

CONCOURS BLANC N°2

CALCULATRICES AUTORISÉES

Les trois problèmes sont totalement indépendants et devront être traités sur des copies séparées.

I. Mission Rosetta

On étudie quelques aspects de la mission Rosetta, qui a conduit entre 2004 et 2014 une sonde spatiale jusqu'à la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko (surnommée "Tchouri" dans toute la suite). On établit ou rappelle dans une première partie des généralités utiles pour toute la suite. Selon les phases du mouvement, on travaillera dans différents référentiels : héliocentrique \mathfrak{R}_S ou géocentrique \mathfrak{R}_G qu'on considérera à chaque fois galiléen pour la durée du phénomène étudié.

Dans la suite, les vecteurs vitesse exprimés dans le référentiel héliocentrique seront noté avec un indice /S et les vecteurs vitesse exprimés dans le référentiel géocentrique avec un indice /G.

Données :

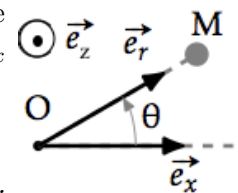
| | |
|---|---|
| Période de révolution terrestre | $T_T = 3.7 \times 10^2$ jours |
| Rayon de l'orbite terrestre considérée comme circulaire | $r_T = 1.5 \times 10^{11}$ m = 1 u.a. |
| Rayon de la Terre | $R_T = 6.4 \times 10^3$ km |
| Masse de la Terre | $m_T = 6.0 \times 10^{24}$ kg |
| Périhélie de "Tchouri" | $r_{p,Tc} = 1.2$ u.a. |
| Aphélie de "Tchouri" | $r_{a,Tc} = 5.7$ u.a. |
| Constante de gravitation universelle | $G = 6.6 \times 10^{-11}$ m ³ .kg ⁻¹ .s ⁻² |

I.1. Généralités

On étudie le mouvement, dans un référentiel galiléen \mathfrak{R}_S , d'un point matériel de masse m et de position M soumis uniquement à la force de gravitation exercée par une masse m_E fixe en O dans \mathfrak{R}_S .

Q1. On désigne par $\overrightarrow{\sigma_{O/S}}$ le moment cinétique en O du point matériel. Montrer que $\overrightarrow{\sigma_{O/S}}$ est conservé au cours du mouvement. En déduire que le mouvement est plan.

On peut donc le caractériser par ses coordonnées cylindriques d'axe Oz tel que $\overrightarrow{\sigma_{O/S}} = \sigma_{O/S} \vec{e}_z$. On repère la distance $r = OM$ et l'angle θ entre un vecteur \vec{e}_x orthogonal à $\overrightarrow{\sigma_{O/S}}$ fixe dans \mathfrak{R}_S et le vecteur unitaire \vec{e}_r défini par $\overrightarrow{OM} = r \vec{e}_r$.



Q2. Déterminer $\sigma_{O/S}$, en fonction de m, r et $\dot{\theta}$.

REMARQUE : Par la suite, on pourra supposer que \vec{e}_z est choisi tel quel $\sigma_{O/S} > 0$.

On considère un mouvement circulaire de rayon R autour de O.

Q3. Montrer qu'il est uniforme. Déterminer la norme v de la vitesse, les énergies cinétique, potentielle et mécanique en fonction de G, m_E, m et R

Q4. Déterminer l'expression du quotient T^2/R^3 en fonction des constantes du problème.

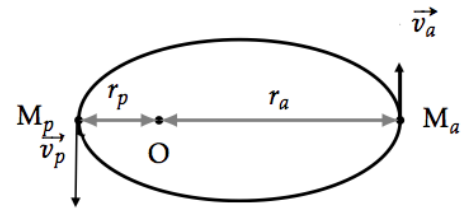
On admettra dans la suite que ce quotient conserve la même valeur pour les trajectoire elliptiques du même astre en remplaçant le rayon R par le demi-grand axe a de l'ellipse.

On considère l'exemple de l'orbite de la Terre dans le système solaire.

Q5. Calculer numériquement v (notée $v_{T/S}$) pour l'orbite de révolution de la Terre autour du Soleil, de rayon noté r_T ainsi que son énergie mécanique.

- Q6.** On considère un point matériel situé sur l'orbite terrestre ($r = r_T$). Quelle vitesse (dans \mathfrak{R}_S) doit-il posséder pour pouvoir s'éloigner à l'infini du Soleil ultérieurement ? On l'exprimera en fonction de $v_{T/S}$ puis on donnera sa valeur numérique.

On considère maintenant une trajectoire elliptique (on ne cherchera pas à montrer son existence) de périastre M_p et d'apoastre M_a . On note r_p la distance à l'astre O et \vec{v}_p la vitesse (resp. r_a et \vec{v}_a) au point M_p (resp. M_a).



- Q7.** Montrer que l'énergie mécanique se met sous la forme :

$$E_m = -\frac{Gm_E m}{r_p + r_a}$$

1.2. Trajectoires

On étudie d'abord le lancement de la sonde dans le référentiel géocentrique. On ne considère que l'attraction gravitationnelle de la Terre.

- Q8.** La sonde est lancée de la Terre le 2 mars 2004 avec une vitesse à la surface terrestre **dans le référentiel géocentrique** de norme $v_{I/G}$. Déterminer et calculer sa valeur minimale, nommée v_1 pour qu'elle puisse s'éloigner à l'infini de la Terre, dans l'hypothèse où l'on néglige les frottements.
- Q9.** Calculer la vitesse de la sonde quand elle est loin de la Terre, en négligeant l'attraction des autres astres pour $v_{I/G} = 2v_1$.

On étudie maintenant le mouvement de la sonde dans le référentiel héliocentrique. On considère que dès après son lancement, on peut négliger l'attraction gravitationnelle de la Terre pour ne plus considérer que celle du Soleil.

On considère une version simplifiée des trajectoires de la comète "Tchouri" et de la sonde Rosetta autour du Soleil. On représente Fig. 1 l'allure des orbites de la Terre T, de "Tchouri" T_C et de la dernière orbite de Rosetta R_O autour du Soleil S.

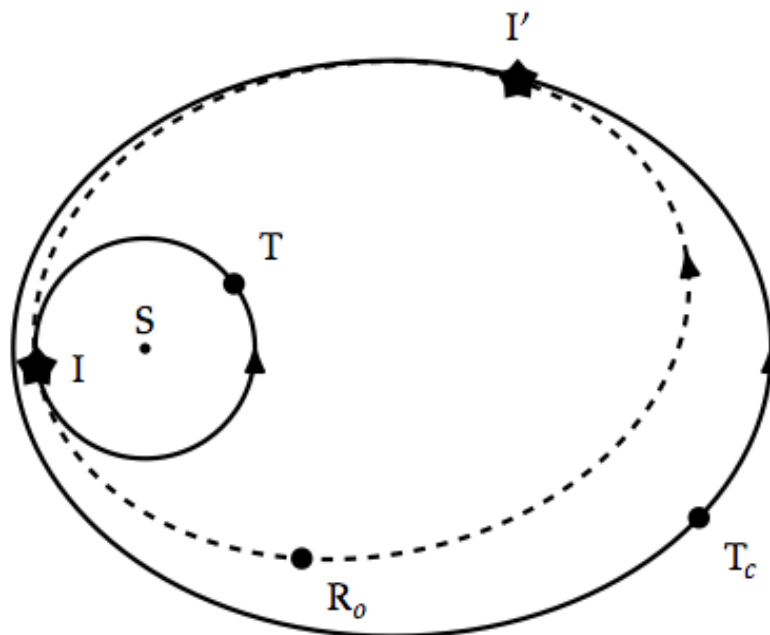


FIGURE 1 – Orbites dans le référentiel géocentrique

- Q10.** Déterminer et calculer la période de révolution de Tchouri, notée T_{T_C} , ainsi que sa vitesse (en norme) à son périhélie et à son aphélie, notées respectivement $v_{T_{Cp}/S}$ et $v_{T_{Ca}/S}$. REMARQUE : Les données littérales utilisables sont celles données en début d'énoncé.

Q11. La sonde étant initialement sur une orbite quasi-circulaire de rayon qu'on considérera égal r_T , on modifie (par une méthode qu'on étudiera plus loin), la vitesse de Rosetta quand elle passe au point I. On note $v_{Rop/S}$ sa norme à l'issue de cette manoeuvre et on suppose que cette vitesse est tangente à l'orbite circulaire.

Sachant que la Fig. 1 respecte les proportions, réaliser sur le schéma les mesures nécessaires pour déterminer numériquement le rapport $v_{Rop/S}$. On fera attention à la clarté des notations introduites pour les grandeurs mesurées sur la figure.

Q12. Déterminer numériquement, pour la situation ci-dessus la période de Rosetta T_{R_O} .

I.3. Assistance gravitationnelle

Cette technique consiste à utiliser le passage de Rosetta à proximité de la Terre pour augmenter ou diminuer sa vitesse dans le référentiel héliocentrique \mathfrak{R}_S . Le mouvement de Rosetta est affecté par la Terre pendant un temps suffisamment court, et la Terre est suffisamment massive pour qu'on puisse considérer que le mouvement dans \mathfrak{R}_S (référentiel héliocentrique toujours supposé galiléen) de la Terre (de position T et de masse m) est, pendant cette manoeuvre, rectiligne uniforme à une vitesse qu'on notera $\vec{v}_{T/S}$.

On étudie d'abord le mouvement de Rosetta dans le référentiel géocentrique noté \mathfrak{R}_T , en translation à la vitesse $\vec{v}_{T/S}$.

On note $\vec{v}_{0/T}$ le vecteur vitesse de Rosetta dans le référentiel géocentrique quand elle est loin de la Terre (et $v_{0/T}$ sa norme) et se dirige vers celle-ci et b son paramètre d'impact (cf. Fig. 2).

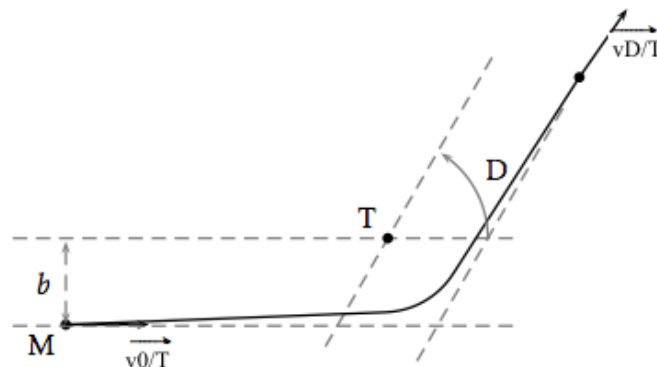


FIGURE 2 – Assistance gravitationnelle.

Q13. Quelle est la trajectoire approximative de Rosetta quand elle est loin de la Terre et qu'elle s'en approche? Même question quand elle est loin et s'en éloigne.

Q14. On admet que la trajectoire complète est une conique, justifier le choix du type de trajectoire dessinée.

Q15. On note $\vec{v}_{D/T}$ le vecteur vitesse de Rosetta dans \mathfrak{R}_T lorsqu'elle est très éloignée de la Terre (cf. Fig. 2). Que vaut sa norme $v_{D/T}$?

Q16. On nomme "déviation", notée D , l'angle entre $\vec{v}_{0/T}$ et $\vec{v}_{D/T}$. Préciser, sans calculs, pour quelles conditions initiales on aura $D = 0$ et pour quelles conditions initiales on aura $D = \pi$.

Q17. On admet que $\tan \frac{D}{2}$ ne dépend que des paramètres $b, v_{0/T}, G$ et m_T . Former un nombre sans dimension β à partir de ces grandeurs tel que l'expression :

$$\tan \frac{D}{2} = \beta$$

soit acceptable.

Pour étudier le phénomène d'assistance, on doit maintenant se placer dans le référentiel héliocentrique. On désigne par $\vec{v}_{0/S}$ le vecteur vitesse initial de la sonde dans le référentiel héliocentrique et par $\vec{v}_{D/S}$ le vecteur vitesse final dans le même référentiel.

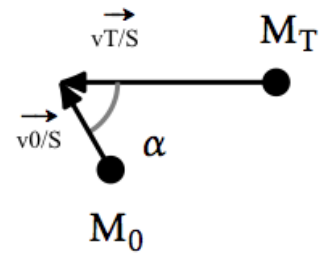
Q18. Compte tenu des hypothèses de la modélisation, justifier que $\overrightarrow{v_{0/S}} = \overrightarrow{v_{0/T}} + \overrightarrow{v_{T/S}}$.

Reproduire le schéma de la Fig. 3 et représenter le vecteur $\overrightarrow{v_{0/T}}$.

On note $\alpha = (\overrightarrow{v_{0/S}}; \overrightarrow{v_{T/S}})$ l'angle entre $\overrightarrow{v_{0/S}}$ et $\overrightarrow{v_{T/S}}$ (cf. Fig. 3).

Q19. Montrer que :

$$v_{0/T} = \sqrt{v_{0/S}^2 + v_{T/S}^2 - 2v_{0/S}v_{T/S} \cos \alpha}$$



Q20. Représenter sur le schéma réalisé précédemment le vecteur $\overrightarrow{v_{D/T}}$ pour un angle de déviation D de l'ordre de 120° . En déduire la construction du vecteur $\overrightarrow{v_{D/S}}$.

Q21. Reproduire le même schéma que précédemment mais représenter la configuration qui rend la norme $v_{D/S}$ maximale quand l'angle α reste fixé. On note $v_{D/S,\max}$ la norme correspondante. Etablir l'expression de $v_{D/S,\max}$ en fonction des normes $v_{T/S}$, $v_{0/S}$ et de α .

Q22. On veut calculer $v_{D/S,\max}$ dans des cas particuliers.

a) On considère le cas particulier $v_{0/S} = 0$. Déterminer $v_{D/S,\max}$. On pourra s'aider d'un schéma si l'expression générale n'a pas été établie.

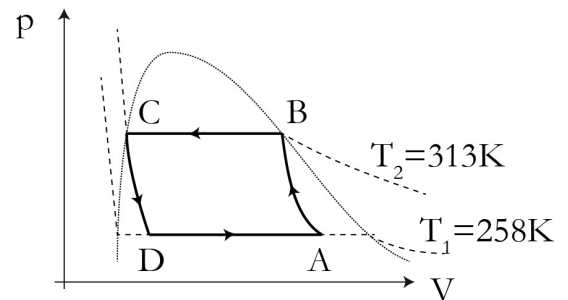
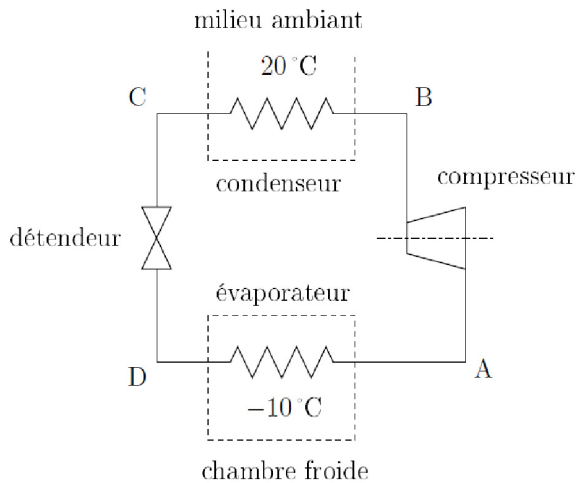
b) On considère le cas particulier $v_{0/S} = v_{T/S}$. Déterminer l'expression de $\frac{v_{D/S,\max} - v_{T/S}}{v_{T/S}}$ pour $\alpha \ll 1$. On effectuera un développement limité en α au terme non nul d'ordre le plus bas.

Q23. Après son lancement le 2 mars 2004, Rosetta recroise pour la première fois la Terre un an plus tard. A l'issue de la phase d'assistance gravitationnelle, la NASA annonce que sa vitesse s'est accrue de $\Delta v = 3.8 \text{ km.s}^{-1}$. En supposant qu'on était dans la configuration réalisant $v_{D/S,\max}$ et qu'avant son passage $v_{0/S} \approx v_{T/S}$, déterminer et calculer la valeur de l'angle entre les trajectoires de Rosetta et de la Terre avant la manoeuvre.

REMARQUE : Pour information : Rosetta a utilisé en tout 3 fois l'assistance gravitationnelle avec la Terre pour acquérir la vitesse nécessaire (celle calculée à la question **Q11**).

II. Étude d'un réfrigérateur

On étudie un réfrigérateur dont le schéma, ainsi que le cycle décrit dans le diagramme (p, V) , sont représentés ci-dessous. La courbe en cloche est la courbe de saturation.



Le système contient une quantité donnée de fluide, le R134a ou le 1,1,1,2-tétrafluorométhane CF_3-CH_2F (qui n'attaque pas la couche d'ozone). Le circuit est fermé et subit la série cyclique de transformations suivante (valeurs numériques indiquées dans le tableau ci-dessous) :

- Le fluide qui sort de l'évaporateur (état A) est à la pression p_1 et la température T_1 . Il subit une compression isentropique dans un compresseur calorifugé, jusqu'à la pression p_2 et la température T_2 (état B).
- Dans le condenseur, le fluide se condense totalement en fournissant de la chaleur à l'extérieur (la cuisine par exemple). L'air est à environ $T_{\text{amb}} = 20^\circ\text{C}$. La pression saturante est alors p_2 et la température du fluide est T_2 (état C).
- Le fluide qui sort du condenseur sous forme de liquide saturant à la pression de p_2 est ramené à la pression de p_1 dans le détendeur (état D). La détente $C \rightarrow D$ est du type de JOULE-KELVIN, donc adiabatique et isenthalpique. Au cours de la détente, une partie du fluide se vaporise.
- Dans l'évaporateur, le liquide restant se vaporise partiellement à pression et température constantes en recevant un transfert thermique de la chambre froide de température $T_{\text{fr}} = -10^\circ\text{C}$ (état A).

On négligera toutes les variations de vitesse du fluide et on raisonnera sur 1 kg du fluide.

Données :

| pression de vapeur saturante (bar) | température de changement d'état (K) | enthalpie massique du liquide (kJ/kg) | enthalpie massique de la vapeur (kJ/kg) | entropie massique du liquide ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) | entropie massique de la vapeur ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) |
|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|
| $p_1 = 1,64$ | $T_1 = 258\text{ K}$ | $h_{1L} = 178,2$ | $h_{1V} = 360,4$ | s_{1L} | $s_{1V} = 730$ |
| $p_2 = 18,26$ | $T_2 = 313\text{ K}$ | $h_{2L} = 264,1$ | $h_{2V} = 387,7$ | s_{2L} | $s_{2V} = 680$ |

Q1. Préliminaires.

- a) Déterminer les chaleurs latentes massiques de vaporisation ℓ_1 et ℓ_2 , respectivement aux températures $T_1 = 258 \text{ K}$ et $T_2 = 313 \text{ K}$.
- b) Démontrer la relation entre l'enthalpie et l'entropie massiques lors d'une vaporisation isobare. En déduire les données manquantes du tableau : s_{1L} et s_{2L} , qu'on pourra utiliser directement par la suite.

Q2. Étude du compresseur A \rightarrow B.

- a) Déterminer le titre massique en vapeur x_A au début de la compression.
- b) En admettant que le travail massique w^* fourni par le compresseur est égal à la variation d'enthalpie massique du fluide lors de la compression, calculer w^* .

Q3. Étude du condenseur B \rightarrow C.

- a) Calculer le transfert thermique q_{BC} reçu de la part de l'air ambiant.
- b) Calculer la variation d'entropie du fluide, l'entropie échangée et l'entropie créée lors de la condensation.

Q4. Étude du détendeur C \rightarrow D.

- a) Calculer le titre massique en vapeur x_D à la fin de la détente.
- b) En déduire l'entropie créée lors de la détente.

Q5. Étude de l'évaporateur D \rightarrow A.

- a) Calculer le transfert thermique q_{DA} reçu de la part de la chambre froide.
- b) Calculer, au cours de l'évaporation, la variation d'entropie du fluide, ainsi que l'entropie échangée et l'entropie créée.

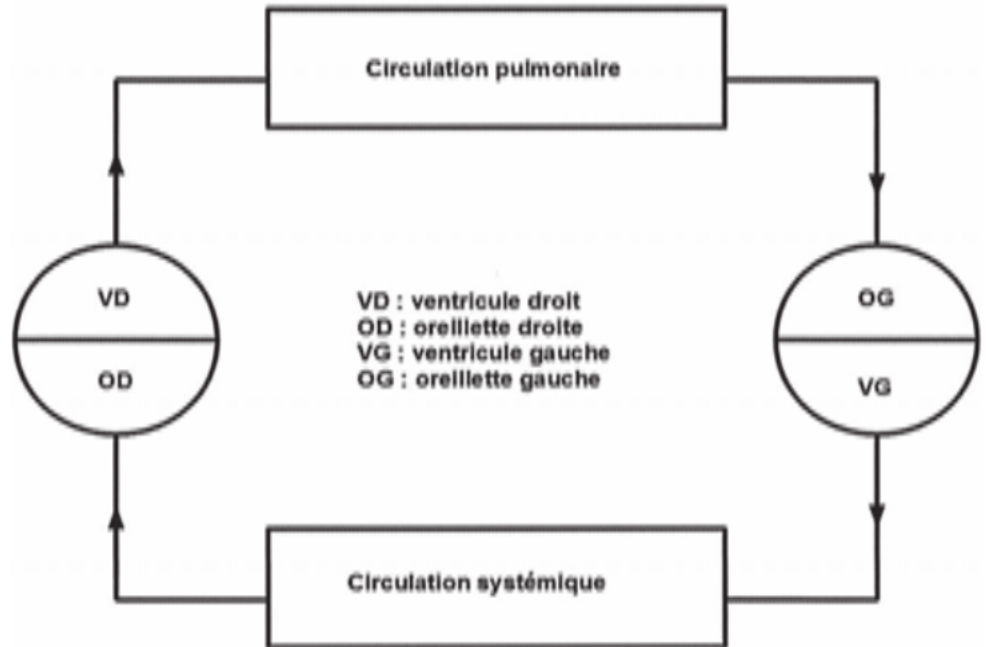
Q6. Bilan.

- a) Définir l'efficacité e_F du réfrigérateur. Calculer e_F .
- b) Établir l'expression de l'efficacité maximale e_{\max} d'un réfrigérateur en fonction des températures des sources chaude et froide. Calculer e_{\max} .
- c) Calculer l'entropie créée sur un cycle.
- d) Justifier le choix des températures $T_1 = 258 \text{ K}$ et $T_2 = 313 \text{ K}$ pour ce cycle.

III. Modélisation thermodynamique du cœur

Le cœur est un organe composé de 4 chambres : deux ventricules et deux oreillettes. Un ensemble oreillette-ventricule fonctionne comme une pompe : une oreillette collecte le sang en provenance d'une partie du corps et l'envoie vers un ventricule à travers une valve d'entrée, puis le ventricule envoie ce sang vers une autre partie du corps à travers une valve de sortie.

L'ensemble oreillette-ventricule **droit** reçoit du sang provenant des organes et l'envoie vers les poumons pour se recharger en dioxygène (on parle de circulation **pulmonaire**), alors que l'oreillette-ventricule **gauche** reçoit du sang en provenance des poumons et l'envoie vers les autres organes pour les approvisionner en dioxygène (on parle de circulation **systémique**). Le schéma ci-contre représente cette circulation.



Dans la suite du problème, nous en considérerons que des valeurs moyennées au cours du temps et les flux sanguins seront considérés comme égaux et constants. On appelle *systole* une phase de contraction du cœur et *diastole* une phase de relâchement. On modélise le cœur comme une machine thermique ditherme de type moteur, permettant de forcer la circulation du sang.

III.1. Évaluation du travail fourni par le cœur

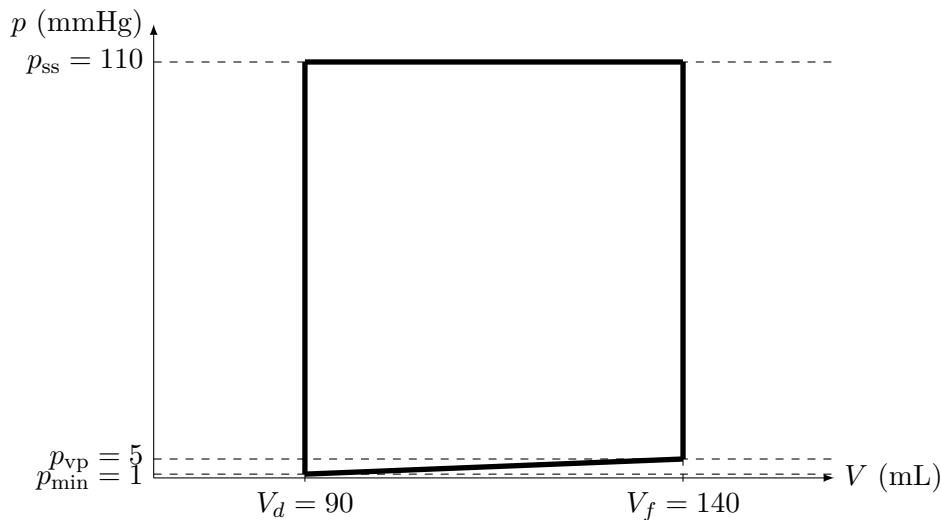
Le cœur fournit le travail nécessaire pour pomper le sang à travers le réseau sanguin. Ce travail se décompose en deux parties : le travail fourni par le ventricule droit et le travail fourni par le ventricule gauche (les travaux fournis par les oreillettes sont négligés). On s'intéresse d'abord au travail fourni par le ventricule gauche en se basant sur le cycle du diagramme de Clapeyron donné ci-dessous. La pression est donnée en mmHg (millimètres de mercure), unité de pression très utilisée en médecine.

Q1. Expliquer par un schéma simple pourquoi on peut mesurer la pression en mmHg. Étant donné que la pression atmosphérique normale $P_{\text{atm}} = 1013 \text{ hPa}$ correspond à une colonne de mercure de hauteur $H_0 = 760 \text{ mmHg}$, calculer la masse volumique du mercure ρ_{Hg} . On prendra $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ pour la champ de pesanteur.

Le cycle ci-dessous n'a pas été obtenu expérimentalement. La pression indiquée est en fait la surpression par rapport à une pression de référence. C'est un cycle modèle (donc simplifié), composé de deux segments verticaux aux volumes V_d et V_f , d'un segment horizontal à la surpression p_{ss} (*pression systémique à la systole*) et d'un segment de droite affine entre les pressions p_{min} et p_{vp} (*pression veineuse pulmonaire*). Les valeurs numériques sont des valeurs typiques ; les valeurs mesurées peuvent nettement varier, notamment d'un individu à l'autre.

Lors d'un cycle on observe quatre phases, données ici dans le désordre.

- Phase R : le ventricule se **R**emplit de sang en provenance de l'oreillette ;
- Phase V : le ventricule se **V**ide d'une partie du sang qui est envoyé, sous pression, dans les organes ;
- Phase C : le ventricule se **C**ontracte, valves d'entrée et de sortie fermées ;
- Phase D : le ventricule se **D**étend, valves d'entrée et de sortie fermées.



Pression (surpression) du sang dans le ventricule gauche en fonction du volume du ventricule.

- Q2.** Reproduire le schéma du cycle sur la copie. En justifiant soigneusement d'après les informations ci-dessus, indiquer sur chaque tronçon la phase R, V, C, ou D correspondante. En déduire le sens de parcours de ce cycle, que l'on indiquera sur le schéma.
- Q3.** Comme le sang qui transite dans les ventricules est extérieur au « moteur » cardiaque, le travail reçu par le moteur (c'est-à-dire reçu par l'agent thermique du moteur au sens d'un moteur thermique ditherme) vaut ici $W_{m,g} = \oint_{\text{cycle}} p \, dV$ et non l'opposé car le volume balayé par les forces de pression extérieures (exercées par le sang) est $-dV$. D'après le sens de parcours du cycle, indiquer le signe du travail W_g reçu par le sang de la part du ventricule gauche sur un cycle entier ?
- Q4.** Déterminer l'expression littérale du travail W_g en fonction de p_{\min} , p_{ss} , p_{vp} et la quantité $V_s = V_f - V_d$.
En donner une expression approchée sachant que $p_{ss} \gg p_{vp} > p_{\min}$.
À quoi correspond la quantité V_s vis-à-vis de la circulation de sanguine ?

Le cycle du ventricule droit peut se modéliser de la même manière ; seules les valeurs de pression changent. En particulier la pression p_{ps} (*pression pulmonaire à la systole*) nécessaire pour faire circuler le sang vers les poumons est inférieure à p_{ss} , pression nécessaire pour faire circuler le sang vers le reste du corps.

- Q5.** En déduire une expression approximative du travail W_d fourni par le ventricule droit au sang en fonction de V_s et p_{ps} .
En déduire l'expression littérale de la puissance mécanique \mathcal{P} fournie par le cœur en fonction de la fréquence cardiaque f , de V_s , p_{ss} et p_{ps} .
- Q6.** À l'aide des valeurs numériques présentées dans l'énoncé ou dans l'annexe, proposer une évaluation de la puissance moyenne \mathcal{P}_{moy} et de l'énergie mécanique \mathcal{E}_m totale fournies par le cœur au cours d'une journée. On prendra une journée type constituée de 8h de repos couché, 15h de repos debout, et 1h de pic d'activité.

III.2. Rendement cardiaque

L'énergie nécessaire au fonctionnement du cœur est essentiellement fournie par des réactions d'oxydation de glucides. La quantité d'énergie produite dépend donc de la quantité de dioxygène consommée. Le cœur ne représente qu'une fraction de l'énergie totale dépensée par le corps (et donc du dioxygène consommé), qui avoisine en moyenne $\mathcal{E}_j \approx 10 \text{ MJ}$ par jour pour un adulte moyen. Dans la suite, on considérera que **le cœur consomme 14% du dioxygène** utilisé par le corps.

- Q7.** Proposer une définition du rendement η du cœur puis en calculer une valeur numérique.

On se propose de modéliser le cœur comme une machine thermique ditherme en contact avec une source froide (le milieu extérieur, de température $T_f = 20^\circ\text{C}$) et une source chaude de température T_c qui lui fournit l'énergie nécessaire sous forme de transfert thermique.

- Q8.** Montrer que le rendement d'une telle machine est inférieur à une certaine valeur à exprimer en fonction de T_f et T_c . Dans quelle condition y aura-t-il égalité ?
- Q9.** Dédurre des deux précédentes questions une valeur minimale de T_c . Commenter la pertinence du modèle proposé.

III.3. Évolution du rendement du cœur en fonction de l'effort fourni

Le rendement du cœur quantifie à quel point la production d'énergie mécanique est efficace. Or cette production d'énergie mécanique se fait à partir d'une source d'énergie chimique qui consomme du dioxygène. Plus on consomme du dioxygène, plus la production d'énergie est importante. Par conséquent le rendement peut dépendre du taux Ω de consommation de l'oxygène, qui lui-même dépend de l'effort fourni.

L'étude du lien entre le fonctionnement du cœur et des poumons amène à l'établissement de l'équation différentielle suivante, liant le rendement du cœur η et le taux Ω de consommation de l'oxygène :

$$\Omega \frac{d\eta}{d\Omega} + \eta = b,$$

où b est une constante qui dépend de la physiologie de l'individu.

- Q10.** Résoudre cette équation différentielle en prenant en compte comme « condition initiale » le fait qu'au repos on mesure un rendement η_0 et un taux de consommation de l'oxygène Ω_0 . On montrera que les solutions sont de la forme $\eta = \frac{\alpha_1}{\Omega} + \alpha_2$ où α_1 et α_2 sont des constantes qu'on exprimera en fonction de b , η_0 et Ω_0 .

On cherche à vérifier expérimentalement ce résultat théorique. Pour cela on demande à un individu de réaliser un effort physique plus ou moins intense (par exemple sur un vélo), et on mesure divers paramètres (flux d'air, fréquence cardiaque, tensions artérielles, ...) permettant de déduire les valeurs de η et de Ω , résumées dans le tableau suivant :

| Niveau d'effort | Repos | Effort léger | Effort moyen | Effort intense |
|------------------|-------|--------------|--------------|----------------|
| Ω (L/min) | 0,19 | 1,18 | 2,00 | 2,51 |
| η | 0,16 | 0,071 | 0,071 | 0,068 |

- Q11.** Proposer une représentation graphique permettant de vérifier l'adéquation entre la théorie et l'expérience. En déduire les valeurs de α_1 et α_2 . Commenter l'accord avec la théorie.

ANNEXE : Données hémodynamiques au repos et durant un pic d'exercice

Les données suivantes sont traduites et adaptées de l'article *Higginbotham M. B., Morris K. G., Williams R. S. ; Regulation of stroke volume during submaximal and maximal upright exercise in normal man. Circ Res. 58 1986 : 281-291.*

Dans cet article de 1986, une étude a été réalisée sur une population de 24 mâles âgés de 20 à 50 ans et ne présentant aucun symptôme de maladie. De nombreuses grandeurs ont été mesurées. Le tableau suivant résume une partie des données sous la forme de la valeur moyenne obtenue \pm l'écart-type.

| | Repos couché sur le dos | Repos debout | Pic d'exercice |
|---|----------------------------|-----------------|-----------------|
| Ω (L.min ⁻¹) | 0,31 \pm 0,06 | 0,33 \pm 0,06 | 2,55 \pm 0,31 |
| Fréquence cardiaque (batt.min ⁻¹) | 64 \pm 12 | 73 \pm 12 | 167 \pm 16 |
| p_{ss} (mmHg) | 130 \pm 14 | 136 \pm 12 | 220 \pm 24 |
| p_{ps} (mmHg) | 20 \pm 4 | 15 \pm 4 | 34 \pm 6 |

* * * FIN DE L'ÉPREUVE * * *