

IMPORTANT : Soigner la présentation de votre copie ! Cela entrera dans la notation.

Une feuille de notes personnelles recto-verso est autorisée, ainsi qu'une calculatrice type collègue.

0 - CONTEXTE DE L'ÉTUDE ET DONNÉES

Cet exercice s'intéresse au système de motricité d'un véhicule hybride, c'est-à-dire couplant un moteur thermique et une machine électrique. Le système de propulsion hybride choisi est du type « parallèle » : l'utilisation des 2 moteurs peut se faire de manière séparée ou conjointe, suivant les points de fonctionnement à atteindre (Figure 1). Les fonctionnements en mode « moteur » (avec le moteur thermique et/ou le moteur électrique) ainsi qu'en mode « générateur » (ou « freinage », avec le générateur électrique) sont possibles.

La **transmission mécanique a un rendement constant de 95%** et elle est composée :

1. d'un embrayage (bloc « E »), permettant de connecter ou de déconnecter mécaniquement le moteur thermique à l'arbre de transmission entrant dans la boîte de vitesses. Son rapport de réduction ainsi que son rendement sont égaux et égal à 1 ;
2. d'une boîte de vitesses (BV) à 6 rapports, composée d'engrenages et servant à adapter la vitesse et le couple en sortie ;
3. d'un différentiel permettant de transmettre la puissance mécanique vers les 2 roues ; on considérera que le rapport de réduction R_{diff} de ce pont différentiel est égal à 4.

Enfin, des roues de diamètre 62 cm permettent d'assurer la liaison du véhicule avec le sol. Dans tous les cas, on supposera que le moteur thermique (lorsqu'il est embrayé) et la machine électrique tournent à la même vitesse de rotation.

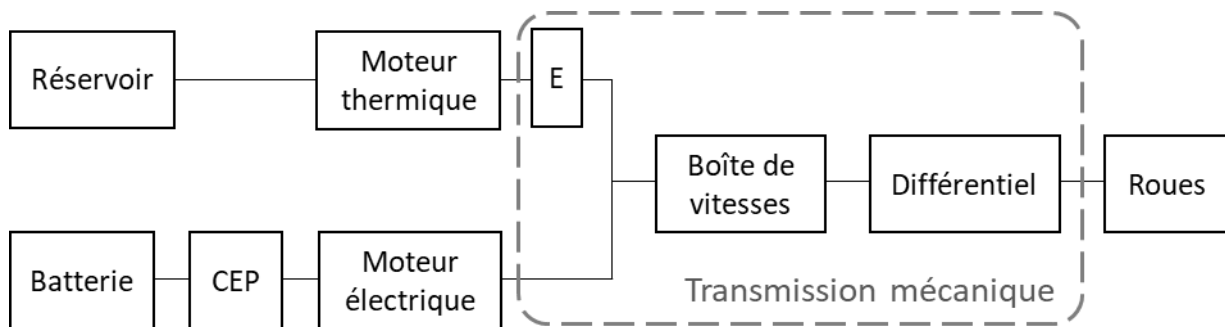


Figure 1 : Schéma synoptique de la configuration de propulsion hybride

Le Tableau 1 suivant définit la transformation mécanique opérée par l'ensemble de la transmission pour chaque position du levier de vitesses (de la « 1ère » à la « 6ème » vitesse). Il donne ainsi la vitesse d'avancée du véhicule relativement à la vitesse (de rotation) de l'arbre d'entrée de la boîte de vitesses.

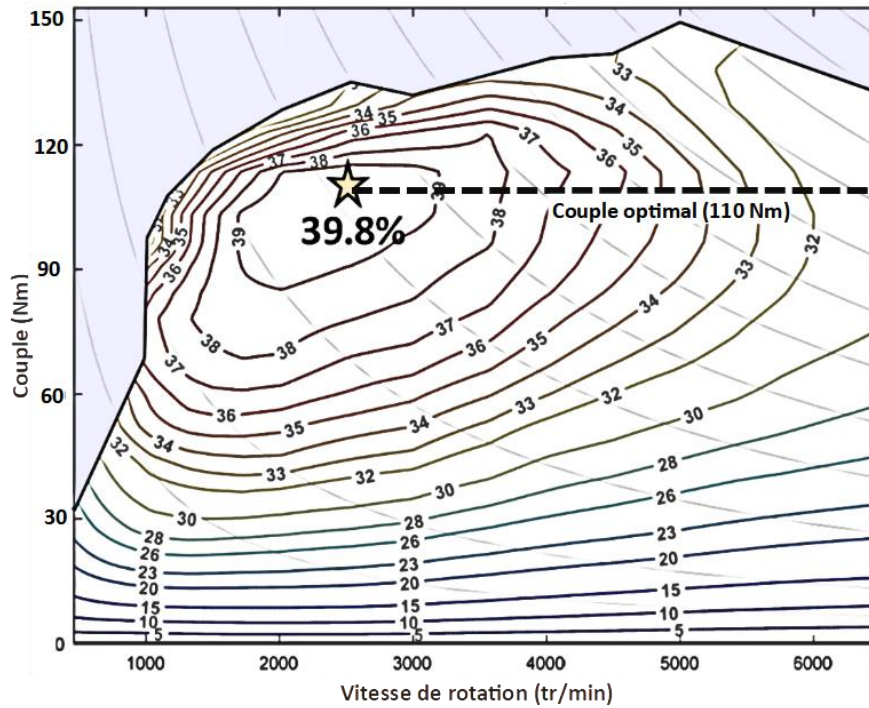
Tableau 1 : données de transformation de la transmission mécanique

N° de vitesse	V1000 (km/h à 1000 tr/min)	N° de vitesse	V1000 (km/h à 1000 tr/min)
1ère	7	4ème	23,5
2ème	12,4	5ème	28,6
3ème	18	6ème	34,1

Les performances du moteur thermique sont données par la Figure 2, par la représentation de son espace de fonctionnement et de courbes d'iso-rendements dans le plan couple – vitesse.

On constate que pour une vitesse de rotation supérieure à 2000 tr/min, le moteur thermique présente un **rendement maximum lorsque son couple développé est voisin de 110 N.m**. Par la suite, lorsque cela sera possible, on cherchera à faire fonctionner ce moteur à cette valeur de couple, pour **atteindre et maintenir une bonne efficacité énergétique**.

Figure 2 : moteur thermique - Courbes d'iso-rendements



La machine électrique utilisée dans cette motorisation hybride est de type **synchrone triphasée à aimants permanents**. Quelques-unes de ses principales caractéristiques ont été reportées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : caractéristiques constructeur de la machine électrique (extraits)

EMRAX 188 CC			
Tension batterie	110 V (continu)	Vitesse maximale	6500 tr/min
Puissance nominale	29 kW	Puissance maximale	52 kW
Couple nominal	50 Nm	Couple maximal	90 Nm
Constante de couple (courant efficace par phase)	0,15 Nm/A	Constante de vitesse (tension efficace entre 2 phases, en charge)	11,54 V/1000tr/min
Facteur de puissance	0,83	Nombre de pôles	10 paires

1 - ETUDE DE LA PARTIE MECANIQUE (40 MIN)

1.1 Calculer les rapports de réduction, pour les rapports 1, 3 et 6 de la boîte de vitesses :

- R_{tot} : entre la vitesse du moteur thermique et la vitesse du véhicule ;
- R_{BV} : entre la vitesse du moteur thermique et la vitesse de sortie de la boîte de vitesses.

Réponse

Rapport de réduction R_{tot} : (boîte de vitesses + Différentiel + Roues) :

$$R_{tot} = \Omega_{mot}/v = (1000rpm \cdot \pi/30)/(v_i/3,6)$$

Avec v_i les valeurs du Tableau 1, pour chaque rapport i .

Rapport de réduction R_{bv} : (boîte de vitesses (seule))

$$R_{bv} = R_{tot}/(R_{diff} \cdot R_{roue})$$

Avec :

$R_{diff}=4$ (rapport de réduction du pont différentiel)

$R_{roue}=2/DR=3,23$ rad/m (rapport de réduction de la roue)

	R_{tot} (rd/m)	R_{bv}
1	53,86	4,17
3	20,93	1,62
6	11,06	0,86

La BV fonctionne donc en réduction pour les rapports 1 à 3, et 6 en (dé)multiplication pour le rapport 6 (classique pour une BV).

1.2 Dans l'hypothèse où le moteur thermique est utilisé de manière optimale entre 2000 et 5000 tr/min, déterminer les vitesses min et max correspondantes du véhicule, pour ces mêmes rapports de la BV (1, 3, 6).

Réponse

$v_{min} = 2 \cdot v_i$ et $v_{max} = 5 \cdot v_i$

Car les v_i sont donnés pour une rotation du moteur thermique de 1000 rpm.

	vmin (km/h)	vmax (km/h)
1	14*	35
3	36	90
6	68,2	170,5

* La première vitesse sert à démarrer le véhicule, typiquement à partir de la vitesse nulle, ce qui pourrait justifier d'écrire 0 km/h ici (mais ça ne répond pas vraiment à la question).

Même dans le cas du démarrage (vitesse de déplacement initialement nulle), la vitesse du moteur thermique n'est jamais nulle, mais est au minimum celle du (régime) ralenti. C'est l'embrayage qui permet d'affecter cette vitesse de ralenti à la traction du véhicule, et qui sert en quelque sorte de rapport de réduction progressif.

Les performances de motricité du véhicule sont analysées pour 3 modes de fonctionnement. Ils sont décrits ici avec la force d'entraînement à fournir au véhicule (= somme des forces à vaincre) et le rapport de boîte de vitesse utilisé :

- Mode 1 : accélération de 0 à 5 km/h en 3s, sur une pente de 20% ($F_{tot} = 4470 N$), 1^{ère} vitesse de la BV ;
- Mode 2 : déplacement à vitesse constante (130 km/h), à pente nulle ($F_{tot} = 818 N$), 6^{ème} vitesse de la BV ;
- Mode 3 : accélération de 130 à 150 km/h en 6s, à pente nulle ($F_{tot} = 2697 N$), 6^{ème} vitesse de la BV.

1.3 Est-ce que ces utilisations de la BV sont compatibles avec les intervalles de vitesses correspondants déjà calculés ?

Réponse

- **Mode 1** : vitesse max : 5 km/h : **non** c'est bien inférieur à $v_{max}(1)=35$ km/h ; mais supérieur à $v_{min}(1)=14$ km/h (voir remarque de la question 2. : la première vitesse sert à démarrer le véhicule ; donc en théorie $v_{min}(1)=0$)
- **Mode 2** : vitesse : 130km/h ; **Mode 3** : vitesse max : 150 km/h ; => **oui**, car valeurs de vitesses bien dans l'intervalle [68,2 170,5] ;

1.4 Pour chaque mode, calculer les valeurs maximales de :

- La puissance mécanique vu du véhicule ;
- Le couple à l'entrée de la boîte de vitesse (BV) ;
- La vitesse à l'entrée de la BV.

Rendement de la transmission mécanique : $n=95\%$.

- Puissance mécanique (« correspondante » = « au niveau du véhicule ») : $P=F_{tot} \cdot v$
- Couple entrée de BV : on a $n \cdot R_{tot} = F_{tot} / C_{entrée}$, d'où $C_{entrée} = F_{tot} / (n \cdot R_{tot})$
- Vitesse entrée de BV : on a $R_{tot} = \Omega_{entrée} / v$, d'où $\Omega_{entrée} = R_{tot} \cdot v$

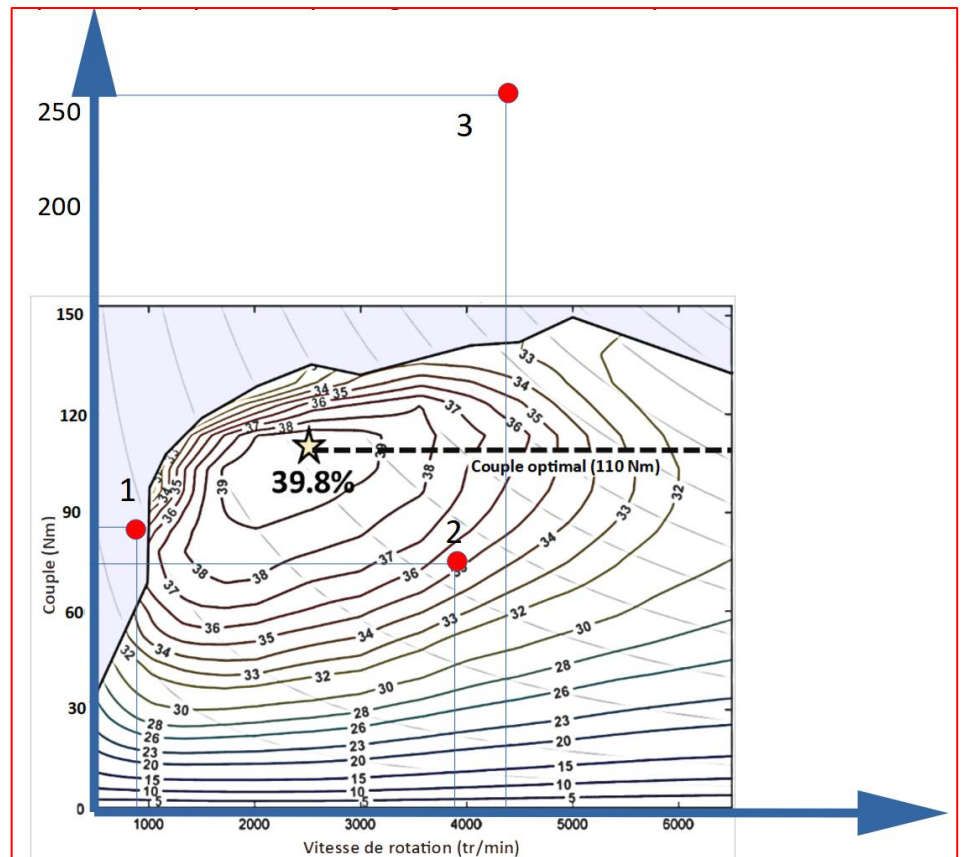
Attention : pour v, il faut prendre la vitesse max définie par le mode ; i.e. la vitesse à la fin de l'accélération, pour les modes 1 et 3 (5 et 150 km/h respectivement) !

Réponse : Valeurs arrondies à l'entier le plus proche :

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
P [W]	6209	29544	112392
C_{entrée} [N.m]	87	78	257
$\Omega_{entrée}$ [rad/s]	75	399	461
N_{entrée} [tr/min]	714	3812	4399

1.5 En supposant (pour l'instant) que le moteur électrique n'est pas utilisé, représenter les points de fonctionnement correspondant aux 3 modes dans le plan couple-vitesse du moteur thermique. Pour cela, il faudra tout d'abord reproduire (simplement) la Figure 2 sur votre copie.

Réponse : schéma



1.6 A partir des résultats précédents, donner toutes les possibilités d'utilisation du moteur thermique et de la machine électrique afin d'assurer la motricité du véhicule, pour les trois modes de fonctionnement et sans chercher à optimiser les rendements. Quand la machine électrique est utilisée, préciser si elle est en fonctionnement moteur ou générateur, en régime permanent ou transitoire (ex. : *moteur thermique seul*, *moteurs thermique et électrique couplés*). Indiquer quelles sont les configurations les plus pertinentes.

Réponse

Mode 1 (87 N.m et 714 tr/min) : le moteur thermique ne permet pas d'assurer seul ce point (point de fonctionnement correspondant an dehors de l'espace de fonctionnement du moteur thermique : voir figure de la question précédente (Q.5.)).

Donc 2 possibilités :

- **Utilisation du moteur électrique seul** ; auquel cas, fonctionnement en régime transitoire (compris entre 50 et 90 N.m)
- **Utilisation du moteur thermique et du moteur électrique** ; configuration peu intéressante car le moteur thermique présente un rendement faible pour de telles basses vitesses ($n \sim 35\%$) alors que le moteur électrique y est plus efficace ($n \sim 90\%$) (sans parler du stockage d'énergie...).

Mode 2 (78 N.m et 3812 tr/min) : chacun des 2 moteurs peut assurer seul le mode de fonctionnement.

- Mais pour le moteur électrique, 78 N.m ne peut être atteint qu'en régime transitoire (donc usage limité dans le temps), ce qui ne correspond pas à l'idée du mode 2 (déplacement régulier sur autoroute, et donc usage en « permanent »).
- **Donc l'utilisation du moteur thermique seul est plus approprié.**
- On peut toutefois aussi envisager la **possibilité d'utiliser la puissance mécanique du moteur thermique pour à la fois entraîner le véhicule et dans le même temps recharger la batterie en entraînant la machine électrique** (celle-ci fonctionnant donc en mode générateur). Cette solution (existante) nécessite toutefois un organe de couplage mécanique des machines (thermique et électrique) plus sophistiqué (fonctionnant typiquement en « torque coupling »). Ce mode combiné (propulsion + recharge) est envisageable car, pour cette vitesse, le moteur thermique possède un couple max de 135 N.m (environ) ; on peut également faire fonctionner ce moteur thermique à 110 N.m (lieu des rendements max).

Mode 3 (257 N.m et 4399 tr/min) : aucun moteur ne permet d'assurer ce mode seul ; également, le couplage des 2 moteurs est également insuffisant (mais quelle idée de vouloir accélérer sur l'autoroute ; c'est un coup à se faire flasher !). Voir Q.7. pour la suite.

1.7 Pour le mode 3, quelle puissance et couple devrait en théorie fournir le moteur électrique afin de faire fonctionner le moteur thermique à son maximum de rendement ? Commenter ces résultats.

Réponse : le maximum de rendement du moteur thermique est donné pour un couple de 110 N.m environ, lorsque la vitesse de rotation est supérieure à 2000 tr/min (d'après l'énoncé).

Pour le mode 3, il faut fournir un couple de 257 N.m, soit **147 N.m de plus que le couple du moteur thermique à rendement maximal.**

Le moteur électrique ne peut fournir au maximum que 86 N.m environ (d'après la Figure 3).

Il « manque » donc 61 N.m pour assurer la dynamique prévue dans le mode de fonctionnement 3. En d'autres termes, la montée en vitesse (de 130 à 150 m/h) se bien plus longue que 6s.

2 - ÉTUDE DE L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE DU MOTEUR (30 MIN)

2.1 Déterminer la tension efficace entre deux phases lorsque le moteur électrique tourne à sa vitesse maximale. Donner la valeur efficace, puis la valeur crête (= amplitude). Est-ce que cette valeur crête vous paraît compatible avec la tension de batterie indiquée sur le Tableau 2 ? Qu'est-ce qui pourrait justifier un écart entre ces valeurs ?

Réponse : $U_{eff} = \frac{11,54}{1000} \times 6500 = 75 \text{ V}$, soit $U_{cr} = 106,1 \text{ V}$

Réponse : Cette valeur crête est **compatible avec la tension batterie de 110V**. L'écart peut être justifié par le **rendement du convertisseur** et par un **rapport cyclique des interrupteurs qui soit inférieur à 100%**.

2.2 Calculer le couple de la machine électrique et le courant qu'elle absorbe sur l'une de ses phases pour les deux situations suivantes : a) à puissance nominale + vitesse maximale et b) à puissance maximale + vitesse maximale.

Réponse : @ P_{nom} et Ω_{max} : $C = \frac{P_{nom}}{\Omega_{max}} = 42,6 \text{ Nm}$, soit un courant $I_{phase} = \frac{42,6}{0,15} = 284 \text{ A}$

@ P_{max} et Ω_{max} : $C = \frac{P_{max}}{\Omega_{max}} = 76,4 \text{ Nm}$, soit un courant $I_{phase} = \frac{76,4}{0,15} = 510 \text{ A}$

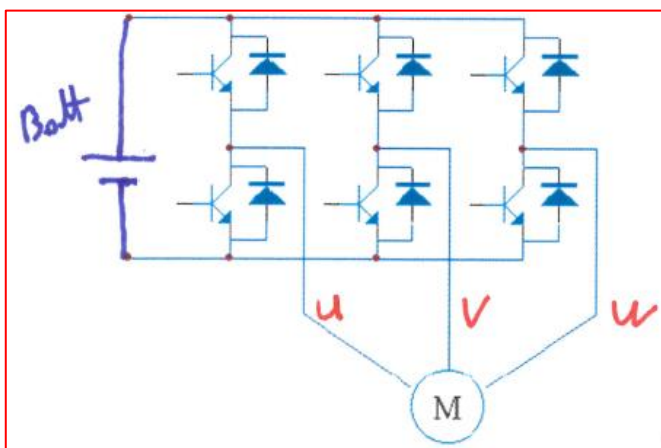
2.3 Donner la puissance électrique nécessaire au moteur lorsque celui-ci fournit sa puissance maximale à sa vitesse maximale. Quel est alors le rendement du moteur ?

Réponse : $P_{elec} = U I \sqrt{3} \cos(\varphi) = 75 \times 510 \times \sqrt{3} \times 0,83 = 54,99 \text{ kW}$ soit un rendement de **94,6 %**.

2.4 Proposer et justifier une structure de convertisseur reliant la machine électrique étudiée et un pack batterie (il est supposé que l'énergie de la plupart des freinages est renvoyée vers le pack batterie, sinon c'est un frein mécanique qui est utilisé pour ralentir le véhicule). Faites un schéma du branchement de la batterie, de ce convertisseur et de la machine électrique.

Réponse : un onduleur triphasé suffit, car il fonctionne dans les 4 quadrants. Hacheur de freinage et filtre sont inutiles.

Réponse



3 – DIMENSIONNEMENT DU PACK BATTERIE (20 MIN)

Il vous est demandé de dimensionner un pack batterie en respectant le cahier des charges suivant :

Tension nominale	110 V	Puissance nominale (décharge)	31 kW
Energie	5 kWh	Puissance maximale (décharge)	56 kW

Pour cela, il vous est demandé d'utiliser les cellules suivantes :

- Li-ion : NMC-graphite
- Masse : 160 g
- Tension nominale : 3,6 V
- Capacité : 5 Ah
- Décharge : 2C (nom.), 4C (3s max)
- Charge : C/2 (nom.), 1C (10 s max)

3.1 Préciser le nombre de cellules à mettre en série et en parallèle pour répondre au cahier des charges. Détailler votre démarche et justifier le respect de chacun des critères du cahier des charges. Commenter l'énergie du pack batterie ainsi réalisé par rapport au critère correspondant du cahier des charges ?

Réponse : Critère en tension : il faut **31 cellules en série**, ce qui donne une **tension nominale de 111,6 V**.

Critère en puissance nominale (décharge) : il faudrait 28 cellules en //, soit une puissance nominale de 31248 W.

Critère en puissance maximale (décharge) : il faudrait 26 cellules en //, soit une puissance maximale de 58032 W.

Critère en énergie : il faudrait 9 cellules en //, soit une énergie de 5022 Wh.

⇒ Conclusion : **il faut 28 cellules en // pour respecter tous les critères du cahier des charges.**

⇒ Cela mène à un pack dont l'énergie est de $E_{pack} = 31 * 28 * 3.6 * 5 = 15624 Wh$, soit environ **3 fois plus d'énergie que le critère du cahier des charges**. Il serait **intéressant de chercher des cellules fournissant plus de puissance et moins d'énergie** afin d'avoir un pack batterie mieux dimensionné (plus petit, plus léger, moins cher...).

3.2 En combien de temps ce pack batterie pourra-t-il être chargé complètement sur une prise électrique domestique classique à l'aide d'un chargeur de rendement 0,9 ? (16 A, 230 V efficace, facteur de puissance unité, monophasé)

Réponse : lorsqu'elle est branchée, **la batterie reçoit du chargeur une puissance de :**

$$P_{charge} = 16 * 230 * 1 * 0,9 = 3312 W$$

Il faut donc 4,72 h (4h43min) pour charger complètement le pack sur cette prise.