique à la sortie du turboréacteur. Exprimer  $P_{cin}$  en fonction de  $T_4$  et  $T_5$  puis faire l'AN.
- 5) Le rendement thermique du turboréacteur est par définition  $\eta_{th} = \frac{P_{cin}}{P_{th}}$  où  $P_{th}$  est la puissance thermique reçue par l'air dans la chambre de combustion. Exprimer  $\eta_{th}$  sous la forme d'un rapport de températures. Faire l'AN.
- 6) Calculer le débit massique  $D_k$  du kérosène consommé dans le turboréacteur.



### Exercice 4\*\*\* : Cycle moteur avec changement d'état

L'eau est le fluide caloporteur de la machine thermique décrite ci-dessous :



On donne :  $P_1 = 40 \text{ bar}$  et  $T_1 = 250^\circ\text{C}$  ;  $P_2 = 0,5 \text{ bar}$  et  $T_2 = 45^\circ\text{C}$ .

	A	B	M	N
$h \text{ (kJ.kg}^{-1}\text{)}$ enthalpie massique	1083	2796	188	
$s \text{ (kJ.K}^{-1}\text{.kg}^{-1}\text{)}$ entropie massique	2,80		0,627	8,15

À la sortie de la chaudière (Ch) l'eau est sous forme de vapeur saturante ( $P_1, T_1$ ). (état B)

Elle ressort du cylindre moteur adiabatique (CM) dans l'état diphasé C (BC est une adiabatique réversible).

Elle subit une liquéfaction partielle dans le condensateur (Cd) à  $P_2, T_2$  fixées.

Le compresseur adiabatique amène le fluide à l'état liquide A (la transformation est supposée réversible).

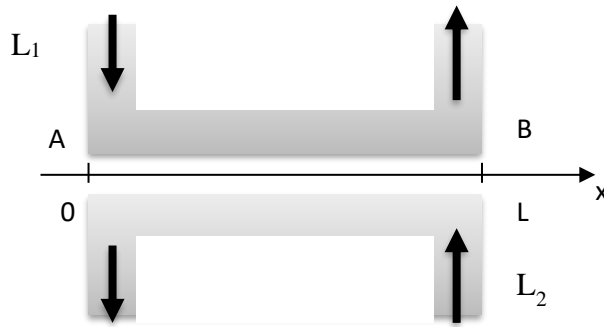
La chaudière vaporise complètement l'eau à  $P_1$  et  $T_1$  constantes.

- 1) Calculer les enthalpies massiques des états D et C.
- 2) Déterminer le travail total récupérable  $w_{\text{recup}}$  par kilogramme d'eau.
- 3) Evaluer également, et pour 1 kg d'eau, les énergies thermiques fournies  $q_1$  par la chaudière et  $q_2$  par le condensateur.
- 4) Définir et calculer le rendement  $r$  de l'installation.
- 5) Calculer le titre  $x$  en vapeur dans les états C et D.



## Exercice 5\*\*♥ : Echangeur à contre-courant

Deux liquides,  $L_1$  chaud et  $L_2$  froid, s'écoulent en sens inverse dans deux canalisations jointives mais distinctes. Négligeant l'épaisseur des canalisations, nous repérons un point par son abscisse  $x$ , comprise entre 0 ( point A ) et  $L$  ( point B ).



Le liquide  $L_1$  de capacité thermique massique  $c_1$ , de température  $T_1(x)$ , circule de A vers B avec un débit massique  $D_1$ . On définit de même  $c_2$ ,  $D_2$  et  $T_2(x)$  pour  $L_2$ .

$L_1$  pénètre en A à la température  $T_{1A}$  connue et ressort en B à la température  $T_{1B}$

$L_2$  pénètre en B à la température  $T_{2B}$  connue inférieure à  $T_{1A}$  et ressort en A à la température  $T_{2A}$ . Le but est d'obtenir une valeur de  $T_{2A}$  aussi proche que possible de  $T_{1A}$ .

Les échanges thermiques entre les deux canalisations sont supposés obéir à une loi linéaire : la puissance thermique  $dP_{th}$  cédée par  $L_1$  à  $L_2$  au niveau d'une tranche de longueur  $dx$  est égale à  $dP_{th}=G(T_1-T_2)dx$ .

- 1) Ecrire les deux équations différentielles couplées en  $T_1(x)$  et  $T_2(x)$ .
- 2) Déterminer  $T_{2A}$  en fonction de  $T_{1A}$  et  $T_{2B}$  dans le cas où  $D_1c_1=D_2c_2=Dc$ .  
Vérifier qualitativement le résultat en faisant varier les paramètres  $L$ ,  $D$ ,  $c$  et  $G$ .

$$Ex 5 : 1) D_1 c_1 \frac{dT_1}{dx} = -G(T_1 - T_2) \quad D_2 c_2 \frac{dT_2}{dx} = -G(T_2 - T_1) \quad 2) T_{2A} = \frac{\frac{1}{T_{1A}} + \frac{1}{T_{2B}}}{\frac{1}{T_{1A}} + \frac{1}{T_{2B}} + \frac{G}{Dc}} = 0,72$$

$$Ex 4 : 1) s_D = s_A \text{ et sur le palier de changement d'état } \Delta h = T_{2A} s_A + h_D = h_M + T_2(s_A - s_M) = 876 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad \text{De même } s_C = s_B = s_A + (h_B - h_A)/T_1 = 6,07 \text{ kJ.K}^{-1} \text{.kg}^{-1} \quad d'où h_C = h_M + T_2(s_B - s_M) = 1,92 \text{ MJ.kg}^{-1} \\ 2) w_{recup} = w_{BC} + w_{DA} = h_C - h_B + h_A - h_D = -671 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad 3) q_1 = h_B - h_A = 1,71 \text{ MJ.kg}^{-1} \quad q_2 = h_D - h_C = -1,04 \text{ MJ.kg}^{-1} \\ 4) \text{Rendement du moteur } r = w_{recup} / q_1 = 0,39 \quad 5) \text{Théorème des moments, } x_D = (s_D - s_M)/(s_N - s_M) = 0,29 \quad x_C = (s_C - s_M)/(s_N - s_M) = 0,72$$

$$Ex 3 : 1) T_2 = 579 \text{ K} \quad w_u = 279 \text{ kJ.kg}^{-1} \quad 2) T_4 = 921 \text{ K} \quad 3) P_4 = 3,96 \text{ bar et } T_5 = 622 \text{ K} \quad 4) P_{cin} = 15,0 \text{ MW} \quad 5) \eta_{th} = 48,1\% \quad 6) D_k = 0,621 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$Ex 2 : 3) P_1 = 15 \text{ bar} \quad P_2 = 1,9 \text{ bar} \quad \eta_c = T_2/(T_1 - T_2) = 4,2 \quad 5) T_{max} = 140^\circ\text{C} \quad 6) D_m = 0,958 \text{ g.s}^{-1} \quad P_u = 0,20 \text{ kW} \quad P_{elec} = 0,34 \text{ kW} \quad P_{th, ch} = 1,3 \text{ kW} \quad \eta = 2,9$$

$$Ex 1 : 1) \text{ Courbe de rosée } \quad 2) \text{ On place e à } T_e = 380^\circ\text{C} \quad P_e = 10 \text{ bar} \quad 3) \text{ Vapeur sèche } \quad T_s = 108^\circ\text{C} \quad w_u = h_s - h_e = -0,5 \text{ MJ.kg}^{-1} \\ 4) \text{ a) On place s' à } P_s = 1,0 \text{ bar et } T_s = 150^\circ\text{C, s' créée} = s_s - s_e = 200 \text{ J.K}^{-1} \text{.kg}^{-1} \text{ car détente adiabatique} \\ \text{ b) Vapeur sèche, } w_u = h_s - h_e = -0,45 \text{ MJ.kg}^{-1} \quad w_u / w_u = 0,85 \quad \text{pertes de travail par irréversibilité}$$

Réponses :