



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

EE2-1 : Mobilité automobile

La première partie du document présente les enjeux du développement durable appliqués à l'industrie automobile avec une approche centrée sur le véhicule ; les aspects d'optimisation de la matière, l'efficacité énergétique des moyens de production et les filières de recyclage des véhicules hors d'usage ne sont pas abordés ici.

La part importante du transport dans les émissions de gaz à effet de serre nous conduit à situer les enjeux d'aujourd'hui et de demain pour aller vers une réduction des consommations en carburant des véhicules. Nous verrons quelles sont les solutions technologiques qui ont été mises en oeuvre dans cet objectif de sobriété énergétique pour présenter le principe « downsizing » et le véhicule hybride.

La seconde partie propose une étude dirigée des consommations et des émissions de CO₂ des groupes motopropulseurs dans différents contextes d'usage. Le lecteur est amené à situer des points de fonctionnement à vitesse stabilisée sur les caractéristiques propres des motorisations ; il est ainsi conduit à établir l'intérêt du sous-dimensionnement des moteurs thermiques implantés dans les véhicules. Enfin, l'étude se termine par une approche des solutions d'hybridation des motorisations afin de répondre au mieux aux besoins de couple des véhicules.

Une perspective à cette étude pourrait prendre en considération les phases dynamiques (accélération, décélération) et leurs aspects énergétiques.

Éléments de contexte.....	2
1-Le transport et les émissions de gaz à effet de serre.....	2
2-L'automobile et la consommation de carburant.....	3
2.1-Principe.....	3
2.2-Les éléments de réduction de la consommation.....	5
2.3-Les tests de consommation et d'émissions des véhicules.....	7
3-Le principe « downsizing »	7
4-Le véhicule hybride.....	8
4.1-Architectures types des véhicules hybrides.....	8
4.2-Les flux d'énergie.....	9
5-Conclusion.....	10
Une étude dirigée sur le « downsizing » et l'hybridation des Groupes Moto-Propulseurs	11
1-Évaluation de la consommation énergétique d'un véhicule à vitesse stabilisée.....	11
2-Étude critique du « downsizing » des Groupes Moto-Propulseurs.....	13
3-Une exploitation de l'hybridation Thermique - Électrique des GMP.....	15

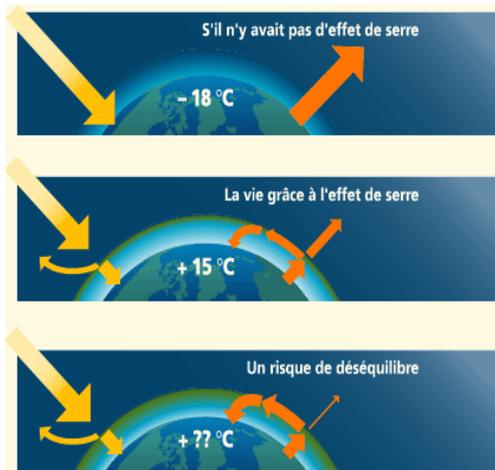


Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

Éléments de contexte

1- Le transport et les émissions de gaz à effet de serre.

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet de conserver en dessous de la couche atmosphérique une partie des rayonnements du soleil. Cela permet d'observer une température moyenne de 15°C alors qu'en l'absence de cet effet, si tous les rayonnements solaires étaient renvoyés, nous observerions une température moyenne de - 18°C.



L'effet de serre est possible grâce à la couche d'ozone. Cependant depuis plusieurs années, on observe une augmentation du phénomène qui nous conduit à une élévation de la température moyenne à la surface du globe. Les perspectives sont variables mais le réchauffement climatique ou le dérèglement climatique comme le nomme la plupart des pays est constaté et corrélé avec les activités humaines. En effet, les modèles climatiques du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat ou IPCC en anglais *Intergovernmental Panel on Climate Change*), qui prennent maintenant en considération la composition chimique de

l'atmosphère (modèle AR4), permettent de constater que les gaz à effet de serre voient leur concentration augmenter de manière très significative depuis la révolution industrielle depuis les années 1950, 1960. Parmi ces gaz, la vapeur d'eau occupe une place prépondérante avec une contribution de l'ordre de 72% - nous avons tous observé une température plus douce après une nuit nuageuse qu'après un ciel étoilé.

L'activité humaine génère des émissions de gaz à effet de serre qui tendent à déséquilibrer l'éco-système et à augmenter ainsi les valeurs moyennes des températures à la surface du globe. Parmi ces activités, les transports représentent environ 42% des émissions et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) en observe une évolution de +22% entre les années 1990 et 2000. Alors que l'industrie ou la production d'énergie présentent des réductions d'émissions sur la même période, les transports et l'habitat sont en augmentation (+22% et +14% respectivement de 1990 à 2000). En 2006, l'ADEME précise que le transport routier représente 80% de la consommation énergétique dont 98% est liée au pétrole.

Les transports routiers contribuent directement à l'effet de serre par les émissions de gaz comme le *dioxyde de carbone* (CO_2) qui est généré par la combustion de carburant. Cette contribution est très importante puisqu'elle représente plus de 95% des émissions dues aux transports, le *protoxyde d'azote* (N_2O) présent dans les gaz d'échappement des



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

moteurs à allumage commandé et l'ozone troposphérique O_3 qui résulte de la photolyse du dioxyde d'azote N_2O par les radiations solaires en présence d'hydrocarbure (méthane, benzène, toluène).

Aujourd'hui le dérèglement climatique amène les pays à s'interroger sur les émissions de gaz à effet de serre et à mettre en place des dispositifs afin de les réduire. Si en 1920 les émissions de CO_2 étaient de 0,8 GteC (Giga tonne équivalent carbone) par an, nous arrivons à 6 GteC aujourd'hui (2009) et les perspectives envisagent, si rien n'est fait, d'atteindre les 10 GTeC en 2050. Les prévisions établies lors du protocole de Kyoto (décembre 1997 – ratifié par l'Union Européenne en 2002) présentent différents scénarios de l'évolution du climat en fonction de l'évolution des activités humaines. Une vision optimiste (scénario B1 – approche environnementale dans un contexte mondial) prévoit une augmentation de $+2^\circ C$ à l'horizon 2050.

Afin d'atteindre ces objectifs, la commission européenne a mis en place en 2009 des normes de performance en terme d'émissions pour les voitures neuves. Il s'agit de limiter les émissions à 130g de CO_2 par km puis de les réduire à 95 g CO_2 /km en 2020. Les objectifs sont progressifs : 65% des véhicules sont pris en compte en 2012, puis 75% en 2013, 80% en 2014 et enfin 100% en 2015. Les constructeurs de véhicules particuliers ont donc des enjeux de réduction de consommation de carburant (le dioxyde de carbone, CO_2 , est produit par la combustion de carburant).

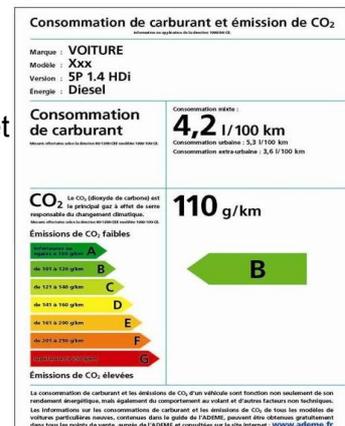
2- L'automobile et la consommation de carburant

Afin de comprendre les principes de consommation de carburant des véhicules à moteur thermique, actuellement les plus répandus sur le marché, nous proposons une approche énergétique du moteur et les principaux leviers de réduction des consommations des véhicules.

2.1- Principe

Depuis les chocs pétroliers de 1973 et 1979, les constructeurs automobiles fabriquent des véhicules dont les moteurs consomment de moins en moins de carburant. Cette avancée technologique est souvent masquée par le phénomène de l'effet rebond : si les moteurs consomment moins de carburant, nous pouvons en produire de plus grands, de plus lourds... à consommation constante ou équivalente.

Aujourd'hui, la réglementation et la demande des consommateurs amènent les constructeurs à proposer des véhicules ayant une consommation raisonnable. Afin de comparer différents véhicules, les constructeurs ont l'obligation d'afficher une étiquette énergétique depuis 2006 (voir figure ci-contre). Celle-ci comprend l'identification du véhicule, le type de





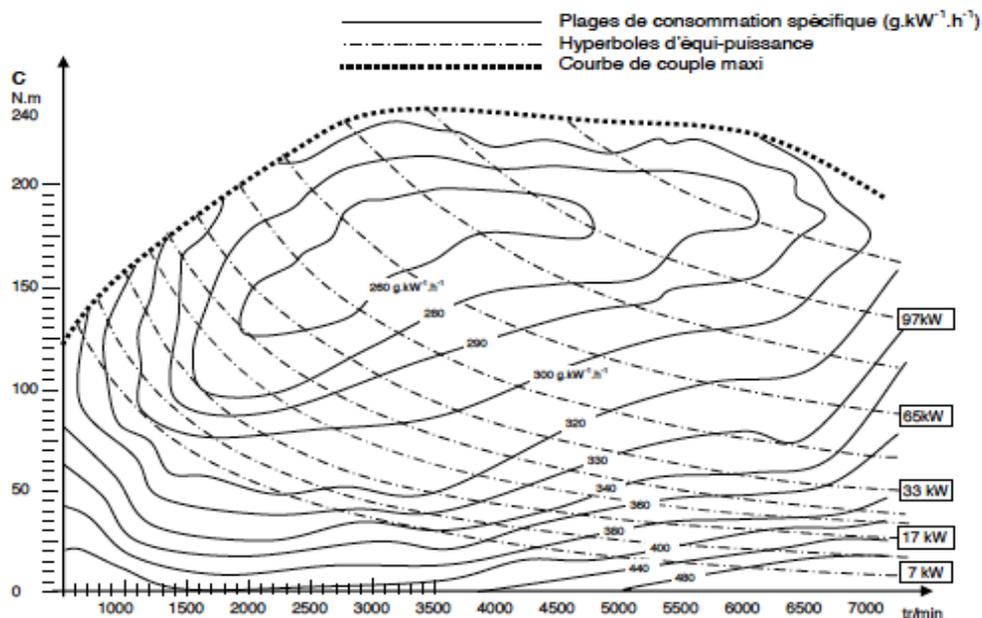
Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

carburant, la consommation selon les cycles urbain, extra-urbain et mixte en litres/100km, les émissions de dioxyde de carbone CO₂ sur le cycle mixte et le positionnement du véhicule sur l'échelle des émissions (classes A à G).

La consommation de carburant des véhicules automobiles est liée à plusieurs caractéristiques comme la consommation du moteur, la masse du véhicule, sa géométrie pour tenir compte des efforts de pénétration dans l'air, des efforts dus aux roulement du véhicule, etc.

Pour un moteur à combustion interne, la quantité de carburant dépend de sa puissance, du couple demandé et de son régime en tours par minute. Les courbes d'iso-consommation indiquent les zones où le moteur est économe et celles qui engendrent une forte consommation. Ces courbes permettent de comparer des motorisations différentes en fonction de la **consommation spécifique** CSP en g/kWh. La donnée CSP représente l'inverse du rendement du moteur thermique.

Courbes d'iso-consommation : (Fig.1)



source : Éducation Nationale

Le type de carburant employé dans le véhicule sera également à prendre en considération pour déterminer la quantité de CO₂ émise par kilomètre. Par exemple, l'objectif de 120 gCO₂/km impose une consommation de 4,6 litres/100km pour un véhicule diesel.

Explications : 120 gCO₂ représentent $120 \times 12 / (12 + 2 \times 16) = 32,7$ gC ; or la masse du carburant diesel contient 85% de carbone, on aura donc une consommation de



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

$32,7/0,85=38,5$ g de diesel. La masse volumique du diesel étant de 830 kg/m^3 , le véhicule devra présenter une consommation de 4,67 litres/100km.

La consommation des véhicules est donc un enjeu majeur pour les constructeurs automobiles afin de respecter les seuils fixés par le Commission Européenne.

2.2- Les éléments de réduction de la consommation

La consommation d'un véhicule dépend de différents paramètres : ceux inhérents au véhicule comme la masse, la résistance au roulement... et ceux inhérents à l'usage qui en est fait comme les accélérations, la vitesse, les dénivelés du parcours...

La **masse des véhicules** est un élément déterminant dans la consommation de carburant. Plus elle est élevée, plus le véhicule aura besoin d'énergie pour se mettre en mouvement. Paradoxalement, on observe une augmentation significative de la masse des véhicules ; par exemple, la Golf 1 affichait 700 kg sur la balance alors que la Golf 5 dépasse la tonne ! L'embonpoint pris par les véhicules s'explique par un besoin de sécurité passive accru. En effet la masse du véhicule est également un élément déterminant sur la tenue de route et sur les différents tests de sécurité passive (crash-tests).

L'étude des points de fonctionnement du groupe moto-propulseur sur les courbes d'iso-consommation montre que le rapport de la boîte de vitesse intervient de manière significative sur la consommation de carburant. Sur les véhicules à boîte manuelle, seul le pilote peut agir pour tendre vers un optimum ; les **boîtes de vitesses à variation continue (CVT)** permettent de garantir cet optimum de consommation en conservant un couple fourni selon la sollicitation du pilote.



source : Éducation Nationale

Le **coefficient de trainée (Cx)** ou la résistance à l'avancement rend compte de la force de résistance d'une surface. Il dépend de la géométrie du véhicule et permet de déterminer la force de trainée (F_x) en fonction des caractéristiques du véhicule et de sa vitesse de déplacement :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2$$

avec ρ : masse volumique du fluide ($\rho_{\text{air}} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ à $+10^\circ\text{C}$) ; S : surface frontale du véhicule en m^2 (ou maitre-couple) ; C_x , le coefficient de trainée et v, la vitesse relative du véhicule par rapport au fluide en m/s.

Le profilage aérodynamique des véhicules a énormément progressé pour présenter des coefficients de trainée les plus faibles possibles. Cependant, c'est la surface projetée ou le



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

maitre-couple (S) qui a, dans le même temps, augmenté afin de répondre à des besoins de confort et de sécurité.

Par exemple, un SUV (Sport and Utility Vehicle) de Cx de 0,40 et de maitre-couple de 2,70m² nécessitera un effort Fx de 521,7 N pour se déplacer à 100 km/h :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot v^2 = \frac{1}{2} * 1,25 * 2,70 * 0,4 * 27,8^2 = 521,7 \text{ N}$$

Si ce déplacement s'effectue dans les mêmes conditions pendant 100 km, l'énergie mise en jeu sera de l'ordre de 52,17 MJ. En considérant un moteur diesel (Pouvoir Calorifique Inférieur =38,08MJ/l) et un rendement global du réservoir à la roue de 40%, le véhicule consommera 3,42 litres sur le trajet de 100km uniquement pour vaincre la résistance aérodynamique à l'avancement.

La consommation en carburant dépend également de la **résistance au roulement (Rr)**. Celle-ci rend compte des caractéristiques des pneumatiques, de leur état et de leur pression et également des chaussées empruntées par le véhicule. Il est évident qu'il faudra conserver un compromis acceptable entre la résistance au roulement et l'adhérence. Les pneumatiques ont largement évolués dans le domaine afin de garantir une adhérence en limitant la résistance au roulement. La Commission Européenne rend obligatoire l'usage de pneumatiques à faible résistance au roulement et au contrôle automatique de leur pression sur tous les véhicules neufs dès 2012. Ces mesures permettraient une réduction de 7 gCO₂/km.

Ces caractéristiques et l'ensemble des efforts nous donne une expression de la force de résistance à l'avancement pour le véhicule Toyota PRIUS selon la vitesse de déplacement :

$$F \text{ (en N)} = 188 + 0,32 \cdot v + 0,456 \cdot v^2$$

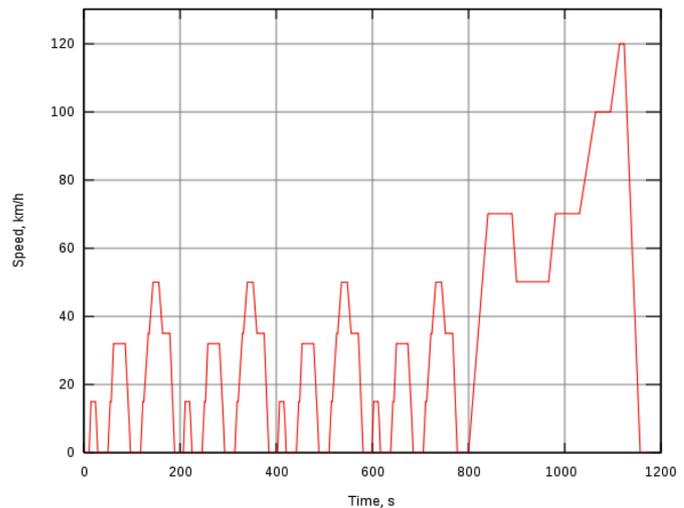
Le véhicule demande, pour un trajet de 100 km à la vitesse de 90 km/h, une énergie de 48,175 MJ, soit une consommation de 3,4 litres (PCI Essence 35,45 MJ/l et rendement global de 40%). Ce résultat ne prend pas en compte la mise en vitesse de la masse du véhicule (1300kg).



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

2.3- Les tests de consommation et d'émissions des véhicules

Afin de comparer la consommation de véhicules différents, la Commission Européenne a mis en place des tests représentatifs des conditions de conduite en Europe. Il s'agit de scénarios d'accélération, de décélération du véhicule sur un banc instrumenté qui permettent de quantifier les émissions et la consommation du véhicule. Le test **New European Driving Cycle** (ou **cycle NEDC**) dure environ 20 minutes et réalise un trajet de 11 km.



source : Wikipedia, auteur : Orzetto

3- Le principe « downsizing »

Le « downsizing » désigne un ensemble de procédés visant à réduire la cylindrée d'un moteur, sans en dégrader la puissance spécifique, dans le but de réduire la consommation de carburant.

Les solutions techniques apportées aux moteurs essence comme aux moteurs diesel permettent de réduire la cylindrée en conservant une puissance suffisante aux besoins du véhicule.

L'injection directe sur les moteurs essence n'est pas une nouveauté ; Georges Regembeau avait ainsi converti sa Citroën Traction au début des années 1950. La magnifique Mercedes 300 SL (1955) a été la première voiture de série à être équipée d'une injection directe essence. L'idée n'a pratiquement plus été mise en oeuvre jusque dans les années 1980 où le fabricant Fiat propose une injection directe diesel. Le principe permet une combustion stratifiée à mélange pauvre (rapport carburant/air <1), amène une réduction de l'ordre de 10% de la consommation mais produit dans le même temps plus d'oxyde d'azote (Nox). Depuis, la technologie a évolué vers le turbo-diesel à injection directe.



source Wikipedia, auteur Sfoskett

La suralimentation par turbocompresseur apporte également un gain de puissance ou une diminution de cylindrée à puissance identique ; par exemple, un moteur 1,6 litres



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

turbocompressé (Mini Cooper S) obtient les mêmes performances de couple qu'une cylindrée de 2,5 litres atmosphérique. Le turbocompresseur à faible inertie fonctionne alors à tous les régimes moteur et permet d'observer une caractéristique de couple pratiquement constante de 2000 à 5000 tr/min ; l'économie de carburant est alors de l'ordre de 10%.

Le downsizing ne concerne pas seulement le moteur. Les gains de puissance sur les énergies de service comme la direction électrique en remplacement de l'hydraulique ou l'optimisation énergétique de tous les accessoires de confort et de sécurité apportent des économies notables qui permettent un besoin en puissance plus petit. Les efforts de conception sur les rendements de toutes les chaînes de transmission : matière, frottements réduits, équilibrage, calage de distribution variable ou encore les commandes de soupapes électromécaniques (camless)...

Aujourd'hui, les constructeurs se tournent vers l'hybridation du groupe moto-propulseur avec des solutions thermique / électrique, hydrogène, pile à combustible...

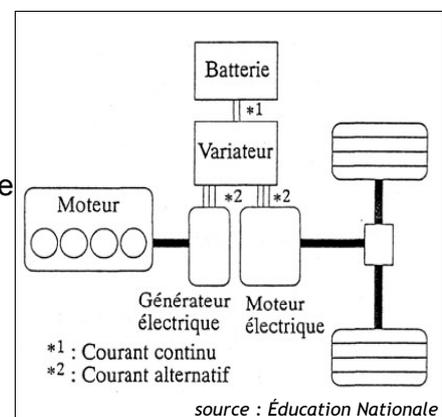
4- Le véhicule hybride

Dans l'objectif de réduction des émissions de CO₂ et des consommations de carburant, les constructeurs automobiles fabriquent des véhicules hybrides. Ils utilisent le principe « down sizing » pour un dimensionnement du moteur thermique au plus près de son point de fonctionnement optimal à vitesse établie dans la zone de fonctionnement économe des courbes d'iso-consommation. Le véhicule est équipé de batteries et ne reçoit donc que du carburant comme énergie externe. L'ensemble est piloté de manière à récupérer l'énergie cinétique au ralentissement ou à utiliser le surplus de la puissance du moteur thermique pour recharger les batteries. L'apport de couple nécessaire aux accélérations est alors fourni par un moteur électrique.

Si aujourd'hui les constructeurs proposent des véhicules essence/électrique, les développements en cours les amèneront à coupler moteur diesel et moteur électrique.

4.1- Architectures types des véhicules hybrides

Architecture série : un moteur thermique est accouplé un générateur électrique et l'énergie ainsi transformée permet au moteur électrique d'entraîner les roues. Le moteur thermique fonctionne alors généralement à régime fixe dans la zone de consommation réduite à son rendement optimum.

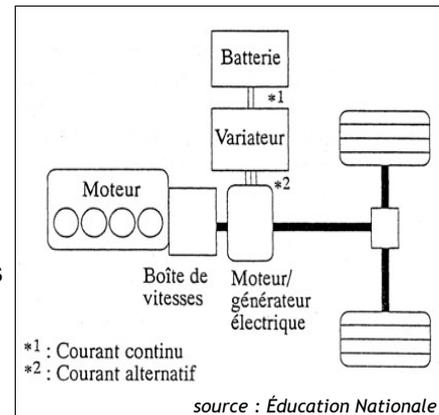




Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

Architecture parallèle : les deux types de motorisation sont utilisés pour entraîner les roues. Le système de pilotage permet également de recharger les batteries sur certains points de fonctionnement.

Architecture série-parallèle : c'est une combinaison des deux architectures présentées ci-dessus. La complexité de ces véhicules (exemple, Toyota Prius) rend leur approche difficile surtout dans leur pilotage.



Il existe d'autres types d'hybridation, notamment les véhicules « start and stop » à alternodémarrreur que l'on qualifie de *micro-hybrides*. Le principe est de stopper le moteur thermique lors des phases d'arrêt ; le véhicule est alors relancé par une machine électrique soit en actionnant le démarreur, soit en délivrant l'énergie nécessaire pour effectuer quelques tours de roue et lancer ainsi le moteur thermique.

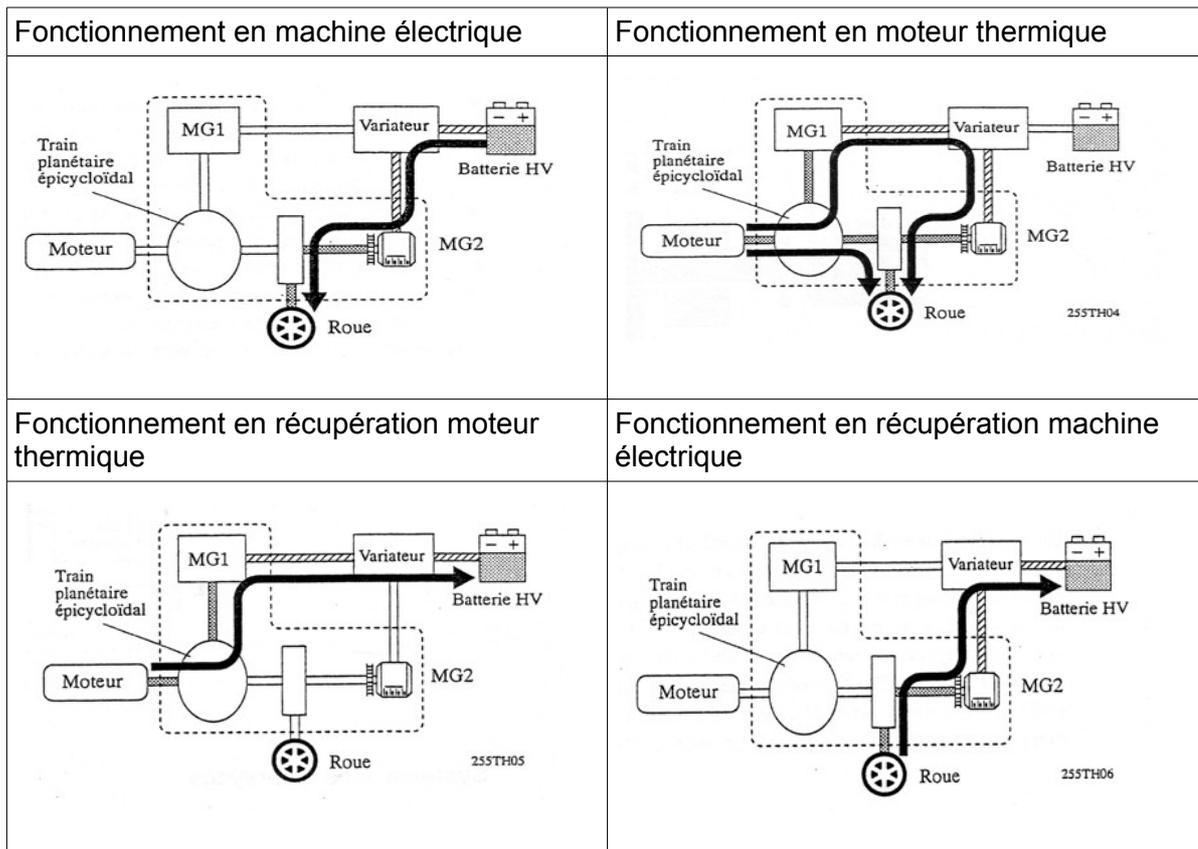
4.2- Les flux d'énergie

Le flux d'énergie peut emprunter différents chemins en fonction de la demande du pilote et du trajet (demande de puissance, couple demandé à la roue). En fonctionnement moteur, le flux d'énergie peut être fourni par le moteur thermique ou par le moteur électrique ; le système de pilotage assure également un « mixte » des solutions pour conserver le point de fonctionnement du moteur thermique dans une zone de rendement optimal. En régime de récupération, le flux d'énergie vient des roues ou du moteur thermique pour recharger les batteries.

Le tableau ci-dessous illustre les principaux types de fonctionnement (source des images : Éducation Nationale) :



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable



5- Conclusion

Le secteur du transport routier représente une très grande part des émissions des gaz à effet de serre ; les enjeux énergétiques et environnementaux sont donc importants et les constructeurs automobiles doivent s'adapter aux nouvelles réglementations en terme d'émission de CO_2 (95 gCO_2/km en 2020). Les solutions techniques présentées ici montrent la diversité des leviers de réduction des consommations des moteurs à combustion interne. De nombreux constructeurs automobiles proposent une gamme de véhicules hybrides, tout électrique, « start and go », etc. L'hybridation est le plus souvent une association thermique essence – électrique, mais de nouveaux véhicules pourraient voir le jour avec une hybridation thermique diesel – électrique ou encore avec des énergies comme l'hydrogène, la pile à combustible...

L'étude pourrait être poursuivie par une approche de la motorisation tout électrique qui, si elle n'émet pas de CO_2 à l'utilisation, pose d'autres problèmes comme le stockage de l'énergie, l'autonomie du véhicule, la production d'électricité et ses différents moyens...



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

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

1- Évaluation de la consommation énergétique d'un véhicule à vitesse stabilisée

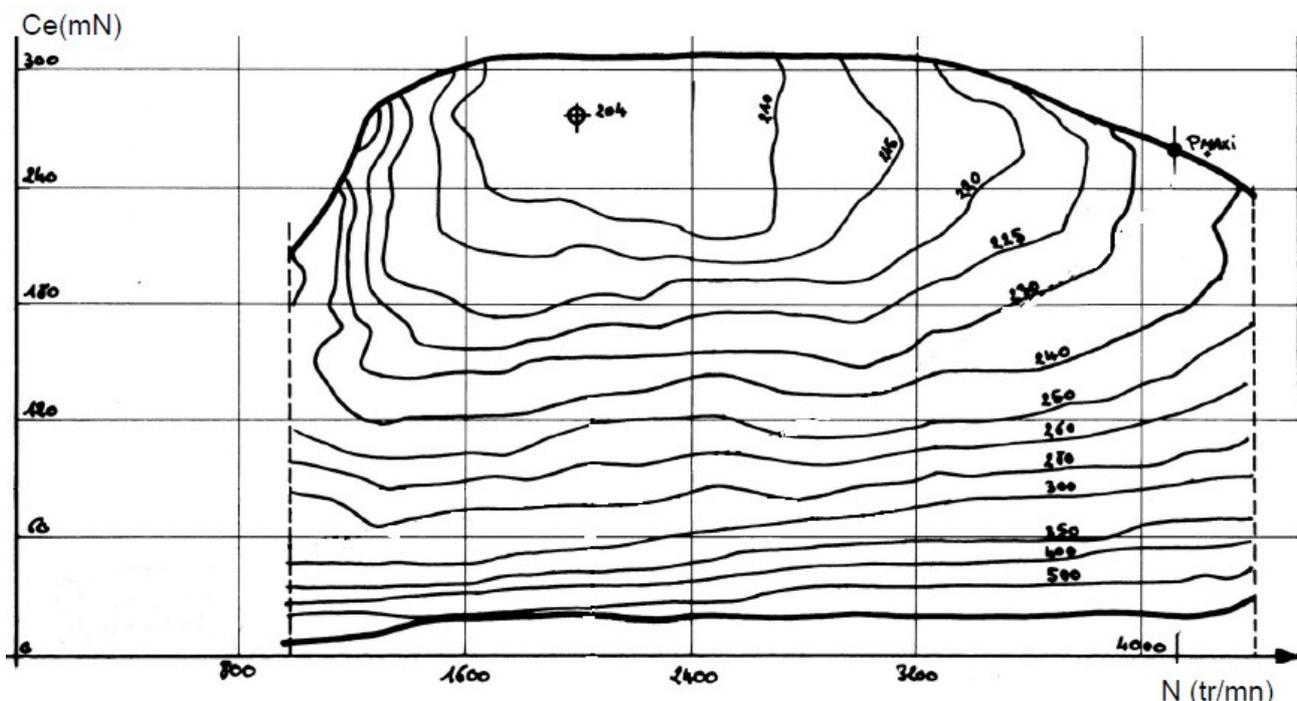
On cherche à évaluer la consommation d'un véhicule qui se déplace à une vitesse stabilisée de 110 km/h. Ce véhicule est équipé d'un moteur Diesel d'une cylindrée de 2,5 l, les courbes d'iso-consommation de ce moteur sont données en figure 1.

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

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

où,

- C_r 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





Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

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

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

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.

1-A-4 Situer ce point de fonctionnement (C_e, N) du moteur sur le plan couple vitesse.

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

$$P = C_r * \Omega \text{ et } \Omega = \frac{2 * \Pi}{60} * N$$

avec P exprimé en W , N exprimé en tr/min, et C en Nm

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

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

1-B-4 Calculer le volume de carburant (densité : 0,83) nécessaire pour faire 100 km et la quantité de CO_2 par km ainsi rejetée dans l'atmosphère (on retiendra un rejet de 2,6 kg de CO_2 par litre utilisé)

1-C- Conclusions

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

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

- du point de vue de sa consommation ?
- du point de vue de sa vitesse de rotation si on admet qu'il est opportun de choisir une vitesse de rotation minimale pour diminuer l'usure des parties mécaniques ?



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

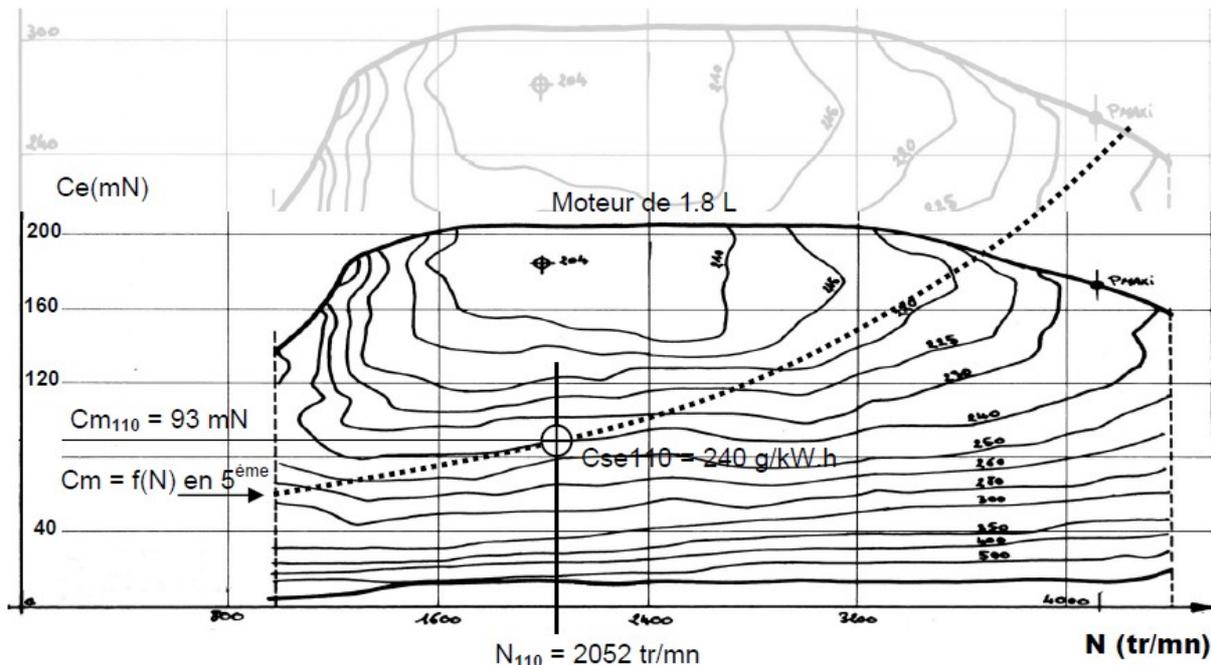
- préciser de ces points de vue un point de fonctionnement particulièrement intéressant

2- Étude critique du « downsizing » des Groupes Moto-Propulseurs

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 « down sizing ») 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 CO_2 pour 100 km du moteur dans cette nouvelle configuration



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

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

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

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

2-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)

2-B- Conclusions

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

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

- du point de vue de sa consommation ?
- du point de vue de sa vitesse de rotation si on admet qu'il est opportun de choisir une vitesse de rotation minimale pour diminuer l'usure des parties mécaniques ?
- préciser, de ces points de vue, un point de fonctionnement particulièrement intéressant

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 ?

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

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



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

3- Une exploitation de l'hybridation Thermique – Électrique 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 aux phases d'accélération.

Hypothèses retenues pour cette étude

Le véhicule roule à 80 km/h à vitesse stabilisée

Véhicule

- Masse totale : $m_T = 1300$ kg
- S.Cx : 0,55
- Coefficient de frottement des pneumatiques : $K_r = 0,015$
- on considérera un rendement unitaire pour la transmission

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 utile max = 33 kW

Batteries

- Pmax durant la charge : 14 kW
- énergie utilisable : 720 Wh

Carburant

- Supercarburant : densité 0,72 ; rejets de CO₂ : 2,28 kg/litre



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

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 :

$$F_r = K_r \cdot m_T \cdot g \quad (\text{Résistance au roulement due aux pneumatiques})$$

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2 \quad (\text{Résistance due aux efforts aérodynamiques})$$

$$F = F_r + F_a$$

où :

- x K_r représente le coefficient de résistance à l'avancement dû aux pneumatiques
- x $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- x ρ représente la masse volumique de l'air ($1,2 \text{ kg/m}^3$)
- x S représente la surface frontale du véhicule
- x C_x représente le coefficient de pénétration du véhicule

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

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.

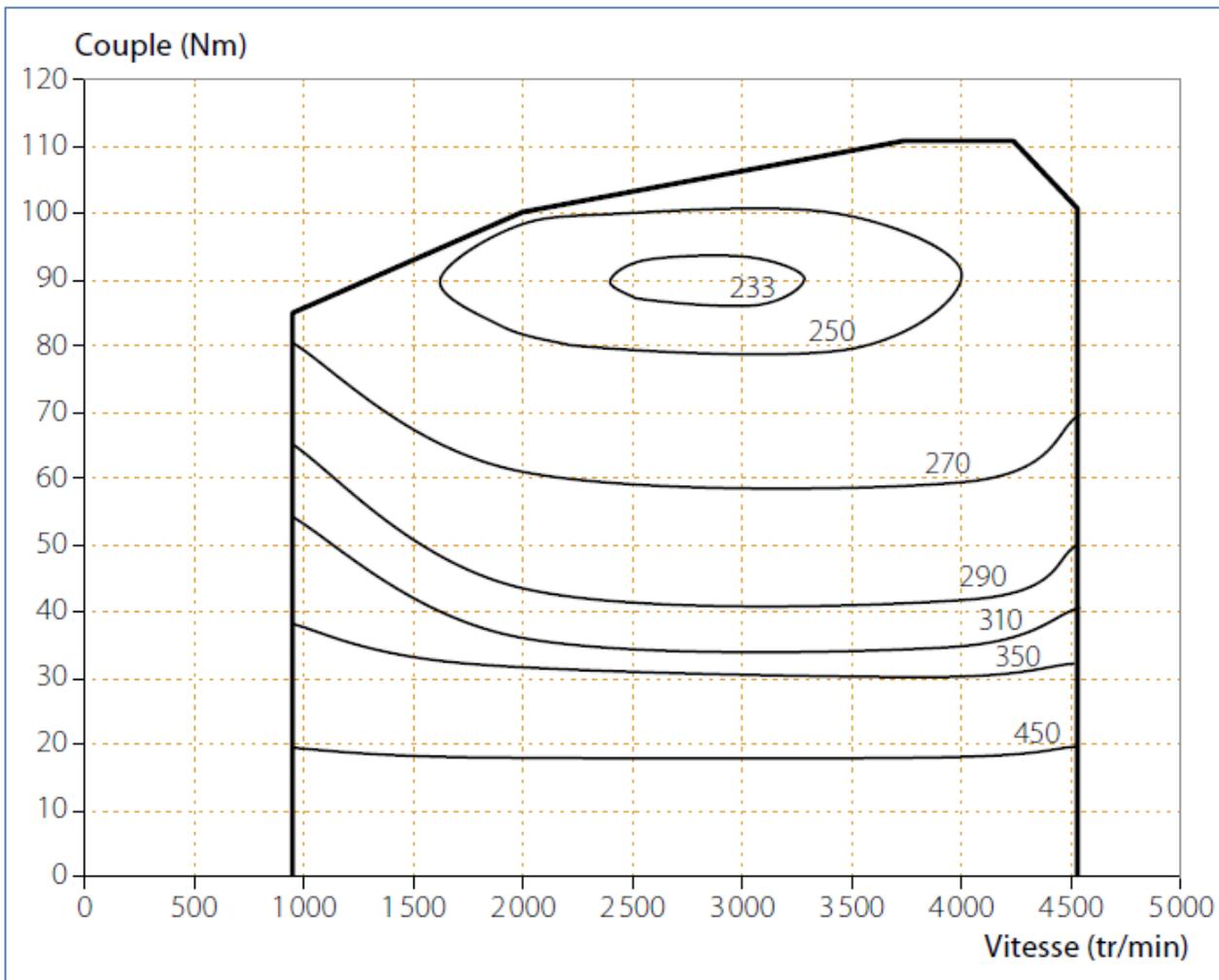
3-A-4 Représenter sur la courbe d'iso-consommation donnée en figure 4, le profil du couple $C_r = f(N)$ obtenu à l'aide des points calculés à la question 3-A-3 pour la puissances P_{80}

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

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 si on retient une fréquence de rotation de 1800 tr/min pour le moteur.



Sciences et technologies de l'industrie et du développement durable



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

3-B-1 Pour le point de fonctionnement retenu à la question 3-A-6, calculer, pour V_{80} , la masse de carburant nécessaire pour faire 100 km

3-B-2 Calculer, pour V_{80} , le volume de supercarburant (densité : 0,72kg/l) 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 de supercarburant)



Sciences et technologies de l'Industrie et du développement durable

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
- 3-C-2 Calculer la puissance disponible pour charger la batterie
- 3-C-3 Calculer le temps de charge de la batterie pour ce régime de fonctionnement
- 3-C-4 Calculer la consommation de carburant ainsi que la distance parcourue durant cette phase 1

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

Bilan

- 3-C-6 Calculer la consommation de carburant 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 de supercarburant) et comparer ces résultats avec ceux obtenus à la question 3-B-2

4-C Conclusions

- 4-C-1 Préciser l'intérêt de l'hybridation des GMP du point de vue de la réduction des émissions de CO_2
- 4-C-2 Préciser l'intérêt de l'hybridation des GMP du point de vue du confort de conduite