

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...

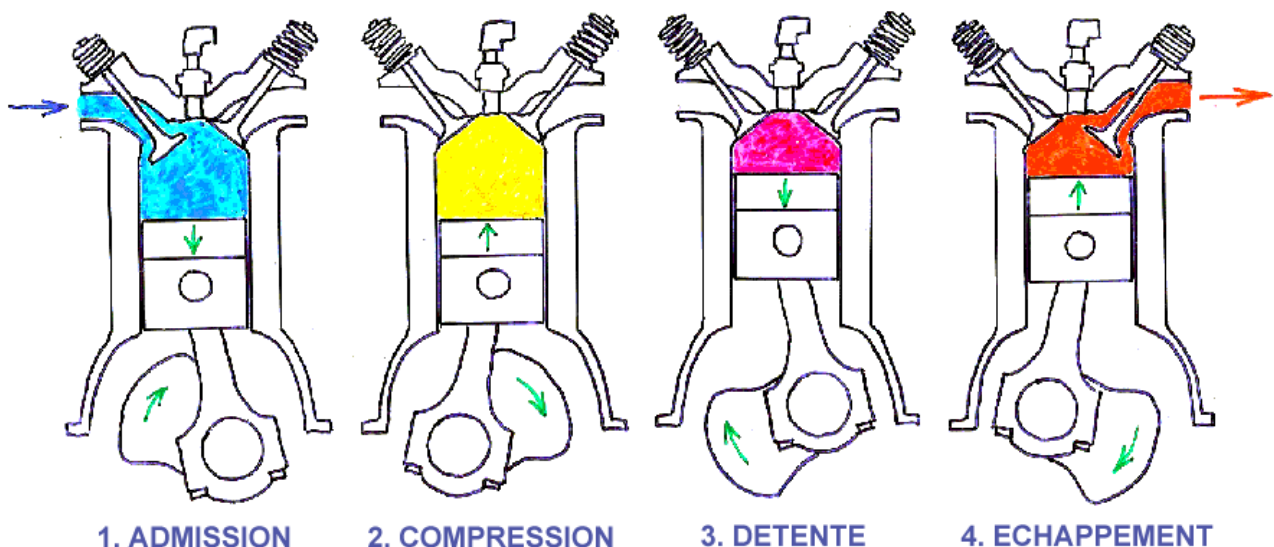
L'origine du mouvement

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, mais quel est son principe de fonctionnement ?

Le fonctionnement du moteur

Tous les moteurs des véhicules terrestres à essence ou diesel 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).

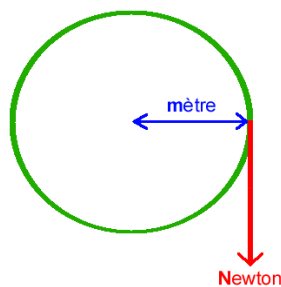
2. Dans un deuxième temps nommé *compression*, les soupapes sont fermées, tandis que le mélange est comprimé par la remontée du piston.

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). Le piston est alors violemment repoussé vers le bas et fait tourner le vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle, c'est l'unique temps moteur du cycle.

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, la force est celle qui fait tourner le vilebrequin ; le bras de levier, c'est la longueur du maneton 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 ⁽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 moteur 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 cette 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 du véhicule. 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 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 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 peut évidemment 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.

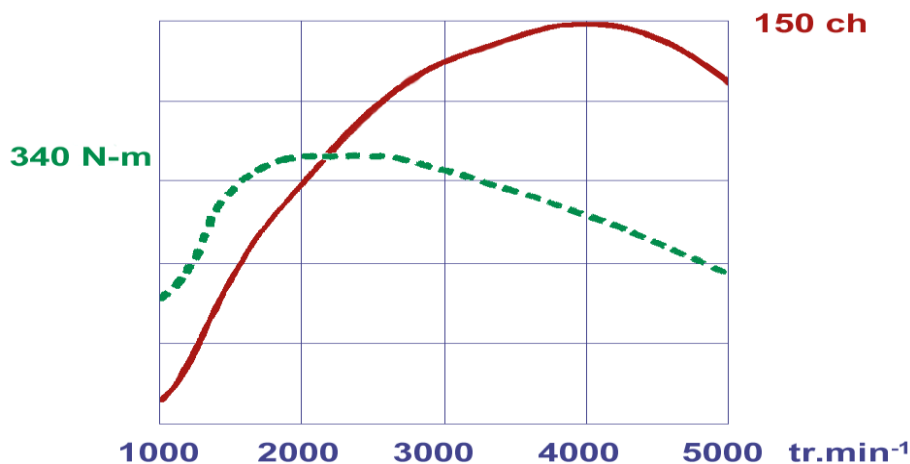
Les valeurs de couple et de régime moteur priment sur la puissance car elles conditionnent les performances réelles, autrement dit les performances en accélération ou lorsqu'il s'agit de tracter une charge en montée.

C'est là tout l'intérêt des motorisations diesel dont le couple 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 ! 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 ?

La valeur du couple moteur dépend de l'aptitude d'un 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 est toujours relativement modeste à bas régime, il 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, 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, il est préférable que le couple maximum soit délivré à un régime pas trop élevé.



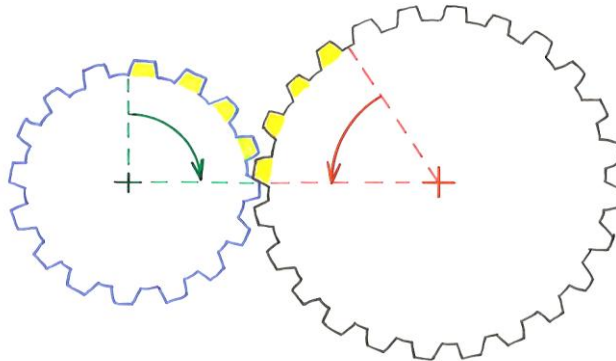
© association adilca reproduction interdite

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

Le rôle de la transmission

Quel est le rôle de la transmission ? Elle agit comme un multiplicateur de couple, c'est pourquoi on distingue le couple moteur (disponible au vilebrequin), et le couple de traction (disponible aux arbres des roues motrices).

Pour donner une idée de ce rôle, il suffit de savoir que la combinaison correspondant à la première vitesse multiplie le couple moteur en moyenne par 15 pour les voitures de tourisme, en moyenne par 50 pour les poids lourds. Un camion disposant d'un couple moteur de 2 000 Nm peut ainsi disposer d'un couple de traction de 100 000 Nm !...



© association adilca reproduction interdite

Principe de la transmission ⁽³⁾ :

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

Dans cet exemple, la démultiplication 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 un exemple de valeurs de démultiplications correspondant à une voiture de gamme moyenne à motorisation diesel, équipée d'une boîte à 5 vitesses :

vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
démultiplication	16	8,5	6	4,6	3,6

© association adilca reproduction interdite

Attention ! La contrepartie de cette démultiplication est une réduction équivalente de la vitesse de rotation. Autrement dit, en réduisant la vitesse de rotation des roues par le biais de la transmission, on augmente la force de traction, et *vice versa*.

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. L'intensité de cette force est fonction du couple moteur, de la démultiplication de la transmission et du rayon des roues motrices.

Dans l'exemple cité plus haut (moteur diesel de gamme moyenne, boîte à 5 vitesses), la force de traction délivrée au contact du sol s'échelonne ainsi ⁽⁴⁾ :

vitesse	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}
force de traction (N)	12 000	6 375	4 500	3 450	2 700

© association adilca reproduction interdite

Le couple antagoniste

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 supprime 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 largement suffisant pour ralentir la voiture, même si son efficacité n'égale jamais celle des freins.

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.

De même que le couple moteur, le couple antagoniste est relayé et donc multiplié par la transmission, ce qui amène la nécessaire distinction entre couple antagoniste (vilebrequin) et couple de retenue (arbres de roues)...

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.

Il suffirait alors de connaître la masse de la voiture, sa vitesse, ses caractéristiques techniques (démultiplication de la transmission, SCx) ainsi que la déclivité de la route pour calculer ensuite tous les autres paramètres du mouvement (résistance de l'air, composante du poids parallèle à la route, etc.).

Une fois ces paramètres connus, il serait finalement possible d'isoler la valeur du couple antagoniste ⁽⁵⁾.

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 (12 %) et régulière (4,1 kilomètres).

Les résultats complets de cette expérience sont détaillés dans le "GUIDE DES LOIS PHYSIQUES DE L'AUTOMOBILE", ils 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.

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, puisque tous les véhicules modernes bénéficient, 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 nano-particules dans l'atmosphère.

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

Les moteurs modernes...

Notons que l'évolution technique des moteurs modernes (suralimentation, matériaux en alliage léger, *downsizing*⁽⁶⁾...) 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 4 600 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 44 Nm à 4 800 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 le problème 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 (la démultiplication détermine le couple de traction ou le couple de retenue répondant au travail demandé).

(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.

(3) Un principe facile à démontrer : au point de contact des deux roues, 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. Par ailleurs, lorsque le pignon de 16 dents a effectué un tour, celui de 24 dents n'a effectué que $16/24^{\text{ème}}$ de tour. Par conséquent, la vitesse de rotation a bien été réduite dans la même proportion.

(4) 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 vitesses, arbre de transmission, différentiel, arbres de roues). Cette résistance absorbe environ 10 % de l'énergie initiale.

(5) 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 vitesses).

(6) Downsizing : de l'anglais "down" qui signifie réduction et "size" qui signifie dimension. 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.

ASSOCIATION ADILCA www.adilca.com * * *

QUELQUES 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 :

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

Démultiplication de la transmission :

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

X : démultiplication de la transmission, grandeur sans dimension

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

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

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

n₄ : nombre de dents de la couronne du différentiel

Exemple : calculons la démultiplication de la transmission avec la combinaison suivante (5^{ème} vitesse) : 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 : démultiplication de la 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, démultiplication 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 : $F = N.m \cdot m^{-1} = N$

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 :

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

Force de retenue :

$$F = C \cdot X / R$$

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

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

X : démultiplication de la transmission, grandeur sans dimension

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

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

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 30 Nm est relayé par une démultiplication de 8,5 :

$$F = 30 \times 8,5 / 0,3 = 850\text{ N}$$

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 : $Y = N \cdot kg^{-1} = kg.m.s^{-2} \cdot kg^{-1} = m.s^{-2}$

Exemple : calculons l'accélération d'une voiture de masse 1 500 kg soumise à une force de traction de 2 400 N :

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



© association adilca reproduction interdite

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

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *