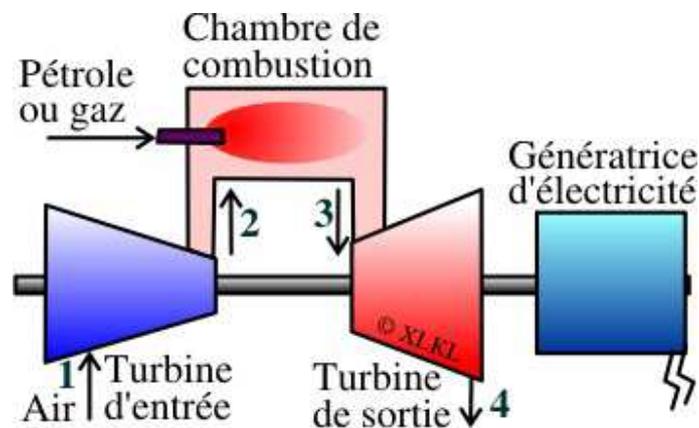


Concours Blanc – Physique/Chimie – Durée 4 heures

Histoire de générateurs...

1 Turbine à gaz

Dans ce problème nous allons étudier les aspects thermodynamiques d'une turbine à gaz servant à faire tourner un générateur électrique (alternateur). De l'air entre dans la machine (point 1) à la température de 20°C ($T_1 = 293\text{ K}$) et à la pression $P_1 = 1\text{ bar}$. Quand il entre dans la chambre de combustion (point 2), sa température monte à la température de 200°C ($T_3 = 473\text{ K}$). Tout se passe comme si le gaz sortant en 4 entrerait à nouveau en 1 une fois refroidi dans l'atmosphère.



1.1 Rendement théorique maximal

1. Faire un schéma avec la source froide (température T_1), la source chaude (température T_3) montrant les échanges d'énergie au niveau d'une certaine quantité d'air qui décrit un cycle moteur. On donnera le signe des différents échanges d'énergie (Q_C , Q_F et W)
2. En appliquant les principes de la thermodynamique à un système à définir, montrer que le rendement de la turbine ne peut pas être plus grand qu'une certaine valeur à calculer littéralement et numériquement (en prenant les valeurs données plus haut).
3. En prenant la valeur du rendement maximal théorique, quelle doit être la puissance minimale de la chambre de combustion qui permet d'avoir une puissance motrice de 100 kW au niveau de la génératrice ?
4. Dans la chambre de combustion, on brûle du propane. Sachant que la combustion d' 1 m^3 de propane (gazeux) libère une énergie d'environ $p = 10\text{ kWh}$ (p est appelé pouvoir calorifique), calculer le débit volumique D_v (en m^3/s) de gaz théorique minimal de cette turbine de 100 kW .

1.2 Cycle théorique de Joule-Brayton

L'air entre au point 1 à la température T_1 et à la pression P_1 . La première turbine (compresseur en fait) comprime l'air de manière isentropique réversible jusqu'à la pression $P_2 = \lambda P_1$ (λ est appelé taux de compression).

L'air passe ensuite dans la chambre de combustion (de 2 vers 3) où il est chauffé de manière isobare par l'énergie thermique libérée par la combustion du gaz injecté.

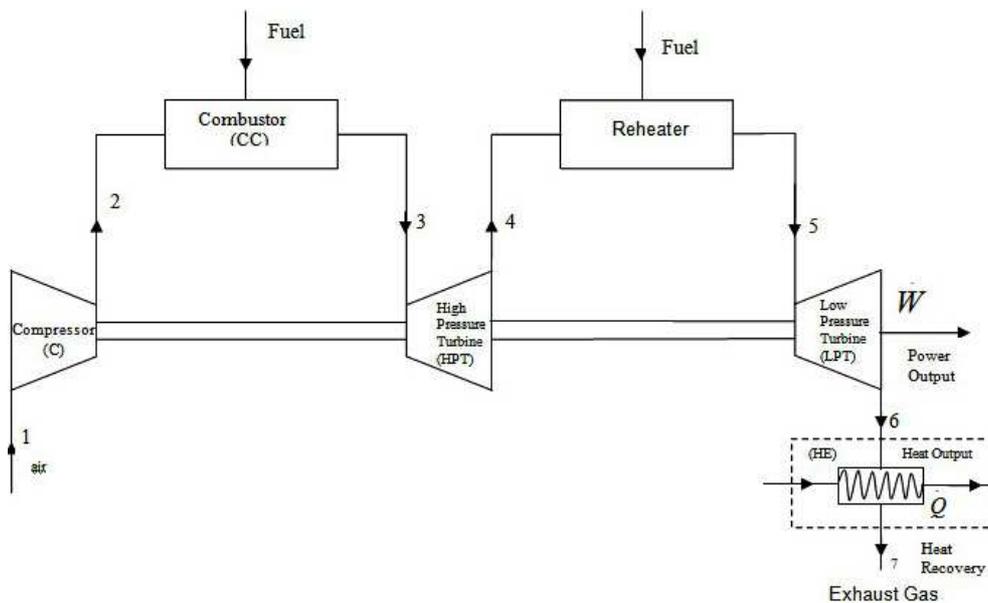
Les gaz brûlés subissent une détente isentropique réversible dans la turbine de 3 vers 4, la pression en 4 est supposée être égale à celle en 1.

Pour simplifier, on pourra fermer le cycle de 4 vers 1 sans se préoccuper du changement de nature des gaz...

1. Tracer le diagramme de Clapeyron (P en fonction de V) subi par 1 mole d'air entrant dans la turbine à gaz. On assimilera les gaz à un gaz parfait de coefficient d'atonicité $\gamma = 1,4$.
2. Etablir l'expression du rendement du cycle, défini par $\rho = \frac{-W_{\text{cycle}}}{Q_{2 \rightarrow 3}}$ en fonction de λ et de γ uniquement.
3. Applications numériques : on prend $\lambda = 4$ et $\gamma = 1,4$. Calculer la valeur numérique du rendement. Calculer la température de l'air à la fin de la première compression (on rappelle que la température en 1 est $T_1 = 293$ K). A quelle température doit être le gaz au point 3 afin que la température au point 4 soit 10% supérieure à celle au point 1 ?
4. Si la puissance de la génératrice est de 100 kW, quelle est alors la puissance thermique de la chambre de combustion ? En déduire le débit volumique D'_v de gaz entrant. On rappelle que la combustion d'1 m³ de propane (gazeux) libère une énergie d'environ $p = 10$ kWh (p est appelé pouvoir calorifique)

1.3 Technologie à cogénérateur

Dans cette partie, on modifie la turbine à gaz : la détente du gaz se réalise en 2 étapes successives où l'on rechauffe (reheat) le gaz détendu.

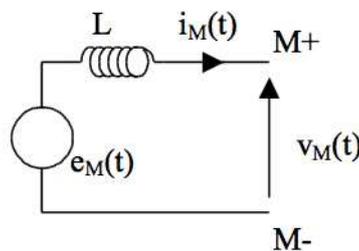


- 1 \rightarrow 2 : compression isentropique réversible de l'air qui entre à la pression $P_1 = 1$ bar et à la température $T_1 = 293$ K. La pression au point 2 est de 4 bars.
 - 2 \rightarrow 3 : combustion (du « fuel » = gaz propane) isobare. La température au point 3 est de 205°C.
 - 3 \rightarrow 4 : première détente isentropique réversible du gaz, la pression passe de P_3 à P_3/τ .
 - 4 \rightarrow 5 : on réchauffe le fluide à pression constante jusqu'à la température de 205°C (la même qu'au point 3)
 - 5 \rightarrow 6 : deuxième détente isentropique réversible qui amène le gaz à la pression P_1
1. Calculer τ qui permet d'avoir deux taux de détente égaux : $\frac{P_4}{P_3} = \frac{P_6}{P_5}$. On exprimera τ uniquement en fonction de λ (on obtient une expression toute simple !). En déduire la valeur de la pression du point 4.
 2. Que représente le système placé entre les points 6 et 7 ?
 3. En assimilant les gaz qui circulent dans les turbines à un gaz parfait, tracer l'allure du diagramme de Clapeyron (P en fonction de V). On fermera le cycle par une isobare de 6 vers 1.
 4. Le rendement de ce cycle est défini par $\rho = -\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_{23} + Q_{45}}$. En raisonnant sur un gaz parfait, montrer que le rendement théorique de ce nouveau cycle est $\rho = 1 + \frac{T_1 - T_6}{2T_3 - T_2 - T_4}$

5. A partir de maintenant, on arrête de supposer que l'air est un gaz parfait. Le diagramme Pression-enthalpie de l'air (fluide R719) est donné plus loin (à la fin de ce sujet).
Quelle serait l'allure des isothermes dans ce diagramme si l'air était un gaz parfait ?
6. Placer au mieux les points 1, 2 , ... 6 sur le diagramme .
Reproduire sur votre copie l'allure du diagramme ($P - h$) du cycle subi par le gaz. On ne cherchera pas la précision, juste l'allure...
7. Rappeler l'expression du premier principe pour les systèmes en écoulement (Zeuner). On donnera aussi les hypothèses sous-jacentes.
8. Déterminer la valeur numérique du travail massique reçu par le fluide lors de l'étape $1 \rightarrow 2$. (L'unité de l'axe des abscisses est kJ/kg). Même question pour les étapes $3 \rightarrow 4$ et $5 \rightarrow 6$.
9. Déterminer aussi la valeur numérique des transferts thermiques massiques pour les étapes $2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 5$.
10. En déduire la valeur numérique du rendement de cette machine.
11. Quel doit être le débit massique d'air afin d'avoir une puissance mécanique utile de 100kW ?
12. Calculer le débit volumique de gaz brûlé dans la chambre de combustion (entre 2 et 3) et dans le réchauffeur (entre 4 et 5) si on veut que la puissance au niveau de la génératrice électrique soit de 100 kW. Le débit massique de l'air entrant en 1 sera pris égal à celui calculé dans la question précédente. On rappelle que la combustion d' 1 m^3 de propane (gazeux) libère une énergie d'environ $p = 10\text{kWh}$ (p est appelé pouvoir calorifique)

1.4 Modélisation du stator de l'alternateur en régime permanent

La turbine à gaz fait tourner le rotor de l'alternateur (génératrice d'électricité). Le stator va alors être le siège d'un phénomène d'induction périodique. Le schéma électrique ci-dessous représente le modèle simplifié du stator. On néglige la résistance.



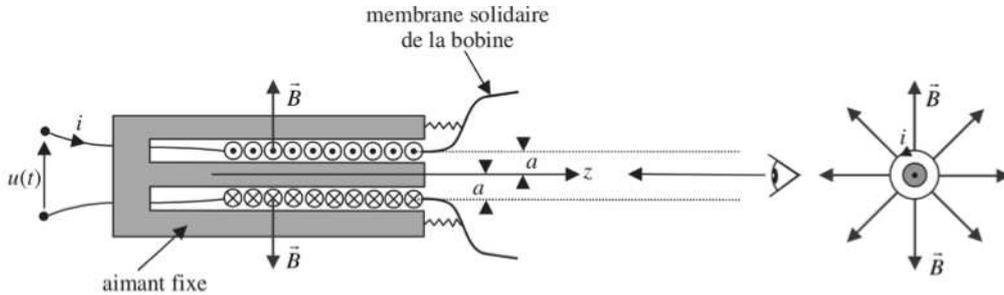
Se ce schéma, $e_M(t)$ représente la force électromotrice et $i_M(t)$ représente le courant délivré par la machine (convention générateur). Les grandeurs e_M et i_M sont sinusoïdales de pulsation ω . On note alors :

$$e_M(t) = E_M \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha) \quad v_M(t) = V_M \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t) \quad i_M(t) = I_M \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi)$$

1. Le stator constitue-t-il l'induit ou l'inducteur ?
2. Expliquer simplement pourquoi E_M est proportionnel à ω .
3. Expliquer pourquoi le stator comporte une bobine d'inductance L ?
4. On fait un essai à vide (on ne branche rien entre $M-$ et $M+$). La génératrice délivre alors une tension $V_M = 100 \text{ V}$. En déduire la valeur de E_M .
5. On fait un essai en court-circuit (on relie $M-$ et $M+$ par un fil électrique) et on mesure $I_M = 50 \text{ A}$ quand ω est de 100 tr/min . En déduire la valeur de l'inductance L .
6. On branche maintenant une résistance $R = 10\Omega$ entre $M-$ et $M+$. La vitesse de rotation est toujours la même. Calculer les valeurs de I_M , α et φ . Est-ce que $i(t)$ est en avance ou en retard de phase sur $e_M(t)$?
7. En déduire la puissance instantanée reçue par la résistance R . Que vaut la puissance moyenne (sur une période) ? Faire l'application numérique.

2 Générateur d'ondes acoustiques

On considère le haut-parleur ci-dessous. L'aimant fixe crée un champ magnétique radial dans l'entrefer, de norme B constante à une distance a de l'axe de symétrie Oz du système. La membrane de masse m est solidaire d'une bobine constituée de N spires circulaires de rayon a , de longueur totale $l_0 = N \times 2\pi a$, d'inductance propre L et de résistance R .



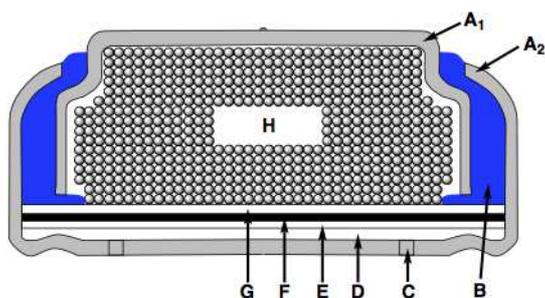
La bobine peut se translater sans frottement selon Oz . Un système de ressorts se comportant comme un ressort unique de raideur k la relie à l'aimant. La résistance de l'air au déplacement de la membrane est modélisée par une force $\vec{f} = -\lambda \vec{v}$, où \vec{v} est le vecteur vitesse de l'ensemble {bobine, membrane}. On pose $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$. On soumet la bobine à une tension $u(t)$.

1. En analysant qualitativement le comportement du système, expliquer comment il peut générer une onde acoustique.
2. Montrer que la force de Laplace est selon $-Bil_0\vec{e}_z$ et établir l'équation mécanique du système {bobine, membrane} dont le centre d'inertie est à la cote z .
3. A l'aide d'un bilan de puissance établir l'expression de la force électromotrice induite en fonction de B, l_0 et la dérivée $\dot{z}(t)$.
4. Dessiner le circuit électrique équivalent et établir l'équation électrique du système.
5. On se place en régime sinusoïdal forcé. Pourquoi peut-on se limiter à ce cas? Montrer alors que l'impédance électrique du haut-parleur se met sous la forme $\underline{Z} = R + jL\omega + \underline{Z}_m$. Mettre $\frac{1}{\underline{Z}_m}$ sous la forme $\frac{1}{R_0} + jC_0\omega + \frac{1}{jL_0\omega}$ et donner un schéma électrique équivalent du montage faisant intervenir la résistance R_0 , l'inductance L_0 et la capacité C_0 .
6. Exprimer L_0C_0 et commenter le résultat obtenu.
7. Faire le bilan de puissance du système. On note $\langle f(t) \rangle$ la valeur moyenne de la fonction $f(t)$. Montrer alors que $\langle ui \rangle = \langle Ri^2 \rangle + \langle \lambda v^2 \rangle$.

Justifier que le rendement électroacoustique du haut-parleur soit $\rho = \frac{\langle \lambda v^2 \rangle}{\langle ui \rangle}$

3 Générateur électrochimique : pile Zinc/Air

Dans cette section, nous allons nous intéresser à un générateur électrochimique d'énergie électrique. Les piles zinc-air sont des accumulateurs tirant leur énergie de l'oxydation du zinc avec le dioxygène de l'air ambiant (Figure ci-dessous). Ces piles possèdent de hautes densités énergétiques et sont peu chères. Leur format varie des piles boutons pour les audioprothèses à des formats intermédiaires, pouvant être utilisés dans des appareils tels les caméras, jusqu'aux grands formats utilisables dans les véhicules électriques.

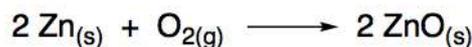


A_1 et A_2 : revêtements métalliques, B : joint isolant, C : orifice d'entrée d'air, D : membrane semi-perméable, E : dioxygène (air), F : membrane hydrophobe, G : séparateur, H : poudre de zinc et électrolyte (solution gélifiée de potasse).

Caractéristiques :

Force électromotrice : $e \approx 1,6$ V.

Réaction de fonctionnement :



Masse de zinc dans la pile : 0,65 g.

Masse de la pile : 1,0 g.

Intensité de fonctionnement : 0,80 mA.

Tension de fonctionnement : 1,5 V.

Figure 1. Schéma et caractéristiques d'une pile bouton zinc-air.

On donne :

Masse molaire du zinc : 65 g/mol

Potentiel rédox standard du couple ZnO/Zn : -0,43 V.

Potentiel rédox standard du couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$: 1,23 V.

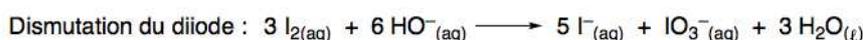
1. Identifier l'anode et la cathode de cette pile. Donner sa polarité. Justifier. On écrira les demi-équations électroniques liées à chaque électrode. On rappelle que la potasse est basique!
2. Calculer la force électromotrice standard de cette pile.
3. Calculer la valeur de la constante d'équilibre de la réaction de fonctionnement de la pile.
4. Calculer la durée théorique de fonctionnement de la pile.
5. Calculer l'énergie que peut fournir cette pile.

4 Le glucose : générateur de l'énergie du sportif

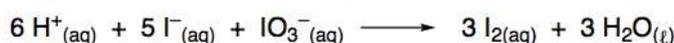
Le glucose, un sucre de formule brute $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, est stocké chez les plantes sous forme d'amidon et chez les animaux sous forme de glycogène, qui peuvent être hydrolysés à tout moment pour redonner des molécules de glucose prêtes à être dégradées en fournissant de l'énergie dès que la cellule en a besoin. Nous allons nous intéresser au titrage du glucose dans un jus d'orange selon le protocole proposé dans le Document 1.

Document 1. Dosage du glucose présent dans du jus d'orange.

- Presser une demi-orange et filtrer sur Büchner sous pression réduite pour récupérer le jus.
- Diluer 5 fois le jus d'orange. Cette solution est nommée (S1).
- En se plaçant en milieu basique, oxyder le glucose présent dans $V_G = 20,0$ mL de la solution (S1) à l'aide de 20,0 mL de solution aqueuse de diiode de concentration $C = 5,00 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Dans cette étape il se produit deux réactions :



- Revenir en milieu acide pour reformer du diiode par une réaction de médismutation :



- Titrer le diiode présent par une solution de thiosulfate de sodium à $0,100 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. On obtient un volume équivalent $V_{\text{éq}} = 8,8 \text{ mL}$.

1. Ecrire la réaction de titrage du diiode I_2 par les ions thiosulfate $S_2O_3^{2-}$. Comment repère-t-on l'équivalence? On donne $E^\circ(S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}) = 0,08 \text{ V}$
2. Calculer la quantité (en mol) de diiode présente au départ et celle calculée grâce au volume équivalent. Pourquoi ces deux quantités sont différentes?
3. Calculer la concentration massique en glucose dans un jus d'orange. La masse molaire du glucose est $M = 180 \text{ g/mol}$.

