

**DM SCIENCES PHYSIQUES N° 2**  
**Pb 1 à rendre pour le lundi 21 septembre**  
**Pb2 à rendre pour le mercredi 30 septembre**

**Problème 1 :**

**Pompe à chaleur**

La pompe à chaleur est un dispositif qui, en mode "chauffage" puise l'énergie thermique dans l'air, dans le sol ou dans l'eau des nappes phréatiques, pour la transférer vers le local à réchauffer.

Elle est constituée d'un circuit fermé dans lequel circule un fluide caloporteur à l'état liquide, gazeux ou biphasé selon les éléments qu'il traverse. La circulation se fait en régime permanent ; on néglige les variations d'énergies cinétique et de pesanteur.

**I- Diagramme de Mollier**

Le diagramme de Mollier (figure 1) représente le logarithme de la pression  $p$  en fonction de l'enthalpie massique  $h$  du fluide caloporteur et permet ainsi de représenter l'évolution de l'état thermodynamique du fluide au cours du cycle de la pompe à chaleur.

1- Montrer qu'à pression constante, dans les domaines du fluide monophasé, la température  $T$  est une fonction croissante de  $h$ .

2- Comment lit-on sur ce diagramme ce qui se nommait autrefois la chaleur latente massique de vaporisation à la pression  $p$  ?

3- Cette question concerne les courbes isothermes dans le diagramme de Mollier.

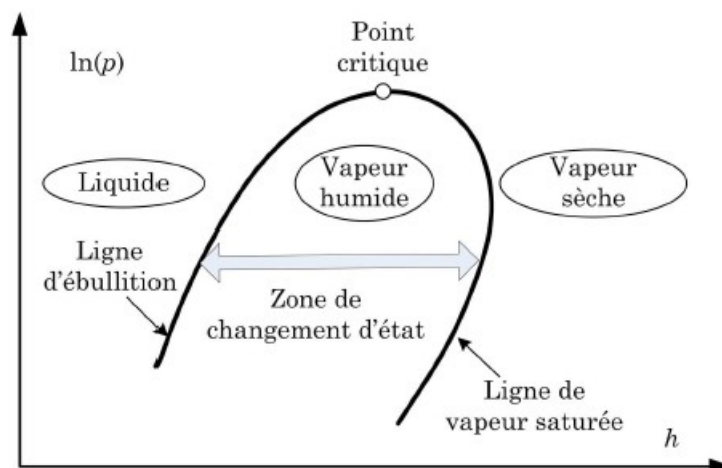


FIG. 1: *Diagramme de Mollier simplifié.*

a- Quelle est a priori leur allure pour la phase liquide, supposée incompressible et indilatable (justifier) ?

b- Quelle est a priori leur allure pour la phase gazeuse, modélisée comme un gaz parfait (justifier) ?

c- Quelle est a priori leur allure dans la zone de changement d'état ?

4- On donne l'expression de la différentielle de l'enthalpie massique  $h$ , considérée comme fonction de l'entropie massique  $s$  et de la pression  $p$ ,  $dh = Tds + v dp$ . On notera  $v$  le volume massique. Montrer que, dans le diagramme de Mollier, la pente des courbes isentropiques est positive.

5- Montrer que, sur une courbe isenthalpique du diagramme de Mollier, l'entropie est une fonction décroissante de la pression.

6- On note  $h_A$  et  $h_B$  les enthalpies massiques du fluide aux points A et B du circuit. Le fluide reçoit d'une

part le travail massique utile, fourni par le compresseur,  $w$  (et qui ne comprend donc pas le travail des forces de pression nécessaire pour faire entrer et sortir le fluide du volume de contrôle), d'autre part l'énergie thermique massique  $q$ . Montrer que  $h_B - h_A = w + q$ .

## II- Cycle de la pompe à chaleur :

Le cycle de la pompe à chaleur se compose de quatre étapes (figure 2), en dehors desquelles les échanges thermiques ou mécaniques sont supposés nuls :

- Compression : la vapeur sèche subit une compression adiabatique et réversible qui l'amène de l'état 1 ( $p_1, T_1$ ) à l'état 2 ( $p_2, T_2$ ). On note  $w$  le travail massique reçu par le fluide.
- Condensation : le gaz se liquéfie totalement à pression constante  $p_2$  jusqu'à l'état de liquide saturant. Il cède de l'énergie à la source chaude, et l'on note  $q_{23}$  l'énergie thermique massique reçue par le fluide.
- Détente : le fluide traverse un tuyau indéformable sans pièce mobile et ne permettant pas les échanges thermiques.

La pression du fluide redescend jusqu'à  $p_1$  et sa température vaut alors  $T_4$ .

- Évaporation : le liquide s'évapore totalement à pression constante  $p_1$  jusqu'à la température  $T_1$ . Il reçoit l'énergie massique  $q_{41} > 0$  de la source froide.

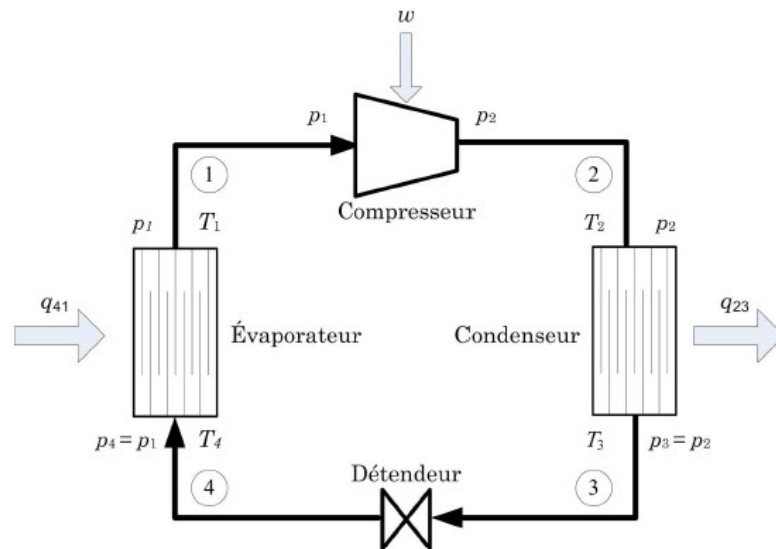


FIG. 2: Cycle frigorifique d'une pompe à chaleur ; les flèches épaisses indiquent le sens des transferts énergétiques.

- Montrer que la phase de détente est isenthalpique.
- Représenter sur un diagramme de Mollier ( $\ln p, h$ ) dont vous tracerez l'allure sur votre copie ( cf figure 1 ) les quatre étapes du cycle, ainsi que les quantités  $q_{23}$ ,  $q_{41}$  et  $w$ .
- Quelle est relation liant les quantités  $q_{23}$ ,  $q_{41}$  et  $w$  ? Représenter ces quantités sur le schéma de la question 8.
- Donner l'expression de l'efficacité  $e$  de la pompe à chaleur et montrer que  $e > 1$ .
- Le Document Réponse représente le diagramme de Mollier d'un fluide caloporteur courant ( R134a). Dans la perspective de vos réponses à la question 3, la phase liquide y apparaît-elle incompressible et indilatable ? La phase gazeuse y apparaît-elle comme un gaz parfait ?
- On donne  $p_1 = 0,3 \text{ MPa}$ ,  $p_2 = 1 \text{ MPa}$ ,  $T_1 = 5^\circ \text{C}$ . Représenter le cycle correspondant dans le Document Réponse, à rendre avec votre copie. Pour chacun des points 1 à 4 du cycle, indiquer dans un tableau les valeurs numériques respectives de l'enthalpie massique, la pression, la température et le titre massique en vapeur. Indiquer aussi l'état du fluide en chacun de ces points.
- À partir du diagramme de Mollier, estimer numériquement l'efficacité de la pompe à chaleur. Comparer la valeur trouvée à celle qui correspondrait à un cycle de Carnot fonctionnant entre les températures de sortie des échangeurs.
- Calculer le débit massique du fluide permettant d'assurer une puissance de chauffage de 4 kW.

## Problème 2 :

### Le projet MESMA

#### Document 1

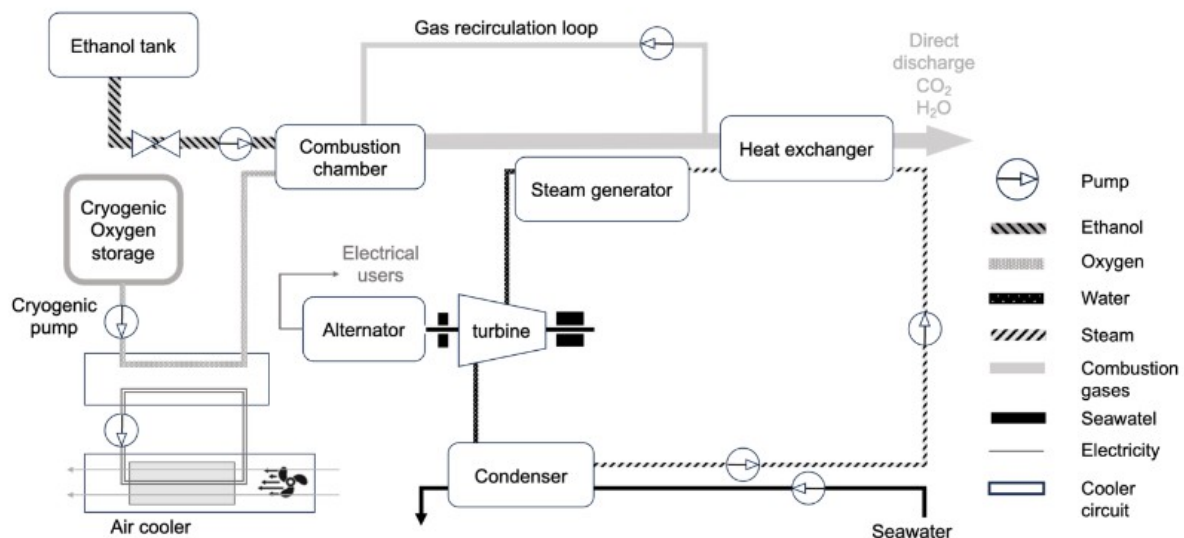
Depuis quelques années maintenant, les sous-marins à propulsion AIP, également appelés sous-marins anaérobies, ont commencé à apparaître sur les listes de navires de différentes marines, comprenant par anaérobie tout ce qui peut vivre ou fonctionner sans la présence d'oxygène atmosphérique. Bien que la référence pour ce type de technologie soit les navires à propulsion nucléaire, ce n'est pas une solution intéressante sauf pour les grandes marines, pour des raisons politiques et sociales, de coût ou de complexité technique. C'est principalement pour cette raison que d'autres solutions ont été recherchées pour réaliser un système indépendant de l'air, et bien qu'au sens strict du terme, dans un sous-marin nucléaire, sa centrale fonctionne sans avoir besoin d'oxygène de l'air.

[...] Ces dernières années, ils ont connu un développement spectaculaire. Leur capacité actuelle et leurs perspectives d'avenir en font un complément fondamental à la propulsion conventionnelle.

Source : <https://www.agasm.fr/>

#### Document 2

En France, la Direction des Constructions Navales Internationale ( DCNI ) a développé le système AIP "MESMA" (Module d'Energie Sous-Marin Autonome) sur base d'une turbine à vapeur qui brûle fondamentalement de l'éthanol et de l'oxygène liquide afin de créer la vapeur requise pour entraîner un turbo-alternateur. DCNI offre l'option MESMA pour ses sous-marins types Agosta 90B et Scorpene. L'entreprise annonce que son option AIP augmente l'autonomie en plongée "d'un facteur de 3 à 5."



Source : <http://zone.sousmarins.free.fr/Sous-marins%20anaerobies.htm>



Sous marin Agosta-90 B utilisé par la marine Pakistanaise.

Source : <https://www.stm.com.tr/en/our-solutions/naval-engineering/pakistan-navy-agosta-90b-class-submarine-modernization-project>

### Document 3

L'AIP appelé MESMA consiste en un module qu'on appelle, dans toute la suite, circuit secondaire. Il est composé d'une turbine à vapeur conventionnelle, où l'énergie thermique est convertie en énergie électrique à l'aide d'un cycle de Rankine conventionnel, qui comprend un générateur de vapeur, des turbo-alternateurs et un condenseur.

Le fluide caloporteur est l'eau.

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. En entrant dans ce dernier, l'eau se trouve sous forme de liquide comprimé à la pression  $P_2$  (état 2). Elle en ressort sous forme de vapeur sèche (état 3) à la même pression  $P_2$  puis pénètre dans la turbine où elle se détend de façon adiabatique et réversible en entraînant l'arbre de l'alternateur, qui permettra la production d'électricité pour faire fonctionner le sous-marin.

A la sortie de la turbine (état 4), l'eau est sous forme de mélange liquide-vapeur. Celui-ci est alors liquéfié à pression constante dans le condenseur et en sort dans l'état 1.

## Partie 1 : Description thermodynamique du cycle

Dans une première approche simplifiée, on considère le moteur ditherme de Carnot fonctionnant de manière réversible entre deux thermostats de températures  $T_{ch}$  et  $T_{fr} < T_{ch}$ .

1- Définir le système étudié dans le circuit secondaire puis identifier dans quels organes du circuit ont lieu les transferts  $Q_c$  et  $Q_f$  avec les sources chaude et froide (énergies thermiques reçues algébriquement par le système) et donner leurs signes. Représenter les différents échanges d'énergie sous la forme d'un schéma.

2- Donner, en la redémontrant, l'expression du rendement de Carnot associé à ce cycle.

3- Donner la valeur numérique approchée de ce rendement en prenant  $500^\circ\text{C}$  et  $100^\circ\text{C}$ , les deux températures extrêmes de l'eau dans le circuit secondaire.

4- Etablir l'expression du rendement réel de l'installation en fonction de  $Q_c$ , des températures  $T_{ch}$  et  $T_{fr}$  et de  $S_{crée}$ , l'entropie créée.

### Etude détaillée du circuit secondaire

On suppose que dans l'ensemble du circuit secondaire, l'écoulement est permanent.

5- Rappeler l'expression du « premier principe industriel » en écoulement stationnaire en définissant rigoureusement le système étudié et en explicitant chaque terme. Que devient cette expression dans le circuit en négligeant l'effet de la pesanteur et la variation d'énergie cinétique ?

Certaines données thermodynamiques sont fournies dans le tableau ci-dessous.

| Etat                                                    | 1     | 2     | 3     | 4     |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Pression (bar)                                          | 1     | 50    | $P_3$ | $P_4$ |
| Température ( $^\circ\text{C}$ )                        | 100   | $T_2$ | 500   | $T_4$ |
| Enthalpie massique ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )              | 440   | $h_2$ | $h_3$ | 2550  |
| Entropie massique ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) | $s_1$ | $s_2$ | $s_3$ | $s_4$ |

6- Déterminer la température  $T_2$  de l'eau dans l'état 2.

7- Déterminer, en les justifiant, les pressions  $P_3$  et  $P_4$  ainsi que la température  $T_4$  puis tracer l'allure du cycle dans un diagramme de Clapeyron  $(P, v)$ .

8- On donne dans le document réponse le diagramme de l'eau. Déterminer l'équation générale d'une isobare pour un gaz parfait dans ce type de diagramme puis discuter de l'allure des isenthalpes à entropie élevée.

9- Placer, en le justifiant, les points 1 à 4 représentant les états correspondants ainsi que le cycle décrit par le fluide.

On rappelle que le document réponse doit être joint à la copie.

10- Identifier l'état dans lequel se trouve le fluide aux points 2 et 3 et déterminer graphiquement les valeurs encore manquantes dans le tableau figurant sur le document réponse.

11- Exprimer l'entropie massique  $s(T)$  d'un kg d'eau en équilibre liquide-vapeur en fonction du titre massique en vapeur  $x$  et des entropies massiques du liquide saturant  $s_l(T)$  et de la vapeur saturante  $s_v(T)$  à la température  $T$ .

En déduire le titre massique en vapeur à la sortie de la turbine.

Faire l'application numérique.

Comparer avec la lecture graphique directe.

12- Exprimer puis calculer le transfert thermique massique reçu par le fluide dans le générateur de vapeur puis déterminer de même le transfert thermique massique reçu dans le condenseur.

Commenter les signes obtenus.

13- En déduire le travail massique (utile) reçu par le fluide au cours du cycle.

14- Dans quel état se trouve le fluide à la fin de la détente dans la turbine ? Pourquoi est-ce un inconvénient pour les parties mobiles de la machine ?

15- Définir puis calculer le rendement thermodynamique du cycle. On arrondira le résultat au dixième. Le comparer au rendement de Carnot calculé à la **question 3**.

16- Le sous-marin développe, pour la propulsion, une puissance motrice  $P_{méca} = 200 \text{ kW}$ .

Le rendement de l'alternateur est de l'ordre de 95%.

En supposant que 80% de l'énergie électrique produite par le système MESMA est utilisée pour propulser le sous-marin, déterminer une valeur approchée du débit massique de l'eau dans le circuit secondaire.

### Données :

Enthalpie massique de l'eau liquide saturant à  $T_1$  :  $s_l(T_1) = 1,3 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Enthalpie massique de l'eau vapeur saturante à  $T_1$  :  $s_v(T_1) = 7,3 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Pour une phase condensée indilatable, incompressible et de capacité thermique massique  $c$  :  $ds = c \frac{dT}{T}$

## DOCUMENT REPONSE

### Diagramme de l'eau

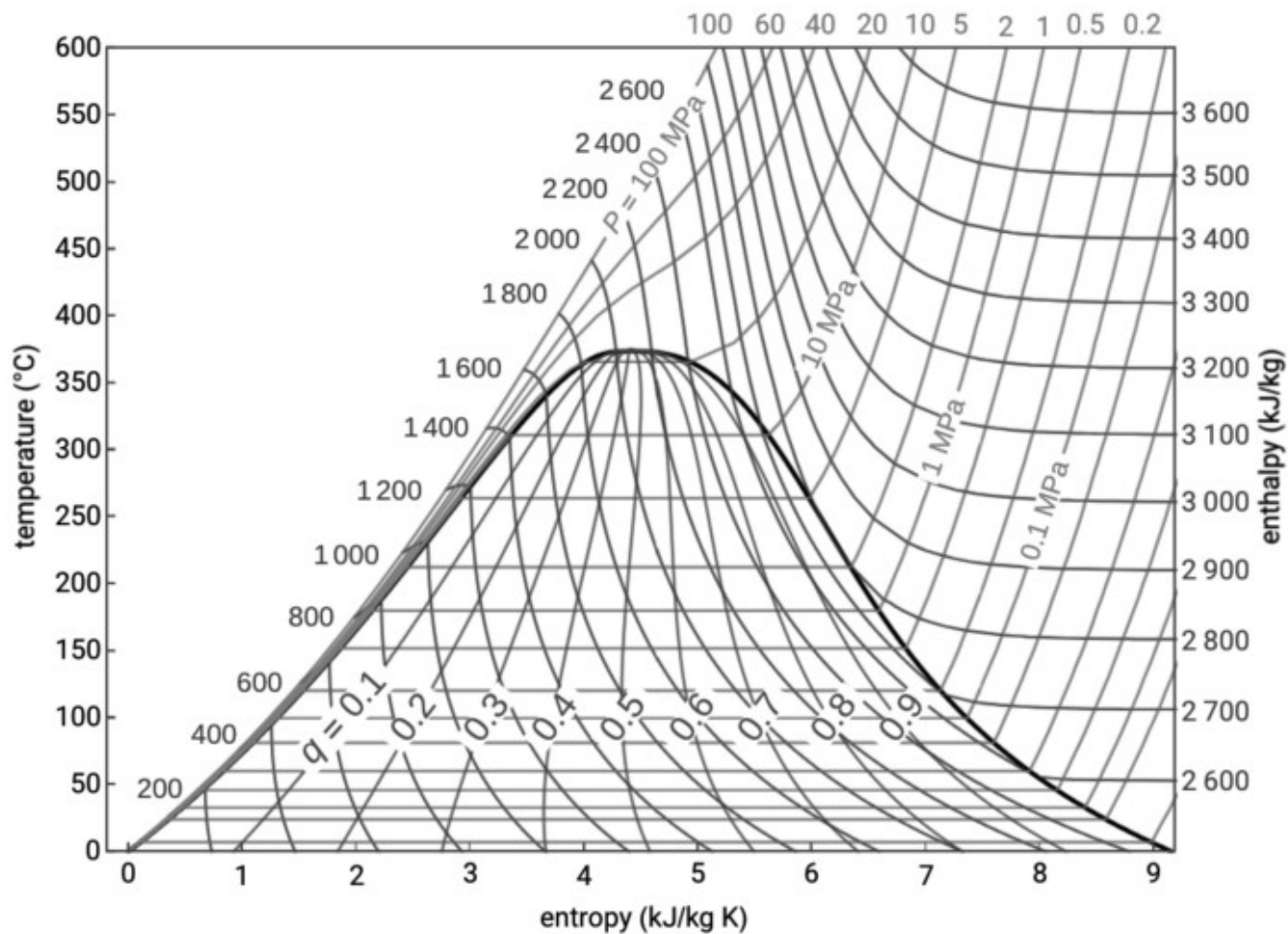


Tableau de données thermodynamiques

|                                                                     | 1              | 2 | 3 | 4                      |
|---------------------------------------------------------------------|----------------|---|---|------------------------|
| <b>Enthalpie massique</b><br>(kJ.kg <sup>-1</sup> )                 | 440            |   |   | 2550                   |
| <b>Entropie massique</b><br>(kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) |                |   |   |                        |
| <b>état</b>                                                         | Liquide saturé |   |   | Mélange liquide vapeur |