

TD T2

Machines thermiques

A. Cycle de CARNOT

De l'air assimilé à un gaz parfait, de coefficient isentropique $\gamma = 1,40$ décrit un cycle de CARNOT $ABCD$:

- les transformations AB et CD sont adiabatiques et réversibles;
- les transformations BC et DA sont isothermes et réversibles.

On donne $T_B = 1431 \text{ K}$; $P_D = 1,0 \text{ bar}$; $T_D = 323 \text{ K}$; $V_D = 2,40 \text{ L}$ et le transfert thermique $Q_{BC} = 1,24 \text{ kJ}$ reçu par l'air au cours de la transformation BC.

1. Calculer la quantité de matière d'air, les volumes V_A , V_B , V_C et les pressions P_A , P_B et P_C et tracer l'allure du cycle $ABCD$ dans le diagramme de CLAPEYRON.
2. Calculer les travaux et les transferts thermiques reçus par le gaz au cours de chacune des évolutions AB, BC, CD et DA.
3. Calculer le travail W récupéré et le rendement η du moteur.
4. En utilisant le premier et le second principe, montrer que le rendement η ne dépend que de T_B et T_D .

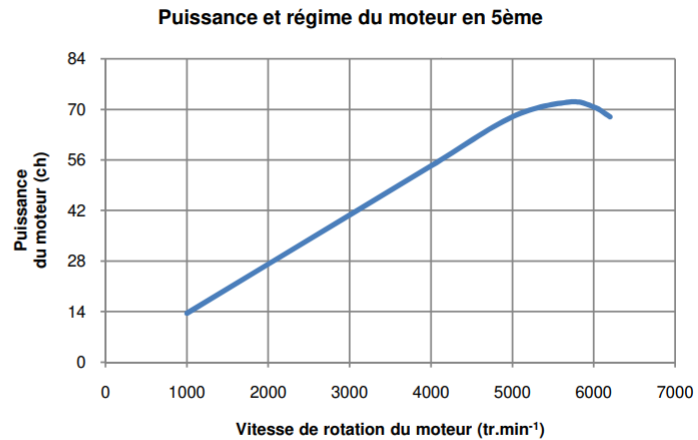
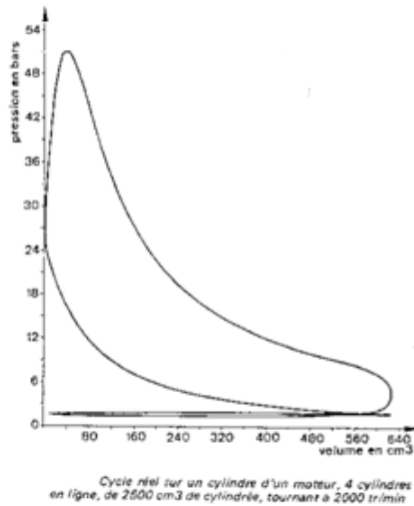
B. Moteur à explosion

Le cycle à 4 temps d'un cylindre d'un moteur à explosion peut être décrit de façon simplifiée par le cycle de BEAU DE ROCHAS. On décompose un cycle de fonctionnement en quatre phases correspondant chacune à un aller (ou un retour) simple du piston : il s'agit des quatre temps du moteur.

- **Premier temps : Admission (EA).** En E, le piston est en position haute (le volume disponible est $V_E = V_B$). La soupape d'admission s'ouvre et le mélange air-carburant entre dans le cylindre à pression atmosphérique et température constante $\theta_E = \theta_A = 80^\circ \text{C}$. En A, le piston est en position basse et le volume est V_A .
- **Deuxième temps : Compression (AB).** En A, la soupape d'admission se ferme et le piston comprime le mélange jusqu'en B : l'étape AB est une compression adiabatique réversible du mélange qui amène le piston en position haute (V_B). La pression est alors p_B .
- **Troisième temps : Explosion et détente (BC et CD).** En B, une étincelle provoque la combustion exothermique du mélange : la pression passe quasi instantanément de p_B à p_C , à volume constant V_B . L'étape CD est une détente adiabatique réversible du mélange : le volume en D est $V_D = V_A$.
- **Quatrième temps : Échappement (AD et DE).** En D, la soupape d'échappement s'ouvre sur l'atmosphère. DA est une transformation quasi-instantanée à volume constant : en A, le gaz est ramené à la pression atmosphérique. Pendant cette transformation DA, on suppose que le gaz n'a pas le temps de s'échapper (la quantité de gaz reste constante pendant cette transformation). Au cours de l'étape AE, le gaz est expulsé dans l'atmosphère à pression et à température constante.

Simplification du cycle : On ne tiendra pas compte des étapes EA et AE au cours desquelles le système constitué par les gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert. En effet, en ce qui concerne le travail, ces deux étapes s'annulent. On considère que tout se passe comme si :

- dans chaque cylindre une quantité de gaz constituant un système fermé décrivant la cycle ABCDA.
- le transfert thermique reçu par le fluide était issu d'une source chaude fictive (alors qu'il provient d'une réaction chimique interne).



On supposera, dans tout le problème, que l'automobile roule à 90 km.h^{-1} . La vitesse du véhicule est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'arbre moteur.

Extraits de la notice technique d'une automobile

- Dimension du cylindre : alésage x course du piston 80 mm x 80 mm
- Cylindrée (4 cylindres) : 1400 cm^3 (la cylindrée correspond donc à $c = 4(V_A - V_B)$)
- Rapport volumétrique : $a = \frac{V_A}{V_B} = 10$
- Vitesse pour 1000 tr/min (en 5ème) : 30 km.h^{-1}
- $1 \text{ ch} = 736 \text{ W}$

Données concernant le carburant

- Nature du carburant : octane de formule brute C_8H_{18}
- Masse molaire octane $M_{\text{ess}} = 114 \text{ g.mol}^{-1}$
- Masse volumique $\rho_{\text{ess}} = 720 \text{ kg.m}^{-3}$
- Consommation en 5ème à 90 km.h^{-1} : 5,0 L pour 100 km.
- La combustion du carburant fournit un transfert thermique de $6,0 \times 10^3 \text{ kJ.mol}^{-1}$

Données concernant l'air

- Masse molaire air $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$
- Masse volumique $\rho = 1,00 \text{ kg.m}^{-3}$
- Volume molaire à 80°C et $p = 1,013 \text{ bar}$: $V = 29,0 \text{ L.mol}^{-1}$

1. Questions préliminaires

1. Tracer le cycle étudié sur un diagramme $p(V)$.
2. Déterminer les valeurs de V_A et V_B en fonction de la cylindrée c et du rapport volumétrique a . Effectuer l'application numérique.
3. Déterminer la vitesse de rotation du moteur en tr.min^{-1} .
4. Combien de tours l'arbre moteur effectue-t-il quand le gaz parcourt un cycle ? En déduire le nombre de cycles parcourus par le gaz en une minute et en une seconde.

2. Consommation de carburant et nature du gaz subissant le cycle

5. Quel volume de carburant est consommé, en une seconde, par le moteur ? par un cylindre ?
6. En déduire le volume de carburant utilisé pour un cycle, dans un cylindre.
7. Déterminer enfin la masse m_{car} et la quantité de matière n_{car} .
8. Déterminer la quantité d'air n_{air} contenu dans le cylindre au moment de l'admission.
9. L'hypothèse disant "le gaz qui subit le cycle est de l'air" est-elle justifiée ?

On considère dans la suite du problème que la quantité de gaz subissant le cycle est $n = n_{\text{air}}$

3. Transferts énergétiques

10. **Transformation AB.** Exprimer p_B et T_B en fonction de p_A , T_A et a . Grâce au premier principe, exprimer W_{AB}
11. **Transformation BC.** Que peut-on dire du travail W_{BC} . Donner la source du transfert thermique Q_{BC} ; calculer Q_{BC} . En déduire T_C en fonction de T_B , Q_{BC} , n , R et γ , puis p_C . Faire l'application numérique.
12. **Transformation CD.** Exprimer p_D et T_D en fonction de p_C , T_C et a . Grâce au premier principe, exprimer W_{CD}
13. **Transformation DA.** Grâce au premier principe appliqué sur le cycle, exprimer Q_{DA} .

4. Rendement et puissance du moteur

14. Déterminer le travail fourni par un cylindre au cours d'un cycle.
15. Définir et calculer le rendement du moteur.
16. **Q_{bonus}** : Exprimer le rendement en fonction des différentes températures, puis en fonction de a et γ .
17. Déterminer la puissance d'un cycle. En déduire la puissance du moteur. Est-ce cohérent avec le graphique fourni par le constructeur ?

5. Étude entropique

18. En effectuant une étude entropique, déterminer si les phases isochores sont réversibles. On rappelle l'expression de l'entropie du gaz parfait : $S(T, V) = C_V \ln T + nR \ln \left(\frac{V}{n} \right) + S_0$

C. Moteur DIESEL

Dans le moteur DIESEL, la combustion n'est plus assurée par des bougies ; on injecte le carburant uniquement après la compression ce qui provoque la combustion. Une mole de gaz parfait diatomique subit les transformations lentes et supposées réversibles (on néglige tous les phénomènes dissipatifs frottements ...) suivantes :

- $E_1 \rightarrow E_2$: compression adiabatique.
- $E_2 \rightarrow E_3$: dilatation isobare, phase de combustion provoquée par l'inflammation spontanée du mélange au cours de laquelle le gaz reçoit un transfert thermique Q_c en provenance d'une source chaude fictive.
- $E_3 \rightarrow E_4$: détente adiabatique.
- $E_4 \rightarrow E_1$: refroidissement isochore ; le gaz est en contact de l'atmosphère qui joue le rôle d'une source froide.

On note $\gamma = \frac{c_{pm}}{c_{vm}} = 1,4$ et $a = \frac{V_1}{V_2}$ et $b = \frac{V_4}{V_3}$ les rapports volumétriques des transformations adiabatiques.

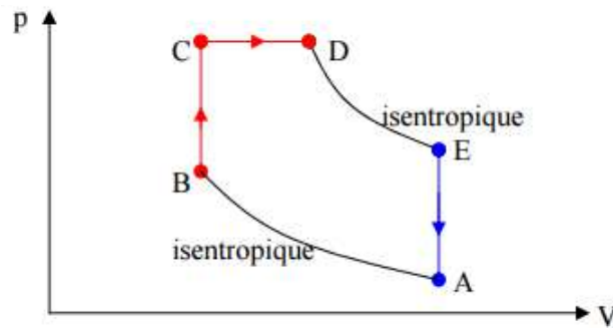
1. Déterminer les expressions littérales de p_2 , p_3 et p_4 en fonction de a , b , γ et p_1
2. Faire de même avec V_2 , V_3 et V_4 en fonction de a , b et V_1 .
3. On donne $a = 9$; $b = 3$; $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$; $p_1 = 1,00 \text{ bar}$; $T_1 = 300 \text{ K}$. En justifiant très proprement chaque application numérique, compléter le tableau ci-dessous

Etat	$p(\text{bar})$	$V(\text{L})$	$T(\text{K})$
E_1	1		300
E_2			
E_3			
E_4			

- Tracer l'allure du cycle en coordonnées de CLAPEYRON.
- Calculer les travaux et les transferts thermiques échangés au cours des différentes transformations.
- Donner l'expression du rendement d'un moteur fonctionnant suivant ce cycle en fonction des différents travaux et transferts thermiques.
- Faire l'application numérique avec les résultats de la question précédente.
- Donner l'expression du rendement en fonction de a , b et γ . Faire l'application numérique et vérifier la cohérence avec l'application numérique de la question précédente.
- Donner l'expression du rendement de CARNOT d'un moteur fonctionnant entre les deux mêmes sources de chaleur. Faire l'application numérique.

D. Cycle de SEILIGER

Dans ce moteur DIESEL, le cycle décrit par "l'air" est celui représenté sur la figure ci-dessous dans le diagramme de CLAPEYRON ($p_A = 1 \text{ bar}$, $T_A = 293 \text{ K}$, $p_C = 65 \text{ bar}$, $T_D = 2173 \text{ K}$).

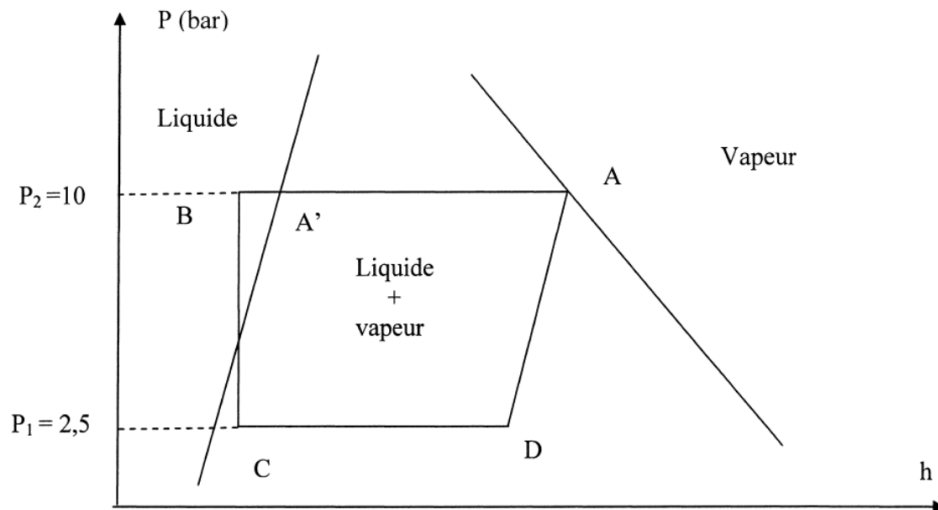


On suppose que l'air est un gaz parfait ($\gamma = 1,4$; $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$). On donne le taux de compression : $\alpha = \frac{V_A}{V_B} = 19$. La combustion a lieu dans les parties BC et CD du cycle.

- Exprimer et calculer les températures et les pressions des points A, B, C, D, E.
- Déterminer les différentes grandeurs : W_{ij} , Q_{ij} , ΔU_{ij} , ΔH_{ij} , ΔS_{ij} .
- Déterminer le rendement η du moteur.
- Quelle est la chaleur échangée par un kg d'air au cours de l'évolution entre les points B et D, quelle est la chaleur échangée entre les points E et A ? En déduire le travail fourni par un kg d'air au milieu extérieur au cours d'un cycle.
- La cylindrée ($V_A - V_B$) étant de 2 L, déterminer la puissance du moteur à 3000 tr.min^{-1} .

E. Machine frigorifique

Un réfrigérateur fonctionne en utilisant la chaleur échangée par un fluide (fréon) avec le milieu extérieur lors de changements d'état. Le cycle du fluide est représenté de façon schématique dans le diagramme (P, h) de la figure. Dans ce diagramme, l'ordonnée P représente la pression du fluide et l'abscisse h son enthalpie massique. Attention : ce schéma est là uniquement pour aider à la compréhension du problème et ne respecte ni la forme exacte des courbes ni les échelles numériques. Il ne sera donc pas utilisé pour les calculs



qui seront faits à l'aide des données du tableau.

Données numériques concernant les phases liquide et vapeur du fréon aux deux températures et pressions d'équilibre intervenant dans le cycle : $c = 5,0 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Pression de vapeur (bar)	Température d'ébullition (K)	Entropie massique du fréon liquide ($\text{J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	Entropie massique du fréon vapeur ($\text{J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$)	Enthalpie massique du fréon liquide (J.g^{-1})	Enthalpie massique du fréon vapeur (J.g^{-1})
$P_1 = 2,50$	$T_1 = 260$	$s_{L1} = 0,50$	$s_{V1} = 5,5$	$h_{L1} = 100$	$h_{V1} = 1,40 \times 10^3$
$P_2 = 10,0$	$T_2 = 300$	$s_{L2} = 1,00$	$s_{V2} = 5,0$	$h_{L2} = 300$	$h_{V2} = 1,50 \times 10^3$

Au point A, le fluide se trouve sous forme de vapeur saturée à $P_A = P_2 = 10,0 \text{ bar}$ et $T_A = T_2 = 300 \text{ K}$.

Les diverses transformations sont les suivantes :

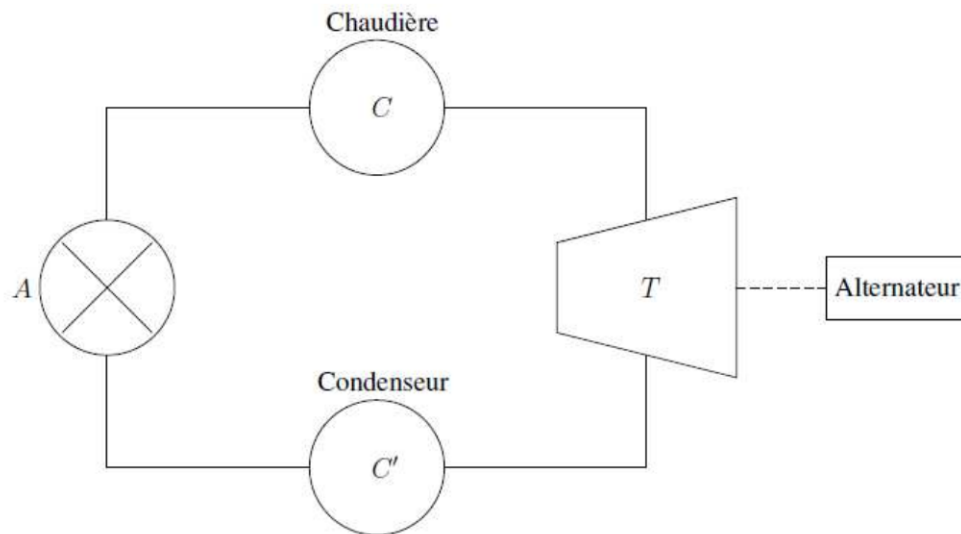
- Transformation AB supposée quasi-statique : partant du point A, on effectue une condensation à pression constante (jusqu'au point A') suivie d'un refroidissement jusqu'à la température $T_B = 290 \text{ K}$ au contact de la source chaude : le fluide est alors au point B, sous forme entièrement liquide.
 - Transformation BC : détente adiabatique et isenthalpique jusqu'à $P_C = P_1 = 2,50 \text{ bar}$ et $T_C = T_1 = 260 \text{ K}$. Le fluide est alors sous forme d'un mélange liquide-vapeur. Le taux de vapeur au point C est noté x_C .
 - Transformation CD : évaporation partielle à température et pression constantes au contact de la source froide jusqu'à obtenir un mélange liquide-vapeur toujours à $P_C = P_1 = 2,50 \text{ bar}$ et $T_C = T_1 = 260 \text{ K}$. Le taux de vapeur au point D est noté x_D .
 - Transformation DA : Compression adiabatique réversible ramenant au point A.
- Dans le cas d'un réfrigérateur domestique, qu'utilise-t-on en pratique comme source chaude ? Comme source froide ?
 - En utilisant les propriétés de la transformation DA et les valeurs du tableau, déterminer la valeur de x_D en fonction de s_{L1} , s_{V1} et s_{V2} , puis numériquement.
 - En déduire l'enthalpie massique h_D du système au point D en fonction de x_D , h_{L1} et h_{V1} , puis numériquement.
 - Montrer que l'enthalpie massique h_B au point B vaut 250 J.g^{-1} . On supposera le liquide incompressible. Le candidat qui n'arrivera pas à démontrer cette valeur pourra l'admettre pour la suite du problème.
 - En déduire la valeur de x_C en fonction de h_B , h_{L1} et h_{V1} , puis numériquement.

6. Déterminer littéralement puis numériquement les chaleurs massiques échangées par le système avec l'extérieur : q_{BC} et q_{DA} , pour les transformations BC et DA, q_{AB} pour la transformation AB, q_{CD} pour la transformation CD.
7. En déduire le travail massique total w mis en jeu au cours du cycle en fonction des chaleurs calculées à la question précédente, puis numériquement. Discuter du signe de ce travail. En pratique quel est le dispositif technologique d'un réfrigérateur qui apporte ce travail ?
8. Justifier la définition de l'efficacité du cycle : $e = \frac{q_{CD}}{w}$.
9. Calculer numériquement cette efficacité pour le cycle étudié.
10. En pratique dans un réfrigérateur quel est le dispositif technologique qui permet au fluide de faire la transformation BC ?

F. Étude d'une turbomachine

Un fluide (de l'eau, de masse volumique ρ) circule dans une turbomachine et décrit les cycles suivants :

- Une pompe A amène le liquide saturant, pris à la sortie du condenseur (état F), jusqu'à la pression p_1 de la chaudière. Cette opération est pratiquement adiabatique et on peut considérer qu'à la sortie de la pompe, le fluide est liquide (état G) à la température T_2 du condenseur.
- L'eau est alors injectée dans une chaudière C où elle se vaporise de façon isobare à la pression p_1 . À la sortie de la chaudière, la vapeur est saturante sèche à la température T_1 (état D).
- Elle subit ensuite une détente adiabatique et réversible dans une turbine T . À la sortie de la turbine, le fluide est à la température T_2 et à la pression p_2 d'un condenseur C' (point E) dans lequel il achève de se liquéfier de façon isobare (point F).



On donne $T_1 = 523 \text{ K}$ et $T_2 = 293 \text{ K}$.

1. Représenter les transformations dans un diagramme de CLAPEYRON (p, v).
2. Exprimer l'enthalpie massique de vaporisation du fluide à la température de 293 K .
3. Déterminer le titre en vapeur du fluide à la sortie de la turbine.
4. Déterminer l'enthalpie massique au point E .
5. Au point D , l'enthalpie massique vaut 2800 kJ.kg^{-1} . Déterminer le travail massique indiqué w_T fourni par la turbine à l'alternateur.
6. Justifier que l'on puisse négliger le travail massique indiqué de la pompe par rapport à celui de la turbine.

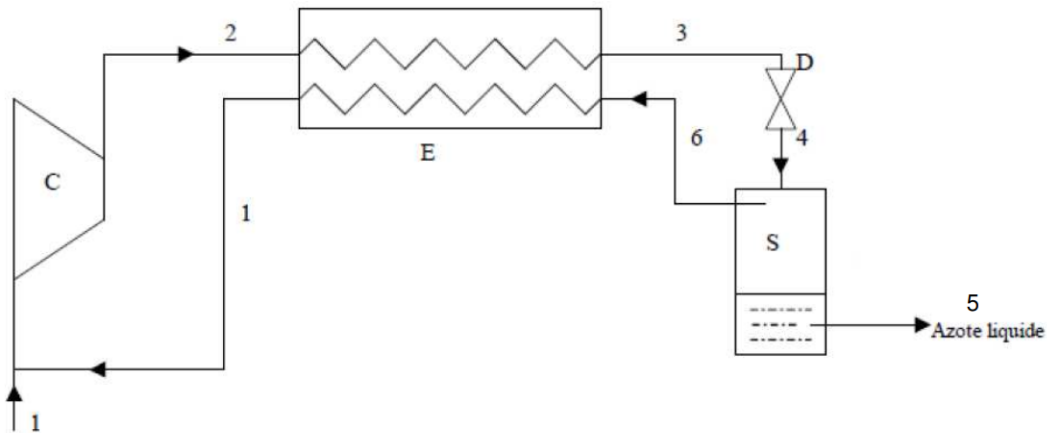
7. Déterminer le rendement de l'installation et le comparer à celui d'un cycle de Carnot réversible fonctionnant entre les mêmes températures extrêmes. Commenter.
8. Déterminer le débit massique de fluide pour obtenir une puissance fournie à l'alternateur égale à 100 kW.

Table thermodynamique de l'eau							
T_e (°C)	P_e (bar)	v_L (dm ³ .kg ⁻¹)	V_G (dm ³ .kg ⁻¹)	h_L (kJ.kg ⁻¹)	h_G (kJ.kg ⁻¹)	s_L (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹)	s_G (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
0	0,0061	0,9999	206199,03	-333,53	2501,01	-1,2212	9,156
5	0,0087	1,0001	147128,02	20,43	2510,22	0,0741	9,0254
10	0,0123	1,0005	106385,25	41,1	2519,42	0,1478	8,9005
15	0,0171	1,0013	77931,21	61,92	2528,59	0,2207	8,7811
20	0,0234	1,0022	57794,18	82,87	2537,74	0,2928	8,6669
25	0,0317	1,0034	43358,56	104,13	2546,85	0,3647	8,5576
30	0,0425	1,0047	32892,68	125,22	2555,92	0,4348	8,453
35	0,0563	1,0063	25215,39	146,33	2564,96	0,5039	8,3527
40	0,0738	1,0081	19522,6	167,46	2573,94	0,5719	8,2566
45	0,0959	1,0101	15257,85	188,58	2582,87	0,6388	8,1644
50	0,1235	1,0123	12031,59	209,69	2591,74	0,7046	8,0759
55	0,1576	1,0146	9568,2	230,78	2600,54	0,7694	7,9909
60	0,1994	1,0172	7670,58	251,84	2609,27	0,8331	7,9092
65	0,2503	1,0199	6196,46	272,88	2617,92	0,8957	7,8306
70	0,3119	1,0228	5042,08	293,89	2626,48	0,9574	7,755
75	0,3858	1,0258	4131,17	314,88	2634,96	1,0181	7,6821
80	0,4739	1,0291	3407,1	335,86	2643,33	1,0779	7,6119
85	0,5783	1,0325	2827,53	356,82	2651,61	1,1368	7,5441
90	0,7014	1,036	2360,52	377,78	2659,77	1,1949	7,4787
95	0,8455	1,0397	1981,83	398,74	2667,81	1,2521	7,4156
100	1,0135	1,0436	1672,87	419,71	2675,72	1,3087	7,3546

195	13,9782	1,1489	141,04	830,18	2789,63	2,284	6,4695
200	15,538	1,1565	127,35	852,74	2792,85	2,3315	6,432
205	17,2301	1,1644	115,2	875,41	2795,7	2,3788	6,3949
210	19,0622	1,1726	104,4	898,21	2798,15	2,4258	6,3582
215	21,0421	1,181	94,78	921,13	2800,18	2,4725	6,3218
220	23,1776	1,1899	86,18	944,19	2801,78	2,519	6,2857
225	25,4768	1,199	78,48	967,4	2802,93	2,5652	6,2499
230	27,9483	1,2086	71,57	990,77	2803,61	2,6113	6,2143
235	30,6004	1,2185	65,36	1014,1	2803,81	2,6568	6,1789
240	33,4419	1,2289	59,76	1037,81	2803,49	2,7026	6,1434
245	36,4819	1,2398	54,7	1061,72	2802,62	2,7482	6,1081
250	39,7294	1,2511	50,13	1085,85	2801,2	2,7938	6,0727
255	43,1939	1,263	45,97	1110,22	2799,19	2,8393	6,0372
260	46,885	1,2755	42,2	1134,85	2796,56	2,8849	6,0017
265	50,8125	1,2886	38,77	1159,78	2793,29	2,9305	5,9659
270	54,9865	1,3024	35,64	1185,01	2789,33	2,9761	5,9299
275	59,4173	1,317	32,78	1210,58	2784,65	3,0219	5,8935
280	64,1157	1,3324	30,17	1236,52	2779,21	3,0679	5,8568
285	69,0925	1,3488	27,77	1262,87	2772,94	3,1141	5,8196
290	74,359	1,3661	25,57	1289,64	2765,8	3,1606	5,7819
295	79,927	1,3845	23,54	1316,88	2757,72	3,2074	5,7434

G. Procédé de liquéfaction du diazote ●●○

La figure ci-dessous représente le schéma de principe du procédé LINDE-HAMPSON utilisé pour produire de l'azote liquide (état 5). L'azote entre dans le compresseur C dans l'état 1 ($P_1 = 1,00$ bar ; $T_1 = 290$ K) ; il y subit une compression isotherme qui l'amène à l'état 2. Il est alors refroidi, jusqu'à $T_3 = 160$ K à pression constante ($P_3 = P_2 = 200$ bar) dans l'échangeur E, avant d'être détendu jusqu'à la pression atmosphérique ($P_4 = P_5 = P_6 = P_1 = 1,00$ bar) dans le détendeur D adiabatique. L'azote liquide (état 5) est extrait du séparateur S ; la vapeur saturée sèche d'azote (état 6) est utilisée pour refroidir l'azote dans l'échangeur E ; on admettra que cette vapeur d'azote est ramenée à l'état 1 à la sortie de l'échangeur.

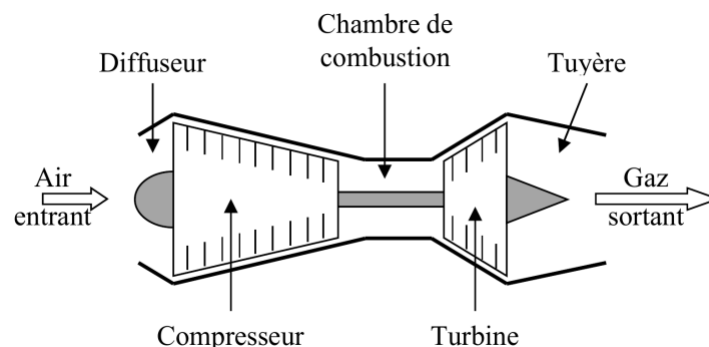


L'étude de ce procédé de liquéfaction sera effectuée en utilisant les propriétés thermodynamiques réelles lues sur le diagramme entropique fourni avec le sujet. Dans tout le problème, on négligera les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de situation.

1. Montrer que la détente dans le détendeur est isenthalpique.
2. Placer les points 1, 2, 3, 4, 6 sur le diagramme entropique.
3. On rappelle que la compression de l'azote s'effectue de façon isotherme et mécaniquement réversible de l'état 1 jusqu'à l'état 2 ($P_2 = 200$ bar). Déterminer les enthalpies et entropies massiques des points 1 et 2, puis calculer la quantité de chaleur fournie par le thermostat par kilogramme d'azote comprimé. Enfin, déterminer le travail échangé entre l'unité de masse d'azote et les parties mobiles du compresseur.
4. Déterminer le taux de vapeur (noté x) au point 4.
5. Quel doit être le débit en diazote pour pouvoir produire 50 kg d'azote liquide par heure?
6. En déduire la puissance du compresseur lorsqu'on produit 50 kilogrammes par heure d'azote liquide.

H. Turboréacteur simple flux CCINP PC 2020 • • •

On qualifie de turbomachines les machines transférant de l'énergie entre un fluide et un axe en rotation. Elles présentent deux grands avantages par rapport aux moteurs à piston : d'une part, leur conception nécessite moins de pièces et permet une masse plus légère ; d'autre part le fluide caloporteur peut être directement utilisé comme moyen de propulsion en le laissant se détendre dans une tuyère. En revanche, leur rendement chute drastiquement à faible puissance et leur temps de réponse est conséquent. Ainsi, les turbomachines sont omniprésentes en aéronautique mais complètement absentes, par exemple, du secteur automobile.



Cet exercice propose d'étudier un modèle simple de turbomachine : un turboréacteur à simple flux. Ces turboréacteurs étaient très utilisés au milieu du XX^e siècle, mais ils sont fortement consommateurs de carburant et très bruyants, si bien qu'ils sont aujourd'hui réservés à quelques avions militaires.

On considère un avion volant à une vitesse de croisière $V = 260 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ par rapport à l'air considéré au repos. À cette altitude, l'air est à 34,5 kPa et -40°C (état A). L'objectif est de calculer la force de poussée produite par le turboréacteur, donnée par

$$F = D_m (v_e - V)$$

avec D_m le débit d'air au sein du turboréacteur et v_e la vitesse d'éjection des gaz en sortie de tuyère, exprimée dans le référentiel lié à la tuyère.

Le turboréacteur est schématisé figure 9. L'air y traverse les cinq composants suivants, avec un débit massique constant $D_m = 45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

- Le diffuseur permet de ralentir le flux d'air de manière adiabatique réversible, de sorte qu'en sortie du diffuseur (état B) l'énergie cinétique du gaz est négligeable.
- Le compresseur comprime l'air avec un rapport de compression $r = P_C/P_B = 10$. Le compresseur étant imparfait, la compression adiabatique n'est pas parfaitement isentropique : en sortie du compresseur (état C), on a $T_C = 230^\circ\text{C}$.
- L'air est mélangé de manière isobare à du carburant enflammé dans la chambre de combustion, ce qui permet de porter la température du mélange à 1200°C (état D).
- La turbine a pour rôle de prélever juste assez d'énergie pour alimenter le compresseur. Le mélange de gaz y subit une détente adiabatique réversible (état E).
- Enfin, l'air subit également une détente adiabatique réversible dans la tuyère, sans échange de travail mais en augmentant fortement sa vitesse. À la sortie de la tuyère (état F), le mélange gazeux est rejeté dans l'atmosphère à la pression atmosphérique.

Toute l'étude est menée dans le référentiel lié au turboréacteur. Le mélange gazeux est assimilé à un gaz parfait d'exposant adiabatique $\gamma = 1,35$ et de capacité thermique isobare $c_p = 1,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ constants. Les variations d'énergie potentielle sont négligées. L'énergie cinétique du fluide est négligeable entre l'entrée du compresseur et la sortie de la turbine.

1. Représenter le cycle suivi par le mélange gazeux dans un diagramme (T, s) qualitatif. On rappelle qu'une isobare s'y représente par une branche d'exponentielle croissante.
2. Déterminer la température T_B en fonction de T_A , V et c_p ; puis la pression P_B en fonction de P_A , T_A , T_B et γ .
3. Déterminer le travail massique w_{comp} fourni à l'air par le compresseur.
4. Que vaudrait la température T'_C si la compression était idéale, c'est-à-dire isentropique avec le même rapport de compression? Quelle serait alors le travail massique w'_{comp} fourni par le compresseur? En déduire son rendement isentropique.
5. Déterminer la puissance $\mathcal{P}_{\text{ch}}$ reçue par le mélange gazeux dans la chambre de combustion.
6. Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, exprimer la température T_E en fonction de T_B , T_C et T_D . En déduire la valeur de la pression P_E .
7. Déterminer la température T_F à laquelle le mélange gazeux sort de la tuyère. En déduire la vitesse v_e d'éjection des gaz.
8. Déterminer la puissance $\mathcal{P}$ fournie au turboréacteur par la force propulsive. En déduire son rendement thermodynamique. Commenter la valeur obtenue en la comparant au rendement d'autres installations motrices.

