

# Chap.3 – Principe de fonctionnement d'un véhicule à roue

## 1. Véhicule roulant sans glisser, tracté ou motorisé

- 1.1. Description du véhicule – Introduction des notations
- 1.2. Condition de non glissement
- 1.3. Les deux situations étudiées : véhicule tracté ou véhicule motorisé

## 2. Véhicule tracté

- 2.1. Application au véhicule du Théorème de la quantité de mouvement
- 2.2. Application aux roues du Théorème du moment cinétique

## 3. Véhicule motorisé

- 3.1. TQM et TMC
- 3.2. Théorème de l'énergie cinétique
- 3.3. Ordres de grandeur
- 3.4. (*Culturel HP*) Déformation des roues : frottements de roulement

## 4. Exemple : influence du braqué en vélo

### Intro :

On se doute bien que c'est le moteur d'une voiture qui lui permet d'avancer. Pourtant, le moteur n'exerce qu'une action intérieure au véhicule, alors que ce sont les forces extérieures qui permettent à un corps d'être mis en mouvement. On notera qu'il en est de même du déplacement de la plupart des êtres vivants.

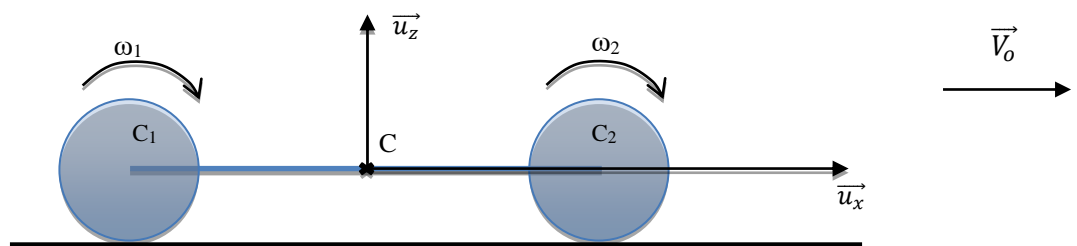
En appliquant les différentes lois de la mécanique aux différentes parties du véhicule, on va expliciter le rôle de chacun des organes :

- ce sont les frottements solides du sol sur les roues qui font avancer le véhicule
- c'est le moteur qui fournit la puissance (intérieure) nécessaire pour mettre le véhicule en mouvement

Pour débiter par une mise en équation simplifiée, on traitera d'abord le cas du véhicule tracté (sans motorisation).

## 1. Véhicule roulant sans glisser, tracté ou motorisé

### 1.1. Description du véhicule – Introduction des notations



Conformément au programme, on se limite à un véhicule en *translation rectiligne uniforme*. On note  $\vec{V}_0$  sa vitesse. On décrit le véhicule de manière simplifiée : deux roues reliées par un châssis. Tout ce que l'on dira peut facilement être généralisé à un véhicule à quatre roues. Les roues sont de rayon  $R$ . Les deux liaisons pivot sont parfaites et les roues sont équilibrées (leur centre de masse est sur l'axe de rotation). Les orientations conventionnelles de  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  et  $\vec{V}_0$  sont représentées sur le dessin.

Deux référentiels semblent intéressants pour étudier le mouvement du véhicule et de ses organes : le **référentiel terrestre  $R_t$**  que l'on considère galiléen, et le **référentiel  $R_{ch}$  lié au châssis**, en TRU dans  $R_t$  donc également galiléen.

### 1.2. Condition de non glissement

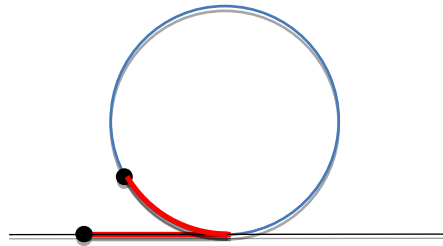
#### Définition du roulement sans glissement

Une roue roule sans glisser ssi le **point de la roue en contact avec le sol est immobile par rapport au sol.**

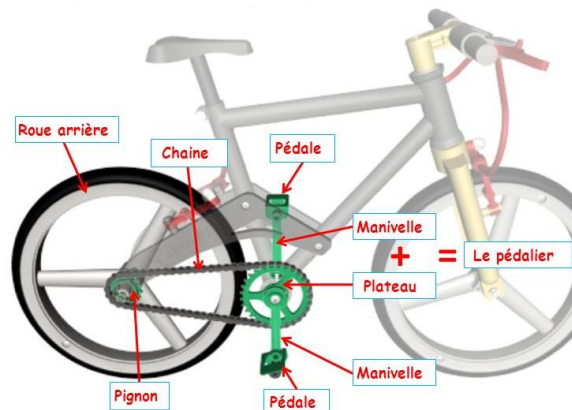
- ❖ En utilisant la loi de composition des vitesses, exprimer dans le référentiel terrestre la vitesse du point de la roue n°1 qui est en contact avec le sol, en fonction de  $V_0$ ,  $\omega_1$  et du rayon  $R$  de la roue
- ❖ En déduire la condition de non glissement (relation entre  $V_0$  et  $\omega_1$ )
- ❖ Idem pour la roue n°2

#### Comment retrouver rapidement la condition de non glissement

Sur une durée donnée, il faut que la distance horizontale parcourue par le véhicule soit égale à la partie du périmètre de la roue qui a touché le sol sur cette durée.



### 1.3. Les deux situations étudiées : véhicule tracté ou véhicule motorisé



Dans le premier cas, le véhicule est tracé par une force extérieure  $\vec{F}_{tr}$ . Elle est bien évidemment dirigée selon le vecteur vitesse  $\vec{V}_0$  qu'elle imprime au véhicule. Il n'y a pas de moteur.

Dans le second cas, le véhicule est motorisé. Le moteur exerce un couple intérieur  $\Gamma_{mot}$  sur l'axe d'une des deux roues. C'est la roue arrière d'un vélo qui subit ce couple. Pour la plupart des voitures, c'est la roue avant.

Le référentiel lié au châssis n'était intéressant que pour exprimer la condition de non glissement. Par la suite, on ne travaillera plus que dans le référentiel terrestre. Dans toute la suite, les roues roulent sans glisser.

## 2. Véhicule tracté

L'objectif est ici de calculer la force de traction nécessaire pour faire avancer le véhicule à une vitesse  $V_0$  donnée.

### 2.1. Application au véhicule du Théorème de la quantité de mouvement

- ❖ Appliquer le TQM au véhicule dans le référentiel terrestre, en tenant compte des frottements fluides exercés par l'air sur le véhicule
- ❖ Projeter sur la BOND du repère cartésien

Selon la direction horizontale, les forces de frottements s'appliquant sur les roues sont des inconnues du mouvement. En étudiant spécifiquement les roues, on devrait pouvoir obtenir d'autres équations permettant de déterminer ces deux inconnues. Les roues étant en rotation autour d'axes fixes (direction constante), il est naturel de penser au TMC.

### 2.2. Application aux roues du Théorème du moment cinétique

On note  $J_1$  et  $J_2$  les moments d'inertie de chacun des roues. Ils sont supposés connus.

- ❖ Appliquer le TMC à la roue 1 puis la roue 2 dans le référentiel du châssis, et en déduire les forces de frottements du sol sur les roues
- ❖ En déduire :
  - pourquoi il faut constamment exercer une force de traction pour faire avancer le véhicule
  - ce qui fixe la valeur de la force de traction nécessaire
  - si l'on double la vitesse, comment évolue la puissance apportée par la force de traction ?

## 3. Véhicule motorisé

L'objectif est ici d'explicitier les forces qui font avancer le véhicule, puis d'explicitier le rôle du moteur. On peut s'imaginer le cas concret d'un vélo, mais le raisonnement est similaire pour tout véhicule à roues.

### 3.1. TQM et TMC

Le TQM est identique à celui écrit précédemment, à la force de traction près. Le TMC pour la roue 2 est le même que précédemment. Celui sur la roue 1 nécessite d'introduire le couple exercé par le moteur  $\Gamma_m > 0$ .

- ❖ En déduire l'expression du couple nécessaire pour faire avancer le véhicule à la vitesse  $V_0$
- ❖ Explicitier la ou les forces extérieures faisant avancer le véhicule

Pour faire directement le lien entre le moteur et le véhicule (sans passer par l'intermédiaire des roues), il faut utiliser le TEC, seul théorème où apparaissent les actions intérieures.

### 3.2. Théorème de l'énergie cinétique

#### *TEC appliqué à un système de solides*

L'énergie cinétique est une grandeur extensive, ainsi  $E_{ctot} = \sum E_{cparties}$

$$\frac{dE_c}{dt} = P_{int} + P_{ext}$$

avec  $P \stackrel{\text{def}}{=} \vec{F} \cdot \vec{v} + \Gamma \omega$

- ❖ Faire le bilan des actions (forces et moments) intérieures et extérieures
- ❖ Appliquer le TEC au véhicule

- ❖ En déduire la puissance que doit apporter le moteur pour que le véhicule avance à la vitesse  $V_0$ . Vérifier que c'est cohérent avec l'expression du couple moteur établie précédemment
- ❖ Comment augmenter la puissance délivrée par le moteur pour doubler la vitesse du véhicule ?

### 3.3. Ordres de grandeur

La puissance d'un véhicule est exprimée en chevaux ( ch ) ;

Cette unité de mesure représente la puissance d'un cheval qui tire une force équivalente à 75 kg au pas (vitesse d'un mètre par seconde) ; on a donc l'équivalence : 1 ch = 736 W.

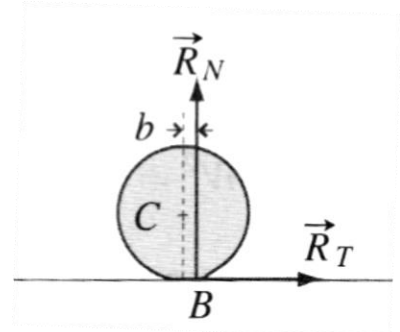
Une voiture moyenne développe une puissance de 150 ch.

### 3.4. (Culturel HP) Déformation des roues : frottements de roulement

La batterie d'une voiture est à plat, et on la pousse pour essayer de la faire démarrer. Si l'on arrête de pousser, la voiture s'arrête quasi instantanément, alors que les forces de frottements fluides sont extrêmement faibles.

Idem dans le cas d'un vtt aux pneus dégonflés : plus ils sont dégonflés plus il est difficile d'avancer avec sur route.

C'est parce qu'il existe une autre source de frottements, prépondérante dans cette situation : ce sont les frottements de roulement. Pour les modéliser, il faut tenir compte de l'aplatissement de la roue : le contact au sol n'est plus ponctuel, mais étendu. Il s'avère que la réaction normale du sol sur la roue ne passe alors plus par l'axe de rotation, et exerce un couple résistant.



## 4. Exemple : influence du braqué en vélo

Dans cet exemple, il s'agit de comprendre le principe de la transmission des efforts (forces et couples) par un système de chaîne et de roues dentées.



On considère un cycliste sur un vélo (masse totale  $M$ ) grimpant une pente faisant un angle  $\alpha$  avec l'horizontale à vitesse  $\vec{V} = V \cdot \vec{u}_x$  constante. Les roues roulent sans glissement, le coefficient de frottement statique entre roues et sol étant  $f_0$ . Les liaisons pivots des roues sont parfaites.

Le cycliste exerce sur les pédales un couple  $\Gamma_c$ . Les roues sont de rayons  $R$ . Le plateau du vélo comporte 42 dents, le pignon 21 dents (le rayon de ce dernier est deux fois plus petit). On dit que le braqué est de 2. Le pignon est solidaire de la roue arrière.

On appelle « partie supérieure de la chaîne » la zone visualisée sur la photo ci-dessus, située entre le pignon et le plateau. Par construction, seule cette partie de la chaîne est tendue. Aucun des autres maillons de la chaîne n'exerce de tension sur ses voisins. On négligera le poids des maillons de la chaîne dans les calculs.

En particulier, le premier maillon en contact avec le plateau (entouré en rouge sur la droite de la photo) interagit avec son voisin de gauche. Les autres maillons en contact avec le plateau ne sont pas tendus.

De manière identique, le premier maillon en contact avec le pignon (entouré en vert sur la gauche de la photo) interagit avec son voisin de droite. Les autres chaînons en contact avec les pignons ne sont pas tendus.

- ❖ A quelle vitesse angulaire tourne les deux roues ?
- ❖ Expliquer pourquoi le pignon tourne deux fois plus vite que le plateau

### Transmission de la force du plateau vers le pignon arrière via la chaîne

- ❖ Dans le référentiel lié au vélo, appliquer le TQM à la partie supérieure de la chaîne (auparavant, on expliquera pourquoi l'accélération de ce système est nulle)

### Transmission du couple du plateau vers le pignon arrière via la chaîne

- ❖ Dans le référentiel lié au vélo, appliquer le TMC au plateau
- ❖ En déduire le couple exercée par la chaîne sur la roue arrière

### Influence du braqué sur le couple exercé par les jambes sur le plateau, et la vitesse de rotation du plateau

- ❖ En appliquant le TQM au système {vélo + cycliste}, ainsi que le TMC à chacune des roues du vélo, expliquer pourquoi une diminution du braqué fait diminuer le couple  $\Gamma_c$  à exercer sur les pédales (la vitesse du vélo restant la même)
- ❖ Expliquer l'intérêt de l'utilisation conjointe du petit plateau et du grand pignon pour gravir une côte à vélo
- ❖ Expliquer l'intérêt de l'utilisation conjointe du grand plateau et du petit pignon sur le plat ou en descente

### Conservation de la puissance dans la chaîne de transmission

- ❖ Exprimer la puissance fournie par le cycliste au plateau. Exprimer la puissance fournie au pignon par la chaîne. Interpréter physiquement le résultat.

- ⊛ Les réactions normales  $N_{avant}$  et  $N_{arriere}$  de la route sur les roues vérifient (admis):

$$N_{avant} - N_{arriere} = \Gamma_c/a$$

où  $a$  est la distance horizontale entre le centre de masse du système {cycliste+vélo} et l'axe de la roue arrière (ou de la roue avant, distances supposés égales).

Quel est le couple maximal que le cycliste peut appliquer avant que la roue arrière ne glisse ?

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.3 Approche descriptive du fonctionnement d'un véhicule à roues.</b>	
Mouvement rectiligne uniforme d'un véhicule à roues dans un référentiel galiléen en l'absence de glissement : a) véhicule tracté par une force extérieure $F$ b) véhicule muni de roues motrices.	Exprimer la condition de non-glissement des roues.  Appliquer la loi de la quantité de mouvement et la loi de l'énergie cinétique au véhicule. Appliquer la loi du moment cinétique aux roues dans le référentiel du véhicule.  Expliquer qualitativement les rôles respectifs du moteur et des actions de contact exercées par la route selon qu'on envisage un bilan énergétique global ou un bilan de quantité de mouvement global.