
DM N°12
Thermodynamique industrielle

Lycée *LANGEVIN* - *WALLON*

22 novembre 2020

À lire attentivement...

Les candidats devront vérifier que le sujet comporte bien 8 pages numérotées 1/8, 2/8, ... 8/8.

Les candidats sont invités à porter une attention particulière à la rédaction : les copies illisibles ou mal présentées seront pénalisées.

Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à attribution de points. Les résultats numériques devront être donnés sous la forme appropriée.

Le sujet comporte :

- 2 exercices d'annale de physique.

Les diverses parties peuvent être traitées dans l'ordre choisi par le candidat. Il prendra toutefois soin de bien numéroter les questions.



Fig. 1 – Carte mémoire de thermodynamique industrielle

L'EMPLOI DE LA CALCULATRICE OU DE TOUTE AUTRE AIDE ÉLECTRONIQUE,
NOTAMMENT PYTHON, EST AUTORISÉ.

LE TRAVAIL AVEC SON COURS SOUS LES YEUX EST RECOMMANDÉ.

LE PHOTO-COPILLAGE DU TRAVAIL D'UN CAMARADE SERA SANCTIONNÉ.

UN RÉSULTAT NON ENCADRÉ NE SERA PAS PRIS EN COMPTE.

Si au cours de la rédaction, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et poursuivra sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

2020 Banque PT B Physique – Étude d'un réseau urbain de chaleur

Le sujet choisi est l'étude simplifiée d'un site de production et de distribution d'un réseau urbain de chaleur. On pourra s'aider des calculs suivants pour les applications numériques qui se feront avec deux chiffres significatifs.

$$0,72/3,05 = 0,24 \quad 0,85/3,5 = 0,24 \quad 17/3,6 = 4,7 \quad \ln(4) = 1,4 \quad 4,2/17 = 0,25$$

On prendra :

- la masse volumique de l'eau liquide égale à $\rho_{\text{eau}} = 1,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- la capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{\text{eau}} = 4,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

On négligera la variation d'énergie cinétique et d'énergie potentielle en regard de la variation d'enthalpie.

Document 1 : L'unité de combustion et de valorisation des déchets d'une agglomération de taille moyenne

L'incinérateur brûle les déchets avec un apport de méthane et des entrées d'air frais. Le dioxyde de carbone, la vapeur et les particules sortantes de l'incinérateur de déchets sont récupérés pour le chauffage des éléments de deux chaudières. Les deux chaudières permettent d'obtenir de la vapeur sous haute pression destinée à entraîner un turboalternateur d'une part et à alimenter un réseau urbain de chaleur d'autre part.

L'incinérateur permet la combustion de 100 000 tonnes de déchets ménagers et assimilés par an. 1,3 % de la masse initiale des déchets est récupérée sous forme de suie par des filtres sur les cheminées et constitue des déchets dangereux. 11 % de la masse initiale des déchets est récupérée au bas de l'incinérateur sous forme de cendres. Ces cendres sont ensuite utilisées comme remblais sous les routes en zone non inondables. La puissance thermique des deux chaudières est de 20 MW. C'est-à-dire un débit de 17 tonne/h de vapeur à 375 °C sous 40 bar pour une seule chaudière. L'énergie envoyée vers le chauffage urbain est de 36 000 MW · h par an. Le turbo-alternateur est d'une puissance électrique de 7 MW et permet une production électrique de 40 000 MW · h par an.

Document 2 : Description du cycle d'une machine à vapeur avec surchauffe

L'eau du réservoir de l'installation est d'abord pressurisée par un compresseur haute pression de manière isentropique de l'état *A* à l'état *B*.

L'eau liquide compressée subit ensuite des transformations isobares en passant successivement par les trois entités constituant la chaudière :

- un économiseur qui l'amène à l'état de liquide saturant (état *C*) ;
- un ballon qui vaporise entièrement le liquide saturant à l'état de vapeur sèche saturante (état *D*) ;
- un surchauffeur qui l'amène à l'état de vapeur sèche surchauffée (état *E*) à 375 °C.

Économiseur, ballon et surchauffeur sont tous chauffés par les fumées des combustions des déchets, ce chauffage s'effectue à pression constante.

La vapeur sèche haute pression subit ensuite une détente isentropique dans la turbine pour revenir à un mélange liquide-vapeur à la pression initiale. Le mélange de titre élevé en vapeur est condensé jusque dans le domaine liquide avec un transfert thermique avec l'air extérieur puis revient à 25 °C

dans le réservoir de manière isobare.

Document 3 : Description du turbo-alternateur

La turbine est entraînée mécaniquement par la vapeur haute pression. La turbine entraîne un alternateur qui génère de l'électricité par induction. On considère un rendement de 90 % entre la puissance mécanique de la turbine et la puissance électrique générée par l'alternateur.

1.1 Partie 1

- On considère l'eau liquide incompressible (volume massique constant). À partir de l'identité thermodynamique avec l'énergie interne, montrer que, pour un tel liquide, une transformation isentropique se confond avec une transformation isotherme.
- Compléter le tableau 1.1 en annexe, placer les points et tracer le cycle sur le diagramme $\{\log(P), h\}$ de l'eau 1.1 fourni également en annexe.
- À partir de l'identité thermodynamique avec l'enthalpie ; exprimer puis calculer le travail massique nécessaire pour compresser l'eau liquide de l'état A à l'état B .
- Exprimer puis calculer le transfert thermique massique total nécessaire pour chauffer l'eau dans les économiseurs, ballon et surchauffeur.
- Exprimer puis calculer le rendement du cycle thermodynamique en considérant que l'objectif est de produire du travail mécanique par détente de la vapeur.
- Exprimer puis calculer le rendement de la machine en considérant que l'objectif est de produire du travail électrique.
- Estimer le titre en vapeur en F par une lecture sur le diagramme puis rappeler la règle des moments. Lire et donner les valeurs contenues dans cette dernière relation sans pour autant faire le calcul.
- Donner l'expression littérale de la création d'entropie massique sur un cycle en fonction des enthalpies massiques et des températures. On supposera que les échanges avec les sources se font aux deux températures extrêmes du fluide. Donner les valeurs nécessaires à l'application numérique sans pour autant faire le calcul.

Document 4 : Un exemple d'optimisation du cycle

Une amélioration de la machine serait d'éviter de rentrer dans le domaine diphasé pendant le turbinage. Ce nouveau cycle nécessite un turbinage haute pression et un turbinage basse pression après réchauffe. Pour cela, on peut turbiner isentropiquement dans les hautes pressions jusqu'à atteindre la courbe de saturation (E'), puis faire une réchauffe isobare dans les fumées de l'incinérateur pour atteindre à nouveau la température de 375 °C (E'') et enfin faire un nouveau turbinage isentropique dit basse pression pour revenir en entrée condensateur (F') sous 1,0 bar dans le domaine vapeur.

1.2 Partie 2

- Placer les points et tracer les nouvelles parties du cycle sur le diagramme en annexe. Compléter le tableau 1.2 avec les nouveaux états du cycle en annexe.
- Exprimer puis calculer le rendement du cycle en considérant que l'objectif est de produire du travail mécanique par détente de la vapeur.
- Quel risque cherche-t-on à éviter avec ce nouveau cycle ?
- On suppose que l'état de l'eau (375 °C ; 40 bar) en sortie des deux chaudières de l'unité de valorisation des déchets permet de restituer de l'énergie jusqu'à l'état (25 °C ; 1,0 bar). Exprimer puis calculer la puissance thermique restituable avec le débit annoncé. Commenter en comparant avec

la puissance des chaudières annoncée dans le document 1.

Document 5 : Site Ecoval, chaudière Biomasse et unité de valorisation des déchets

Depuis novembre 2012, plus de la moitié de la population ébroïcienne bénéficie d'un chauffage urbain généré à 96 % par des énergies renouvelables : ordures ménagères, plaquettes forestières, déchets verts. Le SETOM (Syndicat mixte pour l'étude et le traitement des ordures ménagères) de l'Eure a en effet mis en place une nouvelle chaufferie à bois sur son site d'ECOVAL à Guichainville près d'Évreux. Cette chaufferie est couplée à l'unité de valorisation énergétique des déchets pour alimenter un réseau de chaleur urbain.

La production d'énergie thermique permet l'alimentation de 20 000 habitants en eau chaude sanitaire et en chauffage collectif. L'énergie de la combustion de la biomasse est de l'énergie renouvelable qui vient en substitution à la consommation d'énergie fossile. En complément, brûler du bois en remplacement du fioul ou du gaz équivaut à une réduction des émissions de CO₂ de 20 000 tonnes par an.

Source : SETOM d'Évreux

Informations clés sur la production énergétique renouvelable du SETOM	
Tonnage annuel de bois-énergie	25 à 30 000 tonnes/an
Tonnage annuel de déchets ménagers incinérés	100 000 tonnes/an
Besoins de chauffage	20 000 équivalents habitants
Puissance des chaudières à déchets	20 MW ou 2 x 17 tonnes/h de vapeur à 380°C sous 38 bars
Puissance des chaudières à bois	2 x 8 MW
Puissance des chaudières d'appoint et secours	3 x 15 MW au gaz naturel
Production totale de chaleur	117 GWh/an
Production de chaleur par les déchets	36 GWh/an
Production de chaleur par le bois	54 GWh/an
Longueur du réseau de chaleur	3 + 25 km
Température du réseau de chaleur	105°C
Puissance de production électrique de l'usine	Turbo-alternateur de 7 Mwé Thermodyn
Production d'électricité de l'usine	47 GWh/an
Vente d'électricité sur le réseau	37 GWh/an
Vente de chaleur	96 GWh/an

(Source: SETOM d'Evreux)

Annexe

États		Pression (bar)	Température (°C)	Enthalpie massique (kJ · kg ⁻¹)
A	Entrée compresseur	1,0	25	
B	Entrée économiseur	40		
C	Entrée ballon			
D	Entrée surchauffeur			
E	Entrée turbine		375	
F	Entrée condenseur	1,0		

Tab. 1.1 – Tableau N°1 – question 2

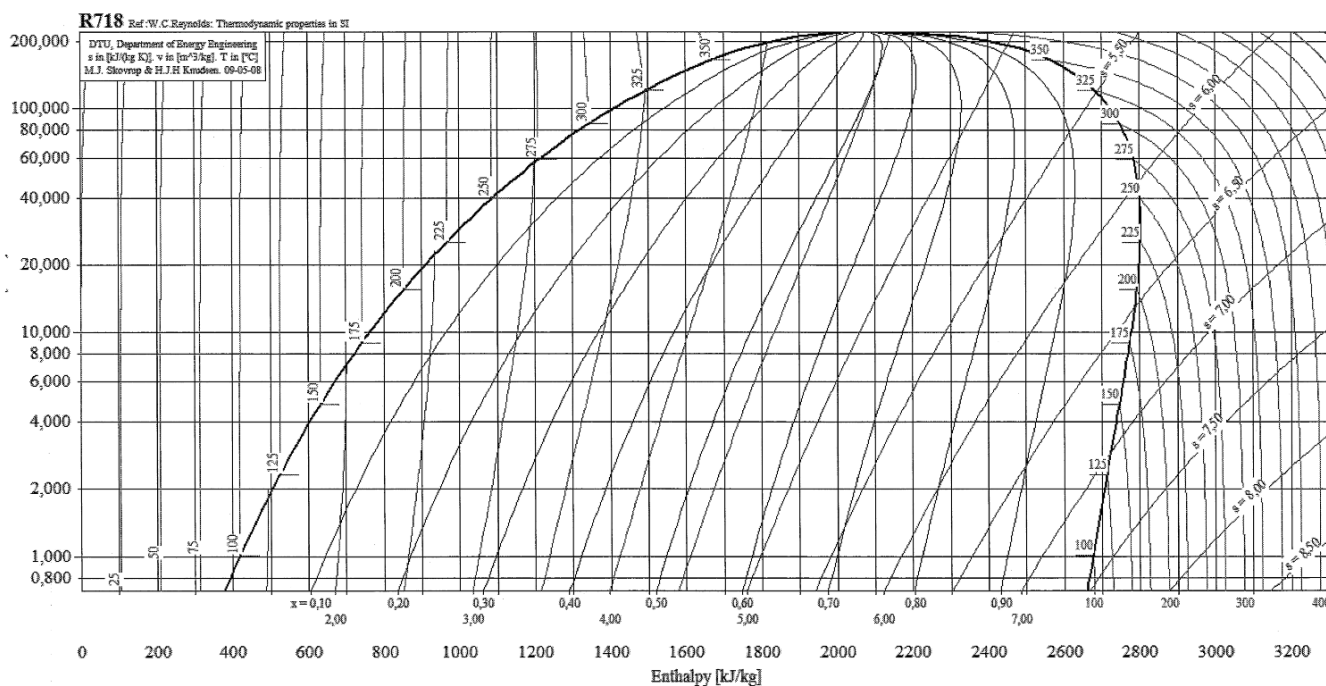


Fig. 1.1 – Diagramme $\{\log(P), h\}$

États		Pression (bar)	Température (°C)	Enthalpie massique (kJ · kg ⁻¹)
E'	Entrée réchauffe			
E''	Entrée turbine BP		375	
F'	Entrée condenseur	1,0		

Tab. 1.2 – Tableau N°2 – question 9

Un formulaire et certaines valeurs numériques sont regroupées en fin d'énoncé.

2.1 Turboréacteur double corps, avec soufflante, à flux séparés

Cette partie étudie, de façon simplifiée, le fonctionnement du turboréacteur double-flux séparés et double-corps du type CFM56 qui équipe l'Airbus A320. Pour cela, on se place dans le cadre d'un test au sol sur un banc d'essai fixe. La figure 2.1 présente le schéma de principe simplifié du turboréacteur.

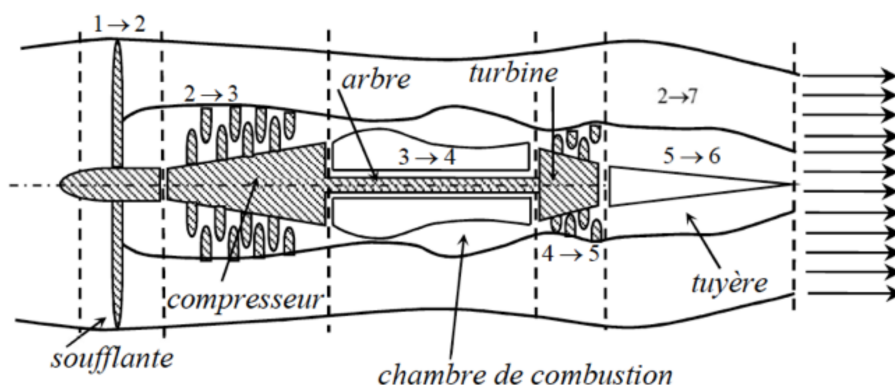


Fig. 2.1

L'air est aspiré (étape $1 \rightarrow 2$) par la soufflante à la température $T_1 = 288 \text{ K}$ et à la pression $P_1 = 1 \text{ bar}$. Il se divise ensuite en deux flux, le flux primaire de débit massique D_{m1} et le flux secondaire de débit massique D_{m2} . On note $\beta = D_{m2}/D_{m1} = 5,7$ le facteur de by-pass (taux de dilution) et $D_m = D_{m1} + D_{m2}$ le débit massique total. Le flux primaire, dit flux chaud du fait de son passage dans la chambre de combustion, décrit dans le corps principal du turboréacteur les étapes suivantes :

- $2 \rightarrow 3$, compression de P_2 à P_3 par un compresseur axial ;
- $3 \rightarrow 4$, dans la chambre de combustion où le carburant est injecté, le mélange air-carburant est chauffé par combustion. La flamme est confinée au voisinage des injecteurs alimentés par un débit de kérosène ici négligé devant celui de l'air qui traverse la chambre. La température (température de flamme) s'abaisse ensuite rapidement dans la chambre pour atteindre une valeur compatible avec la tenue des matériaux de la turbine. Les caractéristiques de l'air ne sont pas modifiées par la combustion. On prendra en sortie de la chambre de combustion $T_4 = 1450 \text{ K}$. La chambre est supposée isobare ;
- $4 \rightarrow 5$, détente partielle dans la turbine axiale ;
- $5 \rightarrow 6$, détente dans la tuyère, de la pression P_5 , à vitesse supposée nulle, jusqu'à la pression ambiante $P_6 = 1 \text{ bar}$ où une première contribution à la poussée est produite.

Le flux secondaire, dit flux froid, s'écoule sans perte de charge autour du corps principal et passe directement dans une tuyère séparée de la première où l'essentiel de la poussée est produite. En sortie de cette tuyère $P_7 = 1 \text{ bar}$ et la température est notée T_7 .

Les taux de compression de la soufflante et du compresseur sont respectivement donnés par $P_2/P_1 = 2$ et $P_3/P_2 = 13$.

On suppose que le régime est stationnaire et que l'énergie potentielle de pesanteur du fluide est partout négligeable devant les autres grandeurs énergétiques. De même on négligera partout l'énergie cinétique

du fluide sauf en sortie des tuyères. Les évolutions dans la tuyère, la turbine et le compresseur sont supposées adiabatiques et réversibles. Le système ne comporte aucune pièce mobile en dehors de la turbine, du compresseur et de la soufflante. Le compresseur, la turbine et la soufflante ont un arbre commun supposé sans perte mécanique. On néglige aussi les pertes mécaniques dans le compresseur et dans la turbine.

13. On modélise le kérosène par le décane $C_{10}H_{22}$. En s'appuyant sur une modélisation qui sera justifiée, exprimer puis évaluer l'élévation maximale de température lors de la combustion d'une mole de décane en présence de la quantité juste suffisante d'air. Les produits obtenus sont du dioxyde de carbone et de l'eau.

On notera c_j la vitesse du gaz dans l'état j , et $C_{p\text{ mass}}$ la capacité thermique massique du gaz.

14. Établir l'expression de la pression P_j en fonction de T_i , P_j , P_i et du coefficient isentropique de l'air γ .
15. En exploitant le couplage mécanique entre turbine, compresseur et soufflante, établir les expressions littérales et les valeurs numériques des températures T_2 , T_3 , T_5 et de la pression P_5 en sortie de turbine.
16. Établir l'expression littérale et la valeur numérique de c_6 , vitesse du gaz du flux chaud à la sortie de la tuyère.
17. Établir également l'expression littérale et la valeur numérique de c_7 , vitesse du gaz du flux froid à la sortie de la tuyère.

On admettra que les poussées produites par les tuyères relatives au flux chaud et froid sont respectivement données par : $F_c = D_{m1}c_6$ et $F_f = D_{m2}c_7$.

18. Exprimer la poussée F du turboréacteur complet uniquement en fonction de D_m , des vitesses d'éjection c_6 et c_7 et du facteur de by-pass.
19. En déduire l'expression et la valeur numérique de la poussée par unité de débit massique D_m , dite poussée spécifique du turboréacteur, notée F_s .
20. Quel est le pourcentage de la poussée assurée par le flux chaud ?
21. Lors d'un essai au sol sur banc fixe, le turboréacteur délivre une poussée de 20 kN. Quel débit massique D_m doit alors assurer la soufflante ?

Données

Sauf indication contraire, les valeurs dépendantes de la température sont fournies à 298 K.

Accélération de la pesanteur terrestre	$g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Composition de l'air	$\text{N}_2 : 80 \%, \quad \text{O}_2 : 20 \%$
Masse volumique de l'air sous une pression de 1 bar	$\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Viscosité dynamique de l'air	$\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Coefficient isentropique de l'air	$\gamma = 1,4$
Capacité thermique massique à pression constante de l'air	$C_{p \text{ mass}} = 1,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Constante des gaz parfaits	$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Constante de Planck	$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Vitesse de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Faraday	$\mathcal{F} = 9,64 \times 10^3 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$
Énergie de liaison ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$\text{N}-\text{O} : 210 ; \text{N}=\text{O} : 630$
Produit de solubilité de $\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{p}K_s = 33$
Produit ionique de H_2O	$\text{p}K_e = 14$
Potentiels standard redox	$\text{Al}^{3+} / \text{Al}_{(s)} : -1,66 \text{ V}$ $\text{H}^+ / \text{H}_{2(g)} : 0,00 \text{ V}$ $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}_{(s)} : 0,34 \text{ V}$
Sur-tension à vide	$\eta_{c0}(\text{H}_2\text{O} / \text{H}_2) : -0,1 \text{ V sur Cu}, -1 \text{ V sur Al}$

Enthalpies standard de formation, entropies molaires et capacités thermiques à pression constante

	$\text{C}_{10}\text{H}_{22(l)}$	$\text{CO}_{2(g)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$	$\text{O}_{2(g)}$	$\text{N}_{2(g)}$	$\text{NO}_{(g)}$
$\Delta_f H^\circ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	-249,7	-393,5	-241,8			90,4
$S_m^\circ (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	545,8	213,8	188,8	205,0	191,5	210,6
$C_p^\circ (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	233,1	38,5	36,2	29,3	28,7	