**DOSSIER CORRIGE**

**Problématique générale**

Le bus multi-hybride manque d’autonomie dans l’utilisation du système électrique de propulsion et la consommation de carburant est élevée. Les différentes parties du questionnement visent dans un premier temps à analyser le système et à définir les paramètres fonctionnels puis dans un deuxième temps à proposer les causes correspondant au dysfonctionnement énoncé.

**Partie A : énergies lors du déplacement entre deux stations**

**B**

**A**

Le bus d’une masse moyenne de 15 tonnes, en charge, circule sur une ligne urbaine allant de A à B en aller-retour. Cette ligne, de 8 km, constituée de 15 stations intermédiaires réparties à équidistance est parcourue en 24 min en moyenne. Á chaque station le temps d’arrêt est de 30 s. Au départ et à l’arrivée en station, l’accélération et la décélération seront considérées constantes (1 m∙s-²). Le dénivelé de la ligne est négligeable et les consommations d’énergies autres que celles relatives à l’avancement du bus ne sont pas prises en compte.

**A-1 Étude énergétique :** l’objectif de cette sous-partie est de quantifier les énergies mises en jeu lors du déplacement du bus entre deux stations.

*Graphe de vitesse entre 2 stations intermédiaires*

Station

n

Station

n+1

Vitesse de déplacement (km∙h-1)

Temps

(s)

36

0

10

50

90

60

**Question 1 :** déterminer la distance parcourue dans la phase de déplacement à vitesse constante.

d = v t d = x 40 = 400 m

**Question 2 :** déterminer la distance parcourue dans les phases d’accélération et de décélération.

d = a∙t² d = = 50 m

**Question 3 :** déterminer la distance parcourue entre les 2 stations.

400 + 50 + 50 = 500 m

**Question 4 :** la vitesse de pointe atteinte entre chaque station est de 36 km∙h-1. Déterminer l’énergie nécessaire pour atteindre cette vitesse depuis le départ de la station.

Avec v = = 10 m s-1 E = ½ m v² = = 750 000 J

**Question 5 :** le bus est équipé des meilleurs pneumatiques actuels. En fonction des caractéristiques fournies (DT5), déterminer l’énergie consommée par le roulement des pneumatiques sur le sol lors du trajet de 500 m (Donner le résultat en joules).

0,5 x 15 / 75 = 0,1 kW.h 0,1 x 3600 = 360 kJ soit 360 000 J

**Question 6 :** l’énergie nécessaire pour vaincre la trainée (forces aérodynamiques) est de 20 kJ dans la phase accélération puis de 200 kJ dans la phase à vitesse constante et enfin de 20 kJ dans la phase décélération. Déterminer, en kJ, l’énergie motrice totale à apporter aux roues pour aller d’une station à l’autre.

750 kJ + 360 kJ + 240 kJ = 1 350 kJ

**Question 7 :** déterminer l’énergie potentiellement récupérable lors de la phase décélération.

750 – 20 - 36 = 694 kJ

**Question 8 :** en partant de l’hypothèse que 450 kJ sont effectivement récupérés (en tenant compte des pertes) et que ceux-ci sont réutilisés pour la propulsion. Exprimer en pourcentage l’énergie qui est économisée entre 2 stations.

450 / 1350 = 0,333 soit 33,3%

**A-2 Diagnostic :** l’objectif de cette sous-partie est de déterminer les causes d’une surconsommation de l’énergie stockée (énergie électrique et carburant).

**Question 9 :** représenter sous forme de diagramme d’Ishikawa les trois causes principales qui peuvent engendrer une surconsommation de l’énergie stockée.

Surconsommation de l’énergie stockée

Mauvais rendement dans la transformation d’énergie

Mauvaise récupération d’énergie

Demande d’énergie excessive (rendement de transmission, gonflage pneus, masse transportée, freinage…)

**Partie B : système hydropneumatique**

**B-1 Analyse fonctionnelle et structurelle :** l’objectif de cette sous-partie est d’analyser le comportement du système hydropneumatique dans les différentes phases de fonctionnement.

**Question 10 :** compléter le tableau 1 sur DR1 en indiquant le nom et le rôle dans le circuit des composants portant les repères indiqués sur le schéma hydraulique (DT10).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Repère** | **Nom** | **Rôle dans le circuit** |
| 3a | Prise de pression | Mesurer la pression hydraulique de l’accumulateur 1 |
| 4 | Vanne | Faire chuter la pression hydraulique de l’accumulateur pour intervenir sur le circuit |
| 19 | Échangeur thermique | Refroidir l’huile |
| 20 | Pompe hydraulique | Transformer et transmettre l’énergie du moteur thermique |
| 21 | Filtre | Filtrer l’huile en retour réservoir |
| 22 | Électrovanne | Commander la variation de cylindrée du moteur hydraulique en fonction du courant de commande |
| 26 | Capteur de pression | Détecter la pression du circuit et transmettre l’information sous forme de courant |

**Question 11 : e**n prenant comme référence la description du principe du système hydropneumatique (DT9) et le schéma du circuit hydraulique (DT10), compléter le tableau 2 (DR1) relatif à l’état des composants pour les différentes situations énoncées (l’état 0 correspond à l’état tel que représenté sur le schéma et l’état 1 lorsque le composant est activé).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Situations** | **Repère du composant hydraulique** | | | | | | | |
| **7** | **8** | **9** | **12** | **13** | **15** | **16** | **18** |
| Transmission hydraulique seule | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Initialisation accumulateur 1 avant le départ | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Restitution d’énergie en départ de station (accélération) | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Accumulation d’énergie en arrivée en station (décélération) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Transmission électrique (sans apport d’énergie hydraulique) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0/1 |

**B-2 Performances du système  hydropneumatique :** l’objectif de cette sous-partie est de déterminer les performances du système hydropneumatique dans les différentes phases de fonctionnement.

Pression d’azote accumulateur 1 en (bar)

*Relation entre le graphe des vitesses ( ) et la pression dans l’accumulateur 1( ) en fonction du temps*

Station (n)

Station

n+1

Vitesse de déplacement (km∙h-1)

Temps (s)

(États accumulateur 1)

36

0

50

(0)

90

(2)

60

(1)

100

(3)

180

350

339

174

**Question 12 :** montrer qu’à une température de 20°C, la masse d’azote contenue dans l’accumulateur 1 est voisine de 7 kg.

p0 V0 = m r T0 => m = = 7,26 kg

***Phase accumulation d’énergie* :** lors du passage de l’état 0 à l’état 1 (sur le graphe de la page précédente) la transformation est polytropique (k=1,2).

**Question 13 :** donner les valeurs de pression de l’azote contenu dans l’accumulateur 1 aux états 0 et 1 (donner le résultat en bar et en Mpa).

État 0 : 180 bar et État 1 : 350 bar

**Question 14 :** dans la phase d’accumulation d’énergie, montrer qu’à l’état 1 de l’accumulateur 1, l’azote occupe un volume voisin de 20 litres.

V2 = V1 =x 35 = 20 l

**Question 15 :** déterminer le volume d’huile contenu dans l’accumulateur 1 à l’état 1 de cette phase.

Soit 35 – 20 = 15 l d’huile accumulés

**Question 16 :** déterminer l’énergie totale accumulée par l’accumulateur 1 dans cette phase.

W = (350 x 105 x 20 x 10-3 – 180 x 105 x 35 x 10-3) = 350 000 J

**Question 17**: la sous-partie A-1 a permis de montrer que l’énergie récupérée est de 450 kJ. Comparer cette valeur au résultat de la question 16 et indiquer comment le constructeur complète la récupération d’énergie.

Les 100 kJ non récupérés par le système hydropneumatique sont récupérés par le dispositif d’accumulation électrique (recharge des batteries)

***Phase conservation d’énergie*** **:** (passage de l’état 1 à l’état 2 sur le graphe de la page précédente)

**Question 18 :** donner les valeurs de pression de l’azote contenu dans l’accumulateur 1 aux états 1 et 2 (donner le résultat en bar).

État 1 : 350 bar et État 2 : 339 bar

**Question 19 :** nommer le type de transformation entre l’état 1 et l’état 2.

Transformation isochore (volume constant car le volume d’huile ne varie pas).

**Question 20 :** dans cette phase qui dure 30 secondes (temps d’arrêt en station), la température de l’azote contenu dans l’accumulateur hydropneumatique baisse. Montrer que la température de l’azote a chuté d’environ 10 C.

p1 V1 = m r T1 et p2 V2 = m r T2 V1 = V2 car le volume d’huile est inchangé

T1 -T2 = = = 10,2 K soit 10,2 °C

**Question 21 :** déterminer la quantité d’énergie perdue par les échanges thermiques durant l’arrêt en station.

U = 7,26 x 0,743 x 10 = 53,94 kJ

***Phase restitution d’énergie :*** lors du passage de l’état 2 à l’état 3 (sur le graphe de la page précédente) la transformation est polytropique (k=1,2).

**Question 22 :** déterminer l’énergie restituée par l’accumulateur hydropneumatique.

W = (174 x 105 x 35 x 10-3  – 339 x 105 x 20 x 10-3) = - 345 000 J

**Question 23 :** déterminer le rendement de l’accumulateur hydropneumatique.

 = = 0,986 soit 98,6 %

**Question 24 :** comparer la quantité de chaleur perdue (question 21) et l’écart entre le travail d’accumulation (question 16) et de restitution (question 22). Expliquer la différence entre ces résultats.

La perte d’énergie calorifique n’a que peu de conséquence sur la quantité de travail restituée par l’accumulateur car la baisse de pression, constatée au point 2, est compensée par la baisse de la pression en fin de détente qui est de 174 bar au lieu de 180 bar initialement. Cette baisse de pression s’explique par la baisse de température de l’azote lors de la détente T3<T0. Pendant la phase déplacement du véhicule la température de l’azote va augmenter car sa température est inférieure à celle du milieu ambiant. L’apport d’énergie calorifique de la phase déplacement permet de compenser la perte de la phase en station.

**B-3 Performances de la transmission mécanique :** l’objectif de cette sous-partie est de déterminer l’impact de l’énergie stockée par l’accumulateur hydropneumatique sur la propulsion du véhicule.

**Question 25 :** le volume d’huile restitué par l’accumulateur hydropneumatique étant de 15 l et le moteur hydraulique étant en cylindrée maximale, déterminer la distance durant laquelle le moteur hydraulique peut participer à la transmission.

15 000 / 110 = 136,36 tour soit 136,36 / (5,74 x 2,85) = 8,35 tour de roue

Soit 8,35 x 3,022 = 25,23 m

**Question 26 :** le moteur hydraulique ayant un rendement mécanique de 96%, déterminer le couple maximum que peut produire le moteur hydraulique en tout début de restitution d’énergie.

Cmot hy = x 0,96 = x 0,96 = 536,13 N∙m

**Question 27 :** montrer que la force motrice totale sur les roues peut s’exprimer sous la forme ci-dessous.



Croue = Cmoteur x Rbc x ηbc x Rp x ηp

Croue = Fmotrice x rroue ===> Fmotrice = Croue / rroue  en remplaçant Croue par l’équation précédente on obtient :



**Question 28 :** le moteur hydraulique fournissant un couple de 560 N∙m, déterminer la force motrice maximale.

Fmotrice =

**Question 29 :** en négligeant l’inertie des pièces en rotation et les différentes résistances parasites (frottements, résistance au roulement…), déterminer l’accélération maximale théorique du bus sur terrain plat.

FN = m kg x a m∙s-² a = = 1,145 m∙s-²

**Question 30 :** Pour obtenir une accélération du véhicule de 1 m∙s-², suivant la demande du conducteur, le calculateur modifie le courant de consigne (de 0,2 à 0,26 A). La cylindrée du moteur hydraulique passe alors de 110 cm3∙tr-1 à une nouvelle cylindrée stable de 100 cm3∙tr-1. En exploitant le dossier technique, expliquer dans le détail, comment la cylindrée du moteur hydraulique va être réduite et stabilisée à 100 cm3∙tr-1.

Selon la courbe d’évolution de la cylindrée en fonction du courant de solénoïde, la cylindrée est de 100 cm3∙tr-1 pour un courant de 0,26 A.

L’augmentation du courant électrique dans le solénoïde provoque un déséquilibre sur le distributeur, la force électromagnétique devient supérieure à l’effort du ressort. La case a du distributeur prend la place de la case b. La pression d’alimentation du moteur hydraulique vient alimenter le vérin de modification de la cylindrée, ce qui réduit la cylindrée. Dans le même temps l’action antagoniste du ressort augmente par la liaison mécanique avec le piston de variation de cylindrée. Lorsque l’action du ressort devient supérieure à la force électromagnétique, la case b du distributeur reprend la position initiale. La cylindrée est ainsi stabilisée sur une valeur correspondant au courant de consigne.

**Question 31 :** dans le cas d’une accélération de 1 m∙s-², l’accumulateur hydropneumatique peut participer à la mise en mouvement du véhicule sur une distance d’environ 25 m. Expliquer pourquoi ce dispositif hydropneumatique n’est pas capable à lui seul de maintenir l’accélération sur les 25 m.

Au fur et à mesure de la vidange de l’accumulateur hydropneumatique, la pression baisse. Ce qui réduit le couple du moteur hydraulique, la force motrice et au final l’accélération.

**B-4 Diagnostic du système hydropneumatique :** l’objectif de cette sous-partie est de déterminer les éléments susceptibles d’être en cause lors d’une accélération insuffisante du bus au départ de la station.

**Question 32 :** en se limitant au système hydraulique et ses commandes indiquer dans un tableau (modèle ci-après à reproduire sur feuille de copie) les causes principales du dysfonctionnement et pour chaque cause les éléments qui peuvent en être à l’origine.

|  |  |
| --- | --- |
| **Causes principales** | **Éléments défectueux** |
| Pression d’alimentation du moteur hydraulique insuffisante (< 339 bar au moment du démarrage) | * Fuite (robinet 4 ; limiteur 5 ou 17 ; électrovanne15 ; valve de blocage 13 ; clapets antiretour 14 ou 25 ; moteur hydraulique) * Ouverture partielle (valve de blocage 13 ; électrovanne18) * Accumulateur défectueux (pas d’azote) |
| Contre pression sur le refoulement du moteur hydraulique trop élevée (> 20 bar au moment du démarrage) | * Ouverture partielle (électrovanne12) * Pression accumulateur trop élevée (Pression azote > 15 bar ou volue d’huile trop important) |
| Cylindrée du moteur hydraulique trop faible (< 110 cm3 au moment du démarrage) | Blocage mécanique qui empêche d’atteindre la cylindrée maxi.  Commande de variation de cylindrée défectueuse (Courant de commande insuffisant ou mauvais réglage du ressort) |

**Partie C: moteur thermique**

**C-1  Analyse des performances:** l’objectif de cette sous-partie est d’analyser les caractéristiques et les performances du moteur thermique.

**Question 33 :** pour lutter contre la pollution atmosphérique, l’Union Européenne a établi des normes strictes concernant les rejets des véhicules. La norme Euro 6 qui s’applique actuellement à tous les types de véhicules limite les émissions de NOx et de particules. Indiquer les facteurs qui sont à l’origine de la production de NOx d’une part, de particules d’autre part.

La production de particules a pour origine de mauvaises conditions dans la réalisation de la combustion qui reste incomplète (manque oxygène, mauvaise pulvérisation du gas-oil, température insuffisante, manque de turbulences dans la chambre de combustion …)

La production de NOx est provoquée par l’excès d’oxygène et la température élevée dans la chambre de combustion.

**Question 34 :** le moteur est équipé d’un DOC, d’un filtre à particules, d’une valve EGR et d’un SCR. Indiquer précisément la fonction de chacun de ces éléments et leur finalité en termes de polluants.

**DOC :** catalyseur d’oxydation (Diesel Oxydation Catalist) est un système passif utilisé pour combattre les monoxydes de carbone et réduire également les hydrocarbures (HC) produits par les gaz d’échappement.

Lors du passage dans le catalyseur métallique, les gaz nocifs sont retenus sur les parois des cellules recouvertes de métaux précieux. Sous l’effet de la température, une réaction thermique les transforme alors en vapeur d’eau et en dioxyde de carbone.

**Filtre à particules :** un filtre à particules (ou FAP) est un système de filtration utilisé pour retenir les fines particules, cancérogènes pour l'homme, contenues dans les gaz de combustion, des moteurs Diesel. Les particules sont détruites par la haute température du filtre (en fonctionnement en puissance ou lors de la régénération).

**Valve EGR :** la valve EGR permet de réduire la production de NOx lors de la combustion en injectant une partie des gaz d’échappement dans l’admission. Ceci permet de réduire la quantité d’oxygène et la température de combustion, ce qui réduit la production de NOX.

**SCR :** la réduction catalytique sélective (RCS) (ou Selective Catalytic Reduction - SCR en anglais) est utilisée pour réduire les oxydes d'azote (NOx) émis par les moteurs. La réaction d'oxydoréduction mise en œuvre transforme les NOx en diazote N2 et en eau. Cette conversion est rendue possible par l'injection d'un agent réducteur « ad blue » injecté en amont du catalyseur.

**Question 35 :** à partir de la courbe caractéristique du moteur (DT7), déterminer pour un régime moteur de 1400 tr∙min-1 :

* le couple maximum disponible Cmax = 350 N∙m
* la puissance maximum disponible P1400 = 51,3 kW
* la consommation spécifique au couple maximum Cs = 210 gr kW-1∙h-1
* la consommation horaire (en l∙h-1) au couple maximum

0.210 x 51,3 / 0,85 = 12,7 l∙h-1

* le rendement du moteur au couple maximum ηmoteur = = 0,383 soit 38 %
* la plage idéale d’utilisation en vitesse et en couple. 1300 à 1900 tr∙min-1 pour un couple compris entre 320 et 350 Nm

**Question 36 :** la sous partie A-1 a permis de montrer que 450 kJ d’énergie pouvaient être économisés sur 500 m (entre 2 stations). Pour une chaîne d’énergie (moteur thermique + transmission) ayant un rendement global de 30%, déterminer la masse de carburant qu’il est possible d’économiser pour 100 km parcourus.

Mc = = 0,033 kg M 100km  = 6.6 kg

**Question 37 :** déterminer le volume de carburant que la récupération d’énergie permet d’économiser pour 100 km parcourus.

V =

**C-2 Diagnostic :** l’objectif de cette sous-partie est d’identifier la cause d’une surconsommation journalière de carburant.

**Question 38 :** en fonction du tableau de relevés sur DRES1 montrer que le couple moteur est bien de 283 N⋅m pour un régime moteur de 1400 tr∙min-1.

CN.m =

**Question 39 :** analyser les résultats obtenus et conclure sur les causes de la surconsommation journalière du moteur.

Constatations en comparaison avec la courbe du constructeur:

* la consommation horaire est bonne (l’énergie introduite dans le moteur est conforme)
* la consommation spécifique est plus élevée (mauvais rendement énergétique du moteur)
* le couple moteur est inférieur aux données et l’écart est plus important à bas régime (l’énergie restituée est insuffisante en particulier en bas régime)

**Conclusion :** deux causes principales sont possibles

* manque d’étanchéité au niveau de la chambre de combustion (soupapes, segmentation, culasse)
* mauvaise combustion (qualité d’injection, masse d’air frais introduite insuffisante (pression turbo, vanne EGR..)

Nota : une mauvaise évacuation des gaz brulés est exclue (freinage des gaz d’échappement) car son effet augmenterait avec le régime moteur. Les relevés montrent le contraire.

**Question 40 :** proposer des tests et mesures complémentaires pour identifier précisément l’origine de la surconsommation journalière du moteur.

* Contrôle de la pression turbo
* Test de compression
* …

**Partie D : système électrique de propulsion**

**D-1 Performances du système :** l’objectif de cette sous-partie est d’analyser les caractéristiques et les performances du système électrique de propulsion.

**Question 41 :** donner en kJ l’énergie stockée par les batteries.

45 x 3600 x 2 = 324 000 kJ

**Question 42 :** déterminer le rendement global de la chaîne d’énergie (des batteries aux roues).

= 0,90 x 0,95 x 0,92 x 0,88 x 0,90 = 0,623 soit 62,3 %

**Question 43 :** pour une énergie restituable par les batteries de 280 000 kJ, déterminer l’énergie motrice utile.

280 000 x 0.623= 174 436 kJ

**Question 44 :** l’énergie stockée consommée entre 2 stations distantes de 500 m étant de 950 kJ (déduction faite de l’énergie récupérée réutilisée), déterminer la distance qu’il est possible de parcourir sur l’autonomie des batteries.

174 436 kJ / (950 x 2) = 91.8 km

**D-2 Conclusion sur les performances du système**

**Question 45 :** comparer la chaîne d’énergie électrique et la chaîne d’énergie hydraulique et justifier le choix du système multi-hydride par le constructeur.

Sur un cycle accumulation - restitution d’énergie les rendements sont de :

* (0.94 x 0.99 x .99)² = 0.85 soit 85 % pour le système hydropneumatique
* (0.92 x 0.88 x 0.90)² = 0.53 soit 53 % pour le système électrique

Les meilleures performances dans l’accumulation et la restitution de l’énergie du système hydropneumatique expliquent le choix du multi hybride.