Moteur Physique pour les jeux vidéo

$5^{ème}$ GamiX

Chapitre 2 : Mouvements dans les mondes réel et virtuels

Partie 2 : Corps rigides

2025 – 2026

AHMED AMMAR

Compétences attendues

- Être capable de **simuler** le mouvement d'un objet rigide indéformable dans le monde virtuel.

Prérequis

- Notions de base de cinématique.
- Notions de base de dynamique.

Problématique

- Quelles différences dans la description du mouvement d’un point matériel et d’un corps rigide indéformable ?

- Quelles sont les règles qui régissent le mouvement d’un corps rigide indéformable?

- Comment transposer tout cela dans le monde virtuel ?

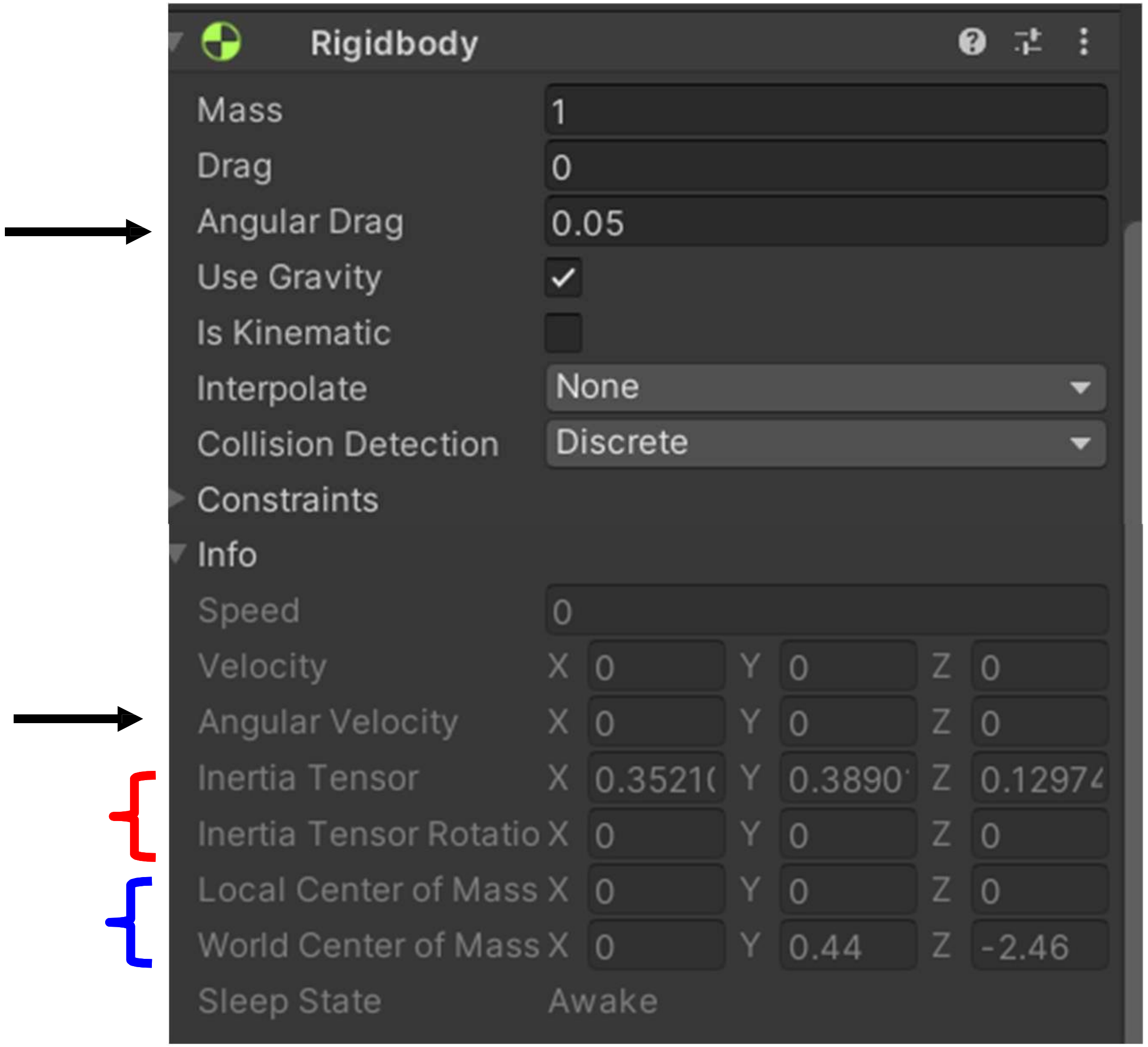
Problématique

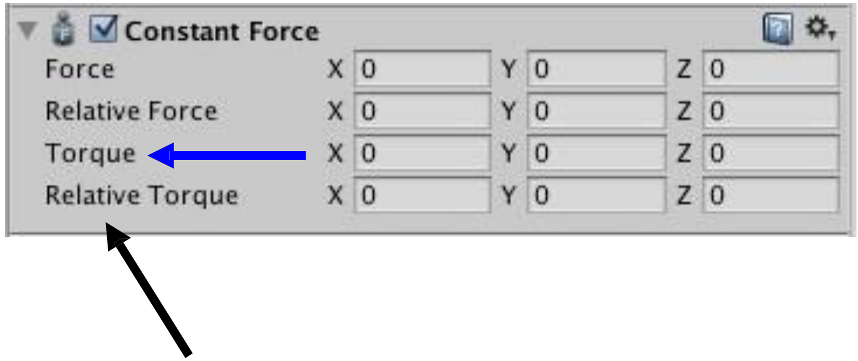
- Corp rigide indéformable: Objet pour lequel les distances « inter-points » ne changent pas !

?

Généraliser l'approche pour un point matériel à N points matériels ?

Dans PhysX

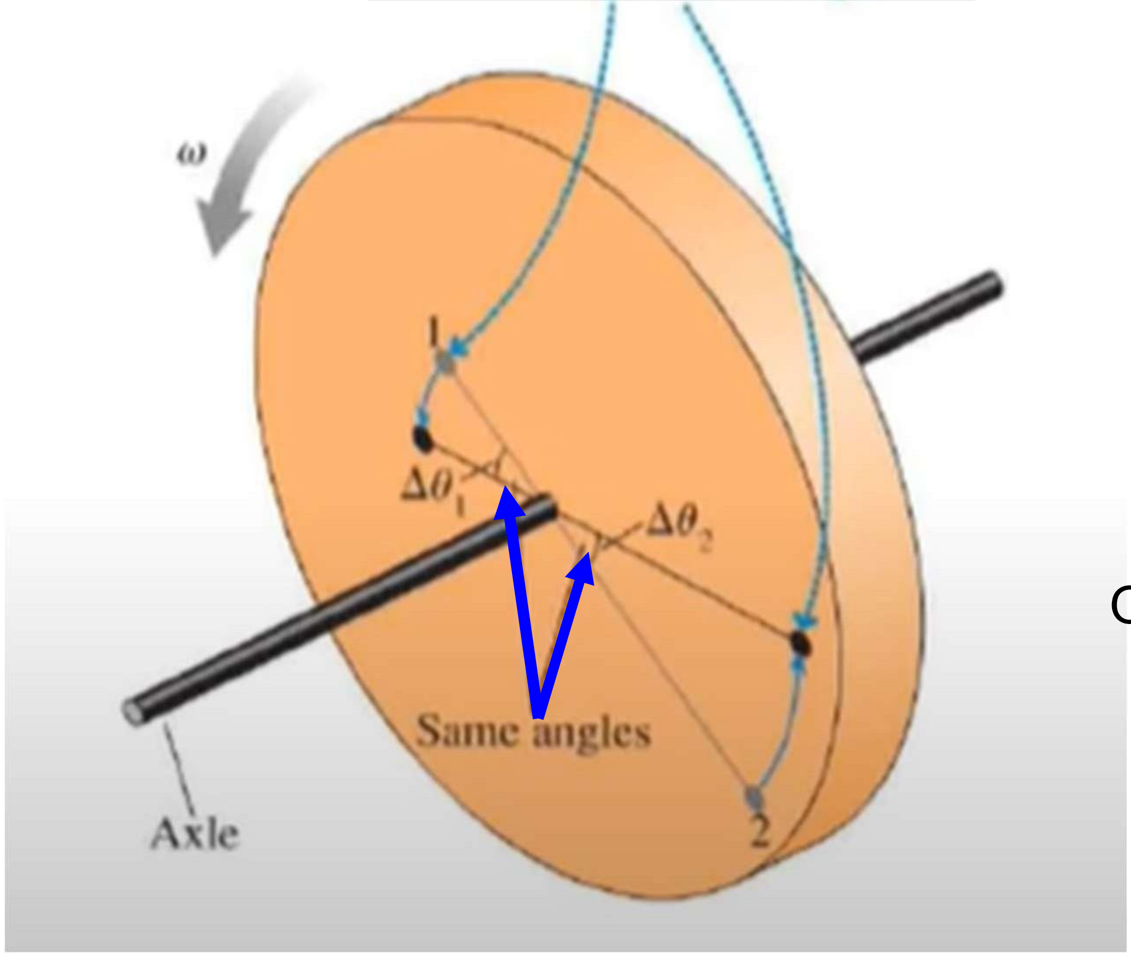

Rigidbody
Mass 1
Drag 0
Angular Drag 0.05
Use Gravity
Is Kinematic
Interpolate None
Collision Detection Discrete
Constraints
Info
Speed 0
Velocity X 0 Y 0 Z 0
Angular Velocity X 0 Y 0 Z 0
Inertia Tensor X 0.3521(Y 0.3890' Z 0.12974
Inertia Tensor Rotatio X 0 Y 0 Z 0
Local Center of Mass X 0 Y 0 Z 0
World Center of Mass X 0 Y 0.44 Z -2.46
Sleep State Awake


Constant Force
Force X 0 Y 0 Z 0
Relative Force X 0 Y 0 Z 0
Torque X 0 Y 0 Z 0
Relative Torque X 0 Y 0 Z 0

Vitesse et vitesse angulaire

Vitesse et vitesse angulaire

N'importe quel point de la roue tourne avec la même vitesse angulaire $\vec{\omega}$



La roue tourne avec une vitesse angulaire $\vec{\omega}$

Variation de l'angle θ par unité de temps (rad/seconde)

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Même variation d'angle donc **même vitesse angulaire**

On a : $V = \omega . r$

vitesse

Distance à l'axe de rotation

Même vitesse angulaire mais vitesses différentes !

Accélération et accélération angulaire

- On a également:

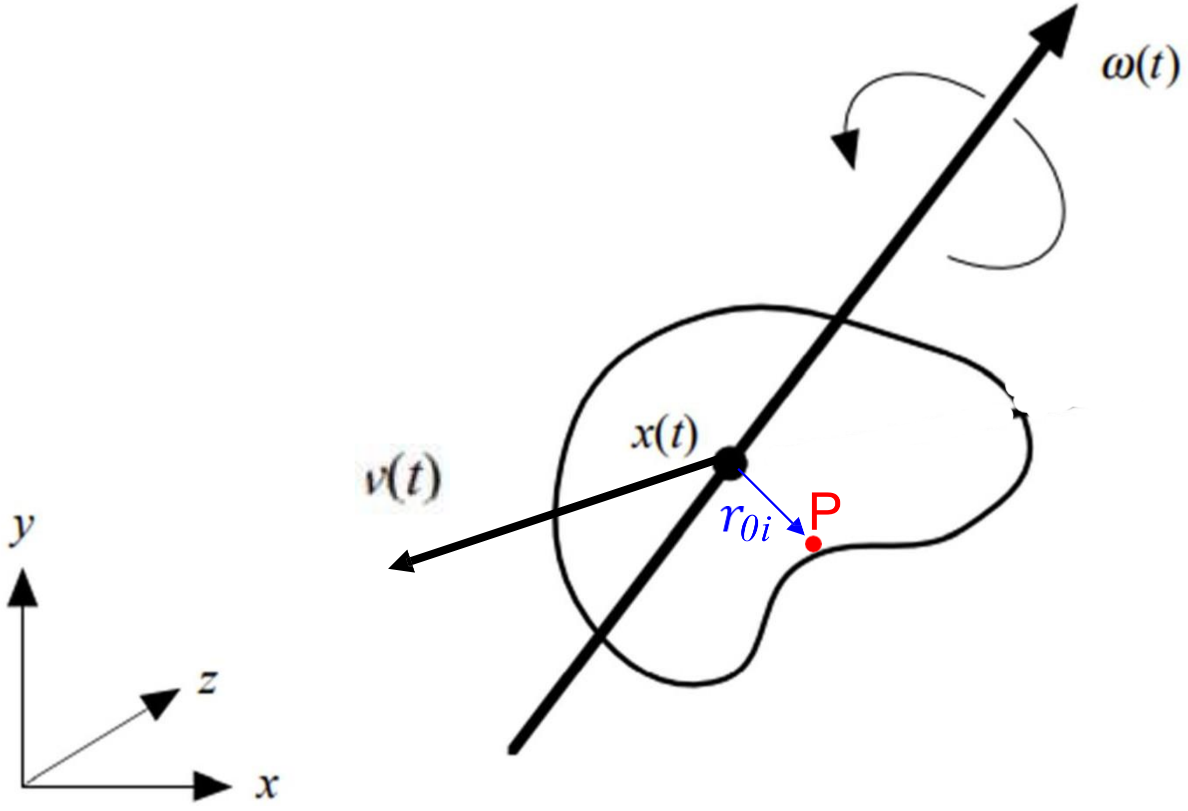
$$\boxed{a_{cc} = \omega^2 . r}$$

L'accélération « linéaire » de P

$$\boxed{\alpha = \frac{d\omega}{dt}}$$

L'accélération angulaire de P

Généralisation

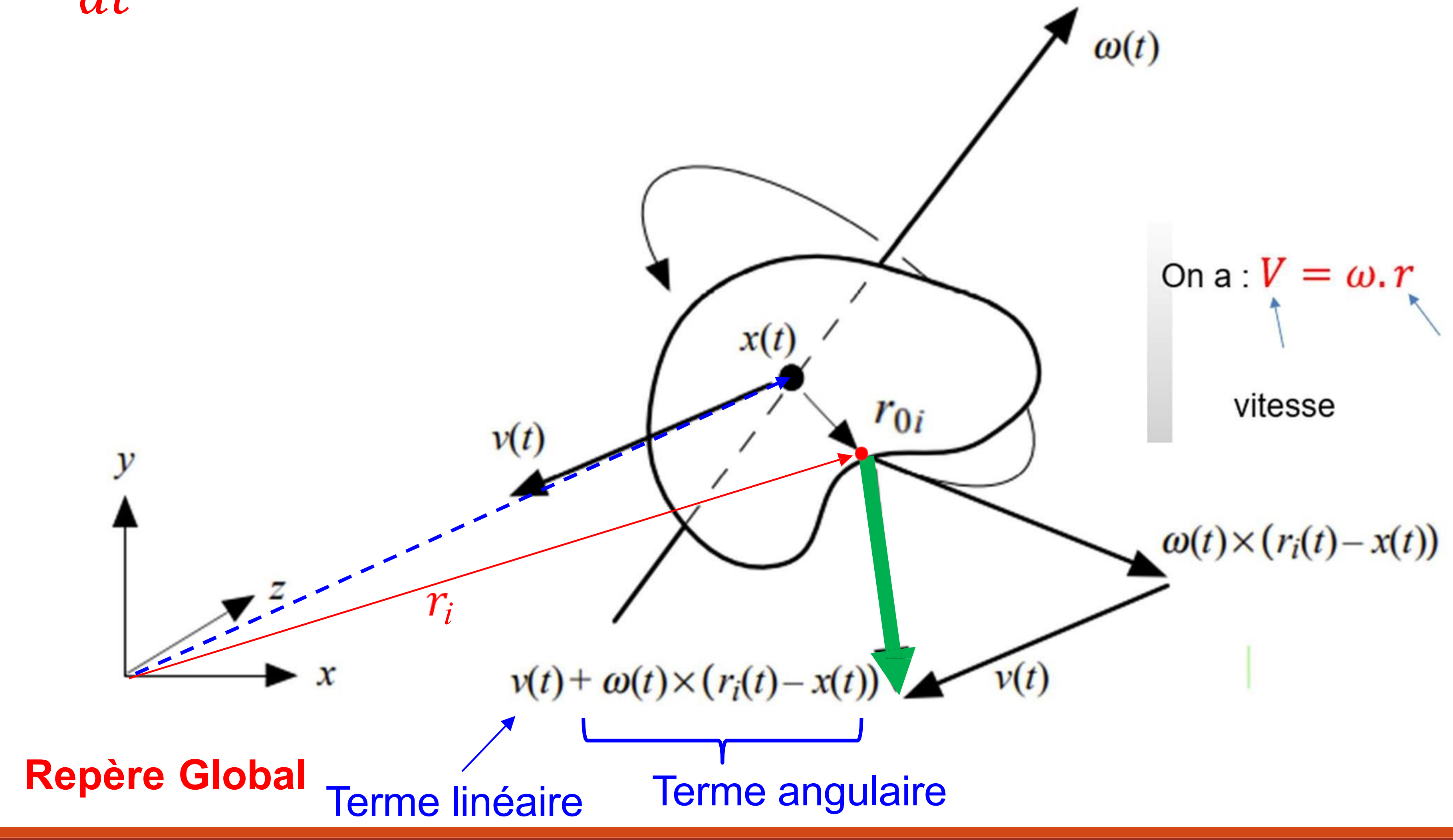


Repère Global

$$\frac{d\overrightarrow{r_i}}{dt} = ?$$

Généralisation

$$\frac{d\vec{r_i}}{dt} = \overrightarrow{v(t)} + \overrightarrow{\omega(t)} \times (\overrightarrow{r_i(t)} - \overrightarrow{x(t)})$$



On a : $V = \omega.r$

vitesse

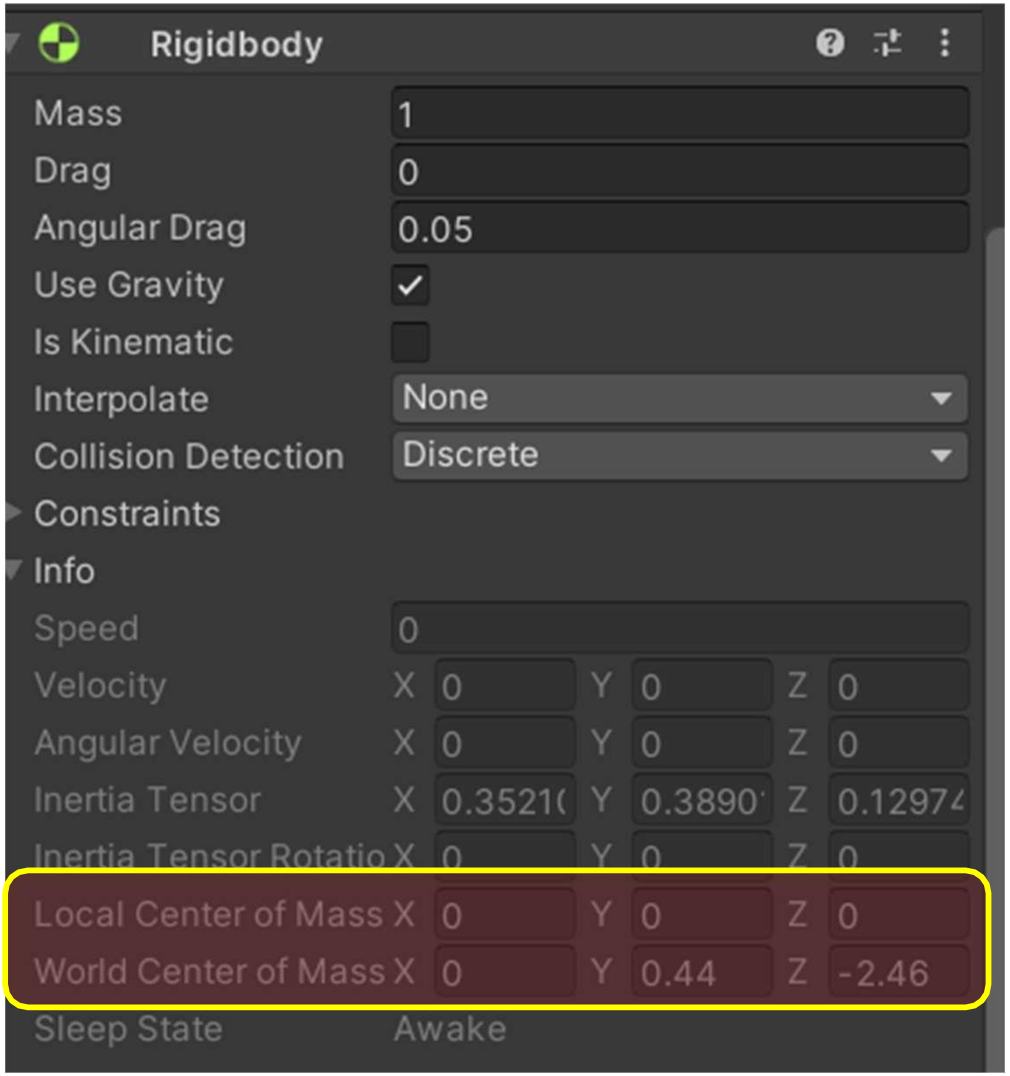
Distance à l'axe de rotation

Définitions

- Quantité de mouvement: Pour un point matériel, il s'agit du produit de sa masse par son vecteur vitesse ($\vec{p}_M = m.\overrightarrow{v_M}$).

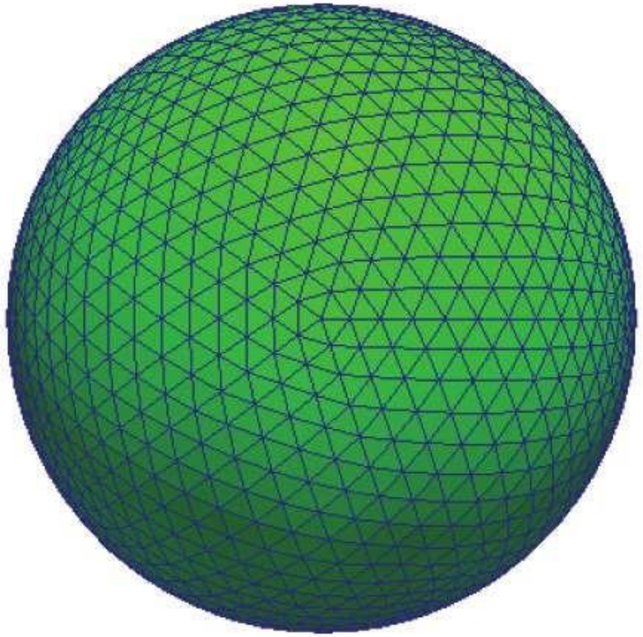
- Barycentre (centre de masse): Point particulier du solide pour lequel la masse est répartie de la même façon dans n'importe quelle direction.

Centre de masse



Centre de masse

La masse est répartie d'une façon homogène ?



S'il s'agit d'un alliage ?

S'il y a une cavité à l'intérieur?

Comment calculer la quantité de mouvement ?

Quantité de Mouvement

La quantité de mouvement d'un point M, de masse m, animé d'une vitesse $\vec{v}_M$ est donnée par :

$$\vec{p}_M = m.\overrightarrow{v_M}$$

La quantité de mouvement d'un système de N points matériels, de masses m_i (i=0,1,,,,,N) se construit en sommant les contributions de chaque point matériel.

$$\vec{p}_{sys} = \sum_{i=1}^{N} m_i.\vec{v}_{M_i} = \sum_{i=1}^{N} m_i.\frac{d\overrightarrow{OM_i}}{dt}$$

Barycentre (centre de masse)

Le centre de masse G (centre d'inertie, barycentre des masses m_i) est donné par :

$$m.\overrightarrow{OG} = \sum_{i=1}^{N} m_i.\,\overrightarrow{OM_i} \quad \text{où} \quad m = \sum_{i=1}^{N} m_i$$

$$\Downarrow \frac{d}{dt}$$

$$m.\frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} = \sum_{i=1}^{N} m_i.\frac{d\overrightarrow{OM_i}}{dt} = \overrightarrow{p_{sys}}$$

Il suffit de savoir où se situe le centre d'inertie et quelle est la masse totale !

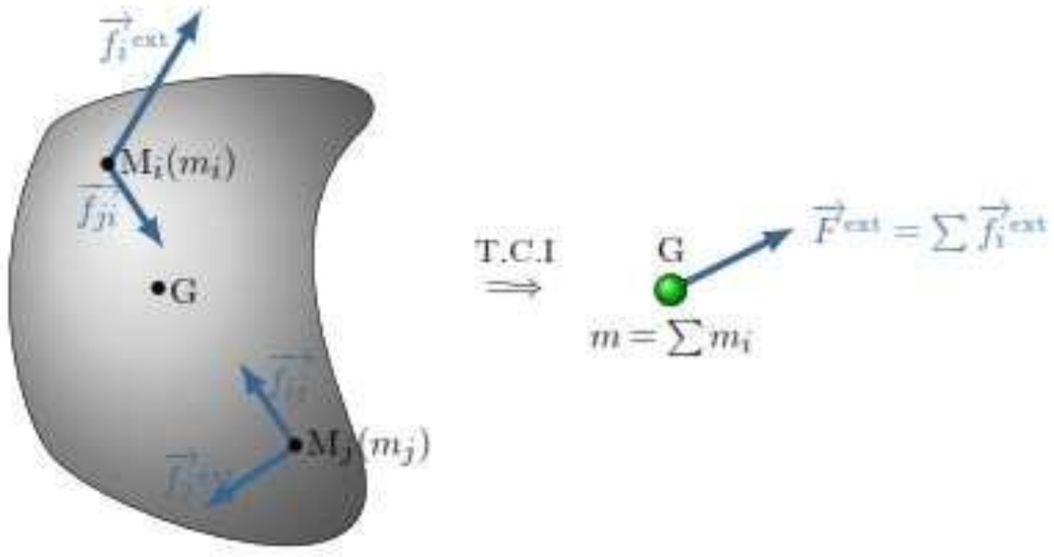
Théorème du Centre d'inertie

La quantité de mouvement d'un système de points matériels S, de masse totale m, est la même que celui d'un point matériel de même masse et situé au centre de masse G.

Remarques

$$m.\frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} = \sum_{i=1}^{N} m_i.\frac{d\overrightarrow{OM_i}}{dt} = \overrightarrow{p_{sys}} \Rightarrow m.\overrightarrow{v_G} = \overrightarrow{p_{sys}}$$

$$\frac{d\overrightarrow{p_{sys}}}{dt} = \frac{d(m.\overrightarrow{v_G})}{dt} = m.\frac{d(\overrightarrow{v_G})}{dt} = m.\overrightarrow{a_G} = \overrightarrow{F_{ext}}$$



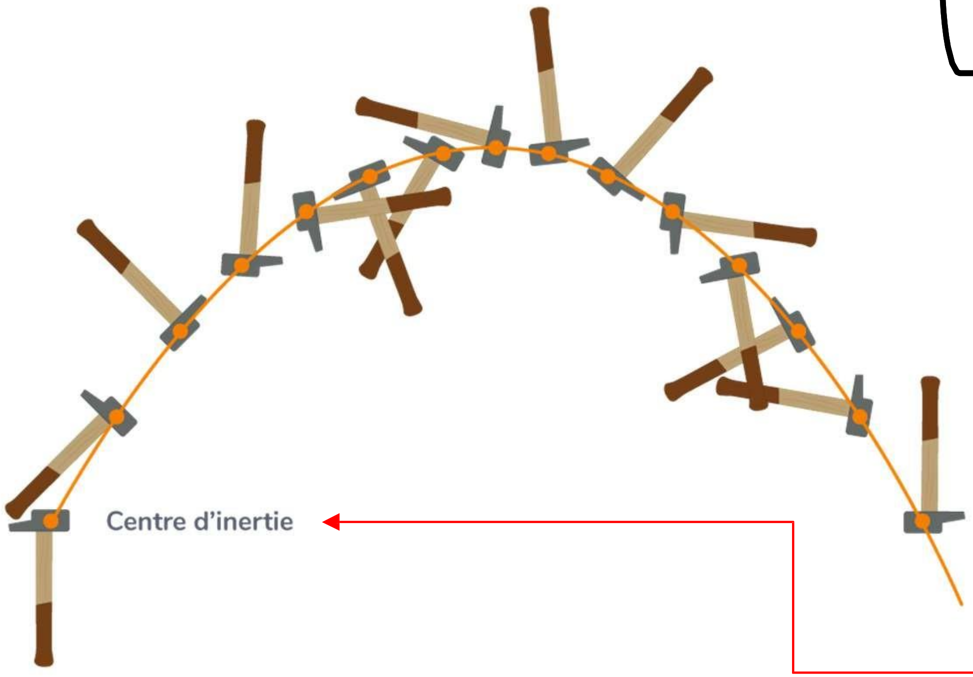
Système $\mathcal{S}$ de points matériels

Remarques

$$\frac{d\overrightarrow{p_{sys}}}{dt} = \frac{d(m.\overrightarrow{v_G})}{dt} = m.\frac{d(\overrightarrow{v_G})}{dt} = m.\overrightarrow{a_G} = \overrightarrow{F_{ext}}$$

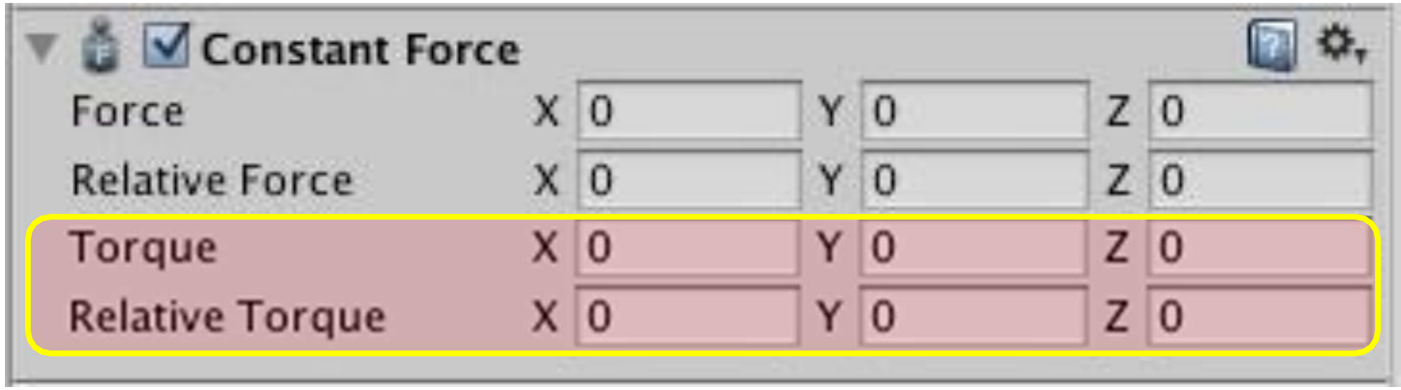
L'action d'une force extérieure sur un système conduit à une variation de sa quantité de mouvement

..de sa vitesse $\overrightarrow{v_G}$....



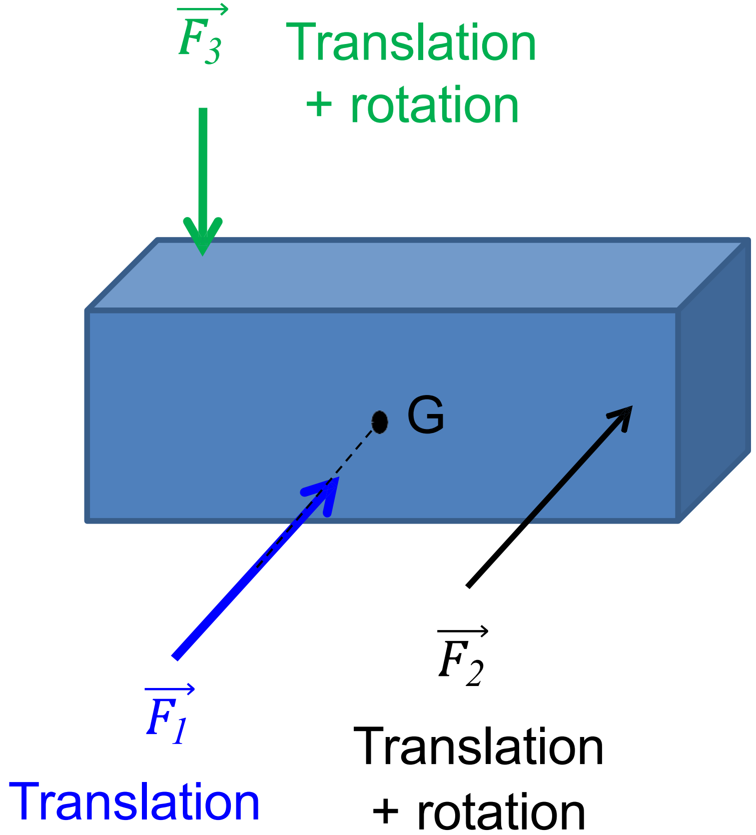
Quel type de mouvement ?

Moment d’une force



Moment d'une force (Torque ou Couple)

Quel mouvement est engendré par l'application de la force $\overrightarrow{F_i}$ (i=1,2 ou 3)?



L'application d'une force dont la direction ne passe pas par le centre de masse crée une accélération au niveau de la **rotation** d'un corps solide.

L'**orientation** du solide va changer !

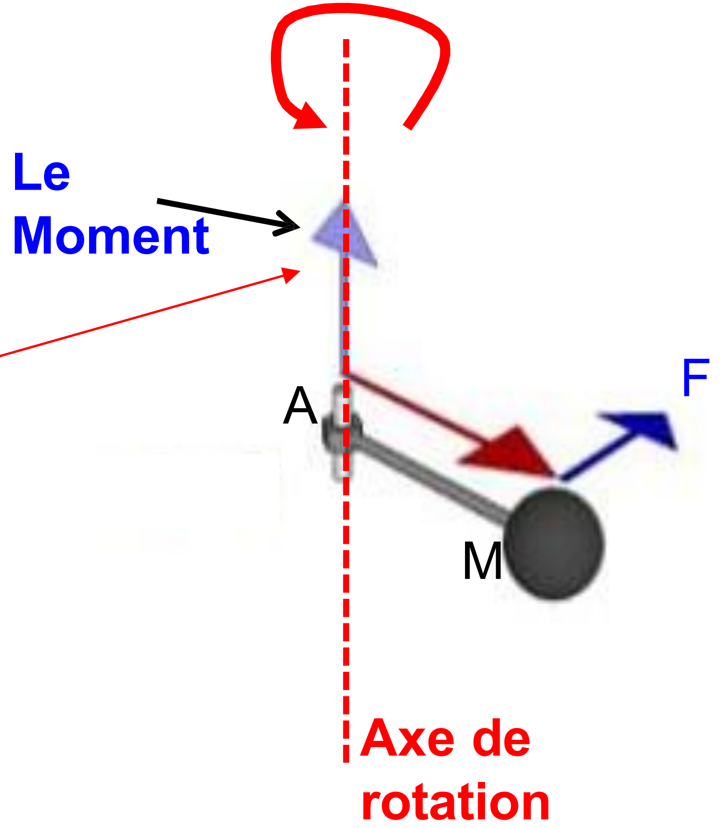
Moment d'une force (Torque ou Couple)

Le Moment d'une force par rapport à un point fixe: c'est une mesure de combien une force agissant sur un objet est susceptible de mettre ce dernier en mouvement de rotation **autour de ce point**.

Moment
de la force
en A

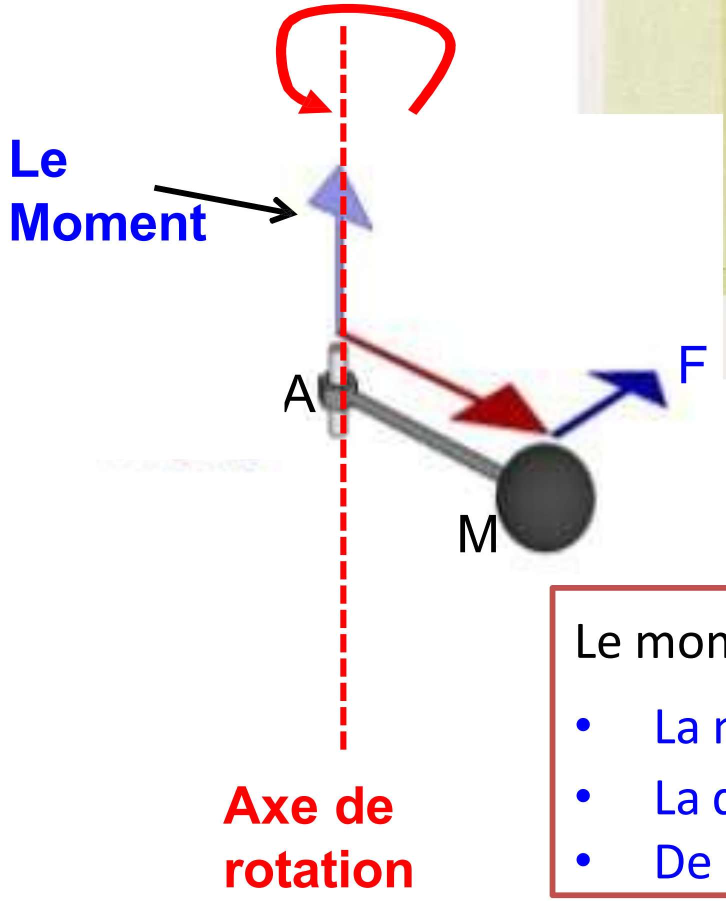
$$\boxed{\vec{\tau} = \overrightarrow{AM} \wedge \vec{F}}$$

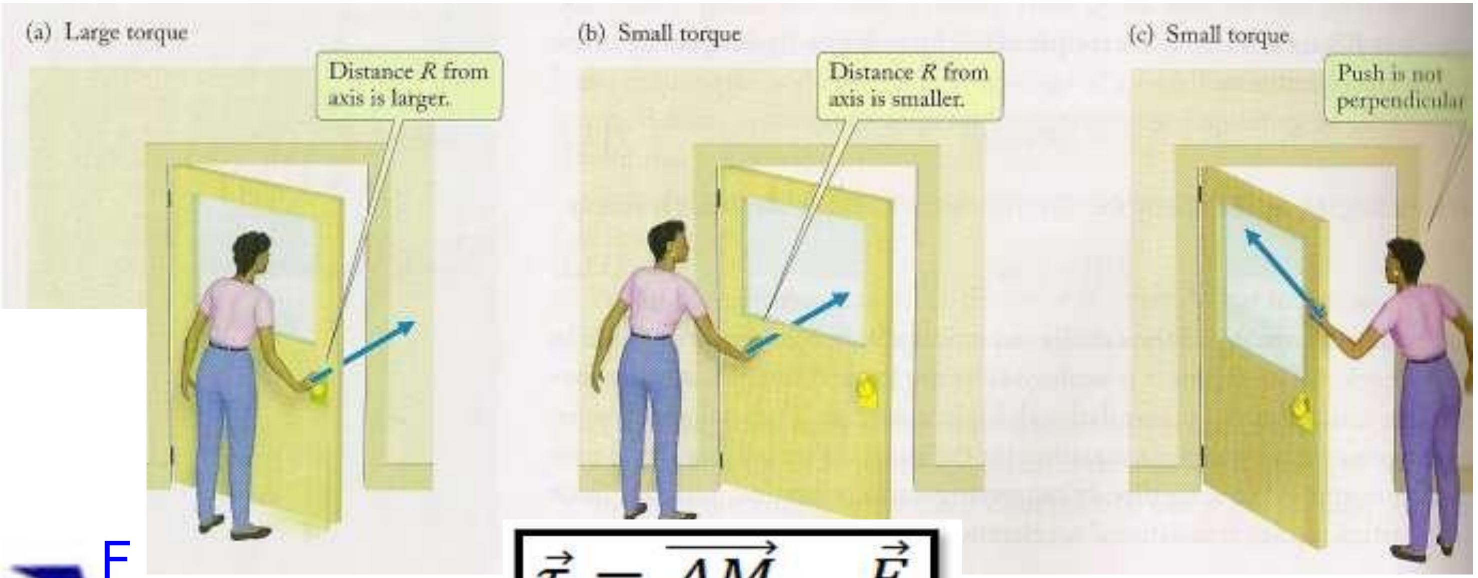
Représente **la direction**
de l'axe de rotation



Le mvt de rotation s'effectue **dans** un **plan perpendiculaire** à l'axe de rotation

Moment d’une force (Torque ou Couple)





$$\boxed{\vec{\tau} = \overrightarrow{AM} \wedge \vec{F}}$$

$$\|\vec{\tau}\| = \|\overrightarrow{AM}\|.\,\|\vec{F}\|.\,|Sin(\overrightarrow{AM},\vec{F})|$$

Le moment dépend de:

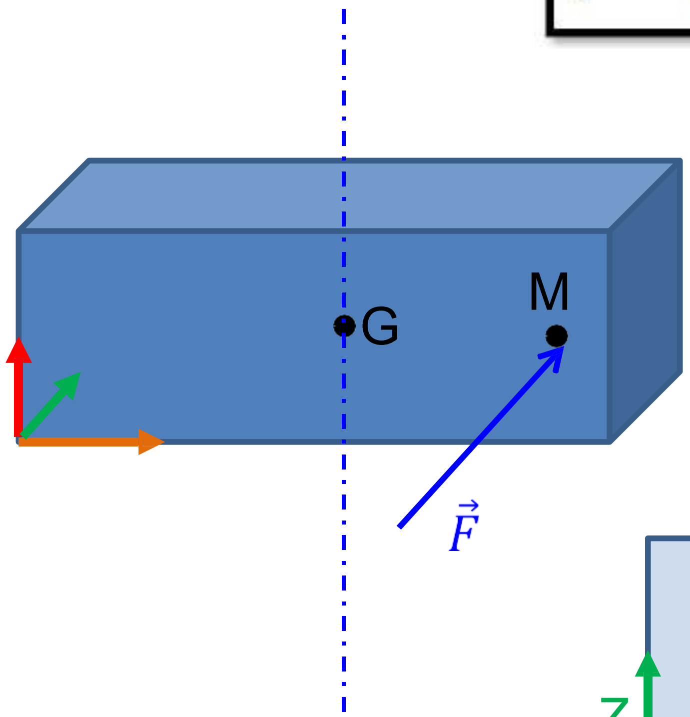
- La norme de la force
- La distance du point d’application au pivot
- De l’angle!

Moment d'une force

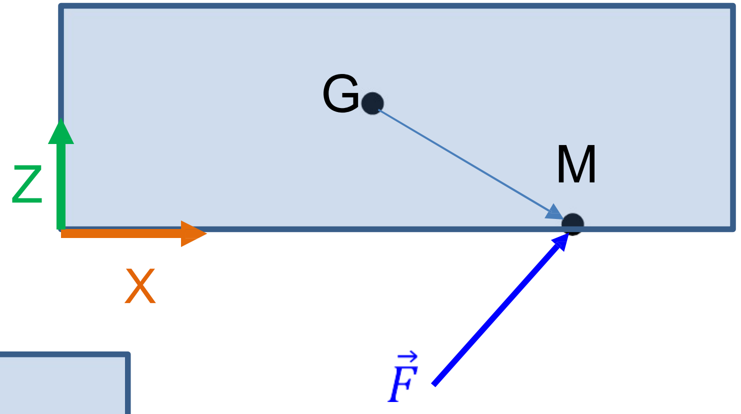
Moment = la capacité d'une force à provoquer un mouvement de rotation

$$\boxed{\vec{\tau} = \overrightarrow{AM} \wedge \vec{F}}$$

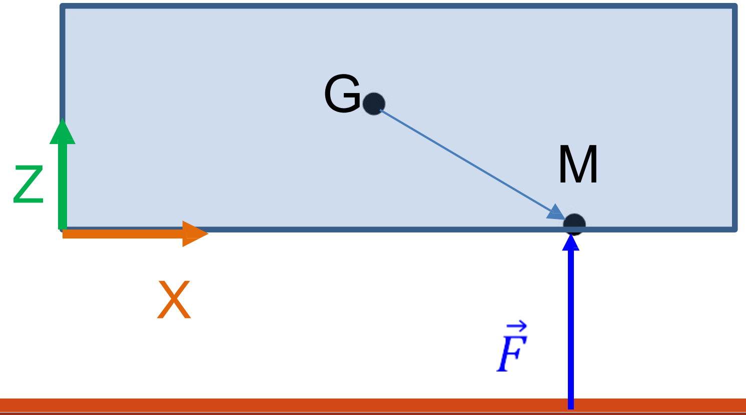
$$\|\vec{\tau}\| = \|\overrightarrow{AM}\|.\|\vec{F}\|.|Sin(\overrightarrow{AM},\vec{F})|$$



Vue de dessus



Vue de dessus



Laquelle de ces deux forces va engendrer plus de rotation ?

Remarque

Rigidbody.AddTorque

Applique une force qui fait tourner l'objet autour de l'axe spécifié.

SWITCH TO MANUAL

Axe de rotation

Declaration

public void **AddTorque**(Vector3 **torque**, ForceMode **mode** = ForceMode.Force);

`ForceMode.Force`

`ForceMode.Acceleration`

`ForceMode.Impulse`

`ForceMode.VelocityChange`

Parameters

torque	Torque vector in world coordinates.
mode	The type of torque to apply.

Description

Adds a torque to the rigidbody.

Declaration

public void **AddTorque**(float **x**, float **y**, float **z**, ForceMode **mode** = ForceMode.Force);

Parameters

x	Size of torque along the world x-axis.
y	Size of torque along the world y-axis.
z	Size of torque along the world z-axis.
mode	The type of torque to apply.

https://www.youtube.com/watch?v=De0PoxaKlww

Moment Angulaire (ou cinétique)

- Le **moment Angulaire** (également appelé **moment cinétique**) est une grandeur vectorielle conservée utilisée pour décrire l'état général de rotation **d'un système** physique

- Le **moment Angulaire** est l'analogue de ce que la quantité de mouvements est pour la translation.

Moment Angulaire (ou cinétique)

❑ Pour un **point matériel M :**

Soit un **point matériel M**, de masse m et de vecteur vitesse $\vec{V}_{M/R}$ par rapport à un référentiel R.

Le Moment cinétique de M pr/pr à un point O est donné par :

$$\boxed{\overrightarrow{L_O}(M) = \overrightarrow{OM} \wedge \vec{p} = \overrightarrow{OM} \wedge m\,\vec{v}}$$

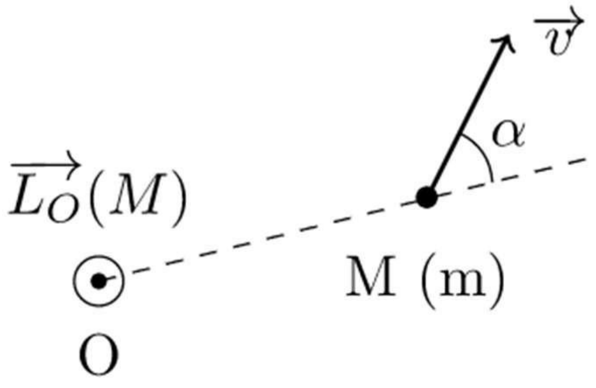


Figure 1 - Moment cinétique d'un point M en un point O

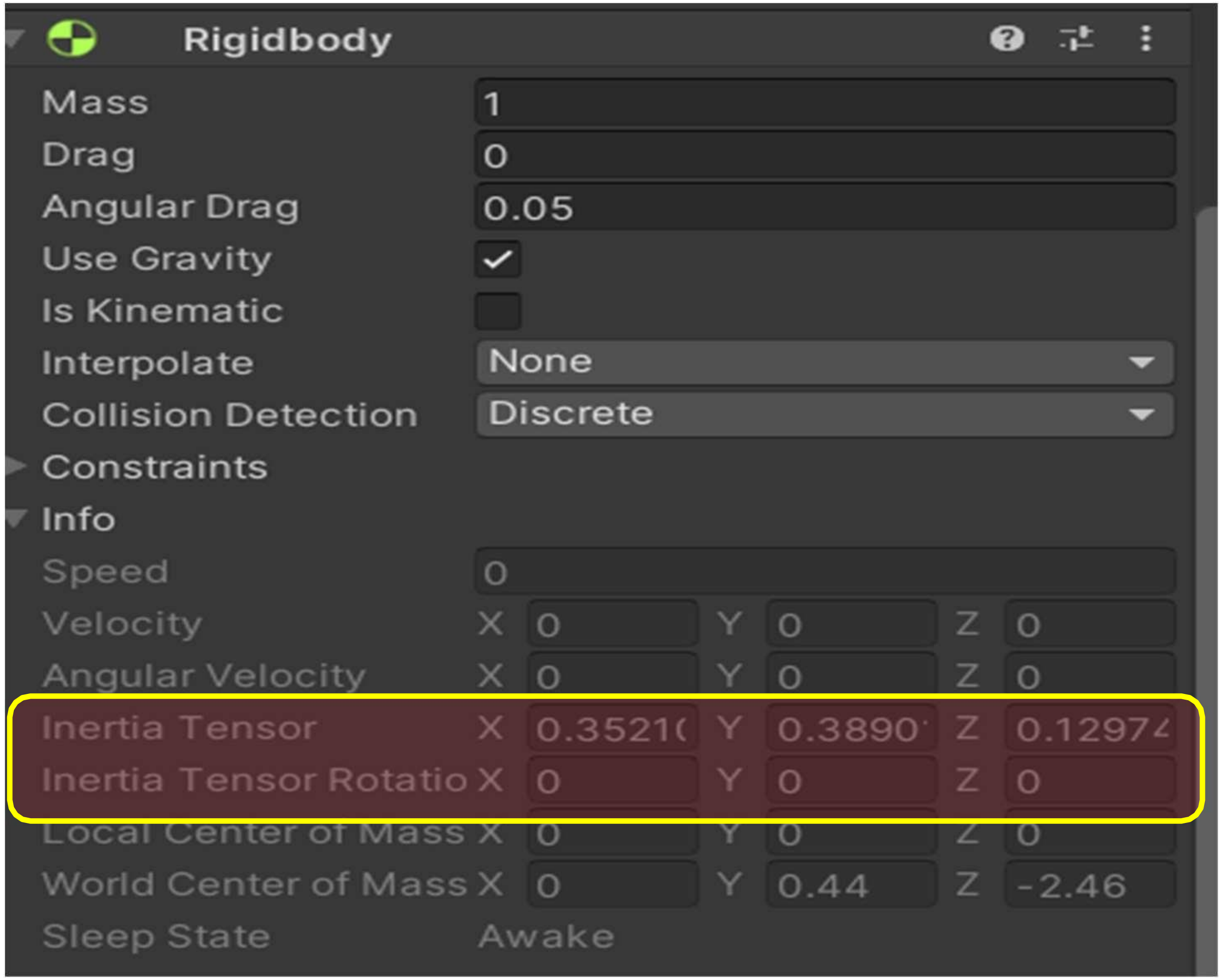
Moment Angulaire (ou cinétique)

❑ Pour un système à N-points matériels :

Le moment angulaire d'un système de points matériels Mi est la somme vectorielle des moments cinétiques individuels:

$$\boxed{\vec{L}(S)_{/A} = \sum_i \overrightarrow{AM_i}\ X\ m_i\ .\vec{V}_{M_i/R}}$$

➡ Et pour un Rigid Body ?


Rigidbody
Mass 1
Drag 0
Angular Drag 0.05
Use Gravity
Is Kinematic
Interpolate None
Collision Detection Discrete
Constraints
Info
Speed 0
Velocity X 0 Y 0 Z 0
Angular Velocity X 0 Y 0 Z 0
Inertia Tensor X 0.3521(Y 0.3890' Z 0.12974
Inertia Tensor Rotatio X 0 Y 0 Z 0
Local Center of Mass X 0 Y 0 Z 0
World Center of Mass X 0 Y 0.44 Z -2.46
Sleep State Awake

Moment angulaire : Rigid Body

Pour un **corps rigide** tournant autour d'un **axe de symétrie** (exemple sphère ou cylindre), le moment angulaire peut être exprimé comme le produit de son **moment d'inertie** par sa vitesse angulaire:

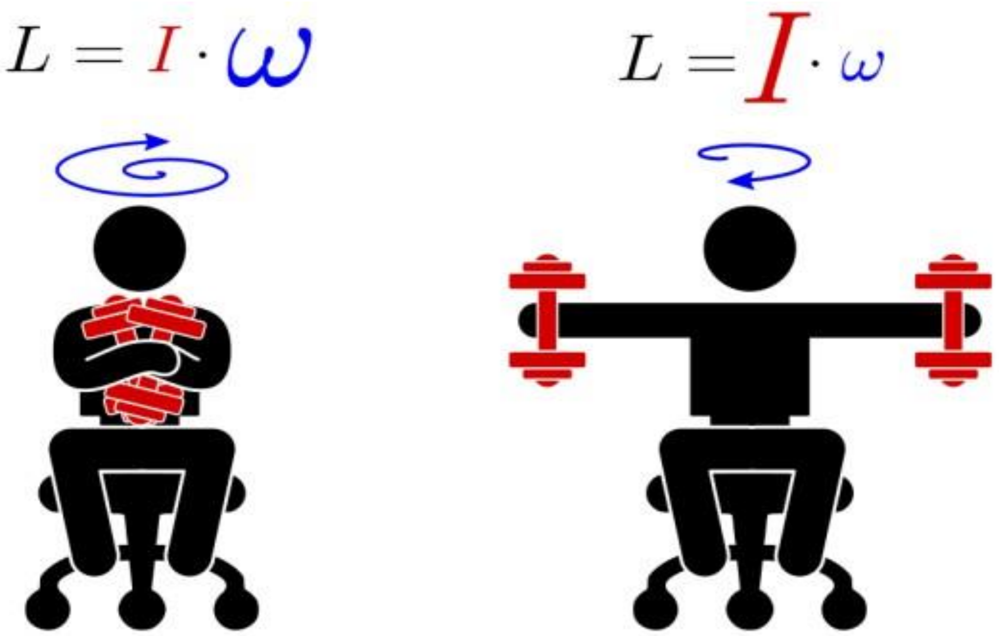
Vitesse angulaire

$$L = I.\omega$$

Moment d'inertie (**I** ou **J**) = Mesure de la résistance d'un objet à sa mise en rotation (L'effort qu'il faut pour mettre un objet en rotation autour d'un axe)

Décrit comment la masse est répartie autour du centre de masse

Moment angulaire : Rigid Body



Décrit comment la masse est répartie autour du centre de masse

Moment angulaire : Rigid Body

- Le moment angulaire caractérise la tendance de l'objet à continuer à tourner autour de l'axe, du fait de son inertie.

- Soit $r_i' = r_i(t) - x(t)$ le déplacement de la ieme particule par rapport au centre de masse , calculée **dans le repère global**:

$$I(t) = \sum \begin{pmatrix} m_i(r'^2_{iy} + r'^2_{iz}) & -m_i r'_{ix} r'_{iy} & -m_i r'_{ix} r'_{iz} \\ -m_i r'_{iy} r'_{ix} & m_i(r'^2_{ix} + r'^2_{iz}) & -m_i r'_{iy} r'_{iz} \\ -m_i r'_{iz} r'_{ix} & -m_i r'_{iz} r'_{iy} & m_i(r'^2_{ix} + r'^2_{iy}) \end{pmatrix}$$

Doit être recalculé à chaque image !

Moment angulaire : Rigid Body

$$I(t) = R(t).I_{body}.R(t)^T$$

Exprimé dans l'espace objet.

CONSTANTE d'une image à l'autre

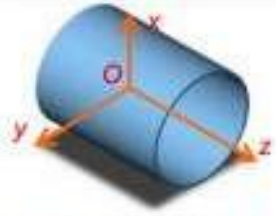
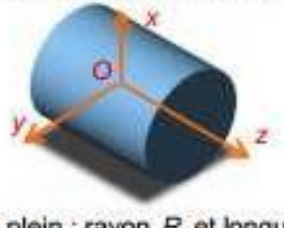
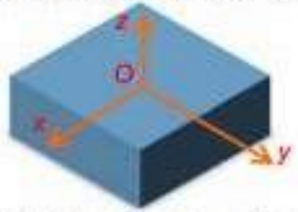
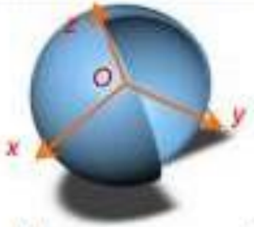
Dépend des dimensions de l'objet

Dépend de la forme de l'objet

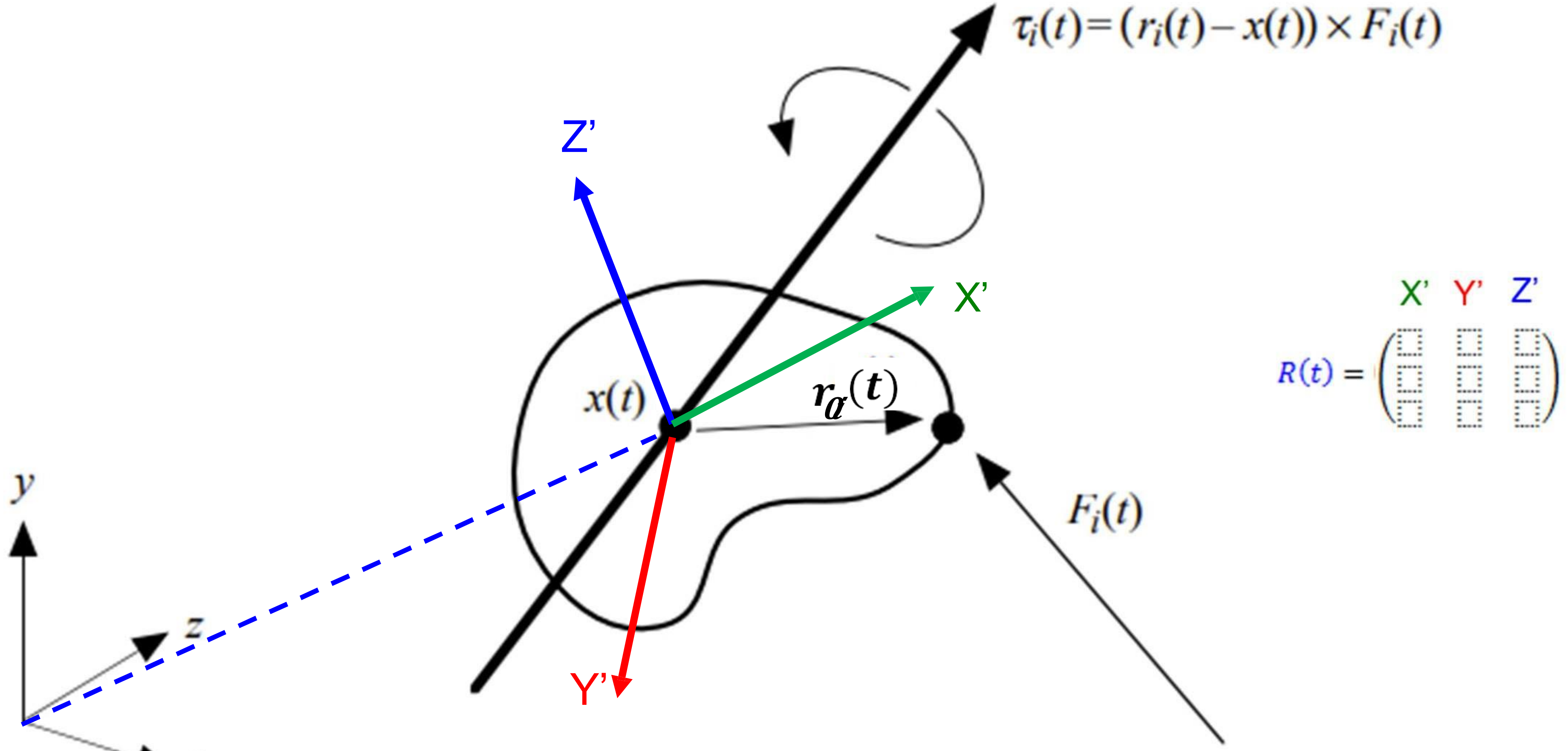
Moment d'inertie

- I_{body}

Matrice
diagonale

Corps homogène de masse m	Centre d'inertie	Matrice d'inertie en $(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})$
 cylindre creux : rayon R et longueur l	centre	$\begin{pmatrix} \frac{1}{2}mR^2+\frac{1}{12}ml^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}mR^2+\frac{1}{12}ml^2 & 0 \\ 0 & 0 & mR^2 \end{pmatrix}$
 cylindre plein : rayon R et longueur l	centre	$\begin{pmatrix} \frac{1}{4}mR^2+\frac{1}{12}ml^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}mR^2+\frac{1}{12}ml^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}mR^2 \end{pmatrix}$
 parallélépipède rectangle : coté a, b, c	centre	$\begin{pmatrix} \frac{1}{12}m(b^2+c^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12}m(a^2+c^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{12}m(a^2+b^2) \end{pmatrix}$
	centre	$\begin{pmatrix} \frac{2}{3}mR^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}mR^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}mR^2 \end{pmatrix}$

Evolution temporelle



$$r(t) = R(t).r_{0i}(t) + x(t)$$

Position d'un point quelconque de l'objet exprimé dans le R.Global

Position de ce point exprimé dans le R. Local

Centre de masse de l'objet dans le R. Global

Evolution temporelle

$$\frac{d\vec{r_i}}{dt} = \overrightarrow{v(t)} + \overrightarrow{\omega(t)} \times (\overrightarrow{r_i(t)} - \overrightarrow{x(t)})$$

$$\frac{d\overrightarrow{p_{sys}}}{dt} = \vec{F}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau}$$

$$\frac{d\overrightarrow{X'}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \vec{X}' = \vec{T}$$

$$\frac{d\overrightarrow{F}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \overrightarrow{Y'} = \vec{N}$$

$$\frac{d\overrightarrow{Z'}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \overrightarrow{Z'} = \vec{B}$$

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccc} X' & Y' & Z' \end{array} \\ R(t) = & \begin{pmatrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{pmatrix} \end{array}$$

$$\frac{dR}{dt} = \begin{pmatrix} . & . & . \\ . & . & . \\ . & . & . \end{pmatrix}$$

Remarque

A cause des erreurs de calcul de $\dot{R}$ on perd l'orthogonalité des vecteurs composant les colonnes de celle-ci.

Method d'orthonormalisation de Gram-Schimdt

On normalise $\vec{T}$ $\longrightarrow$ $\vec{T'} = \dfrac{\vec{T}}{\|\vec{T}\|}$

On retranche la projection de $\vec{N}$ sur $\vec{T'}$ $\longrightarrow$ $\vec{N'} = \vec{N} - \vec{T'}\left(\vec{N}\vec{T'}\right)$

On normalise $\vec{N'}$ $\longrightarrow$ $\vec{N'} = \dfrac{\vec{N'}}{\|\vec{N'}\|}$

On calcule $\vec{B'}$ $\longrightarrow$ $\vec{B'} = \vec{T'} \wedge \vec{N'}$

La programmation

$\vec{F} = \sum \vec{F_i}$ ➡ $\vec{\tau} = \sum (\vec{r_i} - \overrightarrow{x(t)}) \wedge \vec{F_i}$ **Les résultantes !**

Vecteur d'état du Rigidbody

$$\mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix}$$

Position du centre de masse
Matrice d'orientation
Quantité de Mvt
Moment angulaire

$$I(t) = R(t).I_{body}.R(t)^T$$

$$v(t) = \frac{P(t)}{M}$$

$$\omega(t) = I(t)^{-1}.L(t)$$

La programmation

$$\frac{d\vec{X'}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \vec{X'}$$

$$\frac{d\vec{Y'}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \vec{Y'}$$

$$\frac{d\vec{Z'}}{dt} = \vec{\omega} \wedge \vec{Z'}$$

$$\frac{dR}{dt} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$\frac{d}{dt}\mathbf{X}(t) = \frac{d}{dt}\begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v(t) \\ \omega(t)^{*}R(t) \\ F(t) \\ \tau(t) \end{pmatrix}.$$

$$\tau = \sum_{i}^{\cdots} \tau_i(t) = \sum_{i}^{\cdots} (r_i(t) - x(t)) \wedge F_i(t)$$

Evolution temporelle

- Equation du mouvement de l'objet:

$$X(t+\Delta t) = X(t) + \Delta t.\frac{dX(t)}{dt}$$

Etat de l'objet à l'image suivante

Etat actuel de l'objet

?

Evolution temporelle

- Etat de l'objet:

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix}$$

$x(t) \longleftrightarrow$ Position du barycentre de l'objet dans l'espace monde

$R(t) \longleftrightarrow$ Rotation pr/pr au barycentre de l'objet (orientation)

$P(t) \longleftrightarrow$ Quantité de mouvement (infos Translation)

$L(t) \longleftrightarrow$ Moment cinétique (infos Rotation)

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix}$$

$P(t) \rightarrow v(t) = \frac{P(t)}{M}$

$L(t) \rightarrow \omega(t) = I^{-1}(t).L(t)$ / $I^{-1}(t) = R(t).I^{-1}{}_{body}.R(t)^T$

Evolution temporelle

- Evolution de l'état de l'objet:

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix}$$

$x(t) \longleftrightarrow$ Position du barycentre de l'objet dans l'espace monde

$R(t) \longleftrightarrow$ Rotation pr/pr au barycentre de l'objet (orientation)

$P(t) \longleftrightarrow$ Quantité de mouvement (infos Translation)

$L(t) \longleftrightarrow$ Moment cinétique (infos Rotation)

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix}$$

$P(t) \rightarrow v(t) = \frac{P(t)}{M}$

$L(t) \rightarrow \omega(t) = I^{-1}(t).L(t)$ / $I^{-1}(t) = R(t).I^{-1}{}_{body}.R(t)^T$

$$\frac{dX}{dt} = \begin{pmatrix} \frac{dx(t)}{dt} \\ \frac{dR(t)}{dt} \\ \frac{dP(t)}{dt} \\ \frac{dL(t)}{dt} \end{pmatrix}$$

$\frac{dx(t)}{dt}$ —— $v(t)$

$\frac{dR(t)}{dt}$ —— $\vec{\omega} * R(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} . R(t)$

$\frac{dP(t)}{dt}$ —— $F(t)$

$\frac{dL(t)}{dt}$ —— $\tau(t)$ $\quad \tau = \sum_i^{\dots\dots} \tau_i(t) = \sum_i^{\dots\dots} (r_i(t) - x(t)) \wedge F_i(t)$

Evolution temporelle

$$\begin{pmatrix} x(t+\Delta t) \\ R(t+\Delta t) \\ P(t+\Delta t) \\ L(t+\Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix} + \Delta t . \begin{pmatrix} \dfrac{dx(t)}{dt} \\ \dfrac{dR(t)}{dt} \\ \dfrac{dP(t)}{dt} \\ \dfrac{dL(t)}{dt} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x(t+\Delta t) \\ R(t+\Delta t) \\ P(t+\Delta t) \\ L(t+\Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix} + \Delta t . \begin{pmatrix} v(t) \\ \vec{\omega} * R(t) \\ F(t) \\ \tau(t) \end{pmatrix}$$

Evolution temporelle

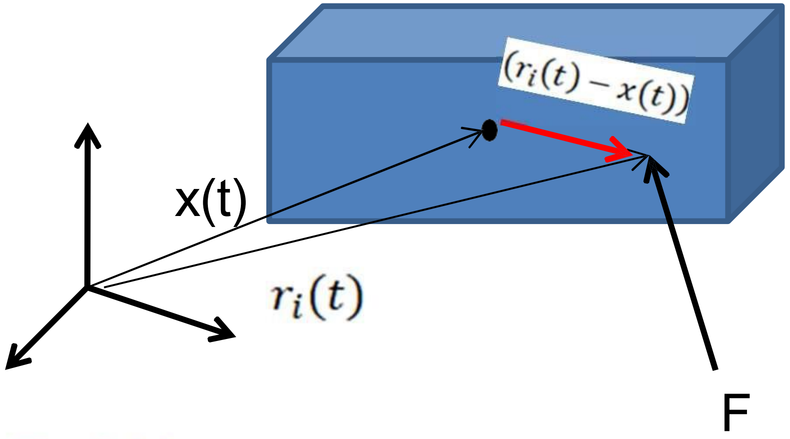
- Itération i

x(t) connu

P(t) connu → $v(t) = \frac{P(t)}{M}$

R(t) connu→ $I^{-1}(t) = R(t).I^{-1}{}_{body}.R(t)^T$

L(t)=connu → $\omega(t) = I^{-1}(t).L(t)$ ⇨ $\dot{R}(t) = \vec{\omega} * R(t)$



F→ dP/dt

$\tau = \sum_i^{\dots\dots} \tau_i(t) = \sum_i^{\dots\dots} (r_i(t) - x(t)) \wedge F_i(t)$ ⇨ dL/dt

$$\begin{pmatrix} x(t+\Delta t) \\ R(t+\Delta t) \\ P(t+\Delta t) \\ L(t+\Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix} + \Delta t. \begin{pmatrix} v(t) \\ \vec{\omega} * R(t) \\ F(t) \\ \tau(t) \end{pmatrix}$$

Evolution temporelle

- Itération 1

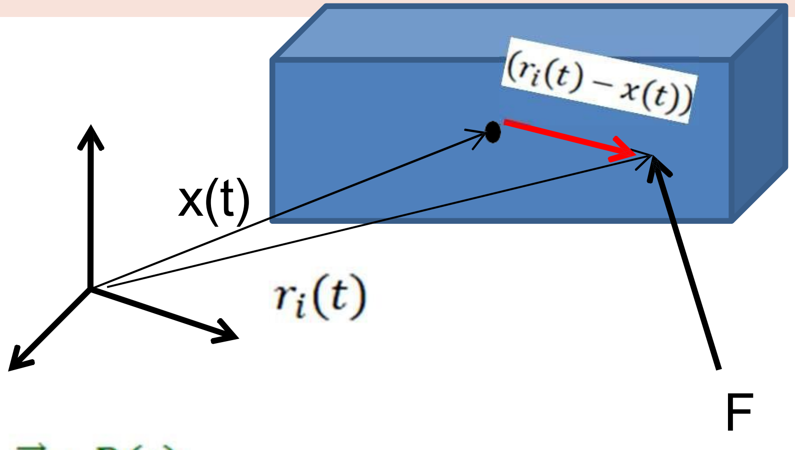
x(t) connu

P(t) connu → $v(t) = \frac{P(t)}{M}$

2 R(t) connu→ $I^{-1}(t) = R(t).I^{-1}{}_{body}.R(t)^T$

2 L(t)=connu → $\omega(t) = I^{-1}(t).L(t)$ ⇒ $\dot{R}(t) = \vec{\omega} * R(t)$

1 F→ $\begin{cases} dP/dt \\ \text{1 } \tau = \sum_i \tau_i(t) = \sum_i (r_i(t) - x(t)) \wedge F_i(t) \Rightarrow dL/dt \end{cases}$



$$\begin{pmatrix} x(t+\Delta t) \\ R(t+\Delta t) \\ P(t+\Delta t) \\ L(t+\Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \Delta t. \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F(t) \\ \tau(t) \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ \\ 1 \\ 1 \end{matrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ \Delta t.F(t) \\ \Delta t.\tau(t) \end{pmatrix}$$

Etat actuel de l'itération 2

Evolution temporelle

- Itération 2

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ \Delta t.F(t) \\ \Delta t.\tau(t) \end{pmatrix}$$

$$\downarrow$$

$$\begin{pmatrix} x(t+\Delta t) \\ R(t+\Delta t) \\ P(t+\Delta t) \\ L(t+\Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) \\ R(t) \\ P(t) \\ L(t) \end{pmatrix} + \Delta t. \begin{pmatrix} v(t) \\ \vec{\omega} * R(t) \\ F(t) \\ \tau(t) \end{pmatrix}$$

x(t) connu

P(t) connu → $v(t) = \frac{P(t)}{M}$

R(t) connu→ $I^{-1}(t) = R(t).I^{-1}{}_{body}.R(t)^T$

L(t)=connu→ $\omega(t) = I^{-1}(t).L(t)$

⇨ $\dot{R}(t) = \vec{\omega} * R(t)$

F→ dP/dt

$\tau = \sum_i^{......} \tau_i(t) = \sum_i^{......} (r_i(t) - x(t)) \wedge F_i(t)$ ⇨ dL/dt

Bibliographie

BARAFF D.: An introduction to physically based modeling: Rigid body simulation. In SIGGRAPH ’97 Course Notes (1997). https://www.cs.cmu.edu/~baraff/pbm/rigid1.pdf