# 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 boite 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 cidessous.

- $\rightarrow$  Admission A<sub>0</sub>A: 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  $P_{atm} = 1,00.10^5 Pa$  et la température  $T_{atm} = 300 \, K$  au point A. Le volume passe de  $V_{min}$  à  $V_{max}$  de façon isobare.
- $\rightarrow$  Compression AB : les soupapes sont fermées. Le volume de l'air admis passe de  $V_{max}$  à  $V_{min}$  de manière adiabatique et réversible.
- $\rightarrow$  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.
- $\rightarrow$  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  $V_{max}$ .
- $\rightarrow$  Refroidissement DA : la soupape d'échappement est ouverte. La pression diminue brutalement jusqu'à  $P_{\it atm}$ , le volume restant constant.
- $\rightarrow$  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  $\eta_D$ , pour ce moteur et l'exprimer en fonction des températures  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_D$  et du rapport  $\gamma$ .
- **Q 4-** Exprimer  $\eta_D$  en fonction de x, y et y 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<sup>-1</sup>, 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  $V_{max} = 57 L$ 

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 :

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

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

Enthalpie de combustion massique du gasoil :  $\Delta_{comb} h = 46.8 \, MJ.kg^{-1}$ 

### 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 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.

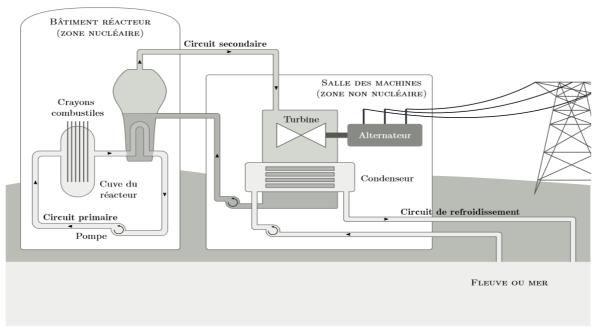


Figure 1 Principe d'un réacteur nucléaire. Librement adapté d'une illustration EDF.

#### 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<sub>2</sub> 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).

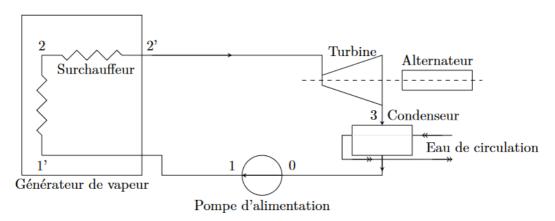


Figure 5 Cycle de Hirn.

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  $T_0 \approx T_1 = 29 \,^{\circ}C$ ,  $T_2 = 300 \,^{\circ}C$  et  $T_2' = 500 \,^{\circ}C$ , 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  $T_2$  :  $L_v(T_2) = 1404 \, kJ.kg^{-1}$  ;
- enthalpie et entropie massiques respectives de la vapeur d'eau sèche à 500 °C et 85,8 bar :  $h=3391\,kJ.kg^{-1}et\ s=6.68\,kJ.kg^{-1}\ .K^{-1}$  .

Pression de vapeur	Température	Liquide juste saturé		Vapeur saturante sèche	
saturante (bar)	(°C)	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<sup>-1</sup> et l'entropie massique en kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>.

- 2- 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 frigoristes (log(P),h).
- 3- Donner le nom des différentes courbes du diagramme des frigoristes (log(P),h) du document réponse 1 et y représenter précisément le cycle décrit par le fluide.
- 4- 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.
- 5- Définir et calculer l'efficacité η de ce cycle.
- 6- Établir l'expression de l'efficacité de Carnot  $\eta_C$  d'une machine cyclique ditherme fonctionnant en

moteur entre une source chaude à la température  $T_C$  et une source froide à la température  $T_F$ . La calculer en prenant respectivement pour  $T_F$  et  $T_C$  les températures minimale et maximale du fluide dans le circuit secondaire.

Commenter en justifiant l'écart éventuel avec la valeur de l'efficacité obtenue à la question précédente.

#### C – Cycle à double surchauffe

Les gouttes d'eau liquide peuvent endommager la turbine. Aussi, est-il avantageux d'utiliser une turbine à deux corps permettant d'obtenir un titre massique en vapeur en sortie de turbine plus élevé grâce à une double surchauffe. Le cycle de Hirn précédent est modifié :

- de l'eau (état 1) est admise dans le générateur de vapeur (GV) d'où elle sort à l'état de vapeur saturante sèche (état 2) ;
- elle passe ensuite dans le premier surchauffeur isobare (2-2), pour être détendue dans la turbine haute pression (HP) (2'-4);
- la vapeur sèche (état 4) est envoyée dans un second surchauffeur isobare (4 4') pour être ensuite détendue dans l'étage de turbine basse pression (BP) (4' 5).
- le fluide dans l'état 5 se condense totalement à la température  $T_0$  dans le condenseur isobare (5-0);
- le liquide juste saturé (état 0) est ensuite comprimé de façon isentropique à la pression  $p_2$  du générateur de vapeur (état 1).

Les détentes dans les turbines, calorifugées, sont supposées isentropiques. On se place encore une fois en régime stationnaire et on a toujours  $T_0 \approx T_1 = 29\,^{\circ}C$ ,  $T_2 = 300\,^{\circ}C$  et  $T_2$ '=  $500\,^{\circ}C$ . De plus,  $T_4 = 300\,^{\circ}C$  et  $T_4$ '=  $500\,^{\circ}C$ .

7- Représenter précisément le cycle décrit par le fluide dans le diagramme des frigoristes du document réponse 1. Définir et calculer l'efficacité de de cycle. Calculer le titre massique au point 5.

### D - Cycle réel d'une tranche nucléaire

Pour des raisons technologiques, des limitations de pression et de température interviennent directement dans le choix des caractéristiques du cycle eau-vapeur de ces centrales thermiques nucléaires, d'où des cycles moins « poussés » que dans les centrales thermiques classiques.

Le cœur du réacteur est réfrigéré et modéré par l'eau, laquelle vient se refroidir dans les échangeurs principaux (appelés générateurs de vapeur). Les mélangeurs ou réchauffeurs sont notés R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub> et R<sub>6</sub> (figure 6).

On se place toujours en régime stationnaire.

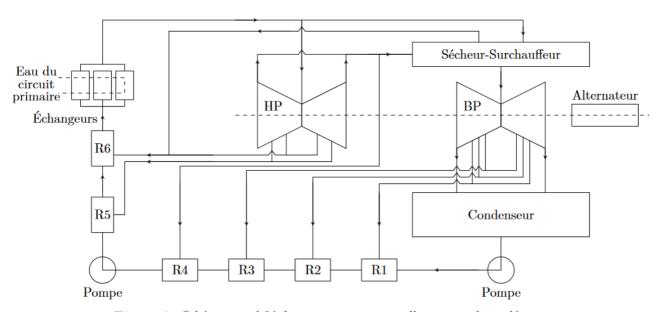


Figure 6 Schéma simplifié du circuit eau-vapeur d'une centrale nucléaire.

8- Calculer l'efficacité du cycle en vous appuyant notamment sur les caractéristiques thermodynamiques du cycle fournies dans le tableau 2. En déduire la puissance disponible aux bornes de l'alternateur. En

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

Eau du circuit	Débit massique $(\mathbf{t} \cdot \mathbf{h}^{-1})$	Température (°C)	Pression (bar)	Enthalpie massique $(kJ\cdot kg^{-1})$
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.

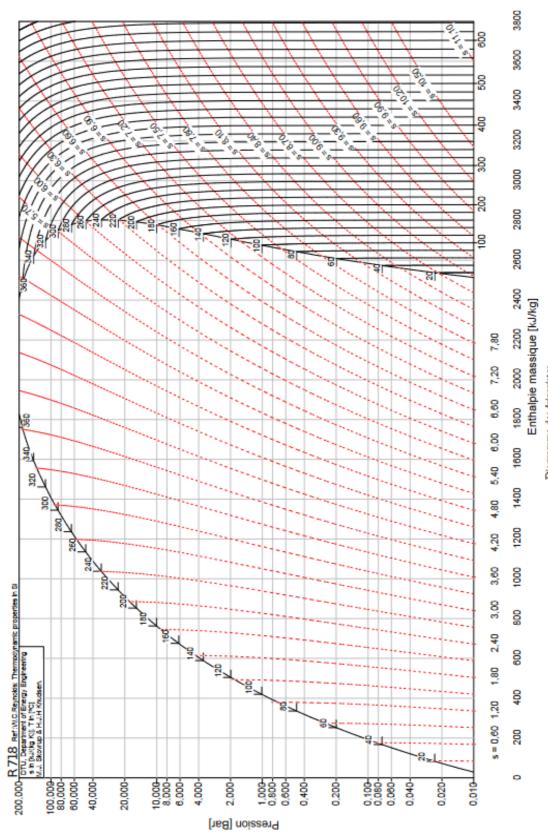


Diagramme des frigoristes. La pression est exprimée en bar, l'entropie massique en  $kJ\cdot kg^{-1}\cdot l$  enthalpie massique en  $kJ\cdot kg^{-1}\cdot kg^{-1}\cdot l$ .