

COUPLE MOTEUR ET FORCE DE TRACTION

I. LE COUPLE MOTEUR

II. LA FORCE DE TRACTION

III. LE COUPLE ANTAGONISTE

IV. RELATIONS ENTRE GRANDEURS

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

I. LE COUPLE MOTEUR

Quelles sont les caractéristiques essentielles d'un véhicule à moteur ? Les services marketing le savent, c'est la puissance et la vitesse maximale qui, au premier abord, focalisent l'attention du public car ce sont les données les plus valorisantes pour l'acheteur.

Mais pour le technicien comme pour le conducteur avisé, c'est la masse de la voiture, son couple moteur et le régime auquel il est disponible qui sont les données essentielles, car elles conditionnent le comportement du véhicule, le service qu'il peut rendre et son prix de revient. Voici quelques explications.

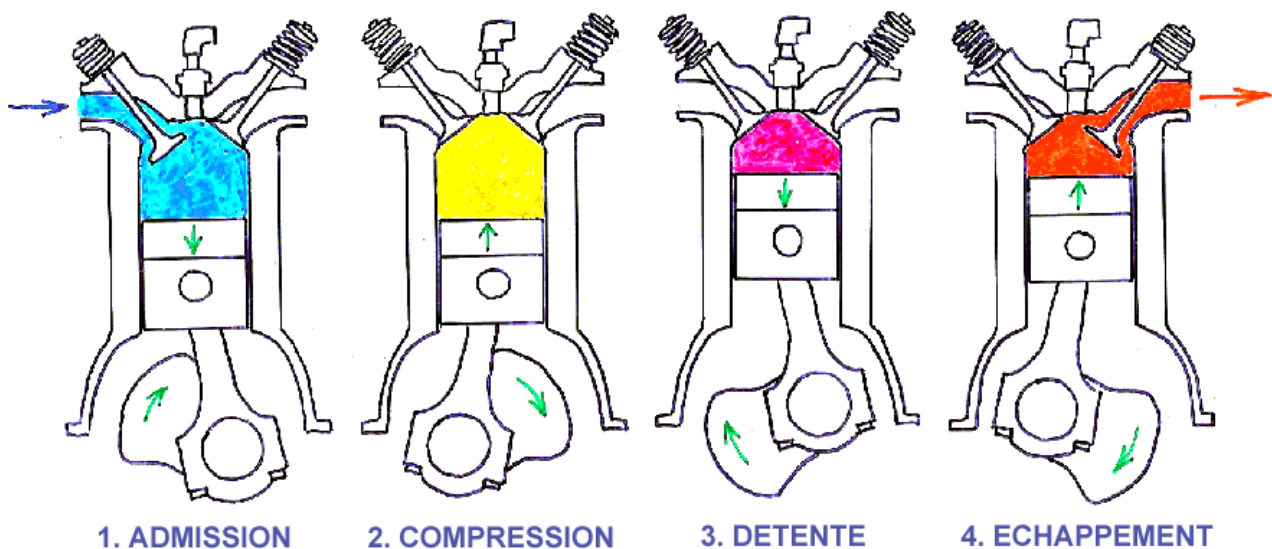
L'origine du mouvement

Du point de vue de la physique, créer du mouvement revient à accélérer une masse à l'aide d'une force.

Cette force qui accélère la masse de la voiture, c'est la force de traction. Elle s'exerce au contact du sol grâce à la rotation des roues motrices. Qu'est-ce qui fait tourner les roues motrices ? C'est le moteur, dont voici le principe de fonctionnement.

Le fonctionnement du moteur

Tous les moteurs des véhicules terrestres diesel, à essence ou au gaz fonctionnent sur le même principe, celui du cycle à quatre temps :



© association adilca reproduction interdite

Le cycle à 4 temps, ou comment passer de l'énergie chimique à l'énergie mécanique.

1. Dans un premier temps nommé *admission*, la soupape d'admission est ouverte tandis que celle d'échappement est fermée. Le déplacement du piston crée une dépression qui permet au moteur d'aspirer un mélange d'air et de carburant (dans le cas d'un moteur à essence) ou de l'air pur, le carburant étant injecté directement dans la chambre de combustion (dans le cas d'un moteur diesel).

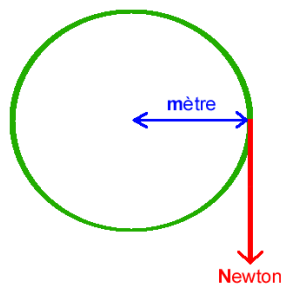
2. Dans un deuxième temps nommé *compression*, les soupapes sont fermées, tandis que le mélange est comprimé par la remontée du piston.

3. Dans un troisième temps nommé *détente*, les deux soupapes sont fermées, une bougie enflamme le mélange air carburant (dans le cas d'un moteur à essence) ou celui-ci s'enflamme spontanément (dans le cas d'un moteur diesel). La combustion dégage alors une importante quantité d'énergie à la fois thermique et mécanique. La pression qui s'exerce sur le piston fait tourner le vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle, c'est l'unique temps moteur du cycle (voir dossier ADILCA "*combustion des carburants*").

4. Dans un quatrième temps nommé *échappement*, la soupape d'admission reste fermée tandis que celle d'échappement est ouverte. La remontée du piston pousse les gaz brûlés vers l'extérieur, etc.

Définition du couple

Le terme de "couple" vient de ce qu'il associe deux grandeurs : une force et un bras de levier. Dans un moteur thermique, la force dont il est question est celle que le piston exerce sur le vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle ; le bras de levier, c'est le rayon de rotation du vilebrequin.



© association adilca reproduction interdite

Le couple est le produit de deux grandeurs : une force et un bras de levier.

Depuis 1954, l'unité internationale de couple est le *newton-mètre* (symbole **Nm**), produit d'une force exprimée en *newton* (**N**) et d'un bras de levier exprimé en *mètre* (**m**) : 1 Nm est le couple produit par une force de 1 N qui s'exerce sur un bras de levier de 1 m.

Mesurer le couple moteur

Comment mesure-t-on le couple moteur ?

On utilise pour cela un “banc de puissance” qui est un appareil équipé d’un compte-tours et d’un frein, ce dernier étant accouplé au vilebrequin⁽¹⁾.

L’opération consiste à lancer le moteur à plein régime, puis à actionner progressivement le frein jusqu’à ce que la vitesse de rotation du vilebrequin soit stabilisée, la commande des gaz restant grande ouverte : le couple moteur est alors exactement égal au couple de freinage.

Il suffit donc de mesurer l’intensité de la force de freinage et la longueur du rayon sur lequel elle s’applique pour en déduire la valeur du couple moteur⁽²⁾.

Le couple spécifique

Le couple moteur ayant pour objet d’accélérer une masse ou de la tracter en côte, il va de soi que sa valeur doit être rapportée à la masse en question. D’où la notion de “couple spécifique” qui s’exprime en newton-mètre par tonne (symbole Nm/t).

Ainsi par exemple, un camion délivrant un couple moteur de 2 000 Nm pour une masse de 40 tonnes dispose d’un couple spécifique de 50 Nm/t. Une voiture délivrant un couple moteur de 300 Nm pour une masse de 1,5 tonne dispose d’un couple spécifique de 200 Nm/t, soit quatre fois plus.

Couple et puissance

Ce sont les deux caractéristiques essentielles d’un moteur. Néanmoins, pour le technicien comme pour le conducteur, ces deux grandeurs ne présentent pas le même intérêt.

En effet, la puissance est une grandeur théorique obtenue par combinaison du couple moteur et de la vitesse de rotation, donc forcément tributaire de régimes élevés.

D’ailleurs la puissance revendiquée par les constructeurs est toujours une valeur maximale, disponible uniquement au régime indiqué, et à condition que la commande des gaz soit grande ouverte.

Si l’une de ces deux conditions n’est pas remplie, ou a fortiori les deux, le conducteur ne disposera que d’une partie seulement de la puissance annoncée. Mais cela, les publicitaires se gardent bien de le préciser...

À l’inverse de la puissance, le couple moteur maximum n’est disponible qu’aux régimes intermédiaires (dès 1 500 tours par minute pour certaines voitures diesel récentes, parfois dès 1 000 tours par minute pour certains camions), sur une plage d’environ 500 à 1 000 tours par minute seulement, donc jamais aux régimes extrêmes. D’où l’intérêt de disposer d’un compte-tours.

La disponibilité du couple moteur peut varier d'un modèle à l'autre, et surtout d'une motorisation à une autre, mais elle obéit globalement aux mêmes règles, quels que soient les marques ou les modèles de véhicules.

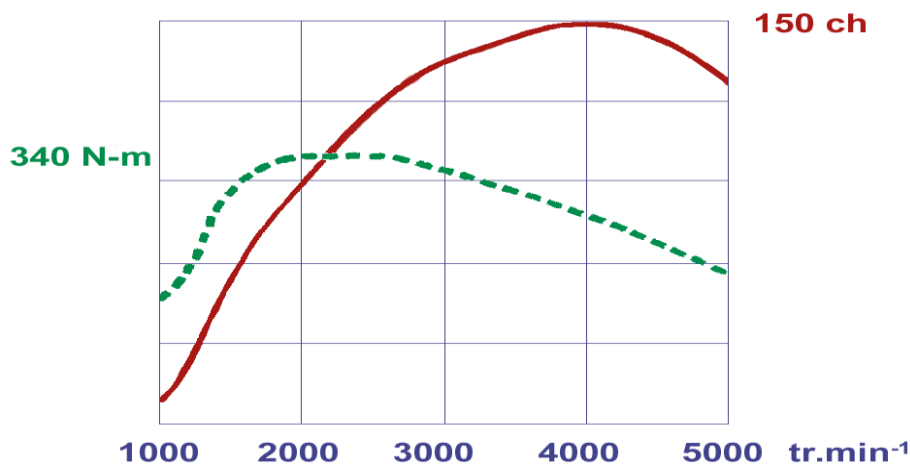
Les valeurs de couple et de régime moteur priment sur la puissance car elles conditionnent les performances réelles, autrement dit les performances en accélération ou lorsqu'il s'agit de tracter une charge en montée.

C'est là tout l'intérêt des motorisations diesel dont le couple moteur est plus généreux, disponible à des régimes moins élevés, et sur une plage souvent plus étendue que celle des moteurs à essence.

Un exemple chiffré

Prenons comme exemple le moteur Renault 2.0 DCI 150 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- puissance maximale 110 kW (150 ch) à 4 000 tr.min⁻¹
- couple maximal 340 Nm à 2 000 tr.min⁻¹



© association adilca reproduction interdite

Courbes de couple et de puissance du moteur Renault 2.0 DCI 150 (d'après un document Renault).

Un rapide calcul nous montre qu'au régime de couple maximal (2 000 tr.min⁻¹), la puissance disponible n'est que de 71 kW (97 ch). Et encore ! À condition que le conducteur garde le pied à fond sur l'accélérateur car, si ce n'est pas le cas, une partie seulement de ces 97 ch seront au rendez-vous...

Un autre calcul tout aussi rapide nous montre qu'au régime de puissance maximale ($4\,000\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$), le couple moteur disponible n'est plus que de 260 Nm ! On voit bien qu'entre puissance et couple, il faut choisir.

Pourquoi privilégier le couple ?

Pour une cylindrée donnée, la valeur du couple moteur dépend de l'aptitude du moteur à introduire dans les cylindres un mélange air-carburant parfaitement homogène, et surtout de sa capacité à en tirer le maximum d'énergie au moment de la combustion.

Le couple moteur, toujours relativement modeste à bas régime, atteint sa valeur maximale aux régimes intermédiaires pour décroître ensuite inexorablement au fur et à mesure que la vitesse de rotation augmente, comme si le moteur finissait par s'asphyxier...

Tant que le moteur fonctionne dans sa plage de régime de couple maximum, le rendement, la consommation de carburant, la pollution de l'environnement et donc le prix de revient du kilomètre parcouru se maintiennent aux valeurs les plus basses dont le véhicule est capable. Pour toutes ces raisons, les constructeurs conçoivent les moteurs de telle sorte que le couple maximum soit délivré à un régime raisonnable.



© association adilca reproduction interdite

Privilégier le couple plutôt que la puissance !
Et surtout : le régime auquel il est délivré (ici : 275 Nm à $1\,800\text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$) !

(1) D'où l'expression de "puissance au frein" souvent utilisée. Il existe plusieurs systèmes de freins, par frottement, résistance hydraulique, électrique ou électromagnétique, mais tous fonctionnent sur le même principe : le moteur est accouplé à un disque sur lequel s'exerce une force de freinage. En dépit de leurs noms, ces appareils ne mesurent pas la puissance mais seulement le couple et la manière dont il évolue en fonction du régime moteur. La puissance résulte d'un calcul ultérieur qui combine deux grandeurs : le couple et la vitesse de rotation (voir dossier ADILCA "puissance des moteurs").

(2) C'est pourquoi les notices techniques font toujours mention d'un "couple maximum" et du régime moteur correspondant, ce qui suppose que la commande des gaz est grande ouverte (autrement dit : pédale d'accélérateur à fond). Si ce n'est pas le cas, une partie seulement du couple indiqué est disponible.

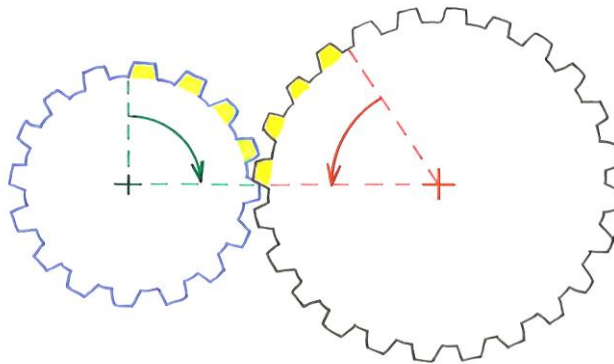
II. LA FORCE DE TRACTION

Le rôle de la transmission

La transmission désigne l'ensemble des mécanismes qui s'interposent entre le moteur et les roues motrices. Son principe se résume à celui d'une série de pignons qui ont pour fonction de multiplier le couple moteur tout en réduisant la vitesse de rotation.

En effet, si le moteur entraînait directement les roues motrices, celles-ci tourneraient trop vite tout en délivrant un couple insuffisant, d'où le rôle des pignons et la nécessaire distinction entre le *couple moteur* (qui s'exerce sur l'axe du vilebrequin), et le *couple de traction* (qui s'exerce sur l'axe des roues motrices).

La multiplication du couple et son corollaire, la réduction de vitesse, est fonction du nombre de pignons et du quotient de leurs rayons ou nombres de dents respectifs. La valeur ainsi obtenue est une grandeur sans dimension qui prend la forme d'un nombre décimal, ou d'une fraction appelée *rapport de transmission*.



© association adilca reproduction interdite

Principe de la transmission ⁽¹⁾ :

Ici, un pignon de 16 dents (flèche verte) entraîne un pignon de 24 dents (flèche rouge).

Dans cet exemple, le *rapport de transmission* est le quotient $24/16 = 1,5$

Le couple moteur est alors multiplié par 1,5 tandis que la vitesse de rotation est divisée par 1,5

Voici quelques valeurs qui reflètent le rôle de la transmission d'une motorisation diesel délivrant un couple moteur de 200 Nm relayé par une boîte à 5 vitesses :

vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
rapport de transmission	16	8,5	6	4,6	3,6
couple de traction (Nm)	3 200	1 700	1 200	920	720

© association adilca reproduction interdite

Comment interpréter ce tableau ? Le nombre 16 est le rapport de transmission en 1^{ère} vitesse. Le couple de traction est alors 16 fois supérieur au couple moteur, tandis que la vitesse de rotation des roues motrices est 16 fois inférieure à celle du vilebrequin, etc.

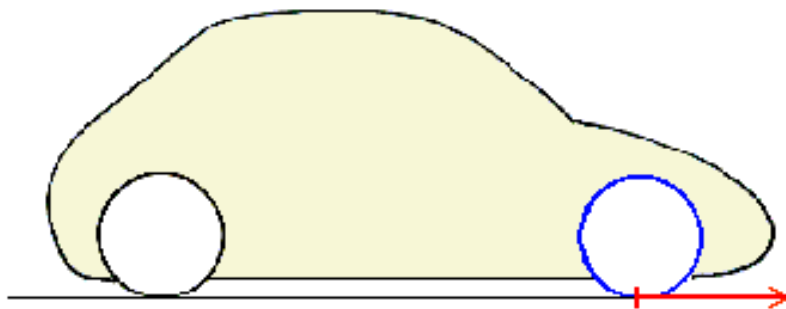
La force de traction

La force de traction désigne la force qui s'exerce à la périphérie des roues motrices au contact du sol pour créer ou entretenir le mouvement de la voiture ⁽²⁾. L'intensité de cette force est fonction du couple de traction et du rayon des roues motrices.

Si on considère une voiture aux caractéristiques suivantes : couple moteur de 200 Nm, boîte à 5 vitesses aux rapports précédemment calculés, et roues motrices de 0,30 m de rayon, la force de traction délivrée au contact du sol s'échelonne ainsi ⁽³⁾ :

vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
couple de traction (Nm)	3 200	1 700	1 200	920	720
force de traction (N)	10 600	5 660	4 000	3 060	2 400

© association adilca reproduction interdite



© association adilca reproduction interdite

Force de traction (roues avant motrices).

Mouvement et vitesse

La force de traction sert à :

- accélérer la masse de la voiture ; le tableau suivant indique les valeurs d'accélération que la force de traction précédemment calculée peut communiquer à une masse de 1 500 kilogrammes (on néglige la résistance au roulement et la résistance de l'air) :

vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
accélération (m.s ⁻²)	7	3,8	2,7	2	1,6

© association adilca reproduction interdite

- maintenir une vitesse constante sur le plat, en compensant les résistances naturelles (résistance au roulement et résistance de l'air, voir dossiers ADILCA "*forces fictives et forces réelles*" et "*aérodynamique*") ; le tableau suivant donne l'ordre de grandeur de ces résistances que la force de traction doit équilibrer quand une voiture de gamme moyenne circule sur une route horizontale :

vitesse (km.h ⁻¹)	50	70	90	110	130
résistances (N)	260	450	680	960	1 280

© association adilca reproduction interdite

- maintenir une vitesse constante en montée, en compensant la force de gravitation ; le tableau suivant indique la force de traction dont une voiture de masse 1 500 kilogrammes doit disposer pour compenser une déclivité ($g = 10 \text{ m.s}^{-2}$, voir dossier ADILCA “déclivités”), cette force devant s’ajouter à celle nécessaire pour compenser les résistances naturelles :

déclivité	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %
force de traction (N)	300	600	900	1 200	1 500

© association adilca reproduction interdite

(1) *Un principe facile à démontrer : au point de contact des deux pignons, la force reçue par le pignon de 24 dents est exactement égale à la force transmise par le pignon de 16 dents (encore le principe d’action réaction d’Isaac Newton !). Le couple étant le produit d’une force par un rayon, et la circonférence étant liée au rayon par une constante (2π), on en déduit que le couple disponible sur l’axe du pignon de 24 dents vaut $24/16^{\text{ème}}$ du couple initial, soit une valeur multipliée par $3/2$ ($24/16 = 3/2$). Par ailleurs, pendant que le pignon de 16 dents effectue un tour complet, celui de 24 dents n’effectue que $16/24^{\text{ème}}$ de tour, soit une vitesse égale aux $2/3$ de la vitesse initiale ($16/24 = 2/3$). Par conséquent, l’augmentation de couple est bien exactement proportionnelle à la réduction de vitesse, et inversement, d’où le nom de “boîte à vitesse” (au singulier) parfois donné à la transmission.*

(2) *Il est important d’insister sur ce point et de rectifier deux erreurs fréquentes :*

- *la force de traction ne s’exerce pas sur le centre de gravité de la voiture, mais bien à la périphérie des pneumatiques au contact du sol, ainsi d’ailleurs que les forces de retenue, de freinage et de guidage (voir dossiers ADILCA consacrés à ces forces). Rappelons qu’aucune force, excepté le poids, ne peut jamais s’exercer directement sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit.*

- *le principe d’action réaction, ou troisième principe de Newton, énonce que toute force qui s’exerce sur une masse entraîne une réaction d’égale intensité mais de sens opposé. Cette réaction est trop souvent confondue avec la force d’inertie pour laquelle ce principe ne peut pas s’appliquer : il n’y a pas d’interaction dans le cas d’une force imaginaire (voir dossier ADILCA “force d’inertie”). Par contre, ce principe s’applique parfaitement et intégralement dans le cas de la force de traction, de retenue, de freinage et de guidage. En effet, lorsque la voiture accélère, décélère ou change de trajectoire, elle prend appui sur le sol et exerce une poussée sur la Terre, sans effet sur le mouvement de rotation du globe terrestre, du fait du rapport des masses en présence (voiture de taille moyenne : $1,5 \times 10^3 \text{ kg}$; Terre : $6 \times 10^{24} \text{ kg}$, soit un rapport de 1 pour 4×10^{21} , autrement dit, de 1 pour 4 000 000 000 000 000 000 000, ou encore, de 1 pour 4 000 milliards de milliards). Et ce, sans qu’il soit nécessaire d’évoquer les différents caps suivis par tous les véhicules terrestres en circulation au même moment, qui neutraliseraient cet effet, si celui-ci était perceptible.*

(3) *Il s’agit ici de valeurs calculées à partir du couple maximum délivré par le moteur en question et mesuré en bout de vilebrequin. Autrement dit, ces valeurs sont purement théoriques : d’une part, elles supposent que le moteur tourne au régime indiqué avec la commande des gaz grande ouverte, d’autre part, elles négligent la résistance liée à la rotation de la transmission (boîte de vitesse, arbre de transmission, différentiel, arbres de roues). Cette résistance absorbe environ 10 % de l’énergie initiale.*

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

III. LE COUPLE ANTAGONISTE

Il est impossible de parler du couple moteur sans évoquer le couple antagoniste, grandeur généralement méconnue mais dont la valeur constitue pourtant l'autre caractéristique technique essentielle des moteurs d'automobiles.

Le couple antagoniste est le terme technique qui désigne ce que les conducteurs appellent couramment le "*frein moteur*". En effet, tout moteur thermique délivre inévitablement un couple antagoniste qui se manifeste dès qu'on coupe son alimentation en carburant.

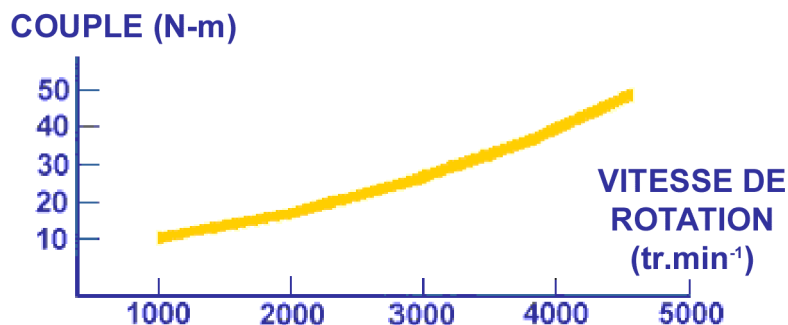
D'où provient le couple antagoniste ?

Les moteurs thermiques, qu'ils soient essence ou diesel, fonctionnent tous selon le principe du cycle à quatre temps dont l'une des particularités est un rendement assez faible : de 25 à 45 % selon les conditions d'utilisation.

Ces valeurs modestes sont dues aux nombreuses résistances qui accompagnent le déroulement d'un cycle : inertie des gaz à l'admission, mouvement alternatif des pistons et des soupapes, compression de l'air (ou du mélange air-carburant) dans la chambre de combustion, frottement des pistons dans les cylindres, frottement des arbres sur les paliers, rotation des pièces périphériques (distribution, pompe à huile, pompe à eau, alternateur) et des accessoires de confort (assistances, climatisation).

Dès lors, si on cesse d'alimenter le moteur, ces résistances créent un couple antagoniste qui freine la rotation du vilebrequin, c'est ce qu'on appelle le frein-moteur.

La disponibilité du couple antagoniste n'obéit pas aux mêmes lois que celle du couple moteur. En effet, le couple antagoniste est toujours proportionnel à la vitesse de rotation du moteur, ce qui signifie que la valeur la plus élevée est obtenue au régime maximal fixé par le constructeur. D'où l'intérêt de disposer d'un compte-tours.



© association adilca reproduction interdite

Couple antagoniste délivré par un moteur diesel de 2 l de cylindrée.

La force de retenue

Comme expliqué plus haut à propos du couple moteur, le couple antagoniste est relayé et donc multiplié par la transmission, ce qui amène la nécessaire distinction entre le couple antagoniste (qui s'exerce sur l'axe du vilebrequin), le couple de retenue (qui s'exerce sur l'axe des roues) et la force de retenue (qui s'exerce au contact du sol).

La force de retenue désigne la force qui s'exerce au contact du sol sur les pneumatiques des roues motrices de la voiture dès que le conducteur cesse d'accélérer. C'est, en quelque sorte, une force de traction inversée qui ralentit la voiture, même si son efficacité n'égale jamais celle des freins.

Si on considère une voiture aux caractéristiques suivantes : couple antagoniste supposé de 50 Nm, boîte à 5 vitesses aux rapports précédemment calculés, roues motrices de 0,30 m de rayon, la force de retenue délivrée au contact du sol s'échelonne ainsi :

vitesse	5 ^{ème}	4 ^{ème}	3 ^{ème}	2 ^{ème}	1 ^{ère}
force de retenue (N)	600	760	1 000	1 410	1 600

© association adilca reproduction interdite

Mesurer le couple antagoniste...

Les constructeurs ne donnent aucune indication quant à la valeur du couple antagoniste et c'est bien dommage, mais il reste néanmoins toujours possible d'en calculer indirectement sa valeur, grâce à une expérience très facile à réaliser.

Imaginons de stabiliser la vitesse de la voiture dans une descente grâce à la seule action du couple antagoniste : cela signifierait alors que la composante du poids qui entraîne la voiture (voir dossier ADILCA "déclivités") est strictement égale à la somme des trois forces qui freinent la voiture (résistance au roulement, résistance de l'air, force de retenue).

Si la déclivité de la route est connue, ainsi que la masse de la voiture, sa vitesse et ses caractéristiques techniques (rapport de transmission, SCx), on peut ensuite calculer tous les autres paramètres du mouvement (composante du poids parallèle à la route, résistance au roulement, résistance de l'air, force de retenue). Une fois ces paramètres connus, il serait finalement possible d'isoler la valeur du couple antagoniste⁽¹⁾.

Les résultats de l'expérience...

Une telle expérience, totalement inédite, a été organisée le 25 mai 2001 sur les flancs du puy de Dôme (volcan du département éponyme de la région Auvergne), site choisi en raison de sa déclivité à la fois forte et régulière (12 % sur 4,1 kilomètres)⁽²⁾.

Les résultats de cette expérience ont montré que la valeur du couple antagoniste d'un moteur diesel de voiture de tourisme est d'environ 25 Nm par litre de cylindrée lorsque le moteur tourne au régime maximal autorisé par le constructeur.

D'autres expériences ont montré qu'à cylindrée égale, la valeur du couple antagoniste est sensiblement proportionnelle à la masse des pistons, au taux de compression et à la vitesse de rotation du moteur.

Enfin et contrairement à une idée reçue, cette valeur varie peu d'une motorisation à une autre, les moteurs à essence compensant la masse des pistons plus faible et une compression plus réduite par un régime de rotation plus élevé.



© association adilca reproduction interdite

Panneau de 1937 annonçant la déclivité qui mène au sommet du puy de Dôme.

À quoi sert le couple antagoniste ?

Où et comment utiliser le couple antagoniste, à quoi peut-il bien servir et pourquoi est-ce une valeur si importante ?

Le couple antagoniste se manifeste dès qu'on coupe l'alimentation du moteur, il suffit donc au conducteur de lâcher l'accélérateur pour en bénéficier.

Le couple antagoniste sert à stabiliser la vitesse de la voiture dans les descentes, comme on l'a dit à propos de l'expérience évoquée ci-dessus. C'est déjà pas mal, mais ce n'est pas suffisant.

Le bon usage du couple antagoniste est la clé de ce qu'on appelle couramment la conduite rationnelle, ou éco-conduite. En effet et à condition de s'y prendre assez tôt, le couple antagoniste suffit la plupart du temps pour ralentir la voiture dans presque toutes les situations de conduite non urgentes.

Le premier intérêt de cette manœuvre est d'économiser le carburant pendant toute la durée du ralentissement, les véhicules modernes bénéficiant tous, grâce à l'injection électronique, d'une coupure totale de l'alimentation du moteur à la décélération.

Le second intérêt de cette manœuvre est d'éviter le recours aux freins, leur usure et l'émission de nanoparticules dans l'atmosphère.

Ces économies sont sans doute négligeables sur un ralentissement unique mais, multipliées par le nombre de situations rencontrées, elles deviennent très vite substantielles, particulièrement en ville...

Les moteurs modernes...

Notons que l'évolution technique des moteurs modernes (suralimentation, matériaux en alliage léger, *downsizing*⁽³⁾...) visant à augmenter le couple moteur et sa disponibilité à bas régime a eu malheureusement pour effet de réduire sensiblement la valeur du couple antagoniste.

Quelques données pour comparer :

- en 1991, une Citroën ZX diesel 1.9 D d'entrée de gamme, munie d'un moteur atmosphérique de 2 litres de cylindrée, délivrait un couple moteur de 120 Nm à 2 000 tours par minute et un couple antagoniste de 53 Nm à 4 500 tours par minute.

- en 2006, une Citroën C4 diesel 1.6 HDI 92 (modèle qui a succédé à la ZX), munie d'un moteur suralimenté d'une cylindrée ramenée à 1,6 litre, délivrait un couple moteur de 215 Nm à 1 750 tours par minute, mais devait se contenter d'un couple antagoniste de seulement 46 Nm à 4 700 tours par minute.

Pour parvenir à un tel résultat, les techniciens et ingénieurs ont réalisé un véritable tour de force : 20 % de cylindrée en moins, 79 % de couple moteur en plus, disponible en outre à un régime 12,5 % plus bas.

Un tour de force oui, mais hélas au détriment du couple antagoniste ! D'autant plus qu'entre-temps, pour satisfaire aux nouvelles normes de confort et de sécurité, la masse de la voiture à vide et en ordre de marche est passée de 1 035 à 1 257 kilogrammes (soit + 21,5 %), une paille...

Autant de caractéristiques à prendre en compte pour qui veut pratiquer l'éco-conduite avec succès.

Couples et conduite

Notez le pluriel ! Tout l'art de la conduite automobile se résume en effet à exploiter le bon couple, au bon moment et au bon endroit...

Pour y parvenir, le conducteur a à sa disposition :

- le compte-tours (il permet de contrôler que le moteur fonctionne aussi souvent que possible dans la plage de régime la plus favorable) ;
- la pédale d'accélérateur (son ouverture ou sa fermeture conditionne la quantité de carburant introduite dans les cylindres, et donc l'intensité du couple moteur ou du couple antagoniste) ;
- la boîte de vitesses (le rapport détermine le couple de traction ou le couple de retenue répondant au travail demandé).

(1) *Contrairement au couple moteur qui est mesuré en bout de vilebrequin, la valeur du couple antagoniste résultant d'une telle expérience est une valeur globale qui inclut à la fois la résistance au roulement des quatre roues et celle liée à la rotation de la transmission (arbres de roues, différentiel, arbre de transmission, boîte de vitesse).*

(2) *Une telle expérience nécessite peu de matériel : le repérage des bornes kilométriques qui, en montagne, indiquent les cotes d'altitude (à défaut : une carte d'état-major indiquant les distances et l'altitude, ces valeurs permettent de calculer la déclivité, voir dossier ADILCA "déclivités"), un thermomètre pour mesurer la température de l'air ambiant, et un baromètre pour mesurer la pression atmosphérique (ces valeurs permettent de calculer la masse volumique de l'air ambiant, voir dossier ADILCA "aérodynamique"), un chronomètre pour calculer la vitesse de la voiture entre deux bornes kilométriques et, naturellement, la notice technique détaillée du véhicule indiquant sa masse, les rapports de transmission, ainsi que son SCx (ces dernières valeurs permettent de calculer la résistance de l'air qui s'exerce sur la voiture en fonction de la vitesse, voir dossier ADILCA "aérodynamique"). La résistance au roulement des quatre roues de la voiture, qui participe de la force de retenue globale, ne se calcule pas, on ne peut que la mesurer, et uniquement sur un banc à rouleaux (voir dossier ADILCA "forces fictives et forces réelles"). L'expérience s'est déroulée entre les cotes d'altitude 1 201 et 1 083 distantes de 1 000 mètres, avec une voiture de masse 1 235 kg (2 personnes à bord) animée par un moteur diesel de cylindrée 1,9 l. La distance entre les deux bornes kilométriques a été parcourue en 67 s, la vitesse étant stabilisée par la seule action de la force de retenue délivrée sur le 2^{ème} rapport (rapport de 6,826 pour un rayon de roue de 0,25 m). Compte tenu de la vitesse et des conditions atmosphériques, la somme des résistances naturelles (résistance au roulement et résistance de l'air) a été estimée à 200 N.*

(3) *Downsizing : de l'anglais « down » qui signifie réduction, et « size » qui signifie taille. Technique qui vise à réduire la cylindrée et le poids des moteurs, tout en obtenant davantage de puissance et de couple grâce notamment à une optimisation du remplissage des cylindres (suralimentation).*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

IV. RELATIONS ENTRE GRANDEURS

Couple moteur :

$$C_m = F \cdot D$$

C_m : couple moteur, exprimé en **Nm**

F : force motrice, exprimée en **N**

D : longueur du bras de levier, exprimée en **m**

cohérence des unités : **C_m** = N . m = **Nm**

Exemple : calculons le couple moteur dans les conditions suivantes : force motrice de 4 000 N, vilebrequin de rayon 0,05 mètre :

$$C_m = 4\,000 \times 0,05 = 200 \text{ Nm}$$

Rapport de transmission :

$$X = (n_4 / n_3) \cdot (n_2 / n_1)$$

X : rapport de transmission, grandeur sans dimension

n₁ : nombre de dents du pignon de l'arbre primaire de la boîte de vitesse

n₂ : nombre de dents du pignon de l'arbre secondaire de la boîte de vitesse

n₃ : nombre de dents du pignon d'attaque du différentiel

n₄ : nombre de dents de la couronne du différentiel

Exemple : calculons le rapport de transmission d'une 5^{ème} vitesse ainsi configurée : pignon d'arbre primaire de 43 dents, pignon d'arbre secondaire de 33 dents, pignon d'attaque du différentiel de 13 dents, couronne de 61 dents :

$$X = (61 / 13) \times (33 / 43) = 4,692 \times 0,767 = 3,6$$

Couple de traction :

$$C_t = C_m \cdot X$$

C_t : couple de traction, exprimé en **Nm**

C_m : couple moteur, exprimée en **Nm**

X : rapport de transmission, grandeur sans dimension

cohérence des unités : **C_t** = **Nm**

Exemple : calculons le couple de traction dans les conditions suivantes : couple moteur de 200 Nm, rapport de 3,6 (5^{ème} vitesse) :

$$C_t = 200 \times 3,6 = 720 \text{ Nm}$$

Force de traction :

$$F = Ct / R$$

F : force de traction, exprimée en **N**

Ct : couple de traction, exprimé en **Nm**

R : rayon des roues motrices, exprimé en **m**

cohérence des unités : $F = N.m . m^{-1} = N$

Exemple : calculons la force de traction qui s'exerce au contact du sol dans les conditions suivantes : couple de traction de 720 Nm, roues motrices de rayon 0,3 mètre :

$$F = 720 / 0,3 = 2\ 400\ N$$

Force de retenue :

$$F = C . X / R$$

F : force de retenue, exprimée en **N**

C : couple antagoniste, exprimé en **Nm**

X : rapport de transmission, grandeur sans dimension

R : rayon des roues motrices, exprimé en **m**

cohérence des unités : $F = N.m . m^{-1} = N$

Exemple : calculons la force de retenue qui s'exerce au contact du sol sur des roues motrices de 0,3 m de rayon lorsqu'un couple antagoniste de 50 Nm est relayé par un rapport de 8,5 (2^{ème} vitesse) :

$$F = 50 \times 8,5 / 0,3 = 1\ 416\ N$$

Accélération :

$$Y = F / M$$

Y : accélération, exprimée en **m.s⁻²**

F : force de traction, exprimée en **N**

M : masse, exprimé en **kg**

cohérence des unités : $Y = N . kg^{-1} = kg.m.s^{-2} . kg^{-1} = m.s^{-2}$

Exemple : calculons l'accélération qu'une force de traction de 2 400 N peut communiquer à une voiture de masse 1 500 kg (on néglige les résistances naturelles) :

$$Y = 2\ 400 / 1\ 500 = 1,6\ m.s^{-2}$$

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *