Maxi Fiches

2e édition

Physique

Mécanique, thermodynamique, électricité, ondes, optique

Sophie Cantin-Rivière
Cyril Pailler-Mattei
Françoise Perrot
Anne-Laure Valette

DUNOD

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072430-7

Table des matières

Table des matières III

Avant-propos 1

1 La mécanique 2

2 Cinématique du point matériel 4

3 Des exemples de forces 8

4 Les trois lois de Newton 12

5 Loi de composition des mouvements 16

6 Mouvement de rotation 18

7 Travail et puissance d'une force 20

8 Énergie cinétique et théorème de l'énergie cinétique 24

9 Énergie potentielle 26

10 Énergie mécanique 30

11 Théorème du moment cinétique 32

12 Forces centrales 34

13 Oscillations mécaniques libres non amorties 36

14 Oscillations mécaniques libres amorties 40

15 Oscillations mécaniques forcées 44

16 Systèmes de n points matériels 48

17 La thermodynamique 52

18 Gaz et phases condensées 54

19 Travail des forces de pression 56

20 Premier Principe 58

21 Enthalpie 62

22 Second Principe 64

23 Identité thermodynamique 66

24 Contact thermique 68

25 Détentes de gaz 72

26 Transition de phase (1) 74

27 Transition de phase (2) 79

28 Machines thermiques 84

29 Conduction thermique 88

30 La mécanique des fluides 92

31 Statique des fluides 94

32 Écoulement parfait 99

33 Intensité et tension en électrocinétique 104

34 Puissance instantanée 108

35 Dipôles électrocinétiques 110

36 Réseaux linéaires en régime continu 116

37 Régimes libres du premier ordre 120

38 Régimes libres du deuxième ordre 125

39 Régime sinusoïdal forcé 130

40 Puissance en régime sinusoïdal 134

41 Résonances 137

42 Filtrage électrique 142

43 Loi de Coulomb 146

44 Champ électrostatique 148

45 Potentiel électrostatique 152

46 Dipôle électrostatique 156

47 Théorème de Gauss 158

48 Conducteurs en équilibre 160

49 Condensateurs 162

50 Énergie électrostatique 164

51 Champ magnétique 166

52 Loi de Biot et Savart 168

53 Théorème d'Ampère 170

54 Forces magnétiques 174

55 Dipôle magnétique 178

56 Phénomènes d'induction 180

57 Inductance 182

58 Équations de Maxwell 184

59 Les ondes 186

60 Équation de d'Alembert 188

61 Ondes sonores 192

62 Ondes électromagnétiques dans le vide 196

63 L'optique 198

64 Rayons lumineux, images optiques 200

65 Réflexion et réfraction 204

66 Miroir plan 208

67 Prisme 210

68 Lentilles minces 214

69 Relations des lentilles minces 218

70 Focométrie 220

71 L'œil 222

72 Loupe 224

73 Instruments d'optique 226

74 Interférences lumineuses 231

75 Interférences à deux ondes 236

76 Diffraction 241

77 Réseaux optiques 246

A Systèmes de coordonnées et vecteur position 249

B Éléments d'analyse vectorielle 252

C Notation complexe 254

Avant-propos

Cet ouvrage de physique, de la collection « maxi fiches », est destiné aux étudiants de niveau L1, L2 ou équivalent des filières scientifiques et santés.
L'objectif de cet ouvrage est de faciliter l'acquisition des notions de base. Il est constitué de 75 fiches synthétiques explorant les différentes parties du programme de physique des 2 premières années du premier cycle universitaire (mécanique, thermodynamique, électricité, optique).
Les fiches sont généralement articulées en 3 parties. La première « En quelques mots » a pour but d'expliquer succinctement une notion de physique. La seconde « Ce qu'il faut retenir » donne les définitions, les formules et les démonstrations essentielles à la compréhension de la notion abordée. Enfin, la troisième partie « En pratique » permet à l'étudiant de mettre en application la dite notion au travers d'exemples détaillés.
Ce recueil de fiches sera un allier précieux pour les étudiants désireux d'aller à l'essentiel au cours de leur apprentissage, et/ou s'avérera être un « mémo » indispensable en période de révisions.

Les conseils pertinents, discussions et relectures attentives de mesdames Danielle Bodevigie-Piroird, Christelle Guerret et Sophie Pavan ont considérablement enrichi cet ouvrage. Nous tenons à leur adresser nos plus sincères et chaleureux remerciements.

Sophie Cantin-Rivière
Cyril Pailler-Mattei
Françoise Perrot
Anne-Laure Valette

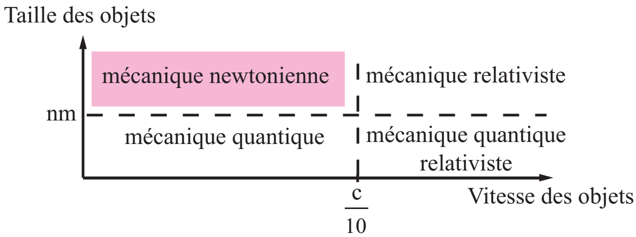
1 La mécanique

1. EN QUELQUES MOTS…

Cette fiche définit le domaine d'application de la mécanique newtonienne et les grandeurs clés utilisées.

2. CE QU'IL FAUT RETENIR…

a) Cadre de l'étude



Notre étude se situe uniquement dans le cadre de la mécanique newtonienne :

- taille des objets > nm (nanomètre)
- vitesse des objets < $\frac{c}{10}$

  (c = célérité de la lumière dans le vide ; $c \approx 3.10^8 m.s^{-1}$)

b) Point matériel

Le point matériel est un « objet idéal » dont les dimensions sont petites, donc négligeables devant les distances caractéristiques du mouvement étudié. Il est modélisé par un point géométrique, généralement noté M.

c) Masse

En mécanique newtonienne, on associe à tout point matériel M une masse m (unité : le kilogramme, noté kg). La masse d'un objet caractérise la quantité de matière qu'il renferme.

La masse est une grandeur scalaire positive, qui se conserve au cours du temps et qui est indépendante du référentiel choisi.

La masse est une grandeur additive car la masse totale d'un système de points matériels est égale à la somme des masses de chacun de ses constituants.

La masse d'un corps est une grandeur fondamentale en mécanique, car elle traduit l'inertie du corps, c'est-à-dire la résistance à la mise en mouvement du corps. En effet, plus la masse d'un objet est grande, plus l'action nécessaire pour provoquer ou modifier son déplacement (force, moment…) doit être importante.

d) Temps

C'est une grandeur absolue, c'est-à-dire qu'il « s'écoule » de la même manière dans tous les référentiels, quel que soit l'observateur qui le mesure (unité la seconde, notée s). Il permet d'étudier le mouvement des corps, c'est une quantité essentielle en cinématique et en dynamique du point matériel.

Par la suite, $A_{(t)}$ indiquera que la grandeur A (vectorielle ou scalaire) est une fonction du temps. Cependant, afin de ne pas « surcharger » les écritures, la variable (t) n'apparaîtra pas de façon explicite dans toutes les expressions dépendantes du temps.

e) Référentiel

En mécanique, la description de la position ou du mouvement d'un objet est nécessairement liée à un référentiel. Le référentiel est donc un corps de référence (lieu, objet, point, observateur…) à partir duquel la position et la trajectoire d'un objet sont étudiées.

Il existe un référentiel privilégié, appelé référentiel galiléen, dans lequel le mouvement d'un système isolé est rectiligne et uniforme (donc la quantité de mouvement d'un système isolé reste constante). Le caractère « privilégié » du référentiel galiléen provient du fait que les lois de la mécanique newtonienne et notamment le principe fondamental de la dynamique, ne sont valables que dans ce type de référentiel. L'expérience montre qu'un référentiel lié à la surface de la Terre pourra être considéré comme galiléen pour de nombreux systèmes mécaniques, à condition, par exemple, que leurs vitesses soient très inférieures à celle de la lumière et que le temps de l'expérience ne soit pas trop long. Par la suite, nous noterons (R_i) les référentiels d'étude qui seront tous supposés galiléens.

Il existe des référentiels galiléens pré-établis qu'il peut être judicieux d'utiliser suivant la nature et le mouvement de l'objet étudié : référentiel de Copernic, référentiel géocentrique, référentiel terrestre…

Par la suite, on notera (R_0) le référentiel fixe supposé galiléen, d'origine O, composé d'un système de trois axes orthogonaux, $O\vec{x}$, $O\vec{y}$, $O\vec{z}$, muni d'une base orthonormée directe $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. De plus, tout référentiel (R_i) (avec $i = 1 \ldots n$) sera un référentiel galiléen, d'origine O_i, composé d'un système de trois axes orthogonaux, $O_i\vec{x}_i$, $O_i\vec{y}_i$, $O_i\vec{z}_i$, muni d'une base directe $(\vec{i}_i, \vec{j}_i, \vec{k}_i)$.

f) Repère

Pour décrire le mouvement d'un objet, l'observateur doit connaître la position de cet objet au cours du temps. Pour cela, il a besoin d'un repère d'espace, muni d'une origine O (fixe dans le référentiel), d'axes de référence lui permettant de déterminer la direction dans laquelle se trouve l'objet et d'un repère temporel (chronomètre, montre…).

g) Notion de force

La force peut être définie comme une action appliquée sur un objet, afin de produire ou de modifier son mouvement, ou encore de créer une déformation sur cet objet. Dans le cadre de la mécanique du point matériel, la notion de déformation n'existe pas.

Une force (unité : le Newton, noté N) est représentée par un vecteur qui a une direction (ou ligne d'action) un sens et une norme (ou intensité). Une force est modélisée par un vecteur associé à un point d'application, généralement le centre de gravité du système considéré. En mécanique du point matériel, le centre d'inertie (fiche 16) et le centre de gravité d'un point matériel sont confondus.

3. EN PRATIQUE…

Quel que soit le problème de mécanique du point matériel que l'on souhaite résoudre, il est important de commencer par :

- indiquer le système étudié ;
- indiquer le référentiel et la base de projection ;
- réaliser le bilan des forces extérieures appliquées sur le système étudié.

Une fois ces étapes réalisées, il suffit bien souvent d'appliquer un des théorèmes fondamentaux de la mécanique (principe fondamental de la dynamique, théorème de l'énergie cinétique…) pour répondre à la question posée.

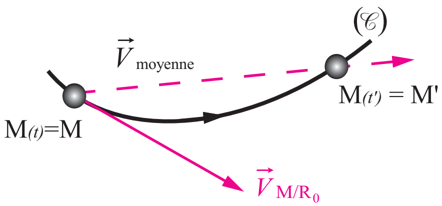
2 Cinématique du point matériel

1. EN QUELQUES MOTS...

Le mot cinématique vient du grec « *kinêma* » qui signifie mouvement. La cinématique est la partie de la mécanique qui étudie les mouvements des corps, indépendamment des causes qui les produisent.

2. CE QU'IL FAUT RETENIR...

a) Vitesse moyenne



La vitesse moyenne représente la distance parcourue par un mobile M pendant le temps de parcours. Soit un point M occupant à l'instant t la position $M = M_{(t)}$ et à l'instant t' (avec $t' > t$) la position $M' = M_{(t')}$ sur la trajectoire orientée $(\mathscr{C})$, alors la vitesse moyenne du point M entre les instants t et t' est : $\vec{V}_{\text{moyenne}} = \dfrac{\overrightarrow{MM'}}{t'-t} = \dfrac{\overrightarrow{OM}_{(t')} - \overrightarrow{OM}_{(t)}}{t'-t}$,

où le point O est l'origine de l'espace de référence à partir duquel la vitesse moyenne du point M est déterminée.

b) Vitesse instantanée

La vitesse instantanée est la limite de $\vec{V}_{\text{moyenne}}$ lorsque t' tend vers t. Posons $t' = t + \delta t$ (avec δt variation infinitésimale de t), la vitesse instantanée du point M s'écrit alors :

$$\vec{V}_{(t)} = \lim_{t'\to t} \frac{\overrightarrow{MM'}}{t'-t} = \lim_{\delta t \to 0} \frac{\overrightarrow{OM}_{(t+\delta t)} - \overrightarrow{OM}_{(t)}}{\delta t} = \frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt}$$

La vitesse instantanée d'un point M est donc la dérivée par rapport au temps du vecteur position $\overrightarrow{OM}_{(t)}$. C'est un vecteur toujours tangent à la trajectoire du point M et dirigé dans le sens du mouvement du point M sur $(\mathscr{C})$. Par la suite, la vitesse instantanée du point M, à l'instant t, relativement à un espace de référence spatial (R_0) sera notée $\vec{V}_{M/R_0}(t)$ ou plus simplement $\vec{V}_{M/R_0}$, telle que : $\boxed{\vec{V}_{M/R_0} = \left.\dfrac{d\overrightarrow{OM}_{(t)}}{dt}\right|_{R_0}}$

c) Accélération

L'accélération d'un point M par rapport à un référentiel (R_0) est la dérivée première du vecteur vitesse instantanée par rapport au temps, ou la dérivée seconde du vecteur position par rapport au temps. Par la suite, l'accélération du point M, à l'instant t, par rapport à un référentiel (R_0) sera notée $\vec{a}_{M/R_0}(t)$ ou plus simplement $\vec{a}_{M/R_0}$, telle que :

$$\boxed{\vec{a}_{M/R_0} = \left.\frac{d\vec{V}_{M/R_0}}{dt}\right|_{R_0} = \left.\frac{d^2\overrightarrow{OM}(t)}{dt^2}\right|_{R_0}}$$

d) Expression du vecteur vitesse et du vecteur accélération dans les différents systèmes de coordonnées

Voir tableau page suivante.

3. EN PRATIQUE…

À titre d'exercice, on propose d'établir les expressions du vecteur vitesse d'un point M par rapport à (R_0) en coordonnées cylindriques (ou polaires) et en coordonnées intrinsèques, puis l'expression du vecteur accélération d'un point M par rapport à (R_0) en coordonnées intrinsèques.

► **Vitesse en coordonnées cylindriques (ou polaires)**

Le vecteur vitesse d'un point M correspond à la dérivée première par rapport au temps du vecteur position par rapport à (R_0), d'où : $\vec{V}_{M/R_0} = \left.\frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt}\right|_{R_0} = \left.\frac{d\left(r\,\vec{u}_r + z\,\vec{k}\right)}{dt}\right|_{R_0}$

Les vecteurs unitaire $\vec{u}_r$ et $\vec{u}_\theta$ sont mobiles, donc dépendants du temps, par rapport à (R_0) et le vecteur unitaire $\vec{k}$, élément de l'axe fixe $O\vec{k}$, est indépendant du temps (Annexe A).

L'expression de la dérivée par rapport au temps du vecteur unitaire tournant $\vec{u}_r$ par rapport à (R_0) s'écrit : $\left.\frac{d\vec{u}_r}{dt}\right|_{R_0} = \vec{\omega}_{(t)} \wedge \vec{u}_r = \dot{\theta}\,\vec{u}_\theta$ avec $\vec{\omega}_{(t)} = \frac{d\theta_{(t)}}{dt}\,\vec{k} = \dot{\theta}\,\vec{k}$ vitesse angulaire du vecteur $\vec{u}_r$ autour de l'axe fixe $O\vec{k}$.

> ⚠ Cette relation est applicable à tout vecteur $\overrightarrow{AB}(t)$ (de norme constante) en rotation autour d'un axe (Δ) fixe avec une vitesse angulaire $\vec{\omega}_{(t)}$: $\frac{d\overrightarrow{AB}}{dt} = \vec{\omega}_{(t)} \wedge \overrightarrow{AB}(t)$.

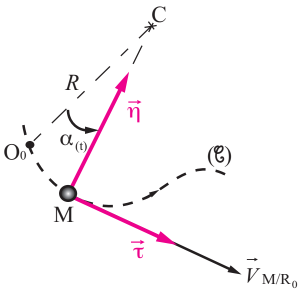
Le vecteur vitesse du point M par rapport au référentiel (R_0) en coordonnées cylindriques (ou polaires) s'écrit alors :

$$\vec{V}_{M/R_0} = \left.\frac{d\overrightarrow{OM}(t)}{dt}\right|_{R_0} = \left.\frac{d\left(r\,\vec{u}_r + z\,\vec{k}\right)}{dt}\right|_{R_0} = \left.\frac{dr_{(t)}}{dt}\right|_{R_0}\vec{u}_r + r_{(t)}\left.\frac{d\vec{u}_r}{dt}\right|_{R_0} + \left.\frac{dz_{(t)}}{dt}\right|_{R_0}\vec{k} + z\underbrace{\left.\frac{d\vec{k}}{dt}\right|_{R_0}}_{=0}$$

d'où : $\vec{V}_{M/R_0} = \underbrace{\dot{r}\,\vec{u}_r + r_{(t)}\,\dot{\theta}\,\vec{u}_\theta}_{\text{coordonnées polaires}} + \dot{z}\,\vec{k}$

Vecteur position	Vecteur vitesse	Vecteur accélération
Coordonnées cartésiennes **(Annexe A)** $\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)} = x_{(t)}\vec{i} + y_{(t)}\vec{j} + z_{(t)}\vec{k}$	$\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)}}{\mathrm{d}t}\right\|_{\mathrm{R_0}} = \dfrac{\mathrm{d}x_{(t)}}{\mathrm{d}t}\vec{i} + \dfrac{\mathrm{d}y_{(t)}}{\mathrm{d}t}\vec{j} + \dfrac{\mathrm{d}z_{(t)}}{\mathrm{d}t}\vec{k}$ $\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OM}}(t)}{\mathrm{d}t}\right\|_{\mathrm{R_0}} = \dot{x}\,\vec{i} + \dot{y}\,\vec{j} + \dot{z}\,\vec{k}$ la notation « pointée » signifiant qu'il s'agit d'une dérivée par rapport au temps vis-à-vis du référentiel ($\mathrm{R_0}$). Par la suite, la notation « pointée » sera choisie préférentiellement par rapport à la notation « classique ».	$\vec{a}_{\mathrm{M/R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}}}{\mathrm{d}t}\right\|_{\mathrm{R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}^2\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)}}{\mathrm{d}t^2}\right\|_{\mathrm{R_0}} = \ddot{x}\,\vec{i} + \ddot{y}\,\vec{j} + \ddot{z}\,\vec{k}$ la notation du double point signifiant qu'il s'agit d'une dérivée seconde par rapport au temps vis-à-vis du référentiel ($\mathrm{R_0}$).
Coordonnées cylindriques (ou polaires) **(Annexe A)** $\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)} = \underbrace{r_{(t)}\vec{u}_r}_{\text{coordonnées polaires}} + z_{(t)}\vec{k}$	$\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)}}{\mathrm{d}t}\right\|_{\mathrm{R_0}} = \underbrace{\dot{r}\,\vec{u}_r + r_{(t)}\,\dot{\theta}\,\vec{u}_\theta}_{\text{coordonnées polaires}} + \dot{z}\,\vec{k}$ (Cf. En pratique fiche 2)	$\vec{a}_{\mathrm{M/R_0}} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}}}{\mathrm{d}t} = \underbrace{\left(\ddot{r} - r_{(t)}\dot{\theta}^2\right)\vec{u}_r + \left(r_{(t)}\ddot{\theta} + 2\dot{r}\,\dot{\theta}\right)\vec{u}_\theta}_{\text{coordonnées polaires}} + \ddot{z}\,\vec{k}$
Coordonnées sphériques **(Annexe A)** $\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)} = r_{(t)}\,\vec{u}_r$	$\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}\overrightarrow{\mathrm{OM}}_{(t)}}{\mathrm{d}t}\right\|_{\mathrm{R_0}} = \dot{r}\,\vec{u}_r + r\dot{\theta}\,\vec{u}_\theta + r\dot{\varphi}\sin\theta\,\vec{u}_\varphi$	$\vec{a}_{\mathrm{M/R_0}} = \begin{pmatrix} \ddot{r} - r_{(t)}\dot{\theta}^2 - r_{(t)}\dot{\varphi}^2\sin^2\theta_{(t)} \\ r_{(t)}\ddot{\theta} + 2\dot{r}\,\dot{\theta} - r_{(t)}\dot{\varphi}^2\sin\theta_{(t)}\cos\theta_{(t)} \\ r_{(t)}\ddot{\varphi}\sin\theta_{(t)} + 2\dot{r}\,\dot{\varphi}\sin\theta_{(t)} + 2r_{(t)}\dot{\varphi}\,\dot{\theta}\cos\theta_{(t)} \end{pmatrix}_{(\vec{u}_r,\vec{u}_\varphi,\vec{u}_\theta)}$
Coordonnées intrinsèques	$\vec{V}_{\mathrm{M/R_0}} = \left.\dfrac{\mathrm{d}s_{(t)}}{\mathrm{d}t}\right\|_{\mathrm{R_0}} \vec{\tau} = \dot{s}\,\vec{\tau}$ (*Cf.* En pratique fiche 2)	$\vec{a}_{\mathrm{M/R_0}} = \ddot{s}\,\vec{\tau} + \dot{s}^2\dfrac{\vec{\eta}}{R} = \underbrace{\dfrac{\mathrm{d}V_{\mathrm{M/R_0}}}{\mathrm{d}t}}_{a_\tau}\vec{\tau} + \underbrace{\dfrac{\left(V_{\mathrm{M/R_0}}\right)^2}{R}}_{a_\eta}\vec{\eta}$ a_τ et a_η sont respectivement l'accélération tangentielle et l'accélération normale (*Cf.* En pratique fiche 2)

Vitesse en coordonnées intrinsèques

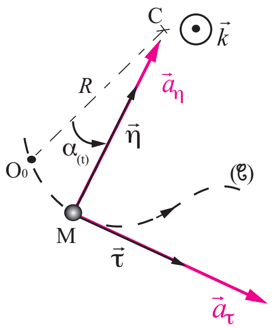


Pour certaines trajectoires (curvilignes par exemple), afin de connaître la vitesse du point M par rapport au référentiel (R_0), il est intéressant de lui affecter une base mobile, dite base de Frenet. Celle-ci est composée d'un vecteur tangent à la trajectoire ($\mathscr{C}$) noté $\vec{\tau}$ (dirigé dans le sens de la direction du déplacement du point M au cours du temps) et d'un vecteur normal à la trajectoire noté $\vec{\eta}$ (dirigé suivant le rayon de courbure de la trajectoire et orienté vers l'intérieur de la courbure).

Le long de la trajectoire ($\mathscr{C}$) le point M est repéré par son abscisse curviligne, notée $s_{(t)}$, qui correspond à la longueur de l'arc de courbe orienté $\overset{\frown}{O_0M} = s_{(t)}$. (le point O_0 étant un point arbitrairement choisi sur ($\mathscr{C}$) comme origine de l'espace de référence). La longueur de l'arc $\overset{\frown}{O_0M}$ est égale au produit du rayon de courbure R de la trajectoire de centre C par l'angle orienté $\left(\widehat{\overrightarrow{CO_0}, \overrightarrow{CM}}\right) = \alpha_{(t)}$, soit : $s = \overset{\frown}{O_0M} = R\alpha_{(t)}$.

La vitesse du point M en coordonnées intrinsèques, par rapport au référentiel (R_0), s'écrit alors : $\vec{V}_{M/R_0} = \left.\dfrac{ds_{(t)}}{dt}\right|_{R_0} \vec{\tau} = \dot{s}\,\vec{\tau}$

Accélération en coordonnées intrinsèques



Lorsque le point M est repéré à partir de son abscisse curviligne $s_{(t)}$, l'accélération du point M dans la base de Frenet par rapport au référentiel (R_0) s'écrit :

$$\vec{a}_{M/R_0} = \left.\frac{d^2 s_{(t)}}{dt^2}\right|_{R_0} = \left.\frac{d\left(\dot{s}\,\vec{\tau}\right)}{dt}\right|_{R_0} = \vec{\tau}\left.\frac{d\dot{s}}{dt}\right|_{R_0} + \dot{s}\left.\frac{d\vec{\tau}}{dt}\right|_{R_0}$$

Sur une portion de trajectoire ($\mathscr{C}$) suffisamment petite, la trajectoire du point M peut être assimilée à un cercle de centre C et de rayon de courbure R (cercle osculateur). Le vecteur $\vec{\tau}$, lié au point M est alors en rotation autour de l'axe fixe $O\vec{k}$ (axe normal au plan de la trajectoire, passant par C et dirigé tel que $\left(\vec{\tau}, \vec{\eta}, \vec{k}\right)$ soit une base orthonormée directe) avec une vitesse angulaire $\vec{\omega}_{(t)} = \dfrac{d\alpha_{(t)}}{dt}\vec{k} = \dot{\alpha}\,\vec{k}$.

La dérivée par rapport au temps de $\vec{\tau}$ est donc : $\dfrac{d\vec{\tau}}{dt} = \vec{\omega}_{(t)} \wedge \vec{\tau} = \dot{\alpha}\,\vec{\eta}$. On peut alors écrire :

$$\vec{a}_{M/R_0} = \left.\frac{d^2 s_{(t)}}{dt^2}\right|_{R_0} = \ddot{s}\,\vec{\tau} + \dot{s}\,\dot{\alpha}\,\vec{\eta} \text{ or } \begin{cases} \vec{V}_{M/R_0} = \dot{s}\,\vec{\tau} \\ s_{(t)} = R\alpha_{(t)} \end{cases} \Rightarrow \vec{a}_{M/R_0} = \ddot{s}\,\vec{\tau} + \dot{s}^2\,\frac{\vec{\eta}}{R} = \underbrace{\frac{dV_{M/R_0}}{dt}}_{a_\tau}\vec{\tau} + \underbrace{\frac{\left(V_{M/R_0}\right)^2}{R}}_{a_\eta}\vec{\eta}$$

a_τ et a_η sont respectivement l'accélération tangentielle et l'accélération normale et V_{M/R_0} la norme du vecteur vitesse $\vec{V}_{M/R_0}$.

3 Des exemples de forces

1. EN QUELQUES MOTS…

Dans l'état actuel des connaissances, tous les processus physiques, chimiques ou biologiques connus peuvent être expliqués à l'aide de quatre interactions fondamentales : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique et les deux interactions dites « fortes » et « faibles ».

Les forces observées à l'échelle macroscopique dans la nature ne sont en réalité qu'une manifestation des quatre interactions fondamentales.

2. CE QU'IL FAUT RETENIR…

a) Les 4 interactions fondamentales

▶ Interaction gravitationnelle

Deux points matériels quelconques M_1 et M_2 de masses respectives m_1 et m_2 séparés d'une distance r, s'attirent toujours avec une force $\vec{F}$ colinéaire à $\overrightarrow{M_1M_2}$ et telle que la norme de cette force est :

$$\|\vec{F}\| = \mathcal{G}\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$\mathcal{G}$: constante de gravitation universelle ; $\mathcal{G} = 6{,}67.10^{-11}$ $m^3.kg^{-1}.s^{-2}$

▶ Interaction électromagnétique

Deux points matériels M_1 et M_2, chargés électriquement respectivement avec une charge q_1 et q_2 et séparés d'une distance r :

– s'attirent si q_1 et q_2 sont de signes opposés ;
– se repoussent si q_1 et q_2 sont de même signe.

avec une force $\vec{F}$ colinéaire à $\overrightarrow{M_1M_2}$ et telle que la norme de cette force est :

$$\|\vec{F}\| = K\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

K : constante ; $K = 9.10^9\ N.m^2.C^{-2}$

▶ Les deux interactions dites « fortes » et « faibles »

L'interaction forte assure la cohésion des noyaux atomiques en liant les protons et les neutrons entre eux. Si elle n'existait pas, les noyaux ne pourraient pas être stables et seraient dissociés sous l'effet de la répulsion électrostatique des protons entre eux.

L'interaction faible intervient dans les réactions nucléaires et elle agit sur toutes les particules.

Contrairement aux interactions gravitationnelles et électromagnétiques qui ont des portées infinies, les interactions fortes et faibles ont des portées extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-15} m pour la première et 10^{-18} m pour la seconde. L'étude des interactions fortes et faibles ne sera pas abordée par la suite.