BACCALAURÉAT TECHNOLOGIQUE

SESSION 2018

Série STI2D
Toutes spécialités

Série STL
Spécialité sciences physiques et chimiques en laboratoire

PHYSIQUE – CHIMIE

DURÉE : 3 HEURES

COEFFICIENT : 4

L'USAGE DE TOUT MODÈLE DE CALCULATRICE, AVEC OU SANS MODE EXAMEN, EST AUTORISÉ.

Ce sujet comporte 12 pages numérotées de la page 1/12 à la page 12/12.

Avant de composer, assurez-vous que l'exemplaire qui vous a été remis est bien complet.

Les pages 10/12, 11/12 et 12/12 où figurent les documents réponses sont à numéroter et à rendre avec la copie, même non complétées.

Lors des applications numériques, les résultats seront donnés avec un nombre de chiffres significatifs cohérent avec ceux de l'énoncé et une attention particulière sera portée aux unités utilisées.

La clarté des raisonnements et la qualité de la rédaction interviendront dans l'appréciation des copies.

Les parties du sujet sont indépendantes et peuvent être traitées séparément dans l'ordre choisi par la candidate ou le candidat.

LE PROJET ÉOLIEN HYDROGÈNE D'UTSIRA (ÎLE DE NORVÈGE)

Les 230 habitants d'Utsira, actuellement alimentés en électricité par le continent via un câble sous-marin de 18 kilomètres, verraient d'un bon œil la possibilité de disposer d'un système énergétique autosuffisant.
Leur île est un endroit idéal pour y utiliser l'énergie éolienne : les vents y atteignent en moyenne 10 mètres par seconde.
Le vent étant cependant parfois trop fort ou trop faible pour la production d'électricité, il est essentiel de disposer d'un moyen adapté de stockage de l'électricité. Ce besoin sera couvert par l'exploitation du dihydrogène. Lorsque les conditions éoliennes sont bonnes, l'électricité en surplus sera utilisée pour produire du dihydrogène par électrolyse. Quand une énergie supplémentaire est requise, elle sera fournie par une pile à combustible à hydrogène et un moteur à combustion d'hydrogène.

Elisabet Fjermestad Hagen
Hydro Energy, Oslo (Norvège)
« Extrait de CLEFS CEA – N° 50/51 »

composant énergétique	industriel	caractéristiques
turbine éolienne	Enercon	2 x 600 kW
volant d'inertie		
alternateur synchrone principal	Enercon	100 kV.A
électrolyseur	Hydro	10 m³/h
unité de stockage d'hydrogène	Hydro	12 m³ sous 200 bars
pile à combustible	IRD	10 kW
générateur à hydrogène	Continental	55 kW

Tableau. Principales spécifications techniques du projet éolien-hydrogène d'Utsira (source : Hydro ASA)

PARTIE A – LES ÉOLIENNES

PARTIE B – LA PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE

PARTIE C – LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

PARTIE A – LES ÉOLIENNES

Caractéristiques d'une éolienne :

- constructeur : Enercon ;
- nom de l'aérogénérateur : E 40/600 ;
- puissance nominale : 600 kW ;
- diamètre du rotor : 40 m ;
- surface balayée : 1 257 m² ;
- nombre de pâles : 3.

A.1 Besoins en énergie électrique.

Dans un premier temps, nous allons étudier l'énergie électrique que nous pouvons récupérer par l'installation de deux éoliennes, différents paramètres pouvant influencer le fonctionnement de l'éolienne.

D'après le **document 1** de la **page 8** et les caractéristiques d'une éolienne ci-dessus, répondre aux questions ci-dessous.

A.1.1 D'après leurs caractéristiques, quelle est l'énergie maximale que peuvent fournir les deux éoliennes en un an (en kW.h) ?

A.1.2 Est-ce suffisant pour alimenter en énergie électrique l'île d'Utsira ? Justifier.

A.1.3 Est-il vraiment nécessaire d'avoir 2 éoliennes ? Justifier.

A.1.4 Compléter la chaine énergétique de l'éolienne sur le **document réponse A.1.4** de la **page 10** en indiquant les types d'énergie mis en jeu.

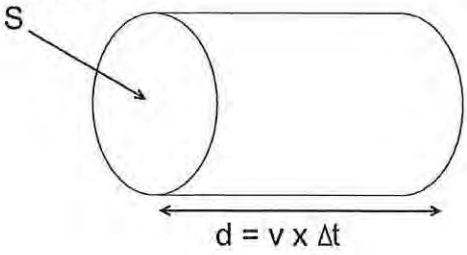
A.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne.

L'énergie produite par l'éolienne provient de l'énergie cinétique de l'air :

$$E_C = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

E_c : l'énergie cinétique de l'air (J)
v : la vitesse du vent ($m.s^{-1}$)
m : la masse de l'air balayant l'éolienne (kg)

S étant la surface de la section (m²) balayée par l'éolienne, on cherche à exprimer la masse d'air, **m**, passant au travers de la section, **S**, pendant une durée **Δt**.



A.2.1. Exprimer le volume d'air, V_{air}, contenu dans un cylindre (de section **S**, et de longueur **d = v × Δt**) en fonction de **S**, **v** et **Δt**.

A.2.2 Sachant que ρ est la masse volumique de l'air, en déduire l'expression de la masse d'air correspondante, **m**, en fonction de ρ, **S**, **v** et **Δt**.

A.2.3 En déduire que l'énergie cinétique de cette masse d'air, **m**, s'exprime selon :
$E_C = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^3 \times \Delta t$.

A.2.4 À partir de l'expression de l'énergie cinétique de la masse d'air, déduire celle de la puissance du vent, P_{vent}, reçue par l'éolienne.

A.2.5 Seule une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie mécanique de rotation du rotor de l'éolienne.

On donne la relation suivante : $P_{méca} = a_p \times P_{vent}$

$P_{méca}$: puissance mécanique au niveau du rotor
P_{vent} : puissance du vent
a_p : coefficient de puissance de l'éolienne

Donnée : masse volumique de l'air à 15 °C sous une pression atmosphérique standard : $\rho = 1{,}23\ kg.m^{-3}$.

Sachant que le coefficient de puissance est de 59 % (au maximum), calculer la puissance mécanique maximale récupérée pour un vent de 10 $m.s^{-1}$.

A.2.6 On s'intéresse maintenant au rendement de l'éolienne défini par $\eta = \frac{P_{élec}}{P_{vent}}$.

À l'aide de la caractéristique fournie par le constructeur (**document 2** de la **page 8**) compléter le **document réponse A.2.6** de la **page 11** :

- compléter le tableau en expliquant la méthode utilisée;
- tracer la courbe de variation du rendement en fonction de la vitesse du vent ;
- en déduire la vitesse du vent permettant d'avoir le meilleur rendement.

A.3 Énergie récupérable par les deux éoliennes de l'île d'Utsira.

Le vent n'est pas une source d'énergie constante. Selon le site où l'éolienne est implantée, elle permet de fournir plus ou moins d'énergie en fonction de la vitesse du vent.

On dispose de la vitesse moyenne du vent chaque mois sur l'île d'Utsira, en annexe, sur le **document 3 de la page 8** ainsi que de la courbe de puissance électrique récupérée en fonction de la vitesse du vent sur le **document 2 de la page 8.**

A.3.1 Compléter le tableau du **document réponse A.3.1** de la **page 11** en déterminant la puissance électrique fournie par une éolienne pour chaque mois.

A.3.2 En déduire l'énergie électrique récupérée, E_{rec} (en kW.h), par **les deux éoliennes** d'Utsira pendant une année (pour simplifier, on considérera que tous les mois ont une durée de 30 jours).

A.3.3 Comparer avec la valeur trouvée à la question **A.1.1** et conclure en utilisant la réponse à la question **A.1.2**.

PARTIE B – LA PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE

La consommation d'électricité ne correspond pas toujours à la production. Il est ainsi prévu, en cas de surproduction, de stocker l'énergie supplémentaire en produisant du dihydrogène par électrolyse.

B.1 Dans le cas d'Utsira, le dihydrogène est choisi principalement comme mode de stockage de l'énergie récupérée par électrolyse. Par ailleurs, il est possible de produire du dihydrogène par reformage. Préciser les avantages et inconvénients des deux modes de production de dihydrogène en vous appuyant sur le **document 4** de la **page 9**.

B.2 Électrolyseur.

En expliquant le fonctionnement de l'électrolyseur, nous allons évaluer la valeur de l'intensité du courant nécessaire pour produire 10 m^3 de dihydrogène en une heure.
Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes trempant dans un électrolyte ; un générateur de tension continue maintient une tension voisine de 2 V et permet de disposer d'une intensité de courant électrique de plusieurs kiloampères.

L'équation de fonctionnement de l'électrolyse s'écrit : $2\ H_2O_{(\ell)} \rightarrow 2\ H_{2(g)} + O_{2(g)}$

B.2.1 Rappeler la définition d'un oxydant et celle d'un réducteur.

B.2.2 Les couples d'oxydoréduction qui participent à l'électrolyse sont : $O_{2(g)}$ / $H_2O_{(\ell)}$ et $H^+_{(aq)}$ / $H_{2(g)}$.

B.2.2.a Écrire la demi-équation de la réaction de réduction correspondant à la formation du dihydrogène.

B.2.2.b La demi-équation associée au couple $O_{2(g)}$ / $H_2O_{(\ell)}$ est :

$O_{2(g)} + 4\ H^+_{(aq)} + 4\ e^- = 2\ H_2O_{(\ell)}$.

D'après les deux demi-équations, justifier l'écriture de l'équation de fonctionnement de l'électrolyse.

B.2.3 Compléter le schéma sur le **document réponse B.2.3 page 12** en indiquant :

- le sens du courant ;
- le sens de circulation des électrons ;
- l'électrode où se dégage O_2 ;
- l'électrode où se dégage H_2.

B.2.4 On veut déterminer l'intensité, **I**, du courant qui doit circuler dans l'électrolyseur pour assurer une production de dihydrogène de 10 $m^3.h^{-1}$, soit une quantité de dihydrogène formée de 417 mol par heure.

B.2.4.a D'après la demi-équation demandée à la question **B.2.2.a**, quel est le nombre de moles d'électrons, $\mathbf{n_e}$ (en mol), échangés pendant cette durée ?

B.2.4.b En déduire le nombre d'électrons, $\mathbf{N_e}$, correspondant.

<u>Donnée</u> : une mole d'électrons contient $6{,}02 \times 10^{23}$ électrons.

B.2.4.c Sachant que la charge transportée par un électron est notée $\mathbf{q_e}$, donner la relation entre le nombre d'électrons, $\mathbf{N_e}$, mis en jeu et la charge totale, **Q**, transportée.

B.2.4.d Connaissant la charge d'un électron $\mathbf{q_e = -1{,}6 \times 10^{-19}}$ **C**, quelle est l'intensité du courant, **I**, dans l'électrolyseur pour assurer une production de dihydrogène de 10 $m^3.h^{-1}$?

B.3 Stockage du dihydrogène.

L'électrolyseur fournit 10 m^3 de dihydrogène (à la pression de 1,0 bar) par heure.

B.3.1. Pour le gaz utilisé dans les conditions de réalisation, on sait que **p × V = constante**.
Ceci signifie que, pour deux états différents, on peut écrire : $\mathbf{p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2}$

Le gaz est stocké dans un volume de 12 m^3 et sous une pression de 200 bar. Quel est le volume, **V**, correspondant à la pression de 1,0 bar ?
On donne 1 bar = 10^5 Pa.

B.3.2. Combien de temps devra fonctionner l'électrolyseur pour remplir le réservoir de dihydrogène ?

B.3.3. Le volume d'une mole de gaz, appelé volume molaire $\mathbf{V_m}$, dépend des conditions de pression et de température.
Pour une pression de 1,0 bar et une température de 16 °C, le volume molaire d'un gaz, $\mathbf{V_m}$, est de 24 $L.mol^{-1}$.
À l'aide d'une analyse dimensionnelle, donner la relation entre **V**, $\mathbf{V_m}$ et **n** (**n** quantité de matière de dihydrogène contenu dans le réservoir).

B.3.4. En déduire la quantité de matière stockée, **n**, de dihydrogène.

B.3.5. Les deux pictogrammes ci-dessous apparaissent sur le réservoir de dihydrogène. Quelles sont leurs significations ? Quelle(s) conduite(s) doit-on adopter ?

PARTIE C – LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Quand l'énergie électrique demandée par les consommateurs est supérieure à celle produite par les éoliennes, elle peut être fournie par une pile à combustible à hydrogène ou par un groupe électrogène à combustion de dihydrogène.

C.1 Les piles à combustible à dihydrogène fonctionnent sur le principe inverse à celui de l'électrolyse selon l'équation: $2\,H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2\,H_2O_{(\ell)}$.
Cette transformation produit un courant qui circule à l'extérieur de la pile.

C.1.1 Compléter le schéma d'une cellule de pile à combustible sur le **document réponse C.1.1** de la **page 12** en précisant le lieu de l'oxydation et celui de la réduction. Faire également apparaitre le sens de déplacement des électrons et celui du courant.

C.1.2 On parle de pile à combustible, dans cette expression, quelle espèce joue le rôle de combustible ?

C.1.3 La pile à combustible produit-elle des produits polluants pour l'environnement ? Justifier.

C.1.4 On souhaite obtenir aux bornes de la pile, une tension d'une dizaine de volts. Comment doit-on associer les cellules élémentaires sachant que la tension aux bornes d'une cellule est d'environ 0,7 V ?

C.1.5 Pendant combien de temps peut-on faire fonctionner une cellule en fournissant un courant d'intensité **I = 200 A** lorsqu'on dispose de 417 moles de dihydrogène ?

Données :
$\mathbf{Q = n_e \times F}$; F, constante de Faraday : $\mathbf{F = 9{,}65 \times 10^4\ C.mol^{-1}}$; n_e, quantité de matière d'électrons (en mol).

C.2 Groupe électrogène.

Le groupe électrogène sert à produire de l'énergie électrique à partir de la combustion du dihydrogène selon l'équation suivante :

$$2\,H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2\,H_2O_{(\ell)}$$

Il possède un rendement η **= 30 %** et une puissance utile de 55 kW.

On cherche la quantité de dihydrogène nécessaire pour produire 55 kW pendant 2,0 h.

C.2.1 Quelle puissance est absorbée par le groupe électrogène pour produire 55 kW ?

C.2.2 En déduire l'énergie absorbée nécessaire par le groupe électrogène pendant 2,0 h. Exprimer le résultat en Joules (rappel : 1,0 W.h = 3 600 J).

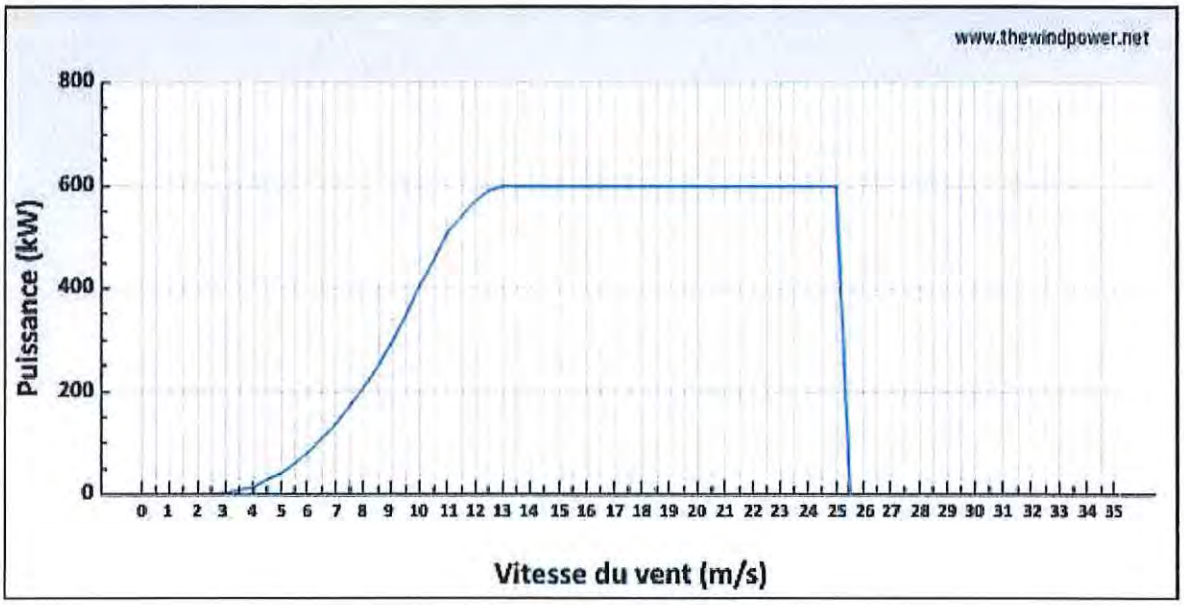
C.2.3 Sachant que le dihydrogène possède une enthalpie de combustion $\mathbf{\Delta H_c = -286\ kJ.mol^{-1}}$, quelle quantité de matière de dihydrogène sera alors nécessaire pour fournir cette énergie ?

Document 1

Le principal critère de conception du projet était la capacité du système à fonctionner de manière autonome, répondant à la fois à la demande en pointe et à la consommation en base, avec une qualité du courant comparable à celle de l'électricité actuellement fournie par la connexion par câble au continent. La consommation de l'île est d'environ 3 500 MW.h/an, la pointe de consommation en hiver étant de l'ordre de 900 kW [...]. La plus longue période de vent nul s'avère de l'ordre de deux jours. Les équipements ont été dimensionnés sur la base de turbines éoliennes standard et de simulations effectuées à partir d'un code de modélisation basé sur Hydrogems et Trnsys et utilisant un profil de charge mesuré.

Elisabet Fjermestad Hagen
Hydro Energy, Oslo (Norvège)
« Extrait de CLEFS CEA – N° 50/51 »

Document 2 : puissance électrique de l'éolienne en fonction du vent



Document 3 : vitesse moyenne du vent sur l'île d'Utsira (d'après le site Windfinder)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Vitesse moyenne du vent en $m.s^{-1}$	10	9	8	7	8	7	7	7	8	10	9	10

Document 4 : modes de production du dihydrogène

PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE À PARTIR DES ÉNERGIES FOSSILES

Aujourd'hui, 95 % du dihydrogène est produit à partir des combustibles fossiles par reformage : cette réaction chimique casse les molécules d'hydrocarbure sous l'action de la chaleur pour en libérer le dihydrogène. Le vaporeformage du gaz naturel est le procédé le plus courant : le gaz naturel est exposé à de la vapeur d'eau très chaude, et libère ainsi le dihydrogène qu'il contient. Mais la production de dihydrogène par reformage a l'inconvénient de rejeter du dioxyde de carbone (CO_2), principal gaz responsable de l'effet de serre dans l'atmosphère.

Pour éviter cela, sa production à partir de combustibles fossiles supposerait donc d'emprisonner le dioxyde de carbone par des techniques qui doivent faire l'objet de développements (on envisage, par exemple, de réinjecter le dioxyde de carbone dans les puits de pétrole épuisés).

L'hydrogène produit aujourd'hui par vaporeformage du méthane coûte environ 1,5 €/kg d'H_2 (prix de production en usine, sans compter la distribution). Le dihydrogène produit à partir du gaz naturel est le procédé le moins cher. Mais son prix de revient reste le triple de celui du gaz naturel.

PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE PAR DÉCOMPOSITION DE L'EAU

Une voie possible consiste à dissocier les atomes de dioxygène et de dihydrogène combinés dans les molécules d'eau (selon la réaction $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$). Cette solution est la plus intéressante en termes d'émission de gaz à effet de serre... à condition toutefois d'opérer cette dissociation à partir de sources d'énergie elles-mêmes non émettrices de CO_2.
Parmi les procédés envisageables, deux sont actuellement à l'étude : l'électrolyse et la dissociation de la molécule d'eau par cycles thermochimiques.

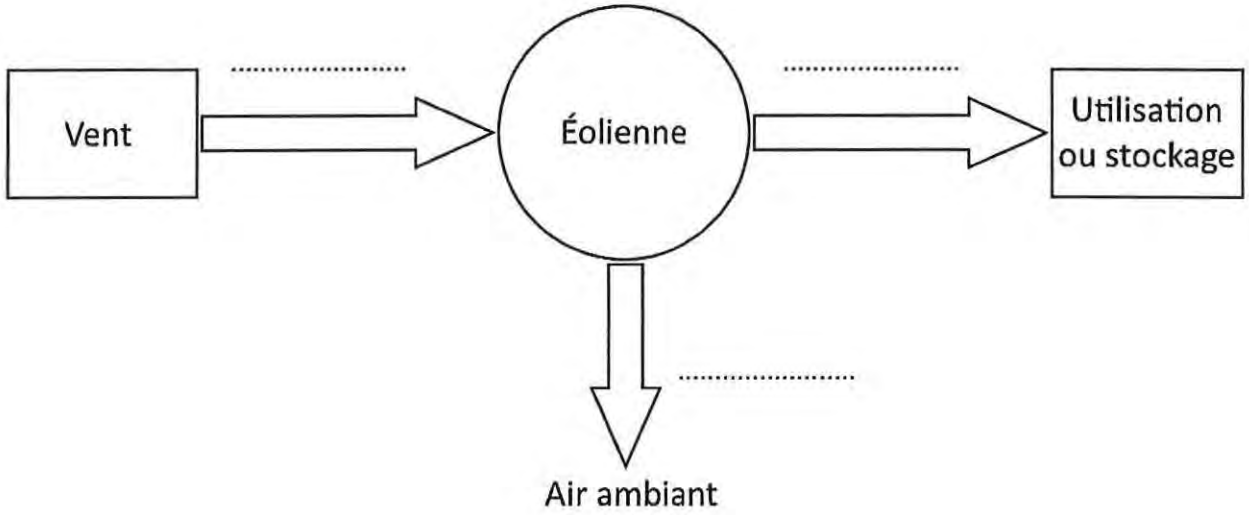
L'**électrolyse** permet de décomposer chimiquement l'eau en dioxygène et dihydrogène sous l'action d'un courant électrique. La production de dihydrogène par électrolyse peut se faire dans de petites unités réparties sur le territoire national. Pour être rentable, ce procédé exige de pouvoir disposer de courant électrique à très faible coût. Actuellement, la production de dihydrogène par électrolyse coûte 3 à 4 fois plus cher que la production par reformage du gaz naturel. Elle souffre de plus d'un mauvais rendement global. L'électrolyse à haute température, qui est une variante du procédé d'électrolyse disponible aujourd'hui, permettrait d'obtenir de meilleurs rendements. Le prix du dihydrogène produit par des électrolyseurs industriels peut fluctuer entre 5 et 30 €/kg d'H_2 suivant le prix de l'électricité.

http://portail.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/hydrogene.aspx?Type=Chapitre&numero=3

Annexe à numéroter et à remettre avec la copie à la fin de l'épreuve même non complétée

(placer à l'intérieur de la copie pour agrafage)

Document réponse A.1.4 :



N° de la copie

.../ ...

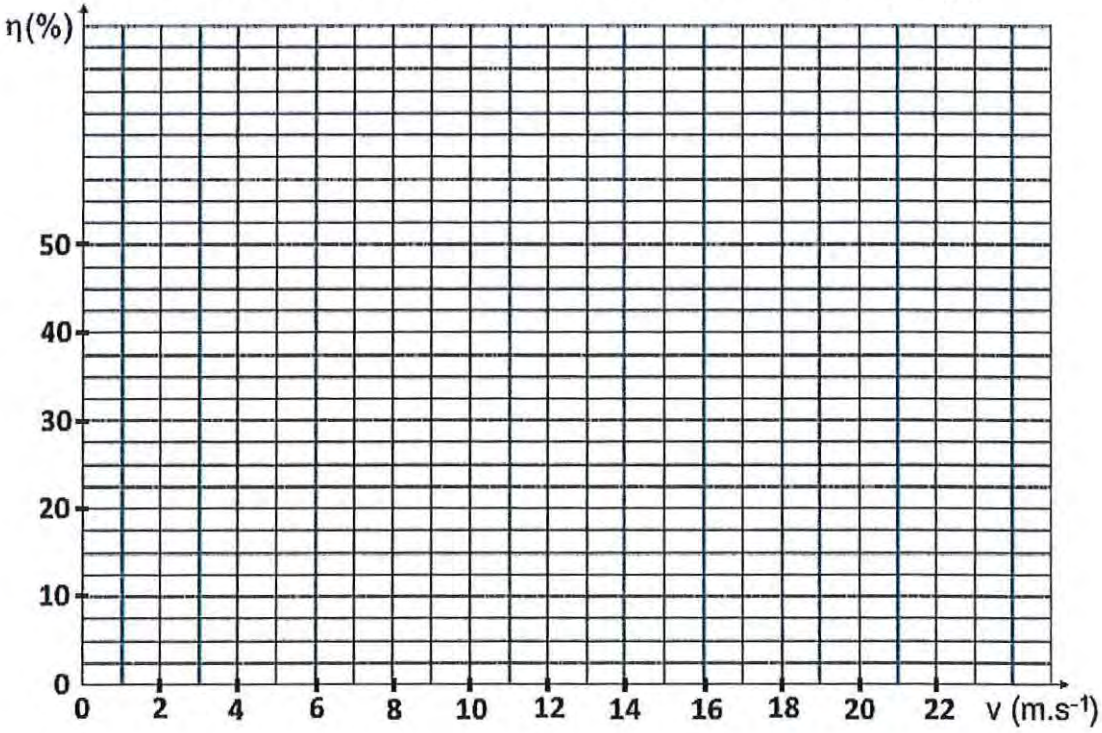
Annexe à numéroter et à remettre avec la copie à la fin de l'épreuve même non complétée

(placer à l'intérieur de la copie pour agrafage)

Document réponse A.2.6 :

Vitesse du vent v en $m.s^{-1}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Puissance du vent en kW	6	49	166	394	770	1330	2110	3150	4190	6160
Puissance électrique en kW	0	20	75			550	600	600	600	600
Rendement (%)	0	41	45			41	28	19	14	10

Courbe du rendement en fonction de la vitesse du vent : $\eta = f(v)$.



Document réponse A.3.1 : vitesse moyenne du vent sur l'île d'Utsira (d'après le site Windfinder)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Vitesse moyenne du vent en $m.s^{-1}$	10	9	8	7	8	7	7	7	8	10	9	10
Puissance électrique en kW												

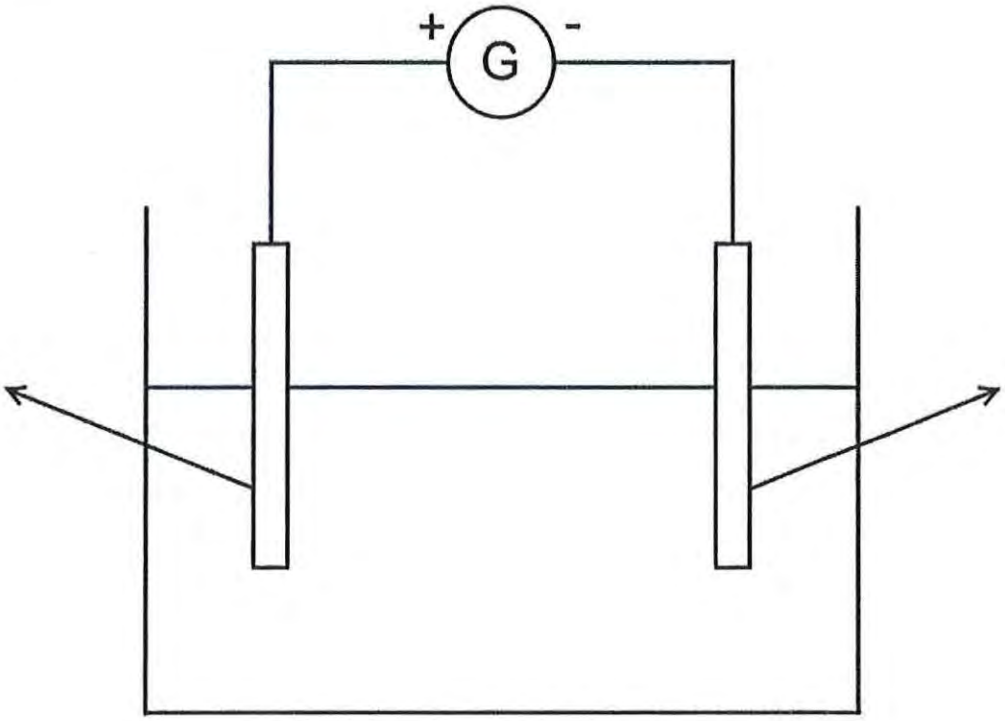
N° de la copie

.../...

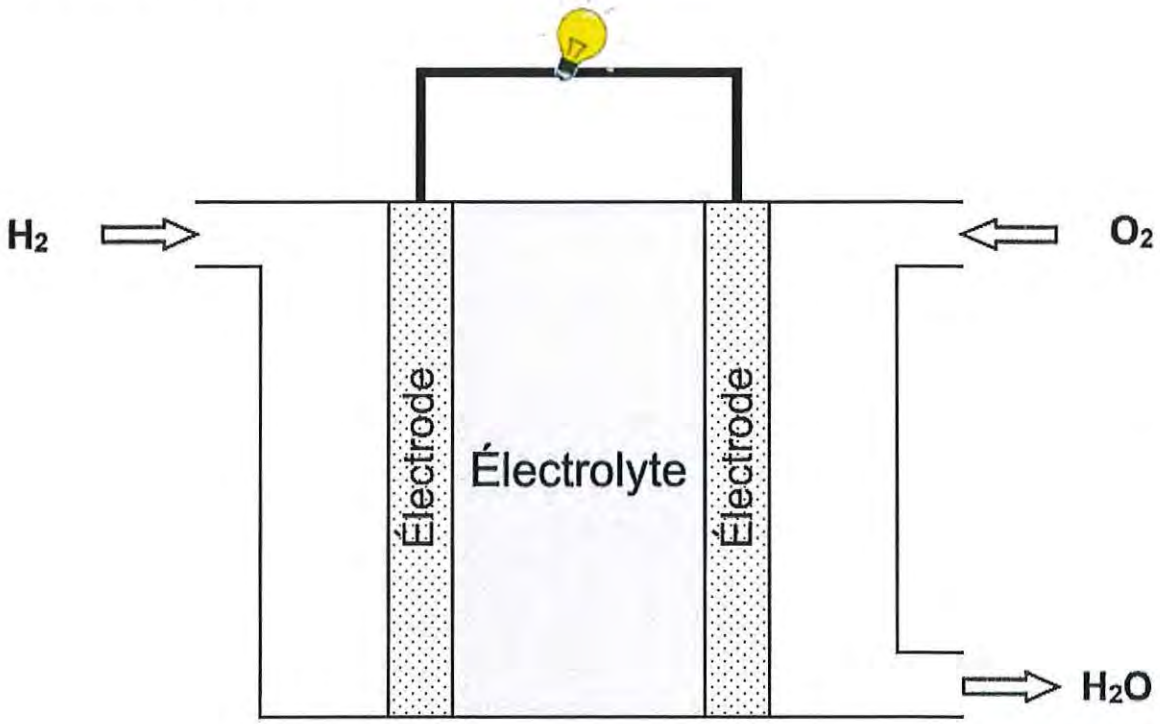
Annexe à numéroter et à remettre avec la copie à la fin de l'épreuve même non complétée

(placer à l'intérieur de la copie pour agrafage)

Document réponse B.2.3 :



Document réponse C.1.1 :



N° de la copie

.../...