

## Problème 1 : *Conception technique d'une éolienne*

Ce problème étudie les contraintes techniques liées à la conception des éoliennes, en accordant — sauf en partie I — une attention particulière aux éoliennes dites de Darrieus de type H (Figure 1b).



a) Éoliennes à  
axe horizontal

b) Éolienne Darrieus de type H

**Figure 1** Différents types d'éoliennes

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 figurent dans le document réponse. Des documents utiles sont regroupés en fin d'énoncé.

### I Enjeux énergétiques

Il est déconseillé de consacrer plus de 20 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  $\text{CO}_2$  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.

**Q 1.** Calculer le supplément de consommation énergétique électrique 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  $\text{CO}_2$  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.

**Q 2.** 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.

### II Conversion énergie éolienne en énergie mécanique — éolienne type Darrieus

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 reportés sur la figure 2 et synthétisées dans le tableau 1.

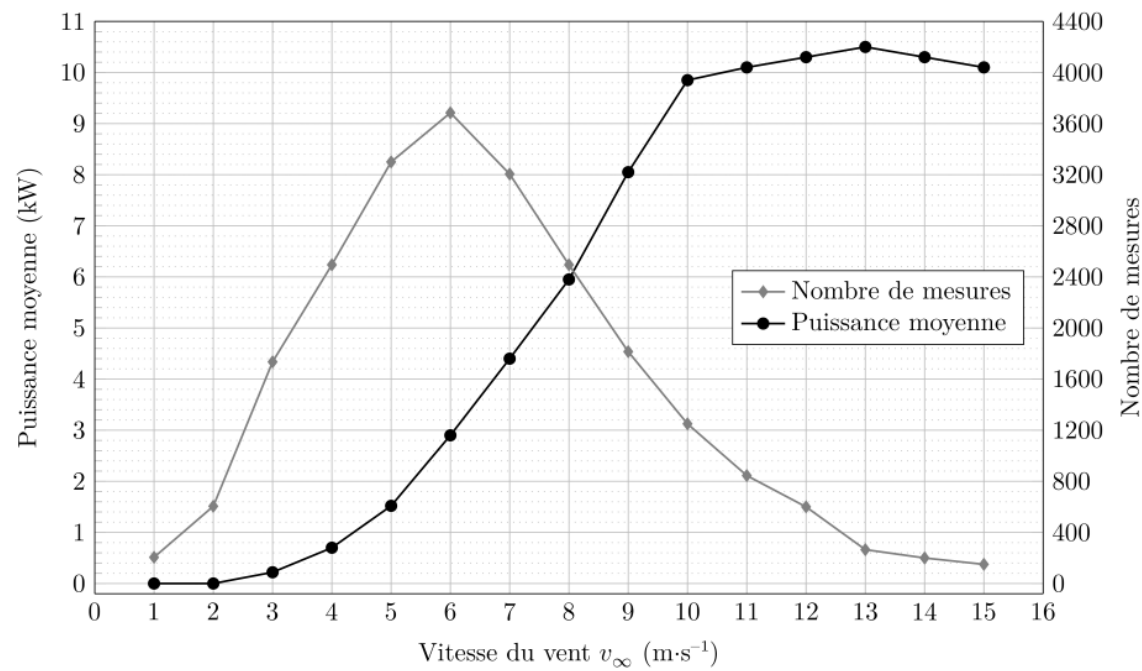


Figure 2 Mesures de contrôle sur site de l'éolienne FAIRWIND 10 kW.

| Vitesse du vent ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 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.

**Q 3.** Quelle est l'énergie produite par cette éolienne sur une année ? Justifier votre raisonnement. Quelle est la puissance moyenne produite sur une année.

On s'intéresse à la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique sur cet exemple simple d'éolienne Darrieus. Pour ce type d'éolienne, les pales sont verticales. La surface qu'elles décrivent lors de leur rotation est un cylindre, appelé « cylindre éolien », de rayon  $R$  et de hauteur  $L$ .

L'étude suivante porte sur une éolienne à trois pales identiques.

L'éolienne est soumise à un vent constant de vitesse  $\vec{v}_\infty = v_\infty \vec{e}_x$ . Après un régime transitoire, les pales tournent à la vitesse angulaire  $\omega = \dot{\theta} > 0$  constante autour de l'axe  $Oz$ . Dans toute la suite de l'étude, le régime est supposé permanent.

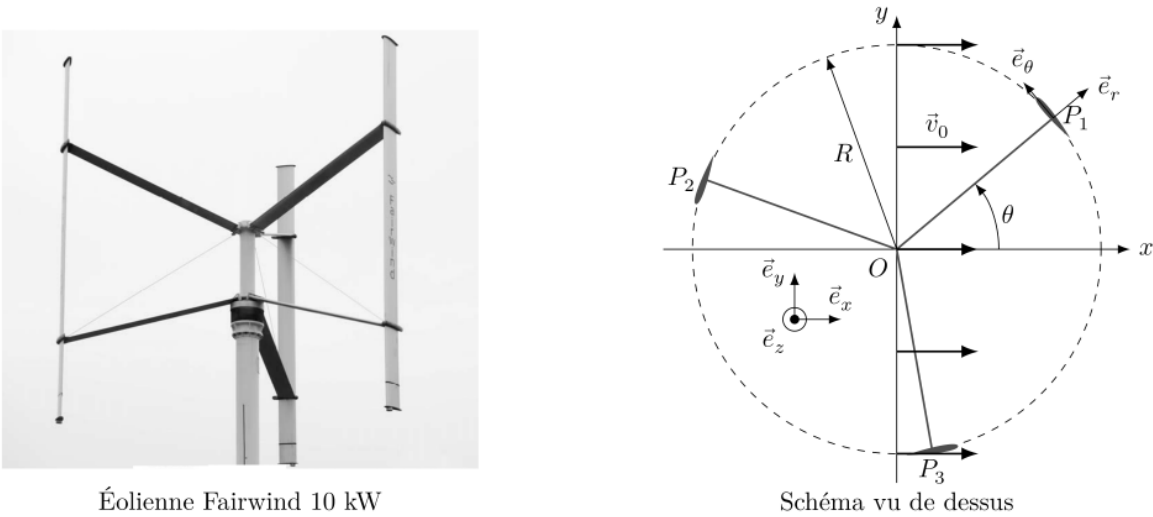


Figure 3 Paramétrage de l'éolienne type Darrieus H

On définit de plus (figure 3) :

- le centre de poussée  $P_i$  où s'appliquent les forces subies par la pale numéro  $i$  ;
- le référentiel  $\mathcal{R}_0 = (O, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$  associé au sol auquel est ancré le mât de l'éolienne ;
- le référentiel  $\mathcal{R}_1 = (P_1, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$  associé à la pale n°1.
- la vitesse du vent *au niveau de l'éolienne* dans le référentiel  $\mathcal{R}_0$  est supposée uniforme et vaut  $\vec{v}_0$  avec  $\vec{v}_0 = v_0 \vec{e}_x = (1 - a)v_\infty \vec{e}_x$  où  $a$  est appelé facteur d'interférence entre le vent et l'éolienne ;
- la vitesse de  $P_1$  dans le référentiel  $\mathcal{R}_0$  est notée  $\vec{u}$  ;
- la vitesse apparente du vent dans le référentiel  $\mathcal{R}_1$  au voisinage de  $P_1$  est notée  $\vec{w}$  et est donnée par  $\vec{w} = \vec{v}_0 - \vec{u}$ .

On définit le coefficient de vitesse de l'éolienne (TSR pour Tip Speed Ratio en anglais) comme  $\lambda = \frac{R\omega}{v_\infty}$ . Pour l'étude suivante, on prendra  $\lambda = 2,4$ ,  $a = 0,37$  et  $v_\infty = 6,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Nous étudions dans un premier temps la pale n°1.

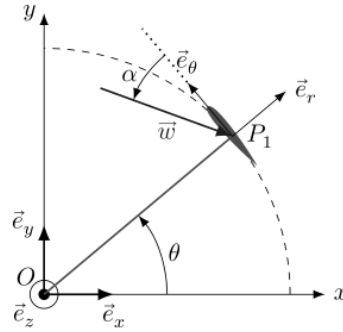
**Q 4.** Représenter sur la figure A du document réponse, pour chaque position de la pale, les vecteurs  $\vec{v}_0$ ,  $-\vec{u}$  et  $\vec{w}$ .

**Q 5.** Montrer que la norme de  $\vec{w}$  s'exprime par

$$w = v_0 \sqrt{1 + 2\lambda_0 \sin \theta + \lambda_0^2}$$

avec  $\lambda_0 = \lambda/(1 - a)$ .

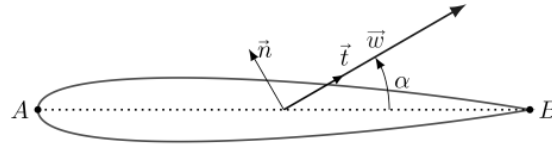
On note  $\alpha$  l'angle d'attaque, l'angle entre l'opposé de la direction du vent et de la direction tangente à la pale, tel que  $\alpha = (\vec{e}_\theta, -\vec{w})$ . La vitesse relative du vent définit l'angle d'attaque (figure 4).



**Figure 4** Définition de l'angle d'attaque  $\alpha$

**Q 6.** Montrer que  $\tan \alpha = \frac{\cos \theta}{\sin \theta + \lambda_0}$ .

**Q 7.** De façon qualitative, tracer  $\alpha$  en fonction de  $\theta$ . Obtenir numériquement l'intervalle des variations de  $\alpha$ . Chaque pale a un profil d'aile symétrique de type NACA 0012.



**Figure 5** Définition de la corde  $AB = \ell$  (en pointillés), de  $\vec{n}$  et de  $\vec{t}$  pour le profil NACA 0012.

La résultante des forces exercées par le vent sur la pale est notée  $\vec{F}$  et se décompose en une force de traînée  $\vec{F}_D$  (*Drag*) dans la direction de l'écoulement et une force de portance  $\vec{F}_L$  (*Lift*) dans la direction perpendiculaire à l'écoulement :

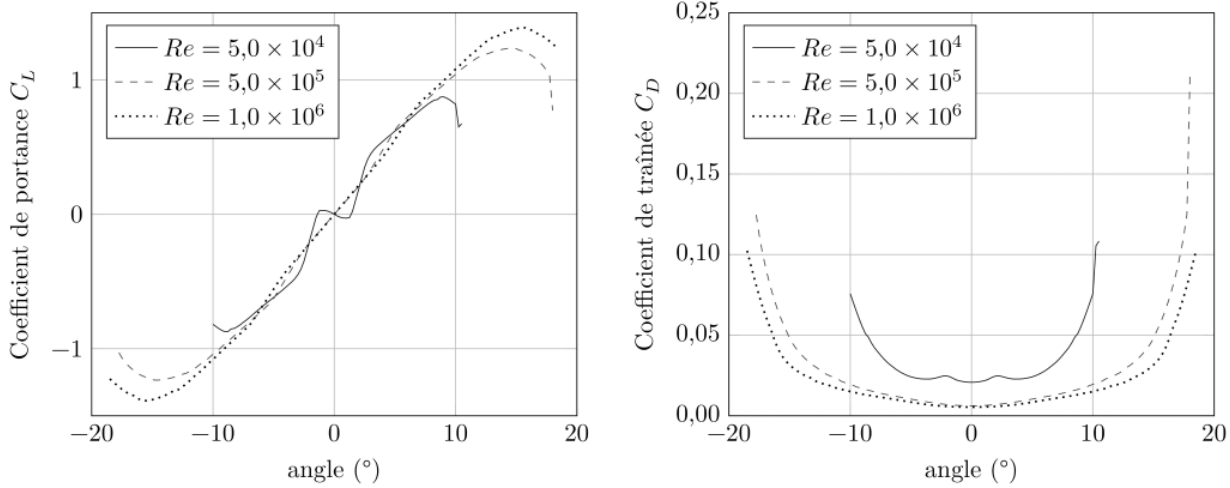
$$\vec{F} = \vec{F}_L + \vec{F}_D.$$

Les coefficients aérodynamiques de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$  sont définis par

$$\begin{cases} \vec{F}_L = \frac{1}{2} C_L \rho S w^2 \vec{n} \\ \vec{F}_D = \frac{1}{2} C_D \rho S w^2 \vec{t} \end{cases}$$

où  $\vec{t}$  est le vecteur unitaire dans la direction et le sens de la vitesse relative du vent  $\vec{w}$  et  $\vec{n}$  est le vecteur normal à  $\vec{t}$  dans le plan perpendiculaire à l'axe  $Oz$ , orienté vers l'extérieur de l'éolienne. On note  $\rho_{\text{air}}$  la masse volumique de l'air et  $S$  est la surface alaire de l'aile, c'est-à-dire la projection de l'aile sur le plan contenant la corde.

Les coefficients aérodynamiques dépendent de l'angle d'attaque. Les courbes donnant  $C_L(\alpha)$  et  $C_D(\alpha)$  sont données figure 6 pour différentes valeurs du nombre de Reynolds  $Re$ . Pour une aile, on précise que la distance caractéristique intervenant dans le nombre de Reynolds est la corde  $\ell$ .



**Figure 6** Coefficients de portance (*Lift*) et de trainée (*Drag*) en fonction de l'angle d'attaque exprimé en degrés pour trois valeurs du nombre de Reynolds

**Q 8.** Justifier que, dans le cas des pales de l'éolienne et pour la valeur de  $\lambda_0$  considérée, on peut écrire en première approximation que  $C_L(\alpha) \approx k\alpha$  et  $C_D \ll C_L$ . Estimer  $k$ .

Sauf mention contraire, on prendra dans la suite  $C_D = 0$  et  $C_L(\alpha) = k\alpha$ .

**Q 9.** Exprimer la force  $\vec{F}_1$  exercée par le vent sur la pale n°1 dans la base  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta)$ . Commenter l'effet de chacune des composantes sur la rotation de l'éolienne.

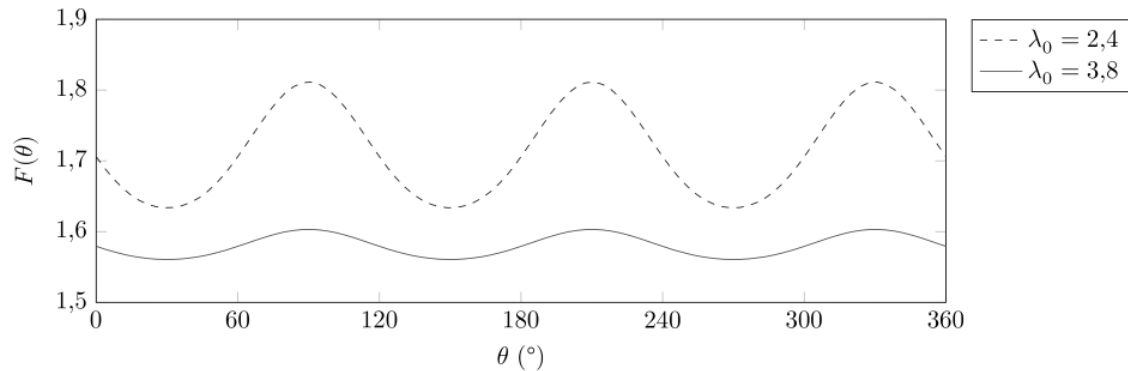
**Q 10.** Exprimer  $\mathcal{M}_{z,1}$ , moment de la force  $\vec{F}_1$  par rapport à l'axe  $Oz$  et montrer que

$$\mathcal{M}_{z,1} = \kappa f(\theta)$$

où  $f(\theta) = (1 + 2\lambda_0 \sin \theta + \lambda_0^2) \frac{\cos^2 \theta}{(\lambda_0 + \sin \theta)^2}$ . En déduire  $\kappa$ .

**Q 11.** Exprimer le couple  $\Gamma_z$  engendré par les trois pales sur le rotor de l'éolienne.

Le tracé de la courbe  $F(\theta) = \sum_{n=0}^2 f\left(\theta + n\frac{2\pi}{3}\right)$  est fourni figure 7.



**Figure 7** Tracé de  $F(\theta) = \sum_{n=0}^2 f\left(\theta + n\frac{2\pi}{3}\right)$

**Q 12.** La puissance moyenne du couple est  $\mathcal{P} = \langle \Gamma_z \rangle \omega$ . En déduire la puissance moyenne transférée au rotor dans ce modèle. En donner une estimation numérique dans le cas considéré jusqu'ici. Donner un exemple concret d'objet ou d'installation électrique susceptible d'être alimenté par cette éolienne.

Donnée :  $k = 6,3 \text{ rad}^{-1}$ .

- Q 13.** Définir puis déterminer le débit d'énergie cinétique  $D_{E_c}$  traversant le cylindre éolien si l'éolienne était absente.
- Q 14.** Définir le coefficient de puissance  $\eta$  de l'éolienne qui représente le rendement moyen de l'éolienne en énergie. L'exprimer en fonction de  $k$ ,  $\lambda$ ,  $a$  et des données géométriques de l'éolienne. Faire l'application numérique. Commenter.
- Q 15.** Quelle sera(seront) la(les) fréquence(s) des composantes sinusoïdales du couple ? Donner leurs valeurs dans la plage de fonctionnement nominale, pour  $v_\infty$  allant de 0 à  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ?
- Q 16.** Montrer que la puissance de la force de traînée sur un tour est négative. Discuter de l'influence de  $C_D$  sur la puissance moyenne que peut fournir une éolienne.

### Documents utiles

#### Document 1

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

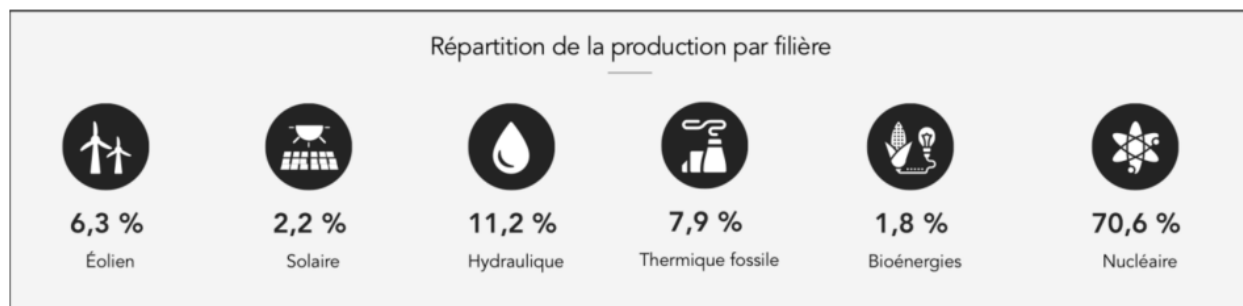
|                          | <i>Essence</i> | <i>Diesel</i> |
|--------------------------|----------------|---------------|
| Nombre                   | 12,7 millions  | 19,8 millions |
| Kilométrage annuel moyen | 8935 km        | 15 910 km     |
| Consommation moyenne     | 7,3 L/100 km   | 6,1 L/100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

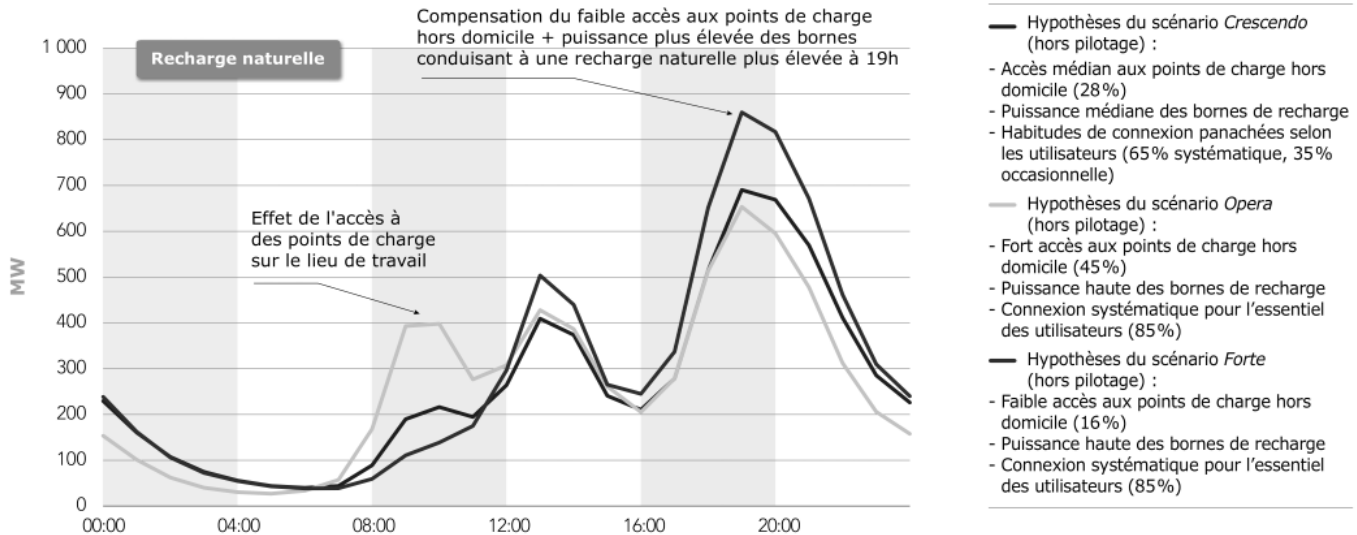


Les pertes représentent principalement l'énergie dissipée par effet Joule lors du transport sur le réseau haute et très haute tension. Elles dépendent essentiellement de la consommation, du plan de production et des échanges transfrontaliers. Les taux de pertes sur le réseau de transport sont compris 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.

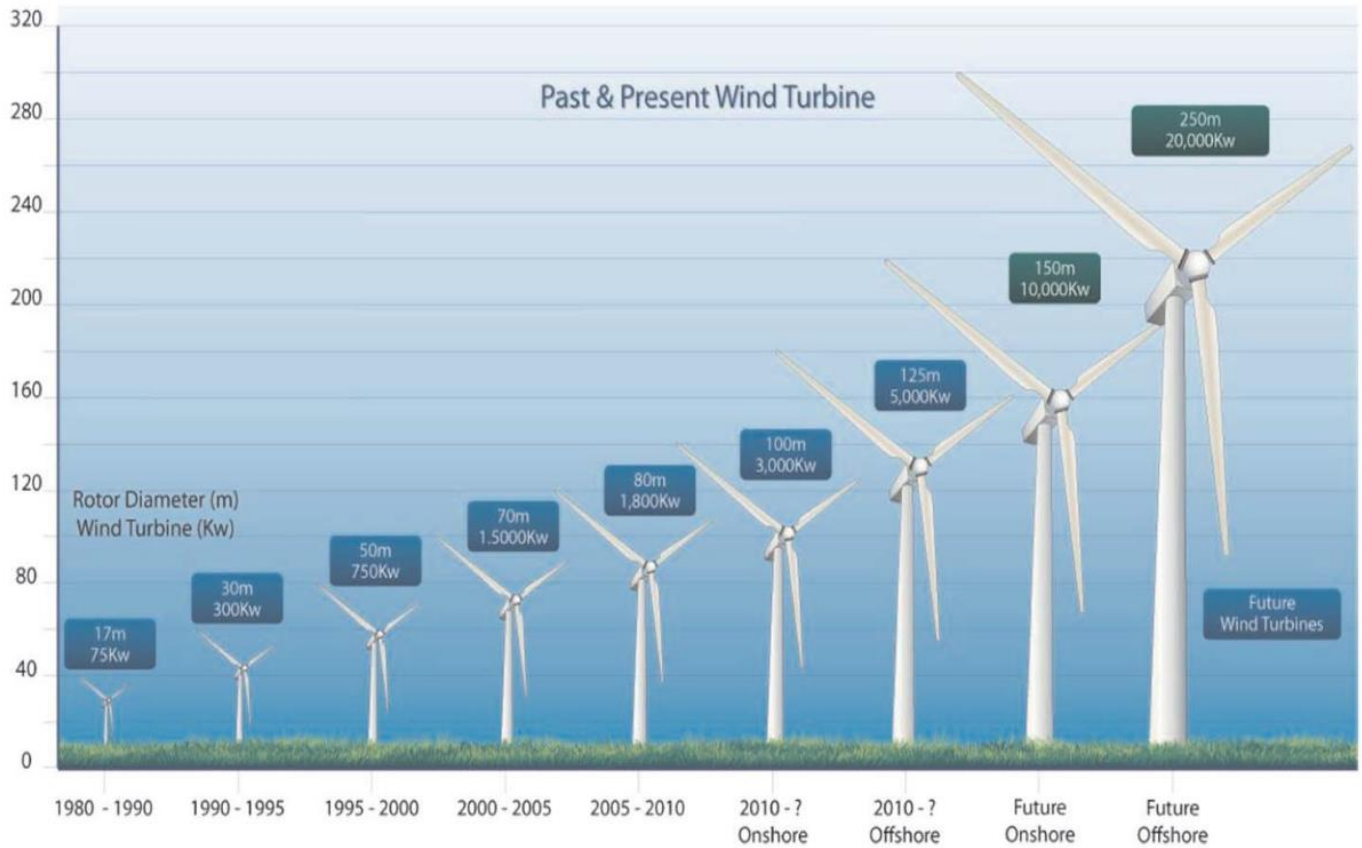
Les éoliennes fonctionnent environ 80 % du temps mais avec une puissance très variable, située entre 0 et (théoriquement) 100 % ; par exemple, en 2019, la puissance éolienne maximale s'est élevée à 13 330 MW le 19 décembre, avec un facteur de charge de 83,8 % ; mais la puissance moyenne mensuelle observée 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

## Données et formulaire

*Données numériques*

|                                          |                                                        |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Masse volumique de l'air                 | $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| Viscosité dynamique de l'air             | $\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$    |
| 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 (tétra) = $10^{12}$                                  |

*Caractéristiques de l'éolienne Darrieus H*

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| Rayon             | $R = 4,0 \text{ m}$     |
| Corde             | $\ell = 0,45 \text{ m}$ |
| Hauteur des pales | $L = 8,0 \text{ m}$     |
| Nombre de pales   | $N = 3$                 |

*Formules trigonométriques*

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

**PROBLEME 2 :**

Calculatrice autorisée

**Utilisation des batteries Li-ion**

Ce sujet aborde quelques éléments liés à l'utilisation des batteries lithium-ion. À partir d'une première étude chimique et thermodynamique sur un accumulateur en fonctionnement, on s'intéresse à la diffusion thermique dans une batterie composée d'un ensemble d'accumulateurs. Enfin, une dernière partie aborde l'utilisation de panneaux solaires comme source d'énergie. Les trois parties sont largement indépendantes.

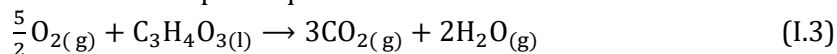
Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par mise en gras. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Un formulaire et certaines valeurs numériques sont regroupés en fin de ce problème.

Depuis l'utilisation de ces batteries Li-ion, plusieurs cas d'explosion ont été recensés que ce soit pour les téléphones portables, les ordinateurs ou encore les véhicules. Des courts-circuits au sein de l'accumulateur ont souvent été incriminés. En 2011, des chercheurs Taïwanais ont montré que lorsque la température dépasse  $100^\circ\text{C}$ , les accumulateurs Li-ion peuvent exploser et induire localement une élévation de température de  $900^\circ\text{C}$ .

**Étude d'un accumulateur Li-ion****I) Influence de l'électrolyte**

Des chercheurs ont constaté que l'explosion d'une batterie Li-ion peut survenir même pour un accumulateur déchargé. Parmi les réactions intervenant dans les explosions de batteries Li-ion, la combustion de l'acide pyruvique ( $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3(\text{l})$ ), utilisé comme électrolyte, joue un rôle important dans l'élévation de température. Sa réaction de combustion est modélisée par l'équation



**Q 1.** Justifier que l'enthalpie standard de formation de  $\text{O}_{2(\text{g})}$  est nulle.

**Q 2.** Déterminer l'enthalpie standard de réaction à  $298 \text{ K}$ . Commenter son signe.



Afin d'évaluer les risques lors d'une surchauffe d'une batterie Li-ion, un accumulateur de type 18650 initialement à la température  $T_i = 298\text{ K}$  sous une pression  $P_i = 1,0\text{ bar}$  est placé dans un calorimètre en acier fermé hermétiquement de volume  $V_0 = 150\text{ mL}$  (figure 3). Le système est équipé d'une mesure en temps réel de la température et de la pression malgré l'explosion. Cette batterie est chauffée progressivement jusqu'à  $\theta_0 = 129^\circ\text{C}$ , température à partir de laquelle l'explosion de la batterie commence. Dans toute l'étude, on suppose que la capacité thermique du calorimètre est négligeable et que le volume occupé par la batterie est négligeable devant l'espace libre disponible. En outre, on considère les gaz comme parfaits.

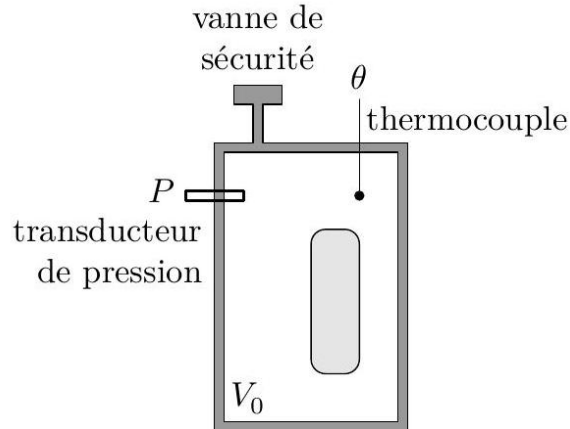


Figure 3 Vent Sizing Package 2 (VSP2™), calorimètre adiabatique à faible inertie thermique, d'après <https://www.fauske.com>

**Q 3.** Déterminer, compte tenu de l'évolution de la température observée (figure 4), si le calorimètre est parfaitement calorifugé.

**Q 4.** En estimant le temps caractéristique de retour à la température ambiante, justifier que la transformation du contenu du calorimètre liée à l'explosion peut être assimilée à une transformation adiabatique.

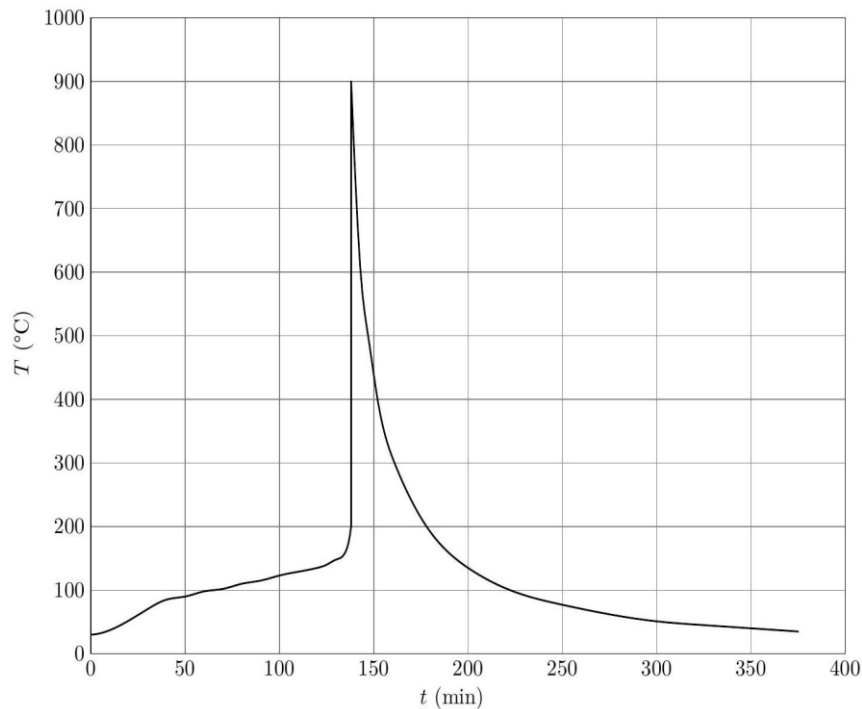


Figure 4 Profil de température d'une batterie chauffée dans un calorimètre, d'après Can-Yong Jhu et al, Journal of Hazardous Materials, 2011

On suppose notamment que

- la contribution des gaz enfermés dans l'enceinte est négligeable en termes de bilan thermique;

- l'énergie libérée lors de l'explosion correspond en bonne approximation à l'échange thermique isotherme à pression constante associé à la réaction (I.3) ;
- le dioxygène nécessaire à la réaction (I.3) est fourni en quantité juste suffisante par une décomposition interne de l'accumulateur.

**Q 5.** En utilisant la figure 4, estimer la quantité de matière d'acide pyruvique mise en jeu lors de l'explosion.

**Q 6.** Déterminer la quantité de matière d'acide pyruvique  $n_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3, \text{lim}}$  conduisant à la pression  $p_{\text{lim}} = 75 \text{ bar}$  dans le calorimètre.

**Q 7.** Sachant que le calorimètre utilisé peut résister à une pression de 75 bar, conclure quant à l'intérêt d'un des éléments constitutifs du calorimètre schématisé sur la figure 3.

## II. - Emballlement thermique

On suppose que la réaction de combustion de l'électrolyte (I.3) suit une loi de vitesse d'ordre 1 par rapport à l'acide pyruvique  $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$ . On considère que les réactifs sont introduits en proportions stœchiométriques dans un volume  $V$  constant. On note  $\alpha_{\text{diss}}(t)$  le taux d'avancement de la réaction comme rapport de la quantité de matière en acide pyruvique consommé par la quantité de matière initiale, notée  $n_0$ .

**Q 8.** Exprimer la loi de vitesse donnant la vitesse de disparition de l'acide pyruvique en fonction de  $\alpha_{\text{diss}}(t)$ ,  $n_0$ ,  $V$  et la constante de vitesse  $k$ .

**Q 9.** Rappeler la loi d'Arrhénius. Préciser l'influence de la température sur la vitesse de réaction.

**Q 10.** On considère une batterie de capacité thermique  $C$ , siège de la réaction (I.3) de combustion de l'électrolyte. On décompose la transformation adiabatique entre  $t$  et  $t + dt$  en une transformation chimique à température et pression constantes puis un échauffement isobare de la batterie. Exprimer la variation d'enthalpie lors de ces deux transformations infinitésimales. Montrer que l'évolution de température vérifie :

$$\frac{dT}{dt} = \beta(1 - \alpha_{\text{diss}}) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

où  $\beta$  est une constante positive à exprimer en fonction des constantes et données du problème.

**Q 11.** Au regard de l'équation différentielle ci-dessus, justifier le terme d'emballlement thermique lorsque l'avancement de la réaction est faible ( $\alpha_{\text{diss}} \ll 1$ ).

Le dispositif expérimental décrit figure 3 permet de relever la température en fonction du temps notamment pour  $\alpha_{\text{diss}}(t) \ll 1$ . La figure 5 donne une représentation de  $\ln \frac{dT}{dt}$  en fonction de  $\frac{1}{T}$ .

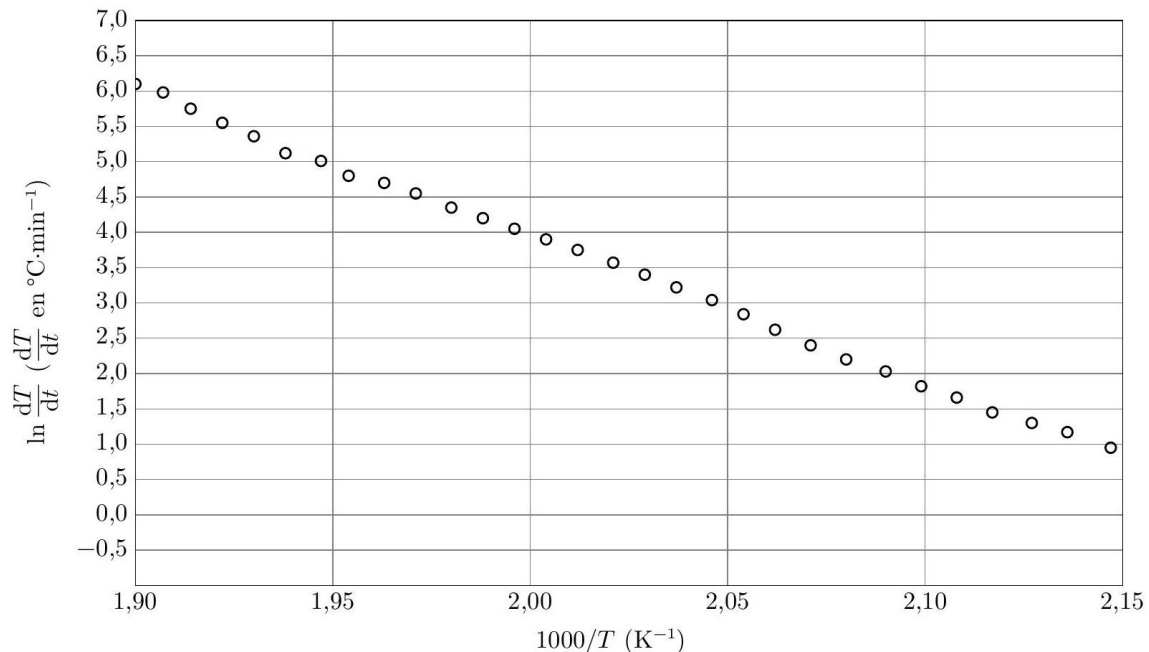


Figure 5 Tracé de  $\ln(dT/dt)$  en fonction de  $1000/T$  pour une batterie Li-ion déchargée pendant son explosion, d'après Can-Yong Jhu et al, Journal of Hazardous Materials, 2011

**Q 12.** En supposant que le modèle isobare reste valide, calculer l'énergie d'activation à l'aide de la courbe de la figure 5.

## Données

Valeurs relatives à l'accumulateur 18650

- Capacité spécifique  $Q = 2600 \text{ mA} \cdot \text{h}$
- Tension  $U = 3,7 \text{ V}$
- Masse  $m = 45,5 \text{ g}$
- Résistance interne  $r = 7,7 \text{ m}\Omega$
- Capacité thermique massique  $c_p = 0,73 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique  $\lambda = 0,40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- Enthalpies standard de formation à 298 K

|                                                      | $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_{3(l)}$ | $\text{CO}_{2(g)}$ | $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| $\Delta_f H^\circ (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ | -1165,30                              | -393,5             | -241,8                     |

- Constante universelle des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
- Masse volumique de l'air dans les conditions usuelles de température et de pression :  $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

## Problème n°3 : (sans calculatrice)

### Apport en glucose, besoin énergétique du cycliste

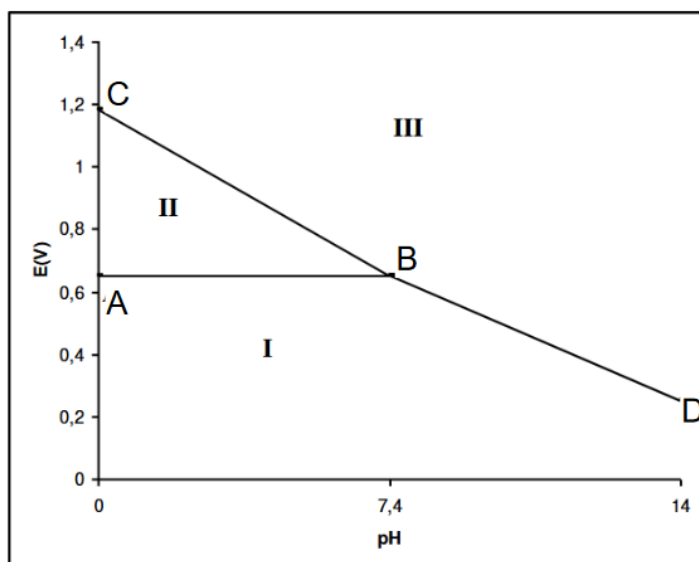
Les boissons dites isotoniques ont une composition particulière destinée à compléter les besoins des sportifs durant l'effort. Elles sont riches en sodium pour compenser les pertes par sudation et en glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{s})$ ). Contrairement au saccharose et au fructose, ce sucre est immédiatement utilisable par l'organisme et permet aux muscles de fonctionner.

#### Combustion et consommation du glucose

- Q1.** Écrire la réaction de combustion d'une mole de glucose  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{s})$  avec le dioxygène  $\text{O}_2(\text{g})$  qui libère du dioxyde de carbone  $\text{CO}_2(\text{g})$  et de l'eau  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ .  
Puis, déterminer la bonne valeur numérique de son enthalpie standard de réaction  $\Delta_r H^\circ$  parmi celles proposées :  $-2\,802 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $-594,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $594,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  $2\,802 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .
- Q2.** Un cycliste développe lors d'une sortie d'une durée d'environ  $\Delta t = 4$  heures une puissance moyenne  $P_{\text{méca}} = 180 \text{ W}$ . En considérant que son rendement musculaire  $\eta$  vaut 25 %, exprimer en fonction de  $\Delta_r H^\circ$ ,  $P_{\text{méca}}$ ,  $\Delta t$ ,  $\eta$  et de la masse molaire du glucose  $M_{\text{gluc}}$ , la masse de glucose  $m_{\text{gluc}}$  qu'il doit consommer pour ne pas puiser dans ses réserves.  
Puis, déterminer la bonne valeur numérique parmi celles proposées : 40 g ; 120 g ; 670 g.

### Dosage du glucose contenu dans une boisson isotonique

La **figure 2** correspond au diagramme E-pH de l'iode, tracé avec une concentration de chacune des espèces iodées de  $10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  sur les frontières. Les espèces prises en compte sont  $\text{I}_2$ ,  $\text{IO}_3^-$  et  $\text{I}^-$ .



**Figure 2** - Diagramme E-pH de l'iode

**Q3.** Déterminer le nombre d'oxydation de l'iode dans chacune de ces espèces, puis associer un domaine à chacune de ces espèces.

**Q4.** En prenant à  $T = 298 \text{ K}$ ,  $\frac{RT}{F} \ln(x) = 0,06 \log(x)$  en V, déterminer la pente du segment BD.

**Données**

Enthalpies standards de formation :

$$\Delta_f H^\circ(\text{CO}_2(\text{g})) = -393,5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_f H^\circ(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = -285,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_f H^\circ(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{s})) = -1\,274 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Potentiels standards à 298 K :

$$E^\circ_{\text{ESH}}(\text{S}_4\text{O}_6^{2-}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 0,09 \text{ V}$$

$$E^\circ_{\text{ESH}}(\text{I}_2(\text{aq})/\text{I}^-) = 0,68 \text{ V}$$

$$\text{Masses molaires : } M(\text{H}) = 1,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ; M(\text{C}) = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} ; M(\text{O}) = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$



CONCOURS CENTRALE • SUPÉLEC

Nom

[illegible]

Prénom

[illegible]

Épreuve : Physique-chimie 2 PSI

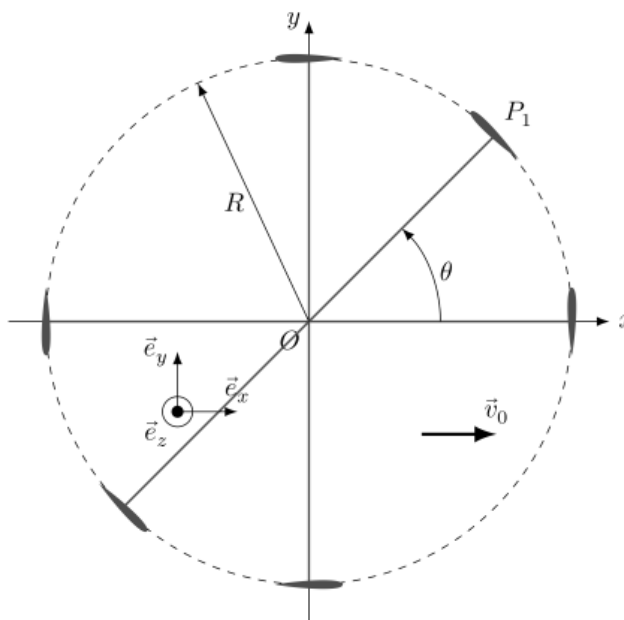
**Ne rien porter sur cette feuille avant d'avoir complètement rempli l'entête**

## Feville

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|--|--|

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|--|--|--|

### Question 4



**Figure A** Figure à compléter avec les vitesses  $\vec{v}_0$ ,  $\vec{u}$  et  $\vec{w}$