Ce document a été mis en ligne par l'organisme FormaV®.

Toute reproduction, représentation ou diffusion, même partielle, sans autorisation préalable, est strictement interdite.

Pour en savoir plus sur nos formations disponibles, veuillez visiter :
formav.co/explorer

BTS Moteurs à combustion interne - Épreuve E4 Étude des constructions

Session 2015 • Code sujet : **1506MOEDC - Sujet n°02ED14** • Durée : **6 heures** • Coefficient : **4**

Sommaire

Cliquez sur une partie pour y accéder directement

1. Étude de la transmission hybride de première génération (6 questions) **Page 3**

2. Valorisation énergétique du système hybride (15 questions) **Page 5**

3. Étude de la transmission par chaîne silencieuse (5 questions) **Page 11**

4. Évolution cinématique entre les transmissions hybrides de première et troisième générations (12 questions) **Page 13**

5. Transmission hybride de troisième génération et conception du guidage de l'arbre intermédiaire (3 questions) **Page 18**

6. Ce qu'il faut retenir & Questions fréquentes (FAQ) (Synthèse & Q&A Examen) **Page 20**

Sujet officiel (PDF) : https://btsmte.fr/assets/annales/bts-mte/E4.1 - Réalisation d'une campagne d'essais/2015/BTS MTE - E4.1 - Réalisation d'une campagne d'essais - Session 2015 - 1-Sujet.pdf

1. Étude de la transmission hybride de première génération

L'étude porte sur la transmission de première génération de la Prius hybride, notamment son train épicycloïdal et son réducteur. Il faut établir les relations cinématiques entre la vitesse du véhicule et les régimes du moteur thermique, du moteur électrique et de la génératrice.

Question 1.1. Calculer le rapport de transmission du réducteur entre l'arbre de sortie du moteur électrique ME et les roues R : K = ωR/ωME = ω10/0/ω5/0.

Le rapport global est le produit des rapports de la chaîne, des engrenages 7-8 et 9-10 : $K = \frac{N_6}{N_5} \times \frac{N_8}{N_7} \times \frac{N_{10}}{N_9} = \frac{Z_5}{Z_6} \times \frac{Z_7}{Z_8} \times \frac{Z_9}{Z_{10}}$. Avec $Z_5 = 36$, $Z_6 = 35$, $Z_7 = 30$, $Z_8 = 44$, $Z_9 = 26$ et $Z_{10} = 75$, on obtient un rapport inférieur à 1, cohérent avec une réduction de vitesse.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $K = \frac{\omega_R}{\omega_{ME}} \approx 0{,}2431$.

Question 1.2. Établir la relation entre la vitesse du véhicule V et la fréquence de rotation de la roue NR.

En une révolution, la roue parcourt sa circonférence πD. À la fréquence N_R en tr/min, elle parcourt donc $\pi D N_R$ mètres par minute. Avec le diamètre $D = 0{,}600$ m, la conversion en km/h donne $V = \frac{\pi D N_R \times 60}{1000}$. On isole ensuite N_R pour obtenir la relation inverse.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $V = 0{,}1131 N_R$ km/h, donc $N_R = 8{,}84V$ tr/min.

Question 1.3. Exprimer V en fonction de NS = NME et montrer que NS = 36,38 V, avec NS en tr/min et V en km/h.

La vitesse de rotation du moteur électrique est liée à celle des roues par le rapport du réducteur : $N_S = N_{ME} = N_R / K$. Avec $N_R = 8{,}8419V$ et $K = 0{,}2431169$, on obtient $N_S = (8{,}8419 / 0{,}2431169)V$. Le coefficient est arrondi au centième.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $N_S = 36{,}38V$, avec N_S en tr/min et V en km/h.

Question 1.4. À l'aide de la formule de Willis, exprimer et calculer la raison λ du train épicycloïdal en fonction des nombres de dents, puis montrer les relations ω2/0 - 3,6 ω1/0 + 2,6 ω3/0 = 0 et NGE - 3,6 NMT + 2,6 NME = 0.

La formule de Willis donne $\lambda = (\omega_2 - \omega_1)/(\omega_3 - \omega_1)$. Pour ce train, $\lambda = -Z_3/Z_2 = -52/20 = -2{,}6$. Ainsi, $\omega_2 - \omega_1 = -2{,}6(\omega_3 - \omega_1)$, soit $\omega_2 - 3{,}6\omega_1 + 2{,}6\omega_3 = 0$. La même relation s'applique aux fréquences de rotation, car leur conversion en vitesses angulaires est identique pour chaque arbre.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$\lambda = -2{,}6$ et $N_{GE} - 3{,}6N_{MT} + 2{,}6N_{ME} = 0$.

Question 1.5. Vérifier et interpréter les courbes de fonctionnement de la figure 5 du DT5 à l'aide de la relation précédente : déterminer NGE lorsque NMT = 0, puis NMT lorsque NGE = 0.

On applique $N_{GE} - 3{,}6N_{MT} + 2{,}6N_{ME} = 0$. Si $N_{MT} = 0$, alors $N_{GE} = -2{,}6N_{ME}$: la génératrice tourne en sens opposé au moteur électrique, comme sur la courbe de fonctionnement tout électrique. Si $N_{GE} = 0$, alors $N_{MT} = (2{,}6/3{,}6)N_{ME} \approx 0{,}722N_{ME}$. La courbe hybride sans génération présente bien des régimes moteur thermique et électrique de même signe.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$N_{MT} = 0 \Rightarrow N_{GE} = -2{,}6N_{ME}$; $N_{GE} = 0 \Rightarrow N_{MT} \approx 0{,}722N_{ME}$.

Question 1.6. Au passage du mode électrique au mode thermique, le véhicule roule à 50 km/h sans génération d'énergie, donc NGE = 0. Calculer les fréquences de rotation NME et NMT.

À $V = 50$ km/h, la relation de la question 1.3 donne $N_{ME} = 36{,}38 \times 50$. Comme $N_{GE} = 0$, la relation cinématique devient $N_{MT} = (2{,}6/3{,}6)N_{ME}$. Le calcul donne les régimes du moteur électrique et du moteur thermique au passage au mode thermique.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$N_{ME} = 1\,819$ tr/min et $N_{MT} \approx 1\,314$ tr/min.

2. Valorisation énergétique du système hybride

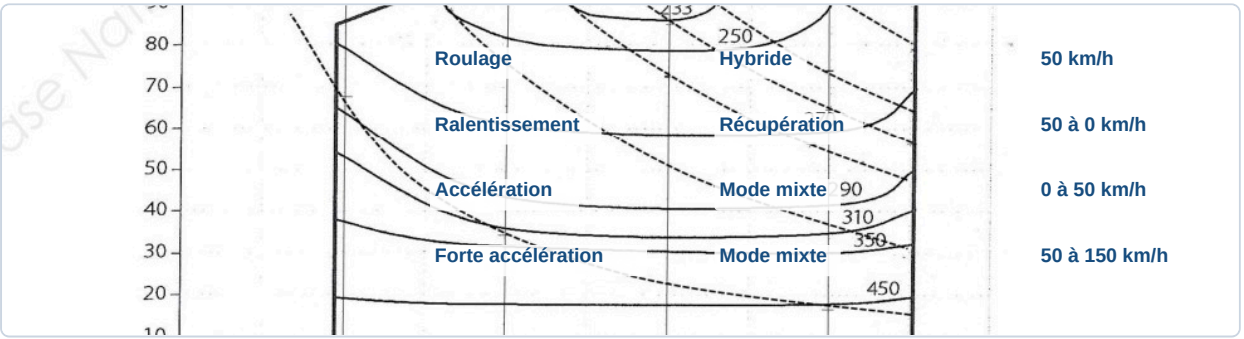
Les questions s'appuient sur les courbes expérimentales, les modes de fonctionnement du HSD et les caractéristiques du véhicule, de ses moteurs et de sa batterie. Elles portent sur les puissances, la consommation, l'autonomie et la récupération d'énergie au freinage ou en descente.

Question 2.1. À partir des courbes de la figure 7 du DR1 et des modes du tableau 1 du DT4, compléter le tableau du DR1 en indiquant pour chaque intervalle la phase, le mode et la vitesse du véhicule.

Les intervalles de temps sont ceux du tableau DR1. La vitesse et les échanges de puissance de la figure 7 permettent d'identifier les phases, puis le tableau DT4 associe chaque phase à un mode : traction électrique, fonctionnement hybride, récupération au freinage ou mode mixte lors d'une forte accélération.

Temps	Phase	Mode	Vitesse
0 à 4 s	Démarrage	Tout électrique	0 à 50 km/h
4 à 18 s	Roulage	Hybride	50 km/h
18 à 34 s	Ralentissement	Récupération d'énergie	50 à 0 km/h
34 à 38 s	Accélération	Mode mixte	0 à 50 km/h
Plus de 38 s	Forte accélération	Mode mixte	50 à environ 150 km/h

Tableau DR1 complété



✓ **RÉPONSE À RETENIR**

Modes successifs : tout électrique, hybride, récupération, mixte, mixte.

Question 2.2. Écrire l'équation de la puissance résistante Pres à la jante, à vitesse constante sur sol horizontal, à partir des efforts de pénétration dans l'air et de résistance au roulement. Calculer Pres à 50 km/h et à 90 km/h.

À vitesse constante sur sol horizontal, la puissance résistante à la jante est le produit de la vitesse par la somme des efforts aérodynamique et de roulement :

$P_{res} = (\frac{1}{2}\rho_{air} S C_x V^2 + kMg)V$. On utilise $\rho_{air} = 1,2$, $SC_x = 0,55$, $k = 0,03$, $M = 1360$ kg et $g = 9,81$ m/s². La vitesse doit être convertie en m/s : $V = V_{km/h}/3,6$.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$P_{res}(50) = 6,44$ kW ; $P_{res}(90) = 15,16$ kW.

Question 2.3. Calculer la puissance nécessaire à l'arbre de sortie PS à 50 km/h et à 90 km/h, en tenant compte du rendement du train épicycloïdal égal à 1 et du rendement réducteur plus chaîne égal à 0,9.

La puissance résistante est fournie à travers le train épicycloïdal, de rendement 1, puis le réducteur et la chaîne, de rendement 0,9. La puissance nécessaire à l'arbre de sortie est donc la puissance à la jante divisée par le rendement global : $P_S = P_{res}/(1 \times 0,9)$. On applique ce rapport aux deux valeurs calculées en 2.2.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$P_S(50) = 7,16$ kW ; $P_S(90) = 16,85$ kW.

Question 2.4. À 50 km/h en mode tout électrique, avec une puissance de 7,2 kW, calculer la puissance électrique nécessaire au moteur électrique, puis l'autonomie de la voiture en temps et en distance avec la batterie initialement pleine.

Le moteur fournit 7,2 kW mécaniques avec un rendement de 0,95, donc la puissance électrique absorbée vaut $7,2/0,95$. La batterie contient 1,86 kWh et son rendement en décharge est 0,95 : l'énergie disponible est $1,86 \times 0,95$ kWh. La durée est cette énergie divisée par la puissance absorbée. À 50 km/h, la distance est le produit de la vitesse par cette durée en heures.

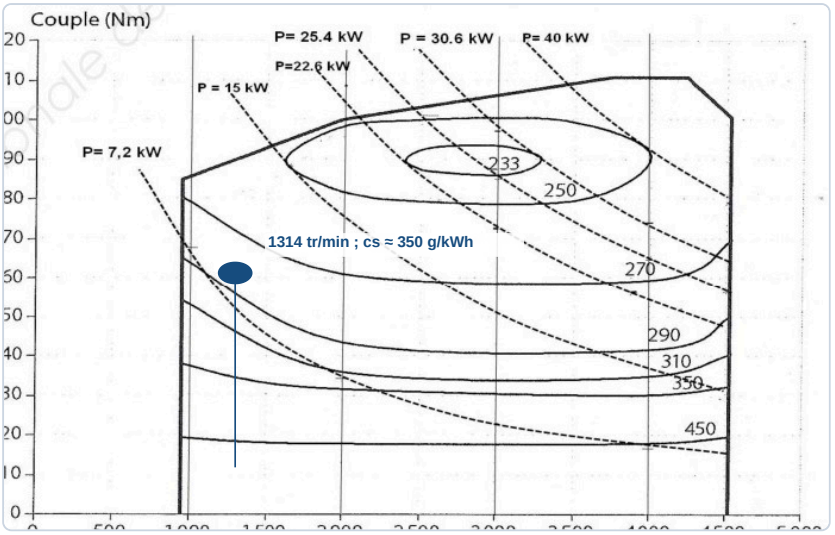
✓ RÉPONSE À RETENIR

Puissance électrique : 7,58 kW ; autonomie : 14,0 min, soit 11,7 km.

Question 2.5. À partir de la courbe de consommation spécifique de la figure 8 du DR1, relever la consommation spécifique cs à 1314 tr/min pour une puissance de 7,2 kW et faire apparaître les traces de lecture.

Sur la figure 8, repérer 1314 tr/min sur l'axe horizontal et rejoindre la courbe isopuissance de 7,2 kW. La courbe de consommation spécifique traversant ce point donne une lecture graphique d'environ 350 g/kWh. La verticale à 1314 tr/min et le point de fonctionnement sont indiqués sur le document. La lecture est approximative en raison de la précision du graphique.

Lecture graphique à 1314 tr/min



✓ **RÉPONSE À RETENIR**

$c_s \approx 350$ g/kWh à 1314 tr/min et 7,2 kW.

Question 2.6. Pour un déplacement à 50 km/h en mode thermique et une puissance de 7,2 kW, calculer la consommation de la voiture en grammes puis en litres aux 100 km.

À 50 km/h, le véhicule parcourt 50 km en une heure. Avec $c_s = 350$ g/kWh et une puissance de 7,2 kW, la consommation horaire est $350 \times 7,2$ g. Cette masse correspond aux 50 km parcourus ; pour l'exprimer en litres aux 100 km, on utilise la densité de 0,72 kg/L, soit 720 g/L.

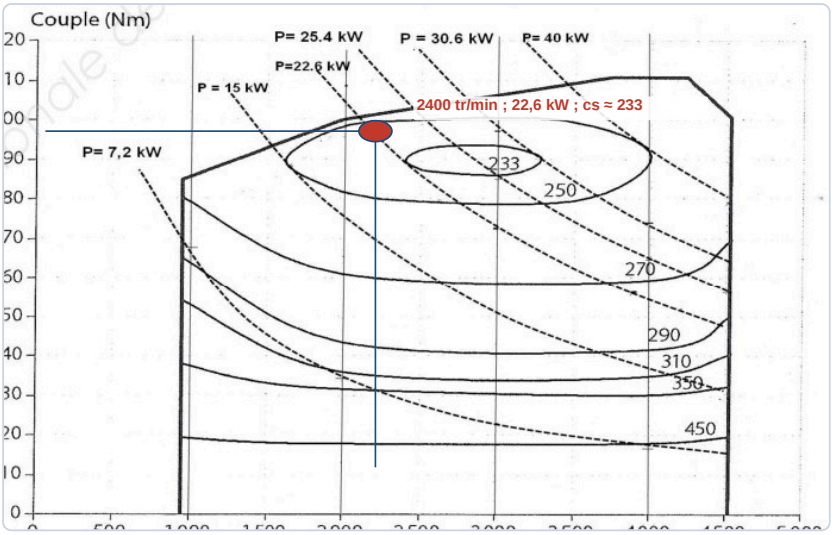
✓ **RÉPONSE À RETENIR**

Consommation : 2520 g pour 50 km, soit 7,00 L/100 km.

Question 2.7. Sur la courbe de consommation spécifique de la figure 8 du DR1, placer le point de fonctionnement correspondant à 22,6 kW et 2400 tr/min, puis relever la consommation spécifique cs et le couple moteur.

Sur la figure 8, le point se place à 2400 tr/min sur l'isopuissance de 22,6 kW. La courbe de consommation spécifique passant par ce point donne environ 233 g/kWh. Le couple correspondant se calcule par $C = 9550P/N$, avec P en kW et N en tr/min. Le point et ses projections sur les axes sont reportés sur le document.

Point de fonctionnement à 2400 tr/min



✓ **RÉPONSE À RETENIR**

$c_s \approx 233$ g/kWh ; $C \approx 89,9$ N·m.

Question 2.8. **Pour les trois minutes de fonctionnement en mode mixte à 50 km/h, calculer la quantité d'essence consommée en grammes puis en litres, ainsi que la distance parcourue d1.**

La durée de fonctionnement est $3/60$ h. La masse d'essence utilisée vaut $c_s Pt = 233 \times 22,6 \times 3/60$ g. Le volume est obtenu en divisant cette masse par 720 g/L. À vitesse constante de 50 km/h, la distance parcourue pendant ces trois minutes vaut $d_1 = 50 \times 3/60$ km.

✓ **RÉPONSE À RETENIR**

Essence : environ 263 g, soit 0,366 L ; $d_1 = 2,50$ km.

Question 2.9. **Calculer la puissance disponible à la génératrice PGE, en déduire la puissance électrique PEl, puis calculer la quantité d'énergie stockée pendant les trois minutes.**

Sur la puissance thermique de 22,6 kW, 7,2 kW servent à propulser le véhicule. La puissance mécanique disponible à la génératrice est donc $22,6 - 7,2$ kW. La génératrice fournit une puissance électrique égale à 0,95 fois cette valeur. L'énergie stockée pendant trois minutes est la puissance électrique multipliée par $3/60$ h et par le rendement de charge de la batterie, égal à 0,95.

✓ **RÉPONSE À RETENIR**

$P_{GE} = 15,4$ kW ; $P_{El} = 14,63$ kW ; énergie stockée : 0,695 kWh.

Question 2.10. Après l'arrêt du moteur thermique, le moteur électrique consomme 7,47 kW à 50 km/h. Calculer son temps de fonctionnement et la distance d2 parcourue avec l'énergie électrique stockée.

L'énergie stockée à la question précédente est de 0,694925 kWh. À la puissance électrique consommée de 7,47 kW, le moteur fonctionne pendant $t = E/P$. Cette durée est convertie en minutes. À 50 km/h, la distance parcourue est la vitesse multipliée par la durée exprimée en heures.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> Temps : 5,58 min ; distance $d_2 \approx 4,65$ km.

Question 2.11. Calculer la consommation moyenne du véhicule pendant le trajet d1 + d2, en litres aux 100 km.

La consommation thermique pendant les trois minutes est d'environ 0,36568 L ; le trajet électrique suivant ne consomme pas d'essence. La distance totale est $d_1 + d_2 = 2,50 + 4,65127$ km. La consommation moyenne en litres aux 100 km s'obtient en divisant le volume consommé par cette distance, puis en multipliant par 100.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> Consommation moyenne : environ 5,11 L/100 km.

Récupération de l'énergie

Question 2.12. Calculer l'énergie cinétique du véhicule de masse 1360 kg à 50 km/h, en joules puis en Wh.

L'énergie cinétique est donnée par $E_c = \frac{1}{2}MV^2$. La masse du véhicule vaut 1360 kg et sa vitesse en unités SI est $50/3,6$ m/s. Le calcul donne l'énergie en joules ; la conversion en wattheures s'effectue en divisant le résultat par 3600.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> $E_c \approx 1,312 \times 10^5$ J, soit 36,44 Wh.

Question 2.13. Calculer l'énergie récupérable à chaque arrêt en Wh, sachant que 70 % de l'énergie cinétique est récupérée.

Le document DT5 fixe à 70 % la part de l'énergie cinétique récupérable au freinage. L'énergie récupérée lors d'un arrêt est donc $E_{rec} = 0,70E_c$. On applique ce taux à l'énergie cinétique en Wh obtenue pour une vitesse de 50 km/h.

✓ RÉPONSE À RETENIR

Énergie récupérable par arrêt : environ 25,51 Wh.

Question 2.14. Calculer la distance parcourue en mode électrique avec l'énergie récupérée, en considérant un rendement électrique global égal à 1, une puissance moteur de 7,47 kW à 50 km/h et 1 Wh = 3600 J.

Avec un rendement électrique global égal à 1, toute l'énergie récupérée, soit 25,51 Wh, est disponible pour le moteur. La durée de fonctionnement vaut l'énergie divisée par la puissance de 7,47 kW, convertie en 7470 W. À 50 km/h, la distance parcourue est cette durée en heures multipliée par 50 km/h.

✓ RÉPONSE À RETENIR

Distance électrique : environ 0,171 km, soit 171 m.

Question 2.15. Lors d'une descente de 5 km à 90 km/h sur une pente de 10 %, calculer la puissance Préc et l'énergie Eréc récupérées, puis le pourcentage de recharge de la batterie en tenant compte de son rendement.

À 90 km/h, $V = 25$ m/s ; parcourir 5 km prend 200 s. En descente, la puissance gravitaire disponible correspond à la puissance de pesanteur moins les pertes aérodynamiques et de roulement. Le bilan est multiplié par $\eta_R = 0,9$, $\eta_T = 1$ et $\eta_{GE} = 0,95$. L'énergie stockée tient ensuite compte du rendement de charge de la batterie, 0,95.

✓ RÉPONSE À RETENIR

Puissance récupérée : 15,35 kW ; énergie récupérée : 0,853 kWh ; énergie stockée : 0,810 kWh, soit 43,6 % de la capacité.

3. Étude de la transmission par chaîne silencieuse

La chaîne silencieuse transmet le couple dans la transmission hybride de première génération. Il faut calculer les efforts sur les lamelles, évaluer les contraintes dans une section et repérer le risque de rupture à partir du document de simulation par éléments finis.

Question 3.1. À l'aide du DT7, calculer le diamètre primitif du pignon 6, puis en déduire l'effort tangentiel transmis dans la chaîne.

Le pignon 6 a 35 dents et le pas vaut 12,70 mm. Ainsi, $\alpha = 180/35$ degrés et $d_6 = p/\sin\alpha = 141,68$ mm. Le pignon 5, solidaire du moteur électrique, transmet un couple de 400 N·m. Avec $N_5/N_6 = Z_6/Z_5 = 35/36$, le couple sur le pignon 6 vaut $C_6 = 400 \times 35/36 = 388,9$ N·m. L'effort tangentiel est alors $T = 2C_6/d_6$.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> d_6 = 141,68 mm ; T ≈ 5,49 kN.

Question 3.2. La chaîne est constituée de maillons assemblés avec 5 ou 6 lamelles. Calculer l'effort de traction maximal dans une lamelle.

Le maillon le moins chargé en lamelles en comporte 5, contre 6 pour l'autre cas. En supposant une répartition uniforme de l'effort entre les lamelles, le cas le plus défavorable donne $T_{lamelle} = T/5$. On reprend l'effort transmis calculé en 3.1, soit environ 5 489 N. Avec 6 lamelles, l'effort par lamelle serait plus faible ; la valeur obtenue avec 5 lamelles est donc à retenir comme maximum.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> Effort maximal par lamelle : environ 1,10 kN.

Question 3.3. En prenant un effort tangentiel T = 1100 N, déterminer le torseur de cohésion dans la section S1 en G. Calculer les contraintes normales dues à la traction et à la flexion, puis en déduire la contrainte maximale dans cette section.

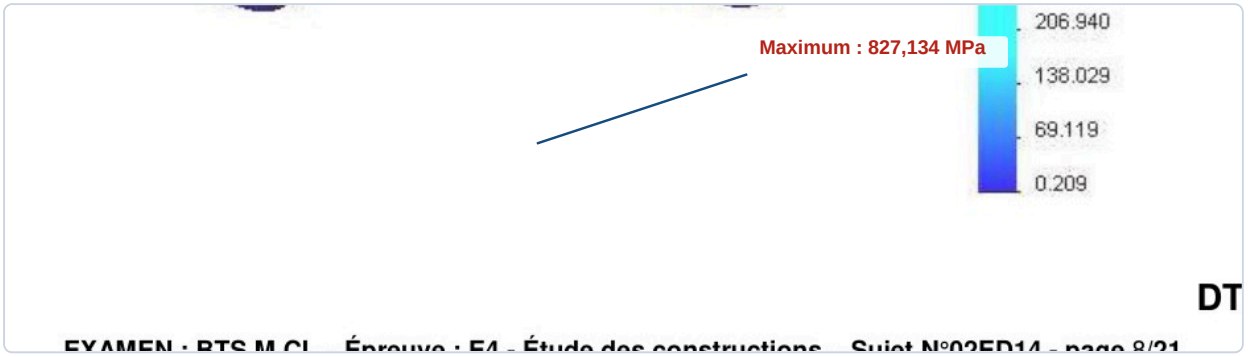
Dans la section S1, la traction vaut $N = 1100$ N. Le décalage de 2,8 mm entre la ligne d'action et G crée un moment fléchissant de 3 080 N·mm autour de z ; les autres composantes sont nulles. Avec $b = 1,5$ mm et $h = 5,6$ mm, $S = bh = 8,4$ mm² et $I_{Gz}/v = bh^2/6 = 7,84$ mm³. Sur la fibre la plus sollicitée, traction et flexion s'ajoutent.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> En G : N = 1 100 N, Mz = 3 080 N·mm ; σT = 131 MPa, σMf = 393 MPa, σmax = 524 MPa.

Question 3.4. À partir de la figure 6 du DT7, retrouver la contrainte maximale dans la section S1 étudiée à la question 3.3, indiquer où se situe le risque de rupture et nommer le phénomène correspondant.

La barre de von Mises de la figure 6 indique un maximum de 827,134 MPa. La zone rouge correspond au raccordement intérieur de l'encoche centrale, au pied de la petite partie horizontale. Cette hausse locale par rapport à la contrainte nominale calculée en 3.3 est une concentration de contraintes. C'est à cet endroit que la lamelle est la plus exposée à une amorce de rupture.

Maximum de contrainte sur la lamelle



✓ RÉPONSE À RETENIR

Maximum simulé : 827,134 MPa, au fond de l'encoche centrale ; risque lié à une concentration de contraintes.

Question 3.5. Déterminer la résistance minimale que doit avoir le matériau pour résister.

Pour éviter la plastification, la contrainte équivalente maximale de von Mises ne doit pas dépasser la limite élastique du matériau. Le critère à retenir est donc $R_e \geq 827,134$ MPa, valeur maximale lue sur la simulation de la lamelle. Cette exigence correspond au seuil théorique sans coefficient de sécurité ; si un coefficient est imposé au dimensionnement, il faut augmenter la résistance requise en conséquence.

✓ RÉPONSE À RETENIR

Limite élastique minimale requise : Re ≥ 827,134 MPa, avant coefficient de sécurité.

4. Évolution cinématique entre les transmissions hybrides de première et troisième générations

Cette partie compare les rapports cinématiques des deux générations de transmission à partir du schéma de troisième génération et du document réponse DR2. La génératrice est à l'arrêt pour déterminer les régimes du moteur thermique et du moteur électrique à 50 km/h.

Train épicycloïdal 1

Question 4.11. Écrire la relation entre ω1/0 et VC1/0.

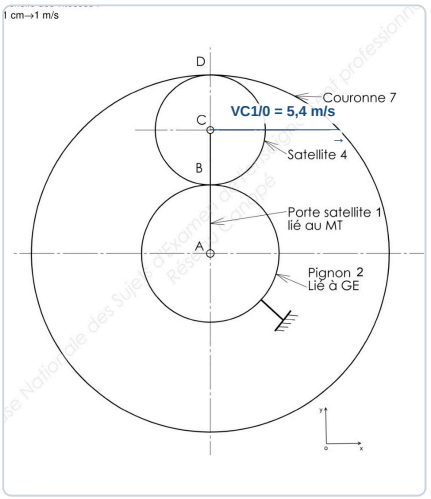
Le point C, centre du satellite 4, est entraîné par le porte-satellite 1 autour de A. D'après le DR2, $AC = AB + BC = 30 + 24 = 54$ mm. Sa vitesse est tangentielle à sa trajectoire circulaire, donc perpendiculaire à AC. La relation vectorielle s'écrit comme le produit de la vitesse angulaire du porte-satellite par le rayon $\overrightarrow{AC}$.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $\vec{V}_{C1/0} = \vec{\omega}_{1/0} \times \overrightarrow{AC}$, avec $AC = 54$ mm.

Question 4.12. Calculer puis tracer le vecteur VC1/0 sur le document réponse DR2, en prenant ω1/0 = 100 rad/s.

Le rayon vaut $AC = 54$ mm, soit $0,054$ m. Pour $\omega_{1/0} = 100$ rad/s, la norme de la vitesse est $100 \times 0,054 = 5,4$ m/s. Le porte-satellite tournant dans le sens horaire et C étant au-dessus de A, le vecteur vitesse est dirigé vers la droite. À l'échelle du DR2, il mesure 5,4 cm : tracer le vecteur à partir de C.

Vecteur vitesse en C



> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $\vec{V}_{C1/0} = 5,4$ m/s vers la droite, soit 5,4 cm sur le DR2.

Question 4.13. Justifier l'égalité VC1/0 = VC4/0.

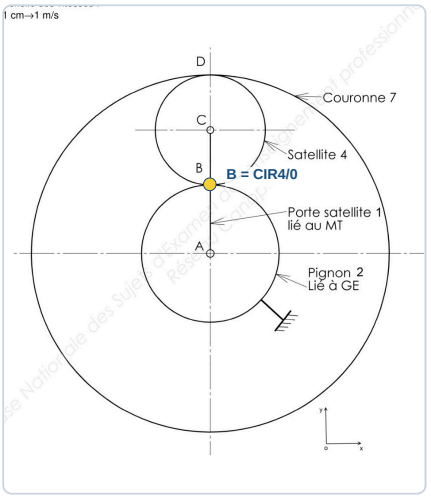
C est le point commun de liaison entre le satellite 4 et le porte-satellite 1. Dans une liaison pivot idéale, les deux solides ont la même vitesse au point commun. Le vecteur vitesse de C par rapport au bâti est donc identique, qu'on l'exprime pour le porte-satellite ou pour le satellite. Cette égalité concerne bien le même point C, et non deux points différents.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $\vec{V}_{C1/0} = \vec{V}_{C4/0}$, car C est le point commun de la liaison pivot.

Question 4.14. Le pignon 2 lié à la génératrice étant fixe, en déduire le centre instantané de rotation CIR4/0.

Le pignon 2 lié à la génératrice est immobilisé. Au contact B avec le satellite 4, le roulement sans glissement impose une vitesse nulle au point B du satellite par rapport au bâti. Un solide en mouvement plan dont un point a une vitesse nulle tourne instantanément autour de ce point. Le centre instantané de rotation du satellite 4 par rapport au bâti est donc B.

Centre instantané de rotation

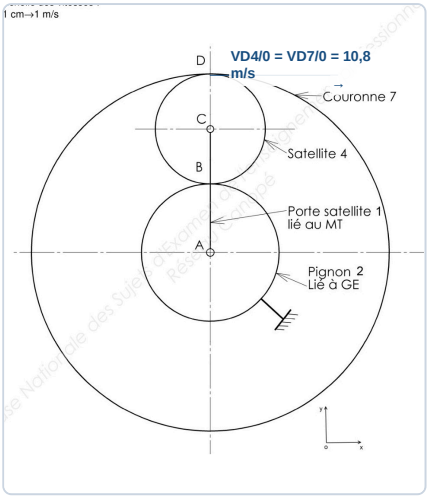


> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $CIR_{4/0} = B$.

Question 4.15. À l'aide du CIR4/0, déterminer VD4/0, puis en déduire VD7/0.

Le satellite tourne autour de B. Comme $BC = 24$ mm et $V_{C4/0} = 5,4$ m/s, sa vitesse angulaire vaut $5,4/0,024 = 225$ rad/s. Le point D est à $BD = BC + CD = 24 + 24 = 48$ mm de B. Sa vitesse vaut donc $225 \times 0,048 = 10,8$ m/s. Au contact sans glissement en D, le point correspondant de la couronne 7 a la même vitesse, dirigée vers la droite.

Vitesse au contact D



✓ RÉPONSE À RETENIR

$\vec{V}_{D4/0} = \vec{V}_{D7/0} = 10,8$ m/s vers la droite.

Question 4.16. Écrire la relation entre ω7/0 et VD7/0, puis calculer ω7/0.

La couronne 7 tourne autour de A et le point D décrit un cercle de rayon $AD = 78$ mm, soit $0,078$ m. La relation cinématique est $\vec{V}_{D7/0} = \vec{\omega}_{7/0} \times \overrightarrow{AD}$. Avec la vitesse de D dirigée vers la droite au sommet de la couronne, la rotation est horaire, donc négative avec l'axe du schéma. On obtient $\omega_{7/0} = -10,8/0,078$.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$\omega_{7/0} \approx -138,46$ rad/s, sens horaire.

Question 4.17. Déduire le rapport kMT = ω7/0 / ω1/0 entre le moteur thermique et la couronne 7.

Le rapport demandé est $k_{MT} = \omega_{7/0}/\omega_{1/0}$. Les deux rotations étant horaires, le rapport est positif. Le pignon solaire 2 est fixe et la couronne 7 est liée au train épicycloïdal 1. La relation de Willis donne alors $k_{MT} = 1 + Z_2/Z_{7a}$. Avec les dentures du DT8, le rapport vaut $1 + 30/78$.

✓ RÉPONSE À RETENIR

$k_{MT} = \omega_{7/0}/\omega_{1/0} = 1,3846$.

Question 4.2. Calculer le rapport kRE = ω10/0 / ω7/0, puis le rapport global KT = kMT × kRE = ωR / ωMT = ω10/0 / ω1/0.

La couronne extérieure 7c entraîne la roue 8, puis le pignon 9 entraîne la couronne différentielle 10. Ces deux engrènements extérieurs inversent deux fois le sens de rotation. Le rapport de transmission est donc positif : $k_{RE} = (Z_{7c}/Z_8)(Z_9/Z_{10})$. Le rapport global moteur thermique-roues est le produit $K_T = k_{MT}k_{RE}$, avec les valeurs

de dentures du DT8.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $k_{RE} = 0,3060$ et $K_T = \omega_R/\omega_{MT} = 0,4237$.

Question 4.3. À 50 km/h, avec une fréquence de rotation des roues de 440 tr/min et une génératrice à l'arrêt, calculer la fréquence de rotation du moteur thermique.

Le rapport global vérifie $K_T = N_R/N_{MT}$. À 50 km/h, le sujet donne $N_R = 440$ tr/min et la génératrice est à l'arrêt, comme dans les conditions de calcul de la partie. On en déduit $N_{MT} = N_R/K_T$. En utilisant le rapport global établi en 4.2, la fréquence du moteur thermique est d'environ 1 038 tr/min.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $N_{MT} \approx 1\,038$ tr/min.

Question 4.4. Le porte-satellite 5 du train épicycloïdal (3, 5, 6, 7) étant fixe, calculer le rapport de réduction kME entre le moteur électrique et la couronne 7, puis le rapport KE entre le moteur électrique et les roues.

Le porte-satellite 5 étant fixe, le train épicycloïdal 2 fonctionne comme un réducteur simple. Le pignon 3 engrène intérieurement avec la couronne 7b : les rotations ont le même sens et $k_{ME} = \omega_{7/0}/\omega_{3/0} = Z_3/Z_{7b}$. Le rapport entre la couronne 7 et les roues est celui de 4.2. Ainsi, $K_E = k_{ME}k_{RE}$, avec les dentures indiquées dans le DT8.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $k_{ME} = 0,3793$ et $K_E = \omega_R/\omega_{ME} = 0,1161$.

Question 4.5. Calculer la fréquence de rotation du moteur électrique à 50 km/h.

Le rapport entre le moteur électrique et les roues est $K_E = N_R/N_{ME}$. Pour $N_R = 440$ tr/min à 50 km/h, la fréquence du moteur électrique vaut $N_{ME} = N_R/K_E$. En remplaçant K_E par $(22/58)(54/55)(24/77)$, on obtient environ 3 791 tr/min. Cette valeur reste inférieure à la limite de vitesse du moteur électrique indiquée dans le DT6.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> $N_{ME} \approx 3\,791$ tr/min à 50 km/h.

Question 4.6. Comparer les résultats obtenus avec ceux de la question 1.6 pour le système de première génération, puis conclure sur le moteur électrique.

En première génération, la relation donnée en 1.3 conduit à $N_{ME} = 36,38 \times 50 = 1\,819$ tr/min. Avec $N_{GE} = 0$, la relation de Willis impose $N_{MT} = (2,6/3,6)N_{ME}$, soit environ 1 314 tr/min. En troisième génération, on trouve environ 3 791 tr/min pour le moteur électrique et 1 038 tr/min pour le moteur thermique. Le moteur électrique tourne donc environ 2,08 fois plus vite.

> **✓ RÉPONSE À RETENIR**
>
> Le moteur électrique passe de 1 819 à 3 791 tr/min, soit environ 2,08 fois plus vite. Le moteur thermique passe d'environ 1 314 à 1 038 tr/min.

5. Transmission hybride de troisième génération et conception du guidage de l'arbre intermédiaire

Dans la transmission de troisième génération, la chaîne silencieuse est remplacée par une roue dentée et un arbre intermédiaire. L'étude vérifie la liaison cannelée transmettant le couple, puis demande de concevoir l'ensemble roue-arbre et son guidage par deux roulements dans le carter.

Transmission du couple

Question 5.11. À partir du document technique DT9, retrouver la valeur de l'effort qui engendre le couple entre la roue dentée 8 et le pignon arbré 9, puis calculer ce couple.

Au point B, la composante tangentielle de l'action vaut 5 260 N. Son bras de levier par rapport à l'axe de l'arbre est de 77,8 mm. Le couple transmis vaut donc, en valeur absolue, **C = 5 260 × 77,8 = 409 228 N·mm**, soit 409,2 N·m.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> Effort tangentiel : 5 260 N. Couple transmis : 409,2 N·m, soit environ 410 N·m.

Question 5.12. Pour un couple de 410 Nm, un diamètre minimal d'arbre de 35 mm, une longueur maximale de moyeu de 35 mm et une pression admissible de 80 MPa, choisir les dimensions de cannelures de série moyenne dans le DT10 et vérifier la condition de non-matage.

La série moyenne se centre sur le diamètre d. Pour un arbre de 35 mm, on retient la dimension immédiatement supérieure du tableau : **6 cannelures, d = 36 mm, D = 42 mm, B = 7 mm**. La hauteur vaut h = (42 − 36)/2 = 3 mm et A = 6 × 3 × 0,75 = 13,5 mm²/mm. Avec C = 410 000 N·mm et L = 35 mm, p = 2C/(A×L×D) = 41,3 MPa. La pression reste inférieure à 80 MPa : le non-matage est vérifié.

> ✓ **RÉPONSE À RETENIR**
>
> Cannelures série moyenne : 6 × 36 × 42 mm, largeur B = 7 mm. Pression : 41,3 MPa, inférieure à 80 MPa.

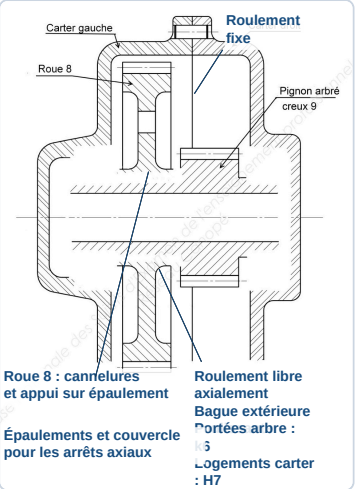
Conception de l'ensemble 8+9

Question 5.2. Sur le document réponse DR3, proposer une conception de l'ensemble roue dentée 8 et arbre intermédiaire 9, ainsi que de son guidage en rotation par rapport au carter. Utiliser deux roulements à billes de dimensions 35 × 72 × 17 mm, définir la liaison encastrement entre la roue et l'arbre, ajouter les coupes ou sections nécessaires et indiquer les jeux et ajustements.

Sur DR3, compléter l'ensemble par deux roulements 35 × 72 × 17 mm, montés sur des portées d'arbre k6 et dans des logements de carter H7. Immobiliser axialement le roulement fixe par épaulements et couvercle. L'autre roulement doit permettre la dilatation axiale, par coulissement de sa bague extérieure dans le carter.

Réaliser la liaison roue 8-arbre 9 par les cannelures choisies en 5.12, avec appui sur un épaulement et maintien axial par écrou freiné. Représenter les coupes nécessaires pour distinguer les cannelures, les portées de roulement et les arrêts axiaux.

Proposition de guidage et d’assemblage sur DR3



✓ RÉPONSE À RETENIR

Deux roulements 35 × 72 × 17 mm en montage fixe-libre. Roue 8 montée sur cannelures, en appui sur épaulement et retenue par écrou freiné.

Ce qu'il faut retenir de ce sujet (Session 2015)

Bilan de l'épreuve : Épreuve E4 du BTS Moteurs à combustion interne, session 2015, code 1506MOEDC, sujet n°02ED14, durée 6 heures, coefficient 4. À partir de la transmission hybride HSD de la Prius, le candidat étudie la cinématique des trains épicycloïdaux, les performances et bilans énergétiques, la résistance de la chaîne silencieuse, puis la transmission cannelée et la conception du guidage d'un arbre intermédiaire.

Notions-clés, formules & règles à maîtriser

- La formule de Willis relie les vitesses des planétaires à celle du porte-satellite, avec une convention de signe cohérente.
- La vitesse de rotation d'une roue dépend de la vitesse du véhicule et de sa circonférence de roulement.
- À vitesse constante, la puissance résistante est le produit de la force résistante par la vitesse : Pres = Frés × V.
- Pour vérifier le non-matage d'un assemblage cannelé, contrôler p = 2C/(A·L·D) < Padmissible.

Points de vigilance & attentes du jury

- Convertir les vitesses et les longueurs dans des unités cohérentes avant les calculs de puissance, d'énergie et de régime.
- Distinguer puissance mécanique, puissance électrique et énergie, et appliquer les rendements dans le sens du transfert.
- Lire les axes et unités des courbes DR1, puis faire apparaître les traces de relevé demandées.
- Sur DR3, représenter un montage réalisable et préciser les arrêts, les jeux et les ajustements des roulements.

Questions fréquentes sur cette épreuve (Q&A Examen)

Q : Comment utiliser la formule de Willis dans un train épicycloïdal ?

Exprimez les vitesses des planétaires relativement au porte-satellite, puis appliquez la relation associée aux nombres de dents. Gardez une convention de signe cohérente et tenez compte des éléments immobilisés ou liés aux arbres.

Q : Comment convertir l'énergie récupérée en distance parcourue en mode électrique ?

Convertissez l'énergie en kWh, puis divisez-la par la puissance consommée pour obtenir une durée en heures. Multipliez cette durée par la vitesse en km/h pour obtenir la distance en kilomètres.

Q : Le sujet donne-t-il un barème par question et des temps conseillés ?

Aucun barème chiffré par question n'est imprimé. Les temps conseillés sont de 30 minutes de lecture, puis 45 minutes, 1 h 30, 45 minutes, 1 heure et 1 h 30 pour les cinq parties.

Q : Quels éléments doivent figurer dans la conception demandée sur DR3 ?

Le dessin doit définir l'assemblage de la roue dentée et de l'arbre, ainsi que leur guidage par deux roulements de dimensions imposées. Les coupes utiles et les conditions fonctionnelles, notamment jeux et ajustements, doivent être indiquées.

Sujet officiel associé (PDF) : https://btsmte.fr/assets/annales/bts-mte/E4.1 - Réalisation d'une campagne d'essais/2015/BTS MTE - E4.1 - Réalisation d'une campagne d'essais - Session 2015 - 1-Sujet.pdf
Ressources BTS Motorisations Toutes Énergies : Toutes les annales & corrigés • Fiches de révision complètes • Simulateur de notes d'examen

Copyright © 2027 FormaV®. Tous droits réservés.

FormaV® est une marque déposée auprès de l'INPI sous le numéro 5227897.

Ce document a été élaboré par FormaV® avec le plus grand soin afin d'accompagner chaque apprenant vers la réussite de ses examens. Son contenu (textes, graphiques, méthodologies, tableaux, exercices, concepts, mises en forme) constitue une œuvre protégée par le droit d'auteur.

Toute copie, partage, reproduction, diffusion ou mise à disposition, même partielle, gratuite ou payante, est strictement interdite sans accord préalable et écrit de FormaV®, conformément aux articles L.111-1 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Dans une logique anti-plagiat, FormaV® se réserve le droit de vérifier toute utilisation illicite, y compris sur les plateformes en ligne ou sites tiers.

En utilisant ce document, vous vous engagez à respecter ces règles et à préserver l'intégrité du travail fourni. La consultation de ce document est strictement personnelle.

Merci de respecter le travail accompli afin de permettre la création continue de ressources pédagogiques fiables et accessibles.