

**Epreuve de physique chimie du concours blanc - Devoirs surveillé n° 5**  
**8h00 – 12h00 4 heures**

**Calculatrices NON autorisées**

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

Toutes les interprétations seront comptabilisées

Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Les applications numériques seront effectuées avec 2 chiffres significatifs au maximum

**RAPPEL DES CONSIGNES**

- Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.
- Ne pas utiliser de correcteur.
- Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.

**Le devoir se compose de 3 problèmes indépendants.**

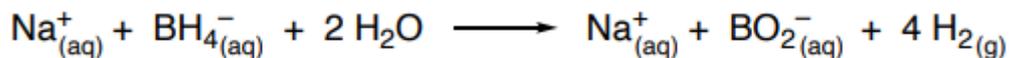
**1<sup>er</sup> problème : Chimie et énergie**  
**(données en fin de l'énoncé de ce problème)**

**Partie 1. La filière hydrogène**

***Production de dihydrogène par hydrolyse catalytique du tétrahydruroborate de sodium***

« L'hydrogène est un des vecteurs énergétiques de demain même si les complications liées à sa production et à son stockage limitent son développement. L'hydrolyse, catalysée du tétrahydruroborate de sodium (NaBH<sub>4</sub>), est une alternative intéressante pour le stockage et la production embarqués d'hydrogène car, en présence d'eau et d'un catalyseur, cet hydrure chimique produit de façon contrôlée de l'hydrogène pur et du métaborate de sodium.»

En présence d'un catalyseur adapté, le tétrahydruroborate de sodium est décomposé par l'eau pour produire du dihydrogène selon l'équation suivante :



**Q1.** Déterminer le volume V(H<sub>2</sub>) de dihydrogène que l'on peut générer à partir de V = 1,0 L de solution aqueuse de concentration C = 1,0 mol·L<sup>-1</sup> en ions sodium Na<sup>+</sup><sub>(aq)</sub> et en ions tétrahydruroborate BH<sub>4</sub><sup>-</sup><sub>(aq)</sub> (on se placera dans les conditions standard de température et de pression : T = 25 °C et P = 1 bar).

**Q2.** La réaction d'hydrolyse peut être catalysée par des catalyseurs à base de platine. Le volume de dihydrogène obtenu serait-il plus élevé si on réalise la réaction en présence de platine ? Justifier.

## Stockage du dihydrogène

S'il n'est pas préparé « à la demande » comme avec l'hydrolyse du tétrahydruroborate de sodium, un des problèmes de l'utilisation du dihydrogène comme vecteur énergétique est son stockage. Des alliages à base de fer et de titane permettent le stockage du dihydrogène. Dans ces composés, l'hydrogène est stocké sous forme atomique (H) et non pas moléculaire (H<sub>2</sub>). L'alliage utilisé ici a une structure cubique dans laquelle les atomes de fer occupent les sommets de la maille cubique et un atome de titane son centre. Les sites octaédriques de la structure sont de deux types : type A (situés au milieu de chaque arête) et type B (situés au centre de chaque face).

**Q3.** Représenter la maille cubique de l'alliage de fer/titane.

**Q4.** Calculer le paramètre de maille  $a$  associé à cette maille sachant que les atomes de fer et de titane sont en contact mais pas les atomes de fer entre eux.

**Q5.** Les sites octaédriques de type B sont-ils des octaèdres réguliers ? Justifier. Ces derniers seront-ils déformés après introduction d'un atome d'hydrogène ? Justifier.

**Q6.** Des atomes d'hydrogène occupent la totalité des sites octaédrique de type B. Indiquer le nombre d'atomes de fer, de titane et d'hydrogène par maille. Justifier. En déduire la formule de cet « alliage hydrogéné ».

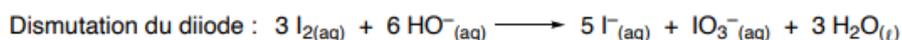
**Q7.** Calculer le volume molaire  $V_m'$  du dihydrogène H<sub>2</sub> stocké dans ce composé en supposant qu'il en occupe tout le volume (on prendra pour valeur de  $a$  celle trouvée à la question 4). Comparer au volume molaire  $V_m$  d'un gaz parfait à  $T = 25\text{ °C}$  et  $P = 1\text{ bar}$ . Conclure.

## Partie 2 – Energie du sportif

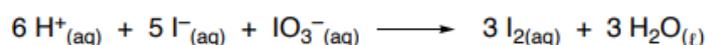
Le glucose, un sucre de formule brute C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, est stocké chez les plantes sous forme d'amidon et chez les animaux sous forme de glycogène, qui peuvent être hydrolysés à tout moment pour redonner des molécules de glucose prêtes à être dégradées en fournissant de l'énergie 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  $V_G = 20,0\text{ mL}$  de la solution (S1) à l'aide de  $20,0\text{ mL}$  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 :



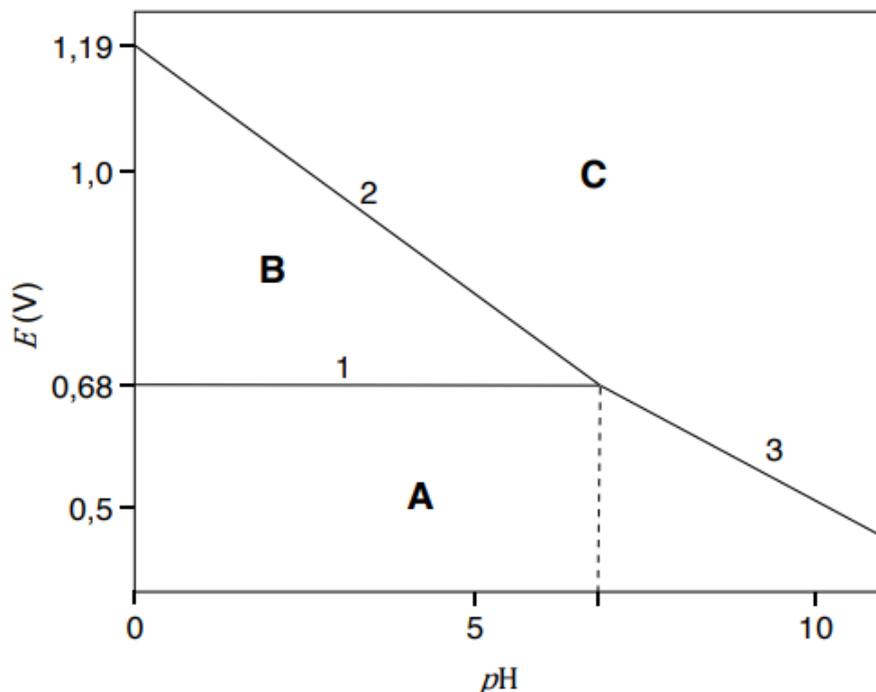
- Revenir en milieu acide pour reformer du diiode par une réaction de médiamutation :



- 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  $V_{\text{éq}} = 8,8\text{ mL}$ .

**Q8.** Déterminer le nombre d'oxydation de l'iode dans les trois espèces qui ont pour formules  $I_2$ ,  $I^-$  et  $IO_3^-$ .

**Q9.** Attribuer à chaque domaine A, B, C du diagramme potentiel-pH (E-pH) de l'iode (Figure 2,  $C_{\text{tracé}} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  en élément iode) aux 3 espèces données dans la question précédente. Justifier.



**Figure 2.** Diagramme potentiel-pH de quelques espèces de l'iode.

**Q10.** Déterminer le coefficient directeur de la droite 2 à l'aide de la formule de Nernst.

**Q11** Écrire la réaction de titrage du diiode  $I_2$  par les ions thiosulfate  $S_2O_3^{2-}$ . Comment repère-t-on l'équivalence du titrage ?

**Q12.** Calculer la concentration massique en glucose dans un jus d'orange

*Annexe 1. Constantes usuelles et approximations de calcul.*

Constante des gaz parfaits :  $R \approx 8 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Approximations :  $\sqrt{3} \approx 1,8$  et  $\sqrt{2} \approx 1,4$ .

*Annexe 2. Données numériques.*

Volume molaire d'un gaz parfait à  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $P = 1 \text{ bar}$  :  $V_m = 24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Numéro atomique :  $Z(\text{B}) = 5$  ;  $Z(\text{Fe}) = 26$  et  $Z(\text{Ti}) = 22$ .

Rayons métalliques :  $R(\text{Fe}) = 125 \text{ pm}$  et  $R(\text{Ti}) = 145 \text{ pm}$ .

Rayon atomique de l'hydrogène :  $R(\text{H}) = 35 \text{ pm}$ .

Masses molaires :  $M(\text{Zn}) = 65 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $M(\text{glucose}) = 180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

*Annexe 3. Données thermodynamiques à 298 K (valeurs arrondies).*

Potentiels redox standards à  $\text{pH} = 0$  :  $E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 1,23 \text{ V}$  ;  $E^\circ(\text{ZnO}/\text{Zn}) = -0,43 \text{ V}$  ;  $E^\circ(\text{S}_4\text{O}_6^{2-}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 0,08 \text{ V}$ .

## 2è problème : Mesure d'un profil de Poiseuille

**Donnée :**

Pour le champ vectoriel  $\vec{A} = A_r(r, \theta, x) \vec{u}_r + A_\theta(r, \theta, x) \vec{u}_\theta + A_x(r, \theta, x) \vec{u}_x$ .

$$\text{div} \vec{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_x}{\partial x}.$$

On étudie l'écoulement stationnaire, de débit volumique  $Q$ , d'un liquide incompressible de masse volumique  $\mu$  et de viscosité dynamique  $\eta$ , dans une conduite horizontale cylindrique de rayon  $R$  et de longueur  $L$  selon l'axe  $Ox$ .

**Q13.** Exprimer le nombre de Reynolds de l'écoulement en fonction de grandeurs définies ci-dessus. À quelle condition l'écoulement peut-il être considéré comme laminaire ? On supposera cette hypothèse vérifiée dans la suite.

La conduite est soumise à des pressions  $P_e$  en entrée et  $P_s = P_e - \Delta P$  en sortie avec  $\Delta P > 0$ . A l'intérieur, le champ de pression et celui des vitesses s'écrivent sous la forme  $P(M,t) = P(x)$  et  $\vec{v}(M,t) = v(r,x) \vec{u}_x$  en coordonnées cylindriques. Pour une longueur  $L$  de conduite, la force de viscosité qu'exerce le liquide en  $r > r_0$  sur le liquide en  $r < r_0$  s'écrit  $\vec{F} = 2\eta\pi r_0 L \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)_{r=r_0} \vec{u}_x$ .

**Q14.** Justifier que  $v(r,x)$  est indépendant de  $x$ . Établir une équation différentielle en  $v(r)$ . En déduire que le profil des vitesses dans la conduite est de la forme  $v(r) = A \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^q \right]$  où  $q$  est un entier que l'on déterminera et dans laquelle on précisera l'expression de  $A$  en fonction de  $\Delta P$ ,  $R$ ,  $L$  et  $\eta$ . Déterminer enfin une relation entre  $Q$  et  $A$  et  $R$ .

On réalise une série de mesures de la vitesse axiale du liquide dans une conduite cylindrique de rayon  $R = 13$  mm, dans laquelle une solution aqueuse circule.

Pour chaque position, une dizaine de mesures est prise et leur moyenne calculée.

On obtient les résultats de la figure 5, pour deux types de solutions :

— La solution 1 est constituée d'eau de viscosité dynamique  $\eta_1 = 1,0 \times 10^{-3}$  Pa.s;

— La solution 2 est un mélange à parts égales d'eau et de sucre de canne de masse volumique  $\mu_2 = 1,2 \times 10^3$  kg.m<sup>-3</sup> et de viscosité dynamique  $\eta_2 = 5,5 \times 10^{-3}$  Pa.s;

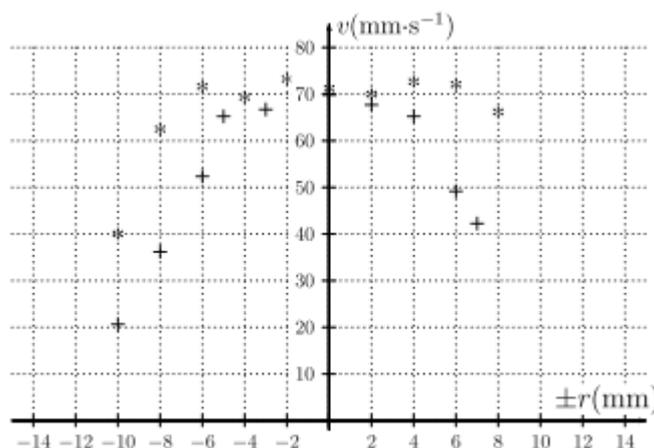


FIGURE 5 – Solution 1 (\*); solution 2 (+)

Sur l'axe des abscisses de la figure 5, la distance  $r$  est relative à l'axe de la conduite.

**Q15.** Lequel de ces deux écoulements correspond le plus à un écoulement laminaire ? Estimer le débit volumique puis en déduire le nombre de Reynolds pour chacune de ces deux expériences. Interpréter les résultats.

### 3è problème : Enjeux énergétiques et technologiques de la production de l'énergie éolienne

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées. Le barème tient compte du temps nécessaire pour explorer ces pistes et élaborer un raisonnement, il valorise ces questions de façon très significative.

Des données numériques et un formulaire, ainsi que des documents utiles sont regroupés en fin d'énoncé.

#### I Enjeux énergétiques

Il est déconseillé de consacrer plus de 30 minutes à la résolution de cette partie pour laquelle on s'appuiera sur les documents 1 à 5 en fin d'énoncé.

Pour diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par le transport routier, il est envisagé, à terme, de remplacer par des véhicules électriques l'ensemble des véhicules à moteur thermique utilisés par les particuliers.

**Q16.** Calculer le supplément de consommation énergétique annuelle que cette conversion au tout électrique occasionnerait. Cela demanderait-il de créer de nouvelles unités de production d'électricité ?

Le passage au tout électrique ne conduit à une diminution significative des émissions de CO<sub>2</sub> que dans la mesure où l'énergie électrique est produite avec un bilan carbone très faible. L'utilisation d'énergie éolienne est, de ce point de vue, une possibilité à étudier en gardant à l'esprit certains ordres de grandeurs évalués dans la question suivante.

**Q17.** Quantifier la puissance de crête nécessaire à la recharge de tous les véhicules électriques. Estimer la surface d'un champ éolien permettant d'assurer cette production d'électricité. Commenter.

On considère une éolienne à axe vertical, type Darrieus H, FAIRWIND 10 kW, implantée sur un site d'essais dans l'Aude. Celle-ci a fait l'objet d'une étude de contrôle et a donc été instrumentée pour relever :

- la production de l'éolienne sur une période de 6 mois,
- la vitesse du vent à proximité de l'éolienne.

Les mesures effectuées sont reportées sur la figure 2 et synthétisées dans le tableau 1.

**Q18.** Quelle est l'énergie produite par cette éolienne sur une année ? Justifier votre raisonnement. Quelle est la puissance moyenne produite sur une année ?



b) Éolienne Darrieus de type H

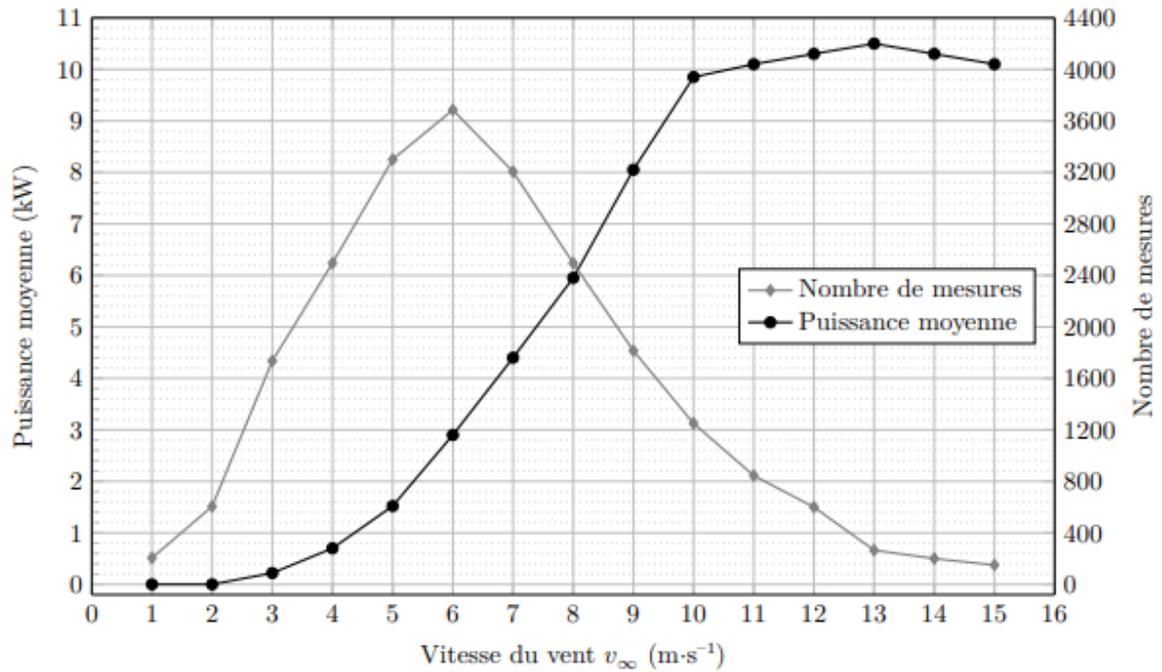


Figure 2 Mesures de contrôle sur site de l'éolienne FAIRWIND 10 kW.

Vitesse du vent (m·s <sup>-1</sup> )	Puissance moyenne (W)	Nombre de mesures	% du temps
1 à 5	867	8350	37 %
6 à 10	5320	12460	54 %
11 à 15	10236	2060	9 %

Tableau 1 Synthèse des mesures de contrôle sur site de l'éolienne FAIRWIND 10 kW.

## II. Générateur

On étudie la production d'énergie électrique par l'éolienne au moyen d'un générateur utilisant des aimants permanents. Il est constitué d'un stator intérieur cylindrique de diamètre  $D_i$  et de longueur  $Lr$  selon. Le rotor a un diamètre intérieur noté  $D_i + 2e$ , avec  $e \ll D_i$  l'entrefer du dispositif et est maintenu en rotation autour de l'axe  $\vec{e}_z$  par une liaison pivot, sa position angulaire étant notée  $\theta r$ .

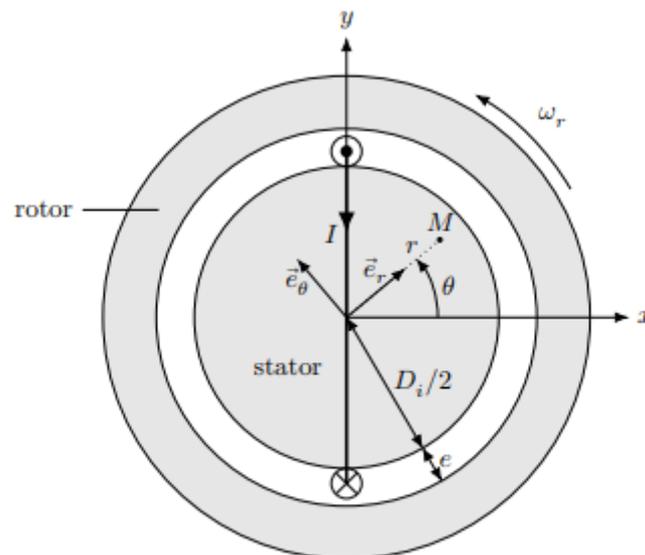


Figure 8 Rotor et stator du générateur (un courant d'intensité  $I$  parcourt l'enroulement autour du stator)

Le rotor et le stator sont constitués d'un matériau ferromagnétique doux de perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  supposée infinie.

On admet que la longueur axiale  $Lr$  est suffisamment grande pour que le champ magnétique dans l'entrefer soit indépendant de la coordonnée  $z$ . On admet également qu'il y est toujours radial, dirigé selon  $\vec{e}_r$ . On enroule autour du stator un câble parcouru par un courant électrique d'intensité  $I > 0$  comme représenté sur la Figure 8. On se place dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires magnétiques. Comme l'entrefer est très fin, ( $e \ll Di$ ), on peut considérer que la norme du champ magnétique y est indépendante de  $r$ .

**Q19.** Montrer que le champ magnétique dans l'entrefer a pour intensité  $B_o = \frac{\mu_o I}{2e}$  et préciser son sens en fonction de l'angle  $\theta$ .

**Q20.** On enroule autour du stator une deuxième spire parcourue par le même courant  $I$ , dans un plan de vecteur normal orienté selon  $\vec{e}_y$ . Tracer la courbe représentative du champ magnétique total  $B(\theta) = \vec{B} \cdot \vec{e}_r$  dans l'entrefer en fonction de  $\theta$ .

On enroule maintenant un grand nombre de spires dans différents plans et on admet qu'une répartition adéquate permet d'obtenir un champ magnétique statorique dans l'entrefer qui varie sinusoïdalement avec l'angle  $\theta$  selon

$$\vec{B}_S(I) = B_o(I) \cos(\theta) \vec{e}_r \quad \text{avec} \quad B_o(I) = \frac{N \mu_o I}{2e}$$

où  $N$  est le nombre effectif de tours de l'enroulement.  
Cette expression sera valable dans toute la suite.

**Q21.** Dans cette question uniquement, l'enroulement statorique fournit une puissance électrique constante de 5,0 kW sous une tension de 230 V et on a  $N = 21$ . Calculer la valeur de l'intensité du courant  $I$  et en déduire l'intensité maximale du champ magnétique dans l'entrefer pour  $e = 2$  mm.

On utilise désormais deux enroulements statoriques similaires mais produisant chacun un maximum de leur champ magnétique dans une direction différente. Ces enroulements sont respectivement parcourus par des courants d'intensité  $I_1$  et  $I_2$  et créent des champs magnétiques respectifs  $\vec{B}_{S1}$  et  $\vec{B}_{S2}$  donnés par

$$\vec{B}_{S1}(I_1) = B_o(I_1) \cos(\theta) \vec{e}_r \quad \text{et} \quad \vec{B}_{S2}(I_2) = B_o(I_2) \cos(\theta - \pi/2) \vec{e}_r$$

où  $B_o$  est défini ci-dessus. Les courants  $I_1$  et  $I_2$  ont même amplitude  $I_s$  et varient sinusoïdalement à la pulsation  $\omega_s$  :  $I_1 = I_s \cos(\omega_s t)$ ,  $I_2 = I_s \cos(\omega_s t - \phi_2)$ .

**Q21.** Comment peut-on réaliser l'enroulement créant le champ  $\vec{B}_{S2}$  si l'on connaît celui qui crée le champ  $\vec{B}_{S1}$  ?

**Q22.** Déterminer la valeur de  $\phi_2$  permettant de réaliser un champ dit « tournant » tel que :

$$\vec{B}_S = B_t \cos(\theta - \omega_s t) \vec{e}_r$$

et préciser l'expression de  $B_t$  en fonction, entre autres, de  $I_s$ .

On note  $\phi_s = \omega_s t$  la direction dans laquelle pointe le maximum du champ magnétique tournant.

Le rotor produit, au moyen d'aimants permanents, un champ magnétique dans l'entrefer qu'on considérera lui aussi radial, uniforme sur l'épaisseur de l'entrefer, variant sinusoïdalement avec la position, et solidaire du rotor. On note  $\vec{B}_r$  son expression

$$\vec{B}_r = B_r \cos(\theta - \phi_r) \vec{e}_r$$

avec  $B_r$  une constante positive et  $\phi_r$  l'angle dont a tourné le rotor.

Le courant dans les enroulements statoriques est désormais induit par le mouvement du rotor. On rappelle que  $\phi_r$  (resp.  $\phi_s$ ) désigne la direction dans laquelle la composante radiale du champ magnétique du rotor (resp. du champ magnétique tournant statorique) est maximale.

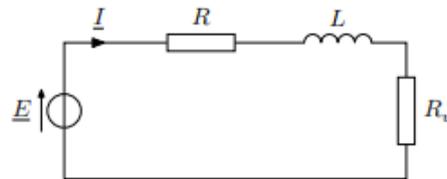
**Q23.** Déterminer l'expression de l'énergie magnétique totale dans l'entrefer, notée  $\mathcal{E}_{\text{mag}}$ , en fonction, entre autres, de  $B_r$ ,  $\phi_s$ ,  $\phi_r$  et de  $I_s$ .

**Q24.** En déduire l'expression du couple exercé sur le rotor, donné par  $\Gamma = d\mathcal{E}_{\text{mag}} / d\phi_r$ .

On suppose dans toute la suite qu'un régime sinusoïdal est établi dans lequel le rotor tourne à la pulsation  $\omega_r$  constante et l'intensité du courant statorique oscille à la même pulsation  $\omega_s = \omega_r$  avec une amplitude  $I_s$ . On note  $\delta = \phi_r - \phi_s = \text{cste}$  qu'on suppose positif.

**Q25.** Calculer la valeur maximale possible de la valeur absolue du couple pour  $I_s = 22$  A et  $B_r = 1,2$  T.

On peut modéliser chacun des enroulements statoriques par le même circuit électrique, représenté sur la figure 9. La résistance  $R$  et l'autoinductance  $L$  sont celles de l'enroulement statorique, la force électromotrice  $E$  est celle produite par le mouvement du rotor. La résistance  $R_u$  représente celle du dipôle alimenté par le générateur. On prendra  $R = 1 \Omega$  et  $L = 20$  mH.



**Figure 9** Schéma électrique d'un enroulement statorique

On donne les expressions des forces électromotrices instantanées des enroulements parcourus par les courants  $I_1$  et  $I_2$  définis avant Q21, qu'on note respectivement  $E_1$  et  $E_2$ ,

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \omega_r \sin(\phi_r) \\ E_2 = -\frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \omega_r \cos(\phi_r) \end{cases}$$

**Q26.** Justifier qualitativement les expressions précédentes.

**Q27.** Déterminer, en notation complexe, les expressions des amplitudes complexes des intensités  $I_1$  et  $I_2$ .

**Q28.** En déduire l'expression du champ magnétique statorique puis celle du couple exercé sur le rotor.

**Q29.** Calculer la valeur du couple mécanique exercé par l'écoulement de l'air sur l'éolienne pour fournir une puissance moyenne de 5 kW à la charge de résistance  $R_u$  sous une tension efficace de 230 V à la fréquence de 50 Hz.

L'utilisation d'un grand nombre d'aimants régulièrement répartis sur le rotor crée désormais un champ magnétique  $\vec{B}_r = B_t \cos(p\theta - \phi_r) \vec{e}_r$

**Q30.** Déterminer la valeur de la pulsation  $\omega_r$  de rotation du rotor pour laquelle la fréquence fondamentale du courant électrique produit en régime sinusoïdal établi est 50 Hz pour  $p = 12$ .

## Données et formulaire

Données numériques :

Tonne équivalent pétrole	1 tep = 42 GJ
Surface de la France métropolitaine	$S_F = 550\,000 \text{ km}^2$
Préfixe du système international d'unité	T (téra) = $10^{12}$

### Caractéristiques du générateur

Diamètre	$D_i = 530 \text{ mm}$
Entrefer	$e = 2 \text{ mm}$
Longueur axiale	$L_r = 300 \text{ mm}$

### Formules trigonométriques

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

## Documents utiles

### Document 1

Le tableau ci-dessous concerne les voitures particulières en circulation en France métropolitaine pendant l'année 2017.

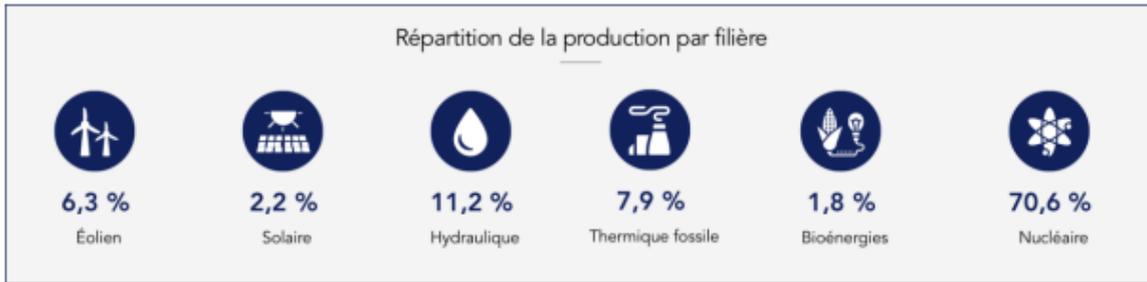
	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>
Nombre	12,7 millions	19,8 millions
Kilométrage annuel moyen	8935 km	15 910 km
Consommation moyenne	7,3 L/100 km	6,1 L/100 km

Avec 43,8 Mtep consommées en 2016, le secteur des transports représente une part croissante de la consommation d'énergie finale de la France : 31 % en 2015 contre 27 % en 1990 et 15 % en 1970. Le transport routier représente à lui seul plus de 80 % des consommations finales en énergie du secteur des transports, largement devant le transport aérien (15 %) et ferroviaire ( $\sim 2\%$ ) et la navigation intérieure (0,4 %). Les consommations du secteur routier proviennent principalement des voitures particulières (62 %), les véhicules utilitaires légers et les camions ne représentant respectivement que 20 % et 14 % des consommations finales d'énergie des transports routiers.

ADEME, *Climat Air et Énergie – Chiffres clés*, édition 2018

Document 2

La production totale d'électricité en France s'établit à 537,7 TW-h sur l'année 2019, répartie comme indiqué dans le schéma ci-dessous :

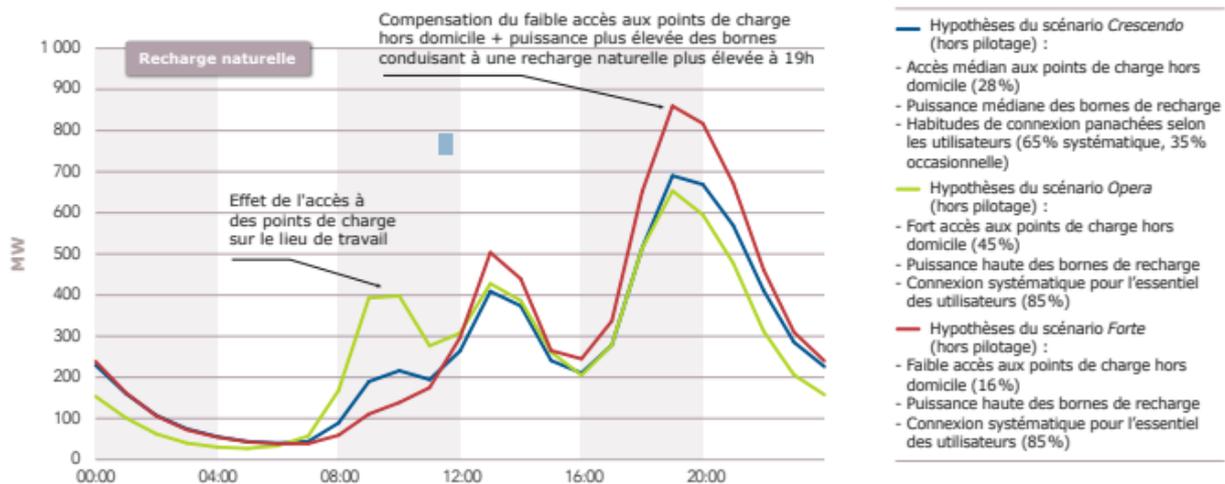


Les pertes représentent principalement l'énergie dissipée par effet Joule lors du transport sur le réseau haute et très haute tension. Elles dépendent essentiellement de la consommation, du plan de production et des échanges transfrontaliers. Les taux de pertes sur le réseau de transport sont compris entre 2 et 3,5 % de la consommation, suivant les saisons et les heures de la journée. En moyenne, en 2019, le taux s'établit à 2,22%, ce qui représente environ 11 TW-h.

RTE, *Bilan électrique 2019*

Document 3

RTE a étudié l'impact de différents scénarios de développement de l'électromobilité sur le système électrique français. La figure ci-dessous présente la courbe de charge type pour un jour ouvré moyen pour un million de véhicules électriques dans différents scénarios considérés (dans leurs variantes sans pilotage).



RTE, *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique*, mai 2019

#### Document 4

Le secteur de l'énergie éolienne en France a pris progressivement de l'importance : en 2019, sa part dans la production nette d'électricité du pays atteint 6,3 % et le taux de couverture moyen de la consommation par la production d'origine éolienne a été de 7,2 % contre 5,9 % en 2018.

En 2018, avec près de 8 000 éoliennes terrestres sur 1 380 parcs, la France était au quatrième rang européen pour la production d'électricité éolienne, loin derrière l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Espagne, et au septième rang mondial.

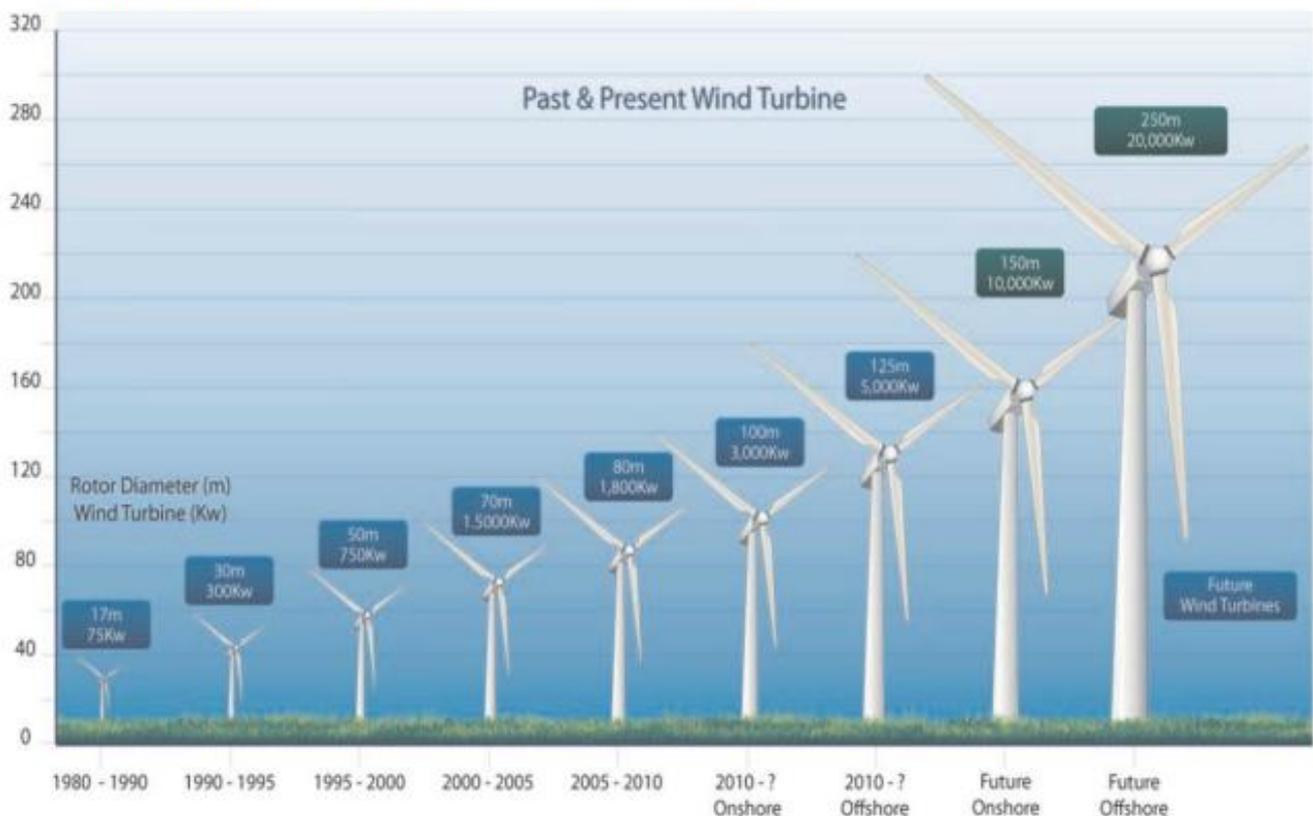
Les éoliennes fonctionnent environ 80 % du temps mais avec une puissance très variable, située entre 0 et (théoriquement) 100 % ; par exemple, en 2019, la puissance éolienne maximale s'est élevée à 13 330 MW le 19 décembre, avec un facteur de charge de 83,8 % ; mais la puissance moyenne mensuelle observée est restée entre 2207 MW en août et 6288 MW en décembre, alors que la puissance installée atteignait 16 494 MW fin 2019 ; le taux d'utilisation (facteur de charge) de cette puissance (puissance moyenne/puissance nominale) a été en moyenne de 24,7 % en 2019, en augmentation (22,8 % en 2018) ; sa moyenne a varié de 13,9 % en août à 39,5 % en décembre, et sa valeur maximale de 52,3 % en juillet à 83,8 % en décembre.

Dans la plupart des parcs éoliens à axe horizontal, un espacement d'environ 6 à 10 fois le diamètre du rotor est souvent respecté. Cependant, pour les grands parcs éoliens, des distances d'environ 15 diamètres de rotor devraient être plus économiques, compte tenu des coûts typiques des éoliennes et des terrains.

*Wikipedia (Énergie éolienne en France, Wind turbine)*

#### Document 5

Croissance des éoliennes commerciales. L'ordonnée correspond à la hauteur du mât. L'inscription au dessus de chaque éolienne donne le diamètre du rotor et sa puissance nominale.



Silvio Simani, Overview of Modelling and Advanced Control Strategies for Wind Turbine Systems  
*Energies*, 2015, 8, p.13396