

DEVOIR SURVEILLE N°8

PHYSIQUE

I. Autocuiseur (d'après CCINP TPC 2024)

L'autocuiseur couramment appelé « cocotte-minute », a été inventé en 1679 par le français Denis Papin.

Il s'agit d'un dispositif de cuisson des aliments sous une pression supérieure à la pression atmosphérique.

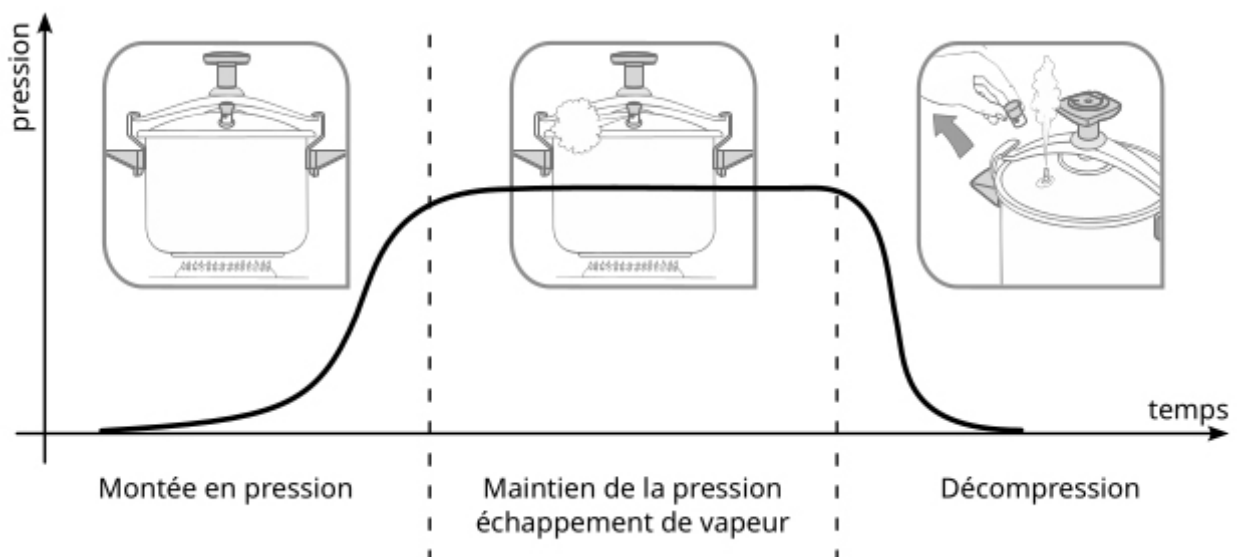
L'augmentation de pression s'accompagne d'une augmentation de la température maximale atteinte, ce qui accélère la cuisson des aliments.

Une soupape permet de limiter la pression intérieure en évacuant la vapeur d'eau formée et assure une cuisson à température constante.



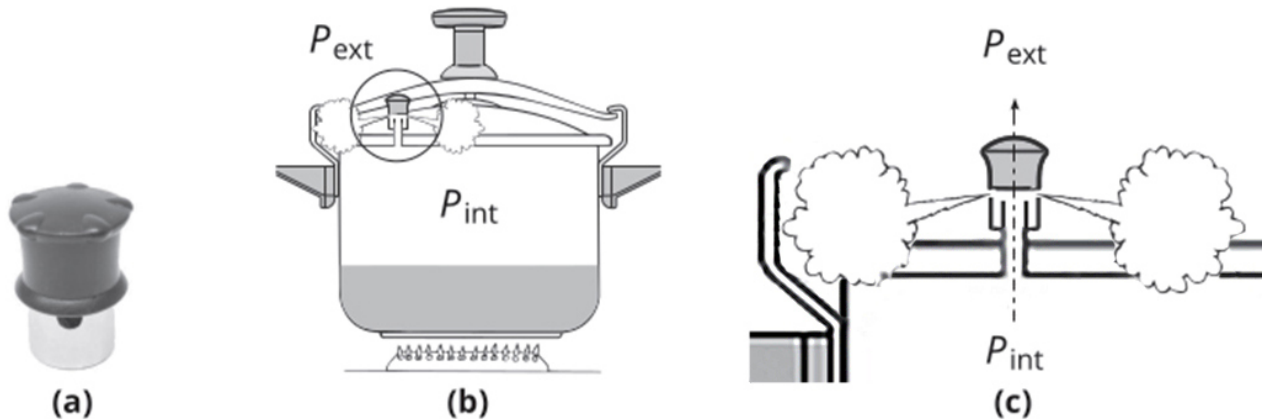
L'autocuiseur contient toujours un peu d'eau en plus des aliments à cuire. La cuisson se déroule alors en trois étapes :

- un régime transitoire de montée en pression et en température du contenu de l'autocuiseur,
- une étape de cuisson durant lequel la pression et la température de la vapeur d'eau restent constantes (la vapeur qui s'échappe par la soupape est compensée par la vaporisation de l'eau contenue dans l'autocuiseur),
- une étape de décompression, souvent rapide, pour arrêter la cuisson.



A. La soupape

La soupape d'échappement de la vapeur est un cylindre de masse m placé sur le couvercle de l'autocuiseur. Elle peut coulisser verticalement sans frottement sur un cylindre creux qui fait communiquer l'intérieur de l'autocuiseur avec l'extérieur.



Lorsque la pression augmente dans l'autocuiseur, la soupape monte, ce qui permet à la vapeur de s'échapper. En régime permanent, la soupape reste à hauteur constante et est en équilibre sous l'effet de son poids et des forces de pression.

La pression extérieure vaut $P_{ext} = 1,0 \text{ bar}$ et on note P_{int} la pression à l'intérieur de l'autocuiseur. La soupape est pesée sur une balance de cuisine dont un extrait de la notice est donné.



(a)

Caractéristiques particulières

- Gamme de pesée : 10 g à 5 kg, avec une précision de mesure de 1 gramme.

(b)

1. En tenant compte de l'indication de précision mentionnée par la notice de la balance, écrire la valeur numérique de la masse m de la soupape avec son incertitude-type associée. On rappelle qu'un tarage est nécessaire pour fixer le zéro.

La section du conduit cylindrique d'évacuation de la vapeur vaut $S = 7,0 \text{ mm}^2$.

On note $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ l'accélération de la pesanteur.

2. Déterminer l'expression littérale de P_{int} durant l'étape de cuisson en fonction de P_{ext} , m , g et de S . Déterminer la valeur numérique de P_{int} .

Des indications de pression et le volume de l'autocuiseur sont gravés sur celui-ci.

3. L'une des indications gravées sur l'autocuiseur permet-elle de confirmer le résultat précédent ? À quoi correspond vraisemblablement l'autre indication de pression ?



B. Régime transitoire de montée en température

On verse un volume $V_e = 1,0 \text{ L}$ d'eau dans l'autocuiseur de volume $V_a = 4,5 \text{ L}$ que l'on ferme et que l'on place sur une plaque chauffante délivrant la puissance thermique $P_{th} = 1,50 \text{ kW}$.

Des capteurs placés dans l'autocuiseur permettent d'enregistrer la température de l'eau et la pression de la phase vapeur au cours du temps durant la phase de montée en température (régime transitoire évoqué au début de l'énoncé).

On constate que la température et la pression augmentent progressivement jusqu'à atteindre les valeurs $P_C = 1,55 \text{ bar}$ et $T_C = 112 \text{ °C}$. Ces valeurs restent ensuite constantes pendant tout le régime permanent de la cuisson des aliments.

On note :

- $m_e = 1,0 \text{ kg}$ la masse de l'eau liquide,
- $C_a = 1,23 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1}$ la capacité thermique totale de l'autocuiseur.
- $c_{liq} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ la capacité thermique massique de l'eau liquide,
- $T_i = T_{ext} = 20 \text{ °C}$ la température de l'atmosphère et température initiale de l'eau et de l'autocuiseur,
- $T_p = 200 \text{ °C}$ la température de la plaque chauffante.

Pour la suite de l'étude, on formule les hypothèses suivantes :

- l'eau et l'autocuiseur sont constamment à la même température,
- on néglige la vapeur d'eau initialement présente dans l'autocuiseur [$x_{v,init} = 0$],
- la vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait : $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$,
- on suppose que l'air possède une capacité thermique négligeable,
- le volume d'eau liquide présent dans l'autocuiseur reste constant et égal à $V_e = 1,0 \text{ L}$.

4. Tracer le diagramme de Clapeyron de l'eau en faisant apparaître la courbe de saturation ainsi que l'isotherme à $T_C = 112 \text{ °C}$. Déterminer les coordonnées (p, V) des deux points d'intersection de cette isotherme avec la courbe de saturation (points E et R). Comment nomme-t-on ces points ?

5. A l'aide du théorème des moments, déterminer la proportion $x_{v,C}$ de vapeur d'eau lorsque la température atteint $T_C = 112 \text{ °C}$ en supposant que le système soit à l'équilibre thermodynamique. Quelle est alors la masse d'eau $m_{v,C}$ à l'état vapeur ?

Dans la suite de la partie B (sauf question 12), on néglige la vapeur d'eau formée.

On note Δt la durée du régime transitoire (montée en température) au bout de laquelle l'eau et l'autocuiseur atteignent la température $T_C = 112^\circ\text{C}$. On rappelle qu'initialement l'eau et l'autocuiseur sont à la même température que l'atmosphère.

6. Dans cette question et la suivante, on suppose que toute la puissance thermique P_{th} délivrée par la plaque chauffante est transférée à l'autocuiseur et que les échanges thermiques avec l'atmosphère sont négligeables. Déterminer l'expression littérale de la durée Δt en fonction des données. Faire l'A.N.

7. Quelle est l'entropie créée S_{cr} au cours de l'étape transitoire sachant que la plaque chauffante est à la température $T_p = 200^\circ\text{C}$? Faire l'A.N.

Le relevé expérimental indique une valeur de Δt un petit peu plus élevée que celle déterminée à la question **6**. On affine alors la modélisation du régime transitoire prenant en compte les **pertes** thermiques de l'autocuiseur vers l'atmosphère. La puissance thermique **perdue** par l'autocuiseur est modélisée sous la forme :

$$P_{fuite}(t) = k(T(t) - T_{ext})$$

où $k = 6,0 \text{ USI}$ et $T_{ext} = 20^\circ\text{C}$ sont des constantes.

8. En effectuant un bilan thermique sur le système {eau + autocuiseur} pendant l'intervalle de temps infinitésimal dt , montrer que la température du système satisfait l'équation différentielle :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{1}{\tau} \left(T_{ext} + \frac{P_{th}}{k} \right)$$

et déterminer l'expression de τ en fonction des données. Faire l'A.N.

9. Résoudre l'équation précédente.

10. Déterminer la durée $\Delta t'$ au bout de laquelle la température $T_C = 112^\circ\text{C}$ est atteinte.

11. Déterminer l'entropie créée S'_{cr} au cours de l'étape transitoire dans ces conditions. On rappelle que la température de la plaque est $T_p = 200^\circ\text{C}$ et que l'atmosphère est à la température $T_{ext} = 20^\circ\text{C}$.

12. Question complémentaire **délicate** :

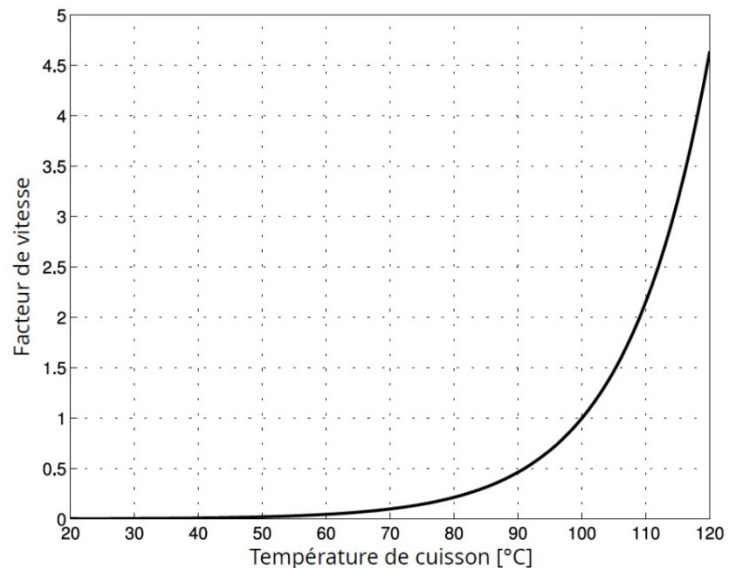
Reprendre la question **6** (calcul de Δt) en tenant compte de la présence de l'air assimilé à un gaz parfait ($\gamma = 1,40$) et de la vapeur d'eau formée au cours de la montée en température également assimilée à un gaz parfait ($\gamma_e = 1,28$). On supposera que l'autocuiseur est un système fermé durant la montée en température. Les hypothèses de la partie B sont-elles justifiées ?

On donne l'enthalpie massique de vaporisation à T_C : $\Delta h_{vap}(112^\circ\text{C}) = 2,223 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,

C. Régime permanent

Durant l'étape de cuisson, la température de l'autocuiseur et de son contenu est T_c et la pression intérieure est P_c . La figure ci-dessous donne le facteur de vitesse de la cuisson en fonction de la température de cuisson. La référence est prise à $T_1 = 100^\circ\text{C}$.

Par exemple, une cuisson à $T_2 = 80^\circ\text{C}$ a un facteur de cuisson de 0,25 et est donc quatre fois plus lente qu'à $T_1 = 100^\circ\text{C}$.



13. Sachant que la cuisson de légumes dans une casserole d'eau bouillante à l'air libre s'est faite en 20 min, estimer la durée Δt_c nécessaire à la cuisson de la même quantité de légumes dans un autocuiseur.

Lorsque l'autocuiseur fonctionne en régime de cuisson, la puissance thermique de la plaque chauffante est réduite à $P'_{th} = 800 \text{ W}$. Un jet de vapeur d'eau s'échappe continûment par la soupape.

Les pertes de chaleur avec l'atmosphère sont évaluées à $P'_f = 550 \text{ W}$.

On conserve l'hypothèse supposant que le volume de l'eau liquide reste constant.

Dans les conditions de cuisson (T_c et P_c), l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau vaut :

$$\Delta h_{vap}(112^\circ\text{C}) = 2,223 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

14. Expliquer pourquoi il apparaît des gouttelettes d'eau liquide dans le jet de vapeur à sa sortie par la soupape.

15. Déterminer, à l'aide d'un bilan enthalpique, le débit massique d_{vap} du jet de vapeur d'eau en mg/s.

16. Déterminer l'entropie créée par seconde $\dot{S}_{cr} = \delta S_{cr}/dt$ [attention à l'unité] durant l'étape de cuisson sachant que la plaque chauffante est à la température $T_p = 200^\circ\text{C}$.

17. Déterminer la masse d'eau Δm_e perdue dans le jet pour une cuisson de 10 min. L'hypothèse faite initialement sur le volume de l'eau liquide qui reste constant est-elle vérifiée ?

18. A l'aide des données, déterminer l'enthalpie massique $\Delta h_{vap}(T_2)$ de vaporisation de l'eau à la température de $T_2 = 133^\circ\text{C}$ pour laquelle la pression saturante est $p_{sat,2} = 3,0 \text{ bar}$.

On donne la capacité thermique massique à pression constante de l'eau vapeur :

$$c_{P,vap} = 2,14 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

II. Quelques aspects du transport ferroviaire (d'après Centrale MP 2024) :

La première locomotive à vapeur date de 1804, elle a été conçue par un ingénieur des mines anglais Richard Trevithick, comme une application de la machine à vapeur. Depuis, le transport ferroviaire a connu une évolution rapide ; il apparaît aujourd'hui comme une solution écologique au désir et au besoin de mobilité d'une population mondiale qui ne cesse de croître.



La locomotive de Trevithick



Locomotive Coradia Lint 54 d'Alstom

Coradia Lint 54 est 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 France et en Allemagne.

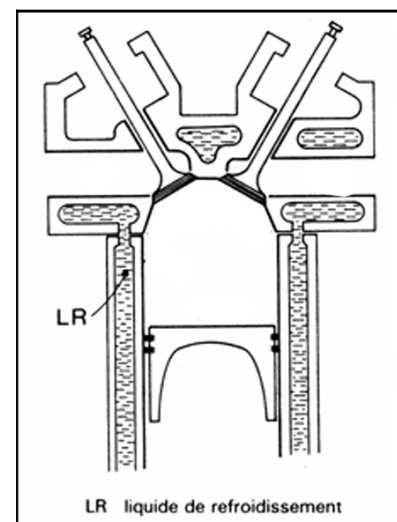
Le moteur diesel n'entraîne pas directement les roues mais un alternateur qui fournit de l'énergie à plusieurs moteurs électriques placés au niveau des essieux.

On modélise le fonctionnement d'un moteur Diesel en considérant un système fermé, constitué du mélange air – gasoil assimilé à un gaz parfait diatomique, décrivant un cycle réversible dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous :

- Admission $A_0 - A$: la soupape d'arrivée de l'air est ouverte, celles d'arrivée de gasoil et d'échappement des gaz sont fermées. Le volume passe de V_{min} à V_{max} de façon isobare. La pression dans le piston est alors $P_A = P_{atm}$.

- Compression $A - B$: 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 $B - C$: 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 $V_C < V_{max}$. On modélise cette phase par une évolution isobare.



- Détente $C - D$: 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 $D - A$: la soupape d'échappement est ouverte. La pression diminue brutalement jusqu'à P_{atm} , le volume restant constant.

- Ejection $A - A_0$: la soupape d'échappement est ouverte, les autres fermées. Le volume passe de V_{max} à V_{min} de façon isobare.

A. Quelques questions de cours préliminaires

1. Démontrer qu'un moteur monotherme est impossible.
2. Montrer que le rendement d'un moteur ditherme fonctionnant avec une source froide à T_{Fr} et une source chaude à T_{Ch} est inférieur ou égal à un rendement r_{max} .
3. Etablir l'expression de la variation d'entropie de n moles d'un gaz parfait (GP) passant d'un état caractérisé par (p_1, T_1, V_1) à un état caractérisé par (p_2, T_2, V_2) .
4. Démontrer les formules de Laplace dans le cas de l'évolution adiabatique réversible d'un GP.

B. Etude du moteur Diesel

On définit le rapport volumétrique de compression $x = V_{max}/V_{min}$, ainsi que le rapport volumétrique de détente $y = V_{max}/V_C$.

5. Représenter le cycle Diesel $A_0 - A - B - C - D - A - A_0$ dans le diagramme de Clapeyron.
6. Exprimer les pressions P_B et P_D en fonction de $P_A = P_{atm}$, x , y et du rapport $\gamma = C_{P,m}/C_{V,m}$ des capacités thermiques molaires à pression et à volume constant. Faire les A.N.
7. Exprimer les températures T_B , T_C et T_D en fonction de $T_A = 300 K$, x , y et γ puis calculer celles-ci à l'aide des données en fin d'énoncé.
8. Définir le rendement, noté r , de ce moteur et l'exprimer en fonction des températures T_A , T_B , T_C , T_D et du rapport γ . L'exprimer ensuite en fonction de x , y et γ et faire l'A.N. En réalité, le rendement observé est $r_{\mathbb{R}} = 45 \%$. Commenter.
9. Calculer la valeur maximale que la thermodynamique prévoit pour un moteur fonctionnant avec une source froide à T_A et une source chaude à T_C . Commenter.
10. Déterminer l'entropie créée lors d'un cycle $A - B - C - D - A$ du moteur Diesel en modélisant l'étape $B - C$ par un échange avec une source chaude à la température T_C . Faire l'A.N.

Une locomotive à moteur Diesel roule à la vitesse constante $v = 140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Le moteur tourne à la vitesse angulaire, elle aussi constante $\omega = 4000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, un tour correspondant à un aller-retour du piston.

11. Calculer la puissance mécanique moyenne développée par le moteur de la locomotive en MW en utilisant la valeur du rendement observé $r_{\mathbb{R}} = 45\%$.
12. L'enthalpie de combustion du gasoil Δh_{comb} correspond à la chaleur fournie par la source chaude lors de la combustion de 1 kg de gasoil. En utilisant la valeur de Δh_{comb} donnée en fin de sujet, déterminer la consommation en litres de gasoil pour 100 km de la locomotive.

Données numériques :

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

Rapports des volumes dans le cycle diesel : $x = 20$ et $y = 7$

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

Rapport des capacités thermiques $\gamma = 1,40$

Enthalpie de combustion massique du gasoil $\Delta h_{comb} = 46,8 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Densité du gasoil : $d_{gasoil} = 0,83$

III. L'énergie thermique des mers (d'après Centrale PC 2024) :

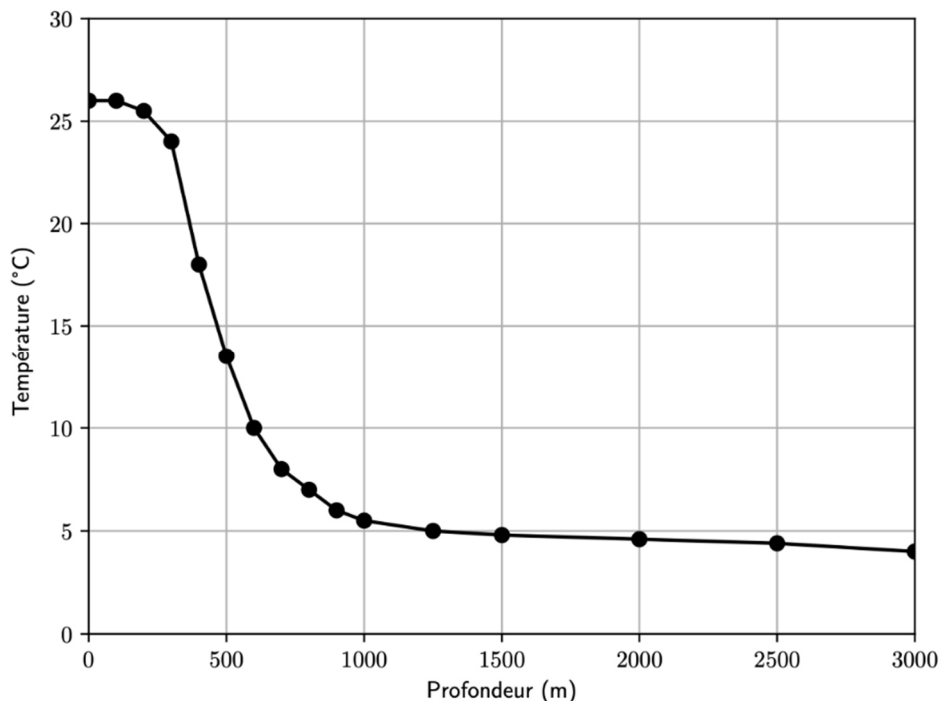
En 1869, dans son livre « Vingt mille lieues sous les mers », Jules Verne fait référence aux eaux de surface et aux eaux profondes des océans pour produire de l'électricité. Cette idée d'utiliser la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes afin de produire de l'électricité est appelée ETM (Énergie Thermique des Mers) en français et OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en anglais.

L'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) considère que le coût de pompage des eaux profondes n'est rentable que pour une différence de température d'au moins 20°C entre l'eau de mer chaude prélevée à la surface et l'eau de mer froide prélevée en profondeur.

A. Généralités

1. Représenter le diagramme d'une machine thermique ditherme produisant du travail en explicitant les signes des différents échanges énergétiques.
2. Calculer la valeur numérique du rendement maximal r_{max} qui pourrait être attendu pour une machine fonctionnant entre des sources de températures $T_C = 26^{\circ}\text{C}$ et $T_F = 5^{\circ}\text{C}$. [La démonstration est demandée dans le problème II]. Commenter le résultat.

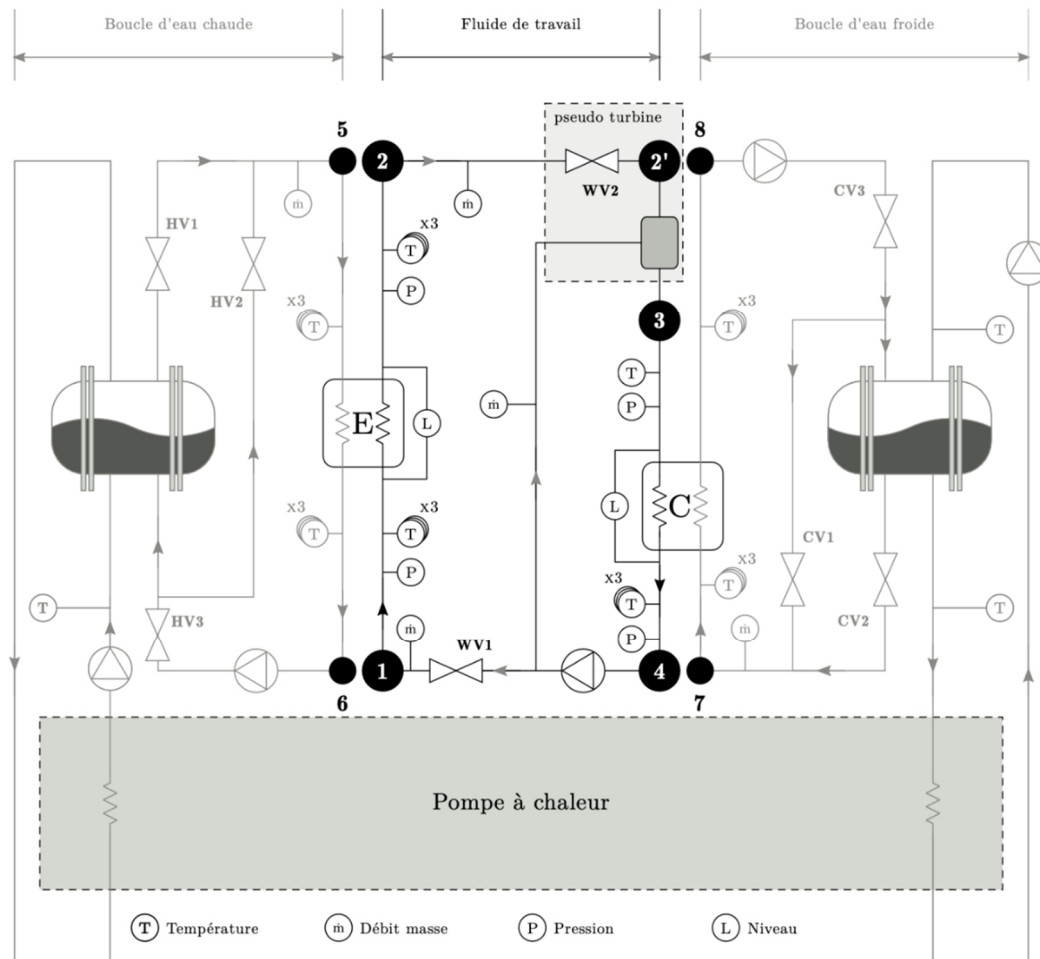
L'installation d'une centrale ETM est envisagée à l'île de La Réunion. On s'intéresse dans ce problème à un prototype de celle-ci, simulant le fonctionnement d'une telle centrale dans les conditions qui environnent l'île. Le profil de température de l'océan autour de l'île est donné ci-dessous :



3. Déterminer la profondeur à laquelle on devra prélever l'eau profonde pour qu'une installation à La Réunion soit rentable.

B. Centrale ETM en cycle fermé

Un prototype de centrale ETM est installé à La Réunion. Il n'est pas raccordé à l'océan et une pompe à chaleur simule les sources d'eau chaude et d'eau froide. Le fluide qui effectue les cycles est constitué d'ammoniac et son évolution est représentée sur la partie centrale de la figure ci-dessous.



Au cours de son cheminement à travers les différents éléments de la centrale, l'ammoniac subit la succession de transformations suivante :

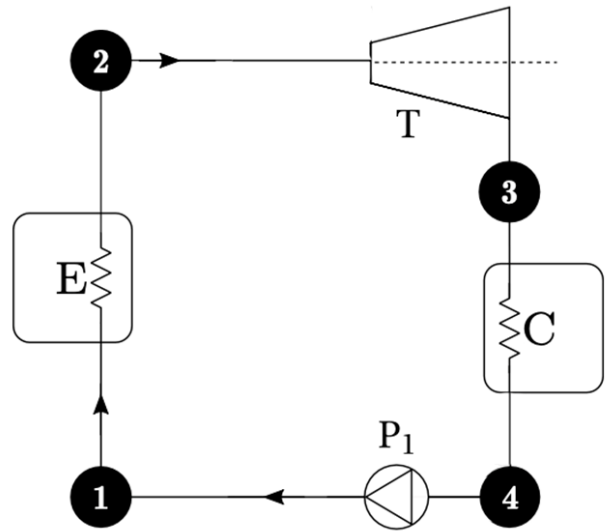
- De l'état **1** à l'état **2**, il traverse un évaporateur E dans lequel il échange de l'énergie thermique avec la source chaude. Au sein de celui-ci, l'ammoniac initialement à l'état liquide à la température $T_1 = 12^\circ\text{C}$ (point **1**) subit dans un premier temps un échauffement isobare sous la pression $p_{HP} = 9 \text{ bar}$ jusqu'à l'état intermédiaire **1'** où il se trouve à l'état de liquide saturant. Dans un second temps, de l'état **1'** à l'état **2**, il subit ensuite une vaporisation isobare complète, sous la même pression $p_{HP} = 9 \text{ bar}$. Dans l'état **2**, l'ammoniac est à l'état de vapeur juste saturante.
- La vapeur subit une détente et une désurchauffe isobare [ne pas entrer dans les détails de cette succession de transformations] qui donnent les mêmes propriétés au fluide que s'il avait été soumis à une détente adiabatique réversible jusqu'à la pression $p_{BP} = 6 \text{ bar}$ (point **2** au point **3** sur la figure ci-dessous).
- L'ammoniac subit ensuite de l'état **3** à l'état **4** une condensation isobare sous la pression $p_{BP} = 6 \text{ bar}$. Dans l'état **4**, il est à l'état de liquide juste saturant.

- De l'état **4** à l'état **1**, l'ammoniac est ensuite ramené vers l'évaporateur à l'aide d'une pompe dont le fonctionnement sera supposé adiabatique et réversible.

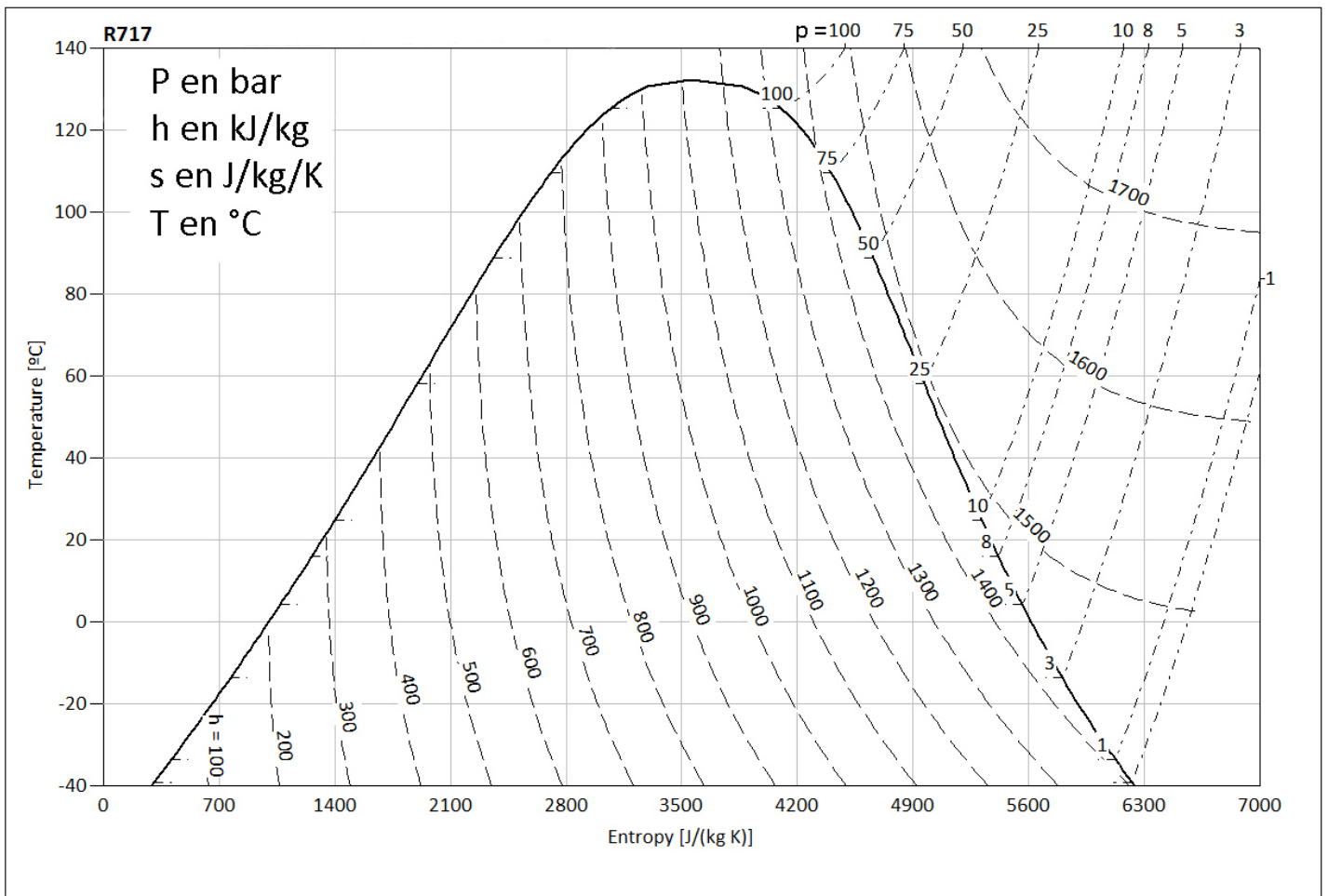
La succession de transformations subies par l'ammoniac peut finalement être représentée sous la forme simplifiée ci-contre :

Dans l'évaporateur et le condenseur, l'ammoniac échange de l'énergie thermique avec les sources respectivement chaude et froide mais il n'échange pas de travail.

Dans la turbine utilisée pour modéliser l'étape **2 - 3** et la pompe, l'ammoniac échange au contraire du travail mais pas d'énergie thermique.



Voici un diagramme entropique de l'ammoniac :



4. Reproduire sur la copie l'allure de ce diagramme sans les isobares ni les isenthalpes. Mentionner les noms des courbes de saturation puis indiquer la phase stable associée à chaque domaine. Faire apparaître le point critique que l'on définira et déterminer sa température.

On exploitera dans la suite un agrandissement du diagramme (T, s) précédent, fourni en annexe. Sur ce dernier document, les isobares (graduées en bar) apparaissent sous la forme d'une alternance de tirets et de points tandis que les isenthalpes (graduées en $kJ.kg^{-1}$) apparaissent en tirets.

5. Déterminer $T_{vap,HP}$ et $T_{vap,BP}$, les températures de vaporisation aux pressions respectives de $p_{HP} = 9 bar$ et $p_{BP} = 6 bar$.

6. Représenter sur ce diagramme, le cycle effectué par l'ammoniac dans le dispositif ETM. On fera apparaître les points **1'**, **2**, **3** et **4**. Le point **1** ($T_1 = 12^\circ C$, $p_1 = 9 bar$) est déjà positionné. On justifiera le placement des points par une phrase claire pour chacun d'entre eux.

7. Reproduire et compléter le tableau présenté ci-dessous en justifiant la valeur de x_{V3} :

Point i	T_i ($^\circ C$)	p_i (bar)	x_{Vi}	h_i ($kJ.kg^{-1}$)	s_i ($J.K^{-1}.kg^{-1}$)
1	12	9		240	1150
1'					
2					
3					
4					

8. Déterminer la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation $\Delta h_{vap,HP}$ à $p_{HP} = 9 bar$. [Rédiger la réponse].

9. Déterminer de même la valeur de $\Delta h_{vap,BP}$ à $p_{BP} = 6 bar$. On aura intérêt à compléter le tableau précédent avec un point judicieusement choisi.

10. Dédire du tableau précédent la valeur de c_{liq} , capacité thermique massique de l'ammoniac liquide, supposé incompressible.

11. Expliquer pourquoi on utilise de l'ammoniac comme fluide de travail plutôt que de l'eau. Donner néanmoins un inconvénient de l'utilisation de l'ammoniac.

12. Exprimer puis calculer l'énergie thermique massique q_{Evap} reçue par l'ammoniac lors de la traversée de l'évaporateur.

13. Exprimer puis calculer l'énergie thermique massique q_{Cond} reçue par l'ammoniac au niveau du condenseur.

14. En déduire la valeur numérique du travail massique w_{cycle} reçu par l'ammoniac au cours d'un cycle. Commenter son signe.

15. Le débit massique d'ammoniac dans les canalisations de la centrale est $d_{mas} = 400 g.s^{-1}$. En déduire la puissance développée par la centrale.

16. Dédire de cette étude le rendement r de la centrale. Commenter.

