

correction du problème de physique 2 CCP 2004 PSI

problème de chimie : matériaux et procédés dans l'industrie électronucléaire :

I) Le combustible :

Q1) Le nombre de protons est $Z = 92$ aussi bien dans ^{235}U que dans ^{238}U , qui sont deux isotopes

Le nombre de neutrons est $N = 143$ dans ^{235}U et $N = 146$ dans ^{238}U

Le nombre d'oxydation de U est :
 IV dans UO_2
 VI dans UO
 VI dans UO_2SO_4
 (16/3 dans U_3O_8 , en fait V et VI)

Q2) $\text{U}_3\text{O}_8 = \text{UO}_2(\text{UO}_3)_2$; les ions présents sont donc : U^{4+} , U^{6+} , O^{2-}

Q3) d'après la théorie VSEPR, UF_6 est une molécule de forme bipyramidale à base carrée (octaèdre)

Q4) si m est la multiplicité : $\rho = m \frac{M_{\text{U}} + 2M_{\text{O}}}{a^3}$; donc :

$$m = \frac{\rho a^3}{M_{\text{U}} + 2M_{\text{O}}} = 4$$

Q5) on calcule immédiatement :

Pour la réaction : $2 \text{U}_3\text{O}_8 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 6 \text{UO}_3$ (α)

$$\Delta_r H^0 = -193,2 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

$$\Delta_r S^0 = -193,8 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$$

Pour la réaction : $3 \text{UO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{U}_3\text{O}_8$ (β)

$$\Delta_r H^0 = -319,8 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

$$\Delta_r S^0 = -153,6 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$$

Pour la réaction : $\text{U} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{UO}_2$ (γ)

$$\Delta_r H^0 = -1085,0 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

$$\Delta_r S^0 = -178,4 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$$

on en déduit (les enthalpies de réaction standard étant exprimées en kJ.mol^{-1} et la température en K) :

$$\Delta_r G^0_{\alpha} = -193,2 + 0,1938.T$$

$$\Delta_r G^0_{\beta} = -319,8 + 0,1536.T$$

$$\Delta_r G^0_{\gamma} = -1085,0 + 0,1784.T$$

d'où le diagramme d'Ellingham sur la feuille jointe

on a, à toute température, par ordre croissant de $\Delta_r G^0$: γ ; β , α . On en déduit qu'on a, sur le graphe :

au-dessous de (γ) le domaine de stabilité de U

entre (γ) et (β) le domaine de stabilité de UO_2

entre (β) et (α) le domaine de stabilité de U_3O_8

au-dessus de (α) le domaine de stabilité de UO_3

$$-RT \ln(Q) = -RT \ln\left(\frac{P^0}{P_{\text{O}_2}}\right) = +RT \ln(1) = 0$$

Q6)

Si on chauffe UO_3 sous $P(\text{O}_2) = 1 \text{ bar}$, on se déplace donc horizontalement, à l'ordonnée 0, dans le sens de T croissante, sur le diagramme d'Ellingham ; on en déduit que UO_3 se transforme en U_3O_8 à la température d'intersection de cette droite horizontale et de la droite d'Ellingham de (α), c'est-à-dire à $T_1 = 1000 \text{ K}$

On peut alors envisager de la même façon la transformation de U_3O_8 en UO_2 : une étude analogue conduit à une température d'équilibre entre ces deux formes $T_2 = 2080 \text{ K}$

On peut encore envisager de la même façon la transformation de UO_2 en U : une étude analogue conduit à une température d'équilibre T_3 qui n'a pas de sens car elle serait supérieure à la température de fusion de U (qui est de 1410 K)

Q7) d'après la règle des phases : $v = e - r + f - \phi = 3 - 1 + 2 - 1 = 3$

Si on impose : $P_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{H}_2} = 1 \text{ bar}$, on obtient : $v_{\text{effective}} = 3 - 2 = 1$

Alors, si on observe la droite (δ) d'Ellingham du couple H₂O/H₂, on constate que, à T = 1000 K, on se trouve dans le domaine de stabilité de UO₂. Alors la pression P_{O₂} est imposée puisqu'on a imposé T à un système de variance égale à 1. La pression P_{O₂} est imposée par

l'équilibre (δ) :
$$-RT \ln(K_\delta^0) = -RT \ln\left(\frac{P^0}{P_{O_2}}\right)$$
 elle n'est donc pas quelconque

Q8) On a pour (δ) :
$$\Delta_r G_\delta = \Delta_r G_\delta^0 + RT \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}\right)$$

On peut appliquer le m^eme raisonnement que précédemment : pour que la réduction de UO₂

en U soit possible à 1000 K, il faut :
$$\Delta_r G_\delta < \Delta_r G_\gamma^0 + RT \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}\right)$$

Ce qui conduit, à la limite, pour P_{H₂} = 1 bar, à :
$$P_{H_2O} = P^0 \exp\left(\frac{\Delta_r G_\gamma^0 - \Delta_r G_\delta^0}{RT}\right)$$

Or on lit sur le graphe :
$$\Delta_r G_\gamma^0 - \Delta_r G_\delta^0 = -908 - (-206) = -702 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Ce qui conduit à : P_{H₂O} = 2,14.10⁻³⁷ bar, pression « impossible » à obtenir : la réduction industrielle de UO₂ en UO est donc impossible

II) La gaine :

Q9) Zr : 1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁶ 4s² 3d¹⁰ 4p⁶ 5s² 4d²

Hf : a 32 électrons de plus que Zr (car, avant de remplir la sous-couche 5d, il faut remplir la sous-couche 4f : Hf a donc 8+6+2+14+2 électrons de plus que Zr ; donc :

Z = 72 : structure : 1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁶ 4s² 3d¹⁰ 4p⁶ 5s² 4d¹⁰ 5p⁶ 6s² 4f¹⁴ 5d²

Q10) (HZrO₃)_{aq} ion hydrogénoszirconate (?)

Q11) a) pour la limite de l'équilibre zircone(s)/Zr⁴⁺ :



À la limite de précipitation :
$$\frac{1.1^2}{10^{-6} \omega_{lim}^4} = K_1$$
 d'où : pOH_{lim} = 12,28
Et : pH_{lim} = 1,72

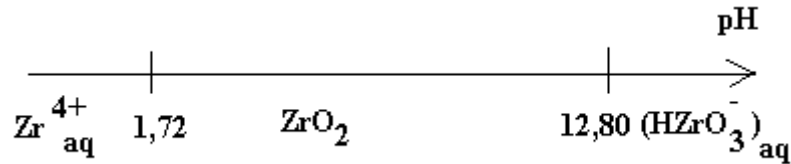
b) pour la limite de l'équilibre zircone(s)/HZrO₃⁻ :



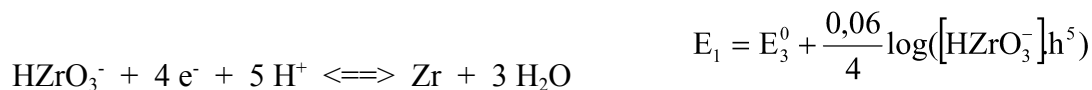
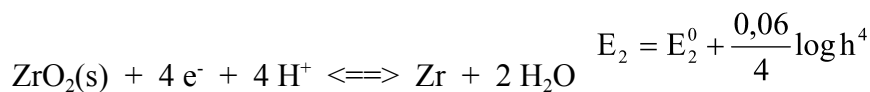
À la limite de précipitation :
$$\frac{10^{-6}}{\omega'_{lim}} = K_2$$
 d'où : pOH'_{lim} = 1,20

Et : $\text{pH}_{\text{lim}} = 12,80$

$\text{ZrO}_2(\text{s})$ n'existe donc que pour pH compris entre 1,72 et 12,80 ; pour les pH plus acides, $\text{ZrO}_2(\text{s})$ est détruit en $\text{Zr}^{4+}_{\text{aq}}$ et, pour les pH plus basiques, en $(\text{HZrO}_3^-)_{\text{aq}}$



Q12) on peut donc considérer les trois couples :



Donc, en utilisant les hypothèses du texte sur la concentration en espèces dissoutes :

$\begin{aligned} E_1 &= -1,53 \text{ V} \\ E_2 &= E_2^0 - 0,06\text{pH} \\ E_3 &= E_3^0 - 0,09 - 0,075\text{pH} \end{aligned}$
--

Q13) diagramme potentiel-pH : cf feuille jointe

Si $\text{pH} < 1,72$: couple Zr^{4+}/Zr : $E_1 = -1,53 \text{ V}$

Si $1,72 < \text{pH} < 12,8$: couple ZrO_2/Zr : $E_2^0 - 0,06\text{pH}$, où E_2^0 est obtenu par continuité : $E_2^0 = -1,43 \text{ V}$; donc : $E_2 = -1,43 - 0,06\text{pH}$

Si $\text{pH} > 12,8$: couple $\text{HZrO}_3^-/\text{Zr}$: $E_3 = E_3^0 - 0,09 - 0,075\text{pH}$ où E_3^0 est obtenu par continuité : $E_3^0 = -1,05 \text{ V}$; donc : $E_3 = -1,05 - 0,075\text{pH}$

On constate que le domaine de stabilité du zirconium est entièrement situé dans le domaine de réduction de l'eau : le zirconium est donc corrodé dans l'eau (mais, en fait, cette corrosion ne se fait pas, pour des raisons cinétiques)

$$\Omega_{\text{molaire}}(\text{ZrO}_2(\text{s})) = \frac{M(\text{ZrO}_2(\text{s}))}{\rho(\text{ZrO}_2(\text{s}))} = 2,193 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Omega_{\text{molaire}}(\text{Zr}(\text{s})) = \frac{M(\text{Zr}(\text{s}))}{\rho(\text{Zr}(\text{s}))} = 1,400 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

Q14)

$$f = \frac{\Omega_{\text{molaire}}(\text{ZrO}_2(\text{s}))}{\Omega_{\text{molaire}}(\text{Zr}(\text{s}))} = 1,57 > 1$$

Donc :

La zircone permet donc une bonne passivation du zirconium

Q15) Au niveau de la surface du métal, l'oxyde est comprimé (volume trop petit pour être compatible avec celui de Zr). Si la corrosion est trop rapide, on peut avoir des dislocations soit à l'intérieur de l'oxyde soit entre l'oxyde et le métal ; alors la couche d'oxyde n'est plus homogène et la corrosion est moins efficace

Q16) à pH = 0, il n'y a pas d'oxyde

E₁ dépend des conditions expérimentales

E₂ dépend du pH et de la surtension de H⁺/H₂ sur Zr

cf courbe intensité-potentiel sur feuille jointe

III) Le milieu aqueux caloporteur :

Q17) B : 1s² 2s² 2p¹

Formule développée :
$$\begin{array}{c} \text{H}-\text{O}-\text{B}-\text{O}-\text{H} \\ \quad \quad \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \text{H} \end{array}$$

D'après la théorie VSEPR, la molécule a une forme triangulaire

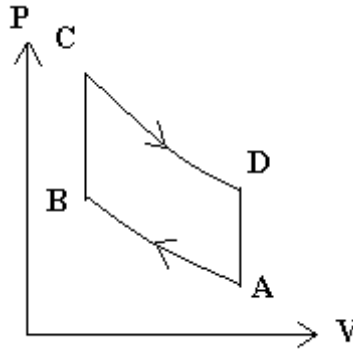
Q18) $\text{pH} = \frac{1}{2}(\text{pK}_a + \text{pc}) = 5,1$

Q19) il faut ajouter une base de façon à obtenir un mélange de pH = 8, qui sera d'ailleurs un assez bon tampon

Problème de physique : différents types de moteurs :

Première partie : modèle d'un moteur d'automobile à explosion :

1.1



1.2 Transformation AB :

1.2.1 $t_{\text{cycle complet}} = 2 \cdot t_{AB} = 2 \cdot t_{\text{un tour}} = \frac{2}{\text{nombre de tours par unité de temps}}$
 or le nombre de tours par unité de temps est proportionnel à la vitesse de l'automobile ; donc :

$$\frac{v}{\text{nombre de tours par unité de temps}} = \frac{v_0}{(\text{nombre de tours})_0 \text{ par unité de temps}}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \text{nombre de tours par unité de temps (à } 90 \text{ km/h)} &= (\text{nombre de tours par unité de temps (à } 30 \text{ km/h)}) \cdot \frac{90}{30} \\ &= 1000 \cdot \frac{90}{30} \text{ tours/min} = 3000 \text{ tours/min} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ tours/s} \end{aligned}$$

donc : $2 \cdot t_{AB} = \frac{2}{50}$ et : $t_{AB} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ s}$

1.2.2 t_{AB} étant petit, cela valide l'hypothèse d'adiabaticité de cette transformation

$$1.2.3 \quad \frac{5}{2} kT_A = \frac{1}{2} m v_A^2 \quad \text{d'où :} \quad v_A = \sqrt{\frac{5kT_A}{m}} = \sqrt{\frac{5RT_A}{M}} = 710 \text{ m.s}^{-1}$$

1.2.4 la vitesse moyenne du piston au cours de la transformation AB v_m est :

$$v_m = \frac{80 \text{ mm}}{t_{AB}} = 4,0 \text{ m.s}^{-1}$$

v_A étant beaucoup plus grande que la vitesse moyenne de déplacement du piston, les molécules ne « voient » pratiquement pas le déplacement du piston et la transformation peut être considérée grossièrement comme réversible

$$1.2.5 \quad P_B = P_A \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^\gamma = P_A \cdot a^\gamma = 10^{6,4} \quad P_A = 2,8 \cdot 10^6 \quad P_A = 28 \text{ bars}$$

$$T_B = T_A \left(\frac{V_A}{V_B} \right)^{\gamma-1} = T_A \cdot a^{\gamma-1} = 886 \text{ K}$$

1.3 Transformation BC :

1.3.1 à une vitesse de 90 km/h, le moteur effectue 3000 tours par minute, donc 1500 cycles par minutes et 1500*60 cycles par heure ; le volume de carburant consommé en 1 heure étant 5 L, le volume de carburant consommé pendant 1 cycle est donc :

$$1.3.2 \quad V_{\text{carburant, 4 cylindres, 1 cycle}} = \frac{5(L) \cdot 90}{100 \cdot 1500 \cdot 60} = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ L / cycle}$$

$$V_{\text{carburant, 1 cylindre, 1 cycle}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{4} = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ L / cycle}$$

$$\text{d'où :} \quad n_c = V_{\text{carburant, 1 cylindre, 1 cycle}} \cdot \frac{\rho_{\text{carburant}}}{M_{\text{carburant}}} = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ mol.cylindre}^{-1} \cdot \text{cycle}^{-1}$$

$1.3.2 \quad Q_{BC} = n_c \cdot 6 \cdot 10^6 = 474 \text{ J}$

$$1.3.3.a \quad a = \frac{V_A}{V_E} \quad c = 4(V_A - V_E) \quad \text{d'où :} \quad V_A = \frac{ac}{4(a-1)}$$

$$\text{puis :} \quad n = \frac{P_A V_A}{RT_A} = \frac{P_A ac}{4(a-1)RT_A} = 1,32 \cdot 10^{-2} \text{ mol}$$

$$1.3.3.b \quad \Delta U_{BC} = Q_{BC} = n C_V (T_C - T_B) = n \frac{R}{\gamma - 1} (T_C - T_B)$$

$$\text{d'où :} \quad T_C = T_B + Q_{BC} \frac{\gamma - 1}{nR} = 2084 \text{ K}$$

$$\text{et :} \quad P_C = \frac{nRT_C}{V_C} = \frac{nRT_C}{c} \cdot 4(a-1) = 6,6 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 66 \text{ bars}$$

1.4 Transformation CD :

$$P_D = P_C \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^\gamma = P_C \cdot a^{-\gamma} = 26 \cdot 10^5 \quad P_A = 26 \text{ bars}$$

$$T_D = T_C \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1} = T_C \cdot a^{1-\gamma} = 830 \text{ K}$$

$$W_{\text{fourni}} = + \oint P.dV = \int_C^D P.dV + \int_A^B P.dV = P_C V_C^\gamma \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_C^D + P_A V_A^\gamma \left[\frac{V^{-\gamma+1}}{-\gamma+1} \right]_A^B$$

$$1.5 \quad = \frac{P_C V_C^\gamma}{\gamma-1} (V_C^{1-\gamma} - V_D^{1-\gamma}) + \frac{P_A V_A^\gamma}{\gamma-1} (V_A^{1-\gamma} - V_B^{1-\gamma})$$

$$d'o\grave{u} finalement : \quad W_{\text{fourni}} = \frac{P_C V_C^\gamma}{\gamma-1} (V_C^{1-\gamma} - V_D^{1-\gamma}) + \frac{P_A V_A^\gamma}{\gamma-1} (V_A^{1-\gamma} - V_B^{1-\gamma})$$

$$\text{ou encore :} \quad W_{\text{fourni}} = \frac{nR}{\gamma-1} [(T_C - T_D) + (T_A - T_B)] = 284 \text{ J}$$

1.6 Rendement :

$$1.6.1 \quad \eta = \frac{W_{\text{fourni}}}{Q_{BC}} = \frac{-W}{Q_{BC}}$$

$$1.6.2.a \quad Q_{BC} = \Delta U_{BC} = \frac{nR}{\gamma-1} (T_C - T_B)$$

$$\eta = \frac{W_{\text{fourni}}}{Q_{BC}} = \frac{\frac{nR}{\gamma-1} [(T_C - T_D) + (T_A - T_B)]}{\frac{nR}{\gamma-1} (T_C - T_B)} = \frac{[(T_C - T_D) + (T_A - T_B)]}{(T_C - T_B)}$$

$$\eta = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B} = 0,60$$

donc :

1.7 Puissance

$$1.7.1 \quad P_{\text{th}} = \frac{4W_{\text{fourni}}(1 \text{ cylindre})}{2t_{AB}} = 28,4 \text{ kW}$$

1.7.2 pour une vitesse de 90 km/h, on lit sur la courbe : $P = 30 \text{ kW}$

1.7.3

Deuxième partie moteur à courant continu commandé par un hacheur :

2.1 Etude du moteur à courant continu :

$$E = \Phi_0 \Omega$$

$$2.1.1 \quad C = \Phi_0 i$$

$$2.1.2 \quad u = E + Ri$$

et : $J \frac{d\Omega}{dt} = \Phi_0 i - C_r = 0$ à vitesse angulaire constante

d'où : $i = \frac{C_r}{\Phi_0}$

or : $\Phi_0 = \frac{E}{\Omega}$; donc : $i = \frac{C_r \Omega}{E}$

on en déduit R : $R = \frac{u - E}{i} = \frac{(u - E)E}{C_r \Omega} = 0,1 \quad \Omega$

2.1.3 $J \frac{d\Omega}{dt} = C - a\Omega - b$ donc : $\frac{Jd\Omega}{C - b - a\Omega} = dt$ ou :

$$\frac{d\Omega}{\Omega - \frac{C-b}{a}} = - \frac{dt}{\left(\frac{J}{a}\right)}$$

$$\Omega_{\infty} = \frac{C-b}{a}$$

si on pose : $\tau = \frac{J}{a}$

on obtient alors : $\frac{d\Omega}{\Omega - \Omega_{\infty}} = - \frac{dt}{\tau}$ puis, par intégration : $\Omega = \Omega_{\infty} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$

on en déduit numériquement : $t_1 \approx 5 \text{ s}$

2.2 Commande par hacheur :

2.2.1 Un interrupteur idéal ne consomme pas de puissance, son temps de commutation est nul

2.2.2 La bobine joue le rôle de réservoir d'énergie, elle permet le transfert d'énergie entre la source et les charges

2.2.3 Règle : une source de tension ne doit jamais être court-circuitée ; donc K_1 et K_2 ne peuvent pas être fermés simultanément

Remarque : les deux interrupteurs peuvent être tous les deux ouverts : cela correspond au cas où le moteur est à l'arrêt

2.2.4.1

2.2.4.2

- Si $0 < t < \alpha T$:

$$E_0 - E = L \frac{di}{dt} \quad \text{donc :} \quad di = \frac{E_0 - E}{L} dt$$

$$\text{d'où :} \quad i(t) = I_m + \frac{E_0 - E}{L} t \quad \text{et :} \quad V = E_0$$

- Si $\alpha T < t < T$:

$$0 - E = L \frac{di}{dt} \quad \text{donc :} \quad di = \frac{-E}{L} dt$$

$$\text{d'où :} \quad i(t) = I_m - \frac{E}{L} (t - \alpha T) \quad \text{et :} \quad V = 0$$

2.2.4.3

a) d'après la voie 1 : $E_0 = 120 \text{ V}$ (6 carreaux à 20 V/carreau)

b) la voie 2 donne la forme du courant : $\alpha = 0,4$

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{E_0 - E}{L}$$

et

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = -\frac{E}{L}$$

c et d) les pentes de la voie 2 correspondent à :

$$\frac{0,2}{20 \cdot 10^{-6}} = \frac{120 - E}{L}$$

et

$$\frac{0,2}{30 \cdot 10^{-6}} = -\frac{E}{L}$$

numériquement :

on en déduit : $L = 7,2 \text{ mH}$ et : $E = 48 \text{ V}$

e) $P = E_0 \cdot \langle i_{K1} \rangle$ d'où : $\langle i_{K1} \rangle = 25 \text{ A}$

f) $P = \langle i \rangle \cdot E$ d'où : $\langle i \rangle = 62,5 \text{ A}$

remarque : $\langle i_{K2} \rangle = \langle i_{K1} \rangle \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} = 37,5 \text{ A}$

on vérifie bien que : $\langle i \rangle = \langle i_{K1} \rangle + \langle i_{K2} \rangle$

$$i = \langle i \rangle + \sum_n a_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

2.2.5

d'après la décomposition en série de Fourier, si on diminue l'ondulation, en augmentant L et en diminuant T, on diminue les coefficients de Fourier. Les pertes par effet Joule seront minimales dans l'induit lorsque l'ondulation sera nulle.

Troisième partie : principe du moteur synchrone :

3.1 Stator de la machine synchrone : production d'un champ tournant :

3.1.1 Tout plan contenant l'axe Ox est un plan d'antisymétrie pour la distribution de courants : le champ magnétique en O appartient donc à tous ces plans ; il est donc colinéaire à Ox

3.1.2 en notation complexe :

$$\begin{aligned} \underline{u} &= (R_0 + R + jL\omega_0) \underline{i}_1 \\ \underline{u} &= \left(R_0 + \frac{1}{jC\omega_0} + R + jL\omega_0 \right) \underline{i}_2 \end{aligned} \quad \text{donc :} \quad \begin{aligned} \underline{i}_1 &= \frac{\underline{u}}{R_0 + R + jL\omega_0} \\ \underline{i}_2 &= \frac{\underline{u}}{R_0 + \frac{1}{jC\omega_0} + R + jL\omega_0} \end{aligned}$$

on en déduit :

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{\sqrt{(R_0 + R)^2 + L^2 \omega_0^2}} \\ I_1 &= \frac{U}{\sqrt{(R_0 + R)^2 + \left(L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} \right)^2}} \end{aligned} \quad \text{et :} \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= -\text{Arc tan} \frac{L\omega_0}{R_0 + R} \\ \varphi_2 &= -\text{Arc tan} \frac{L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0}}{R_0 + R} \end{aligned}$$

$$I_1 = I_2 \Leftrightarrow L^2 \omega_0^2 = \left(L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} \right)^2 \Leftrightarrow \begin{aligned} &C = \infty \\ &\text{ou} \\ &C = \frac{1}{2L\omega_0^2} \end{aligned}$$

3.1.3.a

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow \text{Arc tan} \frac{L\omega_0}{R_0 + R} = \text{Arc tan} \frac{L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0}}{R_0 + R}$$

$$C = \infty$$

ou

$$\frac{L\omega_0}{R_0 + R} = \frac{L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0}}{R_0 + R} + \pi \Leftrightarrow R_0 = \frac{2L\omega_0}{\pi} - R$$

$$\varphi_1 = -\text{Arc tan}(\pi LC\omega_0^2)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2} - \text{Arc tan}(\pi LC\omega_0^2)$$

3.1.3.b alors :

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = K i_1(t) \vec{e}_x + K i_2(t) \vec{e}_y = K I_1 \cos(\omega_0 t - \varphi_1) \vec{e}_x + K I_2 \cos\left(\omega_0 t - \left(\varphi_1 + \frac{\pi}{2}\right)\right) \vec{e}_y \\ 3.1.4 \quad &= K I_1 (\cos(\omega_0 t - \varphi_1) \vec{e}_x + K \sin(\omega_0 t - \varphi_1)) = K I_1 \vec{e}_r \end{aligned}$$

où $\vec{e}_r$ est un vecteur unitaire faisant, à l'instant t , l'angle $\omega_0 t - \varphi_1$ avec l'axe Ox

$$B_T = K I_{1,2} = K I_{1,2} = K \frac{U}{\sqrt{(R_0 + R)^2 + L^2 \omega_0^2}} = K \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{2L\omega_0}{\pi}\right)^2 + L^2 \omega_0^2}}$$

$$B_T = \frac{KU}{L\omega_0^2 \sqrt{\frac{4}{\pi^2} + 1}}$$

donc :

3.1.5.a,b le vecteur $\vec{e}_r$ faisant avec l'axe Ox $\vec{e}_r$ l'angle $\omega_0 t - \varphi_1$, il tourne à la vitesse angulaire ω_0

3.2. Entraînement du rotor du moteur synchrone :

$$3.2.1 \quad \theta(t) = (\omega_0 t + \alpha) - (\omega t + \beta) = (\omega_0 - \omega)t + \alpha - \beta$$

or à $t = 0$, $\theta(t=0) = \theta_0$; donc : $\alpha - \beta = \theta_0$

$$\text{et :} \quad \theta(t) = (\omega_0 - \omega)t + \theta_0$$

$$\text{d'où :} \quad \vec{\Gamma}(t) = \vec{M} \wedge \vec{B} = MB \sin \theta(t) \vec{e}_z = M.B \sin[(\omega_0 - \omega)t + \theta_0] \vec{e}_z$$

3.2.2 Le moteur ne peut fonctionner que pour $\omega = \omega_0$ car, sinon : $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \vec{0}$

3.2.3.1 $\Gamma_0 = M.B.\sin \theta_0$

3.2.3.2 la machine fonctionne effectivement en moteur si, et seulement si la puissance du couple $\overset{\omega}{\Gamma}$ est positive, c'est-à-dire : $\Gamma_0 \omega_{(0)} > 0$, c'est-à-dire, si $\omega > 0$: $\Gamma_0 > 0$,
donc : $\sin \theta_0 > 0$

3.2.3.3 dans ce cas, la puissance fournie par le moteur est :
 $P_{\text{méca}} = \Gamma_0 \omega_{(0)} = M.B.\omega_{(0)}.\sin \theta_0$

3.2.3.4 d'après le théorème du moment cinétique : $\Gamma_0 - \Gamma_r = J \frac{d\omega}{dt}$
le moteur peut effectivement entraîner la charge si, et seulement si :
 $\Gamma_r < \Gamma_0 = M.B.\sin \theta_0$