

# **FORCES FICTIVES ET FORCES RÉELLES**

## **I. LES LOIS DE NEWTON**

## **II. INTRODUCTION**

## **III. FORCES FICTIVES**

## **IV. FORCES RÉELLES**

## **V. FORCES AGISSANT SUR UN VÉHICULE TERRESTRE**

## **VI. RELATIONS ENTRE GRANDEURS**

## **VII. BIBLIOGRAPHIE**

**ASSOCIATION ADILCA [www.adilca.com](http://www.adilca.com) \* \* \***

## I. LES LOIS DE NEWTON

Les lois générales du mouvement ont été découvertes et formulées par le mathématicien et physicien anglais Isaac Newton (1642 – 1727).

Ces lois sont universelles et permettent de décrire n'importe quelle forme de mouvement, elles s'énoncent ainsi :

### Principe d'inertie

*« Une masse immobile sur laquelle n'agit aucune force, reste parfaitement immobile. »*

*« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, conserve intégralement sa vitesse. »*

*« Une masse en mouvement sur laquelle n'agit aucune force, décrit une trajectoire parfaitement rectiligne. »*

Le concept de force découle de ce principe.

### Concept de force

*« Une force désigne toute cause capable d'agir sur la vitesse ou sur la trajectoire d'une masse. »*

### Principe de réciprocité

*« Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé. »*

Comment ces lois s'appliquent-elles pour décrire le mouvement d'un véhicule terrestre ?

## II. INTRODUCTION

Qu'est-ce qu'une force, au sens où l'entend la physique ?

Combien existe-t-il de catégories de forces ?

Qu'est-ce qu'une force fictive ?

Qu'est-ce qu'une force agissant à distance ?

Comment reconnaître une force fictive ?

Quelles sont les forces qui s'exercent sur une voiture ?

D'où proviennent-elles, où et comment s'exercent-elles ?

### Définitions

Une masse est une quantité de matière. Une force désigne :

*« Toute cause capable de modifier la vitesse ou de dévier la trajectoire d'une masse. »*

Cette définition découle du *principe d'inertie* d'Isaac Newton :

*« En l'absence de force, une masse immobile reste immobile ou, si elle est en mouvement, garde une vitesse constante et décrit une trajectoire rectiligne. »*

Selon ce principe appliqué à l'automobile :

- la vitesse de la voiture peut être nulle, croissante (accélération), constante, ou décroissante (décélération).

- sa trajectoire peut être rectiligne ou circulaire.

Cela signifie que n'importe quelle variation de vitesse ou de trajectoire résulte de l'action d'une force, et d'une seule. Une force, oui, mais laquelle ?

Distinguons d'abord deux catégories de forces trop souvent confondues : les forces fictives et les forces réelles. Les véritables causes du mouvement de la voiture seront détaillées plus loin.

### III. FORCES FICTIVES

Les forces fictives (force d'inertie, force centrifuge, force de Coriolis), dites aussi forces d'inertie, forces imaginaires, forces apparentes ou pseudo-forces, ont été utilisées à tort et à travers pour décrire le mouvement des automobiles alors qu'en réalité, ces forces n'existent pas, d'où quelques méprises, y compris dans certains manuels de physique.

Le concept de force fictive est inhérent à la *statique*, un mode de raisonnement initié par Jean Le Rond d'Alembert, mathématicien et physicien français (1717-1783). La statique considère que tout système accéléré peut être décrit comme s'il était immobile, cette inertie (au vrai sens du terme) nécessitant le recours à une force fictive pour expliquer un *mouvement apparent*<sup>(1)</sup> ou un *équilibre apparent*<sup>(2)</sup>.

Comment reconnaître une force fictive ?

1. Une force fictive agit toujours sur le *centre de gravité*, comme par magie, alors que les forces réelles, jamais. Rappelons un principe facile à vérifier : aucune force, excepté le poids, ne peut s'exercer sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit.
2. La présence d'une force fictive suppose de raisonner en *statique*, autrement dit de "figer" le mouvement réellement observé, comme si le système était immobile. Il suffit donc de reconstituer la logique d'un mouvement pour distinguer une force fictive d'une force réelle.
3. Les forces fictives sont souvent confondues avec l'action réciproque qui est la réponse à une force réelle : « *Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité mais de sens opposé.* » Il suffit donc de reconstituer la logique d'un mouvement pour identifier une force réelle et son action réciproque.
4. Les forces fictives étant des forces imaginaires, il est bien évidemment impossible d'en observer ou d'en ressentir les effets. Les diverses observations ou sensations traditionnellement attribuées aux forces d'inertie sont des *illusions perceptives* qui ont forcément une tout autre explication.

Enfin, pour éviter toute confusion entre statique et dynamique, rappelons deux règles simples mais rarement (pour ne pas dire jamais) respectées :

- il est obligatoire de séparer les descriptions ;
- il est impératif de les assortir d'une légende parfaitement explicite quant à la nature de la description proposée.

Remarque : en automobile, les descriptions statiques ne présentent aucun intérêt, les véhicules terrestres étant, par définition, des machines conçues pour le mouvement.

## **IV. FORCES RÉELLES**

Les forces réelles sont évidemment les seules explications logiques et rationnelles de tous les phénomènes physiques qui se manifestent dans notre environnement, et en particulier ceux qui concernent le mouvement des automobiles.

Car, contrairement aux forces fictives, on peut à tout instant observer, ressentir et mesurer les effets des forces réelles. De même, le principe de réciprocité leur est parfaitement et intégralement applicable. Distinguons quatre types de forces réelles :

### **1. Forces agissant à distance**

Il n'en existe que deux : la force électromagnétique et la force de gravitation.

Exemple 1 : tous les moteurs électriques fonctionnent grâce au principe d'attraction-répulsion qui caractérise la force électromagnétique.

Exemple 2 : la Terre décrit une orbite circulaire autour du Soleil à cause de la force de gravitation créée par la masse du Soleil.

Exemple 3 : un objet quelconque lancé en l'air finit par retomber au sol à cause de la force de gravitation créée par la masse du globe terrestre.

Ces deux forces agissent à distance, donc sans contact, elles sont néanmoins bien réelles puisqu'on peut en observer, en ressentir et en mesurer les effets.

### **2. Forces de pression**

Ces forces proviennent de la pression exercée par un gaz ou un liquide.

Exemple 1 : un avion se maintient en vol grâce à la pression que l'air exerce sous les ailes.

Exemple 2 : un voilier se déplace grâce à la pression que le vent exerce sur les voiles, le vent étant une manifestation de l'énergie fournie par le Soleil.

Exemple 3 : une éolienne fournit du courant électrique grâce à la pression que le vent exerce sur les pales d'une turbine.

Exemple 4 : un moulin à eau, un barrage hydroélectrique fournissent du courant électrique grâce à la pression que l'eau exerce sur les pales d'une turbine.

Exemple 5 : un moteur thermique d'automobile fonctionne grâce à la pression que les gaz exercent sur les pistons.

### 3. Forces de frottement

Ces forces résultent du glissement de deux corps l'un contre l'autre. Elles génèrent des résistances indésirables qu'on peut réduire, mais qu'il est impossible de supprimer totalement.

Exemple 1 : un voilier en mouvement est freiné par le frottement de l'eau sur la coque.

Exemple 2 : un cycliste en mouvement est freiné par le frottement de l'air.

Exemple 3 : le fonctionnement d'un moteur thermique est affecté par divers frottements, comme par exemple celui des pistons contre les parois des cylindres, etc.

### 4. Forces de contact

Comme leur nom l'indique, ces forces s'exercent par contact. Elles sont à l'origine de la plupart des formes de mouvement qu'on peut observer dans notre environnement.

Exemple 1 : pour soulever un objet quelconque, un stylo par exemple, il faut solliciter une force de contact qui consiste à serrer l'objet entre les doigts.

Exemple 2 : pour déplacer une masse, un meuble par exemple, il est nécessaire d'exercer une force de contact qui consiste à pousser sur une partie quelconque de sa surface.

Exemple 3 : la marche ou la course à pied nécessitent le contact des pieds (ou des chaussures) avec le sol.

Exemple 4 : le mouvement et la trajectoire de tous les véhicules terrestres (bicyclette, voiture, train...) proviennent de forces qui s'exercent au contact du sol<sup>(3)</sup>.

**Conclusion** : quelle que soit la nature du mouvement observé, il y a toujours une cause, c'est-à-dire une force qu'il est facile d'identifier.

## **V. FORCES AGISSANT SUR UN VÉHICULE TERRESTRE**

### **Le mouvement de la voiture...**

Observons le mouvement d'une voiture : celle-ci accélère, maintient sa vitesse, ralentit, change de direction et s'immobilise, tout cela grâce à des forces. Identifions l'origine de ces forces.

Imaginons par exemple de lever la voiture à l'aide d'un cric pour essayer ensuite de la mettre en mouvement : ce serait impossible car, les roues motrices n'étant plus en contact avec le sol, elles tourneraient alors dans le vide et la voiture resterait immobile.

Le mouvement de la voiture ne provient donc pas directement du moteur, mais du contact des pneumatiques avec le sol : le moteur sert à faire tourner les roues mais, pour mettre la voiture en mouvement, il faut solliciter la réaction du sol qui s'exerce à la périphérie des roues motrices : tout se passe alors comme si la voiture était tractée par la bande de roulement des pneumatiques.

Un raisonnement identique s'applique lorsqu'il s'agit d'arrêter la voiture. N'importe quel automobiliste peut d'ailleurs constater que, malgré de bons freins, il est difficile d'arrêter une voiture sur une route verglacée. Ce ne sont donc pas les freins qui arrêtent directement la voiture, mais une force qui provient du sol et qui s'exerce à la périphérie des quatre roues : tout se passe alors comme si la voiture était freinée par la bande de roulement des pneumatiques.

Pour agir sur la trajectoire de la voiture, c'est-à-dire, selon le principe de Newton, la dévier d'une trajectoire rectiligne, le raisonnement est identique : il faut solliciter une force qui provient du sol et qui s'exerce à la périphérie des roues directrices quand celles-ci pivotent : tout se passe alors comme si la voiture était saisie transversalement par la bande de roulement des pneumatiques des roues directrices.

### **La vitesse stabilisée**

Pourquoi doit-on solliciter le moteur même quand la voiture circule à une vitesse stabilisée sur une route horizontale ? Parce que le moteur doit en permanence compenser deux résistances : la résistance au roulement et la résistance de l'air. En effet, si on éteint le moteur avec la boîte de vitesses au point mort, ces deux résistances finissent par arrêter complètement la voiture.

Pour s'en affranchir totalement, il faudrait que le véhicule quitte le sol et parvienne dans l'espace, autrement dit dans le vide, à l'image des astres, planètes et engins spatiaux. En l'absence d'atmosphère, le véhicule pourrait alors maintenir sa vitesse indéfiniment, sans l'aide du moteur.

## **Les sept forces qui s'exercent sur la voiture...**

Combien existe-t-il de forces qui, à un moment ou à un autre, peuvent s'exercer sur une voiture ? Il y en a sept, et sept seulement !

Elles sont de trois types (force agissant à distance, forces de contact et forces de frottement). Dans l'ordre :

- le poids (force agissant à distance) ;
- la force de traction (force de contact) ;
- la force de retenue (force de contact) ;
- la force de freinage (force de contact) ;
- la force de guidage (force de contact)
- la résistance au roulement (force de frottement) ;
- la résistance de l'air (force de frottement).

Remarque : dans la littérature automobile classique, la force de freinage est souvent assimilée à une force de frottement, ce qui est une formulation incorrecte : cette force ne pourrait être qualifiée ainsi qu'à la seule condition que les quatre roues soient complètement bloquées lors d'un freinage, ce qui, avec une voiture moderne en état standard, est absolument impossible.

## **Le poids et ses particularités**

Le poids est une autre appellation de la force de gravitation, c'est donc une force agissant à distance, comme on l'a vu plus haut.

Le poids étant le produit de la masse par l'accélération gravitationnelle, c'est la force la plus facile à mesurer, puisqu'il suffit pour cela d'utiliser une bascule. Attention à bien distinguer le poids et la masse<sup>(4)</sup> !

Par rapport aux autres forces qui s'exercent sur la voiture, le poids présente quatre caractéristiques remarquables :

1. C'est la seule force qui agit sur le centre de gravité.
2. C'est la seule force dont l'orientation est immuable (le centre de la Terre).
3. C'est la seule force dont l'intensité est constante et invariable<sup>(5)</sup>.
4. C'est la seule force qui agit en permanence, même quand la voiture est à l'arrêt.



Selon le principe de réciprocité, le poids est exactement équilibré par la réaction du sol, d'égale intensité mais de sens opposé, à condition que le sol soit stable et que la route soit parfaitement horizontale et sans dévers.

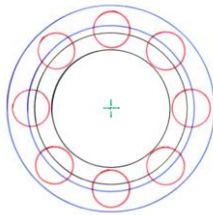
En effet, dès que la route présente une déclivité ou un dévers, le poids affecte l'équilibre, le mouvement ou la trajectoire de la voiture par le biais de ce qu'on appelle la *composante du poids parallèle à la route* (voir les dossiers ADILCA "déclivités" et "anneaux de vitesse").

Remarque : contrairement à une idée reçue due à la confusion entre poids et masse, l'énergie nécessaire pour accélérer une masse sur un terrain horizontal est toujours parfaitement identique en tous lieux, sur la Terre comme sur la Lune, bien que le poids terrestre soit six fois supérieur au poids sélène (on néglige les résistances naturelles).

### La résistance au roulement

La résistance au roulement provient :

- d'une part, du mouvement des billes à l'intérieur de leurs cages ;



© association adilca reproduction interdite

- Coupe schématique d'un roulement à billes :
- la cage intérieure est reliée à la carrosserie de la voiture ;
  - la cage extérieure est solidaire de la roue.

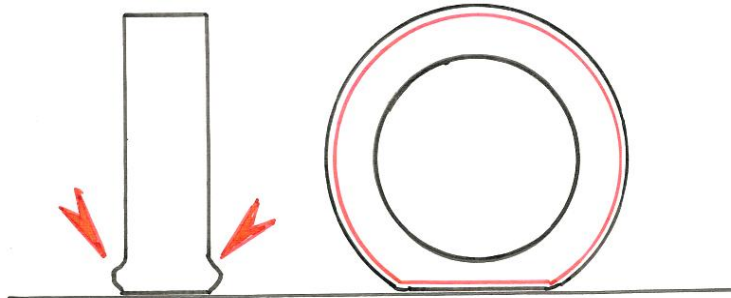
- d'autre part, de la déformation de la bande de roulement des pneumatiques au contact du sol sous l'effet de la masse qui pèse sur les roues : en se déplaçant sur toute la circonférence des pneumatiques lorsque les roues tournent, cette déformation crée une résistance qui freine la voiture.

La résistance au roulement est la somme des forces qui s'exercent au contact du sol, parallèles à la route et de sens opposé au déplacement de la voiture.

Son intensité, sensiblement proportionnelle au poids et à la vitesse, est également liée à la pression de gonflage des pneumatiques.

Il est impossible de mesurer directement l'intensité de cette résistance lorsque la voiture est en circulation, c'est pourquoi on utilise un banc à rouleaux : la voiture est

immobilisée sur deux paires de rouleaux qui entraînent les roues avant ou arrière par le biais d'un moteur électrique. En mesurant la puissance électrique absorbée par la rotation des roues à vitesse stabilisée, on en déduit l'intensité de la résistance au roulement <sup>(6)</sup>.



© association adilca reproduction interdite

La masse qui pèse sur la roue crée un pli qui se propage sur toute la circonférence du pneumatique lorsque la roue tourne.

Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur de la résistance au roulement générée par la rotation des quatre roues et de la transmission d'une voiture de gamme moyenne de masse 1 500 kilogrammes :

vitesse (km.h <sup>-1</sup> )	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>110</b>	<b>130</b>
résistance (N)	<b>130</b>	<b>190</b>	<b>250</b>	<b>310</b>	<b>370</b>

© association adilca reproduction interdite

## La résistance de l'air

La résistance de l'air est due au frottement des molécules d'air sur la carrosserie lorsque la voiture est en mouvement.

La résistance de l'air est généralement représentée comme une force horizontale (on néglige la portance ou la déportance), parallèle à la route et de sens opposé au déplacement de la voiture. Son intensité est proportionnelle à la surface de prise au vent, à la forme de la voiture et au *carré* de sa vitesse.

Il est impossible de mesurer directement l'intensité de la résistance de l'air lorsque la voiture est en circulation, c'est pourquoi on utilise pour cela un tunnel aérodynamique, à l'intérieur duquel on fait souffler un vent artificiel (voir le dossier ADILCA "aérodynamique").

Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur de la résistance de l'air qui s'exerce sur une voiture de gamme moyenne (conditions atmosphériques : 273 K, 1 013 hPa) :

vitesse (km.h <sup>-1</sup> )	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>110</b>	<b>130</b>
résistance (N)	<b>130</b>	<b>260</b>	<b>430</b>	<b>650</b>	<b>910</b>

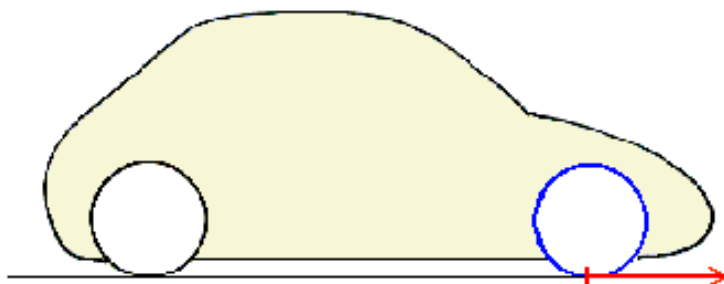
© association adilca reproduction interdite

## Les quatre forces de contact

La force de traction, la force de retenue, la force de freinage et la force de guidage sont des forces de contact qui, comme leur nom l'indique, s'exercent à la périphérie des pneumatiques au contact du sol.

La maîtrise du mouvement de la voiture dépend de ces quatre forces, tout l'art de la conduite automobile consistant à les solliciter avec précision au bon moment et au bon endroit.

L'intensité de ces forces ne se mesure pas, elle se calcule. L'intensité de la force de traction dépend de la cylindrée du moteur, de la quantité d'air et de carburant introduite dans les cylindres et du rapport de transmission. Dès que l'alimentation du moteur est interrompue, la force de retenue se substitue à la force de traction (voir le dossier ADILCA "*couple moteur et force de traction*").



### FORCE DE TRACTION (roues avant motrices)

© association adilca reproduction interdite

La force de freinage et la force de guidage ont une importance telle, en physique comme en automobile, que nous leur avons consacré chacune un dossier particulier (voir les dossiers ADILCA "*force de freinage*" et "*force de guidage*").

## Le principe de réciprocité

Le troisième principe de Newton, ou principe de réciprocité, énonce que :

*« Toute masse soumise à l'action d'une force, répond par une action réciproque d'égale intensité, mais de sens opposé. »*

Comme toutes les forces réelles, les quatre forces de contact qui donnent la maîtrise du mouvement obéissent à ce principe : dès que la voiture accélère, freine ou vire, les pneumatiques exercent une poussée horizontale sur le globe terrestre, d'égale intensité à la force qui agit sur la vitesse ou la trajectoire, mais de sens opposé.

Attention : l'égalité entre une force et son action réciproque ne signifie pas que leurs effets soient identiques. De fait, l'absence de perturbation de la rotation du globe terrestre ne s'explique que par le rapport des masses en présence : celle de la voiture (en moyenne  $1,5 \times 10^3$  kg) s'efface devant celle de la Terre ( $6 \times 10^{24}$  kg), sans qu'il soit besoin d'évoquer les trajectoires divergentes du très grand nombre de véhicules en circulation au même instant<sup>(7)</sup>.

## Le centre de gravité

Le centre de gravité est un point virtuel qui se définit comme le *centre d'équilibre* d'une masse<sup>(8)</sup>.

Rappelons qu'aucune force ne peut s'exercer directement sur le centre de gravité de quelque masse que ce soit, à part l'attraction gravitationnelle (ce qu'on appelle le poids). C'est donc une erreur conceptuelle majeure de présenter le centre de gravité comme l'*alpha* et l'*oméga* des lois physiques, qu'il s'agisse d'automobile ou de n'importe quel autre moyen de transport (train, bateau, avion...), et même, de n'importe quel objet.

Néanmoins, le centre de gravité étant le centre d'équilibre de la voiture, sa position exacte (en hauteur, par rapport au sol, et en distance par rapport aux trains avant et arrière) conditionne les réactions de la voiture lorsque celle-ci est soumise à l'action d'une des forces décrites plus haut, précisément parce que ces forces ne s'exercent pas sur le centre de gravité.

En effet, la hauteur du centre de gravité et la distance qui le sépare de l'essieu directeur doivent être regardés comme autant de *bras de levier*. Combiné à une force de traction, de freinage ou de guidage, chacun de ces bras de levier forme un *couple*, au sens physique du terme.

Ce couple provoque un mouvement de rotation de la voiture autour de son centre de gravité, que l'on décompose selon trois axes orthogonaux :

1. Axe transversal, c'est le *tangage* : la voiture est *déséquilibrée*, elle s'appuie sur le train arrière ou avant, selon que le conducteur sollicite la force de traction ou de freinage.
2. Axe longitudinal, c'est le *roulis* : la voiture est *déséquilibrée*, elle s'appuie sur les roues extérieures à la trajectoire lorsque le conducteur sollicite la force de guidage.
3. Axe vertical, c'est le *lacet* : la voiture change de cap, elle est *déroutée* à cause de la résistance des roues arrière lorsque le conducteur sollicite la force de guidage des roues avant<sup>(9)</sup>.

**ASSOCIATION ADILCA** [www.adilca.com](http://www.adilca.com) \* \* \*

- (1) Un mouvement apparent est celui que perçoit un observateur privé de repères extérieurs. Exemples :
- le Soleil donne l'illusion de tourner autour de la Terre, si on postule que le globe terrestre est immobile. Cette illusion perceptive a longtemps trompé l'humanité sur la réalité du mouvement dans le système solaire (voir le dossier ADILCA "système solaire et révolution copernicienne") ;
  - deux trains immobilisés côte à côte peuvent donner l'illusion d'un mouvement lorsque l'un des deux trains démarre, si les passagers ne disposent d'aucun repère extérieur ;
  - le passager d'une voiture a l'illusion d'être projeté en avant en cas de freinage puissant, alors qu'en réalité, il conserve sa vitesse initiale au moment où la voiture commence à décélérer (voir le dossier ADILCA "force d'inertie").
- (2) Un équilibre apparent est celui que perçoit un observateur lorsque l'objet étudié semble immobile. Exemples :
- un cycliste en train de décrire une trajectoire circulaire donne l'impression qu'il est immobile si on l'observe à partir d'une photographie (voir le dossier ADILCA "force centrifuge") ;
  - un satellite géostationnaire donne l'impression qu'il est immobile si on l'observe depuis le sol (voir le dossier ADILCA "manuels scolaires de physique").
- (3) Voir les dossiers ADILCA "force de traction", "force de freinage" et "force de guidage". L'aérotrain de l'ingénieur Jean Bertin est une exception : testé avec succès sur des lignes expérimentales entre 1964 et 1975, l'appareil était guidé par un rail en béton mais propulsé par une turbine de type aviation.
- (4) Distinction essentielle : la masse est une quantité de matière, le poids est une force qui s'exerce sur une masse. En langage abscons, on dit que la masse est une grandeur scalaire, donc invariable et représentée uniquement par un nombre, tandis que le poids est une grandeur vectorielle, donc affectée d'une orientation spatiale et représentée par une flèche indiquant une direction (en écriture scientifique classique, une grandeur vectorielle est signalée par une flèche horizontale placée au-dessus du symbole). Toute balance ou bascule mesure en réalité une force verticale qu'on devrait exprimer en newtons (symbole **N**). Ce n'est que par un calcul ultérieur (division du poids par l'accélération gravitationnelle locale) qu'on en déduit la masse, exprimée en kilogrammes (symbole **kg**).
- (5) Le poids (à ne pas confondre avec la masse) est une grandeur vectorielle constante et invariable dans les limites d'une aire géographique donnée. En effet, si le poids est indépendant de la longitude, il ne l'est pas de la latitude, en raison de la forme particulière du globe terrestre : le poids exact d'une masse de 1 000 kg est 9 830 N au pôle nord, 9 810 N en Europe et 9 780 N à l'équateur (l'accélération gravitationnelle est fonction inverse du carré de la distance qui sépare un lieu du centre de la Terre). Toutefois, quel que soit le lieu considéré, l'influence de l'altitude est négligeable jusqu'à 5 000 m (le point culminant des routes européennes se trouve en France, au col de l'Iseran, à 2 770 m d'altitude).
- (6) Comme il n'est pas possible de désolidariser le mouvement des roues motrices de celui de la transmission, cela signifie que la mesure effectuée sur les roues motrices inclut obligatoirement la résistance liée à la rotation des arbres de roues, du différentiel, de l'arbre de transmission et de l'arbre secondaire de la boîte de vitesses, même si le moteur est éteint et le levier de vitesses au point mort.
- (7) En vertu du deuxième principe de Newton, également appelé principe fondamental de la dynamique, l'effet produit par une force est inversement proportionnel à la masse sur laquelle elle s'exerce, c'est la relation  $[Y = F / M]$  ou  $[F = M Y]$ . L'action est la force qui s'exerce sur la voiture, l'action réciproque est la force que la voiture exerce sur le globe terrestre.
- (8) Le centre de gravité, appelé également centre de masse, centre d'inertie ou centre d'équilibre, se définit comme le point d'application de la résultante de toutes les forces de gravitation qui agissent sur les différentes masses d'un ensemble non homogène (pour une voiture : moteur, transmission, roues, châssis, carrosserie, passagers, chargement, etc.), comme si toute la matière qui compose le véhicule était concentrée en un seul point. Avec deux personnes à bord, le centre de gravité d'une voiture de tourisme est approximativement situé entre les deux sièges avant, à la hauteur de l'assise, c'est le centre d'équilibre de l'ensemble. L'exemple de la bicyclette montre que ce point est parfaitement immatériel, il est donc strictement impossible d'y exercer la moindre force.
- (9) Cependant, il n'y aurait pas de mouvement de lacet, donc pas de changement de cap, si la voiture était équipée de quatre roues directrices pivotant d'une même valeur angulaire.

## VI. RELATIONS ENTRE GRANDEURS

### Poids :

$$P = M \cdot g$$

**P** : poids, exprimé en **N**

**M** : masse, exprimée en **kg**

**g** : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**  
(accélération gravitationnelle terrestre :  $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ )

cohérence des unités :  $P = \text{kg} \cdot \text{m.s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons le poids d'une voiture de masse 1 500 kg :

$$P = 1\,500 \times 9,8 = 14\,700 \text{ N}$$

### Force de traction :

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

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

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

**X** : rapport de transmission, grandeur sans dimension

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

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

Exemple : calculons la force de traction qui s'exerce au contact du sol sur des roues motrices de 0,30 m de rayon lorsqu'un couple moteur de 250 Nm est relayé par un rapport de transmission de 12 :

$$F = 250 \times 12 / 0,30 = 10\,000 \text{ N}$$

### Force de retenue :

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

**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 :  $F = \text{N.m} \cdot \text{m}^{-1} = \text{N}$

Exemple : calculons la force de retenue qui s'exerce sur des roues motrices de 0,30 m de rayon lorsqu'un couple antagoniste de 30 Nm est relayé par un rapport de transmission de 8 :

$$F = 30 \times 8 / 0,30 = 800 \text{ N}$$

**Force de freinage :**

$$F = \frac{1}{2} M \cdot V^2 / D$$

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

**M** : masse, exprimée en **kg**

**V** : vitesse, exprimée en **m.s<sup>-1</sup>**

**D** : distance de freinage, exprimée en **m**

cohérence des unités :  $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons la force de freinage capable d'immobiliser une voiture de masse 1 500 kg sur une distance de 50 mètres avec une vitesse initiale de 30 m.s<sup>-1</sup> (108 km.h<sup>-1</sup>) :

$$F = \frac{1}{2} \times 1\,500 \times 30^2 / 50 = 750 \times 900 / 50 = 13\,500 \text{ N}$$

**Force de guidage :**

$$F = M \cdot V^2 / R$$

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

**M** : masse, exprimée en **kg**

**V** : vitesse, exprimée en **m.s<sup>-1</sup>**

**R** : rayon de trajectoire, exprimé en **m**

cohérence des unités :  $F = \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons la force de guidage capable de maintenir une voiture de masse 1 500 kg sur une trajectoire circulaire de 50 mètres de rayon à la vitesse de 20 m.s<sup>-1</sup> (72 km.h<sup>-1</sup>) :

$$F = 1\,500 \times 20^2 / 50 = 1\,500 \times 400 / 50 = 12\,000 \text{ N}$$

**Centre de gravité :**

$$D = L \cdot M2 / (M1 + M2)$$

**D** : distance entre l'essieu directeur et le centre de gravité, exprimée en **m**

**L** : empattement, exprimé en **m**

**M1** : masse pesant sur le train avant, exprimée en **kg**

**M2** : masse pesant sur le train arrière, exprimée en **kg**

cohérence des unités :  $d = \text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} = \text{m}$

Exemple : calculons la distance entre l'essieu directeur et le centre de gravité d'une voiture de masse 1 500 kg répondant aux caractéristiques suivantes : empattement 2,5 m, 840 kg pesant sur le train avant, 660 kg sur le train arrière :

$$D = 2,5 \times 660 / (840 + 660) = 1\,650 / 1\,500 = 1,1 \text{ m}$$

Remarque : il s'agit de la distance horizontale (dite « entre axes »), perpendiculaire à la verticale du centre de gravité de la voiture.

**Tangage** :

$$R = M \cdot Y \cdot H / L$$

**R** : réaction de tangage, exprimée en **N**

**M** : masse, exprimée en **kg**

**Y** : décélération, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**

**H** : hauteur du centre de gravité, exprimée en **m**

**L** : longueur de l'empattement, exprimée en **m**

cohérence des unités :  $R = \text{kg} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons la réaction de tangage d'une voiture soumise à une décélération de  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (masse 1 500 kg, hauteur du centre de gravité 0,5 m, empattement 2,5 m) :

$$R = 1\,500 \times 5 \times 0,5 / 2,5 = 1\,500 \text{ N}$$

**Roulis** :

$$R = M \cdot Y \cdot H / L$$

**R** : réaction de roulis, exprimée en **N**

**M** : masse, exprimée en **kg**

**Y** : accélération transversale, exprimée en **m.s<sup>-2</sup>**

**H** : hauteur du centre de gravité, exprimée en **m**

**L** : largeur de voie, exprimée en **m**

cohérence des unités :  $R = \text{kg} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{+1} \cdot \text{m}^{-1} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} = \text{N}$

Exemple : calculons la réaction de roulis d'une voiture soumise à une accélération transversale de  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  (masse 1 500 kg, hauteur du centre de gravité 0,5 m, voie 1,5 m) :

$$R = 1\,500 \times 5 \times 0,5 / 1,5 = 2\,500 \text{ N}$$

**ASSOCIATION ADILCA**

[www.adilca.com](http://www.adilca.com)

\* \* \*



## VII. BIBLIOGRAPHIE

- ASSOCIATION ADILCA (ouvrage collectif édité à compte d'auteurs) : *Guide des Lois Physiques de l'Automobile*, Paris 2002.
  
- LE ROND D'ALEMBERT (Jean) : *Traité de dynamique*, Paris 1743.
  
- LE TONNELIER DE BRETEUIL, marquise du Chastellet (Gabrielle Émilie) : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction intégrale en français de l'œuvre d'Isaac Newton), Paris 1759.
  
- NEWTON (Isaac) : *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres 1687.

**ASSOCIATION ADILCA**

[www.adilca.com](http://www.adilca.com)

\* \* \*