

Problème 1 : Centrale PSI PhCh1 2025

Partie C – Le générateur électrique

Le générateur entraîné par l'ensemble des trois turbines THP, TMP et TBP est une machine synchrone triphasée fonctionnant en alternateur.

Cette partie étudie le modèle d'un alternateur diphasé équivalent dont les caractéristiques au point nominal sont identiques à celles du modèle triphasé (Génératrice ALSTOM type 50WY23Z-109). Ces caractéristiques sont rassemblées dans un tableau figurant en fin de sujet.

On rappelle que toutes les grandeurs fournies relativement à des signaux sinusoïdaux sont données en valeurs efficaces.

On supposera que l'alternateur est une machine à pôles lisses taillée dans un matériau ferromagnétique idéal. L'entrefer étant de très faible épaisseur par rapport au rayon r du rotor, on supposera que tous les points de l'entrefer sont à la distance r de l'axe de rotation de la machine et repérés en coordonnées cylindriques $(O, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ où O se situe au centre de la machine et appartient à l'axe de rotation (Oz) du rotor.

I – Paramètres de l'alternateur

Q25. Attribuer le caractère continu ou sinusoïdal aux courants circulant dans le stator et dans le rotor. Décrire l'organisation spatiale des circuits statorique et rotorique.

Q26. Rappeler l'expression de la puissance moyenne délivrée par les circuits statoriques. En déduire la valeur de la tension nominale aux bornes de chaque phase.

Q27. Rappeler les propriétés d'un matériau ferromagnétique idéal. Déterminer la direction du champ magnétique en un point M de l'entrefer.

Donner, en justifiant, la relation entre ω la pulsation des courants et Ω la vitesse de rotation du rotor.

Déduire la valeur numérique en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ puis en $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ de Ω_n , vitesse de rotation du rotor en fonctionnement nominal.

Q28. Le schéma électrique d'une phase en fonctionnement alternateur est représenté en figure 8. On note R et X respectivement la résistance et la réactance synchrone du bobinage d'une phase définie par $X = L\omega$ où L désigne son inductance propre. En fonctionnement alternateur, écrire l'équation électrique relative à une phase faisant apparaître R et X ; on notera respectivement \underline{E} , \underline{U} et \underline{I} les représentations complexes de la force électromotrice, de la tension aux bornes de la phase et de l'intensité du courant circulant dans la phase.

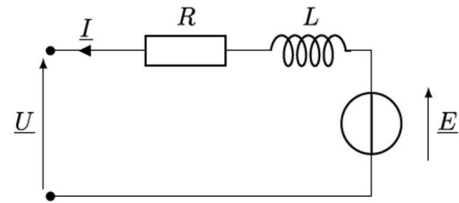


Figure 8 – Schéma électrique d'une phase

Afin de déterminer les paramètres de l'alternateur, on dispose de deux essais expérimentaux au cours desquels le rotor est entraîné par un moteur extérieur à la vitesse nominale Ω_n :

- un essai à vide dans lequel on relève la tension U aux bornes d'une phase en fonction du courant d'excitation I_e ;
- un essai en court-circuit dans lequel on court-circuite chaque phase et on relève I_{cc} , l'intensité circulant dans une phase en fonction du courant d'excitation I_e .

Les deux courbes obtenues sont représentées en figure 9.

Q29. En utilisant les résultats des deux essais, montrer que $E = kI_e$ avec $k = 25,6 \Omega$. Calculer la valeur de X et commenter.

On s'intéresse à présent au fonctionnement nominal de l'alternateur dont les caractéristiques sont données dans le tableau. On considère que la charge nominale impose un retard du courant par rapport à la tension.

Q30. Représenter l'allure du diagramme de Fresnel associé à l'équation électrique d'une phase obtenue en question **Q28** en adoptant la tension \underline{U} pour origine des phases. En déduire l'expression ainsi que la valeur de E puis la valeur de I_e . On parle, dans cette situation, de chute de tension en charge. Interpréter.

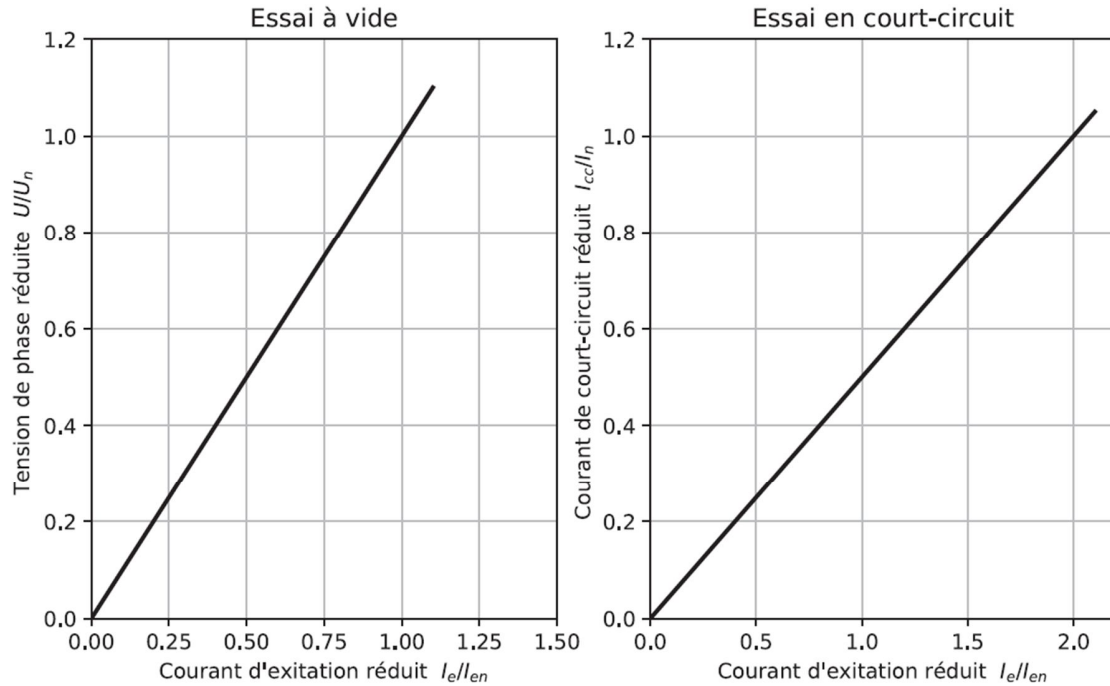


Figure 9 – Courbes issues des essais à vide (à gauche) et en court-circuit (à droite)

II – Raccordement au réseau - compensateur synchrone

L'alternateur fournit de la puissance électrique au site industriel où il se trouve mais peut aussi être raccordé au réseau électrique qui impose la tension aux bornes des phases de l'alternateur et une fréquence constante. Une fois couplé à un grand réseau, un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge électrique branchée aux bornes de cet alternateur en particulier.

On étudie ici les échanges de puissance entre l'alternateur et le réseau. Dans toute la suite, on néglige R devant X ainsi que toutes les pertes énergétiques. On considère de plus que les turbines imposent un couple constant au rotor de l'alternateur. L'alternateur est raccordé au réseau qui impose une tension U_n constante.

L'alternateur, alimenté par le courant d'excitation I_e , échange de la puissance avec le réseau et reçoit de la puissance mécanique de la part des turbines. On note \underline{I} la représentation complexe de l'intensité du courant de phase. Le fonctionnement n'est pas nécessairement nominal. Le facteur de puissance vaut $\cos(\varphi)$ où $\varphi = \text{Arg}(\underline{U}) - \text{Arg}(\underline{I})$ représente le retard algébrique de phase du courant par rapport à la tension.

La figure 10 présente le diagramme de Fresnel d'une phase de l'alternateur raccordé au réseau dans le cas où $\varphi > 0$.

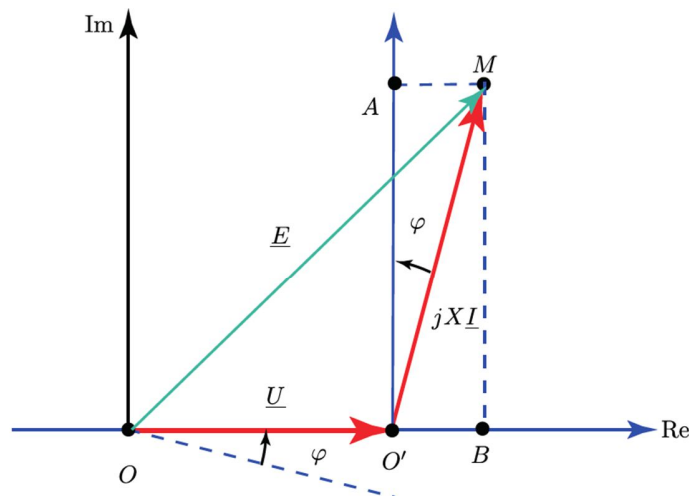


Figure 10 – Diagramme de Fresnel de l'alternateur connecté au réseau dans le cas $\varphi > 0$

- Q31.** Justifier que la puissance P délivrée par l'alternateur est imposée et reste constante. Montrer que la longueur du segment $O'A$ sur la figure 10 est proportionnelle à P et préciser l'expression de la constante de proportionnalité. En déduire le lieu des points M relatifs au fonctionnement de l'alternateur. Comment peut-on en pratique agir sur les paramètres de l'alternateur pour déplacer le point M dans ces conditions ?
- Q32.** Montrer qu'il existe un point de fonctionnement M' de l'alternateur délivrant la même puissance avec le même courant de phase I que le point M . Préciser la relation liant les phases φ et φ' correspondantes. Déterminer alors l'expression puis la valeur E' de E permettant d'obtenir le point M' , ainsi que le courant d'excitation I'_e .

Sur le **document réponse** est reporté un réseau de courbes nommées *courbes de Mordey* donnant l'évolution du courant statorique I en fonction du courant d'excitation I_e pour un fonctionnement de l'alternateur à puissance moyenne constante.

- Q33.** Reporter, directement sur la figure 2 du document réponse, les positions des deux points M et M' associés au fonctionnement de l'alternateur à sa puissance nominale P_n sur le réseau de courbes de Mordey. Retrouver graphiquement les valeurs de E et E' correspondant aux points de fonctionnement M et M' de l'alternateur à sa puissance nominale P_n . Quelle est alors la relation entre les phases φ et φ' correspondantes ?

Un réseau électrique doit fournir une tension stable malgré la présence d'un grand nombre d'utilisateurs et la variété des utilisations. Afin de maintenir certaines constantes du réseau malgré les irrégularités d'utilisation, on utilise les machines synchrones en mode *compensateur synchrone* dans un but de régulation.

Elles sont alors connectées au réseau en tournant à vide, sans être entraînées par un actionneur extérieur.

- Q34.** Adapter le diagramme de Fresnel de la figure 10 afin de déterminer les deux valeurs de φ possibles lorsque l'alternateur tourne à vide sans entraîner de charge mécanique et sans recevoir de puissance mécanique.

Déterminer les valeurs de E correspondantes dans le cas particulier où $U = U_n$ et $I = \frac{I_n}{10}$, en prenant $X = 2,3 \Omega$. Préciser pour laquelle de ces deux valeurs, la machine se comporte comme un condensateur.

Caractéristiques de l'alternateur diphasé au point nominal :

| | |
|--|--------------------------|
| Nombre de pôles | 2 |
| Nombre de phases | 2 |
| Puissance moyenne nominale | $P_n = 240 \text{ MW}$ |
| Courant de phase statorique nominal | $I_n = 11,1 \text{ kA}$ |
| Facteur de puissance nominal | 0,85 |
| Fréquence nominale des courants | $f = 50 \text{ Hz}$ |
| Courant d'excitation rotorique nominal à vide | $I_{en} = 498 \text{ A}$ |
| Tension d'excitation rotorique nominale à vide | $U_{en} = 92 \text{ V}$ |
| Résistance par phase | 0,9 Ω |

Problème 2 : Aimants des rotors d'une éolienne à aimants permanents

Les aimants des rotors des éoliennes sont majoritairement des aimants au néodyme, c'est-à-dire des aimants permanents composés d'un alliage de néodyme, de fer et de bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$).

IV.A – Extraction du néodyme

Les terres rares, notamment le néodyme, ont des propriétés magnétiques exceptionnelles leur permettant, en alliage avec d'autres métaux, la miniaturisation d'aimants très performants, utilisés notamment dans les éoliennes, la téléphonie ou encore l'électroménager.

À l'état naturel, les terres rares ne sont jamais présentes sous forme métallique mais sous forme d'oxyde dans des composés minéraux.

Le néodyme est extrait d'un minerai appelé la monazite. Ce minerai contient des terres rares comme le lanthane (La), le cérium (Ce), le néodyme (Nd) ou le praséodyme (Pr) sous forme d'oxyde. La monazite extraite de la

mine de Mount Weld en Australie contient entre 60 et 70 % (en masse) d'oxydes de terre rare. Le tableau 2 fournit la proportion de chaque oxyde parmi l'ensemble des oxydes de terre rare contenus dans ce minerai.

| | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| La ₂ O ₃ | CeO ₃ | Pr ₆ O ₁₁ | Nd ₂ O ₃ | Sm ₂ O ₃ | Eu ₂ O ₃ | Gd ₂ O ₃ | Tb ₄ O ₇ |
| 26 % | 51 % | 4 % | 15 % | 1,8 % | 0,4 % | 1,0 % | 0,1 % |
| Dy ₂ O ₃ | Ho ₂ O ₃ | Er ₂ O ₃ | Tm ₂ O ₃ | Yb ₂ O ₃ | Lu ₂ O ₃ | Y ₂ O ₃ | Total |
| 0,2 % | 0,1 % | 0,2 % | < 0,1 % | 0,1 % | < 0,1 % | < 0,1 % | 60 – 70 % |

Tableau 2 Composition massique des oxydes de terre rare contenus dans la monazite en provenance de la mine de Mount Weld (d'après *Techniques de l'ingénieur J6630v2*)

Q 30. Quelle masse de néodyme est contenue dans une tonne de monazite provenant de la mine australienne de Mount Weld ?

IV.B – Corrosion des aimants

La présence du fer dans les aimants au néodyme les rend sujet à la corrosion. La corrosion atmosphérique des métaux est similaire à la corrosion humide. Elle résulte de l'action du dioxygène de l'air, et éventuellement de l'eau (condensation de l'humidité, pluie, projections) sur les métaux. Dans le cas du fer, il peut y avoir formation d'oxydes de fer (rouille) ou encore de cations fer (II) ou fer (III).

Le diagramme potentiel-pH de la figure B du document réponse représente le diagramme du fer superposé à celui de l'eau.

L'étude suivante se place systématiquement en milieu aqueux acidifié, pour une concentration des espèces solubles $C = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$; les pressions partielles des espèces gazeuses sont prises égales à $P^\circ = 1 \text{ bar}$. L'aimant est assimilé en première approximation à du fer solide.

Q 31. Donner le nombre d'oxydation du fer et de ses dérivées. Préciser sur la figure B du document réponse, les domaines de corrosion, de passivation et d'immunité à la corrosion du fer.

Q 32. Le fer solide est susceptible de réagir avec l'eau ou le dioxygène dissous dans l'eau. Écrire les équations bilan de ces deux réactions en milieu acide, en choisissant un coefficient stoechiométrique égal à 1 pour Fe(s). Calculer les constantes d'équilibre K° correspondantes et commenter.

La corrosion est particulièrement active dans les zones qui présentent une hétérogénéité de surface (rayure, contrainte, défaut), une hétérogénéité de composition (alliages, impuretés, soudures), ou encore une hétérogénéité de la concentration du milieu. Une quelconque de ces hétérogénéités provoque ce qu'on appelle une corrosion différentielle : l'oxydation et la réduction se produisent en deux zones différentes, le métal assurant la circulation des électrons.

La corrosion est étudiée au niveau d'une goutte d'eau oxygénée sur le métal (figure C du document réponse). Les couples mis en jeu dans la corrosion du fer sont : Fe^{2+}/Fe et O_2/OH^- (correspondant au couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ en milieu basique).

Q 33. Écrire les demi-équations électroniques correspondant à ces deux couples en considérant le dioxygène dissous en milieu aqueux. En déduire l'équation bilan liée au phénomène de corrosion du fer. Sur le schéma de la figure C, repérer la zone correspondant à la réduction et celle correspondant à l'oxydation. Identifier alors l'anode et la cathode et indiquer sur le schéma le déplacement des électrons dans le métal et le déplacement des ions dans l'eau.

L'association de l'anode et de la cathode constitue une micropile en court-circuit. Le déplacement des ions dans l'eau vient fermer le circuit électrique.

Données : pH de l'eau atmosphérique : 7,0. Surtention cathodique du dioxygène sur une électrode de fer : $\eta_C(\text{O}_2) = -0,5 \text{ V}$, $[\text{Fe}^{2+}] = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Il n'y a pas de surtension pour le couple Fe^{2+}/Fe sur une électrode de fer.

Q 34. En supposant que l'allure des courbes est symétrique, proposer des courbes intensité-potentiel $i = f(E)$ permettant d'interpréter ce phénomène de corrosion. Estimer le potentiel mixte E_c , appelé potentiel de corrosion, de cette micro-pile.

Q 35. Sachant que plus la résistance interne du système électrochimique est grande et plus les pentes des courbes $i = f(E)$ sont faibles, comparer la cinétique de la corrosion des aimants d'une éolienne marine et d'une éolienne terrestre.

IV.C – Protection des aimants

Le dépôt industriel de nickel métallique sur les aimants par électrolyse est très utilisé industriellement. Ce procédé consiste à immerger l'aimant, constitué principalement de fer, dans une solution de sulfate de nickel, la pièce en fer étant placée à la cathode. Pour éviter le dépôt d'hydroxyde de nickel, la solution est acidifiée. L'anode est constituée d'un métal inerte.

On réalise le nickelage d'un aimant de rotor de surface totale S_r sous un courant I pour un potentiel de cathode E_C . L'opération a lieu pendant une durée Δt de façon à ce que le nickel recouvre uniformément l'aimant sur une épaisseur h . Le bain permet de maintenir une concentration en nickel à C_0 , à pH fixé.

Données : $E_C = -0,50$ V, $S_r = 6,3$ dm², $I = 4,0$ A, $h = 50$ μm, $C_0 = 1$ mol·L⁻¹, pH = 4,5.

Q 36. Quelle est la durée Δt de cette opération de nickelage ?

En réalité, tout le courant ne sert pas à produire du nickel solide.

La surtension η_{Ni} (en V) au niveau de la cathode est liée à la densité de courant j_{Ni} (en A·dm⁻²) par la relation

$$\eta_{\text{Ni}} = -0,15 \log(|j_{\text{Ni}}|) - 0,30.$$

Q 37. Calculer l'épaisseur de nickel réellement déposée à la surface de l'aimant. Quelle autre demi-réaction a pu se produire en parallèle de la réduction de Ni²⁺ conduisant à la baisse du rendement ?

Q 38. Si la couche de nickel présentait une fissure, tel que le fer se retrouvait en contact avec l'eau, le fer serait-il encore protégé ? À l'aide de courbes $i = f(E)$, comparer avec la protection par une couche de zinc.

Données numériques

| | |
|----------------------------------|---|
| Masse volumique du nickel | $\rho_{\text{Ni}} = 8,9 \times 10^3$ kg·m ⁻³ |
| Constante de Faraday | $\mathcal{F} = 9,65 \times 10^4$ C·mol ⁻¹ |
| Produit ionique de l'eau à 298 K | $K_e = 10^{-14}$ |
| Constante de Nernst à 298 K | $\frac{RT}{\mathcal{F}} \ln(10) = 0,06$ V |

Caractéristiques du générateur

| | |
|-----------------|----------------|
| Diamètre | $D_i = 530$ mm |
| Entrefer | $e = 2$ mm |
| Longueur axiale | $L_r = 300$ mm |

Potentiels standard à 298 K

| | | | | | | |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| | Zn ²⁺ /Zn | Fe ²⁺ /Fe | Ni ²⁺ /Ni | H ⁺ /H ₂ | Fe ³⁺ /Fe ²⁺ | O ₂ /H ₂ O |
| E° (V) | -0,76 | -0,44 | -0,25 | 0,00 | 0,77 | 1,23 |

Extrait du tableau périodique des éléments

| | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|
| Numéro atomique | 1 | 6 | 8 | 28 | 60 |
| Symbole | H | C | O | Ni | Nd |
| Masse molaire atomique (g·mol ⁻¹) | 1,01 | 12,0 | 16,0 | 58,7 | 144,2 |

Formules trigonométriques

$$\begin{aligned} \cos a + \cos b &= 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) & \cos a - \cos b &= -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \\ \sin a + \sin b &= 2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) & \sin a - \sin b &= 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \end{aligned}$$

Document réponse, à rendre avec votre copie

Nom :

Prénom :

Question 31

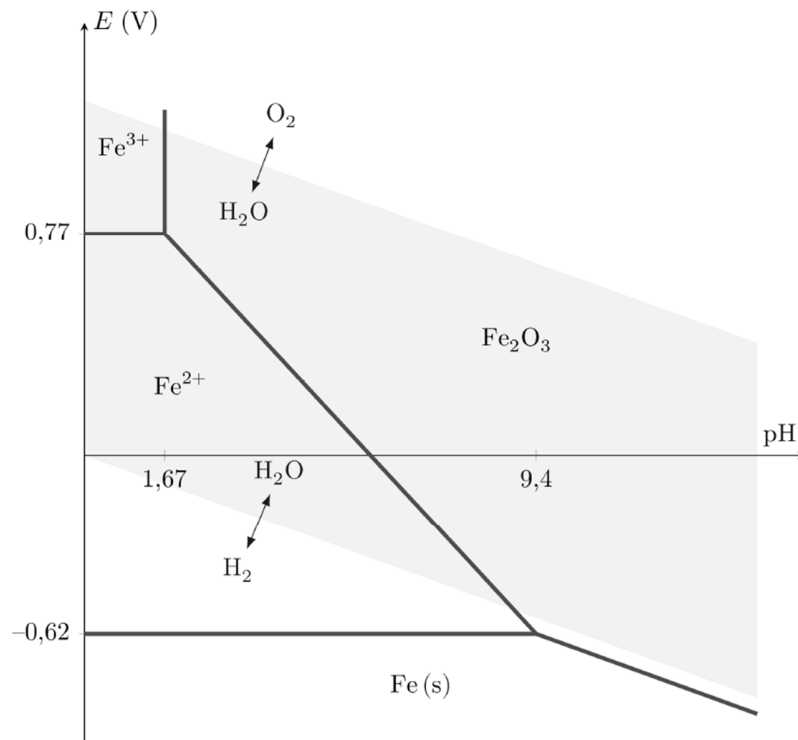
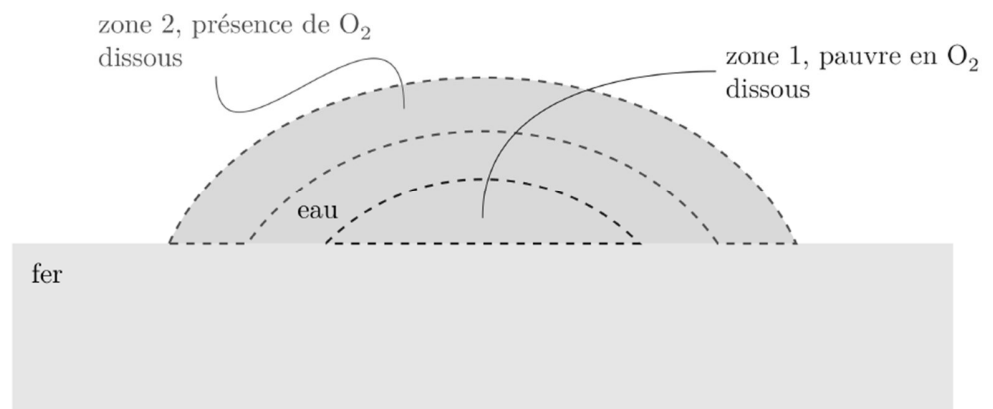


Figure B Diagramme E-pH du fer à la concentration $C = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$

Question 33 **Figure C**

Courbes de Mordey

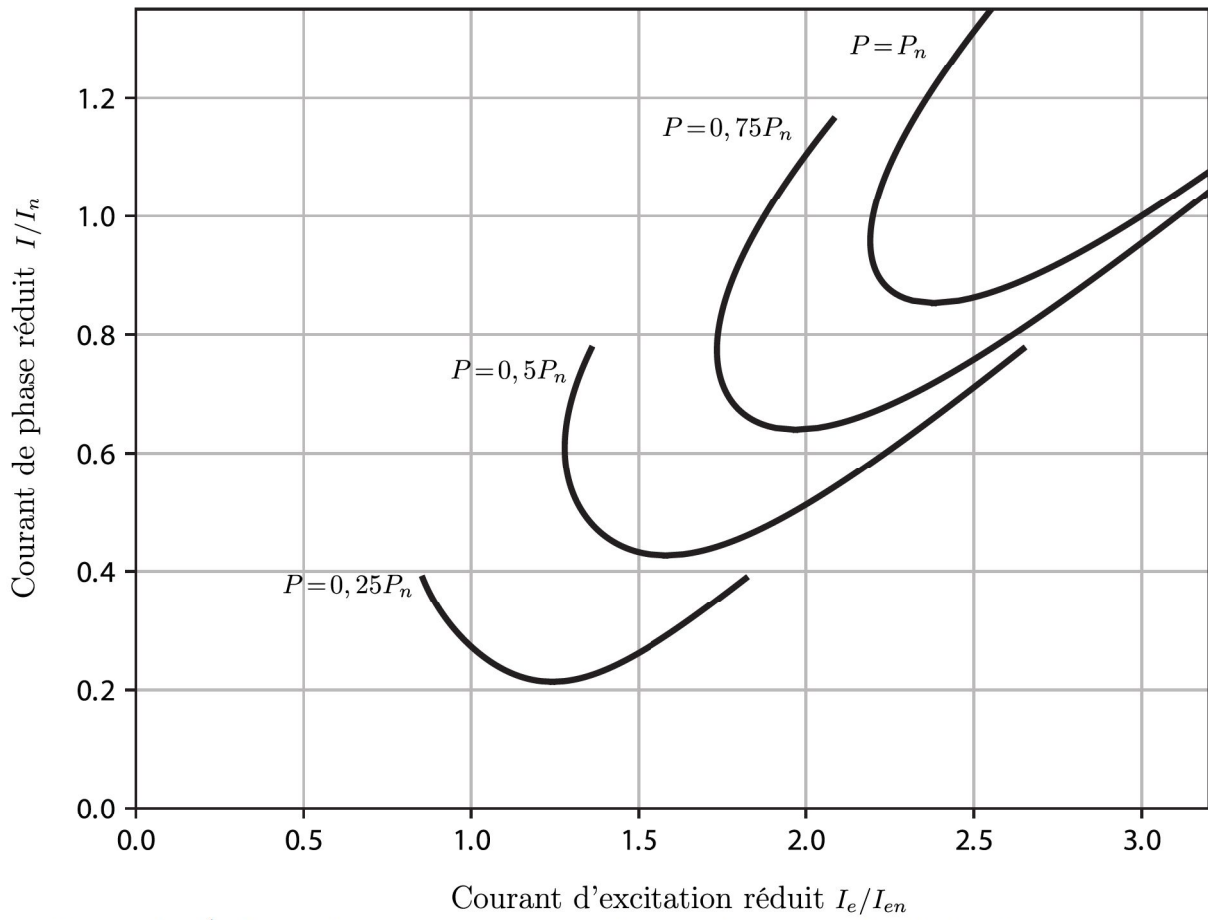


FIGURE 2 – Évolution du courant statorique en fonction du courant d'excitation à puissance constante