

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

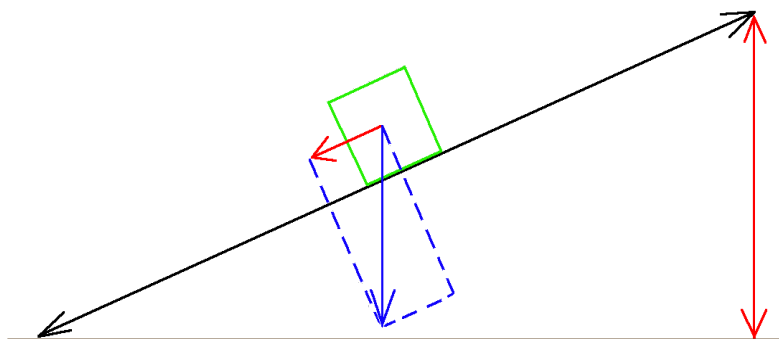
Prenons comme exemple l'anneau de vitesse de Montlhéry : c'est une piste de 20 mètres de large pour une dénivelée de 10 mètres entre les deux bords. L'angle de dévers est progressif, il atteint 45° sur une trajectoire extérieure de 275 mètres de rayon ⁽¹⁾.

Pour nos différents calculs, nous allons considérer une voiture de masse 1 500 kilogrammes circulant sur une trajectoire 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, 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 une trajectoire circulaire sans que le conducteur soit obligé d'agir sur la direction, c'est une question de rayon de trajectoire, de dévers et de vitesse.

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

Sur une piste en dévers à 45° , la composante parallèle à la piste vaut 71 % du poids de la voiture, ce qui signifie que, sur une trajectoire de 250 mètres de rayon, la vitesse d'équilibre s'établit à 42 m.s^{-1} , soit environ 150 km.h^{-1} .

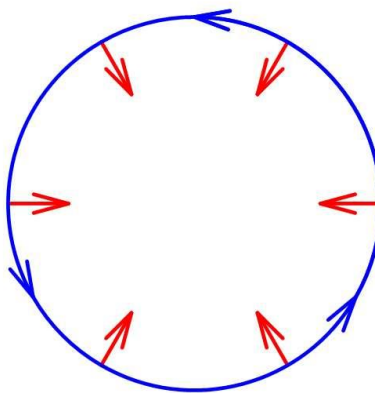
En deçà de cette vitesse, la voiture "tombe" vers l'intérieur de la trajectoire, avec un risque de tonneaux si le dévers est très accentué. Au-delà de cette vitesse, le conducteur doit agir sur la direction et solliciter la force de guidage des pneumatiques pour conserver la trajectoire souhaitée.

La force centripète

Oublions la composante du poids et la vitesse d'équilibre.

Imaginons une piste en dévers, parfaitement circulaire, sur laquelle une voiture se déplace avec une vitesse constante : dans un plan horizontal, cette voiture décrit un cercle parfait.

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



© association adilca reproduction interdite

Sur une piste circulaire en dévers, la voiture décrit une trajectoire en forme de cercle (flèches bleues). Cette trajectoire est due à l'action d'une force horizontale d'orientation centripète (flèches rouges).

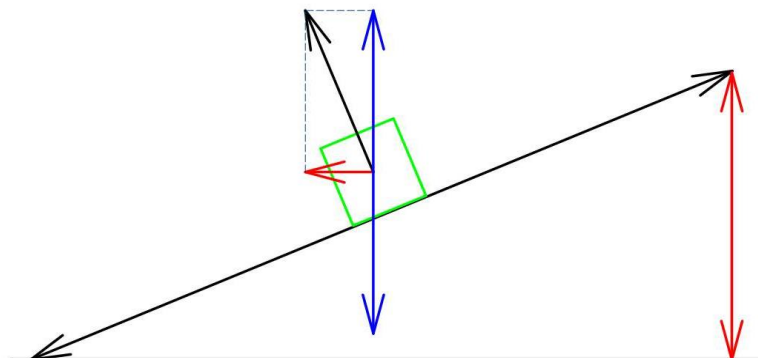
Quelle est la nature de cette force ? Pour simplifier le raisonnement, appelons-la *force centripète*, afin de bien la distinguer de la composante du poids.

L'action de la piste

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

- la voiture n'est jamais *attirée* vers le centre de la piste ;
- il n'existe pas de cause située quelque part au milieu de l'anneau de vitesse pour expliquer cette trajectoire ;
- 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 uniquement grâce à l'action de la piste (on néglige l'action de la composante du poids).



© association adilca reproduction interdite

Action de la piste (flèche noire), force centripète (flèche rouge) et poids (flèche bleue).

Cette action s'exerce sur chacun des quatre pneumatiques de la voiture au contact de la piste. Pour simplifier le dessin, nous avons fusionné ces quatre forces en une seule, que nous avons ensuite "transportée" au centre de gravité de la voiture, là où s'applique le poids⁽²⁾.

Cette action s'exerce sur les quatre pneumatiques dans la surface de contact avec la piste et dans l'axe de symétrie de la voiture ; elle possède deux composantes :

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

La charge dynamique

Du point de vue mathématique, cette action apparaît comme une résultante égale à la somme vectorielle du poids de la voiture et de la force 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.

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, là non plus, par une 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 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 principe d'action-réaction

Le troisième principe de Newton, ou principe d'action-réaction 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 l'action de la piste qui maintient la voiture sur une trajectoire circulaire en dévers.

Conformément au principe de Newton, la voiture génère une réaction d'égale intensité, de même direction mais de sens opposé. Naturellement, cette réaction s'exerce au contact des pneumatiques avec la piste.

Le calcul de la résistance de l'infrastructure doit tenir compte de cette réaction. Par exemple, 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.

Remarque : cette réaction est souvent confondue avec la *force centrifuge*, à tort :

- la force centrifuge est une force imaginaire, elle apparaît uniquement dans une description dite "*statique*", ce qui suppose d'ignorer le mouvement réel. Une telle description serait sans intérêt ici, l'automobile étant un objet conçu pour le mouvement ;
- la force centrifuge est supposée s'exercer sur le centre de gravité de la voiture, alors qu'ici, la réaction de la voiture s'exerce au contact du sol ;
- le principe d'action-réaction est inapplicable dans le cas de la force centrifuge puisqu'il s'agit d'une force imaginaire (voir dossiers ADILCA "*force centrifuge*" et "*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 une trajectoire circulaire ;
- 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.*

(3) *Les deux vecteurs qui représentent la force centripète et le poids formant un angle droit, leur somme (résultante) est 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 de sa masse.*

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *

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 :

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

F : composante du poids, 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 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 centripète :

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

F : force 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 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 :

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

Charge dynamique :

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

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

P : poids, exprimé en **N**

F : force centripète, exprimée en **N**

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

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

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

$$R = [(22\,500 \times 10^4) + (11\,240 \times 10^4)]^{1/2} = [33\,740 \times 10^4]^{1/2} = 184 \times 10^2 = 18\,400 \text{ N}$$

ASSOCIATION ADILCA

www.adilca.com

* * *