

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Génie Électrique et Systèmes de Commande

Sources d'énergie nouvelles et renouvelables

Médian ER54

Prénom, Nom : _____

Numéro INE: _____

B. Blunier, Printemps 2010

Détails

Question de cours _____ / 10 points

Puissance et énergie _____ / 9 points

Pile à combustible _____ / 15 points

Total: _____ / 34 points

Instructions. Aucun document, pas de calculatrice pour la première partie (questions de cours). Une feuille A4 recto/verso manuscrite et calculatrice autorisées pour la deuxième partie.

1 Questions de cours

- (1^{pts}) 1. Donnez la relation mathématique entre la puissance et l'énergie (-2 pt si faux ou non répondu).

1 pts
- (1^{pts}) 2. Donnez une définition de l'empreinte écologique.

1 pts
- (1^{pts}) 3. Donnez les trois principales sources d'énergie primaires utilisées pour la production d'électricité dans le monde.

1 pts
- (1^{pts}) 4. Donnez l'équation de la réaction globale d'une pile à combustible.

1 pts
- (1^{pts}) 5. Quelle est le rendement d'un d'un cœur de pile à combustible à membrane échangeuse de protons?

1 pts

(1^{pts}) 6. Quel est approximativement le temps de doublement d'une ressource qui croît de 35% ?

1 pts

(3^{pts}) 7. Quels sont, selon vous, les problèmes inhérents à une économie tout hydrogène ?

3 pts

(1^{pts}) 8. *Vrai* ou *Faux*. Pas de justification demandée.

(a) _____ L'hydrogène est une source d'énergie au même titre que le pétrole ou le charbon.

(b) _____ Le rendement d'un système pile à combustible est supérieur au rendement d'une batterie.

1 pts

5 pts

2 Puissance et énergie

Décollage de Saturn V

- (6^{pts}) 1. L'énergie nécessaire pour faire décoller une fusée de la surface terrestre, en particulier à la verticale, est énorme, comme on peut l'imaginer. Pour cette raison, la masse de carburant (appelé ergol) à embarquer dans les différents étages de la fusée est très supérieure à la masse du satellite à mettre en orbite, dont le poids peut parfois ne pas excéder quelques centaines de kilos. Nous prendrons ici le cas de Saturn V, le lanceur de la mission Appolo XI de 1969, qui avait permis aux premiers hommes de marcher sur la Lune. Le tableau ci-dessous donne quelques caractéristiques des 3 étages du lanceur.

6 pts

Donnée	Etage I	Etage II	Etage III
Nom	S-IC	S-II	S-IVB
Moteurs	5 Rocketdyne F-1	5 Rocketdyne J-2	1 Rocketdyne J-2
Poussée (MN)	34	4.4	1.0
Impulsion spécifique (s)	263	421	421
Durée de fonctionnement (s)	150	360	165 + 335
Type de carburant	RP-1/LOX	LH2/LOX	LH2/LOX
Masse à vide (t)	131	36	15
Masse au décollage (t)	2286	481	120

Données sur les 3 étages de Saturn V

On rappelle que lors du décollage, le premier étage est mis en fonctionnement jusqu'à ce que celui-ci soit vide, c'est-à-dire que tout son carburant a été consommé. Le premier étage est ensuite largué par la fusée, puis c'est le second étage qui entre en fonctionnement jusqu'à ce qu'il soit lui-même vide. Il est lui aussi largué par la fusée qui utilisera ensuite le troisième et dernier étage pour se déplacer dans l'espace. Les trois étages sont donc remplis uniquement de carburant et ne servent qu'à propulser la fusée.

La variation de la masse de carburant embarquée est liée à la variation de vitesse de la fusée par l'équation 1, dite de Tsiolkovski, donnée ci-dessous et dont les membres sont décrits dans le tableau ci-dessous. Cette équation est donnée en prenant l'hypothèse que l'astronef n'est soumis qu'à la poussée fournie par ses moteurs et donc qu'aucune autre action extérieure n'est prise en compte. La vitesse d'éjection des gaz est également considérée comme constante.

$$\Delta v = v_e \ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right) - g T \quad (1)$$

La vitesse d'éjection des gaz v_e est liée à l'impulsion spécifique I_{sp} du carburant et à la constante de gravité g par la relation :

$$v_e = I_{sp} g \quad (2)$$

Variable	Description
Δv	Variation de vitesse entre le début et la fin de la phase propulsée (m/s)
v_e	Vitesse d'éjection des gaz (m/s)
m_0	Masse totale de l'astronef au début de la phase propulsée
m_1	Masse totale de l'astronef à l'issue de la phase propulsée
g	Constante gravitationnelle (m/s ²)
T	Durée de fonctionnement des moteurs

Description des membres de l'équation de Tsiolkovski

- (a) (2 pts) Sachant que la fusée atteint une vitesse de 8600 km/h à l'extinction du premier étage, calculer la masse de carburant à embarquer dans le premier étage pour atteindre cette vitesse. Comparer la valeur obtenue avec la masse réelle. A quoi peut être due cette différence? On n'oubliera pas de prendre en compte dans les calculs la masse de la charge utile de la fusée, d'un poids total de 118 tonnes.

- (b) (1 pts) Calculer l'accélération maximale de la fusée au cours de l'allumage du premier étage. On utilisera pour cela le principe fondamental de la dynamique (équation 3), en supposant que la fusée n'est soumise qu'à sa poussée. En déduire le "nombre de g " subis par l'équipage. Sachant que celui-ci peut difficilement supporter plus de $4g$, expliquer l'intérêt de couper un des 5 moteurs du premier étage avant les autres.

$$\sum \vec{F} = m_{\text{fusée}} \vec{\gamma} \quad (3)$$

- (c) (1 pts) En supposant que la totalité de l'énergie servant à propulser la fusée est produite par la combustion de la masse de carburant, donner l'expression littérale de l'énergie produite pour la propulsion à un instant t après le décollage, en fonction de la masse de la fusée à l'instant t , $m(t)$, de la masse au début de la phase de combustion m_0 et de la vitesse d'éjection v_e . En déduire l'énergie totale consommée jusqu'à l'extinction du deuxième étage. Aide : L'expression a la forme d'une énergie cinétique.

(d) (1 pts) Donner l'expression littérale de la puissance du premier étage de la fusée. En déduire la valeur de la puissance de la fusée. On utilisera le débit de carburant moyen constaté pendant l'allumage du premier étage.

(e) (1 pts) Proposer une définition de l'impulsion spécifique I_{sp} .

- (f) (0 pts) **Bonus 3 pt** : Démontrer l'expression de l'équation de Tsiolkovski à partir du principe fondamental de la dynamique (équation 3) et de l'expression de la poussée F (équation 4), pour une fusée à un étage, en négligeant l'influence de l'attraction terrestre (donc $g = 0$). On considérera que le débit massique de carburant q , c'est-à-dire la variation de la masse de la fusée, est constant.

$$F = \frac{dm_{\text{ergol}}}{dt} v_e \quad (4)$$

Production et stockage d'énergie

(3^{pts}) **2.** Soit une quantité d'énergie $E = 1,097 \times 10^{13}$ J.

(a) (1 pts) Combien de temps aurait-on eu besoin de faire fonctionner une centrale nucléaire de 1,3 GW pour produire la même quantité d'énergie?

3 pts

(b) (1 pts) Même question pour une surface de 1 km^2 de panneaux photovoltaïques d'une puissance crête de $100 \text{ W}_e/\text{m}^2$. On prendra un ensoleillement maximal sur 12h et nul le reste du temps.

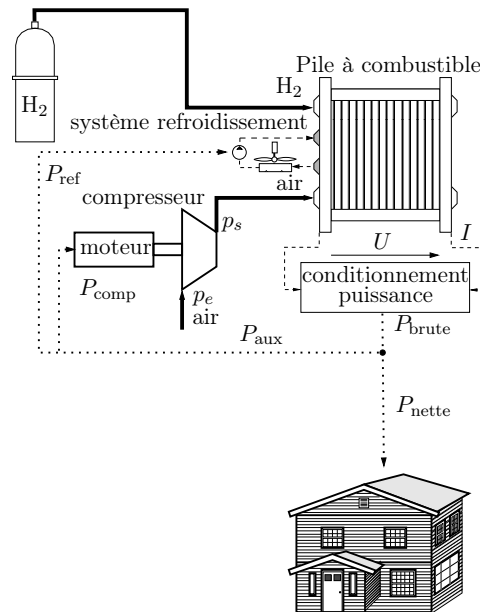
(c) (1 pts) Si l'on voulait pouvoir stocker cette énergie dans une batterie 12 V, quelle serait sa capacité en Wh? Quel serait le courant maximal demandé par une hypothétique fusée électrique à batterie de 47 GW?

3 Pile à combustible

Pile à combustible résidentielle

- (9pts) 1. Une pile à combustible PEFC alimente un petit immeuble résidentiel en électricité (figure ci-dessous). Elle est alimentée par un réservoir d'hydrogène pur sous pression (350 atm) et par un compresseur à air ayant un rapport de compression constant égal à 2 (rapport entre les pressions de sortie et d'entrée).

9 pts



Caractéristiques de la pile à combustible :

- Puissance électrique brute : $P_{\text{brute}} = 5 \text{ kW}$;
- Nombre de cellules : $n_c = 40$.

Le débit molaire (en moles par seconde) de dihydrogène en fonction du courant de la pile est donné par la formule suivante :

$$\dot{n}_{\text{H}_2}(I) = \frac{I}{2F} n_c.$$

Le débit massique d'air (en kilogrammes par seconde) alimentant la pile est donné par la formule suivante :

$$q_{\text{air}} = \nu \frac{I}{4F} n_c \frac{1}{\chi_{\text{O}_2}} \bar{M}_{\text{air}}$$

- où,
- ν est le rapport à la stœchiométrie du débit d'air, $\nu = 2$
 - n_c est le nombre de cellules qui composent la pile, $n_c = 40$
 - χ_{O_2} est la fraction molaire de dioxygène contenue dans l'air, $\chi_{\text{O}_2} = 0,21$
 - I est le courant de la pile [A]
 - F est la constante de Faraday, $F = 96\,485 \text{ [C/mol]}$
 - \bar{M}_{air} est la masse molaire de l'air, $\bar{M}_{\text{air}} = 28,85 \times 10^{-3} \text{ [kg/mol]}$

On considérera que cette pile n'utilise que 4 points de fonctionnement correspondant à 4 puissances de fonctionnement différentes :

	Puissance brute délivrée (W)	Taux de travail
P_1	500	20 %
P_2	2 000	30 %
P_3	3 000	40 %
P_4	4 500	10 %

Les pertes parasites au niveau du système seront assimilées :

- au circuit de refroidissement (pompe + ventilateur) ; la puissance de ces appareils sera considérée comme constante et égale à $P_{ref} = 40 \text{ W}$;
- au compresseur à air ; la puissance du compresseur dépend du débit massique d'air fourni à la pile. La puissance de compression est donnée par la formule suivante :

$$P_{comp} = \frac{q_{air} T_e c_p}{\eta_c} \left(\left(\frac{p_s}{p_e} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

- où, η_c est le rendement du compresseur : $\eta_c = 70 \%$
 γ coefficient isentropique de l'air : $\gamma = 1,4$
 q_{air} est le débit massique d'air [kg/s]
 p_e est la pression d'entrée du compresseur, $p_e = 1$ [atm]
 p_s est la pression de sortie du compresseur $p_s = 2$ [atm]
 c_p est la capacité thermique de l'air $c_p = 1004$ [J/kg·K]
 T_e est la température d'entrée de l'air $T_e = 298,15$ [K]

- (a) (1 pts) À partir des figures de la puissance brute et de la tension données page 12, déterminer pour chaque point de fonctionnement, le courant et la tension de la pile (remplir le tableau ci-dessous).

	P_{brute} (W)	Courant de la pile (A)	Tension de la pile (V)
P_1	500		
P_2	2000		
P_3	3000		
P_4	4500		

- (b) (1 pts) Pour chaque point de fonctionnement, déterminer (remplir le tableau ci-dessous),
- le débit massique d'air utile,
 - la puissance du compresseur.

	P_{brute} (W)	Débit massique d'air (kg/s)	Puissance du compresseur (W)
P_1	500		
P_2	2000		
P_3	3000		
P_4	4500		

- (c) (2 pts) Pour chaque point de fonctionnement, déterminer,
- la puissance totale consommée par les auxiliaires (compléter le tableau ci-dessous),
 - la puissance nette de la pile (compléter le tableau ci-dessous) ; reporter la puissance nette sur la figure de la puissance brute ci-dessous,
 - le rendement système (compléter le tableau ci-dessous).
- Que pouvez-vous en conclure ?

	P_{brute} (W)	Puissance des auxiliaires (W)	Puissance nette (W)	Rendement système
P_1	500			
P_2	2 000			
P_3	3 000			
P_4	4 500			

- (d) (2 pts) On suppose que la pile fonctionne 24 heures. Déterminer,
- l'énergie totale fournie par la pile,
 - la quantité de dihydrogène consommée (en moles).

- (e) (3 pts)

- Déterminer le volume en mètres-cube (à pression atmosphérique) de dihydrogène pour un fonctionnement de 1 an. On rappelle la formule des gaz parfaits :

$$p \cdot V = n R T$$

où, p est la pression [Pa] (1 atm=101 325,024 Pa)

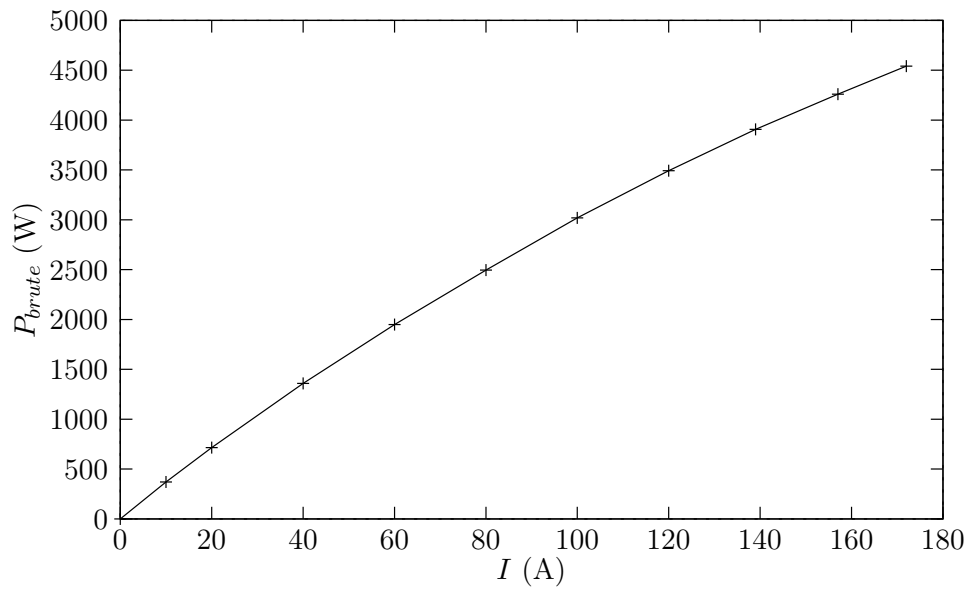
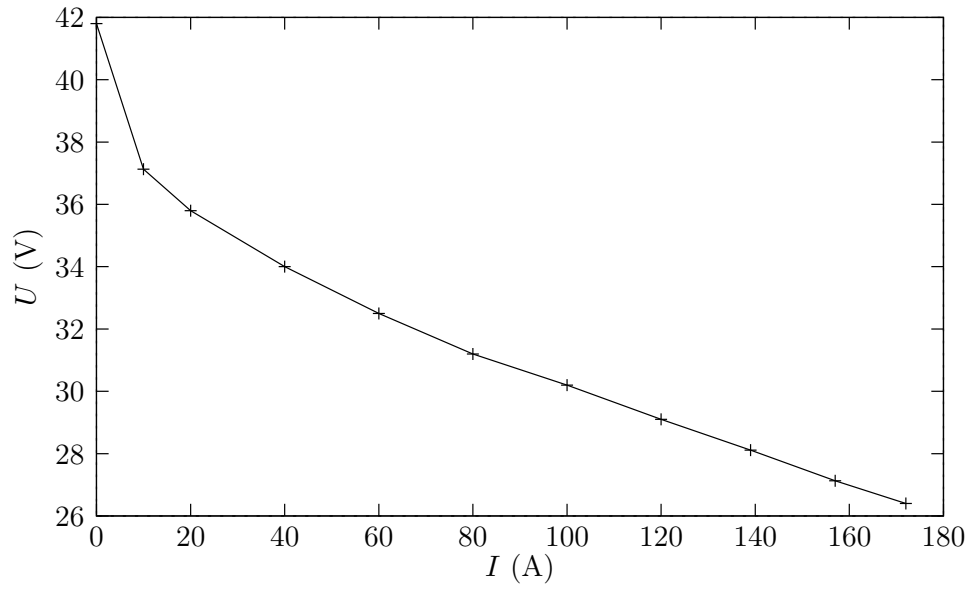
n le nombre de moles

V le volume du gaz [m^3]

R la constante des gaz parfaits $R = 8,314$ [J/mol·K]

T la température $T = 298,15$ [K]

- calculer le volume du gaz sachant que le dihydrogène (considéré comme un gaz parfait) est stocké sous une pression de 350 atm.
- Conclure.



Pression optimale d'un compresseur

- (6^{pts}) 2. On souhaite alimenter une pile à combustible avec un compresseur à air. Quand la pression des gaz augmente, la tension de la pile augmente. Le gain en tension, en élevant la pression de p_1 à p_2 est donné par l'équation suivante (formule semi-empirique)

6 pts

$$V_{\text{gain}} = \mathcal{C} \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (5)$$

où \mathcal{C} est une constante qui est généralement déterminée empiriquement ; elle est exprimée en volts.

Cependant, cette augmentation de pression a un coût énergétique puisque le compresseur consomme une partie de cette puissance ce qui a pour conséquence une chute de tension sur la pile.

Il est évidemment préférable que le gain en tension réalisé sur la pile soit supérieur à la chute engendrée par le compresseur de telle sorte que le gain du *système* pile-compresseur soit positif.

La chute de tension sur la pile provoquée par le compresseur en élevant la pression de p_1 à p_2 est donnée par l'équation suivante

$$V_{\text{perte}} = \frac{1}{I n_c} \frac{q_{\text{air}} T_e c_p}{\eta_c \eta_m} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (6)$$

où,	η_c	rendement du compresseur	
	η_m	rendement du moteur électrique d'entraînement	
	γ	coefficient isentropique de l'air	
	p_1	pression atmosphérique	[atm]
	p_2	pression de sortie du compresseur	[atm]
	c_p	capacité thermique de l'air	[J/kg·K]
	T_e	température d'entrée de l'air	[K]
	q_{air}	débit massique d'air	[kg/s]
	I	courant délivré par la pile	[A]
	n_c	nombre de cellules qui composent la pile	

Le débit q_{air} est donné par la formule suivante :

$$q_{\text{air}} = \nu \frac{I}{4F} n_c \frac{1}{\chi_{O_2}} \bar{M}_{\text{air}} \quad (7)$$

où,	ν	rapport à la stœchiométrie du débit de l'air	
	n_c	nombre de cellules qui composent la pile	
	χ_{O_2}	fraction molaire de dioxygène contenue dans l'air	
	I	courant de la pile	[A]
	F	constante de Faraday	[C/mol]
	\bar{M}_{air}	masse molaire de l'air	[kg/mol]

(a) (1 pts) Exprimer, de façon littérale, le gain en tension du système pile-compresseur.

(b) (3 pts) Donner l'expression littérale du rapport de compression optimal $r_{p,\text{opt}} = p_1/p_2$ permettant d'obtenir le maximum du gain en tension.

(c) (2 pts) On donne les valeurs numériques suivantes :

$$\eta_c = 0,75$$

$$\eta_m = 0,95$$

$$\gamma = 1,4$$

$$c_p = 1004 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$T_e = 288 \text{ K}$$

$$\chi_{O_2} = 0,21$$

$$F = 96485 \text{ C/mol}$$

$$\bar{M}_{\text{air}} = 28,85 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$\mathcal{C} = 0,1 \text{ V}$$

Tracer pour différentes valeurs de ν ($\nu = 1,5$, $\nu = 2$ et $\nu = 3$) le gain en tension du système en fonction du rapport de compression ($1 \leq r_p \leq 5$). Vérifier le résultat de la question précédente graphiquement et numériquement et donner les valeurs maximales de ces gains en tension. Conclure.