

Devoir surveillé n°8

Physique

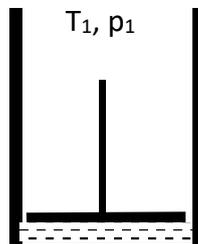
I. Vaporisation de l'eau dans diverses conditions

On enferme une masse $m = 30 \text{ g}$ d'eau liquide dans un cylindre dont les parois latérales sont athermanes et la paroi du fond diathermane.

Le cylindre est fermé par un piston athermane de masse négligeable, pouvant coulisser sans frottement et le volume initial est $V_1 \approx 0$.

Initialement l'ensemble est au contact de l'atmosphère à la température $T_1 = 20^\circ\text{C}$ et à la pression $p_1 = 1,0 \text{ bar}$.

Etat initial du système :



Données pour l'eau :

Pression de vapeur saturante : $p_{\text{sat}}(100^\circ\text{C}) = 1,0 \text{ bar}$ $p_{\text{sat}}(150^\circ\text{C}) = 5,0 \text{ bar}$

Capacités thermiques (indépendantes de T) : $c_{\text{liq}} = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ $c_{\text{p,vap}} = 2,00 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$

Enthalpie massique de vaporisation : $\Delta h_{\text{vap}}(100^\circ\text{C}) = 2,26 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

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

Hypothèses valables pour tout l'exercice :

- le volume occupé par la phase liquide est négligeable [donc $V_1 \approx 0$],
- la vapeur d'eau est assimilée à un gaz parfait de coefficient de Laplace $\gamma = 1,30$,
- la pression saturante de l'eau à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ est négligeable.

1. Placer l'état initial (1) entièrement liquide dans le diagramme (p,T) fourni en annexe.
2. Quelle est la particularité du diagramme (p,T) de l'eau par rapport aux autres corps purs ? Présenter en quelques lignes [et en soulignant les mots clés] une expérience mettant en évidence cette propriété.

On applique alors sous le cylindre un thermostat à la température $T_2 = 150^\circ\text{C}$.

3. Ajouter ce point dans le diagramme (p,T) précédent et en déduire l'état final de l'eau. Déterminer l'état d'équilibre, noté (2), de l'eau (p_2 , T_2 , V_2 et x_{V2}) et faire les A.N.
4. Tracer l'allure du diagramme (p,V) de l'eau en faisant apparaître la courbe de saturation et les trois isothermes à T_1 , $T = 100^\circ\text{C}$ et à T_2 . Placer les points (1) et (2).

5. Déterminer la chaleur Q_{12} fournie par le thermostat pour cette transformation. Faire l'A.N.
6. Déterminer l'entropie créée $S_{cr,12}$ au cours de cette évolution. Faire l'A.N. [je crains d'avoir oublié de rappeler les expressions de ΔS pour un GP... désolé... ;-)]
7. En étudiant un chemin virtuel bien choisi [et en rédigeant très clairement] déterminer l'enthalpie massique de vaporisation $\Delta h_{vap}(150^\circ\text{C})$ de l'eau sous une pression de 5,0 bar à 150°C .

Pour la suite, on prendra la valeur : $\Delta H_{vap}(150^\circ\text{C}) = 2,15 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Un opérateur exerce alors une force F dont l'intensité croît lentement jusqu'à ce que la pression atteigne la valeur $p_3 = 5,0 \text{ bar}$ et que l'eau soit redevenue entièrement liquide ($V_3 \approx 0$ avec les hypothèses retenues). Le contact avec le thermostat à T_2 est maintenu durant cette phase.

8. Ajouter l'état final, noté (3) sur les diagrammes (p,T) et (p,V) .
9. Calculer les variations d'enthalpie ΔH_{23} et d'énergie interne ΔU_{23} durant cette étape. Faire les A.N.
10. Déterminer le travail des forces de pression W_{23} en décomposant le calcul de W_{23} en W_{24} et W_{43} où le point (4) est sur la courbe de rosée à la température T_3 [cette décomposition est possible car elle correspond au chemin réel de la transformation]. En déduire Q_{23} et faire les A.N.
11. Evaluer la force minimale que doit exercer l'opérateur pour maintenir l'eau dans l'état (3) sachant que la section du piston est $S = 30 \text{ cm}^2$. S'agit-il d'un PC 1 ou d'un PC 2 ?

Un PC 2 tente l'expérience mais ne parvient pas jusqu'à l'état (3) et arrête la transformation à l'état (5) caractérisé par un volume $V_5 = 5,0 \text{ L}$.

12. Déterminer l'état final (5) et faire les A.N. (p_5 , T_5 et x_{V5}).
13. Déterminer ΔH_{35} et faire l'A.N.

Un autre PC 2 tente l'expérience mais il enferme initialement dans le cylindre, en plus de la masse $m = 30 \text{ g}$ d'eau liquide, une masse $m_2 = 20 \text{ g}$ d'air assimilé à un gaz parfait de masse molaire $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$.

14. Déterminer l'état (2)' à l'issue de la première transformation (mise en contact avec le thermostat à T_2). Faire les A.N. ($x_{V,2'}$, $V_{2'}$, p_{air} et p_{eau}).
15. Qu'est-ce qui est caché sous le tapis de la thermodynamique ?



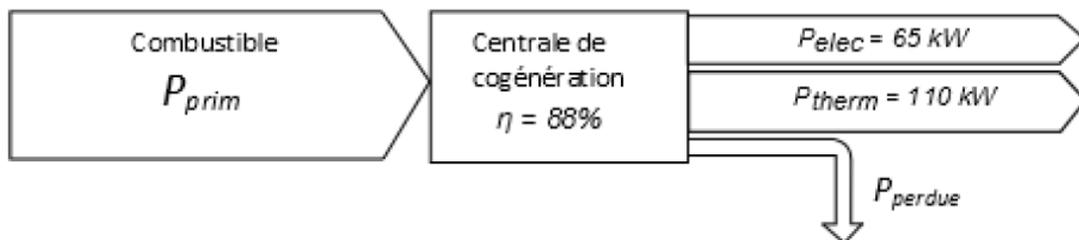
II. Cogénération (d'après CAPES agricole 2011) :

Le biogaz produit par méthanisation peut être valorisé sur une exploitation agricole, comme combustible primaire d'une unité de cogénération. La cogénération est un principe de production simultanée d'électricité et de chaleur. La production d'énergie électrique génère de la chaleur, qui est habituellement dissipée dans l'environnement ; dans un dispositif de cogénération, cette énergie thermique est valorisée. L'énergie électrique de la cogénération est soit autoconsommée, soit réinjectée sur le réseau électrique public.

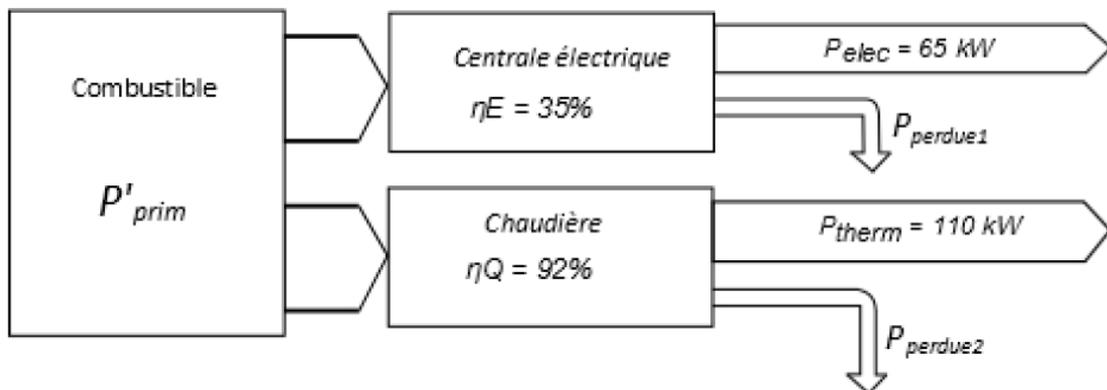
Cogénération et économie d'énergie

L'exploitation agricole étudiée nécessite, pour son fonctionnement, une puissance électrique de 65 kW et d'une puissance thermique de 110 kW. On compare deux dispositifs pour répondre à ces besoins :

- Une centrale de cogénération dont le rendement énergétique d'ensemble est de 88 %.
- Une installation à filières séparées : une centrale électrique dont le rendement est de 35 % et une chaudière dont le rendement est de 92 %.



Centrale électrique et chaudière



On utilise les notations suivantes :

- P_{prim} : puissance primaire fournie par le combustible utilisé dans la centrale de cogénération
- P'_{prim} : puissance primaire fournie par le combustible utilisé dans l'installation à filières séparées
- P_{elec} : puissance électrique produite par le dispositif étudié
- P_{therm} : puissance thermique fournie par le dispositif étudié

On définit les coefficients suivants :

- Pour la centrale de cogénération :

$$\eta = \frac{P_{elec} + P_{therm}}{P_{prim}} \quad \alpha_E = \frac{P_{elec}}{P_{prim}} \quad \alpha_Q = \frac{P_{therm}}{P_{prim}}$$

- Pour l'installation à filières séparées :

$\eta_E = \text{rendement énergétique de la centrale électrique}$

$\eta_Q = \text{rendement énergétique de la chaudière}$

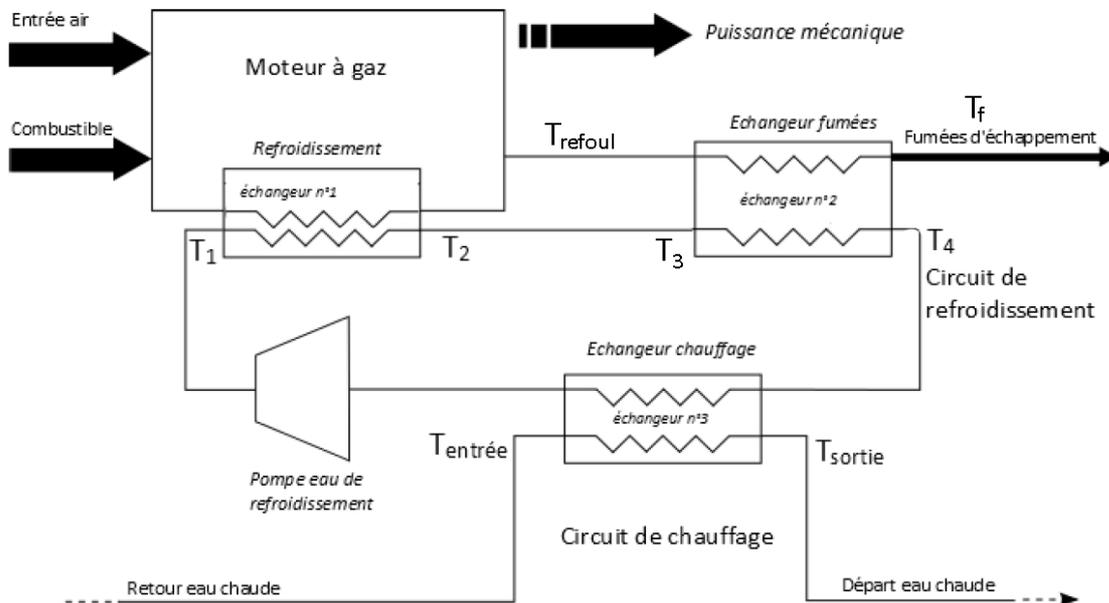
1. En s'appuyant sur les données du schéma de la figure précédente, déterminer les valeurs des puissances suivantes : P_{prim} , P'_{prim} , P_{perdue} , P_{perdue1} et P_{perdue2} .
2. Le choix d'un exploitant agricole souhaitant s'équiper d'une centrale de cogénération pour valoriser le biogaz produit s'appuie sur les économies de combustible par rapport à une installation à filières séparées. L'économie d'énergie primaire, notée EEP, est définie de la façon suivante :

$$EEP = \frac{P'_{\text{prim}} - P_{\text{prim}}}{P'_{\text{prim}}}$$

Déterminer la valeur de l'économie d'énergie primaire pour les deux dispositifs présentés sur la figure précédente.

Cogénération à partir d'un moteur à gaz

On étudie une centrale de cogénération dans laquelle un moteur à gaz est alimenté avec du biogaz. Un circuit de refroidissement à eau, dite « eau de refroidissement » participe à des transferts thermiques dans un échangeur au niveau du moteur, dans un deuxième échangeur au niveau des fumées d'échappement et dans un troisième échangeur avec un circuit de chauffage dans lequel circule de l'eau dite « eau de chauffe » (figure suivante).



Les caractéristiques de la centrale de cogénération sont les suivantes :

Températures de l'eau de refroidissement : $T_1 = 353 \text{ K}$, $T_2 = 361 \text{ K}$, $T_3 = 361 \text{ K}$ et $T_4 = 365 \text{ K}$,

Températures de l'eau de chauffe : $T_{\text{entrée}} = 343 \text{ K}$ et $T_{\text{sortie}} = 363 \text{ K}$,

Débit massique d'eau de refroidissement : $D_{e,r} = 2,2 \text{ kg.s}^{-1}$,

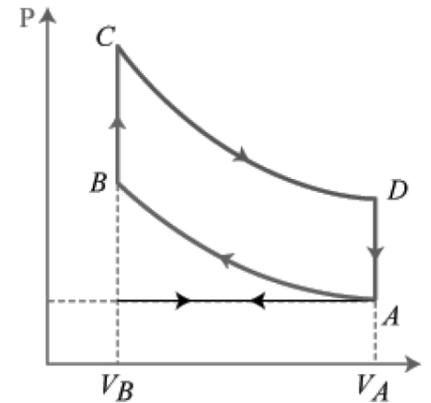
Débit massique d'eau de chauffe : $D_{e,c} = 1,3 \text{ kg.s}^{-1}$,

Débit massique des gaz de combustion : $D_{\text{gaz}} = 0,10 \text{ kg.s}^{-1}$.

Production de l'énergie mécanique

On suppose que le moteur fonctionne selon le cycle théorique de Beau de Rochas :

- admission du mélange gazeux à pression constante.
- de A à B : compression adiabatique réversible du mélange
- de B à C : combustion du mélange gazeux à volume constant
- de C à D : détente adiabatique réversible des gaz de combustion
- de D à A : refroidissement isochore
- refoulement des gaz brûlés.



On suppose que le mélange gazeux se comporte comme un gaz parfait avec $\gamma = 1,30$.

Données : $T_A = 300 \text{ K}$ et $T_C = 2200 \text{ K}$
 rapport de compression : $a = V_A/V_B = 9$
 $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

3. Justifier succinctement que le cycle proposé est un cycle moteur.
4. Rappeler la définition du rendement η_{mot} pour un moteur. Pour le cycle proposé, déterminer son expression en fonction des températures T_A , T_B , T_C et T_D puis faire l'A.N. [attention : cette question demande beaucoup d'autonomie car ce cycle a été traité en exemple de cours].
5. A quelle valeur donnée dans l'énoncé peut-on comparer η_{mot} ? Proposer une explication pour interpréter la différence de valeur observée.
6. Démontrer le théorème de Carnot donnant le rendement maximum d'un moteur ditherme et calculer la valeur de η_{Carnot} pour $T_F = 300 \text{ K}$ et $T_C = 2200 \text{ K}$. Commenter.

Production de l'énergie thermique

Les trois échangeurs de chaleur sont calorifugés : les échanges thermiques se limitent aux fluides qui traversent les échangeurs et il n'y a pas de pertes vers l'atmosphère.

De plus les échangeurs sont isobares.

On rappelle la capacité thermique de l'eau liquide : $c_L = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

7. Déterminer en fonction des données du problème (débits et températures), l'expression littérale, puis la valeur numérique de la puissance thermique P_{therm1} récupérée au niveau de l'échangeur n°1 par l'eau de refroidissement.
8. De même au niveau de l'échangeur n°2, déterminer P_{therm2} (puissance thermique récupérée par l'eau de refroidissement) et faire l'A.N.
9. En sortie du moteur la température des gaz d'échappement est environ de $T_{\text{refoul}} = 500^\circ\text{C}$. En assimilant les gaz d'échappement à un gaz parfait ($\gamma = 1,30$ et $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$), estimer la température T_f de ces gaz à la sortie de l'échangeur thermique n°2. [On démontrera l'expression de $C_{p,m}$ d'un GP en fonction de R et γ].

III. Pompe à chaleur géothermique (d'après CCINP MP 2014) :

Cette partie traite du fonctionnement d'une pompe à chaleur (PAC) géothermique utilisée pour maintenir le circuit d'eau chaude d'une habitation à une température de $T_C = 50^\circ\text{C}$.

Pour cela, la PAC étudiée échange de l'énergie thermique avec l'eau d'une nappe souterraine de température égale à $T_F = 15^\circ\text{C}$.

Le fluide caloporteur qui effectue des cycles au sein de la PAC est le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane, de nom commercial R-134a. Il sera plus simplement désigné par « fluide » dans la suite. Lorsqu'il est à l'état gazeux, le fluide est supposé correctement décrit par le modèle des gaz parfaits (constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$).

Lorsqu'il est à l'état liquide, le fluide est supposé indilatable et incompressible.

On note :

- $M = 102,0 \text{ g.mol}^{-1}$ la masse molaire du fluide ;
- c_V la capacité thermique massique à volume constant du fluide à l'état gazeux, c_P sa capacité thermique massique à pression constante à l'état gazeux et $\gamma = c_P/c_V = 1,18$ son coefficient isentropique ;
- $\Delta h_{\text{vap}}(T)$ l'enthalpie massique de vaporisation du fluide à la température T ;
- $h_V(T)$ l'enthalpie massique de la vapeur saturante à la température T ;
- $h_L(T)$ l'enthalpie massique du liquide saturant à la température T .

Quelques données numériques utiles sont par ailleurs rassemblées dans le tableau ci-dessous (p_{sat} est la pression de vapeur saturante du fluide) :

T	p_{sat} (bar)	$h_V(T)$ (en kJ.kg^{-1})	$h_L(T)$ (en kJ.kg^{-1})
$T_C = 323 \text{ K}$	13,2	421,9	270,5
$T_F = 288 \text{ K}$	4,88	405,6	220,1

1. Exprimer puis calculer $\Delta h_{\text{vap}}(323 \text{ K})$ puis $\Delta h_{\text{vap}}(288 \text{ K})$.
2. Sur un schéma de principe, identifier les différents transferts énergétiques à l'œuvre au sein de la PAC étudiée, entre les différents éléments ci-dessous et les représenter au moyen de flèches indiquant le sens conventionnel et le sens réel des échanges. Identifier la source chaude et la source froide.



3. Définir l'efficacité e de la PAC et démontrer l'expression de sa valeur maximale e_{max} en fonction de T_C et T_F . Faire l'A.N. pour e_{max} .

Le fluide qui effectue des cycles au sein de la PAC subit l'enchaînement de transformations suivant :

- **Étape (1) → (2)** : à partir d'un état de vapeur saturante (1) à la température $T_1 = T_F = 288$ K, le fluide subit une compression adiabatique réversible jusqu'à un état (2) dans lequel il se trouve à l'état de vapeur sèche à la pression $p_2 = p_{\text{sat}}(323$ K) et à la température T_2 .

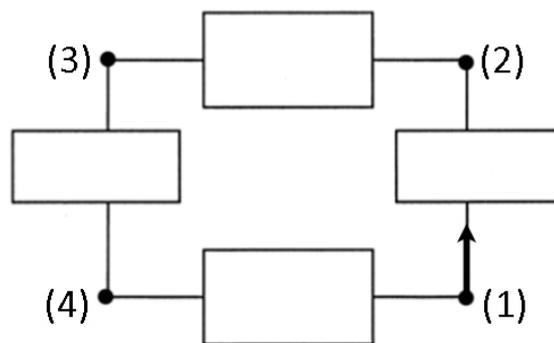
- **Étape (2) → (3)** : à partir de l'état (2), le fluide subit un refroidissement isobare puis une liquéfaction isobare. Il se refroidit dans un premier temps jusqu'à atteindre l'état de vapeur saturante puis le refroidissement se poursuit et le fluide se liquéfie totalement jusqu'à atteindre l'état de liquide saturant dans l'état final (3). Sa température est alors égale à $T_3 = T_C = 323$ K.

- **Étape (3) → (4)** : le fluide traverse alors un détendeur. Au sein de celui-ci, on admet qu'il subit une transformation isenthalpique. Le détendeur est par ailleurs supposé parfaitement calorifugé : aucune énergie thermique n'est échangée au cours de cette étape. Dans l'état final (4), le fluide est diphasé à la pression $p_1 = p_{\text{sat}}(288$ K) et possède un titre massique en vapeur noté x_v .

- **Étape (4) → (1)** : le fluide dans l'état (4) subit pour finir une vaporisation isobare jusqu'à retourner à l'état initial (1).

4. Représenter le cycle thermodynamique décrit par le fluide circulant au sein de la PAC dans le diagramme de Clapeyron (p, v). Tracer les isothermes $T_F = 288$ K et $T_C = 323$ K, la courbe de saturation, ainsi que les points représentatifs des états (1), (2), (3) et (4).

5. Doit-on placer le condenseur au contact de la source froide ou de la source chaude ? Pourquoi ? Au cours de quelle étape le fluide échange-t-il par conséquent avec la source chaude ? avec la source froide ? Reproduire et compléter le schéma ci-dessous en identifiant la nature des différents blocs (compresseur, détendeur, condenseur et évaporateur).



6. Par quoi est représenté le travail massique w_{cycle} dans le diagramme de Clapeyron ? Montrer, à l'aide de la réponse précédente, qu'en augmentant la température T_F , la température T_C étant maintenue constante par ailleurs, on augmente l'efficacité de la PAC. On demande de raisonner de façon qualitative sur l'efficacité de la PAC, donc sur les échanges d'énergie et non sur l'efficacité de Carnot. Quel est à votre avis l'avantage d'une PAC sur aquifère (c'est-à-dire échangeant avec une nappe d'eau souterraine) par rapport à une PAC utilisant l'air extérieur comme source froide ?

7. Exprimer la température T_2 au point (2) en fonction de $T_1 = T_F$, γ , p_1 et p_2 . En déduire la valeur numérique de T_2 .

8. Déterminer l'énergie thermique massique q_{2-3} échangée au cours de l'étape (2) \rightarrow (3) en fonction de R , γ , M , de la différence de température $T_3 - T_2$ et de Δh_{vap} (323 K).

En déduire la valeur numérique de q_{2-3} . Comparer numériquement les deux termes intervenant dans l'expression de q_{2-3} : conclusion ?

9. Exprimer h_3 et h_4 en fonction de données du tableau et en déduire le titre en vapeur x_V dans l'état (4). On pourra utiliser le théorème des moments pour l'enthalpie après l'avoir énoncé.

10. Exprimer l'énergie thermique massique q_{4-1} échangée au cours de l'étape (4) \rightarrow (1) en fonction de x_V et Δh_{vap} (288 K). Calculer numériquement q_{4-1} .

11. Montrer que $w_{\text{cycle}} = -q_{2-3} - q_{4-1}$. En déduire la valeur numérique du travail massique w_{cycle} échangé par cycle.

12. Exprimer puis calculer l'efficacité e de la PAC étudiée. Comparer l'efficacité e obtenue à l'efficacité maximale e_{max} (cf. question 3). Quelle est l'origine de l'écart observé ?

13. Quel doit-être le débit massique du fluide dans la PAC pour assurer une puissance de chauffe de 8 kW ? Déterminer par ailleurs la puissance fournie par le compresseur pour qu'il en soit ainsi.

IV. Question de cours :

En reprenant le modèle simple de distribution des vitesses selon 6 directions, mener le calcul de la pression cinétique p exercée par un fluide sur une paroi plane de surface S .

L'expression de p fera intervenir la vitesse des particules notée v_q (vitesse quadratique), la densité de particule par unité de volume notée n^* et la masse m d'une particule microscopique du fluide.

Annexe :

