

LES ANNEAUX DE VITESSE

Les anneaux de vitesse sont des pistes circulaires destinées aux essais à grande vitesse. Pour le physicien, c'est l'occasion d'étudier les lois du mouvement et de la vitesse, ainsi que les contraintes subies par la voiture dans de telles conditions de roulage.

Les caractéristiques d'un anneau de vitesse

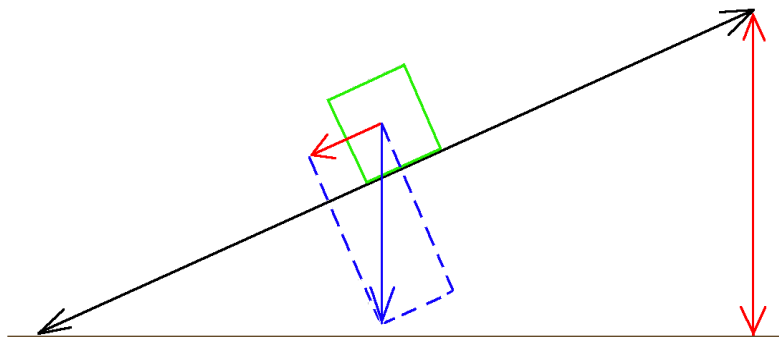
Prenons comme exemple l'anneau de vitesse de Montlhéry : c'est une piste de 20 mètres de large pour une dénivelée de 10 mètres entre les deux bords. L'angle de dévers est progressif, il atteint 45° sur une trajectoire extérieure de 275 mètres de rayon ⁽¹⁾.

Pour nos différents calculs, nous allons considérer une voiture de masse 1 500 kilogrammes circulant sur une trajectoire circulaire de 250 mètres de rayon en dévers à 45° . En minorant la valeur du rayon et en majorant celle du dévers, on escompte une marge de sécurité quant aux résultats.

Théorie de la trajectoire circulaire

Selon le principe de Newton, le mouvement en ligne droite est la règle, une masse ne peut être déviée d'une trajectoire rectiligne que par l'action d'une force.

Lorsqu'une voiture circule sur une chaussée parfaitement horizontale et sans dévers, cette force provient du pivotement des roues directrices et de la réaction (au sens physique du terme) des roues arrière, c'est la force de guidage (voir dossier ADILCA "force de guidage").



© association adilca reproduction interdite

Poids (flèche bleue) et composante du poids (flèche rouge) sur une chaussée en dévers.

Si la voiture circule sur une chaussée en dévers, le poids possède une composante parallèle à la surface de la piste. Cette composante influence la trajectoire de la voiture.

La vitesse d'équilibre

La composante du poids peut suffire pour maintenir la voiture sur la piste sans que le conducteur soit obligé d'agir sur la direction.

La condition d'équilibre est indépendante de la masse de la voiture : à dévers constant, elle est uniquement liée à la vitesse. Cette vitesse est dite *vitesse d'équilibre*.

En deçà de cette vitesse, la voiture "tombe" vers l'intérieur de la trajectoire, avec un risque de tonneaux si le dévers est très accentué. Au-delà de cette vitesse, le conducteur doit agir sur la direction et solliciter la force de guidage des pneumatiques pour conserver la trajectoire souhaitée.

Sur une piste en dévers à 45° , la composante parallèle à la piste vaut 71 % du poids de la voiture, ce qui signifie que la vitesse d'équilibre s'établit à environ 42 m.s^{-1} , soit aux alentours de 150 km.h^{-1} .

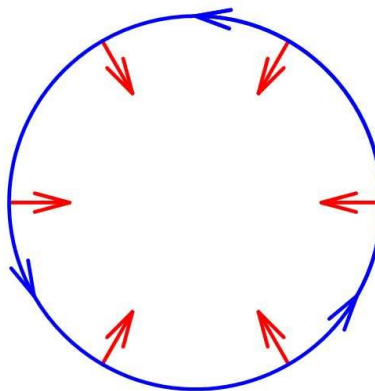
La force d'orientation centripète

La composante du poids conditionne la vitesse d'équilibre mais ce n'est pas la seule force à agir dans le système.

En effet, si la piste était parfaitement rectiligne, la voiture serait incapable de décrire une trajectoire circulaire malgré le dévers.

Prenons de la hauteur et observons le mouvement d'ensemble : vue de dessus, la voiture décrit une trajectoire circulaire dans un plan horizontal.

Selon les lois de Newton, cette trajectoire n'est possible que grâce à une force horizontale d'orientation centripète.



© association adilca reproduction interdite

Piste circulaire vue de dessus : la voiture décrit un cercle dans un plan horizontal (flèches bleues). Cette trajectoire est due à l'action d'une force horizontale d'orientation centripète (flèches rouges).

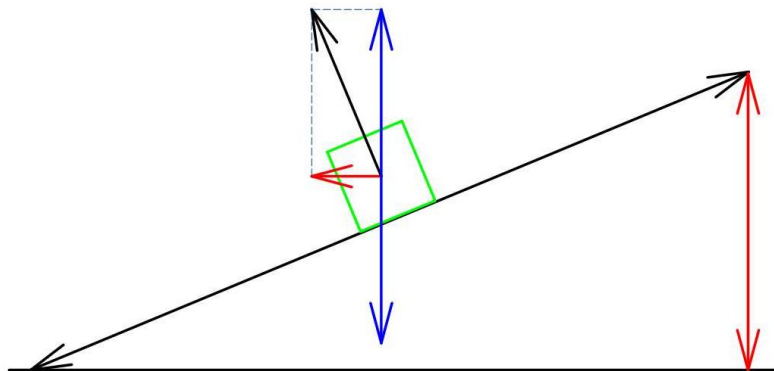
Quelle est la nature de cette force ? Dans un premier temps, appelons-la *force d'orientation centripète*, afin de bien la distinguer de la composante du poids.

La réaction de la piste

En réalité, cette force n'est pas de nature centripète, au vrai sens du terme (voir dossier ADILCA "*force centripète*") :

- la voiture n'est jamais *attirée* vers le centre de la piste ;
- il n'existe pas de *cause* située au centre de l'anneau de vitesse qui pourrait expliquer la trajectoire circulaire de la voiture ;
- aucune force ne s'exerce jamais sur le *centre de gravité* d'une voiture, à part le poids.

Il faut donc chercher ailleurs l'explication : si la voiture décrit une trajectoire circulaire, c'est grâce à la réaction de la piste (on néglige la composante du poids parallèle à la surface de la piste).



© association adilca reproduction interdite

Réaction de la piste (flèche noire), poids (flèche bleue) et force d'orientation centripète (flèche rouge).

La réaction de la piste s'exerce sur les quatre pneumatiques au contact du sol.

Sa résultante (flèche noire) a été "transportée" au centre de gravité de la voiture⁽²⁾.

(Pour simplifier le dessin, la composante du poids parallèle à la surface de la piste n'apparaît pas).

La réaction de la piste s'exerce sur les quatre pneumatiques de la voiture, dans la surface de contact au sol et dans l'axe de symétrie de la voiture ; elle possède deux composantes :

- l'une est verticale, égale et opposée au poids de la voiture ;
- l'autre est horizontale, c'est la force d'orientation centripète.

La charge dynamique

Du point de vue mathématique, cette réaction apparaît comme une résultante égale à la somme vectorielle du poids de la voiture et de la force d'orientation centripète qui la maintient sur une trajectoire circulaire⁽³⁾.

L'intensité de cette résultante a pour effet de comprimer les pneumatiques et les suspensions de la voiture, d'où le nom de *charge dynamique* pour désigner ce phénomène.

À la vitesse d'équilibre, la charge dynamique d'une voiture de masse 1 500 kilogrammes décrivant une trajectoire circulaire de 250 mètres de rayon en dévers à 45° est supérieure à 18 000 newtons.

Dans de telles conditions, les pneumatiques et les suspensions subissent des contraintes qui sont équivalentes à un supplément de masse de 300 kilogrammes en statique, soit 4 passagers. Il en résulte, entre autres, un échauffement des pneumatiques avec un risque d'éclatement.

C'est pourquoi la charge dynamique doit être compensée par une augmentation équivalente de la pression de gonflage des pneumatiques (dans la limite autorisée par leur conception) et par un durcissement de la suspension.

Le carré de la vitesse

Qu'arrive-t-il si on dépasse la vitesse d'équilibre ?

Première conséquence : la charge dynamique augmente.

À 180 km.h⁻¹, la charge dynamique atteint 21 500 newtons, ce qui correspond à un supplément de masse de 650 kilogrammes en statique. Un supplément qu'il est alors difficile de compenser par une simple augmentation de la pression des pneumatiques.

Deuxième conséquence : les pneumatiques des roues directrices sont mis à contribution au niveau du guidage puisque la vitesse d'équilibre est dépassée.

À 180 km.h⁻¹, le déficit de guidage pour maintenir la voiture sur une trajectoire identique à celle décrite à la vitesse d'équilibre est de 4 400 newtons. Il en résulte une contrainte supplémentaire imposée aux pneumatiques, et donc un échauffement qui ne peut être compensé par une simple augmentation de pression.

Dans cet exemple, une telle force pourrait maintenir une voiture de masse 1 500 kilogrammes sur une trajectoire circulaire à dévers nul de 250 mètres de rayon avec une vitesse de 27 m.s⁻¹ soit 100 km.h⁻¹.

La différence avec la vitesse d'équilibre n'est donc faible qu'en apparence. En réalité, elle est considérable puisqu'elle varie selon la même loi que la force d'orientation centripète, c'est-à-dire comme le *carré* de la vitesse.

Un simple calcul, identique à celui qui permet de calculer une variation d'énergie cinétique, permet en effet de vérifier qu'entre 150 et 180 km.h⁻¹, la différence dynamique n'est pas de 30 km.h⁻¹, mais bien de 100 km.h⁻¹ ! (voir dossier ADILCA "énergie cinétique").

Le tableau suivant récapitule ces différences :

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 200 | 173 | 167 | 160 | 152 | 143 | 132 | 120 | 105 | 87 | 63 | 0 |
| 180 | 150 | 143 | 134 | 125 | 113 | 100 | 83 | 59 | 0 | 61 | 87 |
| 160 | 125 | 116 | 106 | 93 | 78 | 56 | 0 | 57 | 83 | 103 | 120 |
| 140 | 98 | 87 | 72 | 52 | 0 | 54 | 78 | 97 | 113 | 129 | 143 |
| 120 | 66 | 30 | 0 | 50 | 72 | 90 | 106 | 120 | 134 | 147 | 160 |
| 100 | 0 | 48 | 66 | 83 | 98 | 112 | 125 | 138 | 150 | 162 | 173 |
| km.h ⁻¹ | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 |

© association adilca reproduction interdite

Comment lire ce tableau ? Il suffit de mettre en correspondance les vitesses en caractères gras apparaissant sur la colonne de gauche et la ligne du bas. La valeur indiquée est la vitesse exprimant la différence dynamique.

Exemple 1 : entre **100** km.h⁻¹ et **120** km.h⁻¹, la valeur indiquée est **66** km.h⁻¹. Cela signifie que, pour maintenir une trajectoire circulaire à la vitesse de **120** km.h⁻¹ au lieu de **100** km.h⁻¹, il faut solliciter une force supplémentaire qui correspond à la même trajectoire décrite à **66** km.h⁻¹. La différence dynamique est donc de **66** km.h⁻¹.

Exemple 2 : supposons que la vitesse d'équilibre sur une piste de 250 mètres de rayon en dévers à 45° s'établisse à **150** km.h⁻¹ et que le conducteur souhaite augmenter cette vitesse jusqu'à **180** km.h⁻¹, cela signifie que les pneumatiques seront sollicités par une force de guidage supplémentaire correspondant à une trajectoire circulaire décrite à la vitesse de **100** km.h⁻¹. Dans ce cas, la différence dynamique est de **100** km.h⁻¹.

Le principe de réciprocité

Le troisième principe de Newton, ou principe de réciprocité s'énonce ainsi :

« Toute force qui s'exerce sur un corps entraîne une réaction d'égale intensité, mais de sens opposé. »

Comment ce principe s'applique-t-il dans le cas du mouvement de la voiture sur une piste circulaire en dévers ?

Nous l'avons vu, c'est la réaction de la piste qui maintient la voiture sur une trajectoire circulaire en dévers.

Conformément au principe de Newton, la voiture génère une *action réciproque* d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé qui s'exerce au contact du sol et s'applique à l'ensemble de l'infrastructure qui sous-tend la piste.

La conception de l'infrastructure

Le calcul de la résistance de l'infrastructure doit donc tenir compte du principe de réciprocité énoncé par Isaac Newton, une preuve supplémentaire de son génie.

En effet, si une seule voiture de masse 2 000 kilogrammes circule à 250 km.h^{-1} sur une trajectoire de 250 mètres de rayon en dévers à 45° , la piste doit pouvoir supporter une charge d'au moins 45 000 newtons, et ce à n'importe quel endroit de son tracé ⁽⁴⁾.

Cette valeur n'est qu'indicative, il faut la multiplier, non seulement par le nombre de voitures susceptibles d'emprunter la piste au même moment, mais aussi par un large coefficient de sécurité, comme c'est la règle dans toute construction.

La force centrifuge

Le concept de *force centrifuge* est souvent appelé à la rescousse pour décrire un mouvement circulaire, ou pire, pour cautionner le principe de réciprocité de Newton, mais ce concept n'a rien à faire ici :

- la force centrifuge est supposée s'exercer sur le centre de gravité de la voiture, alors qu'ici, l'action réciproque s'exerce au contact du sol. Rappelons qu'aucune force ne s'exerce jamais sur le centre de gravité d'aucune masse, sauf le poids. Une preuve supplémentaire de l'absurdité des descriptions qui utilisent le concept de force centrifuge à tort et à travers ;
- la composante du poids parallèle à la piste, dont il est question plus haut, provient de l'accélération gravitationnelle terrestre. Il existe bien une action réciproque à cette force, mais celle-ci s'exerce sur le centre de gravité de la Terre, et non sur celui de la voiture ; en déplacer le point d'application au centre de gravité de la voiture pour la qualifier ensuite de *force centrifuge*, est, au mieux, une simple transgression des règles de calcul vectoriel, au pire, une escroquerie intellectuelle ;
- le principe de réciprocité est inapplicable dans le cas de la force centrifuge puisqu'il s'agit d'une force imaginaire. Par définition, ce genre de force échappe à toute interaction, contrairement aux forces réelles décrites ci-dessus (voir dossiers ADILCA "*force centrifuge*" et "*force d'inertie*").

- d'une manière plus générale, la force centrifuge n'est certainement pas une force égale et opposée à la force centripète, sinon ces deux forces s'annuleraient et toute trajectoire circulaire deviendrait impossible (voir dossier ADILCA "force centripète").
- l'explication correcte est la suivante : la force centrifuge est une force imaginaire qui apparaît uniquement dans une description dite "statique", ce qui suppose d'ignorer le mouvement réel. Bien évidemment, une telle description serait sans intérêt ici, l'automobile étant un objet conçu pour le mouvement (voir dossier ADILCA "statique et dynamique").

Le danger des anneaux de vitesse

Les lois du mouvement circulaire nous font toucher du doigt le danger des anneaux de vitesse ou des pistes ovales au tracé en dévers :

- circuler sur une piste circulaire en dévers génère une charge dynamique qui "pèse" sur les suspensions et les pneumatiques ;
- à une certaine vitesse, dite "vitesse d'équilibre", la composante du poids suffit pour maintenir la voiture sur sa trajectoire ;
- au-delà de la vitesse d'équilibre, les pneumatiques des roues directrices sont mis à contribution en guidage, d'où un échauffement supplémentaire et un risque d'éclatement accru ;
- le risque d'incident ou d'accident lié à une dégradation des suspensions ou des pneumatiques n'est pas proportionnel à la vitesse, mais au carré de la vitesse.

(1) L'angle de dévers se définit comme l'angle que forme la surface de la piste par rapport à l'horizontale.

(2) Un vecteur est une représentation graphique d'une force ou d'une accélération. Il est toujours possible de déplacer un vecteur, à condition de ne modifier ni son orientation, ni sa longueur, c'est une des règles de base du calcul vectoriel. Le déplacement d'un vecteur n'autorise pas un changement d'appellation.

(3) Les deux vecteurs qui représentent la force centripète et la réaction au poids forment un angle droit. Leur somme (résultante) est donc égale à la racine carrée de la somme de leurs carrés, c'est une application concrète du théorème de Pythagore sur les propriétés des triangles rectangles.

(4) Si l'infrastructure est suffisamment solide et bien ancrée dans le sol grâce à ses fondations, c'est en définitive la Terre qui doit "encaisser" cette réaction, sans conséquence sur son mouvement propre du fait du rapport des masses en présence (Terre : 6×10^{24} kg ; voiture : $1,5 \times 10^3$ kg ; rapport des masses Terre / voiture : 4×10^{21}).

QUELQUES 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⁻²**
(accélération gravitationnelle terrestre : **g ~ 10 m.s⁻²**)
cohérence des unités : **P = kg . m.s⁻² = N**

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

$$P = 1\,500 \times 10 = 15\,000 \text{ N}$$

Composante du poids parallèle à la chaussée :

$$F = M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

F : composante du poids parallèle à la chaussée, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
g : accélération gravitationnelle, exprimée en **m.s⁻²**
α : angle de dévers, grandeur sans dimension ;
cohérence des unités : **F = kg . m.s⁻² = N**

Exemple : calculons la composante du poids parallèle à la chaussée d'une voiture de 1 500 kg circulant sur une piste en dévers à 45° (**g ~ 10 m.s⁻²**, **sinus 45° = 0,71**) :

$$F = 1\,500 \times 10 \times 0,71 = 10\,650 \text{ N}$$

Force d'orientation centripète :

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

F : force d'orientation centripète, exprimée en **N**
M : masse, exprimée en **kg**
V : vitesse, exprimée en **m.s⁻¹**
R : rayon de trajectoire, exprimé en **m**
cohérence des unités : **F = kg . (m⁺¹.s⁻¹)² . m⁻¹ = kg . m⁺².s⁻² . m⁻¹ = kg.m.s⁻² = N**

Exemple : calculons la force d'orientation centripète qui maintient une voiture de masse 1 500 kg sur une trajectoire de 250 m de rayon à la vitesse de 42 m.s⁻¹ :

$$F = 1\,500 \times 42^2 / 250 = 1\,500 \times 1\,764 / 250 = 10\,600 \text{ N}$$

Charge dynamique :

$$R = [P^2 + F^2]^{1/2}$$

R : charge dynamique, exprimée en **N**

P : poids, exprimé en **N**

F : force d'orientation centripète, exprimée en **N**

cohérence des unités : $R = [(kg.m.s^{-2})^2]^{1/2} = N$

Exemple : calculons la charge dynamique d'une masse de 1 500 kg soumise à une force d'orientation centripète de 10 600 N ($g = 10 m.s^{-2}$) :

$$R = [(15\,000)^2 + (10\,600)^2]^{1/2}$$

$$R = [(22\,500 \times 10^4) + (11\,240 \times 10^4)]^{1/2}$$

$$R = [33\,740 \times 10^4]^{1/2}$$

$$R = 184 \times 10^2 = 18\,400 \text{ N}$$

Différence dynamique, relation simplifiée :

$$V = (Vb^2 - Va^2)^{1/2}$$

V : différence dynamique, exprimée en **km.h⁻¹**

Va : vitesse, exprimée en **km.h⁻¹**

Vb : vitesse, exprimée en **km.h⁻¹**

cohérence des unités : $V = [(km^{+1}.h^{-1})^2]^{1/2} = [km^{+2}.h^{-2}]^{1/2} = km.h^{-1}$

Exemple : calculons la différence dynamique entre 90 km.h⁻¹ et 120 km.h⁻¹ :

$$V = (120^2 - 90^2)^{1/2}$$

$$V = (14\,400 - 8\,100)^{1/2}$$

$$V = 6\,300^{1/2} = 79,4 \text{ km.h}^{-1}$$

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *