

Réduction des émissions de CO₂ des véhicules automobiles :

Une étude dirigée
sur le « downsizing » et l'hybridation
des Groupes Moto-Propulseurs

Objectifs :

Cette étude va permettre d'approcher l'intérêt du sous-dimensionnement (down sizing) des moteurs thermiques implantés dans les véhicules de série dans la perspective de la réduction des émissions de CO₂. Cette étude est réalisée autour d'un point de fonctionnement et à vitesse stabilisée.

L'étude de l'association d'un moteur thermique et d'un moteur électrique (hybridation des Groupes Moto-Propulseurs) va permettre de montrer comment il est possible de réduire encore les consommations (donc les émissions de CO₂ tout en gardant un confort de conduite comparable à celui des véhicules classiques.

Ces études pourraient être prolongées en abordant les aspects énergétiques impliqués durant les phases dynamiques (accélérations et décélérations)

- 1 -

Evaluation de la consommation énergétique d'un véhicule à vitesse stabilisée

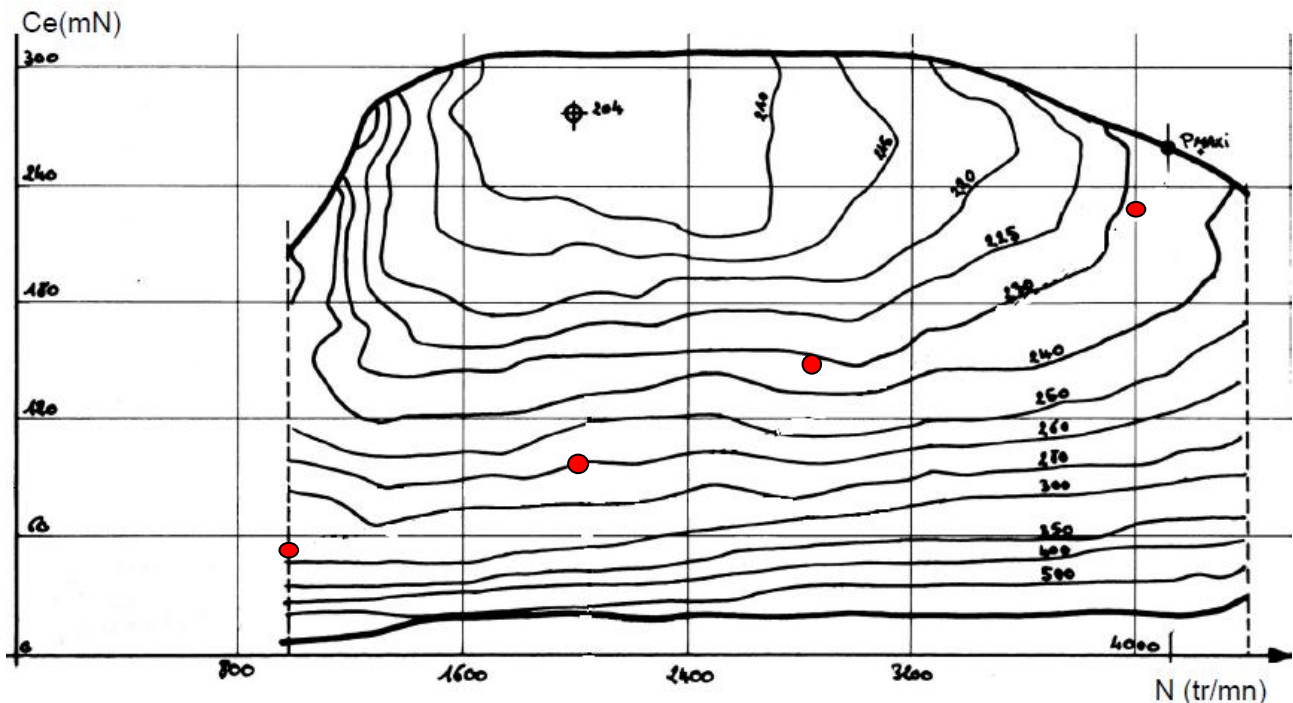
On cherche à évaluer la consommation d'un véhicule qui se déplace à une vitesse stabilisée de 110 km/h. Ce véhicule est équipé d'un moteur Diesel d'une cylindrée de 2,5 l, les courbes d'iso-consommation de ce moteur sont données en figure 1.

Les caractéristiques aérodynamiques du véhicule et la résistance au roulement de ses pneumatiques ont permis de déterminer l'équation mécanique $Cr = f(N)$ ramenée sur l'axe du moteur :

$$Cr = 10,8 \cdot 10^{-6} N^2 + 47,2$$

où,

- Cr est le couple résistant total opposé par la charge représentée par la partie mécanique du véhicule en Nm
- N est la fréquence de rotation de l'arbre de sortie du moteur en tr/min



Questions :

1-A Recherche du point de fonctionnement du moteur à la vitesse de 110 km/h

1-A-1 Calculer à l'aide d'un tableur les valeurs du couple C_r pour les valeurs de N comprises entre 1000 tr/min et 4000 tr/min

N (tr/min)	C_r (Nm)
1000	58,00
2000	90,40
3000	144,40
4000	220,00

1-A-2 Représenter sur la courbe d'iso-consommation donnée en figure 1, le profil du couple $C_r = f(N)$ obtenu à l'aide des points calculés à la question 1

Voir points sur la courbe ci-dessus

En 5ème, le véhicule roule à 53,6 km/h lorsque le régime moteur est de 1000 tr/min.

1-A-3 Déterminer le point de fonctionnement (C_e, N) du moteur

$V = 110 \text{ km/h}$ donne $N = 2052 \text{ tr/min}$ donc $C_e = 93 \text{ Nm}$

soit le point de fonctionnement : (93 Nm, 2052 tr/min)

1-B- Calcul de la consommation de carburant et des rejets de CO_2 au 100 km du moteur dans cette configuration

1-B-1 Calculer la puissance développée par le moteur à ce point de fonctionnement

$P = (93 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2052) / 60 = 20\,000 \text{ W}$

1-B-2 Indiquer, pour ce point de fonctionnement, la consommation spécifique du moteur en g/kWh

$C_{se} = 270 \text{ g/kWh}$

1-B-3 Calculer la masse de carburant nécessaire pour faire 100 km

$m = (20\,000 \cdot 0,270) / 1,1 = 4909 \text{ g}$

1-B-4 Calculer le volume de gazole (densité : 0,83) nécessaire pour faire 100 km et la quantité de CO₂ par km ainsi rejetée dans l'atmosphère (on retiendra un rejet de 2,6 Kg de CO₂ par litre de gazole utilisé)

$$V = 4909 / 0,83 = 5,9 \text{ l}$$

$$\text{masse de CO}_2 \text{ rejeté} = 5,9 \cdot 2,6 = 15,4 \text{ Kg pour } 100 \text{ Km soit } 150 \text{ g/km}$$

1-C- Conclusions

1-C-1 Le moteur fonctionne-t-il à son meilleur rendement ?

Le moteur ne fonctionne pas à son meilleur rendement, la consommation spécifique minimum étant de 204 g/kWh

1-C-2 A quel point de fonctionnement, le moteur serait-il le mieux utilisé :

- du point de vue de sa consommation ?

La meilleure utilisation serait dans la zone 204 g/kWh

- du point de vue de sa vitesse de rotation ?

La vitesse de rotation doit être choisie dans les plus basses vitesses pour éviter l'usure des parties mécaniques

- préciser de ces points de vue un point de fonctionnement particulièrement intéressant

Point de fonctionnement autour de (260 Nm, 1400 tr/min)

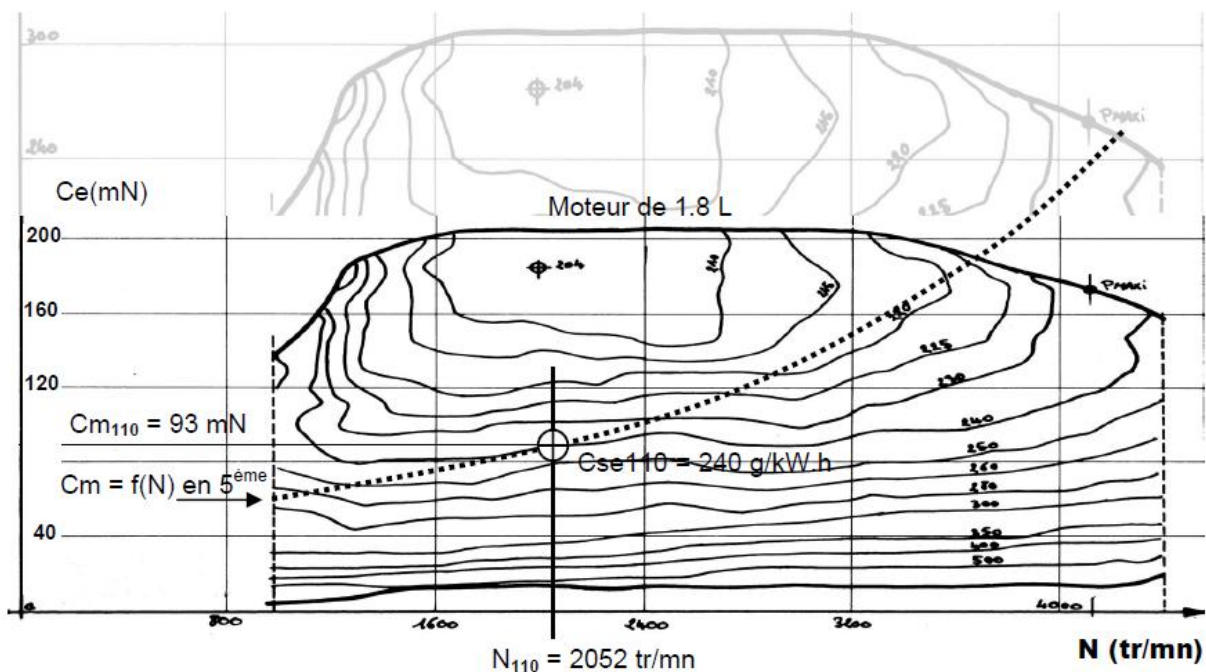
- 2 -

Etude critique du « downsizing » des GMP

On reprend le véhicule étudié dans la première partie, à la vitesse stabilisée de 110 km/h, il consomme 5,9 l de gazole pour faire 100 km.

On remplace le moteur de ce même véhicule par un moteur Diesel d'une cylindrée de 1,8 l. La courbe d'iso-consommation de ce nouveau moteur est donnée en figure 2. On réalise alors un sous-dimensionnement (ou « downsizing ») de la motorisation de ce véhicule.

Le profil du couple $C_r = f(N)$ est reporté sur la figure 2. On remarquera qu'il est le même que précédemment puisque le véhicule est identique.



Questions :

2-A- Calcul de la consommation de carburant et des rejets de CO₂ au 100 km du moteur dans cette nouvelle configuration

2-B-1 Calculer la puissance développée par le moteur à ce point de fonctionnement

$$P = (93 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2052) / 60 = 20\,000 \text{ W}$$

1-B-2 Indiquer, pour ce point de fonctionnement, la consommation spécifique du moteur en g/kWh

$$C_{se} = 240 \text{ g/kWh}$$

1-B-3 Calculer la masse de carburant nécessaire pour faire 100 km

$$m = (20\,000 \cdot 0,240) / 1,1 = 4360 \text{ g}$$

1-B-4 Calculer le volume de gazole (densité : 0,83) nécessaire pour faire 100 km et la quantité de CO₂ par km ainsi rejetée dans l'atmosphère (on retiendra un rejet de 2,6 Kg de CO₂ par litre de gazole)

$$V = 4360 / 0,83 = 5,25 \text{ l}$$

masse de CO₂ rejeté = 5,25 · 2,6 = 13,7 Kg pour 100 Km soit 137 g/km soit un gain de (150 – 137)/150 = 8,6 % par rapport à la motorisation précédente

2-B- Conclusions

2-B-1 Le rendement de cette nouvelle motorisation est-il optimum ?

Non, mais le rendement à été amélioré

2-B-2 A quel point de fonctionnement, le moteur serait-il le mieux utilisé :

- du point de vue de sa consommation ?

Dans la zone 204 g/kWh (Consommation spécifique minimum)

- du point de vue de sa vitesse de rotation ?

La vitesse de rotation doit être choisi dans les plus basses vitesses pour éviter l'usure des parties mécaniques

- préciser, de ces points de vue, un point de fonctionnement particulièrement intéressant

Point de fonctionnement autour de (180 Nm, 1400 tr/min)

2-B-3 Pourquoi est-il difficile de faire fonctionner un moteur thermique à son meilleur rendement lorsque le véhicule est équipé d'une boîte de vitesses manuelle ?

Les rapports de vitesses d'une boîte manuelle sont étagés de façon à obtenir une progression et un confort de conduite qui ne permettent pas de placer un point de fonctionnement dans cette zone pour une vitesse de 110Km/h

2-B-4 Quelle sont les conséquences du choix d'un sous dimensionnement de moteur thermique sur les émissions de CO₂ ?

Le moteur peut être placé à des points de fonctionnement qui offrent de meilleurs rendements.

2-B-5 Quelles sont les incidences d'un sous dimensionnement de moteur thermique sur le confort de conduite ?

La perte de marge de couple pour assurer les accélérations

- 3 -

Une exploitation de l'hybridation Thermique – Electrique des GMP

Les études précédentes nous ont permis de montrer que le sous-dimensionnement des moteurs thermiques pouvait contribuer à la réduction de la consommation de carburant et ainsi réduire les émissions de CO₂. En contre partie, les performances dynamiques (accélérations) du véhicule se trouvent fortement dégradées du fait du manque de réserve de couple disponible.

L'idée d'associer un moteur électrique au moteur thermique sous dimensionné permet d'obtenir des performances comparables à celles des véhicules classiques. En effet, le moteur électrique permet d'apporter la réserve de couple nécessaire au phases d'accélération.

Hypothèses retenues pour cette étude :

Le véhicule roule à 80 km /h

Véhicule :

- Masse totale : $m_T = 1300$ kg
- S.Cx : 0,55
- Coefficient de frottement des pneumatiques : $K_r = 0,015$

Groupe Moto-Propulseur :

Moteur thermique :

- Essence, 4 cylindres, 16 soupapes, cycle ATKINSON
- Puissance maximum : 52 kW (70 cv)
- Cylindrée : 1,5 l
- Courbe d'iso-consommation donnée en figure 4

Moteur électrique :

- Puissance max = 33 kW

Batterie :

- Pmax durant la charge : 15 kW
- énergie utilisable : 720 Wh

Carburant :

- Supercarburant
- densité 0,72

Questions :

3-A Recherche du point de fonctionnement pour une vitesse de 80 km/h (notée V_{80}).

3-A-1 Calculer la force de résistance à l'avancement du véhicule pour V_{80}

Pour faire ce calcul, il faut utiliser les relations suivantes :

- $F_r = K_r \cdot m_T \cdot g$ (Résistance au roulement due aux pneumatiques)
- $F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$ (Résistance due aux efforts aérodynamiques)
- $F = F_r + F_a$

où :

- K_r représente le coefficient de résistance à l'avancement du au pneumatiques
- $g = 9,81\text{m/s}^2$
- ρ représente la masse volumique de l'air (1200 kg/m^3)
- S représente la surface frontale du véhicule
- C_x représente le coefficient de pénétration du véhicule

3-A-2 Calculer la forces de résistance à l'avancement que doit vaincre le GMP pour la vitesses V_{80} ainsi que la puissance correspondante P_{80}

$$F = (0,015 \cdot 1300 \cdot 9,81) + \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,55 \cdot (80 \cdot 1000/3600)^2$$

$$F = 354\text{N}$$

$$P_{80} = F \cdot V = 327 \cdot 22,2 = 7859\text{ W}$$

3-A-3 Pour la puissances P_{80} , calculer, à l'aide d'un tableur, les valeurs du couple C_r pour les valeurs de N comprises entre 1000 tr/min et 4500 tr/min.

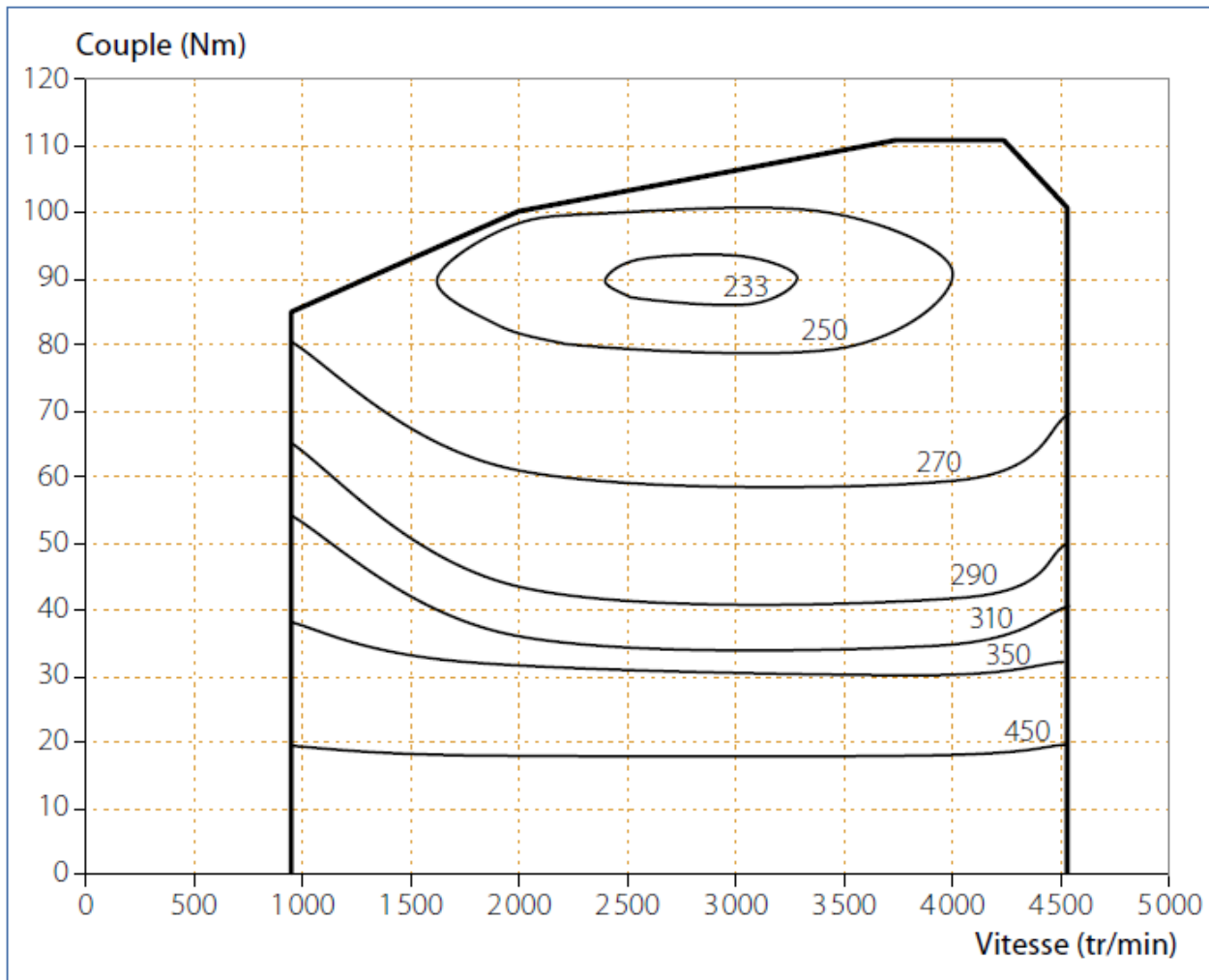
N tr/min	C mN
1000	75,0
2000	37,5
3000	25,0
4000	18,8

3-A-4 Représenter sur la courbe d'iso-consommation donnée en figure 4, le profil du couple $C_r = f(N)$ obtenu à l'aide des points calculés à la question 3-A-3 pour la puissances P_{80}

Voir courbe ci-dessous

3-A-5 Pour la vitesse V_{80} , peut-on faire fonctionner le moteur à son meilleur rendement ?

Non car la courbe $C = f(N)$ ne passe pas par la zone de consommation spécifique minimum



3-A-6 Justifier de façon qualitative que le meilleur point de fonctionnement pour V_{80} se situe autour d'une consommation spécifique de 310 g/kWh

La courbe $C = f(N)$ pour P_{80} croise la courbe d'iso-consommation $C_{se} = 310$ g/kWh dans sa partie encore horizontale. Si on choisit N plus grand, on augmente la C_{se} du moteur. Si on diminue N , on se rapproche trop des limites de fonctionnement du moteur aux vitesses basses.

3-B Calcul de la consommation du GMP pour la vitesses V_{80} quand seul le moteur thermique assure la propulsion.

3-B-1 Calculer, pour V_{80} , la masse de carburant nécessaire pour faire 100 km

$$P = 7860 \text{ W}$$

Pour faire 100 Km, il faut $7860 \cdot 100/80 = 9,82 \text{ kWh}$

soit $m = 9,82 \cdot 0,310 = 3,06 \text{ kg}$ de carburant

3-B-2 Calculer, pour V_{80} , le volume d'essence (densité : 0,72) nécessaire pour faire 100 km et la quantité de CO_2 par km ainsi rejetée dans l'atmosphère (on retiendra un rejet de 2,28 Kg de CO_2 par litre d'essence)

$$V = 3,06/0,72 = 4,25 \text{ l}$$

Masse de $\text{CO}_2 = 4,25 \cdot 2,28 = 9,69 \text{ Kg}$ pour 100 Km soit 96 g/km

3-C Mise en évidence de l'intérêt d'une hybridation thermique-électrique pour les points de fonctionnement à la vitesse V_{80}

Phase 1 : Le véhicule roule à 80 km/h avec le moteur thermique réglé sur son meilleur point de fonctionnement (consommation égale à 233 g/kWh). Le moteur thermique entraîne donc le véhicule et recharge la batterie

3-C-1 Calculer la puissance que délivre le moteur thermique lorsqu'il travaille à son meilleur point de fonctionnement

point de fonctionnement (90 Nm, 2400 tr/min)

$$P = 90 \cdot 2400 \cdot 2 \cdot \pi / 60 = 22,6 \text{ kW}$$

3-C-2 Calculer la puissance disponible pour charger la batterie

$$P_{\text{dispo}} = 22600 - 7860 = 14740 \text{ W}$$

3-C-3 Calculer le temps de charge de la batterie pour ce régime de fonctionnement

Energie utilisable : 720 Wh

$$t = 720 / 14740 = 0,0488 \text{ h} \quad \Rightarrow \quad 2 \text{ min } 93$$

3-C-4 Calculer la consommation de carburant ainsi que la distance parcourue durant cette phase 1

$$\text{consommation} = 0,0488 \cdot (22,6 \cdot 0,233) / 0,72 = 0,357 \text{ l}$$

$$\text{distance parcourue} = 80 \cdot 0,0488 = 3,90 \text{ Km}$$

Phase 2 : Le véhicule roule à 80 km/h avec le moteur thermique éteint. Seul le moteur électrique entraîne le véhicule

3-C-5 Calculer le temps de décharge de la batterie pour ce régime de fonctionnement ainsi que la distance parcourue par le véhicule

$$P = 7860 \text{ W}$$

$$t = 720 / 7860 = 0,092 \text{ h} \quad \Rightarrow \quad 5 \text{ min } 50$$

$$\text{distance parcourue} = 80 \cdot 0,092 = 7,36 \text{ Km}$$

Bilan

3-C-6 Calculer la consommation de carburant nécessaire pour faire 100 km et la quantité de CO₂ par km ainsi rejetée dans l'atmosphère (on retiendra un rejet de 2,28 Kg de CO₂ par litre de gazole) et comparer ces résultats avec ceux obtenus à la question 3-B-2

Pour faire $7,36 + 3,90 = 11,26$ km, il faut 0,357 l de carburant donc pour faire 100 km, il faut $0,357 \cdot 100 / 11,26 = 3,17$ l

soit $3,17 \cdot 2,28 = 7,2$ kg pour 100 km soit 72 g/km

Par rapport au point de fonctionnement précédent, on gagne 25 % de carburant et idem pour les émissions de CO₂

4-C Conclusions

4-C-1 Préciser l'intérêt de l'hybridation des GMP du point de vue de la réduction des émissions de CO₂

L'hybridation permet de réduire de façon significative les émissions de CO₂

4-C-2 Préciser l'intérêt de l'hybridation des GMP du point de vue du confort de conduite

L'hybridation permet d'utiliser un moteur thermique à pleine charge donc à son meilleur rendement, la machine électrique permet d'assurer le complément de couple nécessaire aux phases d'accélération.

Autre point non montré dans ce TP (et pourtant non négligeable), ce système permet de récupérer l'énergie de freinage qui sur un modèle "classique" est dissipée sous forme thermique.