

## **Le sous dimensionnement des moteurs dans un but de réduction des consommations (down-sizing).**

Cette INFOTECH traitera des effets de la réduction de cylindrée sur la consommation des véhicules et montrera comment cette tendance s'inscrit dans les objectifs de limitation des émissions de CO<sub>2</sub> du parc véhicule. Nous verrons les incidences de cette évolution sur la technologie des moteurs dans les applications récentes et à venir.

### **Le problème posé**

La politique de réduction des polluants émis par les transports routiers depuis trente ans porte ses fruits et tend vers des limites quasi asymptotiques qui seront atteintes aux environs de 2020. Le CO<sub>2</sub> reste exclu de ces polluants réglementés alors qu'il est fortement impliqué dans l'effet de serre qui "piège" le rayonnement solaire et contribue au réchauffement de la terre.

Les quantités de CO<sub>2</sub> produites dépendant directement de la masse de carburant consommée, elles sont en constante augmentation (prévision de + 20% à échéance 2020) car le trafic et les activités industrielles n'arrêtent pas de croître. Le CO<sub>2</sub> émis serait responsable à 65% de cet effet de serre et les transports routiers produiraient un quart des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> : les constructeurs automobile se doivent donc de participer à la maîtrise de ces émissions.

L'ACEA (association des constructeurs européens d'automobile) s'est engagée à réduire les émissions moyennes des véhicules vendus en Europe à 140 g/km<sup>(1)</sup> pour 2008. De plus il est prévu de faire un bilan des possibilités technologiques en 2003 et d'envisager la possibilité d'un engagement pour 2012 à 120 g/km.

Pour un carburant donné cet objectif fixe directement une valeur de consommation en litre/100 km. Par exemple pour un gazole contenant 85% en masse de carbone, 120 g de CO<sub>2</sub> correspond à  $120 \cdot 12 / (12 + 32) = 32,72$  g de carbone consommé dans le carburant donc  $32,72 / 0,85 = 38,49$  g de carburant consommé en 1 km. La limite de consommation pour ce carburant (de masse volumique 830 kg/m<sup>3</sup>) serait donc de  $3,849 / 0,83 = 4,63$  litres de carburant pour 100km. La difficulté pour respecter cette valeur est qu'elle représente une moyenne et que des véhicules lourds et de fortes cylindrées seront nettement au dessus, ce qui veut dire qu'il faut en concevoir (et vendre) d'autres qui seront en dessous pour rétablir l'équilibre. Les objectifs de consommations minimales à atteindre sont donc placés très bas pour des durées de développement relativement courtes.

### **Les voies de développement**

- **L'amélioration du réseau routier et la régulation du trafic** pourraient permettre une réduction des consommations pour un trajet donné, les guidages par satellites peuvent contribuer à ce progrès. Pour ce qui est du réseau il est en général toujours en retard car un effet pervers fait que le trafic augmente à chaque fois que la qualité du réseau s'améliore. La régulation du trafic qui actuellement se fait de manière informative et non directive a peu de portée.

---

<sup>(1)</sup> ces valeurs étant mesurées sur banc à rouleaux selon le cycle normalisé européen (NMVEG) correspondant à 11 km de circulation urbaine et extra urbaine.

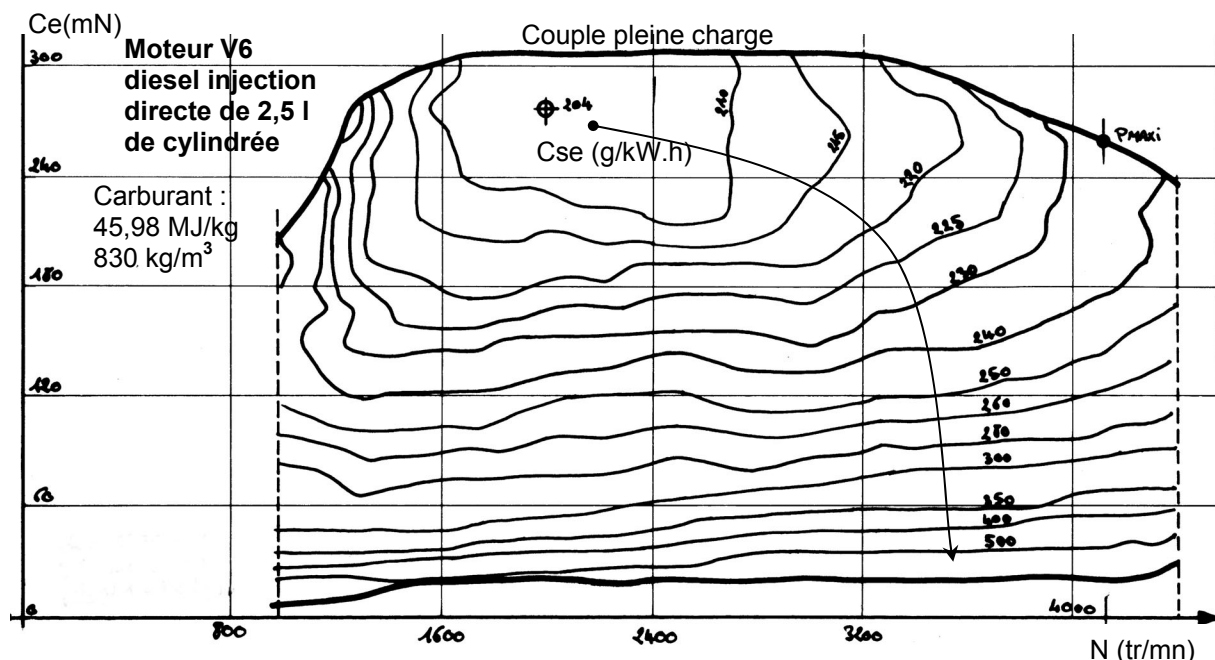
- **La configuration du véhicule** par ses caractéristiques de masse (M), coefficient de traînée (Cx), maître couple (S), résistance au roulement (Rr) agit directement sur les besoins de puissance motrice donc de carburant. Les gains de Cx ont été très importants mais le gain de consommation attendu a été masqué par une augmentation de la masse des voitures, régulière depuis quelques années, et une surface frontale elle aussi en croissance depuis peu. Les causes en sont des structures plus lourdes pour satisfaire les exigences de sécurité passive (crash-test) et de confort acoustique et un style actuel favorisant les véhicules hauts pour des raisons d'habitabilité. Les progrès des pneumatiques sur le paramètre Rr ont eux aussi été masqués par "l'embonpoint" des véhicules modernes.
- **Le type de carburant** décide également la quantité de CO<sub>2</sub> émise pour une énergie donnée, par exemple la combustion du méthane (constituant principal du gaz naturel) réduira de 25% la masse de CO<sub>2</sub> par rapport à l'essence (pour la même énergie consommée) ceci grâce à sa faible teneur massique en carbone et son fort pouvoir calorifique. Pour des carburants non conventionnels et alternatifs ce calcul devient insuffisant car il faut alors faire une comparaison "du puits à la roue" qui fait un bilan du CO<sub>2</sub> en cumulant les étapes de production, de combustion et même de photosynthèse pour les biocarburants. Les seules avancées significatives sont dues actuellement au véhicules GPL et GNV dont le parc croît lentement grâce aux incitations fiscales.
- **Le groupe motopropulseur** agit évidemment sur la performance de consommation par plusieurs effets :
  - **Le type d'équipement**, diesel ou essence, qui s'est orienté massivement vers le diesel contribue à la réduction des valeurs moyennes. Un gain est encore possible car le diesel reste minoritaire sur les plus petites cylindrées probablement à cause des contraintes de coûts sur les véhicules de ce segment.
  - **Le type de transmission** par la multiplication des rapports et l'automatisation des passages permet un gain significatif (boîte robotisée) en optimisant l'utilisation du moteur sur ses zones de meilleur rendement. L'aboutissement de ce principe est la variation continue du rapport de transmission (CVT).
  - **La gestion des énergies de service** : les accessoires de confort et de sécurité sont toujours croissant sur les véhicules et l'optimisation de leur consommation énergétique permet des gains notables. Par exemple le remplacement d'une direction hydraulique par une électrique réduit l'impact de cette fonction sur la consommation du véhicule. La production de l'énergie électrique peut aussi être améliorée par une gestion de l'alternateur par le boîtier de contrôle moteur voire un alterno-démarrreur permettant une récupération d'énergie lors des phases de décélération.
  - **Le rendement de la transformation énergétique** assurée par le moteur : nous avons assisté à un progrès de toutes les fonctions concourant à ce résultat : réduction des frottements (matériaux, qualité d'usinage, équilibrage, évolution des lubrifiants), meilleure maîtrise de la fonction refroidissement (augmentation des températures de service, thermostat piloté, maîtrise des flux internes), calages de distribution variables, optimisation du contrôle moteur grâce aux possibilités des calculateurs (autoadaptativité des cartographies, maîtrise du cliquetis, maîtrise des combustions pauvres, ...). Les gains sur toutes ces fonctions trouvent actuellement leurs limites et nous arrivons au stade où de nouvelles

solutions techniques dites "en rupture" par rapport aux anciennes doivent être mises en place. Ce sont, par exemple, les moteurs en charge stratifiée (mélange hyper-pauvre), les commandes de soupapes électro-mécanique (camless), l'hybridation du GMP (thermique + électrique), voire d'autres types d'énergie embarquée (hydrogène, pile à combustible, ...). Toutes ces solutions seront longues à appliquer sur les moteurs des petites gammes à cause de leurs coûts de développement, c'est pourquoi la situation actuelle incite les constructeurs à pousser "au bout" les solutions actuelles pour retarder le saut technologique.

Avec cette politique il est difficile d'avoir des gains sur les rendements maximum des moteurs. Par contre des progrès sont possibles sur toutes les charges partielles qui représentent la majorité du temps d'utilisation d'un moteur. Le sous-dimensionnement du moteur est typique de cette stratégie et nous allons en examiner les fondements.

## Courbes iso-consommation d'un moteur et consommation du véhicule

Dans tout le champ d'utilisation d'un moteur il est nécessaire de connaître sa performance de consommation spécifique qui est l'image de son rendement global<sup>(2)</sup>. Les résultats sont présentés de la manière suivante :



Nous observons que la Cse augmente lorsque la charge diminue donc les meilleurs rendements ne peuvent être atteints que sur des pleines charges ce qui est une situation assez rare pour une utilisation tourisme.

<sup>(2)</sup> Dans le système d'unités S.I. nous pouvons démontrer que  $\eta_g \cdot P_{ci} \cdot C_{se} = 1$  (avec  $P_{ci}$  : pouvoir calorifique du carburant en J/kg,  $C_{se}$  : consommation spécifique du moteur en kg/W.s et  $\eta_g$  : rendement global du moteur. Ce qui permet d'écrire que  $\eta_g = 1/C_{se}$  donc que la Cse est bien l'image "inversée" du rendement.

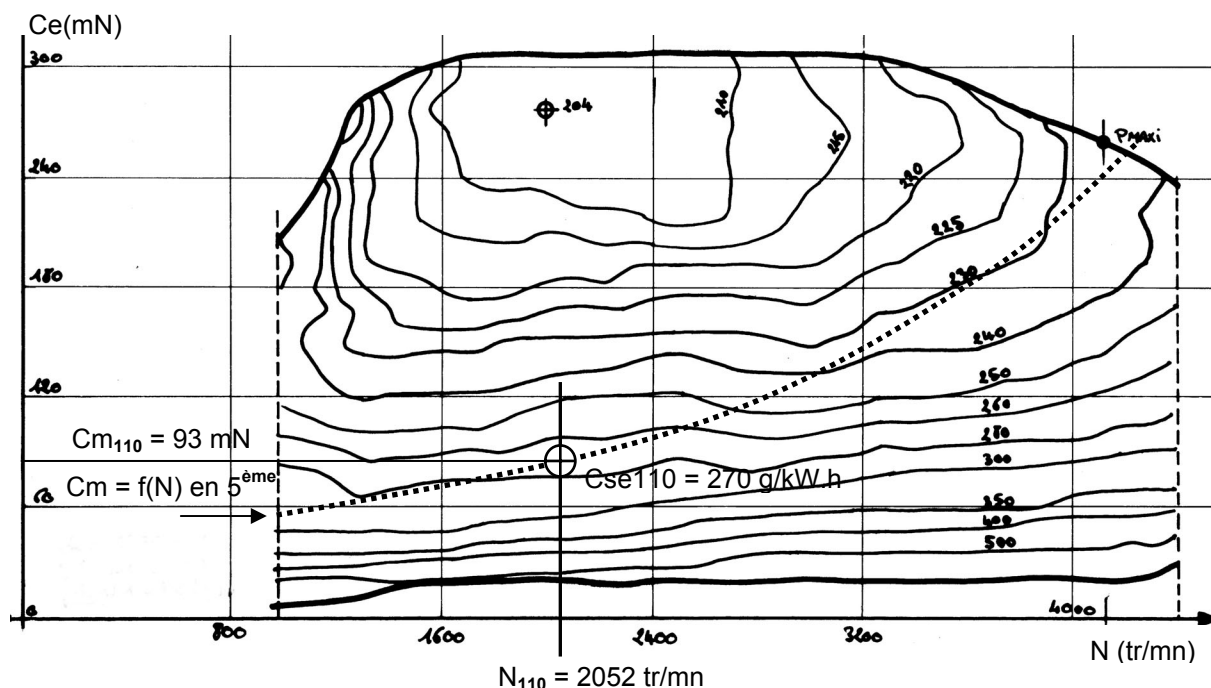
## Relation rendement-charge

La diminution du rendement avec la charge s'explique par plusieurs facteurs :

- Les pertes par frottement sont peu influencées par la charges. Elles sont fonction avant tout du régime, donc lorsque l'énergie introduite diminue, elles prennent proportionnellement plus d'importance ce qui diminue le rendement.
- Sur un moteur essence, la réduction de charge se fait par fermeture du papillon des gaz ce qui fait chuter la pression tubulure à des valeurs très faibles. Cette dépression produit un travail négatif sur le piston lors de la phase admission. Ce travail dit "travail de pompage" est la principale cause de chute du rendement du moteur essence aux charges partielles.
- Sur un moteur diesel, le travail de pompage augmente aussi légèrement si la charge diminue mais pas pour les mêmes raisons puisqu'il n'y a pas de vannage à l'admission. La masse d'air admise par cycle étant considérée constante, c'est la température des gaz d'échappement qui diminue avec la charge. L'évacuation des gaz est alors plus difficile lors de la phase échappement car leur masse volumique est plus importante. C'est la contre pression d'échappement qui crée alors un travail de pompage et affecte le rendement. Ce phénomène est quantitativement limité par rapport au moteur à essence.
- La qualité de combustion peut être affectée par la réduction de charge. Sur un moteur à essence la masse d'air introduite diminue et les turbulences dans la chambre de combustion diminuent : la combustion est ralentie et les imbrûlés augmentent ce qui gaspille une partie de l'énergie introduite. Sur un moteur diesel les conditions de déroulement sont plus stables et le rendement de combustion peu sensible à la charge.

## Consommation d'un véhicule (à vitesse stabilisée)

La connaissance des caractéristiques aérodynamiques du véhicule, de la résistance au roulement de ses pneumatiques ainsi que des rapports de transmission permet de trouver l'équation du couple moteur exigé à l'entrée de boîte en fonction du régime moteur qui sera de la forme  $C_m = A.N^2 + B$ . Voici un exemple pour le véhicule équipé du moteur précédent se déplaçant sur son dernier rapport.



La démultiplication de 5<sup>ème</sup> étant connue pour ce véhicule et chiffrée à 53,6 km/h pour 1000 tr/mn nous pouvons localiser par exemple le point de fonctionnement à 110 km/h à 2052 tr/mn ce qui correspond à un couple moteur de 93 mN. Ce véhicule exige donc une puissance de 20 kW pour se déplacer à 110 km/h. En vitesse stabilisée nous pouvons calculer sa consommation au 100 km à partir de la CSE lue à 270 g/kW.h.

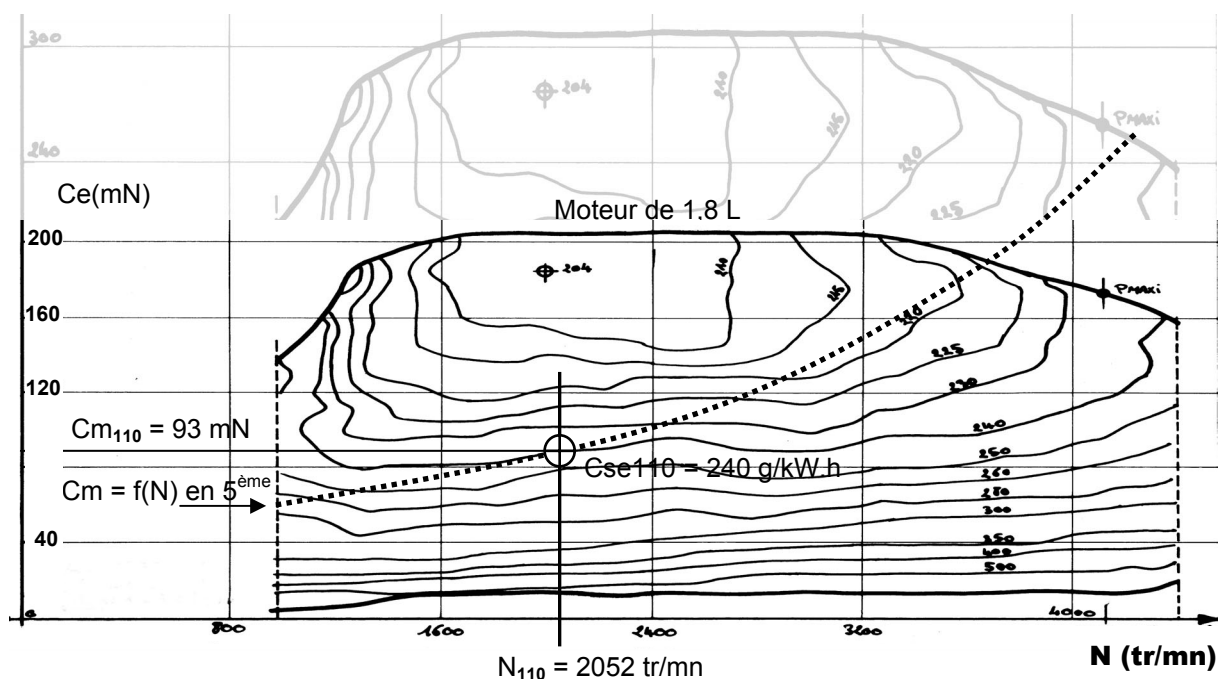
Consommation kilométrique  $0,270.20/0,830.1,1 = 5,9$  l/100km

Ce qui est une bonne performance pour un véhicule de cette catégorie et qui doit beaucoup à son S.Cx de seulement 0,505 m<sup>2</sup>.

Pour un technicien, cette valeur peut paraître décevante puisque ce moteur est capable d'atteindre un rendement de 0,38 (au point 204 g/kW.h) et qu'il est utilisé, dans ces conditions, à un rendement de 0,29 seulement ; si la vitesse diminue, cette valeur sera encore plus basse.

### Réduction de la cylindrée sur un véhicule :

Nous allons considérer pour appuyer notre raisonnement que ce véhicule est maintenant équipé d'un moteur de 1,8 L (les autres caractéristiques n'évoluent pas) et que le contrôle moteur étant de même qualité les performances de Cse sont identiques et parfaitement homothétiques à celles du moteur de 2,5 L (en réalité, pour une cylindrée plus faible, la Cse mini croît légèrement).



La demande de couple du véhicule n'a pas évolué et le moteur de 1,8 L développe lui aussi un couple de 93 mN à 110 km/h. Par contre, nous pouvons remarquer que la valeur de Cse au point 110 stabilisé est de 240 g/kW.h ce qui correspond à une consommation kilométrique de 5,2 l/100 km (gain de 12 % par rapport au moteur de 2,5 L).

La mobilité du véhicule (facilité à augmenter sa vitesse) sera évidemment beaucoup moins bonne avec le petit moteur puisque nous pouvons voir que lors d'une pleine charge à 110, la "réserve" de couple (C<sub>maxi</sub> – 93) vaut 120 mN alors qu'elle est de 214 mN pour le 2,5 L ce qui veut dire que l'accélération à partir de 110 sera presque deux fois plus importante avec le gros moteur.

## Caractérisation du fonctionnement par la pression moyenne effective ( $P_{me}$ )

La comparaison des deux situations précédentes serait plus facile avec la notion de  $P_{me}$ , elle est tout à fait usuelle pour les motoristes mais demande à être précisée pour d'autres lecteurs.

La  $P_{me}$  exprime le travail développé au vilebrequin sur un cycle, ce travail étant ramené en valeur spécifique à la cylindrée. Le travail par cycle vaut  $W_{cycle} = C_e \cdot 4\pi$  (ce serait  $2\pi$  pour un moteur 2 temps) et, ramené à la cylindrée, le travail spécifique vaut  $C_e \cdot 4\pi / \text{cylindrée}$  et s'exprime en joules/m<sup>3</sup>. Cette unité est, du point de vue équation dimension, la définition du Pascal et justifie donc la dénomination de pression moyenne effective. L'unité en usage est plutôt le bar pour exprimer cette valeur et nous procéderons ainsi dans la suite du document.

*Remarque : cette possibilité de transposer un travail par cycle en pression, sur un moteur donné, peut s'appliquer à toutes les autres valeurs énergétiques du cycle. Par exemple, le travail de frottement par cycle devient la pression moyenne de frottement ( $P_{mf}$ ) ; l'énergie chimique introduite par cycle devient la pression moyenne chimique ( $P_{mchim}$ ), etc... L'analyse des flux énergétiques se fait alors totalement en bar.*

La comparaison des deux situations envisagées précédemment revient à dire que la réduction de cylindrée a produit une augmentation de la  $P_{me}$  à 110 km/h.

- avec le 2,5 L  $P_{me} = 5$  b
- avec le 1,8 L  $P_{me} = 7$  b

Toute augmentation de  $P_{me}$  permet sur un moteur thermique des gains de rendement pour les raisons énoncées page 4. Cet effet est la base du principe du down-sizing et vous pourrez constater que cette tendance est amorcée depuis quelques années en comparant les ratios *cylindrée moteur/masse véhicule* de différents modèles.

En appliquant ce principe, il faut tout de même combler le déficit de puissance (au moins en partie) pour que l'utilisateur conserve un agrément de conduite. Ceci veut dire que le petit moteur devrait viser une puissance maxi de 113 kW comme le gros moteur ; ceci correspond à une puissance spécifique de 62 kW/litre qui est tout à fait envisageable et au niveau des meilleures réalisations actuelles.

Les valeurs de  $P_{me}$  maxi seront respectivement de 15,5 b pour le gros moteur et de 21,6 b pour le petit (ce qui est un objectif ambitieux).

Il faut bien comprendre que l'objectif de  $P_{me}$  est aussi important que celui de puissance car nous pourrions aussi atteindre une puissance de 113 kW avec des  $P_{me}$  plus faibles si nous augmentions le régime du moteur (solution habituelle des réalisations "performances"). Par exemple, une  $P_{me}$  de 13,6 b pour le petit moteur, atteinte à 5500 tr/mn, suffit pour produire 113 kW, mais dans ce cas, les objectifs de gain de rendement ne seront pas atteints car le régime est le facteur incident de premier ordre sur les pertes par frottement ( $P_{mf}$ ).

**Le sous-dimensionnement impose bien deux objectifs : un de  $P_{me}$  maxi à réaliser et un de puissance à atteindre.**

### ***Problèmes posés par l'objectif de puissance***

- La densité énergétique dans la chambre amène des températures matière très élevées particulièrement sur les pistons (bord du bol des pistons diesel particulièrement critique) ce facteur limite actuellement la tenue du piston et du pied de bielle où la lubrification est difficile à assurer.
- La longévité des moteurs devient un problème pour ces niveaux de puissance spécifique car tout dérèglement ou aléa de fonctionnement entraîne plus rapidement des dégradations des organes.

### ***Problèmes posés par l'objectif de Pme***

- Une forte valeur de Pme ne peut se réaliser qu'avec des forts taux de remplissage en air ce qui impose une augmentation des pressions de suralimentation. Le travail de la boucle de sural devient plus important et par exemple les contre-pressions d'échappement deviennent nettement supérieures aux pressions de sural.
- Une pression de sural augmentée veut dire un échauffement supplémentaire de l'air lors de la compression ce qui va imposer des surfaces d'échangeur supérieures pour maîtriser les températures d'admission. Ces échangeurs auront un effet négatif sur le Cx du véhicule ce qui va réduire les gains recherchés.
- Les pressions maxi de chambre seront nettement plus élevées lors de la combustion (peuvent atteindre 180 à 200 b sur diesel inj dir) ce qui rend l'étanchéité du joint de culasse plus difficile à réaliser (les serrages culasses nécessaires imposent une rigidité plus élevée du bloc)
- Les contraintes mécaniques sur l'équipage mobile alourdissent celui-ci, les effets d'inertie qui en résultent augmentent les frottements entre les pièces.
- Le fait de décaler toutes les situations de fonctionnement vers des Pme plus élevées va augmenter les émissions d'oxydes d'azote du moteur (voir infotech n°2) ce qui va rendre plus onéreux le post-traitement des émissions. L'EGR qui a un effet positif sur ces émissions verra son application limitée car il réduit le remplissage du moteur en air (donc la Pme) et il faudra se tourner vers des solutions plus évoluées.

### ***Le problème des transitoires (décollage et reprises)***

Un véhicule conçu dans la stratégie de "down-sizing" se retrouve donc avec un moteur fortement suralimenté ce qui va poser des problèmes de comportement principalement lors du décollage du véhicule (démarrage en côte chargé, par exemple). La boucle de suralimentation aura un temps de mise en action à partir du ralenti pendant lequel le véhicule sera mal ressenti par le conducteur, ce problème existe également lors des reprises sur route mais de manière moins critique.

C'est le principal écueil qui empêche de forts down-sizing actuellement, les solutions qui permettent de contourner ce problème sont disponibles et peuvent trouver des applications commerciales très bientôt :

- Transposer le principe de l'alternateur-démarreur au niveau de l'ensemble tournant compresseur-turbine. Le turbocompresseur devient alors un générateur électrique de forte puissance lorsque le moteur est suffisamment chargé. Lors des phases de décollage et de reprise des accumulateurs alimentent le système qui devient moteur et compense le manque de débit de gaz d'échappement. La pression de sural est donc garantie quelles que soient les conditions de fonctionnement du moteur.

- Entraîner le compresseur directement par un moteur électrique (plus de 3kW nécessaires) et supprimer la turbine. La pression de suralimentation est totalement découplée du moteur mais la forte demande de courant ne peut être satisfaite que par un alterno-démarrreur et encore cette solution restera plutôt réservée à des applications à faible suralimentation, sur moteur à essence par exemple. Le remplissage moteur se trouve amélioré (à pression de sural donnée) par le fait que le moteur est complètement libéré à l'échappement et sa contre pression d'échappement retombe à des valeurs faibles.
- Installer une suralimentation par compresseur volumétrique qui présente un meilleur comportement lors des transitoires. En effet une sural. volumétrique revient à mettre en série deux pompes volumétriques avec la première (le compresseur) ayant une cylindrée supérieure à la seconde (le moteur). C'est le volume refoulé par le compresseur à chaque cycle moteur qui détermine le taux de sural (aux rendements volumétriques et fuites près) et celui-ci est atteint à tous les régimes. Un autre avantage d'un compresseur volumétrique est de moins échauffer l'air qu'un compresseur centrifuge : pour un même remplissage les besoins en refroidissement seront réduits ce qui sera bénéfique au Cx. Par contre, les pertes mécaniques entre le moteur et le compresseur deviennent trop importantes pour des régimes et des pressions élevés, là aussi cette application est à réserver à des moteurs essence faiblement suralimentés. Des transmissions moteur-compresseur à variation de rapport continue amélioreraient beaucoup le système sur ce plan là.
- Le système alterno-démarrreur à été évoqué plusieurs fois comme une source d'énergie de service mais il peut aussi être envisagé pour permettre une hybridation "douce" du GMP. Par exemple en visant une puissance motrice de 7 à 10 kW qui serait utilisée uniquement dans les phases transitoires pour "booster" le moteur thermique. Ces utilisations de courtes durées n'imposeraient pas un poids de batterie trop élevé et la récupération d'énergie en décélération aurait un impact favorable sur la consommation de carburant. Il serait également judicieux d'en profiter pour réaliser la fonction "stop-and-go" à chaque arrêt véhicule ce qui est intéressant en circulation urbaine pour réduire la consommation.

## Conclusion

Toutes les possibilités évoquées s'appuient sur des solutions techniques connues ou légèrement extrapolées et n'induisent aucune révolution dans la conception des véhicules. Pour aller plus loin vers l'objectif 2012 il faudra sûrement dépasser ce stade et développer de nouveaux concepts qui existent déjà dans les laboratoires de recherche mais sont loin des applications commerciales. L'énergie embarquée sera elle aussi probablement remise en cause ou au moins diversifiée.

---