Physique MECANIQUE

(Transparents et Eléments relatif au Cours traité en amphithéâtre)

ESIR (Cycle Prépa - CUPGE 1A-S1)

UnivRennes1

univ-rennes1.fr

B. BÊCHE Pr., IETR CNRS – ESIR UR1

bruno.beche@univ-rennes1.fr

https://www.ietr.fr/bruno-beche

PLAN DU COURS

◆ **INTRODUCTION : Définitions, statistique, cinématique, dynamique, place de la mécanique classique de Newton, postulats associés sur la notion d'espace et de temps, la/les masse(s), ordres de grandeurs (distance et durée), unités et S.I. (MKS).**

◆ CHAPITRE I) CINEMATIQUE DU POINT MATERIEL

Référentiels (Galiléens ou d'inertie), repères et systèmes de coordonnées (2D, 3D) cartésiens, polaires, cylindriques, sphériques, notions de trajectoire, position, vitesse, accélération, expressions et mouvements, vers les référentiels non Galiléens et la relativité des mouvements, lois de composition des vitesses et des accélérations.

◆ CHAPITRE II) FONDEMENTS ET POSTULATS DE LA DYNAMIQUE NEWTONIENNE : PRINCIPES, INTERACTIONS ET FORCES

Principe d'inertie, quantité de mouvement, principe fondamental de la dynamique (PFD) et lien Chapitre I), principe des actions réciproques (action/réaction), interactions en physique, notion de forces et exemples (forces de frottement solide puis visqueux, loi et force de l'attraction gravitationnelle, notion de masse gravitationnelle, poids, forces en électrostatique et électromagnétisme, …), applications du PFD, la chute.
Lois de conservation de la quantité de mouvement, physique des collisions et chocs.

◆ CHAPITRE III) FORMULATION INTEGRALE OU APPROCHES ENERGETIQUES : TRAVAIL, PUISSANCE, ENERGIE, POTENTIEL

Travail le long d'une trajectoire, puissance, les énergies, énergie cinétique et théorème de l'énergie cinétique, énergie potentielle et notion de forces à circulation conservative (champ de forces conservatif), propriétés, notions de champs et de potentiels, énergie mécanique totale et loi de conservation, le théorème du viriel, notions et conditions d'équilibre et de stabilité, petits mouvements autour de la position d'équilibre, vers l'oscillateur harmonique en mécanique, notions de barrières et de puits de potentiel en physique.

◆ CHAPITRE IV) LES OSCILLATEURS MECANIQUES : MOUVEMENTS VIBRATOIRES ET OSCILLANTS

L'oscillateur harmonique à un degré de liberté en physique mécanique. Oscillateur harmonique simple (libre et conservatif), analogie électrique. Oscillateur harmonique libre amorti (ou dissipatif), mécanique et analogie électrique, régimes apériodique, critique, pseudo-périodique; facteur de qualité. Oscillateur harmonique forcé, régime permanent. Notion de résonance et facteur de qualité.

CHAPITRE V) MOMENT CINETIQUE ET ROTATIONS

Moment d'une force, moment cinétique et moment d'inertie, Théorème de transport (ou des axes parallèles, ou théorème de Huygens-Steiner), théorème du moment cinétique, conservation et importance du moment cinétique en physique, loi des aires, énergies associées, puissance, mouvements à force centrale newtonienne et énergie potentielle effective, nature des trajectoires (états liés ou de diffusion), théorème de Bertrand.

+ LES PERSPECTIVES: *« Vers la Mécanique des Solides, mouvements combinés de rotations et de translations… »*

Remarques :

Lorsque le symbole ✎ apparaitra, une démonstration plus conséquente sera nécessaire au tableau et sur votre cahier / feuilles en terme de prise de notes.

Le symbole ⚠ mérite une attention particulière.

Quelques ouvrages et livres de références :

➔ **Pour le cours :**

▪ **'Physique Générale : Tome I, Mécanique et Thermodynamique', M. Alonso, E. J. Finn, Ed. InterEditions ou dernièrement Ed. Dunod.**
▪ **'Introduction à la Mécanique', M. Le Bellac, Ed. Belin collection DIA.**
▪ **'Mécanique', C. Cappe, Ed. Dunod (avec exercices).**
▪ **'Mécanique : fondements et applications', J. Ph. Pérez, Ed. Dunod (avec exercices).**
▪ **'Introduction to Classical Mechanics', D. Morin, Ed. Cambridge, (with problems and solutions).**

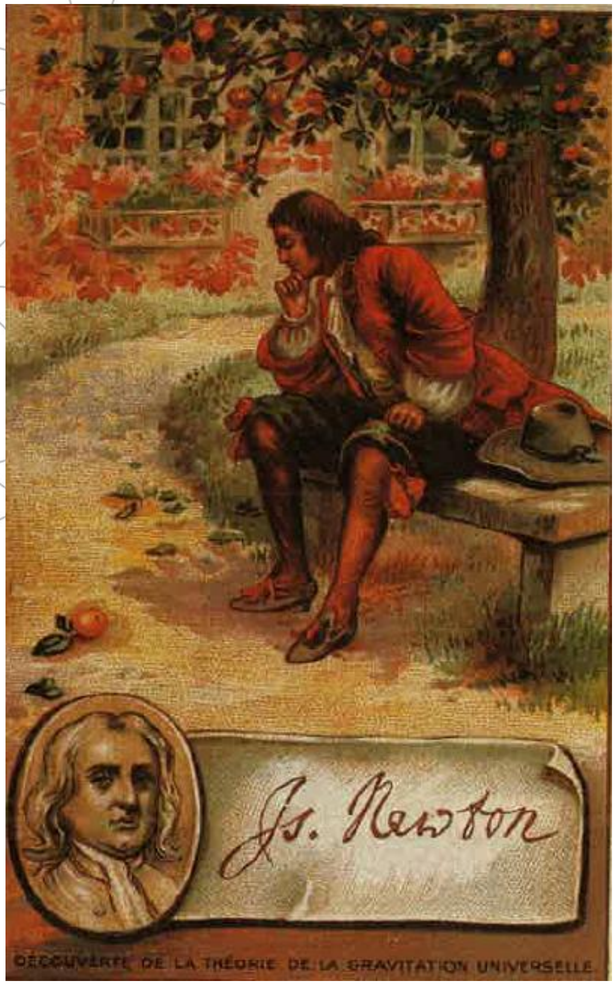
+ 'Les classiques'

▪ **'Mécanique : Cours de Physique de Berkeley', C. Kittel, W.D. Knight, M.A. Ruderman, vol. 1, Ed. Armand Colin.**
▪ **'Mécanique 1&2 : Le cours de physique de Feynman', R. Feynman, Ed. Dunod.**

➔ **Pour les exercices et les problèmes :**

▪ **Tous les livres possibles et imaginables (du SDC - BU Sciences Campus Beaulieu, voir SUPERNOVA) relatifs à la première année du supérieure (CPGE MPSI, PCSI, PC…) aux chapitres de 'Mécanique'.**

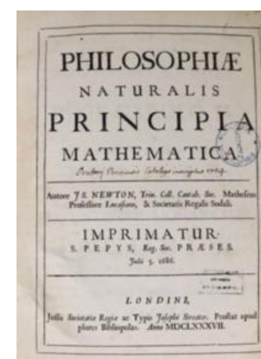
SUPERNOVA



L'existence d'Isaac Newton apparait extraordinaire de part son apport phénoménal et ses idées fécondes à la compréhension et à l'analyse des phénomènes fondamentaux de la Nature en mécanique, optique théorie et instrumentation, hydrodynamique et mathématiques...

Naissance en 1642 (année du décès de Galilée), apparaissant ainsi comme une forme de continuité de l'immense travail portant sur l'élaboration des lois physiques régissant l'Univers. Il fit ses études au Trinity Collège de Cambridge et fut reçu en 1665 '*bachelier es arts*' (Bachelor). La peste noire ravageant l'Angleterre de l'époque, l'Université ferma ses portes et Newton passa deux années qualifiées d'admirables et fructueuses au sein de son village natale de Woolsthorpe (by-Colsterworth). Il rédigera l'ensemble de ses traités mathématiques, énoncera la globalité de ses principes universels. En 1684, l'astronome Halley le convaincra de publier ses travaux concernant la *Gravitation Universelle* en un troisième livre intitulé 'Philosophiae naturalis principia mathematica'. Il unifie les mouvements de la mécanique 'céleste' (de Kepler) avec ceux terrestres (de Galilée).

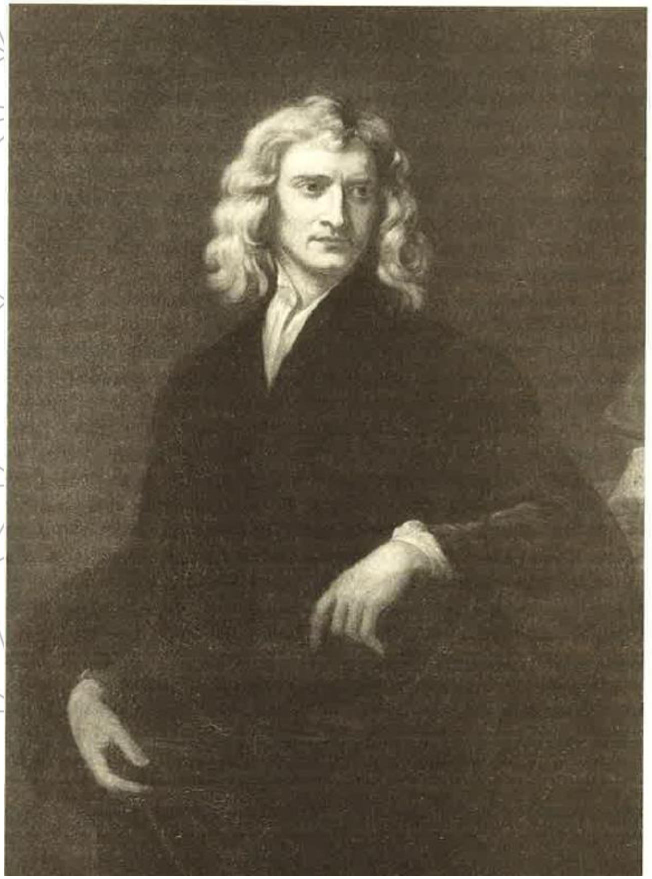
Président de la 'Royal Society of Sciences', il décède en 1727, reconnu par ses pairs comme un incomparable génie.


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

IMPRIMATUR.

LONDINI,

Isaac Newton [1642-1727]



Premier de la célèbre série de portraits d'Isaac Newton exécutée par le peintre Godfrey Kneller. Sur celui-ci, le professeur lucasien avait quarante-six ans. Il avait publié les *Principes* deux ans plus tôt seulement.

1642 Naissance à Woolsthorpe, Lincolnshire, le 25 décembre (4 janvier 1643 d'après le calendrier grégorien), du fils posthume d'Isaac et Hannah Newton, née Ayscough. Celle-ci le laissera après son remariage aux soins de sa grand-mère maternelle, à l'âge de trois ans.

1653 Après la mort de son beau-père, Barnabas Smith, Newton retourne vivre avec sa mère. Il va à l'école à Grantham.

1661 Newton entre au Trinity College de l'université de Cambridge.

1665 Après qu'il a obtenu sa licence, une épidémie de peste oblige Newton à retourner à Woolsthorpe, où il reste deux ans. Pendant cette période, mais particulièrement en 1666, connue comme l'*annus mirabilis* newtonienne, il développe nombre de ses idées fondamentales dans le domaine mathématique, l'optique, la mécanique et l'astronomie.

1669 Newton est nommé professeur lucasien de mathématiques au Trinity College en remplacement d'Isaac Barrow. Il écrit *De analysi*.

1672 Newton entre à la Royal Society, où il présente un article majeur sur l'optique, qui le conduira par la suite à un affrontement avec un autre membre de la société, Robert Hooke.

1679 À la mort de sa mère, Newton devient encore plus introspectif.

1684 L'astronome Edmund Halley consulte Newton sur les causes du mouvement planétaire. Cette visite sera le déclencheur des *Principes*

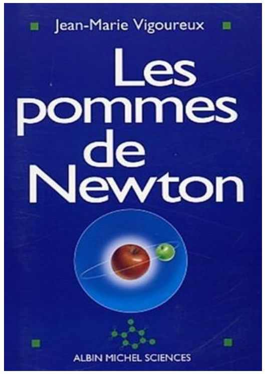
1687 Newton publie les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Cet ouvrage monumental réunit une bonne part de ses idées sur la mécanique céleste et la gravitation universelle, et offre en outre une explication physique cohérente des marées, de la précession des équinoxes et d'autres phénomènes naturels.

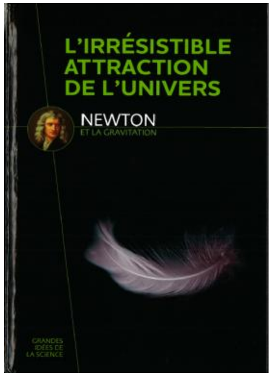
1696 Newton est nommé directeur de la Royal Mint (Monnaie royale).

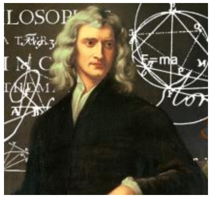
1703 Newton est nommé président de la Royal Society. Un an plus tard, il publie *Opticks*, sur la lumière et ses propriétés.

1714 La Royal Society tranche en faveur de Newton la dispute sur l'antériorité dans l'invention du calcul infinitésimal qui l'opposait à Leibniz depuis 1684.

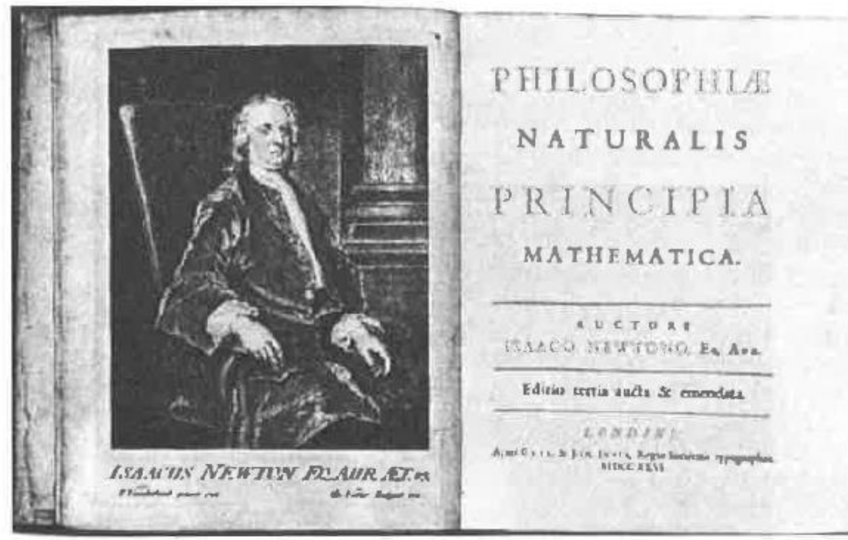
1727 Newton meurt riche et célèbre, le 31 mars. Il est enterré en grande pompe à l'abbaye de Westminster.





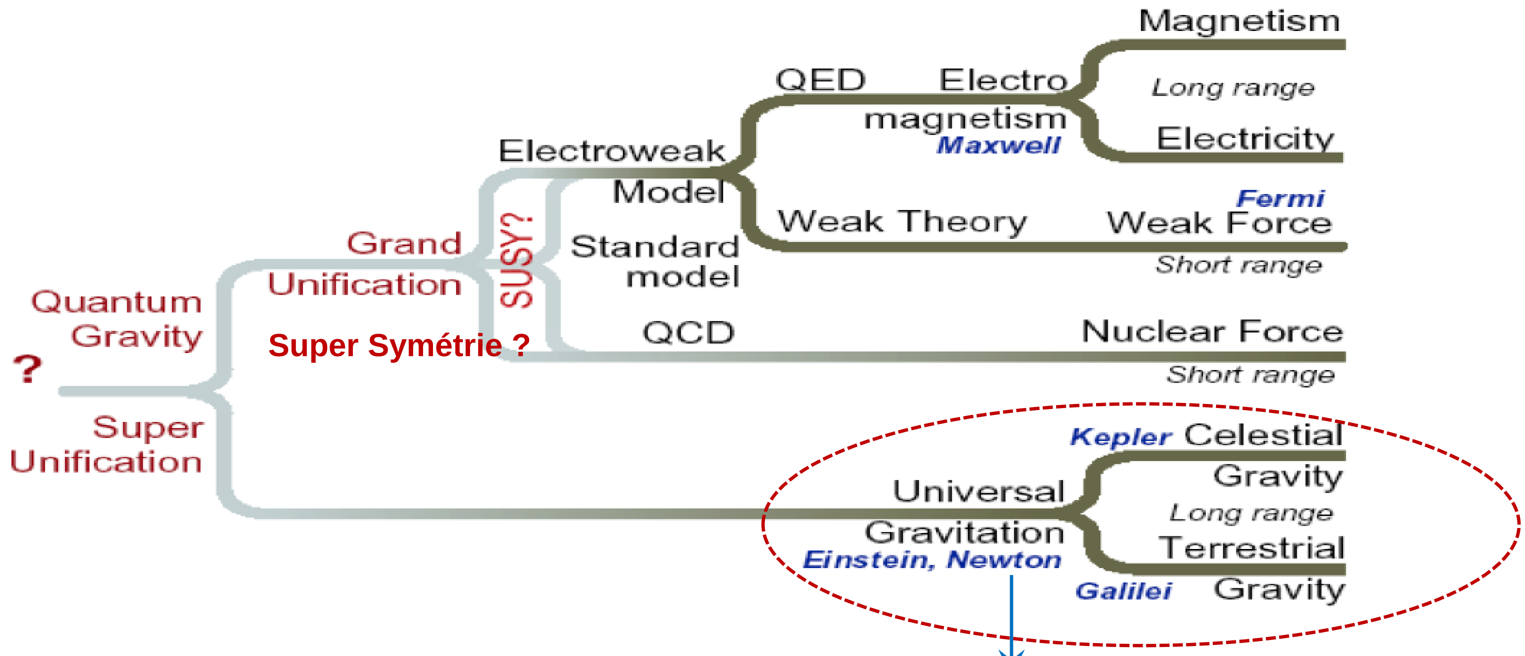


Statue de Newton, par Roubiliac. Cette statue se dresse au Trinity College, université de Cambridge, où exerça Newton. L'inscription en latin gravée sur le socle dit : « NEWTON, dont le génie a surpassé le genre humain ».



Les Philosophiae Naturalis Principia Mathematica *(en abrégé* Principia *ou* Principes*), parus en 1687, constituent une œuvre monumentale. Ils s'ouvrent par une série de définitions et par les célèbres lois du mouvement (loi d'inertie, loi de la dynamique, loi de l'égalité de l'action et de la réaction), se poursuivent par deux livres consacrés au mouvement des corps et se concluent par un troisième livre traitant du « Système du monde ». Les* Principes *marquèrent une date dans l'histoire des sciences et assurèrent définitivement la gloire à Newton.*

L'unification des interactions et forces
(Positionnement de la Mécanique)



La loi de la gravitation universelle a unifié *dans une même théorie* les forces de gravité qui s'exercent entre les objets célestes et celles qui s'exercent entre la matière et la terre. C'est Isaac Newton qui le premier unifia la mécanique céleste (Kepler) avec la mécanique terrestre (Galilée). A. Einstein en 1917 (avec la théorie dite de la relativité générale) décrivit une théorie de la gravitation plus générale à base de géométrie riemannienne pouvant représenter la courbure de « l'espace-temps ».

J.C. Maxwell a unifié la force magnétique et la force électrique dans la théorie classique de l'électromagnétisme (1864), ensuite Fermi puis Glashow (1961), puis Weinberg et Salam (vers les années 1967) ont contribué à l'unification des interactions faible et électromagnétique en une théorie dite électrofaible unique.

+ Suggestion lecture, voir sous Moodle *Interlude Les interactions en Physique_1 puis _2.pdf*

Pré-COURS

(*A lire sous site Moodle*, voir .pdf)

« Pré-requis minimal du vectoriel au lycée pour préparer le début du supérieur : quelques notions sur le vectoriel et ses notations, ses calculs, sa géométrie»

….vers l'entrée du Supérieur.

⇨ **Notions basiques à lire après son baccalauréat avant l'entrée du 1er cours de Mécanique au 1er semestre** (.pdf de 15 pages)

INTRODUCTION

INTRODUCTION

(1)

- La statique : c'est l'étude des corps matériels en équilibre. (analyse vectorielle)
- La cinématique : c'est l'étude des mvts des corps matériels sans prendre en compte les causes des mvts. Seules les trajectoires (positions $\vec{r}(t)$), vitesses $\vec{v}(t)$, accélérations $\vec{a}(t)$ sont étudiées.
- La dynamique : c'est l'étude des mvts des corps en tenant compte des causes de ces mvts (échelle macro- ou micro-scopique). Existence d'interactions décrites par des forces
- Système International (SI) ⇒ MKS

longueur	L	unité	m
temps	T	unité	s

ex : pour la cinématique :

trajectoire : position : L

vitesse : $L.T^{-1}$

accélération : $L.T^{-2}$

(2)

- Quelques longueurs (en mètre(s) ; m) (ordre de grandeurs)

	(m)
molécule	10^{-8}
$\lambda_{\text{lumière}}$	10^{-6}
grain de sable	10^{-3}
Etudiant(e)	$10^{0} = 1$
Terre (diamètre)	10^{7}
distance (Terre-Lune)	10^{8}
distance (Terre-Soleil)	10^{11}
Etoile(s) (+ proche)	10^{17}
distance entre galaxie	10^{22}

- Remarques :
- Une année lumière $\simeq 10^{16}$ m = distance parcourue par la lumière (célérité $c = 3.10^{8}$ m/s) en une année.
- $1\,Å = 10^{-10}$ m

• Quelques durées (en seconde(s) ; s) (3)

	(s)
Vibration atomique	10^{-15}
Rotation molécule	10^{-12}
Tps lumière pour parcourir 1 m	10^{-9}
Période T onde radio	10^{-6}
période T onde sonore	10^{-3}
Un jour	10^{5}
Vie humaine	10^{9}
âge système solaire	10^{17}

• place de la mécanique classique

0 — (1/10) c — c — vitesse

Mécanique classique Newton (1642-1727)	Mécanique classique relativiste Einstein (en 1905-1917)
{ Physique Mécanique Quantique (1925 : De Broglie, Bohr, Schrödinger, Heisenberg) dimensions	{ Physique Mécanique Quantique relativiste Dirac (1902-1984) Klein et Gordon

• Postulats de la mécanique Classique (4)

• Le temps est absolu et donc dissocié de l'espace (il est le même dans tout l'espace, c'est un paramètre t, pas une dimension) ;

• L'espace physique est isotrope ; il est Euclidien.

• Remarques : (relativité restreinte, 1905)

• Dès l'année prochaine, nous montrerons que la référence absolue n'existe pas ! (Einstein). La notion de trajectoire sera relative, tout comme celle de la longueur, de la durée, de la vitesse. Ces « réalités » (trajectoire, etc...) seront des réalités relatives de perspectives, perspectives dynamiques.

• On introduira alors la notion : « d'espace-temps ».

CHAPITRE I)
CINEMATIQUE DU POINT MATERIEL

- **Référentiels (Galiléens ou d'inertie), repères et systèmes de coordonnées (2D, 3D) cartésiens, polaires, cylindriques, sphériques**

- **Notions de trajectoire, position, vitesse, accélération, expressions et mouvements**

- **Vers les référentiels non Galiléens et la relativité des mouvements**

- **Lois de composition des vitesses et des accélérations.**

I.1) Les différents repères : repérage d'un point M

- **L'Espace est caractérisé par un référentiel (S)** ; le référentiel (S) est défini comme un solide (ou ensemble de solides) constituant une figure stable au cours du temps, son origine O et son étalon de longueur.

- Ceci permet alors de définir **la position**, à chaque *instant t*, $\vec{r}(t) = \overrightarrow{OM}(t)$ (et donc **la *trajectoire*** globale au final) d'un objet, mobile ou point M au cours du ***temps t*** dans un **référentiel (S) = {*repère* spatial + *temps t*}**

La position $\vec{r}$ étant un vecteur, le repérage sera fera donc par 3 nombres paramètres appelés coordonnées (notre Espace étant défini par 3 dimensions spatiales à notre échelle). Il existe différents repères (cartésien, polaire, cylindrique, sphérique, torique…) et coordonnées associées.
La distance *OM* = *d(OM)* = $\left\|\overrightarrow{OM}\right\|$ se nomme la *norme* du vecteur $\overrightarrow{OM}$.

- **Historique sur la notion de temps :** Pour I. Newton, le temps apparait comme une quantité particulière indépendante qui 'flue*' ou 'coule' uniformément' et qui est 'corrélative' aux autres quantités dites 'relatives' étudiées. Dans les Principes mathématiques de la philosophie naturelle de Newton : *« Le temps absolu, vrai et mathématique, en soi par sa nature sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément et s'appelle aussi durée… »*.

+ Suggestion lecture, voir sous Moodle *Article_Etienne-Klein_leTemps.pdf*


I. Newton (1642-1727). [Phot. Giraudon.]

* Voir récapitulatif d'Histoire des Sciences (infra, …/…) sur la méthode dite des 'fluxions' de I. Newton

La méthode des ‘fluxions’ de Sir Isaac Newton
(Histoire des Sciences)

Newton développa en particulier la conception de quantité infinitésimale (accroissement noté ‘*o*’) par sa méthode dite des fluxions (développée pendant l’hiver 1670-1671, mais qui fut publiée qu’en 1734). Newton considérait alors l’ensemble des quantités mathématiques comme *engendré par une augmentation continuelle*… à la manière de l’espace que décrit par exemple un mobile en mouvement. L’approche de Newton est celle de la mécanique. Il imagine alors les ‘*vitesses’* des mouvements qui les engendrent qui seront appelées ‘*fluxions*’ et les quantités mathématiques qui évoluent seront qualifiées de ‘*fluentes*’ (pour analogie, si *x* est une quantité fluente, sa fluxion serait noté $\dot{x}$; la fluxion de la fluxion serait la notion de dérivé seconde actuelle…). A titre d’exemple, si *x* est une grandeur ou quantité, son accroissement infiniment petit sera noté par l’addition + $\dot{x}o$. Ainsi le calcul de l’accroissement de la quantité *x* à $x+\dot{x}o$ se faisait par des développements en série sur différents ordres en *‘o’* (la formule du binôme étant déjà connue), la différence de ces deux quantités, puis le rapport relatif de ces dernières formant les premières notions de taux de variations et nombre dérivé. Newton définit ce *‘o’* comme un accroissement léger durant un intervalle de temps infiniment petit,
En 1676, il développa la méthode des premières et dernières raisons (publié en 1704, avec les notions de suites et séries existant de l’époque) qui est ni plus ni moins la notion moderne de limite et qui permit ainsi de calculer le quotient de ces infinitésimaux en grandeurs instantanées comme limites de taux de variations d’une quantité fluente (la notion de dérivée apparaît presque sous sa forme moderne). Lorsque les ordres d’accroissements notés *‘o’* disparaissent en formant le quotient, Newton les qualifient de variations ‘*évanouissantes*’…
Plus tard, concernant le rôle du temps dans l’origine des équations différentielles, Newton a interprété toutes les variables espace (par ex. en cartésien *x, y, z),* mais aussi leur dérivées *v*, et autres *fonctions* aussi comme des quantités fluentes s’écoulant en ayant des ‘*vitesses de changements*’. Ces quantités proposées et étudiées augmentent ou diminuent par fluxion uniforme à laquelle quantité il rapporte comme si c’était le temps ! *‘Methodus fluxionum et serierum infinitarum’* qui fut traduit en *‘La méthodes des fluxions et des suites infinies’,* I. Newton, 1671.
Les termes de *‘fluente’* et de *‘fluxion’* correspondent en quelque sorte à ceux de l’intégration-dérivation modernes.

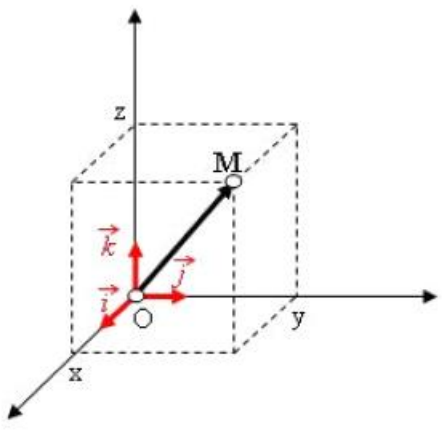
- **Principe de causalité :**

La cause est pour tous les observateurs , antérieure à l'effet produit (ordre temporel). De plus, de manière plus générale, la chronologie de deux évènements *reliés causalement* est toujours la même quelque soit l'observateur.
Plus précisément, il existe en physique (relativité restreinte) une vitesse limite, et tout effet a une cause ; cette cause précède l'effet dans tout référentiel galiléen d'un délai au moins égal à la durée nécessaire pour aller du lieu de la cause au lieu de l'effet à la vitesse limite indépassable.

La 'course' du temps produit la durée $\Delta t = t_2 - t_1$, 'éloignement' dans le temps de deux évènements de dates t_1 et t_2.

Le principe de causalité semble être une des contraintes 'réalistes' imposées à toute théorie mathématiquement cohérente afin qu'elle soit physiquement admissible… Cette causalité a une antériorité logique qualifiée d'implication en logique.

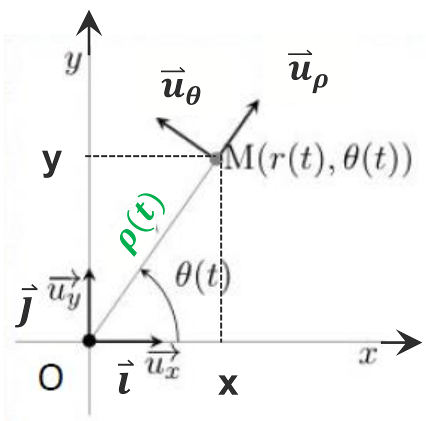
I.1.1) Le repère cartésien (3D) - Repère $\mathcal{R}_{cart}(O,\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})$ $\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k}$ trièdre direct (fixe)



- Vecteurs unitaires du repère (ou base) cartésien ($\vec{\imath}=\vec{u}_x, \vec{\jmath}=\vec{u}_y, \vec{k}=\vec{u}_z$) et *propriétés…*
- Ecriture de la position $\vec{r}$ en fonction des coordonnées :

$$\vec{r}(t)=\overrightarrow{OM}(t)=\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix}_{\mathcal{R}(\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})} = x(t)\vec{\imath}+y(t)\vec{\jmath}+z(t)\vec{k} \qquad \text{(I-1)}$$

I.1.2) Le repère polaire (2D) - base normée $(\vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta)$ ⚠ (non fixe, se déplace)



⚠ Savoir tracer le schéma complet

- Vecteurs de la base polaire et *propriétés…*
- $\theta(t)$ est un angle $(\overrightarrow{Ox},\overrightarrow{OM})$ et ρ une distance (O →M)
- Lien coordonnées (ou formule chgt de repères)

$$\begin{cases} x=\rho\cos\theta \\ y=\rho\sin\theta \end{cases} \longleftrightarrow \begin{cases} \rho=\sqrt{x^2+y^2} \\ \theta=arctg\left(\dfrac{y}{x}\right) \end{cases} \qquad \text{(I-2)}$$

- Ecriture de la position : $\boxed{\vec{r}(t)=\overrightarrow{OM}(t)=\rho(t)\vec{u}_\rho}$

⚠ La coordonnée θ n'intervient pas dans l'écriture de la position $\vec{r}$! Expliquez pourquoi ?

- **Interlude mathématique des vecteurs 'tournants' $\vec{u}_\rho$ et $\vec{u}_\theta$:**

+ voir sous Moodle *Notion de différentielle d'un vecteur.pdf*
Interlude Mathématique Calcul Diff fonction.pdf

D'après schéma polaire (par projection): $\vec{u}_\rho \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix}_{\mathcal{R}cart.}$ et $\vec{u}_\theta \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix}_{\mathcal{R}cart.}$ $\frac{d}{d\theta}$

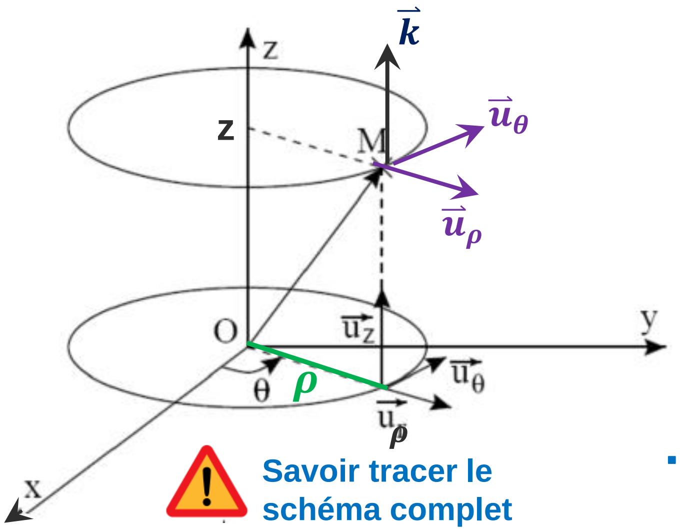
Soit : $\boxed{\frac{d}{d\theta}\vec{u}_\rho = \vec{u}_\theta}$ **Rotation $\pi/2$** à savoir

La dérivée d'un vecteur unitaire par rapport à l'angle qui définit sa direction, est le vecteur unitaire qui lui est perpendiculaire

De même : $\frac{d}{d\theta}\vec{u}_\theta = \frac{d}{d\theta}\begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix} = -\vec{u}_\rho = \frac{d}{d\theta}\frac{d}{d\theta}\vec{u}_\rho = \frac{d^2}{d\theta^2}\vec{u}_\rho$

Quelles sont les coordonnées des vecteurs unitaires $\vec{u}_\rho$ et $\vec{u}_\theta$ dans $\mathcal{R}_{polaire}$ cette fois-ci ?

I.1.3) Le repère cylindrique (3D) - Repère $\mathcal{R}_{cyl}\left(O, \vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta, \vec{k} = \vec{u}_z\right)$ (trièdre non fixe)



Savoir tracer le schéma complet

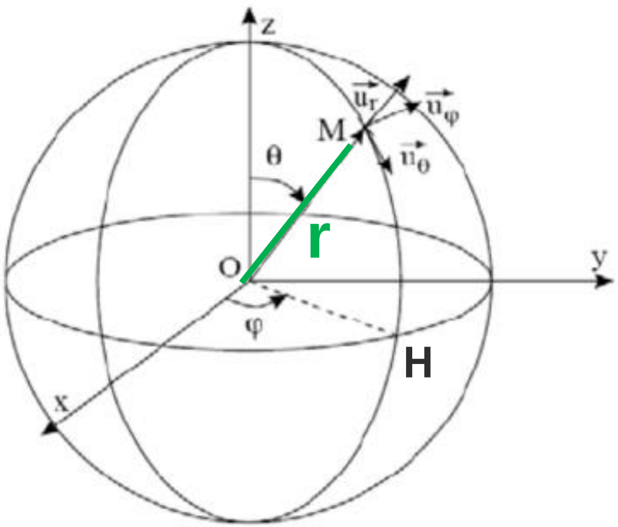
Pol. **Cart.**

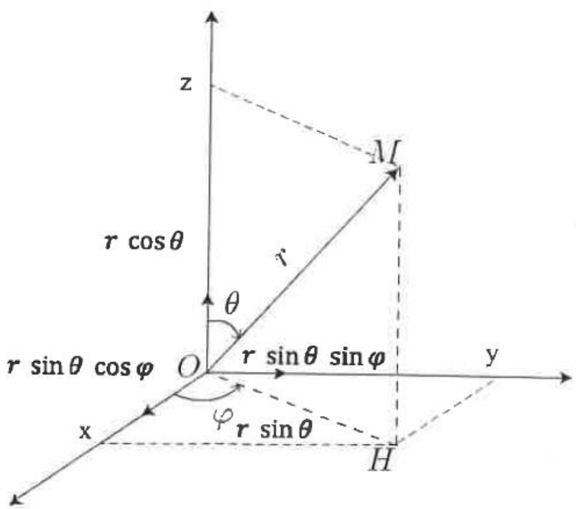
- **Lien coordonnées (ou formule chgt de repères)**

$$\begin{cases} x = \rho\cos\theta \\ y = \rho\sin\theta \\ z = z \end{cases} \longleftrightarrow \begin{cases} \rho = \sqrt{x^2+y^2} \\ \theta = arctg\left(\frac{y}{x}\right) \\ z = z \end{cases} \quad \text{(I-3)}$$

- **Ecriture de la position :** $\boxed{\vec{r}(t) = \overrightarrow{OM}(t) = \rho(t)\vec{u}_\rho + z(t)\vec{u}_z}$

I.1.4) Le repère sphérique (3D)





Repère $\mathcal{R}_{sph\acute{e}r.}\left(O, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_\varphi\right)$ (trièdre direct non fixe)

- **Vecteurs du repère sphérique et *propriétés…***

- **r, une distance (O → M),**
  $\theta(t)$ est un angle $\left(\overrightarrow{Oz}, \overrightarrow{OM}\right) \in [0\ \pi]$, colatitude
  $\varphi(t)$ est un angle $\left(\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{OH}\right) \in [0\ 2\pi]$, azimut ou longitude

- **Lien coordonnées (ou formule chgt de repères)**

$$\begin{cases} x = r\sin\theta\cos\varphi \\ y = r\sin\theta\ \sin\varphi \\ z = r\cos\theta \end{cases} \longleftrightarrow \begin{cases} r = \sqrt{x^2+y^2+z^2} \\ \varphi = arctg\left(\dfrac{y}{x}\right) \\ \cos\theta = \dfrac{z}{r} = \dfrac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \end{cases} \tag{I-4}$$

- **Ecriture de la position :** $\boxed{\vec{r}(t) = \overrightarrow{OM}(t) = r(t)\vec{u}_r}$

Les coordonnées θ et φ n'interviennent pas dans l'écriture de la position $\vec{r}$.

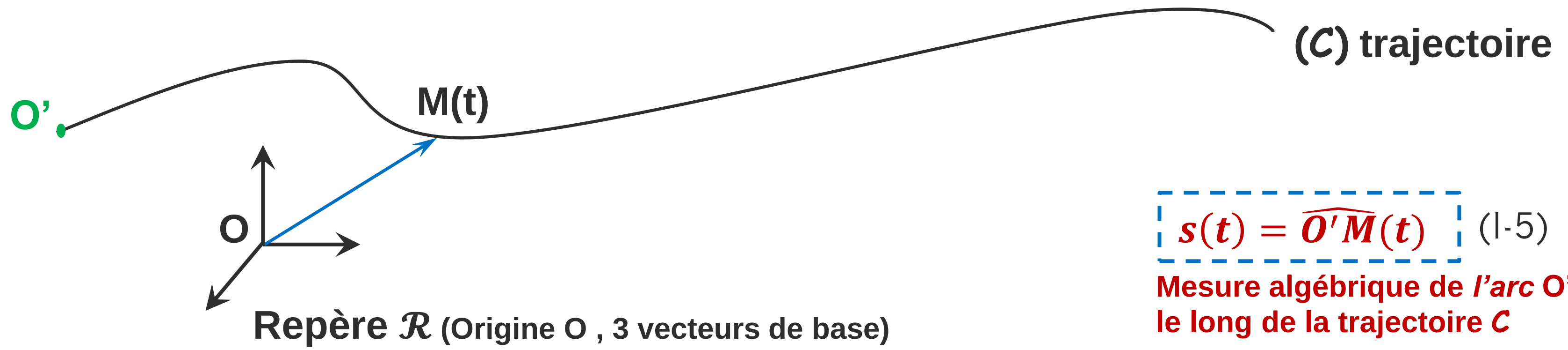
I.2) Cinématique du point M mobile : Position, Vitesse, Accélération

- La cinématique étudie le mouvement des objets/mobiles indépendamment des causes qui lui donnent naissance ; elle repose sur une description de géométrie euclidienne de l'espace et d'un temps newtonnien absolu.

I.2.1) La trajectoire

- C'est l'ensemble des points occupés par le mobile M au cours du temps t ou une courbe 3D : $\vec{r}(t) = \overrightarrow{OM}(t)$. => soit une relation entre les coordonnées : par ex. *{y(x), z(x)}*, ou bien *{r(φ), θ(φ)}*…soit les relations paramétriques des coordonnées en fonction du *paramètre temps t* (ou équations horaires) comme *{x(t), y(t), z(t)}* ou bien *{ρ(t), θ(t), z(t)}* ou encore *{r(t), θ(t), φ(t)}* …

- Notion d'abscisse curviligne *s(t)* d'une trajectoire

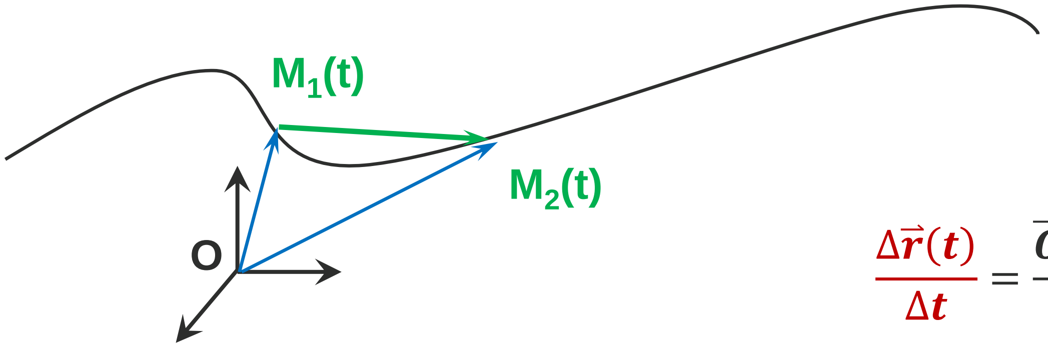


$$\boxed{s(t) = \widehat{O'M}(t)} \quad \text{(I-5)}$$

Mesure algébrique de *l'arc* O'M le long de la trajectoire *C*

Ecrire les trois équations horaires *x(t), y(t)* d'un mouvement circulaire en fonction du rayon *R* et de *θ(t)*. Faire un schéma.
Comment s'écrirait l'équation ou l'abscisse curviligne d'un tel mouvement avec l'arc *s(t)* = ?

I.2.2) Notion de vitesse (ou *variation de position $\vec{r}(t)$ au cours du temps*)



$$\frac{\Delta\vec{r}(t)}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{OM_2} - \overrightarrow{OM_1}}{\Delta t} = \frac{\overrightarrow{M_1M_2}}{\Delta t}$$

Repère $\mathcal{R}$ (Origine O , 3 vecteurs de base)

- Le vecteur vitesse instantané d'un point (M) dans un référentiel $\mathcal{R}$ sera alors définit comme la limite (au sens de Cauchy) de la 'vitesse moyenne' $\frac{\Delta\vec{r}(t)}{\Delta t}$:

$$\boxed{\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}(t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}(t)}{dt}} \quad \text{(I-6)}$$

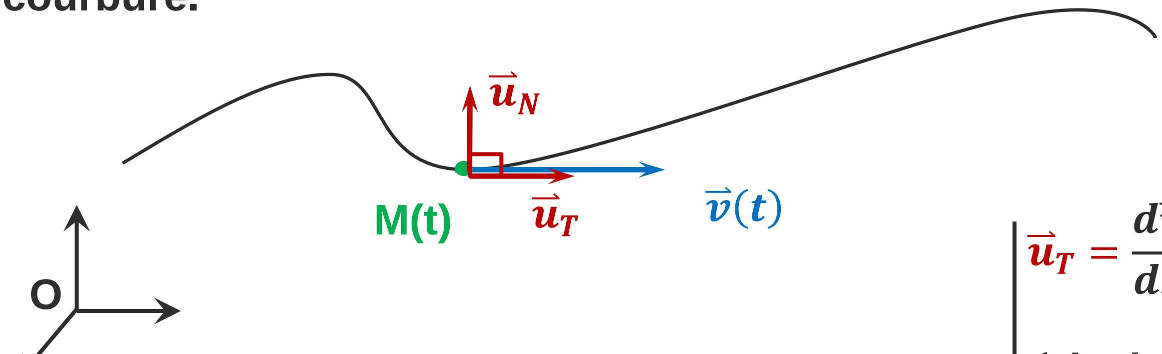
- Le *vecteur* vitesse est donc la *dérivée du vecteur position*, il en résulte qu'il sera ***tangent à la trajectoire (et de sens celui du mouvement)***. Dans le S.I. (MKS), de dimension $L.T^{-1}$, sa norme se mesurera alors en ***unité $m.s^{-1}$.***

- Par la suite, deux quantités importantes seront définies à partir du vecteur vitesse puis de sa norme en mécanique (*m*, étant la *masse* du mobile se déplaçant dans l'espace et le termps) : la ***quantité de mouvement*** $m.\vec{v} = \vec{p}$, puis la fonction ***énergie cinétique*** $E_c(m, v) = \frac{1}{2}.m.v^2$.

Considérons un mouvement circulaire ou le module du vecteur $\vec{r}(t)$ est constant $\forall t$, soit $|\vec{r}(t)|$=constante en mètres (faire un schéma). Montrer que la dérivée ($\frac{d}{dt}$) du vecteur $\vec{r}(t)$ est perpendiculaire à $\vec{r}(t)$ (on calculera d'abord le produit scalaire de $\vec{r}(t)$ par lui-même, puis on appliquera l'opérateur différentiel $\frac{d}{dt}$ pour conclure…)

▪ **Remarque {hors programme Semestre 1} : Le repère de Frenet de base $(\vec{u}_T, \vec{u}_N)$**

▪ **En cinématique, le repère de Frenet (ou de Serret-Frenet) est un outil d'étude du comportement local des courbes . Il s'agit d'un *repère local* associé à un point M, décrivant une courbe ($\mathcal{C}$) . Il permet d'ailleurs de mener des calculs de courbure.**



($\mathcal{C}$) trajectoire

Repère $\mathcal{R}$ (Origine O , 3 vecteurs de base)

$$\vec{u}_T = \frac{d\vec{r}}{ds} = \frac{d\vec{r}}{dt}.\frac{dt}{ds} = \frac{\dot{\vec{r}}}{\|\dot{\vec{r}}\|} = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}$$

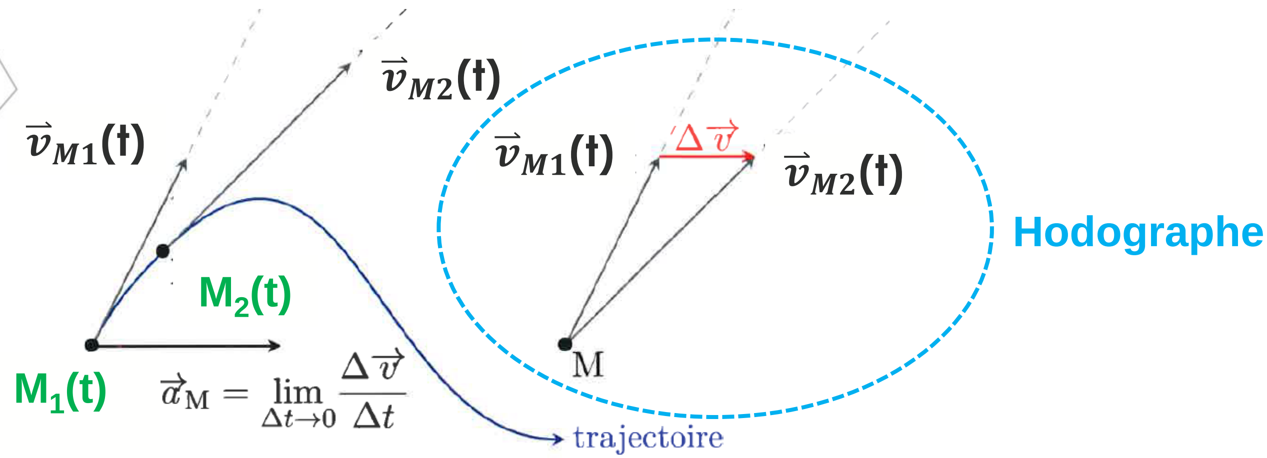
's', abscisse curviligne

▪ **La courbure κ sera alors définie comme le module ('norme') de la variation du vecteur $\vec{u}_T$ par rapport à l'abscisse curviligne 's' :**

$$\kappa_{(s)} = \left\|\frac{d\vec{u}_T}{ds}\right\| = \frac{\|\dot{\vec{u}}_T\|}{\|\vec{v}\|} = \kappa_{(t)}$$

+ {Hors programme Semestre 1 :
voir sous Moodle *Notion de Courbure.pdf* }

I.2.3) Notion d'accélération (ou *variation de vitesse* $\vec{v}(t)$ *au cours du temps*)



$$\boxed{\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}(t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \frac{d^2\vec{r}(t)}{dt^2}} \qquad \text{(I-7)}$$

- Le vecteur accélération s'obtient en dérivant le vecteur vitesse (par rapport au temps *t*), l'unité de l'accélération (de sa norme) sera le (m/s)/s soit : $m.s^{-2}$

- Le **mouvement rectiligne uniforme** se caractérise par *un vecteur accélération vecteur nul* ; ainsi le vecteur accélération peut-être vu comme 'une mesure' d'un écart au mouvement rectiligne uniforme.

Sous champ gravitationnel terrestre de combien augmente notre vitesse en chute libre chaque seconde ?

I.2.4) Expressions de la vitesse et de l'accélération (différents repères)

I.2.4-1) Repère cartésien $\mathcal{R}_{cart}(O,\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})$

(I-1)
(I-6) ⟶

$$\boxed{\vec{v}(t) =} \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} = \boxed{\dot{x}(t)\vec{\imath} + \dot{y}(t)\vec{\jmath} + \dot{z}(t)\vec{k}} = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_{cart}(O,\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})}$$

(I-8)

(I-7) ⟶

$$\boxed{\vec{a}(t) =} \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \boxed{\ddot{x}(t)\vec{\imath} + \ddot{y}(t)\vec{\jmath} + \ddot{z}(t)\vec{k}} = \begin{pmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_{cart}(O,\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})}$$

I.2.4-2) Repère polaire $\mathcal{R}_{pol}(O,\vec{u}_\rho,\vec{u}_\theta)$

(I-2)
(I-6) ⟶

$$\boxed{\vec{v}(t) =} \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} = \boxed{\dot{\rho}(t)\vec{u}_\rho + \rho(t)\dot{\theta}(t)\vec{u}_\theta} = \begin{pmatrix} \dot{\rho}(t) \\ \rho(t)\dot{\theta}(t) \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_{pol}(O,\vec{u}_\rho,\vec{u}_\theta)}$$

(I-9)

(I-7) ⟶

$$\boxed{\vec{a}(t) =} \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \boxed{\left[\ddot{\rho}(t) - \rho(t)\dot{\theta}^2(t)\right]\vec{u}_\rho + \left[\rho(t)\ddot{\theta} + 2\dot{\rho}(t)\dot{\theta}(t)\right]\vec{u}_\theta}$$

$$= \begin{pmatrix} \ddot{\rho}(t) - \rho(t)\dot{\theta}^2(t) \\ \rho(t)\ddot{\theta} + 2\dot{\rho}(t)\dot{\theta}(t) \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_{pol}(O,\vec{u}_\rho,\vec{u}_\theta)}$$

Dimension de l'accélération:
termes constitués avec $\ddot{\ }$ ou $\dot{\ }\ \dot{\ }$

Bien comprendre la démonstration, bien la connaître. Maitriser le calcul des dérivés relatif aux vecteurs 'tournants', ils 'produisent' des projections sur les vecteurs de la base des autres directions

▪ Remarque: une autre manière de calculer $\vec{v}(t)$ (slide 15, schéma polaire) serait d'écrire le déplacement élémentaire $d\vec{r} = d\rho\vec{u}_\rho + \rho d\theta\vec{u}_\theta$ puis de diviser par *dt*.

I.2.4-3) Repère cylindrique $\mathcal{R}_{cyl}(O, \vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z = \vec{k})$

« Cylindrique = concaténation du résultat 2D du Polaire || résultat 3ème coordonnée cartésienne »

(I-3)
(I-6) ⟶ $$\boxed{\vec{v}(t) =} \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} = \boxed{\dot{\rho}(t)\vec{u}_\rho + \rho(t)\dot{\theta}(t)\vec{u}_\theta + \dot{z}\vec{u}_z} = \begin{pmatrix} \dot{\rho}(t) \\ \rho(t)\dot{\theta}(t) \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_{cyl}(O, \vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta, \vec{u}_k)}$$

Polaire || Cart.

(I-10)

(I-7) ⟶ $$\boxed{\vec{a}(t) =} \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \boxed{[\ddot{\rho}(t) - \rho(t)\dot{\theta}^2(t)]\vec{u}_\rho + [\rho(t)\ddot{\theta} + 2\dot{\rho}(t)\dot{\theta}(t)]\vec{u}_\theta + \ddot{z}\vec{u}_z}$$

Polaire || Cart.

$$= \begin{pmatrix} \ddot{\rho}(t) - \rho(t)\dot{\theta}^2(t) \\ \rho(t)\ddot{\theta} + 2\dot{\rho}(t)\dot{\theta}(t) \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_{cyl}(O, \vec{u}_\rho, \vec{u}_\theta, \vec{u}_k)}$$

Dimension de l'accélération:
termes constitués avec $\ddot{\ }$ *ou* $\dot{\ } \times \dot{\ }$

▪ Application au mouvement circulaire uniforme (vitesse de rotation $\vec{\omega} = \dot{\theta}\vec{u}_z$ fixée)

Faire un schéma, appliquer les relations (I-10) pour déterminer les expressions des vecteurs vitesse et accélération.

Vérifier par le calcul que pour le mouvement circulaire uniforme : $\vec{\omega} \wedge \overrightarrow{OM} = \vec{v}$, puis que $\vec{\omega} \wedge (\vec{\omega} \wedge \overrightarrow{OM}) + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \wedge \overrightarrow{OM} = \vec{a}$

I.2.4-4) Repère sphérique $\mathcal{R}_{sphérique}(O, \vec{u}_\rho\ , \vec{u}_\theta, \vec{u}_\varphi)$ {hors programme S1}

(I-4)
(I-6) $\longrightarrow$ $$\boxed{\vec{v}(t) =} \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt} = \boxed{v_r\vec{u}_r + v_\theta\vec{u}_\theta + v_\varphi\vec{u}_\varphi}$$

(I-12)

avec, $\begin{cases} \text{vitesse radiale } v_r = \dot{r} \\ \text{vitesse méridienne } v_\theta = r\dot{\theta} \\ \text{vitesse transverse } v_\varphi = r\, sin\,\theta\ \dot{\varphi} \end{cases}$

- ***Remarque:*** une autre manière de calculer $\vec{v}(t)$ (slide 17, schéma sphérique) serait d'écrire le déplacement élémentaire $d\vec{l} = dr\vec{u}_r + rd\theta\vec{u}_\theta + r\sin\theta\ d\varphi$ puis de diviser par *dt*.
- ***Exercice:*** écrire l'expression de la fonction énergie cinétique E_c en coordonnées sphériques.

(I-7) $\longrightarrow$ $$\boxed{\vec{a}(t) =} \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \boxed{a_r\vec{u}_r + a_\theta\vec{u}_\theta + a_\varphi\vec{u}_\varphi}$$

(I-13)

avec, $\begin{cases} \text{accélération radiale } a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r sin^2\theta\dot{\varphi}^2 \\ \text{accélération méridienne } a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\sin\theta\cos\theta\ \dot{\varphi}^2 \\ \text{accélération transverse } a_\varphi = r\, sin\,\theta\ddot{\varphi} + 2\sin\theta\dot{r}\dot{\varphi} + 2r\cos\theta\ \dot{\theta}\ \dot{\varphi} \end{cases}$

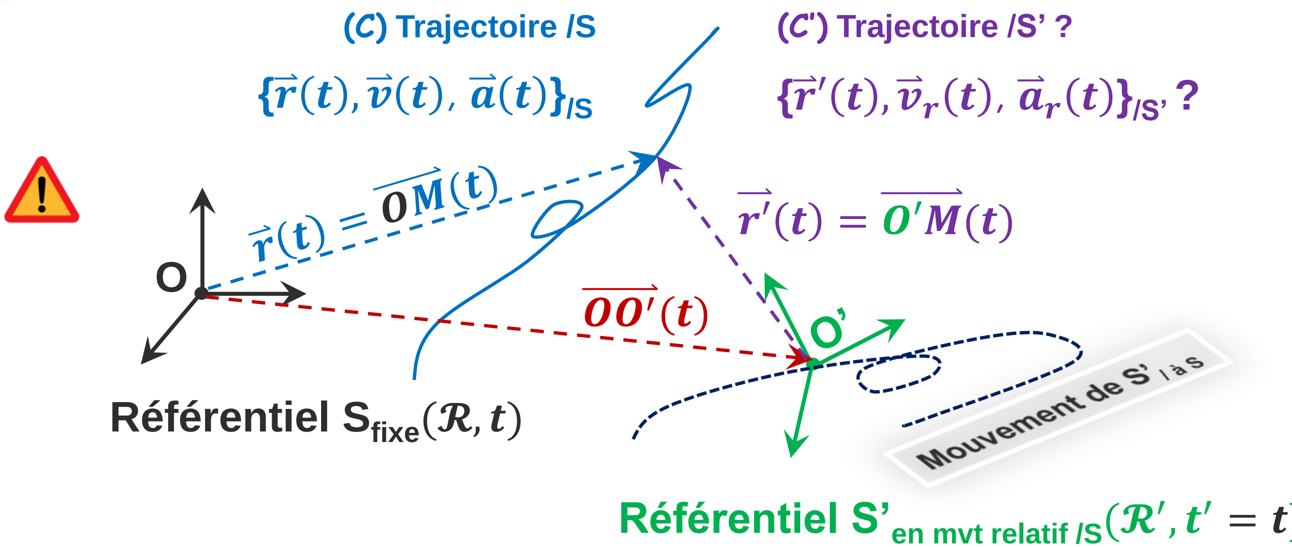
I.3) Lois de composition des mouvements, changement de référentiel, relativité (de Galilée)

▪ Etablir une méthodologie pour les formules de changement de référentiels est nécessaire de manière à exprimer l'ensemble de la cinématique (position, vitesse , accélération) lorsqu'elle est étudiée d'un certain 'point de vue d'observation' ou 'depuis' un autre référentiel. Ceci permettra d'ailleurs de souligner l'aspect 'relatif' des mouvements et de leurs caractéristiques suivant le référentiel d'étude choisi.

(*Exemple :* chute d'un objet le long d'un mât de bateau en mouvement (/bateau puis /plage considérée ici 'fixe')

I.3.1) Définition et position du problème

▪ Idée : Considérer deux référentiels S et S' en mouvement relatif le plus général l'un par rapport à l'autre. Par exemple, S_{fixe} et $S'_{\text{mvt relatif /S}}$ pouvant subir par à S_{fixe} de nombreuses translations et/ou rotations accélérées ou non…



$$\vec{r}(t) = \overrightarrow{OM}(t) = \overrightarrow{OO'}(t) + \overrightarrow{O'M}(t) = \overrightarrow{OO'}(t) + \vec{r}'(t) \quad \text{(I-14)}$$

▪ **Méthodologie :** de manière à accéder aux lois de compostions respectivement des vitesses (lien $\vec{v}(t)$, $\vec{v_r}(t)$) puis des accélérations (lien $\vec{a}(t)$, $\vec{a_r}(t)$), il est nécessaire de différencier par ***l'opérateur total exact*** $\frac{d}{dt}$ (ou dériver par rapport au temps) la relation (I-14) une première fois, puis une seconde fois. Le calcul sera mené avec S et S' en coordonnées cartésiennes car les lois (formules) de compositions obtenues sont générales et identiques quelque soit le système de coordonnées utilisées pour ce calcul de relativité du mouvement !

I.3.2) Loi de composition des vitesses

$$\begin{cases} (S): \vec{r}(t) = \overrightarrow{OM}(t)_{\mathcal{R}(\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k})} = x(t)\vec{\imath} + y(t)\vec{\jmath} + z(t)\vec{k} \\ (S'): \vec{r}'(t) = \overrightarrow{O'M}(t)_{\mathcal{R}'\left(\vec{i'},\vec{j'},\vec{k'}\right)} = x'(t)\vec{i'} + y'(t)\vec{j'} + z'(t)\vec{k'} \end{cases}$$

avec (I-14)

$\downarrow \frac{d}{dt}$

Vitesse 'd'entrainement' (S' / à S)

$$\vec{v}_{(S)} = \vec{v}_{e\,(S'/S)} + \vec{v}_{r(S')}$$

Vitesse 'absolue' dans (S)

Vitesse 'relative' dans (S')

(translation S' / à S) (rotation S' / à S)

avec,
$$\begin{cases} \vec{v}_{e\,(S'/S)} = \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} + x'\frac{d\vec{i'}}{dt} + y'\frac{d\vec{j'}}{dt} + z'\frac{d\vec{k'}}{dt} \\ \vec{v}_{r(S')} = \dot{x}'\vec{i'} + \dot{y}'\vec{j'} + \dot{z}'\vec{k'} \quad \text{(par définition aussi !)} \end{cases}$$

(I-15)

▪ **Cas S' en *translation pure* / à S, conclusion.**

▪ **Cas S' en Rotation pure / à S, étude et conclusion.**

On considère *O=O'*, puis un *axe de rotation [Oz) = [O'z')* pour la rotation particulière considérée ici de S' / à S (c'est-à-dire $\vec{k} = \vec{k}$' et $\frac{d\vec{k'}}{dt}$ = *0*), mais le résultat sera généralisable aux autres axes susceptibles d'être en rotations.

Dans ce cas le *vecteur de rotation* (d'entrainement) s'écrit $\vec{\omega}_e$= $\omega_e\vec{k}$, avec ω_e= $\frac{d\theta}{dt}$ = $\dot{\theta}$ (en rad/s).

Faire un schéma, calculer $\vec{v}_{e\,(S'/S)}$ de (I-15) dans ce cas (calculs de $\frac{d\vec{i'}}{dt}$ et $\frac{d\vec{j'}}{dt}$ nécessaires). Conclure que pour la rotation pure $\vec{v}_{e\,(S'/S)} = \vec{\omega}_e \wedge \vec{r'}$.

▪ **En conclusion finale, la loi (I-15) de composition des vitesses se simplifiera en :**

$$\boxed{\vec{v}_{(S)} = \frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} + (\vec{\omega}_e \wedge \vec{r'}) + \vec{v}_{r(S')}} \qquad \text{(I-16)}$$

Formule à connaître et à savoir utiliser

I.3.2) Loi de composition des accélérations

▪ **Appliquer l'opérateur $\frac{d}{dt}$ directement sur l'expression (I-15) des lois de compositions des vitesses:**

(I-17)

Accélération 'd'entrainement' (S' / à S)

$$\vec{a}_{(S)} = \vec{a}_{e\,(S'/S)} + \vec{a}_c + \vec{a}_{r(S')}$$

avec,

Accélération 'absolue' dans (S)

Accélération de Coriolis)

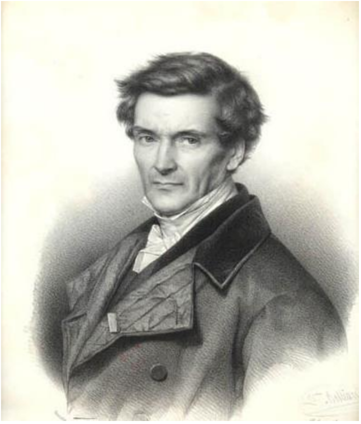
Accélération 'relative' dans (S')

(translation S' / à S) **(rotation S' / à S)**

$$\vec{a}_{e\,(S'/S)} = \frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + x'\frac{d^2\vec{i'}}{dt^2} + y'\frac{d^2\vec{j'}}{dt^2} + z'\frac{d^2\vec{k'}}{dt^2}$$

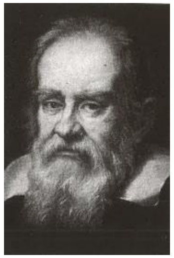
$$\vec{a}_c = 2.\left(\dot{x}'\frac{d\vec{i'}}{dt} + \dot{y}'\frac{d\vec{j'}}{dt} + \dot{z}'\frac{d\vec{k'}}{dt}\right)$$

$$\vec{a}_{r(S')} = \ddot{x}'\vec{i'} + \ddot{y}'\vec{j'} + \ddot{z}'\vec{k'}$$ **(par définition aussi !)**



G-G de Coriolis est un mathématicien et ingénieur français (1792-1843). Il a donné son nom à l'accélération de Coriolis, de laquelle découle la force de Coriolis, laquelle affecte le mouvement des corps dans un référentiel en rotation. L'origine du terme d'accélération de Coriolis est clairement apparu par les calculs historiques de relativité entre deux référentiels différents et 'points de vues'.

- Cas S’ en *translation pure* / à S, conclusion $\vec{a}_{(S)} = \vec{a}_{e\,(S'/S)} + \vec{a}_{r(S')}$
- Cas S’ en *translation ‘uniforme’* / à S (réf. Galiléens) $\vec{a}_{(S)} = \vec{a}_{r(S')}$



Galilée (Galileo Galilei), mathématicien, géomètre, physicien [1564-1642]

- Cas S’ en Rotation pure / à S, étude et conclusion.

On considère *O=O’*, puis un *axe de rotation [Oz) = [O’z’)* pour la rotation particulière considérée ici de S’ / à S (c’est-à-dire $\vec{k} = \vec{k}$’ et $\frac{d\vec{k'}}{dt} = \frac{d^2\vec{k'}}{dt^2}$ = *0*), mais le résultat sera généralisable aux autres axes susceptibles d’être en accélérations de rotations {rappel le *vecteur de rotation* (d’entrainement) s’écrit $\vec{\omega}_e = \omega_e\vec{k}$, avec $\omega_e = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$ (en rad/s) , l’accélération de la rotation $\vec{\omega}_e$ sera sa dérivé / au temps *t*}.

- Faire un schéma, calculer $\vec{a}_{e\,(S'/S)}$ de (I-17) dans ce cas (calculs de $\frac{d^2\vec{i'}}{dt^2}$ et $\frac{d^2\vec{j'}}{dt^2}$ nécessaires). Conclure que pour la rotation pure $\vec{a}_{e\,(S'/S)} = \frac{d\vec{\omega}_e}{dt} \wedge \vec{r'} + \vec{\omega}_e \wedge (\vec{\omega}_e \wedge \vec{r'})$.

- Calculer $\vec{a}_c$ de (I-17) dans ce cas (calculs de $\frac{d^2\vec{i'}}{dt^2}$ et $\frac{d^2\vec{j'}}{dt^2}$ nécessaires). Conclure que pour la rotation pure $\vec{a}_c = 2(\vec{\omega}_e \wedge \vec{v}_{r(S')})$. Discutez le *sens physique* de ce terme de *‘mélange’* ou de ‘Coriolis’. Discuter de certaines situations avec existences ou non de ce terme.

▪ En conclusion, cette relativité des mouvements en spatial, va impacter une loi de composition des accélérations sous la forme

(I-18)

$$\vec{a}_{(S)} = \vec{a}_{e\,(S'/S)} + \vec{a}_c + \vec{a}_{r(S')}$$

avec,

$$\left|\begin{array}{l} \vec{a}_{e\,(S'/S)} = \dfrac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} + \dfrac{d\vec{\omega}_e}{dt} \wedge \vec{r'} + \vec{\omega}_e \wedge \left(\vec{\omega}_e \wedge \vec{r'}\right) \\ \\ \vec{a}_c = 2\left(\vec{\omega}_e \wedge \vec{v}_{r(S')}\right) \end{array}\right.$$

Formule à connaître
et à savoir utiliser

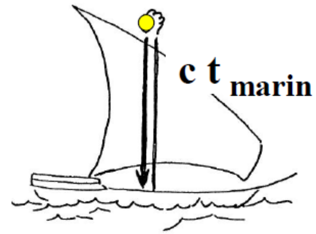
{ Hors Semestre 1: le passage à la relativité restreinte d'Einstein (1905) sera fera par deux aspects à ajouter :
- *l'existence d'une célérité limite* (noté *c* ou célérité maximale des informations, ou champs) et donc l'impossibilité d'atteindre des vitesses infinies (le domaine de définition des vitesses est borné ainsi)
- *le concept d'un temps t' de S' différent de t de S* (voir schéma du transparent 27) pour des vitesses dites relativistes et donc proches de *c*.
- les transformations mathématiques de H. A. Lorentz (1853-1928) permettront alors de décrire la 'relativité restreinte' d'A. Einstein }

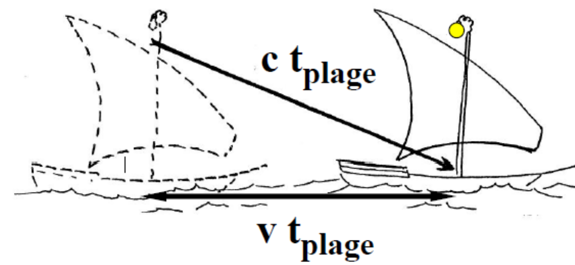
· Pour aller plus loin « La ‘relativité restreinte’ d’A. Einstein »

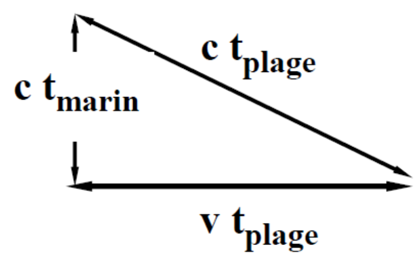
Par le Pr. Jean-Marie Vigoureux, Institut CNRS UTINAM (voir livre ‘L’Univers en Perspective’ et lien Conférence invité)

La base étant tout d’abord l’idée d’Albert Einstein postulant que la célérité de la lumière *c* est la même quelque soit le référentiel et donc constante : « La vitesse de la lumière dans le vide est indépendante du mouvement de sa source » (voir expérience historique d’interférométrie de Michelson). De plus, elle sera ensuite la célérité limite de toute information et signal en science.

Conférence à : https://www.youtube.com/watch?v=rnfWkZz0174







$$t_{plage} = \frac{t_{marin}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

La notion de durée n’est donc pas absolue !