

DS N°8 Thermodynamique (Calculatrice interdite)

Exercice 1 : Moteur à essence (d'après CCINP TSI 2026)

On s'intéresse au fonctionnement d'une voiture Clio de la marque Renault dont les caractéristiques sont données dans le document 1.

Document 1 - Caractéristiques techniques d'une Renault Clio

Moteur	
Carburant	Essence
Cylindrée (cm ³)	898
Rapport de compression	9,5:1
Puissance maximale (ch)	90
Couple maximal (N · m)	140
Performances	
Vitesse maximale (km · h ⁻¹)	178
0 - 100 km · h ⁻¹ (s)	12,1
Carburant	
Consommation à 100 km · h ⁻¹ (L/100 km)	10
Volume du réservoir (L)	45

Tableau 1 - Caractéristiques de la voiture

Source : www.renaultgroup.com

On définit le rapport volumétrique comme le rapport $\delta = \frac{V_h}{V_b}$ et la cylindrée comme le volume total admis par l'ensemble des cylindres du moteur lors de la phase d'admission.

Le moteur à essence de cette voiture utilise un mélange air-essence modélisé par un cycle thermodynamique de Beau de Rochas. Ce cycle est constitué des phases successives suivantes :

- **0 → 1** : admission isobare et isotherme du mélange dans la chambre de combustion jusqu'au point mort haut de volume V_h . La quantité de matière de mélange admise sera notée n_e ;
- **1 → 2** : compression adiabatique réversible du mélange vers le point mort bas de volume V_b où le mélange est porté à une température de **614 K** ;
- **2 → 3** : combustion isochore du mélange qui atteint une température de **1 800 K** ;
- **3 → 4** : détente adiabatique réversible du mélange jusqu'au point mort haut où le mélange descend à une température de **879 K** ;
- **4 → 1** : ouverture de la soupape modélisée par un refroidissement isochore jusqu'à la température ambiante de **300 K** ;
- **1 → 0** : éjection isobare et isotherme du mélange jusqu'au point mort bas.

Pour simplifier l'étude, on assimile le mélange air-essence à un système fermé constitué d'une quantité de matière n_e d'un gaz parfait diatomique de coefficient isentropique γ , hors étapes d'admission et d'éjection. On notera {GP} ce système. On note respectivement W , Q_c et Q_f , le travail reçu par le système de la part du rotor du moteur, le transfert thermique reçu par le système de la part de la source chaude et le transfert thermique reçu par le système de la part de la source froide sur un cycle. On note également d'un indice i , toute variable d'état associée à l'état i .

On rappelle que $C_V = \frac{n_e R}{\gamma - 1}$ et $C_P = \frac{\gamma n_e R}{\gamma - 1}$.

Q1. Identifier les sources chaude et froide, et donner leurs températures.

Q2. Donner, en justifiant, les signes de Q_f , Q_c et de W .

- Q3.** Compléter le diagramme de Watt (P, V) en annexe en indiquant les différents états **1 à 4**, le sens de parcours du cycle et les transferts thermiques Q_f et Q_c . Commenter le sens de parcours du cycle représenté.
- Q4.** Exprimer $Q_{2 \rightarrow 3}$, le transfert thermique reçu par {GP} lors de la phase $2 \rightarrow 3$, en fonction notamment des températures T_2 et T_3 .
- Q5.** Exprimer $Q_{4 \rightarrow 1}$, le transfert thermique reçu par {GP} lors de la phase $4 \rightarrow 1$, en fonction notamment des températures T_1 et T_4 .
- Q6.** En écrivant le premier principe sur un cycle, exprimer le travail W en fonction notamment des températures T_1, T_2, T_3 et T_4 .
- Q7.** En déduire une expression du rendement du moteur η en fonction des températures T_1, T_2, T_3 et T_4 .

On rappelle que pour une transformation adiabatique et réversible, la loi de Laplace s'écrit : $PV^\gamma = C^{te}$

- Q8.** Exprimer la température T_4 en fonction de T_3, V_b, V_h et de γ .
- Q9.** Exprimer la température T_1 en fonction de T_2, V_b, V_h et de γ .
- Q10.** En déduire l'expression de η en fonction de δ et de γ . L'application numérique donne $\eta = 0,59$. On utilisera cette valeur pour la suite.
- Q11.** Établir l'expression du rendement de Carnot η_c associé à ce cycle. Faire l'application numérique et commenter.
- Q12.** Écrire le second principe de la thermodynamique sur un cycle
- Q13.** Exprimer l'entropie totale échangée S_e avec la source froide et la source chaude.
- Q14.** En déduire l'expression de l'entropie créée S_c sur un cycle. Ce résultat est-il cohérent avec la réponse à la question 10 ?

Exercice 2 : Etude d'une pompe à chaleur (d'après PT B2024)

Dans le cadre de la rénovation énergétique des bâtiments afin de lutter contre le réchauffement climatique, il est préconisé l'installation de pompe à chaleur. En effet, ce dispositif permet d'effectuer des économies d'énergie pour le chauffage des habitations et la production d'eau sanitaire.

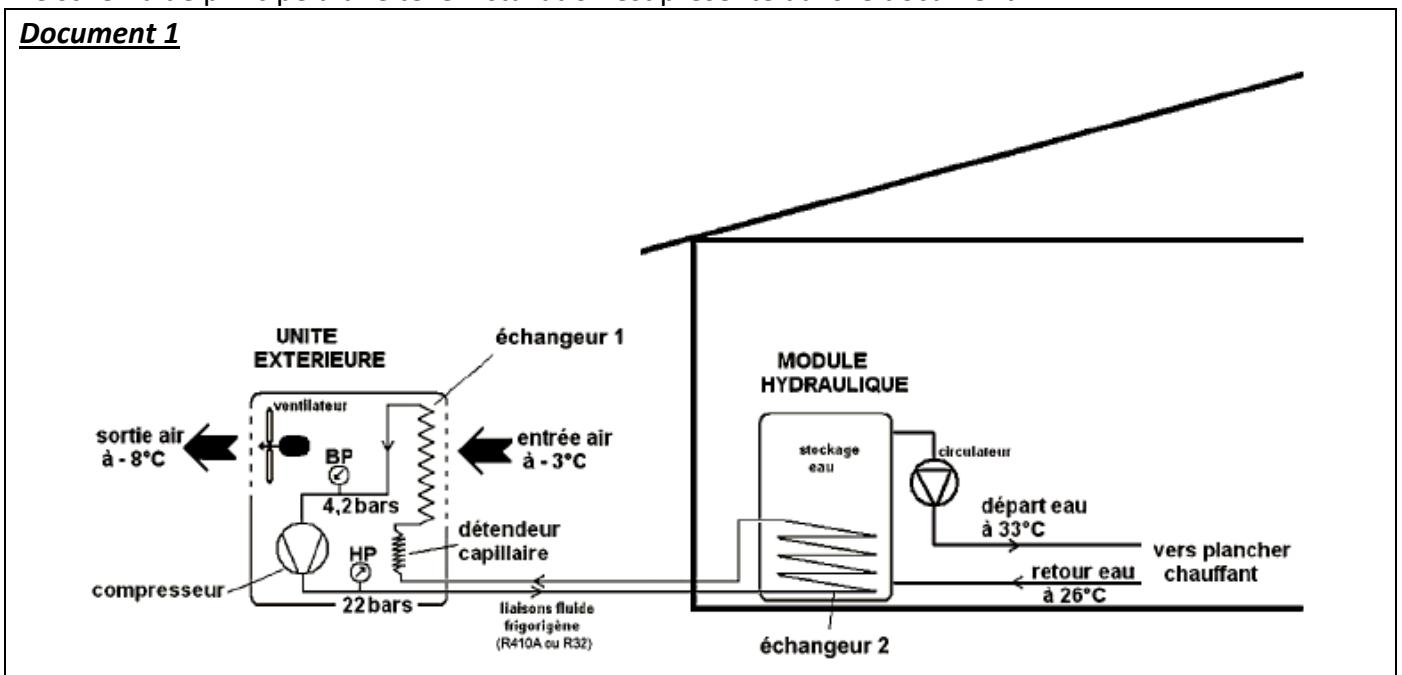
PARTIE A : Modèle ditherme

- Q15.** Présenter sous forme de schéma annoté, le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur ditherme fonctionnant entre une source chaude thermostatée (de température T_C) et une source froide thermostatée (de température T_F).
- Q16.** On considère comme système thermodynamique le fluide de la pompe à chaleur. Préciser, en justifiant, les signes de Q_C transfert thermique reçu par le système de la part de la source chaude, de Q_F transfert thermique reçu par le système de la part de la source froide et de W travail mécanique reçu de la part du système mécanique sur un cycle de fonctionnement.
- Q17.** Définir l'efficacité (ou **COP**) de cette pompe à chaleur. L'exprimer en fonction uniquement des transferts thermiques Q_C et Q_F .
- Q18.** Déterminer l'expression de l'efficacité (ou **COP**) de la pompe à chaleur en fonction de T_C et T_F respectivement température de la source chaude et température de la source froide, de l'entropie créée au cours d'un cycle de fonctionnement que l'on notera S_c et de W . Donner son ordre de grandeur pour une machine réelle.
- Q19.** Représenter graphiquement l'évolution du **COP** en fonction de S_c (en considérant W , T_C et T_F constants).
- Q20.** Interpréter physiquement le cas $S_c = 0$.

PARTIE B : Fonctionnement de la pompe à chaleur à fluide R410A

Le schéma de principe d'une telle installation est présenté dans le document 1.

Document 1



Q21. A l'aide du document 1, identifier la source chaude et la source froide ainsi que le système mécanique qui échange un travail avec le fluide de la pompe à chaleur.

On étudie dans cette partie le fonctionnement réel de la pompe à chaleur fonctionnant avec le fluide R410A. Cette pompe à chaleur est composée des organes thermodynamiques suivants : un compresseur, un condenseur (dans lequel a lieu une liquéfaction), un détendeur et un évaporateur. Le fluide R410A subit alors les transformations décrites dans le document 2.

Document 2

En régime permanent d'écoulement, le fluide R410A subit les transformations suivantes :

- **1 → 2** : le fluide à l'état gazeux sous la pression $P_b = 4,2 \text{ bars}$ et à la température de -12 °C subit une compression isentropique jusqu'à la pression $P_h = 22 \text{ bars}$ dans un compresseur ;
- **2 → 3** : le gaz entre dans le condenseur où il subit dans un premier temps un refroidissement isobare selon une désurchauffe, pour atteindre un état de vapeur juste saturante ;
- **3 → 4** : toujours dans le condenseur, le fluide subit une liquéfaction jusqu'au liquide juste saturé à la pression P_h ;
- **4 → 5** : le liquide subit alors un sous-refroidissement isobare jusqu'à la température de 30 °C et sort du condenseur ;
- **5 → 6** : le liquide entre dans le détendeur (adiabatique et sans partie mobile) pour y subir une détente jusqu'à la pression P_b ;
- **6 → 7** : le fluide entre dans l'évaporateur pour y subir une vaporisation totale à la pression P_b pour se retrouver sous forme de vapeur juste saturante ;
- **7 → 1** : avant de sortir de l'évaporateur, la vapeur juste saturante subit une surchauffe avant de rentrer dans le compresseur.

Pour un fluide en écoulement permanent à travers un organe thermodynamique à une entrée et une sortie, on rappelle le premier principe industriel :

$$\Delta_{(e,s)}(h + e_c + e_p) = w_i + q$$

avec h enthalpie massique du fluide, e_c énergie cinétique massique du fluide, e_p énergie potentielle massique du fluide, w_i travail massique reçu par le fluide et q transfert thermique massique reçu par le fluide.

Dans la suite, on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques devant la variation d'enthalpie massique. On négligera les pertes de charge dans les canalisations.

Sur le document 1 figurent les deux échangeurs (échangeur 1 et échangeur 2) de la pompe à chaleur : l'un est le condenseur, l'autre est l'évaporateur.

Q22. Au contact de quelle source doit être mis le condenseur ? Identifier l'échangeur, présent sur le document 1, concerné en justifiant la réponse.

Q23. Au contact de quelle source doit être mis l'évaporateur ? Identifier l'échangeur, présent sur le document 1, concerné en justifiant la réponse.

Q24. En appliquant le premier principe à l'écoulement permanent à travers le détendeur, en déduire la nature de la transformation subie par le fluide.

Q25. La transformation subie par le fluide dans le compresseur est considérée isentropique dans un premier temps. Comment peut-on justifier cette hypothèse ?

On fournit le diagramme enthalpique en annexe (à rendre avec la copie) du fluide *R410A*.

Q26. A l'aide du document 2, représenter les différents points du cycle effectué par le fluide *R410A* notés de 1 à 7 sur le diagramme fourni en annexe. On précisera le sens d'évolution le long de ce cycle.

Q27. Sans s'aider des isotitres figurant sur le diagramme fourni, déterminer le titre massique du seul point du cycle dans un état diphasique. Commenter.

Q28. Déterminer à l'aide du diagramme :

- le travail massique indiqué reçu par le fluide de la part du compresseur ;
- le transfert thermique massique reçu par le fluide à la traversée du condenseur ;
- le transfert thermique massique reçu par le fluide à la traversée de l'évaporateur.

Q29. Quel est l'intérêt de la surchauffe ?

Q30. Calculer l'efficacité de la pompe à chaleur fonctionnant avec le fluide *R410A* (on donnera le résultat avec deux chiffres significatifs). Quel est l'intérêt d'une pompe à chaleur par rapport à un chauffage électrique ?

Q31. En réalité, la transformation subie par le fluide à la traversée du compresseur n'est pas isentropique. L'efficacité réelle vaut 90 % de l'efficacité calculée à la question précédente et le reste du cycle est inchangé. Quelle est alors la température en sortie du compresseur ?

Exercice 3 : Connaître son sol par décantation fractionnée (d'après PT A2026)

Afin de mettre en place la bonne stratégie d'irrigation, le maraîcher doit d'abord connaître la composition de son sol qui est un mélange en proportions variables :

- de matières organiques (débris végétaux en décomposition) ;
- d'argiles (particules de taille inférieure à $2 \mu\text{m}$) ;
- de limons (particules de taille comprise entre $2 \mu\text{m}$ et $50 \mu\text{m}$) ;
- de sables (particules de taille supérieure à $50 \mu\text{m}$).

Un sol argileux est réputé pour avoir une bonne capacité de rétention d'eau tandis qu'un sol sableux sera très drainant.

Afin d'estimer grossièrement la composition d'un sol, les jardiniers ont souvent recours au « test du bocal » dont le protocole est défini ainsi :

Test du bocal

- Prélever un échantillon de terre dans le potager et remplir environ le tiers d'un grand bocal en verre de cette terre.
- Compléter le bocal au trois quart avec de l'eau et refermer-le hermétiquement.
- Agiter le bocal vigoureusement pendant trois minutes afin de former un mélange eau/terre homogène.
- Poser le bocal sur un meuble sans y toucher pendant 72 heures.

Après 72 heures de repos, le bocal ressemble à la **Figure 2**. On peut distinguer des strates de matériaux de différentes granulométries, les plus gros grains reposant au fond du bocal. En mesurant les épaisseurs respectives de chacune des strates, on peut alors déterminer les proportions de sables, limons et argiles de la terre récoltée. On remarque que la matière organique, de densité inférieure à celle de l'eau, surnage en haut du bocal. Dans la suite de cette partie, nous allons chercher un modèle permettant d'expliquer la stratification du contenu du bocal.

Le bocal est de section S et de profondeur p . On note respectivement η et ρ_e la viscosité dynamique et la masse volumique de l'eau. η et ρ_e sont supposées constantes. On définit le repère $(O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ lié au bocal. L'axe (Oz) est vertical descendant. L'interface du mélange terre/eau avec l'air dans le bocal correspond à la cote $z = 0$. On suppose que les particules minérales (sables, limons ou argiles) sont sphériques, de rayon r (qui dépend de la particule considérée), et qu'elles sont soumises, entre autres, à la force de frottement fluide $\vec{F} = -6 \pi \eta r \vec{v}$, où \vec{v} est la vitesse des particules, et à la poussée d'Archimède dont l'énoncé historique peut se formuler ainsi : « Tout corps plongé dans un fluide au repos subit une force verticale de norme égale et opposée au poids du volume de fluide déplacé. »



Figure 2 : résultat du « test du bocal » après 72 heures de décantation.

On note enfin ρ_0 (avec $\rho_0 > \rho_e$) la masse volumique des particules, supposée constante et identique pour toutes les particules.

Q32. Donner les expressions des trois forces s'exerçant sur une particule en mouvement durant la décantation.

Q33. A partir de la seconde loi de Newton, établir l'équation différentielle sur v_z , projection selon \vec{e}_z de la vitesse de la particule. Déterminer alors, en fonction de ρ_0, ρ_e, r, η et de l'accélération g de la pesanteur, la vitesse limite $\vec{v}_l = v_l \cdot \vec{e}_z$ atteinte par ces particules. Quel est le signe de v_l ?

Q34. Introduire un temps caractéristique τ_c que l'on exprimera en fonction de ρ_0, r et de η , puis donner la solution $v_z(t)$ de l'équation différentielle en supposant qu'initialement $v_z(t = 0) = 0$.

On appelle temps de sédimentation noté τ_s la durée nécessaire pour qu'une particule initialement à $z = 0$ se retrouve au fond du bocal, c'est-à-dire en $z = p$.

Q35. Déterminer l'évolution de $z(t)$ en supposant une particule initialement à la surface $z(t = 0) = 0$ avec une vitesse nulle $v_z(t = 0) = 0$.

Q36. Montrer que le temps de sédimentation τ_s est à chercher comme solution de l'équation :

$$v_l[\tau_s + \tau_c\{\exp(-\tau_s/\tau_c) - 1\}] = p$$

On ne cherchera pas à résoudre cette équation.

On donne **Figure 3** la représentation graphique, en échelle log-log, de la fonction

$$f : x \rightarrow x - 1 + \exp(-x)$$

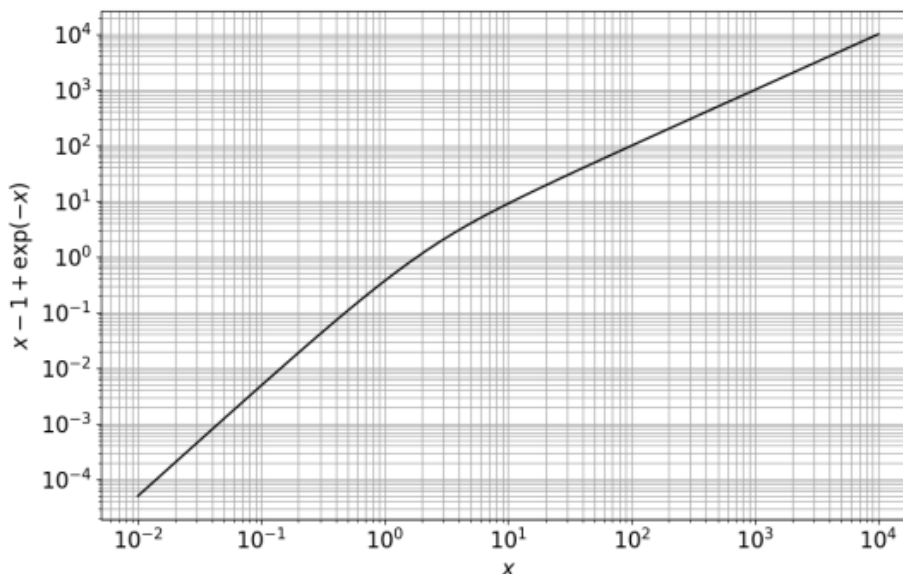


Figure 3 : représentation graphique de la fonction f en échelle log-log.

On récapitule également dans un tableau les valeurs de τ_c et du rapport $p/(v_l \tau_c)$ pour trois types de particules :

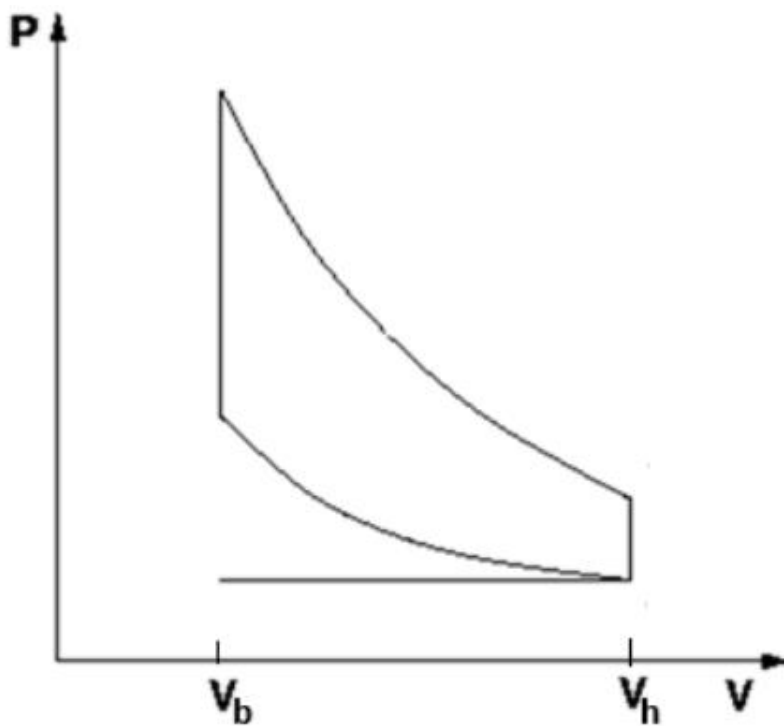
	argiles ($r = 1 \mu\text{m}$)	limons ($r = 20 \mu\text{m}$)	sables ($r = 2 \text{mm}$)
τ_c (en s)	2×10^{-7}	9×10^{-5}	0,9
$p/(v_l \tau_c)$	8×10^{11}	5×10^6	5×10^{-2}

- Q37.** Déterminer graphiquement la valeur prise par τ_s pour les sables $r = 2 \text{ mm}$. Vous complétez la reproduction de la **Figure 3** présente en annexe de l'épreuve et vous explicitez avec précision toutes les étapes de votre démarche.
- Q38.** Faire une approximation de $f(x)$ lorsque $x \gg 1$. Cela se confirme-t-il sur le graphe de la **Figure 3** ?
- Q39.** En déduire alors les valeurs prises par τ_s pour les limons et les argiles.
- Q40.** Introduisons ε la distance parcourue par les argiles durant la durée de sédimentation des sables (c'est-à-dire la durée du dépôt de tous les sables du bocal au fond de celui-ci). En exprimant littéralement puis numériquement le rapport ε/p , conclure quant à l'efficacité de la sédimentation fractionnée pour obtenir une séparation des différentes particules.
- Q41.** Justifier que le protocole indique d'attendre 72 heures avant d'analyser les résultats de la décantation.

ANNEXE A RENDRE EN FIN D'EPREUVE

Exercice 1

Q3)



Exercice 2

Q26)

