

LES LOIS DE NEWTON

1. PREMIERE LOI DE NEWTON: LE PRINCIPE D'INERTIE.

1.1. ENONCE DU PRINCIPE D'INERTIE VU EN 2^{de}.

Dans un référentiel terrestre, un corps isolé (soumis à aucune force) ou pseudo-isolé (soumis à des forces mais qui se compensent) reste:

- soit immobile (si sa vitesse initiale est nulle);
- soit en mouvement de translation rectiligne uniforme (si sa vitesse initiale est différente de zéro).

Remarque.

Le principe est également vrai dans le référentiel géocentrique.

1.2. IMPORTANCE DU REFERENTIEL.

Une nouvelle notion importante est à apporter par rapport au programme de 2^{de}. **Le principe d'inertie n'est pas valable dans tous les référentiels.** Nous nous sommes contentés l'année dernière d'étudier certains mouvements dont les dimensions permettaient de porter l'étude dans deux référentiels particuliers: les référentiels terrestres et géocentriques.

Approche expérimentale.



La description d'un mouvement dépend du référentiel. Si on considère l'expérience faite en classe de 2^{de}, d'un mobile sur coussin d'air, mais réalisée dans une fête foraine:

- Pour un observateur lié au manège tournant, le centre d'inertie du mobile a un mouvement complexe.
- Pour un observateur debout au bord du manège, le centre d'inertie du mobile a un mouvement rectiligne uniforme.

Dans les deux cas, les forces agissant sur le mobile ont une somme nulle, mais le centre d'inertie n'a pas un mouvement rectiligne uniforme dans le cas d'un référentiel lié au manège. Le principe d'inertie est mis en défaut.

Les référentiels dans lesquels le principe d'inertie s'applique sont dits **galiléens**.

Définition:

On appelle **référentiels galiléens**, les référentiels dans lesquels le centre d'inertie d'un solide soumis à des forces de somme nulle a un mouvement rectiligne uniforme. L'expérience montre qu'un référentiel de Copernic (ou héliocentrique) est un excellent référentiel Galiléen: jusqu'à ce jour tous les résultats donnés par le théorème de l'inertie sont en accord avec l'expérience.... Par exemple, les mouvements des planètes et des sondes interplanétaires peuvent être décrits avec une grande précision dans ce repère.

Remarque (Hors programme)

Un référentiel animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport à un référentiel galiléen est lui-même un référentiel galiléen.

Exemples.

Le référentiel terrestre, rigoureusement, ne peut être considéré comme galiléen car par rapport à un référentiel galiléen, la Terre n'est pas en mouvement de translation rectiligne uniforme, puisqu'en perpétuelle rotation sur elle-même et autour du Soleil. Mais pour des expériences de courte durée devant la période de rotation de la Terre autour de son axe, on considère le référentiel terrestre comme galiléen.

Le principe d'inertie

Le **principe d'inertie** a été énoncé au XVI^e siècle par **Galilée**; citons le texte de son ouvrage "**Deux nouvelles sciences**".

"Une vitesse quelconque imposée à un corps se conserve rigoureusement aussi longtemps que les causes d'accélération ou de ralentissement sont écartées, condition qui se réalise seulement dans le plan horizontal; car, dans les plans déclives (c'est-à-dire en pente), il existe déjà une cause d'accélération tandis que dans les plans qui vont en montant, il existe une cause de ralentissement. D'où il suit que le mouvement sur le plan horizontal est perpétuel..."

Notez que dans cet énoncé, on considère implicitement les frottements comme nuls ou négligeables.

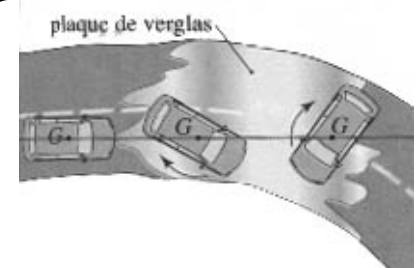
Le principe d'inertie est repris et précisé par **Newton** dans ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*; le texte original peut être traduit de la manière suivante:

"Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état" (c'est-à-dire changer de mouvement).

Il faut comprendre la différence entre les idées de Galilée et Newton, d'une part, et celles d'Aristote, d'autre part, qui ont fait autorité pendant environ 2 000 ans. On peut citer une phrase typique des Mécaniques d'Aristote:

"Un corps en mouvement s'arrête quand la force qui le pousse ne peut plus agir de façon à le pousser."

On voit que pour Aristote, un corps ne peut être en mouvement que si une force s'applique sur lui; c'est assurément une erreur fondamentale.



Une conséquence désagréable du principe d'inertie: sur une plaque de verglas, le centre d'inertie d'une automobile a un mouvement rectiligne uniforme quelles que soient les manoeuvres du conducteur et le véhicule ne peut prendre le virage.

1.3. ENONCE DU PRINCIPE D'INERTIE.

Dans un référentiel galiléen, un corps isolé (soumis à aucune force) ou pseudo-isolé (soumis à des forces mais qui se compensent) reste:

- soit immobile (si sa vitesse initiale est nulle);
- soit en mouvement de translation rectiligne uniforme (si sa vitesse initiale est différente de zéro).

Réciproquement, dans un référentiel galiléen, si le centre d'inertie d'un solide a un mouvement de translation rectiligne uniforme ($\vec{v}_G = \vec{cste}$), alors la somme des forces qui s'exercent sur ce solide est nulle ($\vec{F} = \sum \vec{f} = \vec{0}$).

Remarque (Hors programme).

La première loi de Newton a une limite: elle permet de connaître le mouvement du centre d'inertie d'un mobile isolé ou pseudo-isolé mais elle ne donne aucune indication sur le mouvement des autres points du mobile.

Solide isolé ou pseudo-isolé.

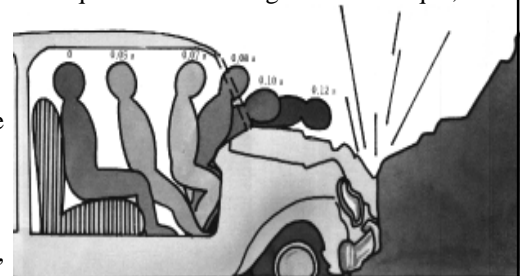
Un solide qui ne subirait aucune force est un solide isolé.. En fait , un solide situé dans l'environnement terrestre est toujours soumis au moins à son poids. Un objet situé dans l'espace est attiré par les astres qui l'entourent. Le cas d'un système isolé est donc un cas idéal.

POURQUOI UNE CEINTURE DE SECURITE ?

Lorsque la voiture freine, le principe d'inertie ne s'applique pas dans le référentiel associé au véhicule. Par contre, dans le référentiel terrestre de la route, on constate que le mouvement du passager serait toujours rectiligne uniforme lors du freinage si la ceinture de sécurité n'empêchait pas le corps du passager de partir en avant.

Au cours d'un freinage brutal, ou pire, lors d'un choc contre un obstacle, le véhicule perd brusquement de l'énergie dite cinétique, liée à son mouvement, et s'arrête.

Les passagers, eux, ne sont pas freinés s'ils ne sont pas attachés à la voiture: ils conservent leur énergie liée à leur mouvement et continuent donc à se déplacer vers l'avant. Il s'écrase contre le pare-brise avec une vitesse presque égale à celle du véhicule avant le choc.



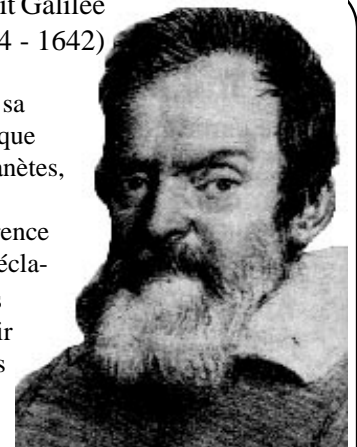
Un choc à 50 km.h⁻¹ équivaut à une chute du haut d'un immeuble de 4 étages.

La ceinture de sécurité, en liant les passagers à leur siège, les rend solidaires de la voiture et les empêche donc de passer à travers le pare-brise lorsque le véhicule s'arrête brusquement, mais n'écarte pas tout danger !

Même si la carrosserie est déformable, donc l'habitacle perd sa vitesse de façon progressive, le siège suit le mouvement du pare-chocs et atteint la vitesse nulle en un temps très court. A 40 km.h⁻¹, même si la ceinture se distend de quelques centimètres, retardant d'autant l'immobilisation du passager, la force qui s'exerce alors sur le thorax est une force de l'ordre de 10⁴ N !

Né à Pise, ce fils de musicien a abandonné ses études de médecine pour les mathématiques et la technique. Fabriquant des instruments dans son laboratoire de l'Université de Padoue pour arrondir ses fins de mois, il perfectionne une lunette astronomique (qui portera son nom) venue de Hollande et observe le ciel toutes les nuits. Voyant, dans sa lunette, des montagnes sur la Lune, les satellites de Jupiter et des taches sur le Soleil - alors qu'à l'époque les corps célestes sont supposés parfaitement sphériques - , il se rallie aux théories de Copernic (les planètes, tournent autour du Soleil) et invite ses collègues à se rendre compte par eux-mêmes de la fausseté des affirmations soutenues par l'Eglise. Mais il commet l'erreur de quitter Padoue, ville libérale, pour Florence où les jésuites s'emploient à le faire condamner par l'Inquisition. Il est contraint, sous la menace, de déclarer que la Terre ne tourne pas autour du Soleil, mais

Galileo Galiléi dit Galilée
(1564 - 1642)



continua à les défendre «sous le manteau», pour finir ses jours en résidence surveillée dans sa maison près de Florence, où il meurt aveugle. On raconte qu'il prononça alors, à voix basse, la phrase célèbre: E pur, si muove (Et pourtant, elle tourne). La Terre tourne autour du Soleil !! Il étudiera également les oscillations du pendule (avec un long pendule suspendu au sommet du Dôme de Pise) et la chute des corps (en lâchant des corps du haut de la célèbre tour penchée de Pise). Il construisit l'un des premiers microscopes.

Il est rassurant de savoir que Galilée était aussi capable de commettre des erreurs. alors que sa théorie des marées, à laquelle il était très attaché, ne tenait pas la route, il s'étonne que Kepler (auteur, lui, d'une théorie faisant justement intervenir l'attraction de la Lune) «accorde à la lune un tel pouvoir sur l'eau, et autres gamineries...»! Nul n'est parfait. Les marées ont été expliquées, un peu plus tard, par la théorie de Newton; elles sont dues aux attractions combinées de la Lune et du Soleil sur les eaux océaniques.

Galilée étudiant le mouvement d'une bille sur un plan incliné.

2. LA DEUXIEME LOI DE NEWTON.

2.1. APPROCHE EXPERIMENTALE.

Dispositif.

A l'aide d'une webcam, on enregistre le mouvement d'une balle de golf lancée dans un plan frontal, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire à l'axe de la visée de la caméra. A l'aide du logiciel AVIMECA, on fait défiler l'enregistrement image par image et on pointe le centre de la balle pour chaque image. La trajectoire du centre de la balle est alors imprimée.

Bilan des forces.

Pendant la chute, la seule force agissant sur la balle est son poids de direction verticale et de sens vers le bas (la résistance de l'air peut-être négligée).

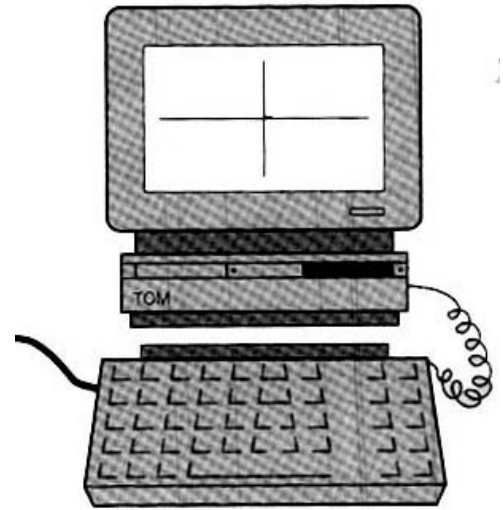
Conclusion.

On constate, aux erreurs de construction près, que $\Delta \vec{v}_G$ est vertical et de sens vers le bas et \vec{p} et \vec{v}_G ont donc même direction et même sens.

Lorsque les forces agissant sur un solide se compensent, nous avons vu que le centre d'inertie de ce solide est animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme dans un référentiel galiléen.

Si les forces ne se compensent plus, c'est-à-dire leur résultante \vec{F}_R n'est pas nulle, Newton énonce que le changement de mouvement, c'est-à-dire la variation de vitesse entre deux instants, s'effectue dans la direction de la résultante des forces.

La variation $\Delta \vec{v}_G$, entre deux instants, du vecteur vitesse \vec{v}_G et la résultante \vec{F}_R des forces, ont la même direction et le même sens.



ordinateur

Pour aller plus loin.

L'étude informatique permet de calculer: - les coordonnées V_x et V_z du vecteur vitesse du centre d'inertie de la balle; - puis ΔV_x et ΔV_z entre deux dates très proches.

Les documents joints montrent l'évolution: - de V_x et ΔV_x en fonction du temps - de V_z et ΔV_z en fonction du temps.

Ces graphes doivent être interprétés en tenant compte des imprécisions liées à la méthode utilisée.

On constate: - ΔV_x est négligeable devant V_x qui ne varie pratiquement pas, soit $\Delta V_x = 0$. - en revanche ΔV_z varie.

De positive quand la balle monte, elle devient négative quand elle descend. Sa variation ΔV_z entre deux instants est non nulle, négative et quasiment constante. $\Delta \vec{v}_G$ est donc un vecteur vertical, dirigé vers le bas. Il a même direction et même sens que le poids.

2.2. ENONCE DE LA DEUXIEME LOI DE NEWTON

En attendant d'être complété en classe de Terminale, on retiendra l'énoncé suivant:

Dans un référentiel Galiléen, si le vecteur \vec{v}_G du centre d'inertie varie, la somme des forces extérieures ($\vec{F} = \sum \vec{f}_{ext}$) qui s'exercent sur le solide n'est pas nulle.

La direction et le sens de \vec{F} sont ceux de la variation $\Delta \vec{v}_G$ du vecteur \vec{v}_G du centre d'inertie du solide, entre deux instants très proches.

3. TROISIEME LOI DE NEWTON.

3.1. ENONCE DU PRINCIPE D'INTERACTION.

Enoncé.

Lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}_{A/B}$ alors le corps B exerce sur le corps A une action mécanique modélisée par la force $\vec{F}_{B/A}$.

Ces deux forces, qui constituent l'interaction, ont, quel que soit l'état de mouvement de A par rapport à B:

- la même droite d'action;
- des sens opposés;
- la même valeur $F_{A/B} = F_{B/A}$.

Exemple.

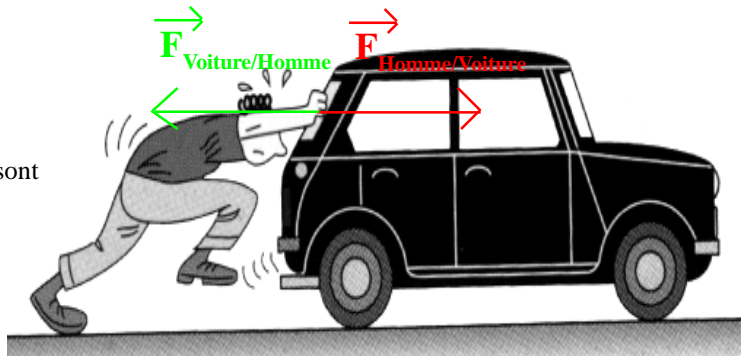
L'homme exerce sur la voiture une force directement opposée à celle exercée par la voiture sur l'homme: ces deux forces d'interaction sont directement opposées.

En astronomie, on parlera d'interaction gravitationnelle. Si la Terre attire la Lune, alors la Lune attire la Terre telle que $\vec{F}_{T/L} = -\vec{F}_{L/T}$.

Remarque (hors programme).

Une expression plus complète de la troisième loi doit prendre en considération les moments des forces.

De plus, on évitera l'emploi de l'expression "loi de l'action et de la réaction" qui peut introduire l'idée fautive d'une "réaction" causée par une "action" et lui faisant suite temporellement.



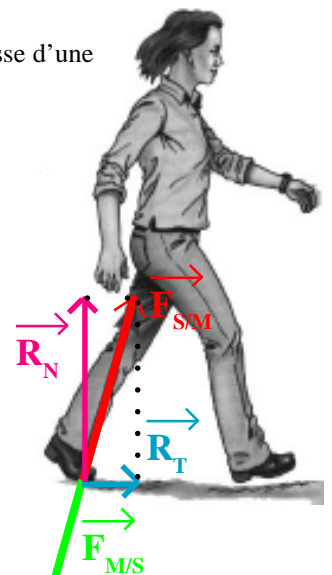
3.2. APPLICATIONS A LA PROPULSION ET AU FREINAGE.

3.2.1. MARCHE ET FROTTEMENT.

Le pied du marcheur (M) s'appuie sur le sol (S) vers le bas et vers l'arrière: il exerce une force $\vec{F}_{M/S}$. Le sol exerce sur le marcheur la force $\vec{F}_{S/M}$ directement opposée.

Si on néglige l'action de l'air, le marcheur est soumis à son poids p et à la force R exercée par le sol, dirigée vers le haut et l'avant. Celle-ci présente donc deux composantes:

- la composante \vec{R}_N empêche le pied de s'enfoncer dans le sol;
- la composante \vec{R}_T qui est dans le sens du mouvement propulse le marcheur vers l'avant. Cette composante n'existe que si les surfaces en contact sont rugueuses: les forces de frottement servent à la propulsion du marcheur.



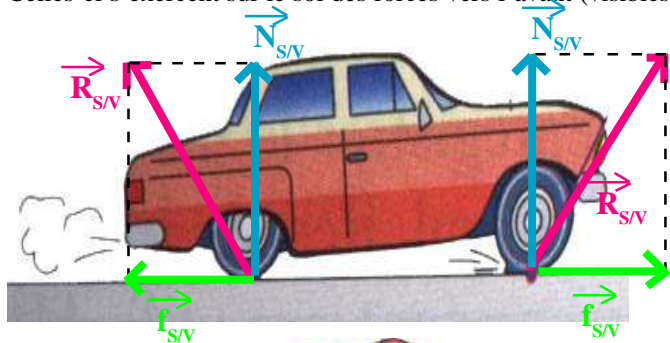
3.2.1. VEHICULE AU DEMARRAGE.

Il faut distinguer les roues motrices, des roues non-motrices:

Les roues motrices.

Lorsque le véhicule démarre, l'action du moteur produit la rotation des roues motrices.

Celles-ci s'exercent sur le sol des forces vers l'avant (visibles parfois aux gravillons projetés par le véhicule).



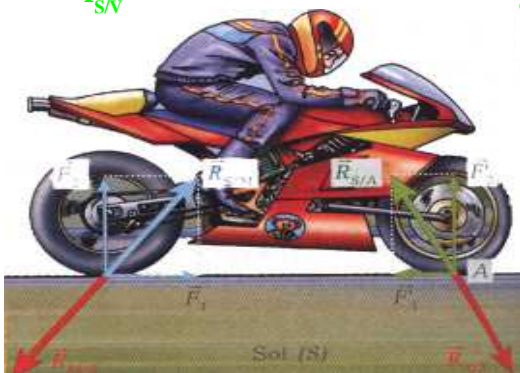
D'après le principe des actions réciproques, le sol exerce simultanément une force opposée, vers l'avant du véhicule. Cette force peut être décomposée:

- une composante $N_{S/V}$ qui empêche la voiture de s'enfoncer dans le sol;
- la composante $R_{S/V}$ qui est dans le sens du mouvement propulse la voiture vers l'avant. Cette composante n'existe que si les surfaces en contact sont rugueuses: les forces de frottement servent à la propulsion de la voiture.

Les roues non motrices.

Les roues arrière non motrices exercent sur le sol une force $F_{A/S}$ dirigée vers l'avant et donc le sol exerce une force $R_{S/V}$ dirigée en sens contraire sur la roue. Il est commode de décomposer les actions du sol sur les roues:

- une composante $N_{S/V}$ qui empêche toujours la voiture de s'enfoncer dans le sol;
- la composante $R_{S/V}$ qui est dans le sens contraire du mouvement ralentit la voiture: les forces de frottement sont "négatifs" car ils ralentissent la voiture..... d'où l'intérêt des voitures à 4 roues motrices.

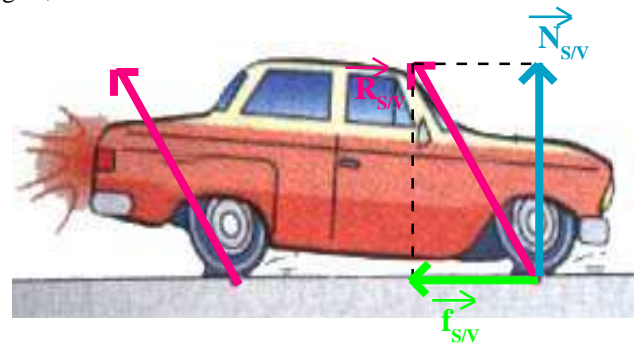


Remarque. (hors programme).

Si les roues reposent sur un sol parfaitement glissant comme une plaque de verglas, elles ne subissent aucune force de frottement de la part du sol.

La roue motrice tourne "sur place": le centre d'inertie de la moto est immobile et la roue non motrice ne tourne pas.

Par conséquent, l'étude n'est valable que si la roue motrice adhère au sol (ce qui provoque l'usure pneumatique). Elle n'est plus valable peu de temps après le démarrage, quand les roues roulent sans "gripper" au sol.



3.2.3. VEHICULE AU FREINAGE.

Lorsque le véhicule freine, la résultante des forces de frottement exercée par le sol sur les pneus est opposée au déplacement et ralentit le véhicule.

3.2.4. CONCLUSION.

Il est intéressant de remarquer que la résultante des forces de frottements s'exerçant sur un mobile peut être:

- dans le même sens que le mouvement (propulsion);
- dans un sens opposé à la vitesse du mobile (freinage), comportement moins paradoxal.

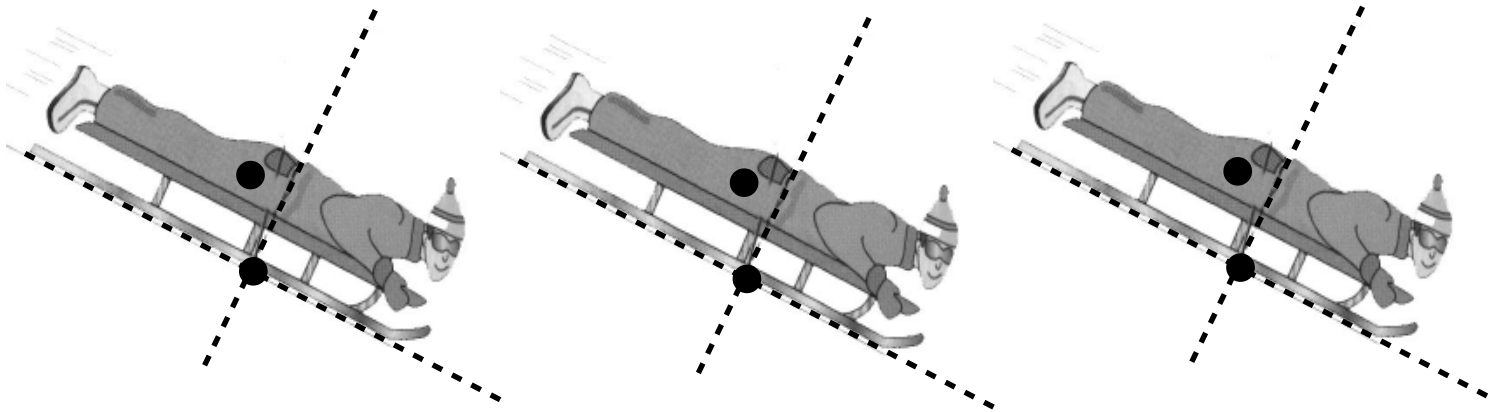
Une force de frottement ne s'oppose pas toujours au mouvement !!! dans de nombreux cas, elles en sont la cause.

4. POUR CONCLURE.

Les deux premières lois de Newton s'expriment mathématiquement de la façon synthétique suivante.

Soit $\vec{F} = \sum \vec{f}_{\text{ext}}$ la somme des forces agissant sur un solide et $\Delta\vec{V}_G$ la variation du vecteur vitesse de son centre d'inertie entre deux instants proches:

● **Principe d'inertie:** $\vec{F} = \sum \vec{f}_{\text{ext}} = \vec{0} \iff \Delta\vec{V}_G = \vec{0}$



● **Deuxième loi d'inertie:** $\vec{F} = \sum \vec{f}_{\text{ext}} \neq \vec{0} \iff \Delta\vec{V}_G$ colinéaire à \vec{F} et de même sens.

Selon la théorie élaborée par Newton, les notions de vitesse et de force ne sont pas directement liées: dans un référentiel galiléen, un solide peut ainsi avoir une vitesse très grande, alors que la somme des forces extérieures qui agissent sur lui est nulle.

Les lois de Newton relient les forces aux changements de la vitesse et pas la valeur de la vitesse elle-même.