

Calculatrices autorisées

III-Alternateur pour éolienne

Q17 On applique le **théorème d'Ampère au contour $\mathcal{C}$ représenté ci-contre** :

$\oint_{\mathcal{C}} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I$. Avec $\vec{H} = \vec{0}$ dans les ferromagnétiques, puisque leur perméabilité est supposée infinie.

Puisque, dans l'entrefer, $\vec{B}(\theta) = B(\theta) \vec{e}_r$, il vient, pour $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$:

$$\frac{B(\theta)}{\mu_0} e - \frac{B(\pi-\theta)}{\mu_0} e = I.$$

De plus, le plan yOz est un plan de symétrie pour les courants, donc a priori d'antisymétrie pour le champ magnétique, et comme cette antisymétrie n'est pas contrariée par la présence des ferromagnétiques, on peut écrire $B(\pi - \theta) = -B(\theta)$, d'où $\frac{B(\theta)}{\mu_0} e + \frac{B(\theta)}{\mu_0} e = I$.

Cela donne donc, pour $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, $B(\theta) = +B_0 = \frac{\mu_0 I}{2e}$.

Grâce au plan d'antisymétrie, on en déduit pour $\theta \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$,

$$B(\theta) = -B_0 = -\frac{\mu_0 I}{2e}.$$

Enfin, le plan xOz est un plan d'antisymétrie pour les courants, donc a priori de symétrie pour le champ magnétique, et comme cette symétrie n'est pas contrariée par la présence des ferromagnétiques, on peut écrire $B(-\theta) = B(\theta)$

On en déduit le champ créé par cette spire :

$$\begin{cases} \vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I}{2e} \vec{e}_r & \text{pour } \theta \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[\\ \vec{B}_1 = -\frac{\mu_0 I}{2e} \vec{e}_r & \text{pour } \theta \in]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[\end{cases}$$

Q18 Curieuse question. Normalement, dans la bobine d'axe Oy , on fait passer un courant différent de celui qui passe dans la bobine d'axe Ox ... C'est sans doute pour sculpter un champ crénelé qui ressemble déjà à une mauvaise sinusoïde, mais son axe principal ne sera pas (Ox) . Bref, obéissons. On obtient de la même façon le champ créé par cette seconde spire de normale $\vec{e}_y$:

$$\begin{cases} \vec{B}_2 = \frac{\mu_0 I}{2e} \vec{e}_r & \text{pour } \theta \in]0, \pi[\\ \vec{B}_2 = -\frac{\mu_0 I}{2e} \vec{e}_r & \text{pour } \theta \in]\pi, 2\pi[\end{cases}$$

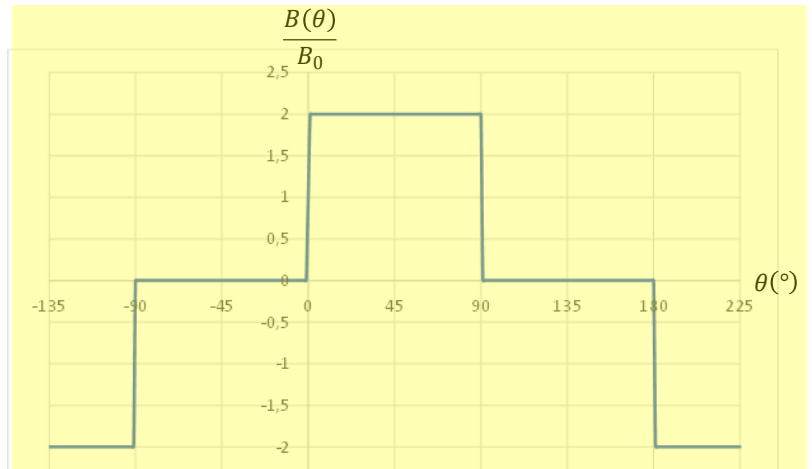
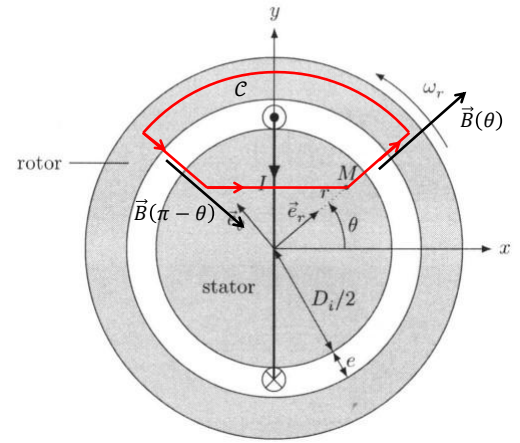
On en déduit l'allure du champ total $B(\theta) = \vec{B} \cdot \vec{e}_r$:

Et autre maladresse de l'énoncé : on introduit une notation $B_0(I)$ différente de B_0 ...

Q19 La puissance étant constante, on est en continu strict. Donc $\mathcal{P} = UI$. Par conséquent, $I = \frac{\mathcal{P}}{U}$.

On en déduit : $B_0(I) = N \frac{\mu_0 \mathcal{P}}{2eU} = 0,14 \text{ T}$.

Q20 La direction du maximum (axe principal) du champ magnétique $\vec{B}_{s1}$ est $\theta = 0$ tandis que la direction du maximum du champ magnétique $\vec{B}_{s2}$ est $\theta = \frac{\pi}{2}$.



Il suffit donc de réaliser un enroulement identique au premier (qui est enroulé autour de la direction $\theta = 0$ c'est-à-dire $\vec{e}_x$), mais de l'enrouler autour de la direction $\theta = \frac{\pi}{2}$ c'est-à-dire $\vec{e}_y$.

Q21 Le champ statorique total est donné par :

$$\vec{B}_s = \frac{\mu_0 N I_s}{2e} \left(\cos(\omega_s t) \cos \theta + \cos(\omega_s t - \phi_2) \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right) \vec{e}_r$$

On veut que ce champ se mette sous la forme $B_t \cos(\theta - \omega_s t) \vec{e}_r$, c'est-à-dire

$$B_t (\cos(\omega_s t) \cos \theta + \sin(\omega_s t) \sin \theta) \vec{e}_r, \text{ ou encore } B_t \left(\cos(\omega_s t) \cos \theta + \sin(\omega_s t) \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \right) \vec{e}_r.$$

Puisque les deux formes doivent être égales à tout instant, on peut identifier terme à terme : il faut que $\cos(\omega_s t - \phi_2) = \sin(\omega_s t)$, d'où $\phi_2 \equiv \frac{\pi}{2} [2\pi]$.

Dans ce cas, $B_t = \frac{\mu_0 N I_s}{2e}$.

Q22 L'énergie magnétique totale stockée dans l'entrefer est donnée par :

$$\mathcal{E}_{\text{mag}} = \iiint_{\text{entrefer}} \frac{(\vec{B}_s + \vec{B}_r)^2}{2\mu_0} dV = \frac{e D_i L_r}{4\mu_0} \int_0^{2\pi} (\vec{B}_s + \vec{B}_r)^2 d\theta, \text{ en assimilant } dr \text{ à } e.$$

Cette énergie est la somme de trois termes :

- $\frac{e D_i L_r}{4\mu_0} B_t^2 \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta - \phi_s) d\theta = \frac{e D_i L_r}{8\mu_0} B_t^2 \left(2\pi + \frac{1}{2} [\sin(2(\theta - \phi_s))]_0^{2\pi} \right) = \frac{\pi e D_i L_r}{4\mu_0} B_t^2$
- $\frac{e D_i L_r}{4\mu_0} B_r^2 \int_0^{2\pi} \cos^2(\theta - \phi_r) d\theta = \frac{e D_i L_r}{8\mu_0} B_r^2 \left(2\pi + \frac{1}{2} [\sin(2(\theta - \phi_r))]_0^{2\pi} \right) = \frac{\pi e D_i L_r}{4\mu_0} B_r^2$
- $\frac{e D_i L_r}{2\mu_0} B_t B_r \int_0^{2\pi} \cos(\theta - \phi_s) \cos(\theta - \phi_r) d\theta = \frac{e D_i L_r}{4\mu_0} B_t B_r \int_0^{2\pi} [\cos(\phi_r - \phi_s) + \cos(2\theta - \phi_s - \phi_r)] d\theta$

qui vaut :

$$\frac{e D_i L_r}{2\mu_0} B_t B_r \int_0^{2\pi} \cos(\theta - \phi_s) \cos(\theta - \phi_r) d\theta = \frac{\pi e D_i L_r}{2\mu_0} B_t B_r \cos(\phi_r - \phi_s)$$

Au total, l'énergie magnétique s'écrit donc :

$$\mathcal{E}_{\text{mag}} = \frac{\pi e D_i L_r}{4\mu_0} (B_t^2 + B_r^2 + 2 B_t B_r \cos(\phi_r - \phi_s))$$

Q23 Le couple subi par le rotor vaut donc :

$$\Gamma = \frac{d\mathcal{E}_{\text{mag}}}{d\phi_r} = - \frac{\pi e D_i L_r}{2\mu_0} B_t B_r \sin(\phi_r - \phi_s)$$

Q24 Comme le courant statorique a la valeur trouvée à la question Q19, on prend

$$B_t = B_0 = 0,14 \text{ T. Numériquement, on trouve : } |\Gamma|_{\text{max}} = \frac{\pi e D_i L_r}{2\mu_0} B_t B_r = 68 \text{ N.m.}$$

Q25 Nouvelle maladresse : La résistance est notée R , comme le rayon de l'éolienne. Mais, bon, on ne devrait pas trop mélanger les deux.

Les fém, qui ont été orientées dans le même sens que les courants (logique, on a un fonctionnement alternateur, pas moteur, et ce sont bien des fém, pas des fcém) sont données par la loi de Faraday :

$$\begin{cases} E_1 = - \frac{d\Phi_{r \rightarrow 1}}{dt} \\ E_2 = - \frac{d\Phi_{r \rightarrow 2}}{dt} \end{cases}$$

Sur la figure 8, on voit que pour la phase 1, le courant I (donc I_1 en fait), est orienté dans le sens direct par rapport à $\vec{e}_x$, donc $\Phi_{r \rightarrow 1}$ est maximum quand l'axe principal du champ magnétique rotorique est

selon $\vec{e}_x$, donc $\Phi_{r \rightarrow 1}$ est en $\cos(\phi_r)$. Ainsi, $E_1 = -\frac{d\Phi_{r \rightarrow 1}}{dt}$ est bien en $\omega_r \sin(\phi_r)$.

Pour la phase 2, décalée angulairement de $-\frac{\pi}{2}$, $\Phi_{r \rightarrow 2}$ est en $\cos\left(\phi_r - \frac{\pi}{2}\right)$, puis $E_2 = -\frac{d\Phi_{r \rightarrow 2}}{dt}$ en $\omega_r \sin\left(\phi_r - \frac{\pi}{2}\right)$, c'est-à-dire en $-\omega_r \cos(\phi_r)$.

Q26 La loi des mailles appliquées dans l'enroulement statorique (i) donne :

$$\underline{I_i} = \frac{\underline{E_i}}{R + R_u + jL\omega_r}$$

Or, les fém complexes s'écrivent :
$$\begin{cases} \underline{E_1} = -j\omega_r \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \exp(j\phi_r) \\ \underline{E_2} = -\omega_r \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \exp(j\phi_r) \end{cases}$$

puisque $\sin(\phi_r) = \cos\left(\phi_r - \frac{\pi}{2}\right)$ et $e^{-j\frac{\pi}{2}} = -j$. On en déduit :

$$\begin{cases} \underline{I_1} = -\frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \frac{j\omega_r}{R + R_u + jL\omega_r} \exp(j\phi_r) \\ \underline{I_2} = -\frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \frac{\omega_r}{R + R_u + jL\omega_r} \exp(j\phi_r) \end{cases}$$

Q27 Le champ magnétique statorique complexe s'écrit donc :

$$\underline{B_t} = \frac{\mu_0 N}{2e} (\underline{I_1} \cos \theta + \underline{I_2} \sin \theta) = -\frac{\mu_0 N}{2e} \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \frac{\omega_r}{R + R_u + jL\omega_r} (j \cos \theta + \sin \theta) \exp(j\phi_r)$$

Soit, puisque $-j \cos \theta - \sin \theta = \cos\left(-\theta - \frac{\pi}{2}\right) + j \sin\left(-\theta - \frac{\pi}{2}\right)$:

$$\begin{aligned} \underline{B_t} &= \frac{\mu_0 N}{2e} \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \frac{\omega_r}{R + R_u + jL\omega_r} \exp j\left(\phi_r - \theta - \frac{\pi}{2}\right) \\ &= \frac{\mu_0 N}{2e} \frac{\pi N D_i L_r B_r \omega_r}{4 \sqrt{(R + R_u)^2 + L^2 \omega_r^2}} \exp j\left(\phi_r - \theta - \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{L\omega_r}{R + R_u}\right)\right) \end{aligned}$$

En identifiant avec $\underline{B_s} = B_t \exp j(\phi_s - \theta)$, on en déduit :

$$\begin{cases} B_t = \frac{\pi \mu_0 N^2 D_i L_r \omega_r}{8e \sqrt{(R + R_u)^2 + L^2 \omega_r^2}} B_r \\ \phi_r - \phi_s = \frac{\pi}{2} + \text{atan}\left(\frac{L\omega_r}{R + R_u}\right) \end{cases}$$

Injectons ces expressions dans l'expression du couple trouvée à la question Q23 :

$$\Gamma = -\frac{\pi e D_i L_r}{2\mu_0} \frac{\pi \mu_0 N^2 D_i L_r \omega_r}{8e \sqrt{(R + R_u)^2 + L^2 \omega_r^2}} B_r^2 \sin\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}\left(\frac{L\omega_r}{R + R_u}\right)\right)$$

soit :
$$\Gamma = -\frac{\pi^2 N^2 D_i^2 L_r^2 \omega_r}{16 \sqrt{(R + R_u)^2 + L^2 \omega_r^2}} B_r^2 \cos\left(\text{atan}\left(\frac{L\omega_r}{R + R_u}\right)\right).$$

Q28 La puissance moyenne consommée par la résistance de charge vaut $\mathcal{P} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R_u}$ donc : $R_u = \frac{U_{\text{eff}}^2}{\mathcal{P}}$.

En régime permanent de rotation, le théorème du moment cinétique appliqué au rotor dans le référentiel terrestre, supposé galiléen, donne, en projection sur l'axe de rotation : $0 = \Gamma_{\text{vent}} + \Gamma$.

Donc :
$$\Gamma_{\text{vent}} = \frac{\pi^2 N^2 D_i^2 L_r^2 \omega_r B_f^2}{16 \sqrt{\left(R + \frac{U_{\text{eff}}^2}{p}\right)^2 + L^2 \omega_r^2}} \cos\left(\text{atan}\left(\frac{L \omega_r}{R + \frac{U_{\text{eff}}^2}{p}}\right)\right) = 208 \text{ N.m.}$$

Q29 Que veut dire l'énoncé par « pulsation ω_r de rotation du rotor » ? Sans doute « vitesse angulaire de rotation ». Ce qui veut dire que $\phi_r = \omega_r t + Cte$.

Du coup, on va noter ω_r' la pulsation des courants et des tensions dans les bobines du stator.

Remarquons tout d'abord que la période angulaire $\Delta\theta$ du champ rotorique a été divisée par p : $\Delta\theta = \frac{2\pi}{p}$.

Donc une période temporelle de variation du flux magnétique dans les bobines du stator correspond au temps T_r' que met le rotor pour tourner de $\Delta\theta = \frac{2\pi}{p}$. La vitesse angulaire $\omega_r = \frac{\Delta\theta}{T_r'}$ est donc reliée à la

période temporelle par $\omega_r = \frac{2\pi}{p T_r'}$, et donc la pulsation des grandeurs électriques est $\omega_r' = \frac{2\pi}{T_r'} = p \omega_r$.

Ainsi, si $\omega_r' = 2\pi f$, avec $f = 50 \text{ Hz}$, alors $\omega_r = \frac{2\pi f}{p} = 26 \text{ rad.s}^{-1} = 250 \text{ tr.min}^{-1}$

I. Aimantation des rotors

Q30 Soit $w_{Nd_2O_3} = 15\%$ la fraction massique d'oxyde de néodyme contenue dans une masse m_{tr} d'oxydes de terres rares, et soit $w_{tr} = 60$ à 70% la fraction massique d'oxydes de terres rares contenue dans une masse m_{mona} de minerai monazite. Pour une masse $m_{tot} = 1$ tonne de minerai, la masse d'oxydes de terres rares est $w_{tr} m_{tot}$, et elle contient une masse d'oxyde de néodyme $m_{Nd_2O_3} = w_{tr} \times w_{Nd_2O_3} \times m_{tot}$. Or, une masse $m_{Nd_2O_3}$ d'oxyde de néodyme contient n_{Nd} moles de néodyme (de masse molaire M_{Nd}) et n_O moles d'oxygène (de masse molaire M_O), tels que $m_{Nd_2O_3} = n_{Nd} M_{Nd} + n_O M_O$.

Et compte tenu de la formule chimique de Nd_2O_3 , $n_O = \frac{3}{2} n_{Nd}$, d'où $m_{Nd_2O_3} = n_{Nd} (M_{Nd} + \frac{3}{2} M_O)$, d'où

$$n_{Nd} = \frac{m_{Nd_2O_3}}{M_{Nd} + \frac{3}{2} M_O}$$

La masse de néodyme m_{Nd} contenue dans une $m_{Nd_2O_3}$ est $m_{Nd} = n_{Nd} M_{Nd}$, d'où :

$$m_{Nd} = \frac{m_{Nd_2O_3} M_{Nd}}{M_{Nd} + \frac{3}{2} M_O} = \frac{w_{tr} \times w_{Nd_2O_3} \times m_{tot} \times M_{Nd}}{M_{Nd} + \frac{3}{2} M_O}$$

Numériquement, $\frac{0,15 \times 0,60 \times 1000 \times 144,2}{144,2 + \frac{3}{2} \times 16,0} \leq m_{Nd} \leq \frac{0,15 \times 0,70 \times 1000 \times 144,2}{144,2 + \frac{3}{2} \times 16,0}$, soit $77 \text{ kg} \leq m_{Nd} \leq 90 \text{ kg}$.

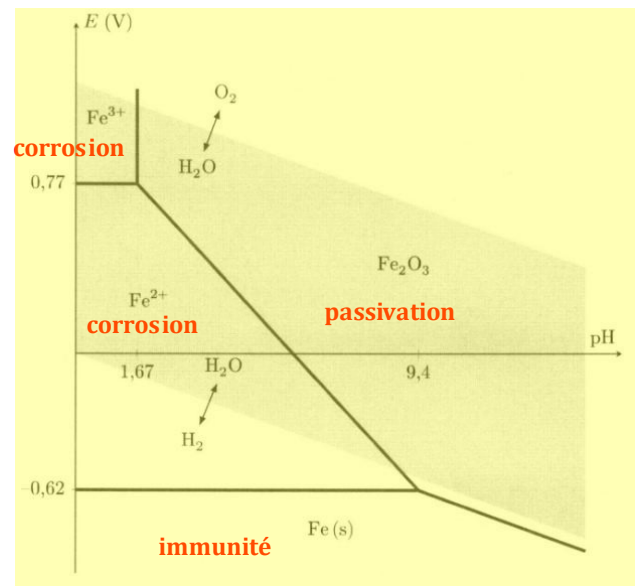
Q31 Les nombres d'oxydation du fer dans les différentes espèces valent :

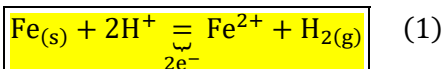
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fe}_{(s)} : \text{NO}(\text{Fe}) = 0 \\ \text{Fe}^{2+} : \text{NO}(\text{Fe}) = +\text{II} \\ \text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} : \text{NO}(\text{Fe}) = +\text{III} \\ \text{Fe}^{3+} : \text{NO}(\text{Fe}) = +\text{III} \end{array} \right.$$

Le domaine d'immunité est celui de $\text{Fe}_{(s)}$, le domaine de passivation est celui de $\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$, et le domaine de corrosion est le reste (cf ci-contre)

Q32 Les domaines de stabilité de l'eau et du fer étant disjoints, le fer est oxydé par l'eau en ions Fe^{2+} en milieu acide : en combinant les deux $\frac{1}{2}$ réactions

$\text{Fe}_{(s)} = \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ et $2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_{2(g)}$, on obtient :

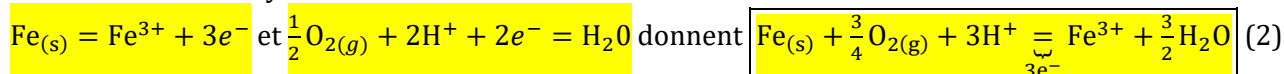




La constante d'équilibre K_1° de cette réaction vaut, à 298 K : $K_1^\circ = 10^{\frac{2}{0,06}(0,00 - (-0,44))} = 4,6 \cdot 10^{14}$.

Les domaines de stabilité du dioxygène et du fer étant disjoints, le fer est oxydé par l'eau en ions Fe^{2+} en milieu acide (réaction thermodynamiquement très favorisée puisque $K_1^\circ \gg 1$).

Mais comme les domaines de prédominance du dioxygène et des ions Fe^{2+} sont également disjoints, le fer est finalement oxydé en ions Fe^{3+} en milieu acide :



Pour calculer sa constante d'équilibre K_2° , commençons par calculer le potentiel standard du couple Fe^{3+}/Fe . La demi-équation redox (III/0) $\text{Fe}^{3+} + 3e^- = \text{Fe}$ est la somme des deux demi-équations (III/II) $\text{Fe}^{3+} + e^- = \text{Fe}^{2+}$ et (II/0) $\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$. Or les enthalpies libres standard de demi-équations redox sont liées aux potentiels standard par la relation : $\Delta_r G^\circ = -nFE^\circ$. Par conséquent :

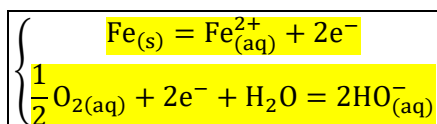
$$\Delta_r G^\circ(\text{III}/0) = -3FE^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}) = -FE^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) - 2FE^\circ(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe})$$

$$\text{On en déduit : } E^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}) = \frac{E^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) + 2E^\circ(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe})}{3} = -0,037 \text{ V}$$

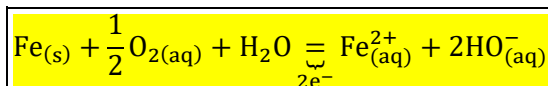
$$\text{Par conséquent : } K_2^\circ = 10^{\frac{3}{0,06}(1,23 - (-0,04))} = 2,1 \cdot 10^{63}$$

On constate que $K_2^\circ \gg K_1^\circ \gg 1$: l'oxydation du fer en ions Fe^{2+} par l'eau est thermodynamiquement très favorisée, mais en présence de dioxygène, le fer devrait s'oxyder de manière quantitative en ions Fe^{3+} .

Q33 On retrouve quasiment mot pour mot le cours sur la goutte d'Evans. La seule petite différence est qu'on nous demande de prendre en compte, dans les équations chimiques, le dioxygène dissous plutôt que le dioxygène gazeux (mais la concentration de dioxygène dissous est proportionnelle à la pression partielle de dioxygène dans la phase gazeuse). Les deux demi-équation redox d'écrivent :



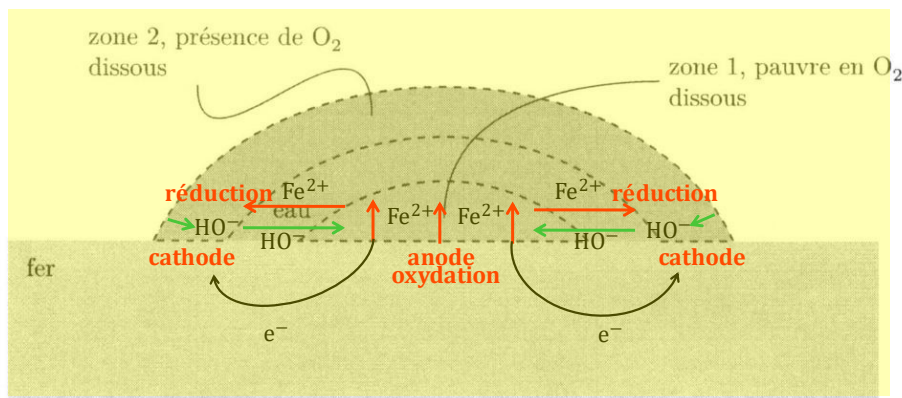
L'équation bilan de la réaction s'écrit donc :



Anode au centre

Cathode à la périphérie.

En rouge est représenté le mouvement des ions positifs $\text{Fe}^{2+}_{(aq)}$, en vert est représenté le mouvement des ions négatifs $\text{HO}_{(aq)}^-$. Pour assurer le passage du courant dans l'eau, les ions positifs et négatifs se déplacent en sens inverse. Et dans le métal, ce courant est assuré par le déplacement des électrons libres. Sur ce dessin en coupe, on a 2 boucles de courant.



Q34 Je suis surpris par le vocabulaire employé : « courbes symétriques ». D'abord, il vaudrait mieux dire « courbes antisymétriques », et ensuite, il faudrait tenir compte du palier de diffusion du dioxygène dissous, ce qui rendrait les courbes non antisymétriques. Mais bon, c'est sans doute une volonté de simplification, en imaginant qu'on n'atteint pas les paliers de diffusion pour les courbes cathodiques de réduction du dioxygène.

D'autre part, on dit au début du IV.B que l'« étude suivante se place systématiquement en milieu aqueux acidifié », puis dans les données de la question Q33, on donne $\text{pH}=7$ (??). En tout cas, on nous dit au début du IV.B que les pressions partielles des gaz dissous seront de 1 bar, donc on peut écrire les demi-réactions avec O_2 gaz.

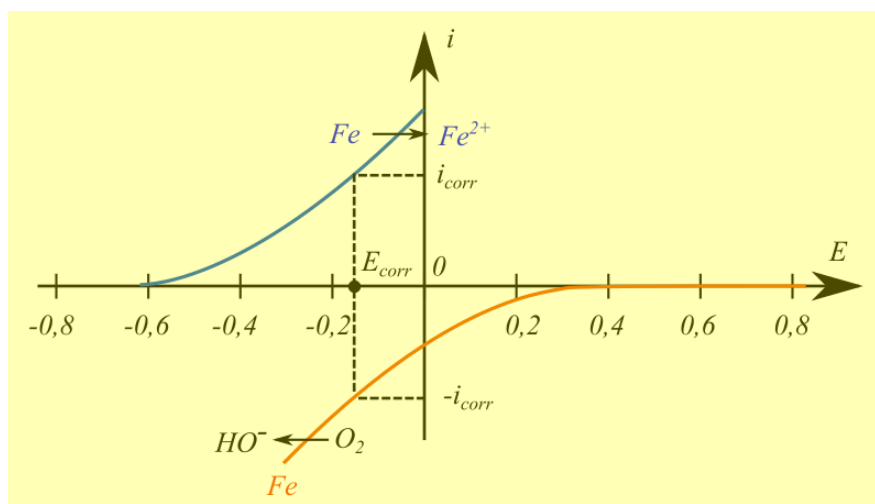
Calculons tout d'abord le potentiel de Nernst du couple $\text{O}_{2(\text{aq})}/\text{H}_2\text{O}$ à $\text{pH} = 7,0$. Pour cela, récrivons la demi-équation redox de ce couple en l'équilibrant avec des H^+ (pour pouvoir utiliser le potentiel standard de 1,23V rappelé dans l'énoncé, valable pour une demi-réaction équilibrée avec des H^+ , et non pas avec des OH^- : $\frac{1}{2} \text{O}_{2(\text{g})} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}$

$$\text{On en déduit : } E(\text{O}_{2(\text{g})}/\text{H}_2\text{O}) = E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) + \frac{0,06}{2} \log \left(\frac{\sqrt{P_{\text{O}_2}} [\text{H}^+]^2}{\sqrt{P^\circ} c^{\text{O}^2}} \right) = 1,23 - 0,42 = \boxed{0,81 \text{ V}}$$

Le potentiel de Nernst du couple Fe^{2+}/Fe vaut, quant à lui :

$$E(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = E^\circ(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) + \frac{0,06}{2} \log \left(\frac{[\text{Fe}^{2+}]}{c^0} \right) = -0,44 + \frac{0,06}{2} \log(10^{-6}) = -0,44 - 0,18 = \boxed{-0,62 \text{ V}}$$

Compte tenu du surpotentiel cathodique (on devrait ajouter « au démarrage »), la vague cathodique démarre donc autour de $E = 0,31 \text{ V}$ tandis que la vague anodique démarre à $E = -0,62 \text{ V}$. L'allure des vagues anodique et cathodique est donc la suivante :



Le potentiel de corrosion est le potentiel pour lequel les deux courants anodique et cathodique sont égaux en valeur absolue. Avec l'hypothèse des courbes antisymétriques, il est à mi-chemin entre les points de décollage des 2 courbes : $E_{\text{corr}} = \frac{0,31 - 0,62}{2} = -0,16 \text{ V}$.

+Q35 En milieu marin, l'eau est chargée en ions Na^+ et Cl^- notamment. Ces ions participent notablement au transport du courant dans l'électrolyte, et diminuent donc la résistance du système électrochimique. D'après la donnée de l'énoncé, les pentes des deux vagues anodique et cathodique sont donc plus élevées en milieu marin qu'en milieu terrestre : les courants de corrosion sont plus importants, et donc la corrosion est plus rapide en milieu marin qu'en milieu terrestre.

Q36 A la cathode se produit la réduction des ions nickel en nickel métallique : $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}_{(\text{s})}$

A l'anode se produit l'oxydation de l'eau en dioxygène : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_{2(\text{g})} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+$

L'équation bilan de l'électrolyse est donc :
$$\text{Ni}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{2e^-} \text{Ni}_{(s)} + \frac{1}{2}\text{O}_{2(g)} + 2\text{H}^+$$

Pour une variation élémentaire $d\xi$ de l'avancement, la charge échangée vaut $\delta q = I dt = 2F d\xi$.

Or, $d\xi = \frac{\delta m_{\text{Ni}}}{M_{\text{Ni}}}$. Par conséquent, le courant étant constant, $I \Delta t = \frac{2F}{M_{\text{Ni}}} m_{\text{Ni}} = \frac{2F}{M_{\text{Ni}}} \rho_{\text{Ni}} S_r h$. On en déduit :

$$\Delta t = \frac{2F \rho_{\text{Ni}} S_r h}{M_{\text{Ni}} I} = 6,4 \text{ h}$$

Q37 Le potentiel de Nernst du couple Ni^{2+}/Ni est donné par :

$$E(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) = E^\circ(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) + \frac{0,06}{2} \log \left(\frac{[\text{Ni}^{2+}]}{c^0} \right) = E^\circ(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) + \frac{0,06}{2} \log \underbrace{(1)}_{c^0} = -0,25 \text{ V}$$

Et par définition du surpotentiel (on ne dit plus surtension) η_{Ni} , le potentiel de la cathode est

$$E_C = E(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) + \eta_{\text{Ni}}$$

Avec la formule fournie (qui donne l'équation de la courbe courant-potentiel, mais attention,

numériquement, il faudra laisser S_r en dm^2), on obtient $|j_{\text{Ni}}| = 10^{\left(\frac{-0,30 - \eta_{\text{Ni}}}{0,15}\right)} = 10^{\left(\frac{-0,30 + E(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) - E_C}{0,15}\right)}$

On en déduit l'intensité du courant servant effectivement à réduire les ions nickel vaut donc :

$$I_{\text{Ni}} = |j_{\text{Ni}}| S_r = 10^{\left(\frac{-0,30 - 0,25 + 0,50}{0,15}\right)} \times 6,3 = 2,9 \text{ A}$$

L'épaisseur de nickel réellement déposée vaut donc :
$$h_{\text{reel}} = \frac{M_{\text{Ni}} I_{\text{Ni}}}{2F \rho_{\text{Ni}} S_r} \Delta t = \frac{I_{\text{Ni}}}{I} h = 37 \text{ } \mu\text{m}$$

Une partie du courant cathodique a servi à réduire l'eau, réaction parasite :
$$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_{2(g)}$$

Q38 Le **nickel est un métal plus noble que le fer**, contrairement au zinc. A priori, si une fissure se produit, c'est **le fer qui serait attaqué et non le nickel**. Dans le cas d'un zingage, **le zinc serait attaqué et non le fer**.

Précisons cela à l'aide des courbes courant-potentiel. En l'absence de données, nous supposons qu'on est à $\text{pH} = 7,0$. Les potentiels de Nernst des couples Ni^{2+}/Ni et Zn^{2+}/Zn valent, dans les conditions de corrosion ($C = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) :

$$E(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) = E^\circ(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) + \frac{0,06}{2} \log \left(\frac{[\text{Ni}^{2+}]}{c^0} \right) = -0,25 - 0,18 = -0,43 \text{ V}$$

$$E(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) = E^\circ(\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}) + \frac{0,06}{2} \log \left(\frac{[\text{Zn}^{2+}]}{c^0} \right) = -0,76 - 0,18 = -0,94 \text{ V}$$

Le dessin ci-contre, très qualitatif, explique ce qu'il advient si la couche de nickel est rayée. On y a tenu compte des paliers de diffusion du dioxygène dissout.

On y voit le potentiel que prend le morceau de fer selon qu'il est seul, recouvert d'une couche de nickel rayée, ou recouvert d'une couche de zinc rayée.

Quand il est seul, il se corrode.

Quand il est recouvert de zinc, partiellement, il est protégé. Quand il est recouvert de nickel partiellement, il se corrode, et même plus vite que s'il n'y a pas de couche de nickel.

