

Éléments de correction de l'épreuve de conception préliminaire d'un système, d'un procédé ou d'une organisation

PARTIE A

Question Q.1.

Dans une structure non hybridée, la source doit assurer, à chaque instant, tous les besoins en puissance des charges. Cela implique donc un dimensionnement de la source au moins supérieur à la puissance maximale consommée. Pour les deux profils, cette dernière est de 580 kW environ. Le groupe Diesel de 610 kW est donc adéquat.

Question Q.2.

L'énergie consommée correspond à l'intégrale de la puissance instantanée : $E_x(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p_x(t) dt$.

Par conséquent, l'énergie est égale à l'aire sous la courbe de la puissance instantanée. Cela donne :

$$E_3(0;1000 \text{ s}) = 330 \text{ kW} \cdot (610 \text{ s} - 50 \text{ s}) + \frac{1}{2}(280 \text{ s} - 50 \text{ s}) \cdot (520 \text{ kW} - 330 \text{ kW}) = 206,65 \text{ MJ}$$

La puissance moyenne est égale à l'énergie consommée divisée par la durée du profil (1000 s), soit 206,65 kW.

	Energie consommée	Puissance moyenne	Puissance maximale	PHP
Desserte locale (profil 1)	555,35 MJ	185,12 kW	557,52 kW	0,668
Triage (profil 2)	117 MJ	73,14 kW	477 kW	0,847
Mission simplifiée (profil 3)	206,65 MJ	206,65 kW	520 kW	0,60

Question Q.3.

En mode hybridée, le groupe Diesel ne fournit que la valeur moyenne de la puissance du profil. Il est dimensionné sur la valeur la plus grande des profils considérés. Pour les profils 1 et 2, la puissance minimale du groupe Diesel en mode hybridé est de 185,12 kW.

Question Q.4.

Le tableau suivant regroupe les résultats.

Puissance (pourcentage de 215 kW)	20 %	40 %	50 %	60 %	80 %	90 %	100 %
Puissance (kW)	43	86	107,5	129	172	193,5	215
Consommation spécifique (g/kW·h)	240	203	199	196	194	194	195

Question Q.5.

Le tableau suivant regroupe les résultats, sachant que la troisième ligne du tableau est la même que celle du tableau précédent (les consommations spécifiques sont les mêmes pour les deux groupes Diesel pour le même niveau de puissance exprimé en pourcentage de la puissance nominale).

Puissance (pourcentage de 610 kW)	20 %	40 %	50 %	60 %	80 %	90 %	100 %
Puissance (kW)	122	244	305	366	488	549	610
Consommation spécifique (g/kW·h)	240	203	199	196	194	194	195

Question Q.6.

En mode non hybridé, le groupe Diesel de 610 kW est utilisé. Pour chaque tranche de puissance, la puissance est multipliée par la durée d'occurrence et par la consommation spécifique. La somme de tous ces résultats donne alors la consommation totale en grammes. Cette dernière est ensuite divisée par la masse volumique du gazole afin d'obtenir le résultat.

Pour exemple, voici le calcul pour la desserte locale (profil 1)

$$cons = \left(\frac{122 \cdot 240 \cdot 1689}{3600} + \frac{244 \cdot 203 \cdot 65}{3600} + \frac{305 \cdot 199 \cdot 204}{3600} + \frac{366 \cdot 196 \cdot 269}{3600} + \frac{488 \cdot 194 \cdot 680}{3600} + \frac{549 \cdot 194 \cdot 93}{3600} \right) \cdot \frac{1}{850} = 51,8 \text{ L.}$$

En mode hybridé, le moteur Diesel de 215 kW est utilisé. Son point de fonctionnement est fixe durant toute la durée du profil et ce point de fonctionnement correspond à la puissance moyenne du profil considéré.

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant.

	Diesel de 610 kW	Diesel de 215 kW	Gain de consommation (en %)
Desserte locale (profil 1)	51,8 L	35,2 L	32 %
Triage (profil 2)	16,3 L	8,18 L	49,8 %

Question Q.7.

Le gain de consommation est calculé selon la relation suivante :

$$\frac{Conso_Diesel610 - Conso_Diesel215}{Conso_Diesel610}$$

Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessus.

Selon la question Q.1, le PHP est plus important dans la mission de triage (profil 2), ce qui correspond également au gain de consommation le plus important. Par conséquent, le potentiel d'hybridation est un bon indicateur sur le gain de consommation du groupe Diesel, ce dernier pouvant atteindre un facteur de 50 %.

Question Q.8.

Le plan de Ragone classe les éléments de stockage en fonction de leurs capacités en puissance et énergie massiques. Par exemple, un condensateur admet des pics de puissance importants mais pendant une durée plus courte par rapport à une batterie d'accumulateurs. Le plan de Ragone est donc utile dans le choix des éléments de stockage en vue de l'hybridation, car il permet de sélectionner ceux qui correspondent le mieux aux besoins de la locomotive.

Question Q.9.

Deux éléments de stockage aux caractéristiques complémentaires sont associés au groupe Diesel : accumulateurs NiCd pour les besoins énergétiques et supercondensateurs pour les pics de puissance.

La puissance consommée par les charges est décomposée en fonction de la fréquence : le groupe Diesel fournit la puissance moyenne, les accumulateurs NiCd, les basses fréquences et les supercondensateurs, les hautes fréquences du profil de mission.

Question Q.10.

Nous avons trois sources connectées en parallèle. Par conséquent, une pilotera la tension et les deux autres seront pilotées en courant. Classiquement, l'élément à la plus grande dynamique contrôle la tension, soit le groupe de supercondensateurs. En effet, cela limite l'ondulation de tension du bus.

PARTIE B**Question Q.11.**

Pour la mission de desserte locale (profil 1), les valeurs sont $|P_{SC}|_{max} = 386,6 \text{ kW}$ et $E_{uSC} = 4,55 \text{ kW}\cdot\text{h}$. La fréquence caractéristique s'obtient selon

$$f_{p,SC} = \frac{|P_{SC}|_{max}}{E_{uSC}} = \frac{386,6 \cdot 10^3 \text{ W}}{4,55 \cdot 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s}} = 23,6 \text{ mHz}.$$

L'ensemble des résultats est donné dans le tableau suivant :

	$ P_{SC} _{max}$ (kW)	E_{uSC} (kW·h)	$f_{p,SC}$ (Hz)
Desserte locale (profil 1)	386,8 kW	4,55 kW·h	23,6 mHz
Triage (profil 2)	281 kW	3,15 kW·h	24,8 mHz

Question Q.12.

L'énergie stockée dans un condensateur de capacité C est liée à la tension à ses bornes V selon

$$E = \frac{1}{2} C \cdot V^2.$$

Par conséquent, lorsque la tension aux bornes du condensateur est divisée par deux, l'énergie stockée est divisée par quatre. La variation d'énergie stockée est donc de 75 %, soit 750 J d'énergie utilisable pour 1 kJ d'énergie stockée.

La mission nécessitant le plus d'énergie stockée est celle de desserte locale (profil 1) avec 4,55 kW·h, soit une énergie stockée minimale de $4,55 \text{ kW}\cdot\text{h} / 0,75 = 6,07 \text{ kW}\cdot\text{h}$.

Par conséquent, pour remplir les deux missions, il faut au moins $6,07 \text{ kW}\cdot\text{h} = 21,84 \text{ MJ}$ d'énergie stockée.

Question Q.13.

D'après le dossier ressources, chaque supercondensateur peut stocker une énergie de 15 625 J. En se basant sur l'énergie stockée minimale calculée à la question Q.12, il faut donc un minimum de 1 398 supercondensateurs.

Question Q.14.

La tension nominale d'un supercondensateur est de 2,5 V. Afin de tenir une tension de 500 V, il faut connecter $n_{s,SC} = 500 / 2,5 = 200$ éléments en série. Avec un total de 1 600 éléments, cela donne $n_{p,SC} = 1\ 600 / n_{s,SC} = 8$ blocs connectés en parallèle.

Question Q.15.

La résistance R_p représentant l'autodécharge peut être négligée dans cette étude car elle représente une décharge lente du supercondensateur avec une constante de temps de plusieurs dizaines d'heures, durée plus grande que celle des profils de mission étudiés (inférieure à une heure). D'après le dossier ressources, chaque supercondensateur a une capacité $C_R = 5\ 000$ F et une résistance série à basse fréquence (la fréquence caractéristique d'usage des supercondensateurs est de l'ordre de 20 mHz) $ESR_{DC} = 350\ \mu\Omega$. Pour le groupement de supercondensateurs, on obtient

$$C = \frac{n_{p,SC}}{n_{s,SC}} C_R = 200\ \text{F} \quad \text{et} \quad R_s = \frac{n_{s,SC}}{n_{p,SC}} ESR_{DC} = 8,75\ \text{m}\Omega .$$

Question Q.16.

Chaque condensateur est chargé par un courant constant I . Pour le condensateur C_1 , la relation courant – tension est

$$I = C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} .$$

Par intégration, les conditions initiales étant nulles, les équations d'évolution des tensions aux bornes des condensateurs sont

$$v_{C1}(t) = \frac{I}{C_1} t \quad \text{et} \quad v_{C2}(t) = \frac{I}{C_2} t .$$

Question Q.17.

Le condensateur de plus petite capacité (C_2) va se charger plus vite et atteindra la tension maximale de 2,5 V en premier. La durée de charge t_1 vaut

$$t_1 = \frac{C_1 \times 2,5\ \text{V}}{I} = 112,5\ \text{s} .$$

Les tensions aux bornes des condensateurs C_1 et C_2 à l'instant t_1 sont respectivement $v_{C1}(t_1) = 2,05\ \text{V}$ et $v_{C2}(t_1) = 2,5\ \text{V}$. Les énergies stockées dans les condensateurs C_1 et C_2 sont respectivement de 11 557 J et 14 062 J pour un total de 25 619 J.

Si la charge est poursuivie, la tension aux bornes du condensateur C_2 va dépasser sa tension maximale de 2,5 V pouvant entraîner sa destruction.

Question Q.18.

La source de courant alimente une charge RC parallèle. Pour le condensateur C_1 , l'équation différentielle est

$$I = C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} + \frac{v_{C1}}{R} .$$

Après intégration, les conditions initiales étant nulles, les équations d'évolution des tensions aux bornes des condensateurs sont

$$v_{C1}(t) = R \cdot I \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C_1}} \right) \quad \text{et} \quad v_{C2}(t) = R \cdot I \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C_2}} \right) .$$

Afin d'assurer l'équilibrage, il faut que la valeur finale de tension atteinte soit égale à 2,5 V, soit une résistance de 25 mΩ. Cette valeur n'est pas acceptable car cela va décharger les condensateurs dès l'arrêt de la phase de charge avec une constante de temps de l'ordre de 125 s, bien plus faible que la durée des profils de mission. Cela va donc dissiper la majorité de l'énergie stockée.

Question Q.19.

À partir de l'instant t_1 de fin de charge, chaque condensateur se décharge dans la résistance connectée en parallèle selon

$$0 = C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} + \frac{v_{C1}}{R}.$$

Après intégration, les condensateurs ayant un état de charge non nul à l'instant t_1 , les équations d'évolution des tensions aux bornes des condensateurs au-delà de t_1 sont

$$v_{C1}(t) = v_{C1}(t_1) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{R \cdot C_1}} \text{ et } v_{C2}(t) = v_{C2}(t_1) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{R \cdot C_2}}.$$

Les tensions ne s'équilibrent jamais, sauf à l'infini où la tension sera nulle car les constantes de temps sont différentes.

Par conséquent, ce système d'équilibrage passif n'est pas efficace. Il fonctionne seulement quand l'assemblage de condensateurs et de résistances est alimenté par une source de tension et non une source de courant.

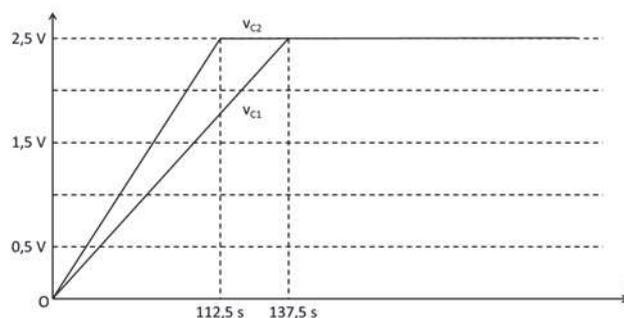
Question Q.20.

Afin de ne pas détériorer les condensateurs, il faut que la résistance détourne tout le courant de charge lorsque la tension maximale est atteinte, soit une résistance $R = 25 \text{ m}\Omega$.

Question Q.21.

Pour chaque condensateur, la charge se fait à courant constant avec la résistance déconnectée. Les équations d'évolution sont donc identiques à la question Q.16. Quand la tension aux bornes d'un condensateur atteint 2,5 V, la résistance en parallèle est connectée, dérivant tout le courant de charge. La tension reste donc constante à 2,5 V. La durée de charge du condensateur C_1 est de 137,5 s et celle du condensateur C_2 est de 112,5 s.

L'évolution des tensions est représentée ci-dessous :



Question Q.22.

À la fin de la charge, les tensions aux bornes des condensateurs sont de 2,5 V. Les énergies stockées dans les condensateurs C_1 et C_2 sont respectivement de 17,19 kJ et 14,06 kJ pour un total de 31,25 kJ.

Seule la résistance aux bornes de C_2 dissipe de l'énergie entre les instants t_1 et t_2 , phase durant laquelle elle est traversée par le courant I , soit une énergie dissipée $R \cdot I^2 \cdot (t_2 - t_1) = 6,25 \text{ kJ}$.

Sans équilibrage, l'énergie stockée est de 25,62 kJ. Par conséquent, le système d'équilibrage permet de stocker 5,63 kJ supplémentaires mais avec 6,25 kJ dissipés dans le système d'équilibrage, soit une augmentation de 20 % de l'énergie stockée avec un rendement inférieur à 50 %.

Question Q.23.

L'ensemble des résultats est donné dans le tableau suivant :

	$ P_{Bat} _{max}$ (kW)	$E_{u,Bat}$ (kW.h)	$f_{o,Bat}$ (Hz)
Desserte locale (profil 1)	315,6 kW	43,54 kW.h	2 mHz
Triage (profil 2)	141,4 kW	6,66 kW.h	5,9 mHz

Question Q.24.

La mission nécessitant le plus d'énergie stockée est celle de desserte locale (profil 1) avec 43,54 kW.h, soit une énergie stockée minimale de $43,54 \text{ kW.h} / 0,5 = 87,08 \text{ kW.h}$.

Un élément du bloc batterie a une énergie stockée de $135 \text{ A.h} * 1,2 \text{ V} = 162 \text{ W.h}$, soit un total de 93,3 kW.h pour le bloc batterie. Le dimensionnement du bloc batterie de la locomotive est donc suffisant pour remplir les profils de mission proposés.

Question Q.25.

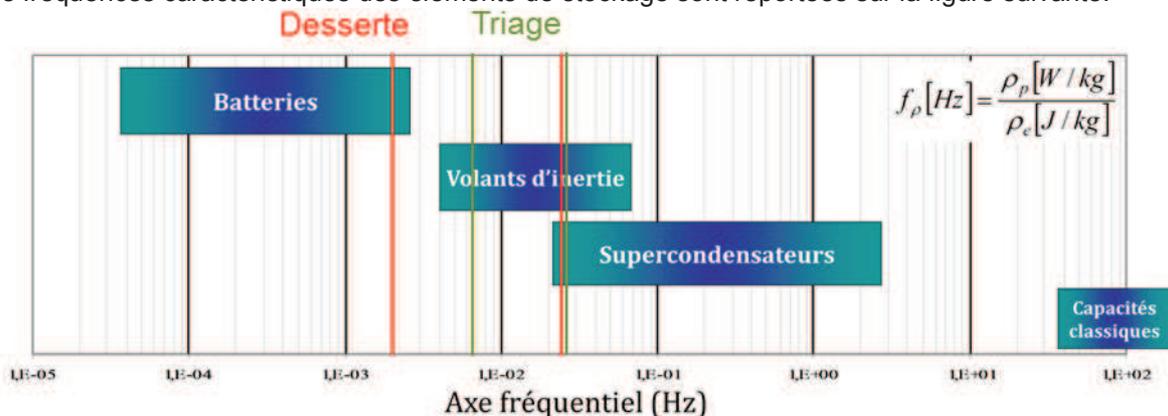
Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

	Profondeur de cycle	Nombre de cycles autorisés
Desserte locale (profil 1)	46,7 %	5 890
Triage (profil 2)	7,1 %	516 000

Chaque cycle peut être répété une dizaine de fois par jour. Donc pour le premier, cela donne 589 jours d'utilisation soit moins de 2 années d'exploitation. Pour le triage, on obtient 51 600 jours, soit 141 années d'exploitation. Par conséquent, la mission va avoir un impact important sur la nécessité de changer ou non régulièrement le bloc batterie.

Question Q.26.

Les fréquences caractéristiques des éléments de stockage sont reportées sur la figure suivante.



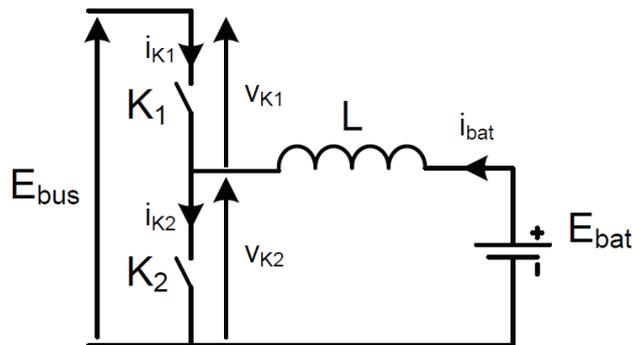
Mis à part la mission de triage pour la batterie, il y a adéquation entre les missions demandées aux éléments de stockage et leurs caractéristiques. Pour la mission de triage, la fréquence caractéristique

montre que les volants d'inertie sont mieux adaptés que les batteries, mais ils sont encombrants et peuvent poser des problèmes de sécurité. Le choix réalisé reste donc cohérent, car la fréquence caractéristique quoiqu'un peu élevée, reste proche des caractéristiques des batteries. L'intérêt de la double hybridation est de couper la mission en deux afin d'optimiser l'usage et le dimensionnement des éléments de stockage.

PARTIE C

Question Q.27.

Le bus de tension ainsi que les batteries d'accumulateurs NiCd sont des sources de tension continue. Le convertisseur statique utilisé est donc un hacheur. Les sources étant de même nature, elles ne peuvent pas être connectées directement. Il faut donc associer une bobine en série. La structure obtenue est représentée à la figure suivante.

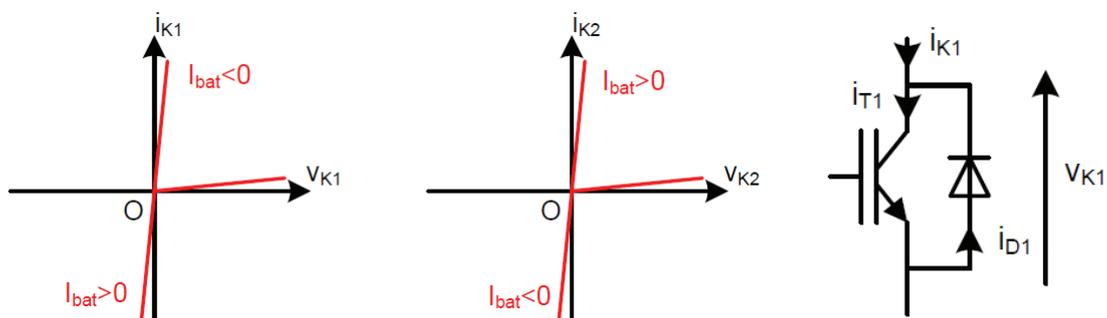


Question Q.28.

Le convertisseur statique est réversible en puissance (phases de charge et de décharge) par inversion du courant. Chaque source est donc unidirectionnelle en tension et bidirectionnelle en courant.

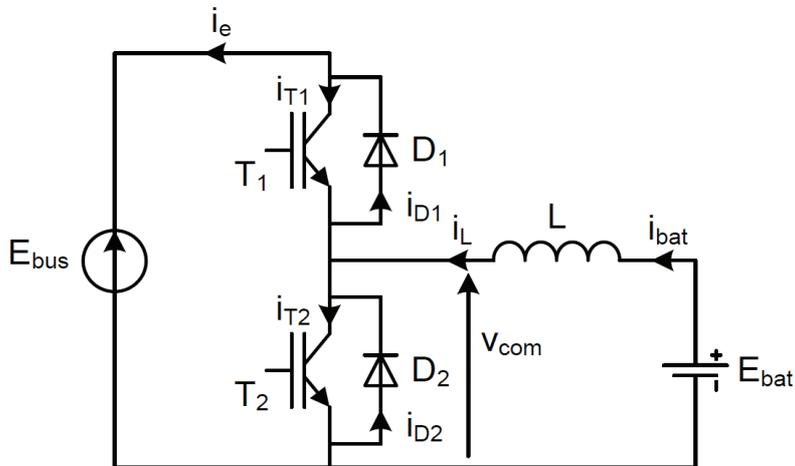
Question Q.29.

Les segments des interrupteurs sont représentés dans la figure suivante. Afin de réaliser ces interrupteurs, il faut associer un transistor (IGBT par exemple) avec une diode en anti-parallèle.



Question Q.30.

Le schéma complet du convertisseur est donné à la figure ci-dessous.



Question Q.31.

La tension d'un bloc de batteries s'élève à $E_{bat} = 288 \cdot 1,2 \text{ V} = 345,6 \text{ V}$. La valeur moyenne de la tension aux bornes de la bobine en régime permanent étant nulle, la tension aux bornes de la batterie est égale à la valeur moyenne de la tension v_{com} , dont la valeur est $\alpha \cdot E_{bus}$. Par conséquent, la valeur du rapport cyclique est $\alpha = E_{bat} / E_{bus} = 0,64$.

Question Q.32.

Le courant fourni par un bloc de batterie vaut $I_{bat} = 380 \text{ kW} / (2 \cdot 345,6 \text{ V}) = 550 \text{ A}$. Le courant du bloc de batterie étant positif, le courant i_{K1} est négatif et le courant i_{K2} est positif. Cela veut dire que c'est la diode de K_1 et le transistor de K_2 qui vont conduire.

Question Q.33.

Les éléments des modèles circuits de l'IGBT et de la diode sont obtenus à partir d'une linéarisation des caractéristiques du document constructeur du dossier ressources. Les valeurs obtenues sont, pour l'IGBT, $V_{CE0} = 0,9 \text{ V}$ et $r_{IGBT} = 2,44 \text{ m}\Omega$, et pour la diode, $V_{d0} = 1,05 \text{ V}$ et $r_d = 1,4 \text{ m}\Omega$. Les pertes par conduction sont calculées selon

$$P_{condIGBT} = V_{CE0} \cdot \langle i_{IGBT} \rangle + r_{IGBT} \cdot I_{IGBTeff}^2 = 444 \text{ W}$$

$$P_{cond} = V_{d0} \cdot \langle i_d \rangle + r_d \cdot I_{deff}^2 = 640,6 \text{ W}.$$

	Tension maximale	Courant moyen	Courant efficace	Courant à conduire à l'amorçage	Courant au blocage	Pertes par conduction	Pertes par commutation
Transistor T ₁	-	-	-	-	-	-	-
Diode D ₁	540 V	352 A	440 A	567,3 A	532,7 A	640,6 W	9,4 W
Transistor T ₂	540 V	198 A	330 A	532,7 A	567,3 A	444 W	28 W
Diode D ₂	-	-	-	-	-	-	-

Question Q.34.

Pour le transistor IGBT, l'énergie dissipée à l'amorçage est $E_{on}(532,7 \text{ A}) = (540 \text{ V} / 600 \text{ V}) \cdot 40 \text{ mJ} = 36 \text{ mJ}$ et l'énergie dissipée au blocage est $E_{off}(567,3 \text{ A}) = (540 \text{ V} / 600 \text{ V}) \cdot 82 \text{ mJ} = 73,8 \text{ mJ}$. Cela donne des pertes par commutation qui valent $P_{comIGBT} = F_{dec} \cdot (E_{on} + E_{off}) = F_{dec} \cdot 109,8 \text{ mJ}$. Pour la diode, l'énergie de recouvrement est $E_{rec}(532,7 \text{ A}) = (540 \text{ V} / 600 \text{ V}) \cdot 41 \text{ mJ} = 36,9 \text{ mJ}$. Les pertes par commutation de la diode sont $P_{comd} = F_{dec} \cdot E_{rec} = F_{dec} \cdot 36,9 \text{ mJ}$.

Question Q.35.

L'expression des températures de jonction de l'IGBT et de la diode sont

$$T_{jIGBT} = (P_{condIGBT} + P_{comIGBT}) \cdot R_{thT} + T_C$$

$$T_{jd} = (P_{cond} + P_{comd}) \cdot R_{thd} + T_C.$$

D'après le dossier ressources, la température de jonction admissible en fonctionnement de commutation est limitée à 125 °C pour l'IGBT et la diode. Cela permet de déduire la fréquence de commutation maximale pour les deux composants, soit 3 357 Hz pour l'IGBT et 255 Hz pour la diode. La valeur la plus faible des deux doit être choisie, soit une fréquence de découpage de $F_{dec} = 255$ Hz, ce qui permet de déduire les pertes par commutation des deux composants (valeurs dans le tableau).

Question Q.36.

L'expression de l'ondulation de courant est

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot E_{bus}}{L \cdot F_{dec}}.$$

Avec une fréquence de découpage $F_{dec} = 255$ Hz, cela donne une inductance $L = 14,1$ mH.

La valeur d'inductance est très élevée (supérieure au mH pour un courant de 550 A). Cela va entraîner un volume et une masse importants. Cela est lié à la faible fréquence de découpage, ce qui est fréquent dans les structures de forte puissance.

Question Q.37.

Pour diminuer l'inductance, il faut augmenter la fréquence de découpage afin de limiter l'ondulation de courant, ce qui n'est pas possible car les composants silicium sont en limite thermique. Une autre possibilité est d'agir sur la structure : le rapport cyclique est proche de 2/3 et si une structure de hacheur à 3 bras entrelacés est utilisée, cela permet d'avoir une ondulation de courant nulle dans la batterie d'accumulateurs, quelle que soit la fréquence de découpage.

Un autre avantage, à fréquence de découpage donnée, est la multiplication par trois de la fréquence apparente de sortie.

Question Q.38.

Les résultats sont présentés sur la figure page suivante.

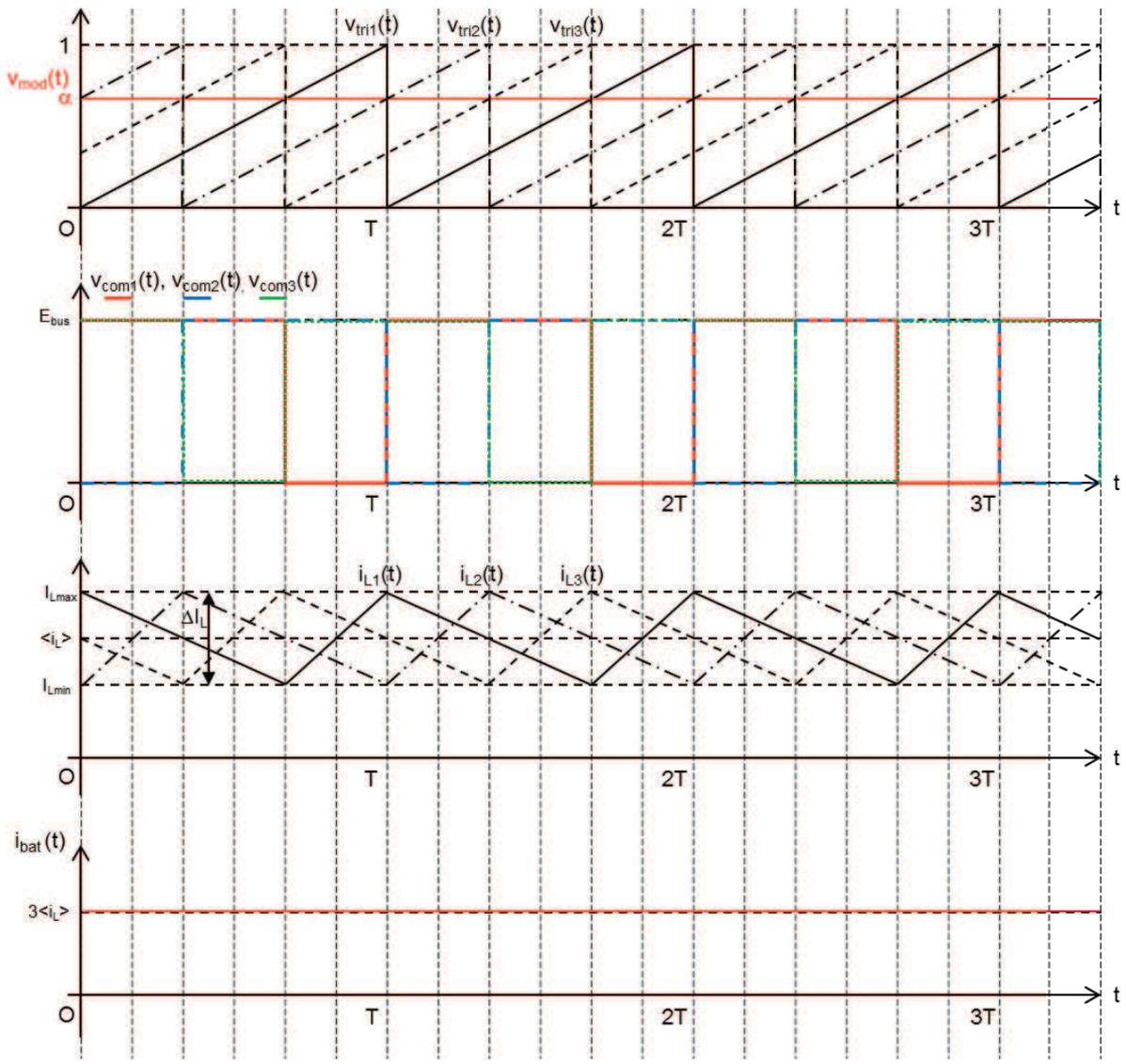
Question Q.39.

Par construction graphique, le courant i_{bat} est constant. Cela est cohérent avec la courbe du dossier ressources car le graphique proposé est tracé pour un rapport cyclique de 0,66, soit une ondulation de courant de sortie nulle.

La fréquence de découpage est $F_{dec} = F_{app} / 3 = 2$ kHz.

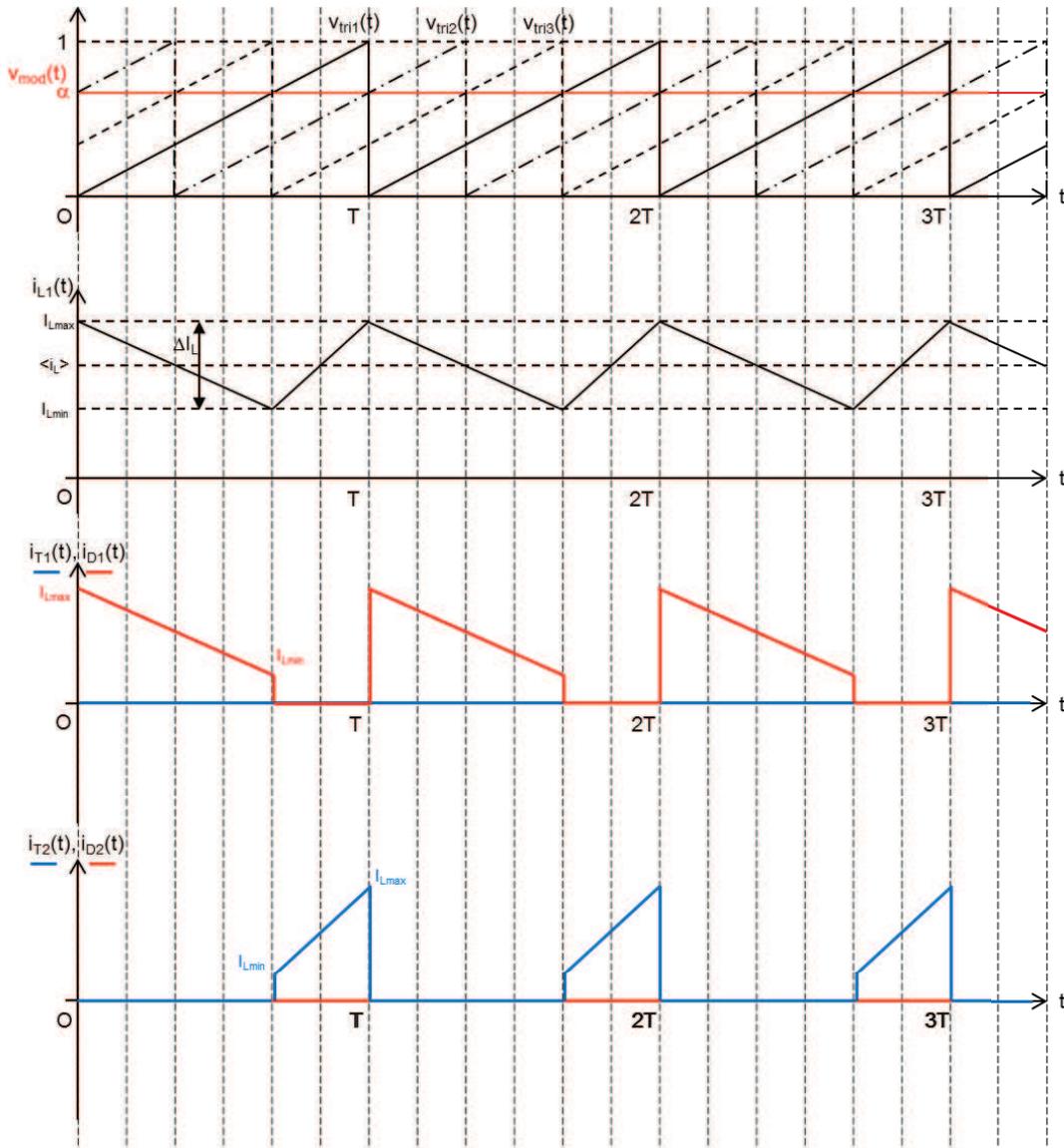
L'ondulation de courant dans une phase est donnée par

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot E_{bus}}{L \cdot F_{dec}} = 103,7 \text{ A.}$$



Question Q.40.

Les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous.



Question Q.41.

La valeur moyenne du courant peut être calculée comme l'aire sous la courbe selon

$$\langle i_{D1} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_{D1}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \frac{\alpha \cdot T \cdot (I_{Lmin} + I_{Lmax})}{2}.$$

Or l'ondulation de courant s'exprime par $\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin}$, donc :

$$\langle i_{D1} \rangle = \frac{\alpha \cdot (I_{Lmax} - \Delta I_L + I_{Lmax})}{2} = \alpha \cdot \left(I_{Lmax} - \frac{\Delta I_L}{2} \right).$$

La valeur efficace du courant de la diode s'exprime par

$$I_{D1eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{D1}^2(t) \cdot dt}.$$

Or le courant de la diode est $i_{D1}(t) = -\frac{\Delta I_L}{\alpha \cdot T} \cdot t + I_{Lmax}$ entre 0 et $\alpha \cdot T$ et il est nul de $\alpha \cdot T$ à T .

Par conséquent,

$$I_{D1eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\alpha \cdot T} \left(-\frac{\Delta I_L}{\alpha \cdot T} \cdot t + I_{Lmax} \right)^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\alpha \cdot T} \left(\left(\frac{\Delta I_L}{\alpha \cdot T} \right)^2 \cdot t^2 - 2 \frac{I_{Lmax} \cdot \Delta I_L}{\alpha \cdot T} \cdot t + I_{Lmax}^2 \right) \cdot dt}$$

Soit

$$I_{D1eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\left(\frac{\Delta I_L}{\alpha \cdot T} \right)^2 \cdot \frac{(\alpha \cdot T)^3}{3} - 2 \frac{I_{Lmax} \cdot \Delta I_L}{\alpha \cdot T} \cdot \frac{(\alpha \cdot T)^2}{2} + I_{Lmax}^2 \cdot \alpha \cdot T \right)} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot \Delta I_L^2}{3} - \alpha \cdot I_{Lmax} \cdot \Delta I_L + \alpha \cdot I_{Lmax}^2}$$

Ce qui donne

$$I_{D1eff} = \sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\Delta I_L^2}{3} - I_{Lmax} \cdot \Delta I_L + I_{Lmax}^2}$$

Les calculs sont similaires pour les courants moyen et efficace du transistor.

Question Q.42.

Les contraintes en tension et courant sont résumées dans le tableau suivant, en se basant sur les formules de la question Q.41. Le courant du bloc de batteries étant positif, le transistor T₁ et la diode D₂ ne conduisent pas.

	Tension maximale	Courant moyen	Courant efficace	Courant à conduire à l'amorçage	Courant au blocage	Pertes par conduction	Pertes par commutation
Transistor T ₁	-	-	-	-	-	-	-
Diode D ₁	540 V	117 A	148 A	235 A	131 A	154 W	36 W
Transistor T ₂	540 V	66 A	111 A	131 A	235 A	89 W	82,8 W
Diode D ₂	-	-	-	-	-	-	-

Pour calculer les pertes par conduction et par commutation, les formules des questions Q.33 et Q.34 sont utilisées. Concernant les énergies de commutation, pour le transistor IGBT, l'énergie dissipée à l'amorçage est $E_{on}(131 \text{ A}) = (540 \text{ V} / 600 \text{ V}) \cdot 11 \text{ mJ} = 9,9 \text{ mJ}$ et l'énergie dissipée au blocage est $E_{off}(235 \text{ A}) = (540 \text{ V} / 600 \text{ V}) \cdot 35 \text{ mJ} = 31,5 \text{ mJ}$. Pour la diode, l'énergie de recouvrement est $E_{rec}(131 \text{ A}) = (540 \text{ V} / 600 \text{ V}) \cdot 20 \text{ mJ} = 18 \text{ mJ}$.

Question Q.43.

La température de jonction de l'IGBT est 73,6 °C et celle de la diode est 78 °C.

Les pertes dans les composants sont plus faibles car les courants ont été diminués avec l'entrelacement des trois bras. Cela a permis d'obtenir des pertes et, par conséquent, une température de jonction plus faibles, malgré l'augmentation de la fréquence de découpage.

Question Q.44.

Toutes les grandeurs périodiques peuvent se décomposer en une valeur moyenne et des harmoniques. Par exemple, les courants s'écrivent $i_e(t) = \langle i_e \rangle + i_{eh}$ et $i_{bus}(t) = \langle i_{bus} \rangle + i_{bush}$. Par contre, la source d'entrée étant constante, il n'y a que la composante continue E_{bus} . De son côté, le convertisseur statique, étant alimenté en tension, impose le courant qu'il consomme et peut être modélisé par une source de courant.

Le système étudié étant linéaire, le principe de superposition peut être utilisé, l'étude se faisant harmonique par harmonique. Si seule la partie harmonique est représentée, le schéma proposé est obtenu car $E_{bush} = 0$.

Question Q.45.

En appliquant l'équation du pont diviseur de courant, la fonction de transfert s'écrit

$$\frac{I_{bush}(p)}{I_{eh}(p)} = \frac{\frac{1}{C_f \cdot p}}{R_f + L_f \cdot p + \frac{1}{C_f \cdot p}}.$$

Soit

$$\frac{I_{bush}(p)}{I_{eh}(p)} = \frac{1}{1 + R_f \cdot C_f \cdot p + L_f \cdot C_f \cdot p^2}.$$

La fréquence propre du filtre f_0 s'exprime selon

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f \cdot C_f}}.$$

Question Q.46.

Le modèle petit signal est la linéarisation autour du point de fonctionnement. La courbe peut alors être confondue avec sa tangente, dont la pente est $\Delta i_e / \Delta v_e$, grandeur homogène à une conductance. Nous pouvons constater sur la figure que la pente de la tangente est négative, donc la conductance est négative soit une pente en $-1/R_{ch}$.

L'équation de la fonction de la puissance peut s'exprimer selon

$$i_e = \frac{I_{e0} \cdot V_{e0}}{v_e}.$$

L'expression de la dérivée est

$$\frac{di_e}{dv_e} = -\frac{I_{e0} \cdot V_{e0}}{v_e^2}.$$

Au point de fonctionnement (V_{e0} ; I_{e0}), la valeur de la dérivée, correspondant au coefficient directeur de la tangente, vaut $-I_{e0}/V_{e0}$, soit une expression de la résistance de charge

$$R_{ch} = -\frac{V_{e0}}{I_{e0}}.$$

Au point de fonctionnement du hacheur, l'application numérique donne $R_{ch} = -1,53 \Omega$.

Question Q.47.

En appliquant l'équation du pont diviseur de tension, la fonction de transfert s'écrit

$$H(p) = \frac{V_e(p)}{E_{bus}(p)} = \frac{\frac{1}{C_f \cdot p + \frac{1}{R_{ch}}}}{R_f + L_f \cdot p + \frac{1}{C_f \cdot p + \frac{1}{R_{ch}}}}.$$

Soit

$$H(p) = \frac{R_{ch}}{R_{ch} + R_f} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_f + R_f \cdot R_{ch} \cdot C_f}{R_{ch} + R_f} \cdot p + \frac{R_{ch} \cdot L_f \cdot C_f}{R_{ch} + R_f} \cdot p^2}.$$

Les paramètres de la forme canonique de la fonction de transfert sont

$$K = \frac{R_{ch}}{R_{ch} + R_f}$$

$$\xi = -\frac{1}{2} \cdot \frac{L_f + R_f \cdot R_{ch} \cdot C_f}{\sqrt{(R_{ch} + R_f) \cdot R_{ch} \cdot L_f \cdot C_f}}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_{ch} + R_f}{R_{ch} \cdot L_f \cdot C_f}}$$

À noter que le signe négatif du coefficient d'amortissement est lié au terme $R_{ch} + R_f$ qui est négatif.

Question Q.48.

Le système est stable si le coefficient d'amortissement ξ est strictement positif, soit $L_f + R_f \cdot R_{ch} \cdot C_f < 0$ soit $L_f < -R_f \cdot R_{ch} \cdot C_f$.

Question Q.49.

Les différents résultats pour les deux valeurs de capacité proposées sont résumés dans le tableau suivant :

C_f	L_f	Limite de stabilité	Filtre stable ?
$C_{f1} = 4 \text{ mF}$	$L_{f1} = 17,6 \text{ } \mu\text{H}$	12,2 μH	NON
$C_{f2} = 6 \text{ mF}$	$L_{f2} = 11,7 \text{ } \mu\text{H}$	18,36 μH	OUI

La solution retenue sera le couple de valeurs $L_{f2}-C_{f2}$.

Question Q.50.

Si la puissance est divisée par deux, le bus étant alimenté par une source de tension, c'est le courant absorbé qui sera divisé par deux. Par conséquent, la résistance de charge R_{ch} du modèle petit signal sera multipliée par deux, soit une valeur de -3,06 Ω .

Après avoir recalculé les limites de stabilité, nous constatons que les deux solutions de filtre sont stables.

C_f	L_f	Limite de stabilité	Filtre stable ?
$C_{f1} = 4 \text{ mF}$	$L_{f1} = 17,6 \text{ } \mu\text{H}$	24,6 μH	OUI
$C_{f2} = 6 \text{ mF}$	$L_{f2} = 11,7 \text{ } \mu\text{H}$	36,8 μH	OUI

Nous constatons que plus la puissance augmente, plus il y a de chance qu'un filtre devienne instable. Par conséquent, du point de vue de la stabilité, il vaut mieux dimensionner un filtre à la puissance maximale de l'équipement connecté en aval.

Question Q.51.

Si nous prenons comme valeur pour l'inductance de filtre $L_f = 100 \text{ } \mu\text{H}$, le système est stable à la puissance nominale si la valeur de la capacité C_f est supérieure à 32,7 mF. Cela donne une fréquence maximale de coupure du filtre de 88 Hz. Donc, pour ce filtre, il n'existe pas de couple de valeurs $L_f - C_f$ permettant de garantir la stabilité du système avec une fréquence de coupure de 600 Hz.

Pour avoir un filtre stable, nous pouvons choisir le couple $L_f = 100 \text{ } \mu\text{H}$ et $C_f = 32,7 \text{ mF}$, ce qui donne une fréquence de coupure de 88 Hz. D'un point de vue filtrage des harmoniques, ce filtre est meilleur, mais il est de taille beaucoup plus importante, ce qui limite la capacité d'intégration dans la locomotive.

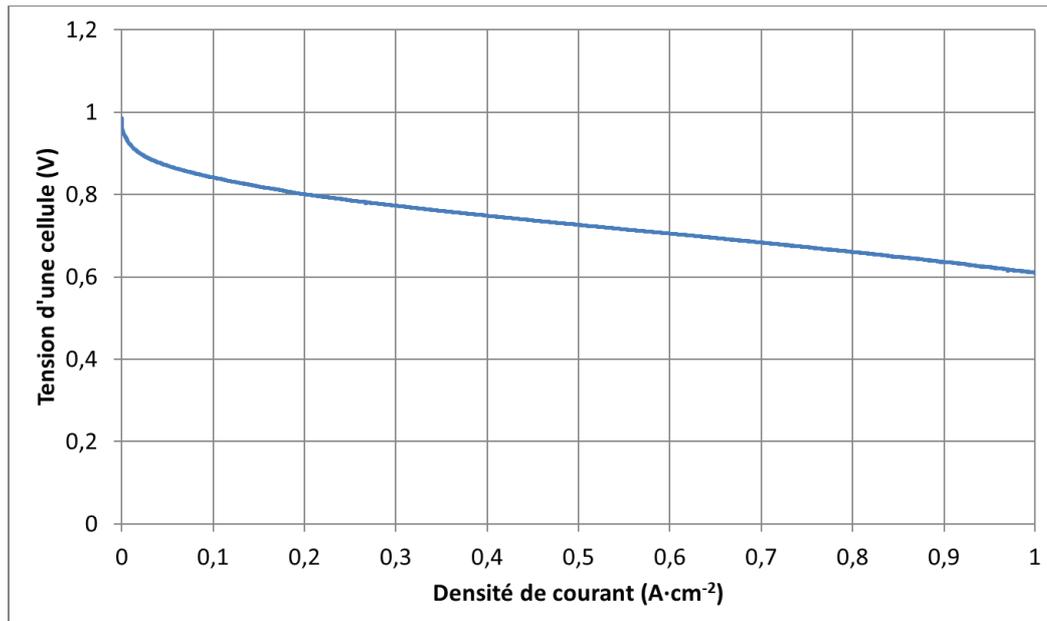
PARTIE D

Question Q.52.

À une densité de courant de $0,8 \text{ A/cm}^2$, une cellule élémentaire a une tension de $0,66 \text{ V}$, selon le dossier ressources. Cela donne une tension totale de $n_{\text{PAC}} \cdot 0,66 \text{ V} = 145,2 \text{ V}$. Le courant nominal est $0,8 \text{ A/cm}^2 \cdot S_{\text{PAC}} = 600 \text{ A}$. Par conséquent, la puissance nominale de la pile est égale à $87,12 \text{ kW}$.

Question Q.53.

Le rendement de la cellule élémentaire se calcule en divisant la tension aux bornes de la cellule pour le courant considéré, par la force électromotrice standard. Cela donne la courbe suivante :



Le rendement diminue lorsque le courant augmente. Il est donc maximal quand la pile est utilisée à faible courant. Mais, afin de fournir un certain courant, cela impliquerait une surface énorme de la pile avec une forte sous-utilisation de l'équipement. Par conséquent, nous acceptons de travailler au point nominal même si le rendement n'est pas optimal.

Question Q.54.

Au point de puissance nominale, le cœur de pile a un rendement de $0,66 / 1,23 = 0,54$.

Le rendement de sortie du système est

$$\frac{87,12 \text{ kW} - 14 \text{ kW}}{87,12 \text{ kW}} = 0,84$$

Par conséquent le rendement global du système est $0,54 \cdot 0,84 = 0,454$, soit $45,4 \%$.

Le rendement paraît faible mais il reste supérieur à celui d'un groupe thermique qui se situe autour de 30% .

Question Q.55.

Le nombre de moles de dihydrogène est donné par

$$n_{\text{H}_2} = \frac{I \cdot \Delta t \cdot n_{\text{PAC}}}{2F} = 1\,094,5 \text{ mol.}$$

Question Q.56.

Il y a 18 bouteilles avec 8 Nm^3 utilisables, soit 144 Nm^3 ou $144\,000 \text{ L}$. Par conséquent, le nombre de moles utilisables total de dihydrogène est $144\,000 \text{ L} / 22,4 \text{ L/mol} = 6\,428,6 \text{ mol}$.

La quantité étant supérieure à la réponse de la question Q.55, elle est suffisante afin d'assurer la mission de triage (profil 2). La durée maximale de fonctionnement avec ce profil est de

$$(6\,428,6 \text{ mol} / 1\,094,5 \text{ mol}) \cdot 1\,600 \text{ s} = 9\,398 \text{ s}.$$

Cette durée correspond à 2 heures, 36 minutes et 38 secondes.

Question Q.57.

La masse de dihydrogène consommée lors de la mission de triage (profil 2) est

$$m_{\text{H}_2} = n_{\text{H}_2} \cdot 2 \text{ g/mol} = 2\,189 \text{ g}.$$

Le rendement énergétique du dihydrogène est

$$\eta_{\text{H}_2} = \frac{32,5 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 3600}{m_{\text{H}_2} \times 120 \text{ kJ/g}}.$$

Ce qui donne un rendement de 44,5 %.

Question Q.58.

Le rendement énergétique du gazole est

$$\eta_{\text{gazole}} = \frac{32,5 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 3600}{6,95 \text{ kg} \times 1000 \times 42,5 \text{ kJ/g}}.$$

Ce qui donne un rendement de 39,6 %.

Nous retrouvons le fait que le rendement de conversion est meilleur pour la pile à combustible, amenant un meilleur usage du combustible par rapport au groupe Diesel.

Question Q.59.

Dans une bouteille de dihydrogène, il y a $8,8 \text{ Nm}^3$, soit $392,9 \text{ mol}$. Cela donne une masse de $785,7 \text{ g}$ de dihydrogène soit une énergie stockée de $94,3 \text{ MJ}$. La masse totale avec la bouteille est de $70,785 \text{ kg}$, soit un pouvoir calorifique équivalent de $1,33 \text{ kJ/g}$ en tenant compte de la masse du stockage.

Lors de la mission de triage (profil 2), d'après les questions Q.55 et Q.56, la quantité de dihydrogène consommée correspond à 17 % des 18 bouteilles soit un coût de $0,17 \cdot 2 \cdot 700 \text{ €} = 238 \text{ €}$.

De son côté, le groupe Diesel $6,95 \text{ kg}$ de gazole, soit $6,95 \text{ kg} / 0,85 \text{ kg/L} = 8,18 \text{ L}$, ce qui représente un coût de $8,18 \text{ €}$.

En tenant compte de la masse du stockage et du coût, la technologie utilisant le dihydrogène semble peu intéressante. Mais il faut noter que des progrès récents ont réduit la masse des éléments de stockage (matériaux composites) et que les coûts de production diminueraient si la technologie se développait. Enfin, la pile à combustible ne rejette que de l'eau lors de son usage, ce qui est très positif dans l'optique de la réduction de la pollution des transports.