

## Centrale Physique et Chimie 2 PSI 2021 — Corrigé

Ce corrigé est proposé par Arthur Alexandre (ENS Paris-Saclay) et Alexandre Hérault (professeur en CPGE) ; il a été relu par Olivier Frantz (professeur agrégé en école d'ingénieurs) et Stéphane Ravier (professeur en CPGE).

---

Ce sujet de physique-chimie a pour objet l'étude d'un modèle particulier d'éolienne (Darrieus de type H) pour lequel l'axe de rotation des pales est vertical, et non horizontal comme c'est le cas pour une éolienne classique. Les trois premières parties abordent différents problèmes de physique liés à la conversion de puissance et à la production d'énergie électrique par l'éolienne. La quatrième et dernière est consacrée à la chimie et s'intéresse plus particulièrement aux aimants des rotors de l'éolienne.

- La première partie est consacrée aux enjeux énergétiques liés au remplacement des véhicules actuels par des véhicules électriques, ainsi qu'à la construction de parcs éoliens pour répondre à la demande énergétique. Elle ne comporte que deux questions, qui nécessitent de prendre des initiatives en s'appuyant sur les documents fournis à la fin de l'énoncé.
- Dans la partie II, on s'intéresse à la conversion d'énergie cinétique transportée par l'air en énergie mécanique de rotation. Après avoir mis en évidence la vitesse apparente du vent, on détermine le couple des forces exercées par le vent, puis on estime la puissance moyenne transférée au rotor.
- Dans la troisième partie, on étudie la production d'électricité par le générateur. Cette partie demande de la réflexion ; elle utilise des notions d'électromagnétisme et de conversion électromécanique de puissance.
- Dans la quatrième et dernière partie, dédiée à la chimie, on s'intéresse aux aimants des rotors constitués d'un alliage contenant du néodyme et du fer. L'oxydoréduction est le thème principal de cette partie, particulièrement la corrosion du fer. On utilise des diagrammes potentiel-pH fournis, ainsi que des courbes courant-potentiel dont on doit proposer l'allure.

La difficulté de ce sujet est modérée. Plusieurs résultats intermédiaires sont donnés, ce qui permettait d'espérer traiter l'intégralité du sujet dans le temps imparti.

## INDICATIONS

### Partie I

- 1 On pourra s'aider de la conversion de Mtep en J donnée à la fin du document réponse. De plus, pour estimer l'énergie consommée par l'ensemble des véhicules électriques sur une année, on pourra s'appuyer sur le document 3 donné à la fin de l'énoncé et estimer l'aire sous l'une des trois courbes proposées.
- 2 Pour le calcul de la surface du champ éolien, on peut supposer que les éoliennes sont réparties sur un maillage carré.

### Partie II

- 3 Pour calculer la puissance moyenne, on peut utiliser le tableau 1 puis vérifier que le résultat est cohérent avec les données de la figure 2.
- 6 On pourra déterminer séparément  $\cos \alpha$  et  $\sin \alpha$  en exprimant respectivement  $\vec{w} \cdot \vec{e}_\theta$  et  $\vec{w} \cdot \vec{e}_r$ , à chaque fois de deux manières différentes.
- 7 Calculer la dérivée de  $\tan(\alpha(\theta))$  et déterminer les valeurs de  $\theta$  pour lesquelles cette dérivée s'annule.
- 8 Calculer le nombre de Reynolds en utilisant les indications de l'énoncé.
- 10 Utiliser l'approximation  $\alpha \ll 1$  et écrire  $\sin \alpha \approx \alpha$  et  $\tan \alpha \approx \alpha$ .
- 15 Mesurer la période du signal sur le graphique de la figure 7 et vérifier que l'on obtient bien  $2\pi/3$ .
- 16 Considérer maintenant  $C_D \neq 0$  et calculer le moment de la force de traînée.

### Partie III

- 18 Déterminer la courbe  $B(\theta)$  en superposant les contributions des deux spires.
- 22 Utiliser l'approximation  $e \ll D_i$  ainsi que des formules trigonométriques données à la fin du document réponse.
- 25 Vérifier que les expressions proposées sont en accord avec la loi de Faraday.
- 26 Calculer le module des équations obtenues en appliquant la loi des mailles aux deux circuits électriques.
- 27 Reprendre les expressions obtenues aux questions 21 et 23 et injecter l'expression de  $I_s$  déterminée à la question 26.
- 28 Considérer qu'il n'y a pas de pertes énergétiques dans l'entrefer et que toute l'énergie mécanique du rotor est convertie en énergie électrique.

### Partie IV

- 32 Utiliser le diagramme E-pH pour déterminer les produits d'oxydation dans les deux cas. Tant que les domaines sont disjoints l'oxydation se poursuit. Il faut calculer le potentiel standard du couple  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}$ .
- 33 Trouver dans quelle zone de l'eau le potentiel est le plus faible. Les électrons remontent les potentiels dans le métal.
- 34 Déterminer les potentiels pour lesquels les intensités anodique et cathodique deviennent non nulles, en utilisant les surtensions éventuelles. Les courbes étant symétriques, le potentiel de corrosion se situe à égale distance de ces deux valeurs.
- 35 Dans l'eau de mer, la circulation du courant est plus aisée.
- 36 Décomposer le raisonnement en plusieurs étapes et déterminer les grandeurs suivantes, dans cet ordre : volume de nickel déposé, quantité de matière de nickel, quantité de matière d'électrons puis durée en utilisant la charge et l'intensité.

## I. ENJEUX ÉNERGÉTIQUES

**1** Il s'agit de calculer l'énergie supplémentaire  $E_{\text{élec}}$  consommée sur une année si tous les véhicules actuels en France étaient remplacés par des véhicules électriques. On note  $E_{\text{actuel}}$  et  $E_{\text{élec}}$  l'énergie consommée respectivement par l'ensemble des véhicules actuels et par l'ensemble des véhicules électriques. Le document 1 indique l'énergie consommée en France sur une année par le secteur des transports : 43,8 Mtep (que l'on peut convertir en J en utilisant la donnée du formulaire). Il est aussi mentionné la part énergétique consommée par les voitures particulières :  $0,62 \times 0,8$ . On trouve

$$\begin{aligned} E_{\text{actuel}} &= 43,8 \times 0,62 \times 0,8 \\ &= 21,7 \text{ Mtep} = 9,1 \times 10^{17} \text{ J} \end{aligned}$$

Pour calculer  $E_{\text{élec}}$ , on utilise les données des documents 1 et 3. Le graphique du document 3 donne la puissance de charge nécessaire d'un million de véhicules électriques en fonction du temps sur une journée. Pour déterminer l'énergie consommée, il faut estimer l'aire sous la courbe. Pour cela, on peut utiliser une méthode, certes grossière, qui consiste à estimer la hauteur d'une droite horizontale telle que l'aire sous la courbe et au-dessus de la droite est égale à celle au-dessus de la courbe et en-dessous de la droite. Quelle que soit la courbe considérée, cela donne une puissance moyenne nécessaire  $P_{\text{moy}} \approx 300 \text{ MW}$  sur une journée, pour un million de véhicules. Le document 1 donne le nombre total de véhicules en circulation :  $32,5 \cdot 10^6$ . Ainsi,

$$\begin{aligned} E_{\text{élec}} &= 300 \cdot 10^6 \times 3600 \times 24 \times 365 \times 32,5 \\ &= 3,1 \times 10^{17} \text{ J} = 85 \text{ TWh} \end{aligned}$$

Pour estimer l'aire sous la courbe du graphique du document 3, on peut utiliser la méthode des rectangles, mais cela peut prendre beaucoup de temps.

Finalement, on trouve que le supplément énergétique annuel engendré par un remplacement des voitures actuelles par des véhicules électriques est

$$\Delta E = E_{\text{élec}} - E_{\text{actuel}} = -6,0 \cdot 10^{17} \text{ J} = -14,4 \text{ Mtep}$$

La conversion au tout électrique entraînerait une baisse de la consommation énergétique. Les moteurs électriques sont donc plus efficaces énergétiquement que les moteurs thermiques. Étant donné que les sources de production énergétique sont différentes (diesel, essence/électricité), **la conversion au tout électrique suppose de créer de nouvelles unités de production électrique.**

Estimons le nombre de réacteurs nécessaires pour produire  $E_{\text{élec}}$ . Étant donné que la puissance d'un réacteur de centrale nucléaire est de l'ordre du GW, cela correspond à une énergie produite sur un an de 8,8 TWh. Il faut donc environ environ 10 réacteurs pour produire  $E_{\text{élec}}$  sur une année, ce qui est évidemment très important.

**2** Pour évaluer la puissance crête, on s'appuie sur le document 3 où trois scénarios sont proposés. Le pic de charge des véhicules se situe vers 20 heures pour les trois scénarios. À cette heure, la puissance crête nécessaire à la recharge est de 850 MW dans le pire des scénarios pour 1 million de véhicules électriques. On trouve que la puissance crête nécessaire à la recharge de tous les véhicules électriques est

$$P_{\text{crête}} = 850 \cdot 10^6 \times 32,5 = 28 \text{ GW}$$

On souhaite à présent estimer la surface d'un champ éolien capable de produire cette puissance électrique. D'après les données du document 5, on trouve que l'ordre de grandeur de la puissance d'une éolienne est  $P_{\text{éolienne}} = 10 \text{ MW}$ . En prenant en compte le facteur de charge ou taux d'utilisation  $\eta = 0,25$ , le nombre d'éoliennes à construire est

$$N_{\text{éolienne}} = \frac{P_{\text{crête}}}{\eta P_{\text{éolienne}}} = 1 \cdot 10^4$$

L'ordre de grandeur obtenu est évidemment gigantesque, les grands parcs éoliens actuels possèdent environ  $10^2$  éoliennes.

Déterminons à présent l'ordre de grandeur de la surface nécessaire pour une éolienne. L'ordre de grandeur du diamètre du rotor est de 100 m. D'après le document 4, les éoliennes doivent être séparées d'environ 10 fois le diamètre du rotor. En supposant que les éoliennes sont réparties suivant un maillage carré, on obtient alors la surface nécessaire pour une éolienne :

$$S_{\text{éolienne}} = (100 \times 10)^2 = 10^6 \text{ m}^2 = 1 \text{ km}^2$$

La surface totale du parc éolien permettant d'assurer la production nécessaire à la recharge de tous les véhicules électriques est donc

$$S_{\text{total}} = N_{\text{éolienne}} \times S_{\text{éolienne}} \approx 10^4 \text{ km}^2$$

On obtient un ordre de grandeur gigantesque par rapport à la surface d'un parc éolien classique ( $\approx 10^2 \text{ km}^2$ ). Une solution « tout éolien » semble donc exclue. Il faut alors envisager une diversification de la production énergétique (hydraulique, solaire, ...). Dans tous les cas, cela reste un défi très important.

## II. CONVERSION ÉNERGIE ÉOLIENNE EN ÉNERGIE MÉCANIQUE - ÉOLIENNE TYPE DARRIEUS

**3** En utilisant les données du tableau 1, on détermine l'énergie produite par l'éolienne de type Darrius sur une année  $E_{\text{moy}} = P_{\text{moy}} \Delta t$ , avec  $P_{\text{moy}}$  la puissance moyenne calculée en pondérant les données de puissance du tableau par les pourcentages de temps et  $\Delta t$  la durée d'une année exprimée en seconde. On trouve

$$P_{\text{moy}} = 867 \times 0,37 + 5\,320 \times 0,54 + 10\,236 \times 0,09 = 4,1 \text{ kW}$$

et

$$E_{\text{moy}} = 4,1 \cdot 10^3 \times 365 \times 24 \times 3\,600 = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ J} = 36 \text{ MWh}$$

Le résultat obtenu pour la puissance moyenne est cohérent avec le graphique de la figure 2. En effet, on peut estimer la vitesse moyenne du vent en regardant où se situe le pic de la courbe de mesures, c'est-à-dire pour environ  $v_{\infty} = 6 \text{ m.s}^{-1}$ . La puissance moyenne délivrée par l'éolienne pour cette vitesse est  $P_{\text{moy}} = 3 \text{ kW}$ , ce qui est en accord avec le résultat calculé.