

DM SCIENCES PHYSIQUES N°2

Problème 1 : moteur diesel

Le Coradia Lint est le premier train à hydrogène au monde, propulsé par une pile à combustible. Il est basé sur le Coradia Lint 54, un modèle de locomotive diesel produit par Alstom. Ce type de machines thermiques, dédié aux voies non électrifiées, est très largement répandu sur les lignes régionales en Allemagne mais aussi en France.

Le moteur Diesel

Le moteur des locomotives diesel fut inventé en 1892 par l'ingénieur allemand Rudolf Diesel. Les premières locomotives « Diesel-mécanique » où la puissance est transmise par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse à pignons furent rapidement remplacées par des locomotives « Diesel-électrique » où le moteur diesel, en tournant, entraîne un alternateur. Ce dernier fournit de l'énergie à plusieurs moteurs électriques de traction.

On modélise le fonctionnement d'un moteur Diesel en considérant un système fermé, constitué de n moles de gaz parfait diatomique, décrivant le cycle réversible dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous.

→ Admission A_0A : la soupape d'arrivée de l'air est ouverte, celles d'arrivée de gasoil et celle d'échappement des gaz sont fermées. La pression est $P_{atm} = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et la température $T_{atm} = 300 \text{ K}$ au point A. Le volume passe de V_{min} à V_{max} de façon isobare.

→ Compression AB : les soupapes sont fermées. Le volume de l'air admis passe de V_{max} à V_{min} de manière adiabatique et réversible.

→ Injection et combustion BC : les soupapes sont fermées, sauf celle d'injection du gasoil. Une petite quantité de gasoil est injectée et la combustion se produit. Le volume augmente jusqu'à V_c . On modélise cette phase par une évolution isobare.

→ Détente CD : les soupapes sont toutes fermées. L'injection cesse en C et le mélange subit une détente adiabatique et réversible jusqu'à atteindre un volume V_{max} .

→ Refroidissement DA : la soupape d'échappement est ouverte. La pression diminue brutalement jusqu'à P_{atm} , le volume restant constant.

→ Ejection AA_0 : la soupape d'échappement est ouverte, les autres fermées. Le volume passe de V_{max} à V_{min} de façon isobare.

Q1- Représenter le cycle Diesel $A_0 - A - B - C - D - A - A_0$ dans le diagramme de Watt (P, V).

Q 2- On définit le rapport volumétrique de compression $x = \frac{V_{max}}{V_{min}}$, ainsi que le rapport volumétrique

de détente $y = \frac{V_{max}}{V_c}$. Exprimer les pressions P_B et P_D en fonction de P_{atm} , x , y et du rapport

$\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}}$, des capacités thermiques molaires à pression et à volume constant du gaz considéré.

Q 3- Définir le rendement thermodynamique, noté η_D , pour ce moteur et l'exprimer en fonction des températures T_A, T_B, T_C, T_D et du rapport γ .

Q 4- Exprimer η_D en fonction de x, y et γ puis faire l'application numérique en utilisant les données en fin de sujet. En réalité, le rendement observé est de l'ordre de 0,45. Commenter.

Q 5- Une locomotive à moteur Diesel roule à la vitesse constante $v = 140 \text{ km.h}^{-1}$. Le moteur tourne à la vitesse angulaire, elle aussi constante, de 2000 tr.min^{-1} , un tour correspondant à un cycle du moteur. Calculer la puissance mécanique moyenne du moteur de la locomotive (en utilisant la valeur du rendement observé) ainsi que sa consommation en gasoil pour 100 km. On utilisera les données en fin de

sujet.

Données :

Volume maximal du gaz dans le cycle diesel $V_{\max} = 57 \text{ L}$

Rapports des volumes dans le cycle diesel $x = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = 20$; et $y = \frac{V_{\max}}{V_c} = 7$

Rapport des capacités thermiques $\gamma = \frac{C_{pm}}{C_{vm}} = 1,4$

Rappel des expressions des capacités thermiques molaires à respectivement volume et pression constants :

$$C_{vm} = \frac{R}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad C_{pm} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

Constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

Enthalpie de combustion massique du gasoil : $\Delta_{\text{comb}} h = 46,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$

Problème 2: centrale nucléaire

Une centrale nucléaire utilise l'énergie dégagée par la fission nucléaire des atomes d'uranium placés au cœur du réacteur. La chaleur générée par la fission est transférée à un fluide caloporteur, généralement de l'eau qui circule dans le circuit primaire. L'eau du circuit primaire est portée à très haute température par l'effet des réactions de fission nucléaire qui ont lieu au sein du cœur du réacteur. Elle passe ensuite dans un pressuriseur qui maintient sa pression constante et égale à $p = 155 \text{ bar}$, puis effectue un échange thermique avec le circuit secondaire dans un générateur de vapeur : l'énergie thermique dégagée par l'eau du premier circuit vaporise alors l'eau du second, qui fait ensuite tourner plusieurs turbines génératrices d'énergie mécanique, elle-même enfin transformée en énergie électrique par un alternateur.

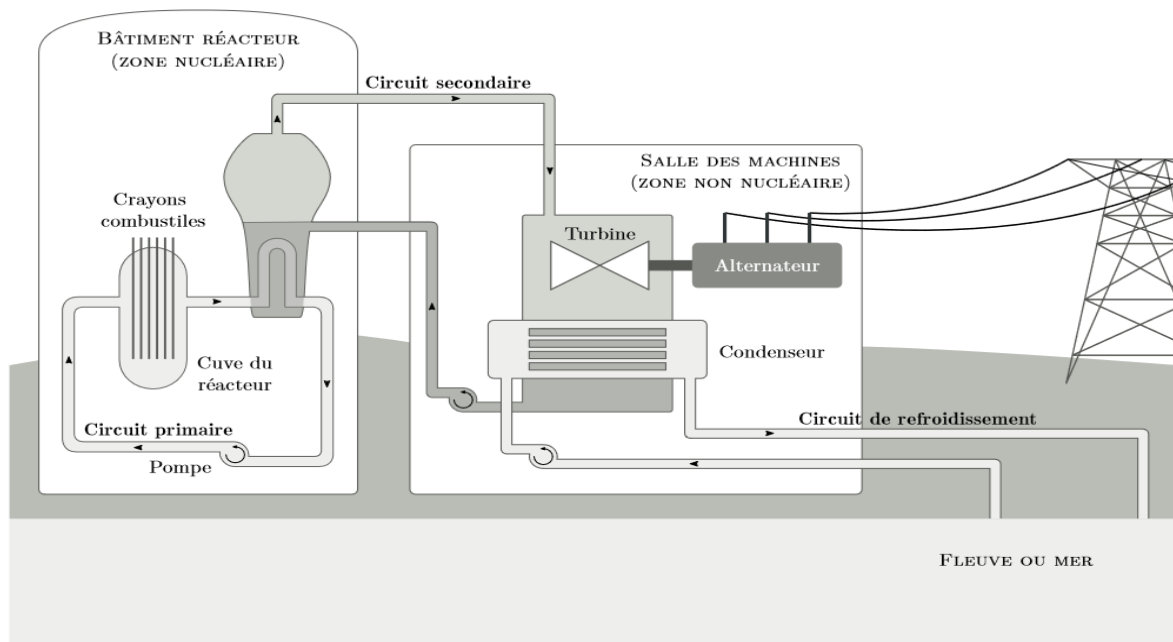


Figure 1 Principe d'un réacteur nucléaire. Librement adapté d'une illustration EDF.

A - Préliminaire

On considère un fluide en écoulement stationnaire, sans variation notable de son énergie mécanique, dans une machine. Il y entre dans l'état (pression p_e , température T_e , enthalpie massique h_e) et en sort dans l'état (pression p_s , température T_s , enthalpie massique h_s). On note w_u le travail utile massique et q le transfert thermique massique reçus algébriquement par le fluide lors de la traversée de la machine.

1- Établir soigneusement la relation vérifiée dans ce cas par $h_s - h_e$, w_u et q .

B - Cycle de Hirn

On considère le circuit secondaire, décrit par la figure 5 :

- la pompe d'alimentation porte l'eau liquide juste saturée (état 0) de la basse pression $p_3 = 0,040$ bar du condenseur à la pression $p_2 = 85,8$ bar du générateur de vapeur de façon isentropique (état 1) ;
- l'eau liquide entre ensuite dans le générateur de vapeur, où elle est chauffée de façon isobare jusqu'à la température T_2 du changement d'état (état 1' - liquide juste saturant), puis est totalement vaporisée jusqu'à l'état 2 (vapeur saturante sèche). Le surchauffeur (2 - 2') fonctionne de façon isobare ;
- la vapeur sèche produite (état 2') subit ensuite une détente isentropique dans une turbine calorifugée amenant le système dans l'état 3, à la température T_0 .
- le mélange diphasé (état 3) pénètre ensuite dans le condenseur pour y être totalement condensé (état 0) .

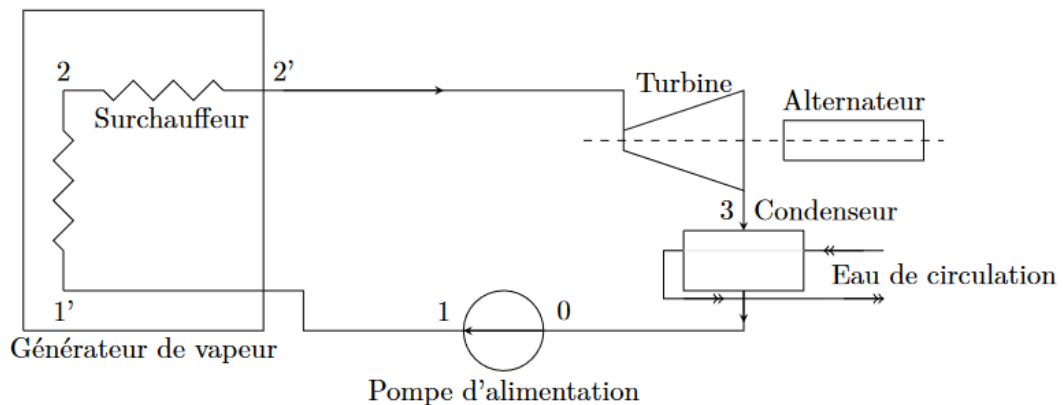


Figure 5 Cycle de Hirn.

On se place en régime stationnaire. On suppose l'eau liquide incompressible et on néglige le travail consommé par la pompe devant les autres termes énergétiques de l'installation.

Dans la suite, les grandeurs thermodynamiques indicées par i sont relatives à l'état i.

On donne $T_0 \approx T_1 = 29^\circ\text{C}$, $T_2 = 300^\circ\text{C}$ et $T_2' = 500^\circ\text{C}$, ainsi qu'un extrait de tables thermodynamiques pour l'eau sur le tableau 1. Les données suivantes sont également fournies :

- chaleur latente massique de vaporisation de l'eau à T_2 : $L_v(T_2) = 1404 \text{ kJ.kg}^{-1}$;
- enthalpie et entropie massiques respectives de la vapeur d'eau sèche à 500°C et $85,8$ bar : $h = 3391 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $s = 6,68 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Pression de vapeur saturante (bar)	Température ($^\circ\text{C}$)	Liquide juste saturé		Vapeur saturante sèche	
		s	h	s	h
85,8	300	3,25	1345	5,70	
0,040	29	0,42	121	8,47	2554

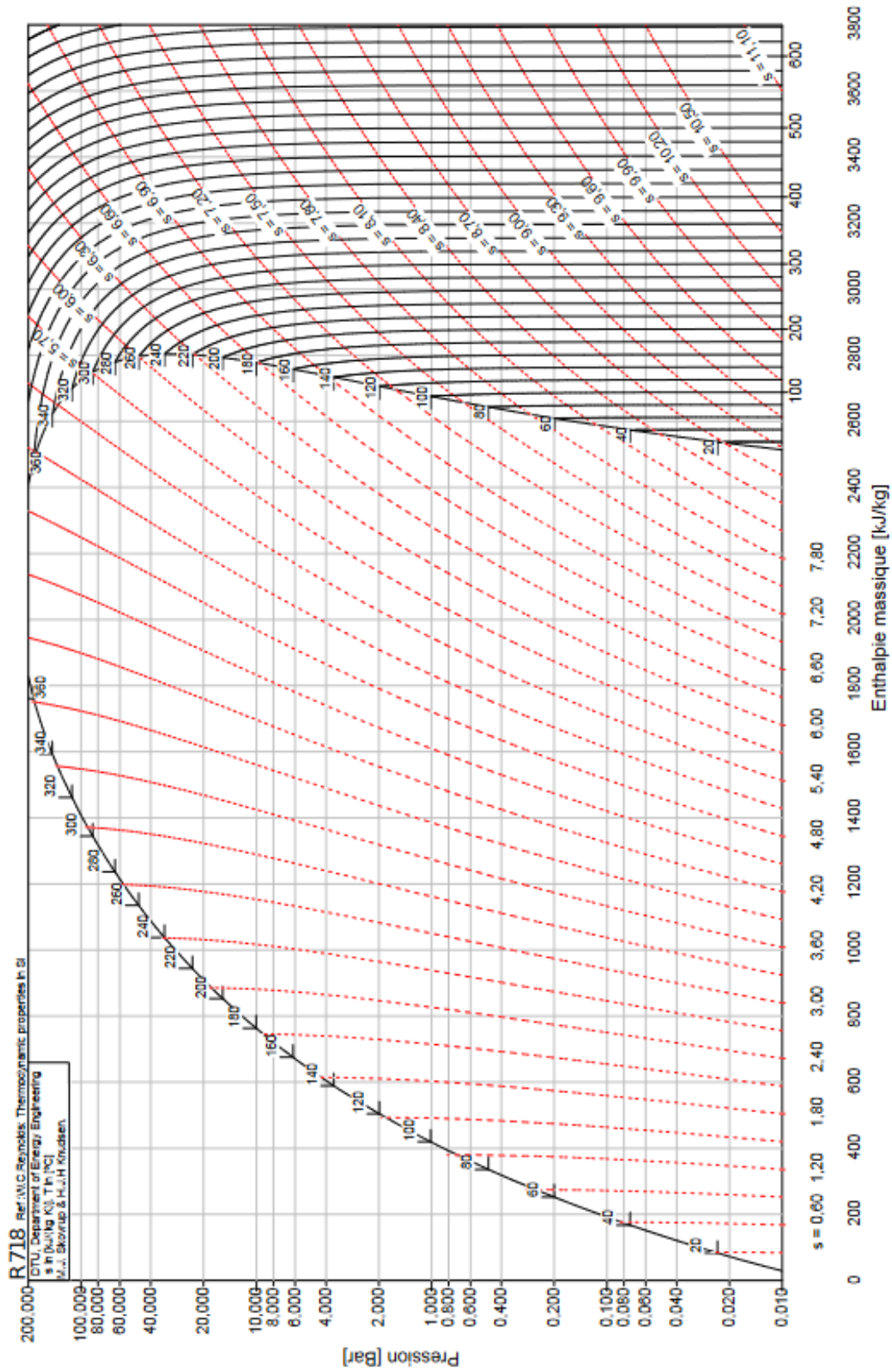
Tableau 1 Quelques données thermodynamiques pour l'eau. L'enthalpie massique h est exprimée en kJ.kg^{-1} et l'entropie massique en $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

- Expliquer pourquoi $T_0 \approx T_1$ et $h_0 \approx h_1$. Préciser l'allure d'une transformation isentropique dans le domaine liquide du diagramme des frigorisites ($\log(P), h$) .
- Donner le nom des différentes courbes du diagramme des frigorisites ($\log(P), h$) du document réponse 1 et y représenter précisément le cycle décrit par le fluide.
- Calculer, à partir de données du tableau 1 pour plus de précision, le titre massique en vapeur ainsi que l'enthalpie massique de la vapeur à la sortie de la turbine.
- Définir et calculer l'efficacité η de ce cycle.
- Établir l'expression de l'efficacité de Carnot η_c d'une machine cyclique ditherme fonctionnant en

réalité, cette puissance disponible n'est que de 960 MW : proposer une explication.

Eau du circuit	Débit massique (t·h ⁻¹)	Température (°C)	Pression (bar)	Enthalpie massique (kJ·kg ⁻¹)
Eau sortie condenseur		32,5	0,050	136,0
Eau sortie réchauffeur 4		181,1		768,0
Eau sortie réchauffeur 5		181,7		772,2
Eau entrée échangeurs principaux	5412,1	219,3	60	941,7
Vapeur sortie échangeurs principaux	5412,1	268,7	54	2788,4
Vapeur admission turbine HP	5001,9	266,4	52	2787,1
Vapeur alimentant le sécheur surchauffeur	403,7	266,4	52	2787,1
Vapeur soutirage 6 sortie turbine HP	214,3	223,3	26	2682,5
Vapeur soutirage 5 sortie turbine HP	208,4	203,4	17,6	2622,6
Vapeur soutirage 4 sortie turbine HP	402,1	183,8	11,5	2562,8
Vapeur à l'échappement de la turbine HP	4177,1	183,8	11,5	2562,8
Vapeur admission turbine BP	3704,0	264,1	11,2	2970,4
Vapeur soutirage 3 sortie turbine	281,4	137,8	3,6	2731,5
Vapeur soutirage 2 sortie turbine	235,4	97,4	0,97	2538,9
Vapeur soutirage 1 sortie turbine	134,2	60,8	0,22	2377,8
Vapeur entrée condenseur (en provenance de la turbine BP)	3053,0	32,9	0,050	2242,2

Tableau 2 Caractéristiques thermodynamiques du cycle.



La pression est exprimée en bar, l'entropie massique en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, l'enthalpie massique en $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ et la température en $^{\circ}\text{C}$.