

Correction du CAPES externe de Physique 2007

La composition de physique et applications 2007 comprend cinq parties : la première concerne la thermodynamique et en particulier le fonctionnement d'un moteur thermique selon le cycle de Diesel, la seconde est consacrée à la physique appliquée et en particulier à l'étude d'alternateur synchrone triphasé et de machine asynchrone triphasée, la troisième traite de mécanique (d'ailleurs essentiellement de géométrie), la quatrième tourne autour de questions d'électrocinétique et enfin la cinquième traite d'optique.

Les vecteurs apparaissent dans le texte de la rédaction soit en caractère gras soit surmontés d'une flèche.

I Moteur Diesel

I.1 Propriétés d'un gaz parfait

I.1.1 l'équation d'état du gaz parfait est : $PV=nRT$

I.1.2 $H=U+PV=U+nRT$, donc $dH=dU+nRdT$, et $C_p dT=C_v dT+nRdT$, d'où : $C_p=C_v+nR$, et :

$$C_v = \frac{nR}{\gamma - 1}, \text{ et } C_p = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}.$$

I.2 Transformations d'un gaz parfait

I.2.1 $W_{isoV} = \int_{V_i}^{V_f} \delta W_{isoV} = \int_{V_i}^{V_f} -P.dV = 0$, car $dV=0$ en isochore.

I.2.2 $W_{isoP} = \int_{V_i}^{V_f} \delta W_{isoP} = \int_{V_i}^{V_f} -P.dV = -P_i(V_f - V_i) = -P_f(V_f - V_i)$

I.2.3

$$Q_{isoV} = \Delta U - W_{isoV} = \Delta U = C_v \Delta T = C_v (T_f - T_i) = \frac{C_v}{nR} (P_f V_f - P_i V_i) = \frac{1}{\gamma - 1} (P_f V_f - P_i V_i)$$

I.2.4 $Q_{isoV} = \Delta H = C_p \Delta T = C_p (T_f - T_i) = \frac{C_p}{nR} (P_f V_f - P_i V_i) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_f V_f - P_i V_i)$

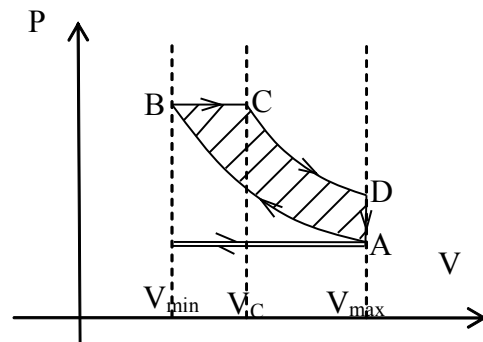
I.2.5 $Q_{isoS} = 0$, car adiabatique.

I.2.6 $dU = C_v dT = TdS - PdV$, en adiabatique réversible $dS=0$, et compte tenu de l'équation d'état $PV=nRT$, on obtient : $\frac{1}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} + \frac{dV}{V} = 0$, soit en intégrant : $T.V^{\gamma-1} = Cte$,

ou $P.V^\gamma = Cte$.

I.3 Etats thermodynamiques successifs lors du cycle diesel.

D'après les indications de l'énoncé, on peut tracer le cycle qui sera demandé dans une question ultérieure :



I.3.1 $P_A=P_{atm}=1.00 \cdot 10^5$; $T_A=T_{atm}=300K$;
 $V_A=V_{max}=0.4L$.

I.3.2

$$P_B = P_A \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^\gamma = P_A \left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)^\gamma = 3.95 \cdot 10^5 Pa$$

$$; V_B=V_{min}=0.15L ; T_B = \frac{P_B V_B}{nR} = \frac{P_B V_B}{P_A V_A} T_A = 444.13 K .$$

I.3.3 $P_C=P_B=3.95 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; $V_C=V_B=0.25 \text{ L}$; $T_C = \frac{P_C V_C}{nR} = \frac{P_C V_C}{P_A V_A} T_A = 740.2 \text{ K}$

I.3.4 $P_D = P_C \left(\frac{V_C}{V_D}\right)^\gamma = P_C \left(\frac{V_C}{V_{\max}}\right)^\gamma = 2.04 \cdot 10^5 \text{ Pa}$; $V_D=V_{\max}=0.4 \text{ L}$;

$T_D = \frac{P_D V_D}{nR} = \frac{P_D V_D}{P_A V_A} T_A = 613.35 \text{ K}$.

I.4 Transformations lors du cycle diesel

Les questions qui suivent utilisent les relations générales démontrées en I.2 et les valeurs calculées en I.3.

I.4.1 A \rightarrow B : adiabatique réversible donc : $Q_{AB}=0$ et

$W_{AB} = \Delta U_{AB} - Q_{AB} = C_V(T_B - T_A) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_A) = \frac{P_A V_A}{(\gamma - 1)T_A}(T_B - T_A) = 48.04 \text{ J}$.

I.4.2 B \rightarrow C : isobare, donc : $W_{BC}=P_C(V_B-V_C)=-39.5 \text{ J}$ et

$Q_{BC} = C_P(T_C - T_B) = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}(T_C - T_B) = \frac{\gamma P_A V_A}{(\gamma - 1)T_A}(T_C - T_B) = 138.17 \text{ J}$.

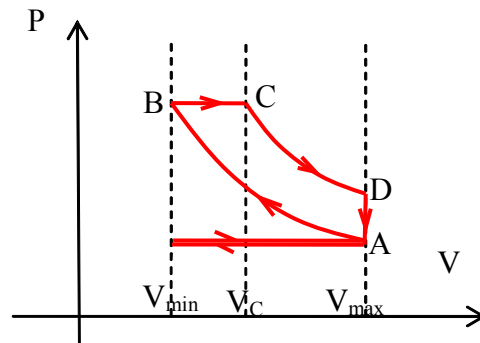
I.4.3 C \rightarrow D : adiabatique réversible donc $Q_{CD}=0$, et $W_{CD} = \frac{P_A V_A}{(\gamma - 1)T_A}(T_D - T_C) = -42.28 \text{ J}$.

I.4.4 D \rightarrow A : isochore donc $W_{DA}=0$, et $Q_{DA} = \frac{P_A V_A}{(\gamma - 1)T_A}(T_A - T_D) = -104.45 \text{ J}$.

I.5 Diagramme de Clapeyron du cycle diesel

I.5.1 $W_{\text{tot}}=W_{AB}+W_{BC}+W_{CD}+W_{DA}=-33.74 \text{ J}$. $W_{\text{tot}}<0$ car le système fournit effectivement du travail à l'extérieur (fonctionnement en moteur).

I.5.2



I.5.3 sens horaire car cycle moteur.

I.6 Rendement du moteur diesel

I.6.1 Par définition le rendement est le quotient de l'énergie utile sur l'énergie dépensée :

$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie dépensée}}$

I.6.2 Ici la machine thermique est un moteur, donc ce qui présente de l'intérêt est le travail, et l'énergie investie est ce que l'on prend à la source chaude pendant la phase B \rightarrow C, d'où :

$\eta = \frac{-W_{\text{tot}}}{Q_{BC}} = 0.244 = 24.4\%$.

I.6.3 Pour $N=1500 \text{ tr/min}=25 \text{ tr/s}$, il y a donc 25 cycles de 33.74 J par seconde soit $843.5 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, soit une puissance de : $P_{\text{mot}}=843.5 \text{ W}$.

Remarque : Cette puissance est beaucoup trop faible pour une locomotive (cela n'est d'ailleurs pas très étonnant vu la cylindrée de 0.4L), d'autre part, en ramenant à une cylindrée de 2L (cylindrée classique pour une automobile) et une vitesse de rotation de 4000 tr/min (valeur classique ici aussi), on obtient 11247 W, soit 15 ch, on est donc en deçà des puissances classiques annoncées pour ces voitures (100 à 150ch, il est vrai avec turbo).

II Alternateur triphasé et moteur asynchrone

II.1 Etude de l'alternateur triphasé

II.1.1 $\vec{S}_2 = \cos \frac{2\pi}{3} \vec{u}_x + \sin \frac{2\pi}{3} \vec{u}_y$; $\vec{S}_3 = \cos \frac{4\pi}{3} \vec{u}_x + \sin \frac{4\pi}{3} \vec{u}_y = \cos \frac{-2\pi}{3} \vec{u}_x + \sin \frac{-2\pi}{3} \vec{u}_y$.

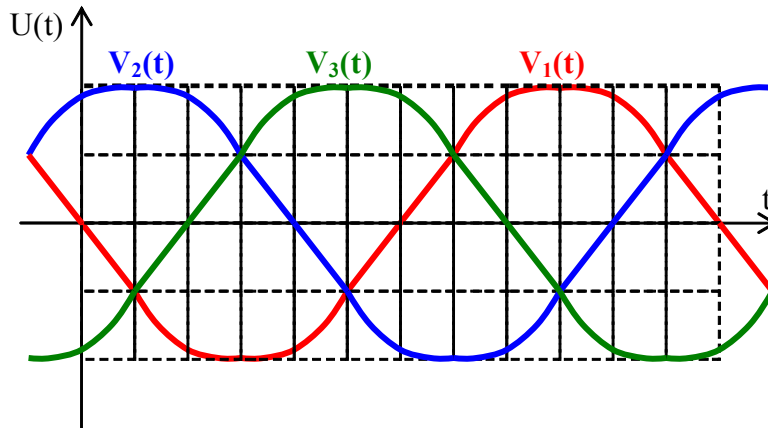
II.1.2 $B_x(t)=B\cos\omega t$; $B_y(t)=B\sin\omega t$.

II.1.3.a. D'après Faraday : $e_k = - \frac{d\Phi_k(t)}{dt}$.

II.1.3.b. $\Phi_k = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S}_k$, d'où, en effectuant, $\Phi_1=BNS\cos(\omega t)$, $\Phi_2=BNS\cos(\omega t-2\pi/3)$, $\Phi_3=BNS\cos(\omega t+2\pi/3)$.

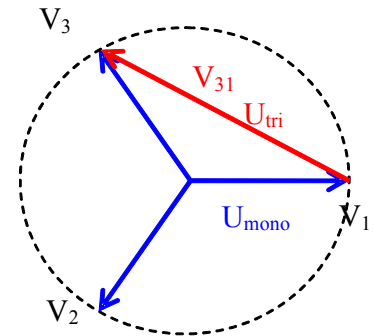
II.1.3.c. comme $u_k = -e_k = \frac{d\Phi_k(t)}{dt}$, $U_{\max}=BNS\omega$, $\varphi_1=0$, $\varphi_2=-2\pi/3$, $\varphi_3=+2\pi/3$ [2 π] .

II.1.3.d

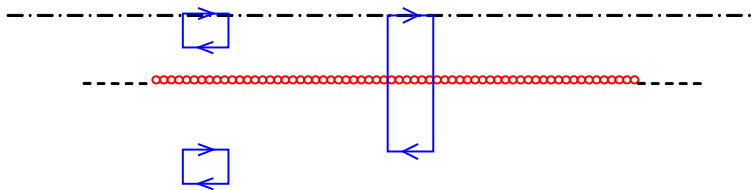


II.1.3.e. Pour une tension sinusoïdale : $U_{eff} = U_{\max} / \sqrt{2}$, d'où $U_{\max}=311$ V.

II.1.3.f. Pour du triphasé équilibré : $U_{tri} = U_{mono} \sqrt{3}$, d'où $U_{tri}=380$ V (dans la réalité le 220/380 V est plutôt du 230/400 V).



II.2 Etude magnétique du stator du moteur asynchrone



II.2.1

Tout plan perpendiculaire à l'axe est plan de symétrie : donc **B** est axial, il y a invariance par translation suivant l'axe et par rotation autour de l'axe : donc B ne dépend que de la distance à l'axe. De plus le théorème d'Ampère appliqué sur un contour rectangulaire intérieur ou extérieur montre que B est constant à l'intérieur du solénoïde, et constant à l'extérieur du solénoïde. Si l'on calcule le champ sur l'axe en intégrant sur toutes les spires, on obtient $\mathbf{B}=\mu_0 n I \mathbf{u}_z$ sur l'axe et donc à l'intérieur, et en appliquant le théorème d'Ampère sur un contour rectangulaire de part et d'autre du solénoïde, on obtient un champ nul à l'extérieur.

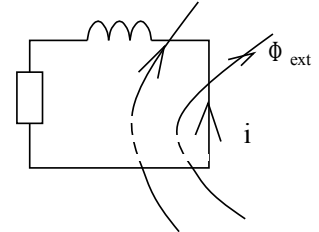
II.2.2.a. Le milieu étant linéaire, le champ résultant est la somme des trois champs créés par les bobines : $\mathbf{B}=\mathbf{B}_1+\mathbf{B}_2+\mathbf{B}_3=\mu_0 n I_1(t) \mathbf{u}_1 + \mu_0 n I_2(t) \mathbf{u}_2 + \mu_0 n I_3(t) \mathbf{u}_3$, soit, en utilisant les formules trigonométriques rappelées en début d'énoncé : $\mathbf{B}=3/2 \cdot \mu_0 n I_0 (-\sin\omega t \mathbf{u}_x + \cos\omega t \mathbf{u}_y)$.

D'où $B_0 = \frac{3}{2} \mu_0 n I_0$.

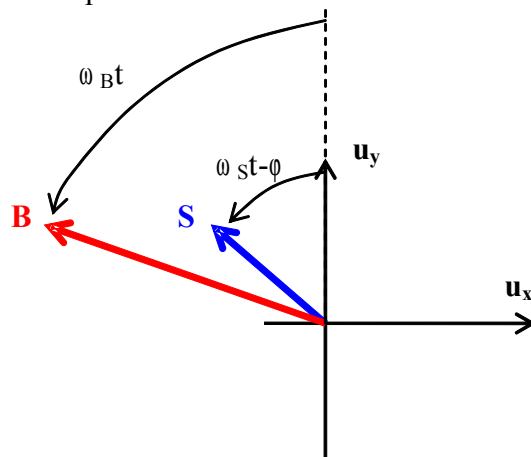
II.2.2.b On remarque que $B^2=B_0^2$, donc le vecteur B est de norme constante, de plus, $\frac{d\vec{B}}{dt} = -B_0\omega_{tri} \cos(\omega_{tri}t)\vec{u}_x - B_0\omega_{tri} \sin(\omega_{tri}t)\vec{u}_y = \vec{\Omega}_B \wedge \vec{B}$, avec $\vec{\Omega}_B = \omega_{tri}\vec{u}_z$: donc B est un vecteur tournant à la vitesse angulaire $\vec{\Omega}_B = \omega_{tri}\vec{u}_z$.

II.3 Etude électrique du rotor du moteur asynchrone

II.3.1 D'après l'énoncé, le circuit électrique équivalent au rotor est : L'équation électrique est donc : $Ri + Ldi/dt = -d\Phi_{ext}/dt$.



II.3.2 En tenant compte des données de l'énoncé :



II.3.3 $\Phi_{ext}(t) = \vec{B}(t) \cdot \vec{S}(t) = B_0 \begin{vmatrix} -\sin(\omega_B t) \\ \cos(\omega_B t) \\ 0 \end{vmatrix} \cdot S \begin{vmatrix} \cos(\omega_S t + \frac{\pi}{2} - \varphi) \\ \sin(\omega_S t + \frac{\pi}{2} - \varphi) \\ 0 \end{vmatrix} = B_0 S \cos((\omega_B - \omega_S)t + \varphi)$

II.3.4 en identifiant : $\omega = \omega_B - \omega_S$.

II.3.5 En passant en complexe (grandeurs soulignées), l'équation différentielle devient : $R\dot{i} + Ld\dot{i}/dt = -d\Phi_{ext}/dt$, et en remplaçant par la forme demandée : on obtient :

$(R + jL\omega)\dot{i} = -j\omega \Phi_{ext}$, on en tire $I_{max} = |i| = \frac{\omega B_0 S}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$.

II.3.6 $\psi = \arg(\Phi_{ext}) - \arg(i) = \arg(-L + j\frac{R}{\omega})$, d'où $\sin(\psi) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$ (du signe de ω).

II.4 Etude mécanique du rotor du moteur asynchrone

II.4.1 $\vec{m} = i \cdot \vec{S}$.

II.4.2 $\vec{\Gamma} = \vec{m} \wedge \vec{B} = i(t) \cdot S \cdot B_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \vec{u}_z$, soit :

$\Gamma_z = \frac{\omega B_0^2 S^2}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} \cos(\omega t + \varphi - \psi) \sin(\omega t + \varphi)$.

II.4.3 en développant le cosinus et en prenant la valeur moyenne sur le temps (la moyenne d'un sinus² est égale à 1/2) : $C = \langle \Gamma_z \rangle = \frac{\omega R B_0^2 S^2}{2(R^2 + L^2\omega^2)}$.

II.4.4 pour $\omega_S=0$, on a $\omega=\omega_B$ d'où $C_0 = \frac{\omega_B R B_0^2 S^2}{2(R^2 + L^2 \omega_B^2)}$. Le moteur peut démarrer seul si C_0

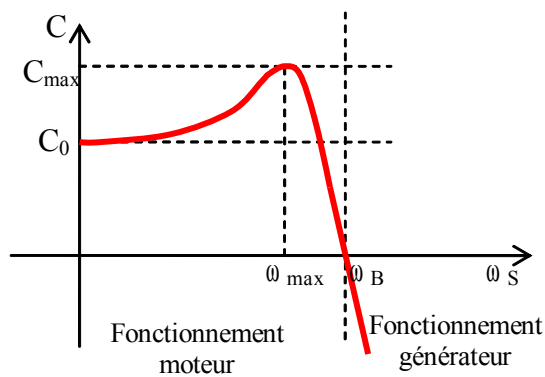
(couple moyen à l'arrêt) est supérieur au couple résistant ramené sur son arbre.

II.4.5 Le couple est moteur si $C>0$, soit, C étant du signe de ω , si $\omega>0$ ou encore si $\omega_B>\omega_S$: le champ tournant va plus vite que le rotor et l'entraîne. Le couple est résistant si $C<0$, soit si $\omega<0$ ou encore si $\omega_B<\omega_S$: le champ tournant va moins vite que le rotor et le freine.

II.4.6 Dérivons la fonction $C(\omega)$: $\frac{dC}{d\omega} = (R^2 - L^2 \omega^2)(R^2 + L^2 \omega^2)^{-2}$, la dérivée s'annule pour

$R=L\omega$, soit une vitesse de rotation angulaire $\omega=R/L$. La vitesse du rotor qui maximise le couple est $\omega_S=\omega_B-R/L$ et le couple maximum vaut : $C_{max}=B_0^2 S^2/4L$.

II.4.7 La courbe du couple en fonction de la vitesse de rotation rotor (pour une vitesse de

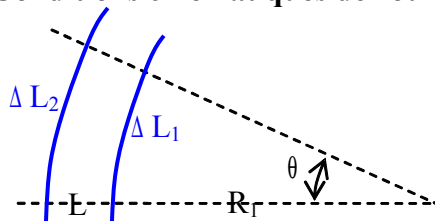


champ donnée) est la suivante :

On remarque en particulier le maximum de couple (question II.4.6) et les deux types de fonctionnement en moteur ou générateur (question II.4.5).

III Forme des roues des trains.

III.1 Conditions cinématiques de roulement sans glissement



III.1.1 $\theta=\Delta L_1/R_1=\Delta L_2/(R_1+L)$, d'où : $\Delta L_2/\Delta L_1=1+L/R_1$.

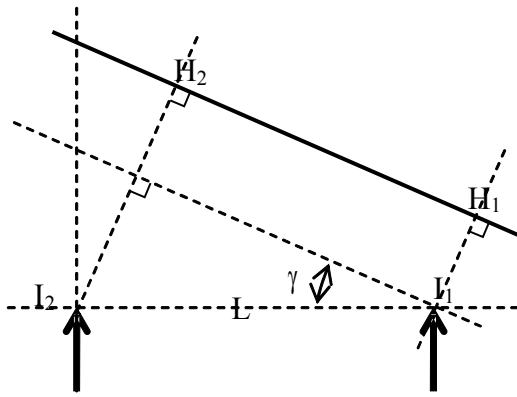
III.1.2 Pour un angle α de rotation de l'arbre des roues : $\Delta L_2=\alpha.r_2$ et $\Delta L_1=\alpha.r_1$, d'où : $\Delta L_2/\Delta L_1=r_2/r_1$.

III.1.3 On en déduit : $r_2/r_1=1+L/R_1$.

III.2 Variation du rayon des roues

III.2.1 Si le chemin de fer est rectiligne, son rayon de courbure est infini et $r_2=r_1=r_0$.

III.2.2 $\frac{r_2}{r_1} = \frac{r_0 + \delta}{r_0 - \delta} = (1 + \frac{\delta}{r_0})(1 - \frac{\delta}{r_0})^{-1} = 1 + 2\frac{\delta}{r_0} + o(\frac{\delta}{r_0})$, d'où $\delta = \frac{r_0 L}{2R_1}$.



III.3.1

On obtient : $\sin(\gamma) = (r_2 - r_1) / L$.

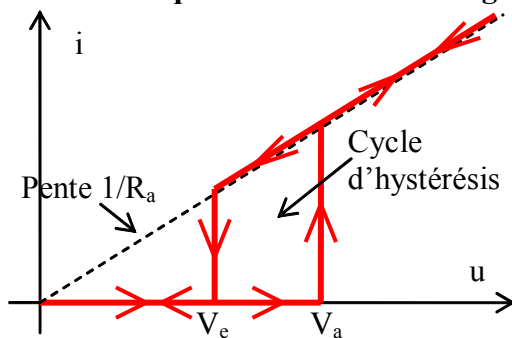
III.3.2 $\sin(\gamma) = r_1(r_2/r_1 - 1) / L = r_1(L/R_1) / L = r_1/R_1$ d'où : comme γ est petit et r_1 proche de r_0 : $\gamma \approx r_0/R_1$.

III.3.3 le chemin de fer est rectiligne, son rayon de courbure est infini et $\gamma = 0$ (le train reste horizontal en ligne droite).

III.3.4 Pour $\gamma = 2\% = 0.02$, on a : $R_1 > r_0 / 0.02 = 61 \text{ m}$.

IV Etude de l'éclairage intérieur du train par tube à décharge

IV.1 Caractéristique d'un tube à décharge



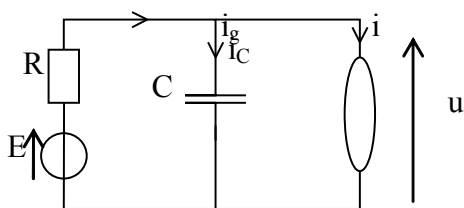
IV.1.1

IV.1.2 - dipôle libre (pas de commande extérieure, l'état actuel ne dépend que de l'état antérieur et de l'évolution).

- dipôle non linéaire (car seulement linéaire par morceaux tel que modélisé).
- Dipôle passif (car ne peut que recevoir de la puissance).

IV.2 Tube éteint

IV.2.1



On a : $u = u_C$, $u = E - Ri_g$, $i_C = C du_C / dt$ et $i_g = i_C + I$, or $i = 0$ car le néon est éteint, on obtient donc :

$$u + RC \frac{du}{dt} = E$$

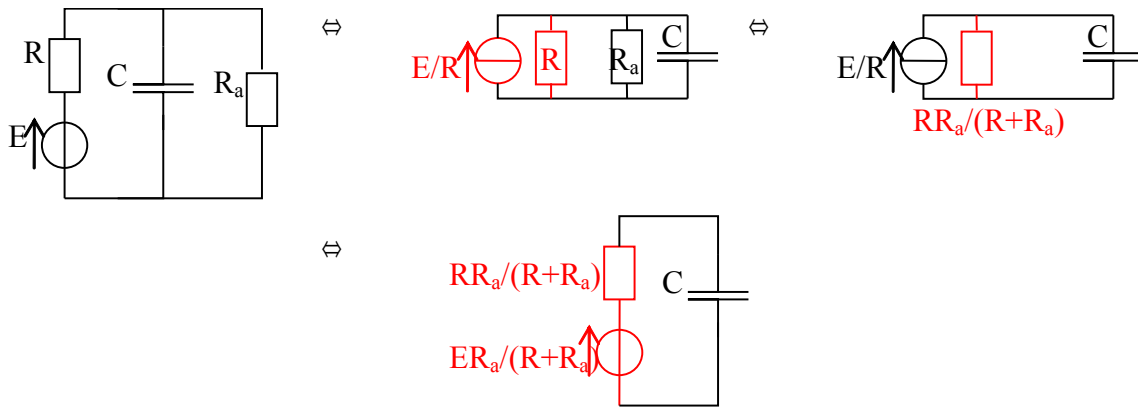
IV.2.2 la solution somme de l'équation générale sans second membre et d'une solution particulière

de l'équation avec second membre est égale à : $u(t) = Ke^{-t/RC} + E$, et $u(t=0) = 0$ donc $K = -E$

donc : $u(t) = E(1 - e^{-t/RC})$.

IV.3 Tube allumé

IV.3.1 Par transformation Thévenin-Norton, résistance équivalente et transformation Norton-Thévenin, on arrive à :



d'où : $E' = E \frac{R_a}{R + R_a}$ et $R' = \frac{RR_a}{R + R_a}$.

IV.3.2 On obtient l'équation différentielle : $u + R' C \frac{du}{dt} = E'$.

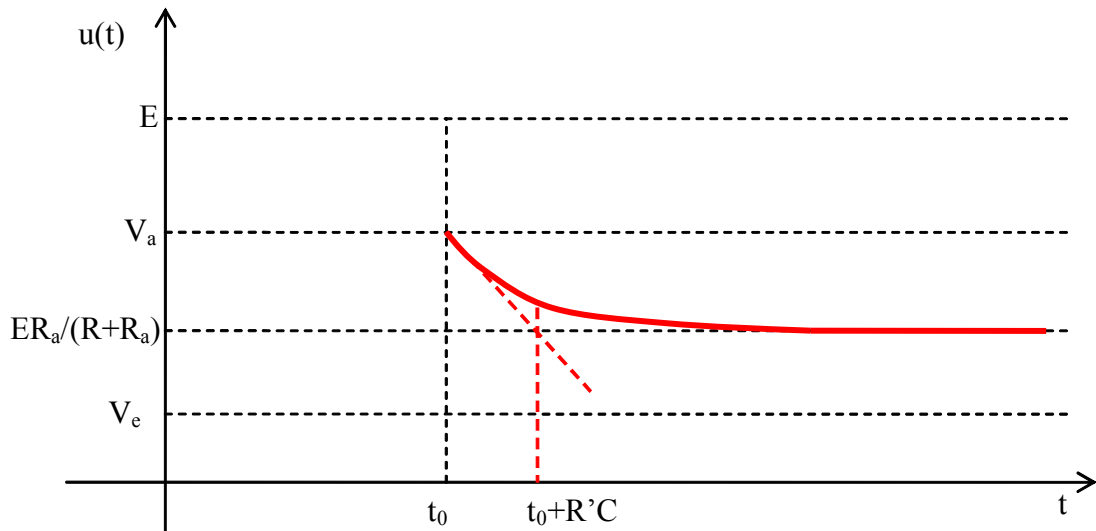
IV.3.3 La solution est du même type que précédemment, et avec la condition demandée en $t=t_0$: $u(t) = (V_a - E')e^{(t_0-t)/R'C} + E'$.

IV.4 Interprétation

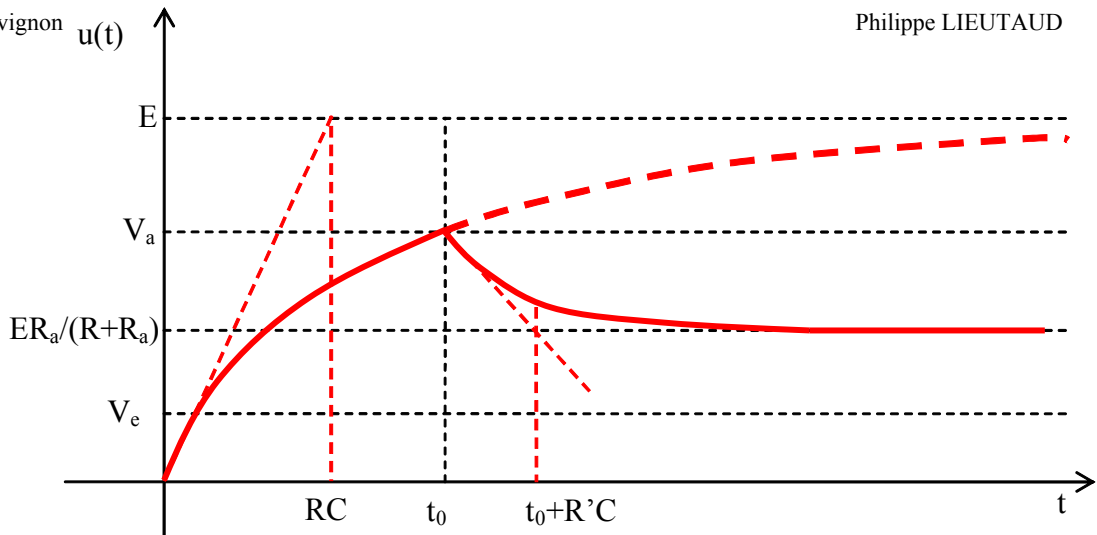
Remarque : la condition donnée par l'énoncé est fautive, en effet il faut que $\frac{R_a}{R + R_a} E > V_e$

pour que la tension aux bornes du néon reste supérieure à la tension d'extinction et pour que le néon reste allumé en continu. Dans le cas donné par l'énoncé, après avoir allumé le néon, on va l'éteindre en repassant sous la tension d'extinction, puis la tension ré-augmentant, on va le rallumer lorsque la tension repasse en dessus de V_a et etc... : on explore le cycle d'hystérésis du néon et on a fabriqué un oscillateur astable (voir par exemple oscillateur astable à un amplificateur opérationnel en électronique), ce qui est très intéressant d'un point de vue physique mais plutôt gênant en pratique pour un éclairage !

IV.4.1



IV.4.2



IV.4.3 Le néon s'allume lorsque $u(\Delta t) = V_a$ dans la première phase, soit : $\Delta t = RC \ln\left(\frac{E}{E - V_a}\right) = 6.3 \text{ s}$, le temps d'allumage est effectivement bien long comme indiqué dans l'énoncé : un train roulant à 90 km/h parcourt 160 m pendant ces 6.3 s et les tunnels de distance inférieure sont effectivement déjà traversés lorsque le néon s'allume.

V Etude de l'éclairage procuré par une veilleuse

V.1 Etude du miroir de la veilleuse

V.1.1 $\frac{1}{S_1 A_1} + \frac{1}{S_1 A} = \frac{2}{S_1 C_1}$

V.1.2 L'ampoule devrait être au foyer objet du miroir, c'est-à-dire au milieu de $S_1 C_1$ pour rejeter l'image à l'infini.

V.1.3 $\overline{S_1 A} = \frac{S_1 C_1 \cdot S_1 A_1}{2S_1 A_1 - S_1 C_1} = 2.56 \text{ cm}$.

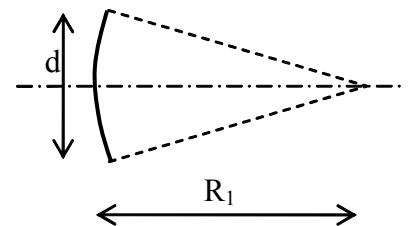
V.1.4.a A_1 est alors en C_1 (C_1 est son propre conjugué par le miroir).

V.1.4.b L'intérêt du montage est de (quasi) doubler le flux lumineux utile de la lampe en renvoyant le flux montant vers le voyageur.

V.1.5.a L'approximation de Gauss est l'approximation des rayons paraxiaux, c'est-à-dire proches de l'axe et peu inclinés sur l'axe.

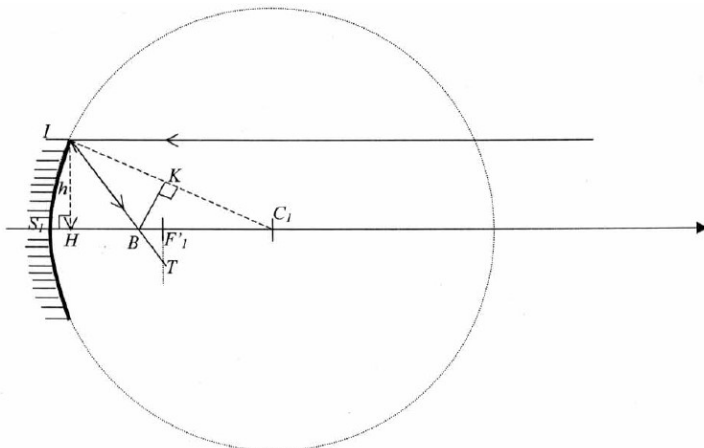
V.1.5.b Il faut que $d/2R_1 \ll 1$ pour que l'angle soit petit.

V.1.5.c Pour la veilleuse, $d/2R_1 = 0.4$ n'est pas très petit, donc les conditions de Gauss ne sont pas vérifiées.



V.2 Etude des aberrations du miroir de la veilleuse

V.2.1 $BC_1 = HC_1 - HB$ et $HC_1 = \sqrt{R_1^2 - h^2}$, de plus en notant α l'angle $\widehat{HC_1 I}$, on a $\sin \alpha = h/R_1$ et $\widehat{HIB} = \frac{\pi}{2} - \alpha$, or $\tan(\pi/2 - \alpha) = HB/h$ et il



vient après calcul et utilisation de formules trigonométriques : $HB = \frac{R_1^2 - 2h^2}{2\sqrt{R_1^2 - h^2}}$; d'où :

$$BC_1 = \frac{R_1}{2\sqrt{1 - (\frac{h}{R_1})^2}}$$

V.2.2 $BF_1' = BC_1 - F_1'C = 0.228 \text{ cm}$

V.2.3 Dans les triangles : $HB/h = BF_1'/TF_1'$, d'où : $TF_1' = \frac{h}{\sqrt{1 - 2(\frac{h}{R_1})^2}} (\frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{h}{R_1})^2}} - 1)$

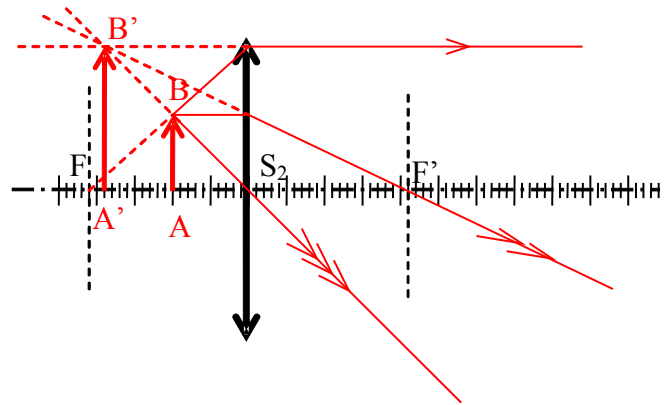
= 0.221 cm .

V.2.4 Les aberrations de sphéricité de l'ordre de $BF_1'/R_1 = 4\%$ ne sont pas négligeables mais restent faibles compte tenu du fait que le système optique ne doit pas former une image mais diriger la lumière (condenseur et pas imageur).

V.2.5 Pour qu'il y ait aberration chromatique il faut qu'il y ait dispersion (comportement différent du système pour différentes longueurs d'ondes) ce n'est pas le cas en réflexion, donc il n'y a pas d'aberrations chromatiques pour un miroir.

V.3 Etude du réglage du faisceau sortant de la veilleuse par la lentille

V.3.1 Il faut 'sortir' de l'axe en plaçant un objet transverse AB, trouver B' image de B par construction et utiliser l'aplanétisme pour obtenir A' (on constate que l'image est droite et virtuelle) :



V.3.2 Pour une lentille mince, la vergence est l'inverse de la distance focale image :

$$V_2 = \frac{1}{S_2F_2'} = \frac{1}{f_2'}$$

(symbole δ , homogène à l'inverse d'une longueur).

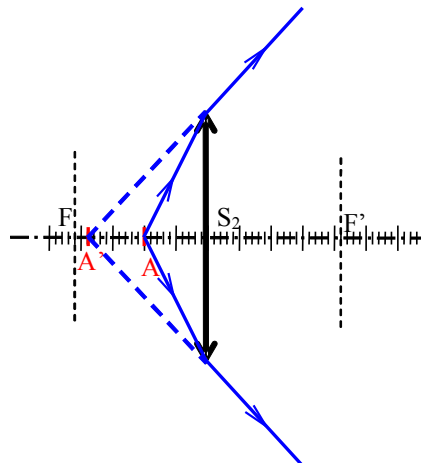
A.N. : $V_2 = 47.62 \delta$

V.3.3 D'après la relation de conjugaison de la lentille : $\overline{S_2A'} = \frac{f_2' \overline{S_2A}}{f_2' + \overline{S_2A}} = \frac{-x \cdot f_2'}{f_2' - x}$

A.N. : - $x = x_1 = 1 \text{ cm} : \overline{S_2A_1'} = -1.91 \text{ cm}$

- $x = x_2 = 2 \text{ cm} : \overline{S_2A_2'} = -42 \text{ cm}$

V.3.4



V.3.5 α est tel que $\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{h}{S_2 A'}$, d'où : $\alpha = 2 \arctan\left(\frac{h}{S_2 A'}\right)$.

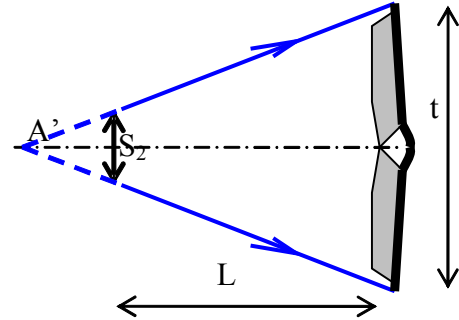
A.N. : $x=x_1$ alors $\alpha_1=92.7^\circ$
 $x=x_2$ alors $\alpha_2=5.45^\circ$

V.3.6

En utilisant le théorème de Thalès : $\frac{t}{d} = \frac{L + S_2 A'}{S_2 A'}$,

d'où pour L : $L = \frac{x \cdot f_2'}{f_2' - x} \cdot \frac{t - d}{d}$.

A.N. : $x=x_1$ alors $L=L_1=7.64$ cm
 $x=x_2$ alors $L=L_2=168$ cm



V.3.7 Le livre se trouve entre les deux distances calculées précédemment, donc il y a un réglage qui correspond à la juste ouverture angulaire, en inversant la relation du V.3.6, on

obtient : $x = \frac{L \cdot f_2'}{f_2' \cdot \frac{t - d}{d} + L} = 1.94$ cm.

V.4 Etude de la diffraction due à la faible ouverture de la lentille

V.4.1 $\alpha_0=0$ car les rayons issus du foyer objet émergent parallèlement à l'axe.

V.4.2.a $\alpha_0' \approx \frac{\lambda}{d} = 1.25 \cdot 10^{-5} \text{ rad} = 7.2 \cdot 10^{-40}$

V.4.2.b On obtient donc une ouverture angulaire due à la diffraction telle que : $\alpha_0' \ll \alpha_1$ et $\alpha_0' \ll \alpha_2$, donc l'ouverture angulaire supplémentaire due à la diffraction est négligeable devant celles calculées en optique géométrique.