

Thermodynamique

Extraits de CCP TSI 2012.

Deuxième partie : propulsion du sous-marin

Les systèmes de propulsion doivent répondre à quelques grandes exigences, en particulier être silencieux pour ne pas être repérés et fonctionner de manière anaérobie, c'est-à-dire sans utiliser d'air, vu qu'en immersion totale le milieu extérieur est l'eau et non l'air.

La propulsion nucléaire est un type de propulsion largement utilisée dans les sous-marins militaires à l'heure actuelle.

Les *AIP* (Air Independent Propulsion) représentent une autre classe de propulsion fonctionnant de manière classique, sans apport d'air et permettant de s'affranchir du danger nucléaire. Parmi ces *AIP*, nous nous intéresserons au moteur Stirling.

Les questions 3/ et 4/ sont indépendantes.

3/ Propulsion nucléaire

Un réacteur nucléaire fournit de l'énergie grâce à la fission nucléaire de combustible tel que l'uranium (circuit primaire). Cette énergie permet de vaporiser de l'eau entraînant une turbine couplée à un alternateur (figure 3 page suivante). Celui-ci produit de l'électricité pour alimenter un moteur électrique faisant tourner l'hélice du sous-marin.

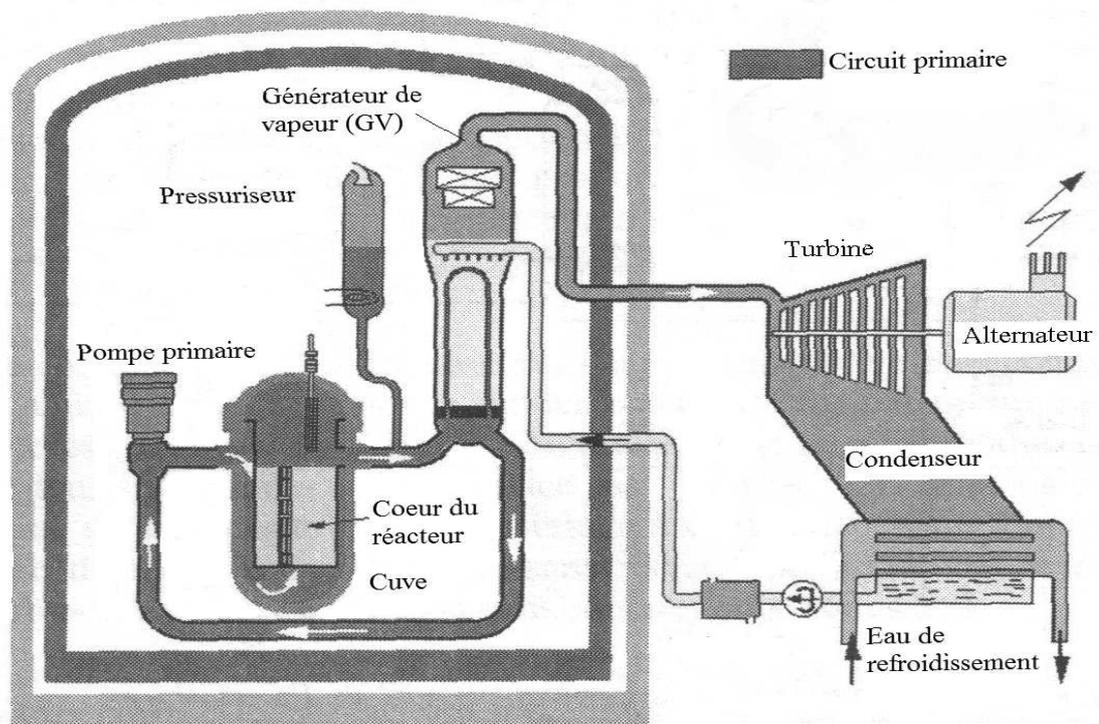


Figure 3 : moteur à propulsion nucléaire

Nous nous intéresserons ici uniquement au circuit secondaire représenté schématiquement ci-dessous (figure 4) :

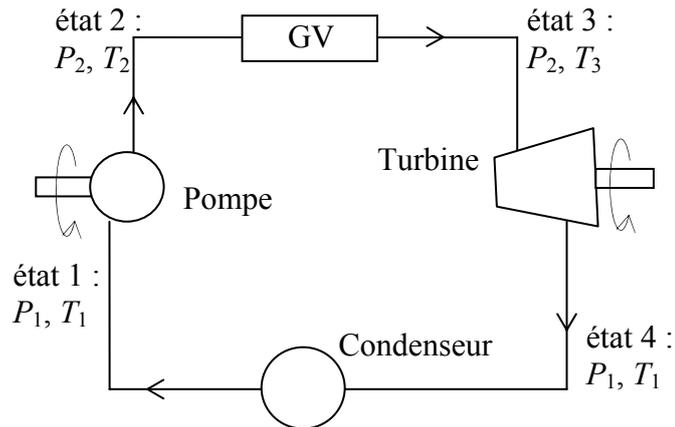


Figure 4 : circuit secondaire

L'eau entre dans la pompe sous forme de liquide saturé (état 1), puis est comprimée de façon isentropique (adiabatique réversible) à la pression qui règne dans le générateur de vapeur (GV). En entrant dans le GV, l'eau se trouve sous forme de liquide comprimé à la pression P_2 (état 2). Elle en ressort sous forme de vapeur (état 3) à la même pression P_2 puis pénètre dans la turbine où elle se détend de façon isentropique (adiabatique réversible) en entraînant l'arbre de l'alternateur. A la sortie de la turbine (état 4), l'eau est diphasée. Ce mélange liquide-vapeur est alors liquéfié à pression constante dans le condenseur et en sort dans l'état 1.

3.1/ Les quatre composants de ce cycle (dit cycle de Rankine), soit la pompe, le GV, la turbine et le condenseur, fonctionnent avec un écoulement en régime permanent.

L'objectif des questions qui suivent est d'établir l'expression du premier principe dans ce cas. Pour cela, on considère un composant (C) et on définit le système fermé Σ_f de la façon suivante (figure 5) :

- à l'instant t , Σ_f est constitué du fluide contenu dans (C) et de la masse dm_e de fluide entrant dans (C) entre t et $t + dt$
- à l'instant $t + dt$, Σ_f est constitué du fluide contenu dans (C) et de la masse dm_s de fluide sortant de (C) entre t et $t + dt$.

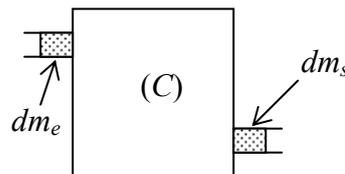


Figure 5 : système fermé Σ_f

3.1.1/ Justifier très précisément l'égalité $dm_e = dm_s$. On notera dm cette quantité.

3.1.2/ Etablir l'écriture suivante du premier principe :

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = q + w_i$$

Dans cette formule, la notation Δ désigne la variation de la grandeur physique entre l'entrée et la sortie du composant, q représente le transfert thermique massique reçu par le fluide dans ce composant et w_i le travail massique indiqué reçu par le fluide de la part des parties mobiles du composant. Les grandeurs h , e_c et e_p sont respectivement l'enthalpie massique, l'énergie cinétique massique et l'énergie potentielle massique du fluide.

Dans la suite, on négligera les variations de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle. De plus, le travail massique indiqué n'intervient ni dans le GV ni dans le condenseur et les évolutions au sein de la pompe et de la turbine sont adiabatiques.

3.2/ On utilise le diagramme entropique de l'eau dans lequel la température est placée en ordonnée et l'entropie massique en abscisse (figure 6).

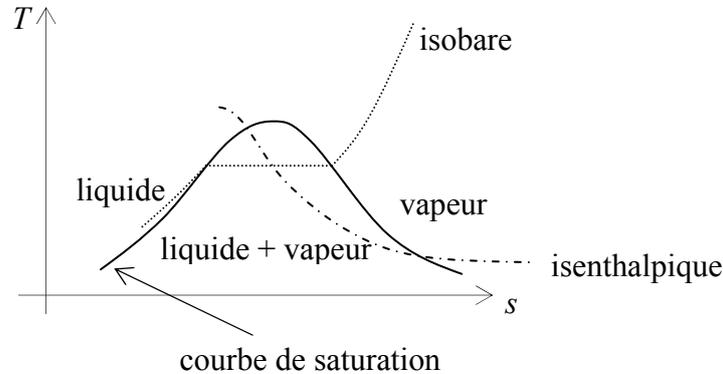


Figure 6 : diagramme entropique

Dans ce diagramme, quelle est l'allure de la courbe représentative d'une évolution isentropique ?

3.3/ On donne $P_2 = 50 \cdot 10^5$ Pa, $P_1 = 10^5$ Pa et $T_3 = 773$ K (500 °C). Les points 1 et 2 figurent déjà sur le diagramme (T, s) de l'eau fourni dans le document réponse 1. Sur ce même diagramme placer les points 3 et 4 correspondant aux états 3 et 4 du fluide ainsi que le cycle de Rankine décrit par le fluide. On rappelle que le document réponse 1 doit être joint à la copie.

3.4/ A l'aide du diagramme (T, s) fourni dans le document réponse 1, donner les valeurs numériques de T_1 , h_3 , h_4 , s_4 , $s_v(T_1)$ entropie massique de la vapeur juste saturante à T_1 , et $s_l(T_1)$ entropie massique du liquide juste saturé à T_1 .

3.5/ Déduire de la question précédente la valeur numérique du titre en vapeur x_4 à la sortie de la turbine. On exprimera pour cela s_4 en fonction de x_4 , $s_v(T_1)$ et $s_l(T_1)$.

3.6/ On donne $h_1 = 440$ kJ.kg⁻¹ et $h_2 = 475$ kJ.kg⁻¹. A l'aide de la question **3.1.2/**, déterminer les expressions et les valeurs numériques de q_{cond} et q_{GV} , les transferts thermiques massiques reçus par le fluide, respectivement dans le condenseur et dans le GV. Déterminer également les expressions et les valeurs numériques des travaux massiques indiqués dans la pompe et la turbine, respectivement w_{pompe} et w_{turb} .

3.7/ Une fraction du travail produit par la turbine sert à entraîner la pompe. En déduire le travail massique indiqué w_{alt} récupérable au niveau de l'alternateur. Donner sa valeur numérique.

3.8/ Définir et calculer numériquement le rendement du cycle de Rankine η .

4/ Moteur Stirling

Le moteur Stirling a été développé au XIX^e siècle et a rapidement été délaissé au profit des moteurs à combustion interne (à essence et diesel) ; il pourrait cependant connaître un essor significatif dans le futur compte-tenu, entre autres, des avantages qu'il présente en matière de protection de l'environnement. Par exemple, le sous-marin civil SAGA développé dans les années 80 et destiné à l'industrie pétrolière offshore est équipé d'un moteur Stirling.

La structure du moteur est représentée sur la figure 7.

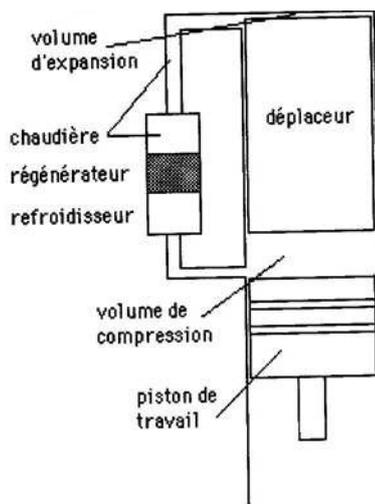


Figure 7 : schéma d'un moteur Stirling

Dans une enceinte principale, peuvent se mouvoir d'une part un piston de travail et d'autre part un déplaceur, dont le rôle est de transvaser le fluide de travail depuis le volume de compression (zone froide) vers le volume d'expansion (zone chaude) et réciproquement ; lors du transvasement, le fluide parcourt dans un sens ou dans l'autre la chaudière à la température T_3 , le régénérateur et le refroidisseur à la température T_1 .

Le fluide de travail décrit le cycle constitué des 4 phases suivantes (figure 8) :

- pendant la phase de compression 1 - 2, le déplaceur se trouve en position haute et le fluide, entièrement situé dans la zone froide, est comprimé par le piston de travail dans sa course vers le haut.

- Au point 2, le piston est au point mort haut et le déplaceur est ramené en position basse, ce qui a pour effet de transvaser le fluide comprimé, qui passe pendant la phase 2 - 3 de la zone froide vers la zone chaude, commençant par se réchauffer dans le régénérateur puis recevant un transfert thermique de la chaudière.

- Pendant la phase de détente 3 - 4, le fluide se détend dans le volume d'expansion où il continue d'être chauffé par les tubes de la chaudière. Cette détente a pour effet de repousser le déplaceur et le piston de travail vers le bas.

- Pendant la phase 4 - 1, après que le piston ait atteint le point mort bas, le déplaceur est ramené en position haute, ce qui a pour effet de transvaser le fluide de la zone chaude (volume d'expansion) vers la zone froide (volume de compression). Au cours de ce transfert, le fluide commence par céder un transfert thermique au régénérateur, puis il est refroidi par le refroidisseur.

En pratique, le régénérateur est un échangeur de chaleur : il reçoit un transfert thermique du gaz chaud dans un sens de circulation, qu'il restitue dans l'autre sens, lorsque le gaz est froid.

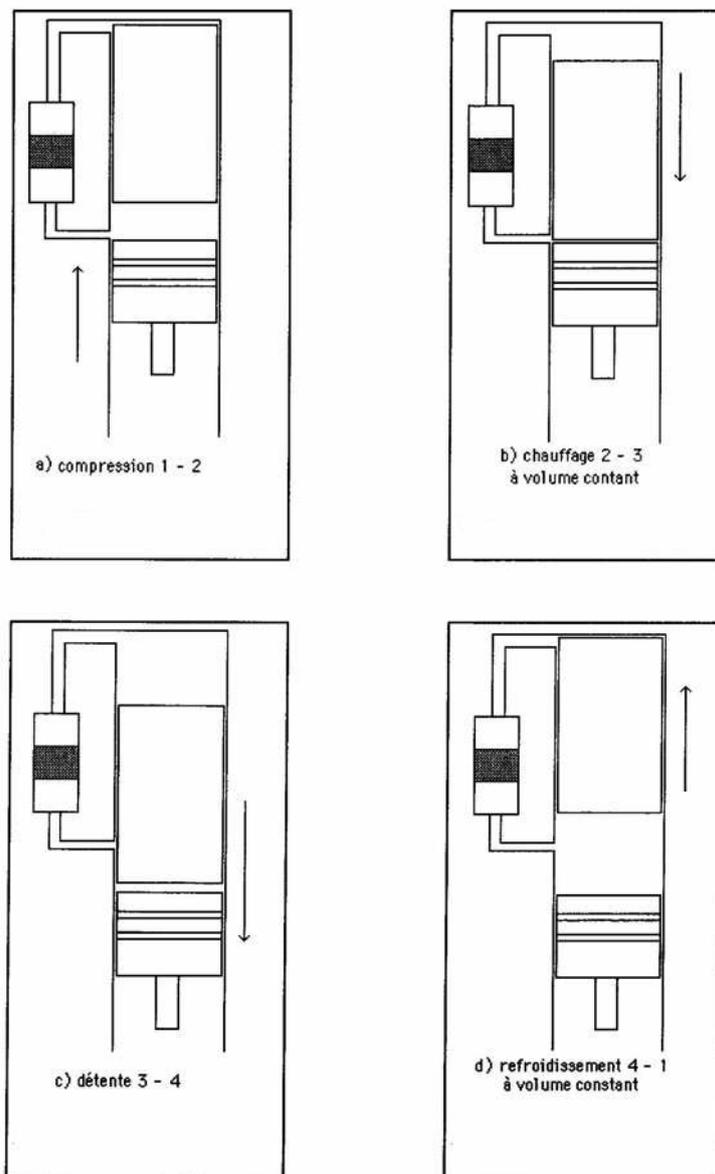


Figure 8 : cycle du moteur Stirling

Nous étudierons le cycle de Stirling idéal ; au cours de celui-ci, n mol de gaz parfait de rapport

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ subissent les évolutions suivantes :

- compression 1 - 2 isotherme réversible à la température $T_1 = 300$ K,
- échauffement 2 - 3 isochore jusqu'à l'état 3 de température $T_3 = 600$ K,
- détente 3 - 4 isotherme réversible à la température T_3 ,
- refroidissement 4 - 1 isochore jusqu'à l'état 1.

Il n'y a pas de travail autre que celui des forces de pression. On rappelle que $C_v = \frac{nR}{\gamma - 1}$.

4.1/ Représenter l'allure du cycle dans le diagramme (P, V) . Comment peut-on savoir, sans calcul, si le cycle proposé est celui d'un moteur ou d'un récepteur ?

4.2/ Exprimer le travail reçu par le fluide au cours de la compression W_{12} en fonction de n, R, T_1 et du rapport de compression $\rho = \frac{V_1}{V_2}$. En déduire le transfert thermique Q_{12} reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de n, R, T_1 et ρ . Préciser les signes de W_{12} et Q_{12} .

4.3/ Exprimer le transfert thermique Q_{23} reçu par le fluide au cours de l'échauffement en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ . Préciser son signe.

4.4/ Exprimer le travail reçu par le fluide au cours de la détente W_{34} en fonction de n, R, T_3 et ρ . En déduire le transfert thermique Q_{34} reçu par le fluide au cours de cette détente en fonction de n, R, T_3 et ρ . Préciser les signes de W_{34} et Q_{34} .

4.5/ Exprimer le transfert thermique Q_{41} reçu par le fluide au cours du refroidissement en fonction de n, R, T_1, T_3 et γ . Préciser son signe.

4.6/ Le régénérateur étant idéal, on a $Q_{23} + Q_{41} = 0$. Quelle est alors, sur le plan énergétique, la grandeur coûteuse (pour l'utilisateur) de ce système sur un cycle ?

La grandeur énergétique utile est le travail fourni par le fluide sur le cycle. En déduire l'expression du rendement η' en fonction de T_1 et T_3 . Commenter puis faire l'application numérique.

△ △ △ Fin du devoir.

Document réponse 1

Diagramme T - S de l'eau

