PASS

PARCOURS **SANTÉ & L.AS**

PHYSIQUE

2e édition

Le **cours complet**
De nombreuses **illustrations**
Des **conseils** pour les **épreuves**
Nombreux **QCM et exercices**
Tous les **corrigés détaillés**

AVEC CE LIVRE, DES **EXAMENS BLANCS** CORRIGÉS À TÉLÉCHARGER !

Salah Belazreg

EDISCIENCE

LES + EN LIGNE

Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté, des ressources complémentaires sont disponibles sur le site http://www.dunod.com/EAN/9782100841097

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil).
Sur la page de l'ouvrage, sous la couverture, cliquez sur le lien « LES + EN LIGNE ».

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

DANGER
LE PHOTOCOPILLAGE TUE LE LIVRE

© EdiScience, 2022

EdiScience est une marque de Dunod Éditeur
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-084109-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Avant-propos

Cet ouvrage, destiné aux étudiants de la L1 Santé (PASS, L.AS), s'ajoute à l'ouvrage de *Biophysique* de la même collection.

Il est le fruit d'une longue expérience et de nombreuses années d'enseignement de la physique et de la biophysique dans le secondaire et le supérieur. Il s'adresse principalement aux étudiants de 1re année Santé (PASS, L.AS), mais il intéressera aussi les étudiants en classes préparatoires BCPST ainsi que les étudiants en 1re et 2e année de Licence scientifique (L1 et L2).

Son but est de présenter de façon claire et progressive l'ensemble des notions à connaître par les étudiants de première année santé (PASS, L.AS) et son usage suppose que l'étudiant ait une connaissance complète du programme actuel des premières et terminales scientifiques.

Chaque chapitre indique clairement les objectifs à atteindre et comporte, en plus du cours et d'une synthèse finale, des exercices et des QCM.

Il présente de nombreux sujets d'adaptation progressive aux programmes et aux exigences de ces examens et concours difficiles.

Les choix pédagogiques qui ont guidé ma démarche sont :

- **les cours**, exposés de façon détaillée, présentent les résultats fondamentaux ainsi que des compléments sur des notions plus délicates ;
- **les exercices**, classés par niveau de difficulté, sont tous suivis de leurs solutions détaillées. Ils permettront ainsi aux étudiants de tester leurs connaissances et tirer le maximum de profit de chaque mise en situation. De plus, certains nécessitant une réflexion plus approfondie exciteront et combleront la curiosité des plus audacieux ;
- **les QCM**, en fin de chaque chapitre, sont de véritables exercices de réflexion. Ainsi, avant de proposer des solutions rapides et sans démarches rigoureuses, il importe de bien connaître la totalité du cours, et pas seulement les formules. Une résolution approfondie vous permettra de vous entraîner à ce type d'épreuve afin de gagner compétence et rapidité.

J'espère que cet ouvrage rendra les plus grands services aux étudiants, en complément de leur cours, notamment grâce aux exercices et QCM résolus et je suis persuadé qu'il constituera un outil précieux pour la préparation de ces examens et concours difficiles, et leur souhaite bon courage.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Remerciements

Mes remerciements vont à l'équipe du Professeur Rémy Perdrisot du service de biophysique et médecine nucléaire de la faculté de médecine et de pharmacie de Poitiers pour les annales qu'ils m'ont fournies.

Merci à mon épouse, le Docteur Frédérique Belazreg, pour son aide, sa relecture des différents chapitres, ses conseils pour les exemples et les applications médicales cités dans ce manuel. Merci à mes enfants pour leur patience et compréhension.

Je remercie également les éditions Dunod pour le soin et la présentation apportés à la réalisation de cet ouvrage.

Que les lecteurs, collègues enseignants et étudiants, qui voudront bien me formuler leurs remarques constructives et critiques ou me présenter leurs suggestions susceptibles d'améliorer cet ouvrage en soient par avance remerciés.

Poitiers, 23 février 2020 — Salah Belazreg

Attention

Pour les QCM, chaque question comporte une ou plusieurs réponses exactes. Vous devez indiquer pour chacune d'elles si elle est vraie (en cochant la proposition) ou fausse

Table des matières

Avant-propos III

Chapitre 1
Grandeurs physiques. Équations aux dimensions 1

- 1. Les grandeurs physiques 1
- 2. Système international d'unités 2
- 3. Équations aux dimensions 2
- 4. Analyse dimensionnelle 3
- Exercices et QCM corrigés 4

Chapitre 2
Cinématique du point 6

- 1. Référentiels et repères 6
- 2. Vitesse et accélération 10
- 3. Étude de quelques mouvements 13
- 4. Mouvements relatifs et absolus 16
- Exercices et QCM corrigés 19

Chapitre 3
Dynamique newtonienne 30

- 1. Les différentes actions auxquelles peut être soumis un système mécanique 30
- 2. Centre d'inertie. Quantité de mouvement 36

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

■ 3. Le principe d'inertie (1re loi de Newton) 37

■ 4. Les référentiels galiléens 37

■ 5. Relation fondamentale de la dynamique (2e loi de Newton) 39

■ 6. Principe des actions réciproques (3e loi de Newton) 40

■ 7. Validité de la relation fondamentale 41

■ 8. Conservation de la quantité de mouvement 42

■ 9. Moment cinétique 43

■ Exercices et QCM corrigés 46

Chapitre 4
Équilibre d'un solide – Solide en rotation autour d'un axe fixe 59

■ 1. Les effets d'une force 59

■ 2. Moment d'une force 62

■ 3. Conditions générales d'équilibre d'un solide 64

■ Exercices et QCM corrigés 65

Chapitre 5
Travail. Puissance. Énergie 70

■ 1. Travail et puissance d'une force 70

■ 2. Théorème de l'énergie cinétique 73

■ 3. Énergie potentielle. Énergie mécanique 76

■ Exercices et QCM corrigés 78

Chapitre 6
Conservation de la quantité de mouvement – Choc entre deux particules 88

■ 1. Définitions 88

■ 2. Chocs entre deux particules 89

■ Exercices et QCM corrigés 94

Chapitre 7
Électrostatique 99

■ 1. Champ et potentiel électrostatique 99

■ 2. Le dipôle électrostatique 108

■ Exercices et QCM corrigés 110

Chapitre 8
Électrocinétique des courants continus 127

■ 1. Le courant continu 127

■ 2. Loi d'Ohm 130

■ 3. Conductivité. Mobilité 134

■ 4. Énergie électrique 136

■ 5. Force électromotrice d'un générateur. Force contre électromotrice d'un récepteur 137

■ Exercices et QCM corrigés 140

Chapitre 9
Électromagnétisme 150

■ 1. Le champ magnétique 150

■ 2. Champ d'induction magnétique créé par un élément de courant 153

■ 3. Flux d'induction magnétique 156

■ 4. Action d'un champ magnétique $\vec{B}$ sur un élément de circuit parcouru par un courant 157

■ 5. Action d'un champ magnétique $\vec{B}$ sur un circuit fermé 160

■ Exercices et QCM corrigés 163

Chapitre 10
Mouvement d'une particule chargée dans un champ uniforme 174

■ 1. Action d'un champ électrique uniforme sur une particule chargée 174

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

■ 2. Action d'un champ magnétique uniforme sur une particule chargée 178

■ Exercices et QCM corrigés 183

Chapitre 11 Courants transitoires 195

■ 1. Réponse d'un circuit R,C à un échelon de tension 195

■ 2. Applications 201

■ 3. Réponse d'un circuit R,L à un échelon de tension 204

■ Exercices et QCM corrigés 207

Chapitre 12 Mécanique des fluides 217

■ 1. Généralités sur les fluides 217

■ 2. Fluide en équilibre 220

■ 3. Fluide en mouvement (ou dynamique des fluides) 223

■ 4. Dynamique des fluides réels 227

■ Exercices et QCM corrigés 231

Chapitre 13 Les phénomènes de surface 246

■ 1. Tension superficielle des liquides 246

■ 2. Ascension capillaire 252

■ Exercices et QCM corrigés 254

Chapitre 14 Thermodynamique 261

■ 1. Le gaz parfait. Théorie cinétique 261

■ 2. Premier principe ou principe de la conservation de l'énergie 266

■ 3. Second principe ou principe d'évolution 270

■ 4. Équilibre d'un corps pur sous deux phases 270

■ Exercices et QCM corrigés 274

Chapitre 15
Ondes **294**

■ 1. Généralités sur les ondes 294

■ 2. Ondes stationnaires 301

■ 3. Exemples d'ondes progressives 303

■ 4. Vitesse du son 308

■ 5. L'effet Doppler-Fizeau 310

■ 6. Notions sur les ondes électromagnétiques 314

■ Exercices et QCM corrigés 318

Chapitre 16
Interférences. Diffraction **325**

■ 1. Interférences de deux ondes 325

■ 2. Diffraction 333

■ Exercices et QCM corrigés 338

Chapitre 17
Le photon **349**

■ 1. L'effet photoélectrique 349

■ 2. L'effet Compton 353

■ Exercices et QCM corrigés 357

Chapitre 18
Niveaux d'énergie dans un atome **362**

■ 1. Spectres d'émission et d'absorption 362

■ 2. L'atome de Bohr. Niveaux d'énergie des électrons 363

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

■ 3. Spectres des atomes. Cas de l'atome d'hydrogène 368
■ 4. L'atome de Sommerfeld 370
■ 5. Notion de nombre quantique 373
■ Exercices et QCM corrigés 375

Chapitre 19
Mécanique ondulatoire 383

■ 1. Les aspects de la lumière 383
■ 2. Onde associée à une particule 383
■ 3. Principe d'incertitude de Heisenberg 385
■ 4. Probabilité de présence 386
■ 5. Équation de Schrödinger 387
■ Exercices et QCM corrigés 389

Chapitre 20
Le laser. Oscillateur à fréquence optique 395

■ 1. Caractéristiques d'un faisceau laser 395
■ 2. Principe de fonctionnement 398
■ 3. Quelques applications du laser 404
■ Exercices et QCM corrigés 406

Chapitre 21
Optique géométrique 419

■ 1. Quelques notions de base de l'optique géométrique 419
■ 2. Notion d'objet et d'image 424
■ 3. Dioptres 426
■ 4. Systèmes centrés 432
■ 5. Les lentilles 433
■ Exercices et QCM corrigés 436

Chapitre 22
Œil et instruments d'optique 445

■ 1. Aberrations 445
■ 2. L'œil 448
■ 3. Les instruments d'optique 450
■ Exercices et QCM corrigés 455

Index 465

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

1

Grandeurs physiques Équations aux dimensions

Plan

1. Les grandeurs physiques
2. Système international d'unités
3. Équations aux dimensions
4. Analyse dimensionnelle

Objectifs

- Savoir établir une équation aux dimensions
- Retrouver l'unité d'une grandeur physique dans le système S.I.

La physique a pour but de décrire des phénomènes et étudier leurs propriétés : leurs études nécessitent la définition de grandeurs physiques. À chaque grandeur physique correspond une unité et l'ensemble des unités est regroupé dans un système universel, le système international.

1. Les grandeurs physiques

La physique est une science basée sur l'observation de phénomènes physiques, et l'étude de ces phénomènes nécessite la définition de grandeurs physiques.

On appelle **grandeur physique** toute propriété physique mesurable.

Une grandeur physique est mesurable si on sait définir l'égalité, la somme et le rapport de deux grandeurs de son espèce.

La mesure de la grandeur s'obtient donc par comparaison entre deux grandeurs physiques de même nature dont l'une est choisie comme unité.

Exemple

Il est possible d'exprimer la masse d'un solide en fonction de la masse d'un solide de référence de notre choix. Pour cela, il faut choisir le solide de référence et l'**unité de masse.**

L'unité légale de masse (S.I.) est le kilogramme, de symbole kg. C'est par définition, la masse d'un cylindre de platine irridié déposé au bureau international des poids et mesures (pavillon de Breteuil à Sèvres).

Toute masse se mettra donc sous la forme : $m = x$ kg.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

2. Système international d'unités

Des grandeurs fondamentales ont été choisies : elles sont au nombre de sept **(tableau ci–dessous)**. L'ensemble des unités est regroupé dans un système cohérent et universel d'unités, appelé le **système international (S.I.)**.

Toute grandeur physique peut donc s'exprimer sur la base de ces unités fondamentales.

Grandeurs fondamentales	Unités	Symboles
Masse	kilogramme	kg
Longueur	mètre	m
Temps	seconde	s
Intensité du courant électrique	ampère	A
Température	kelvin	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité lumineuse	candéla	cd
Unités supplémentaires		
Angle plan	radian	rad
Angle solide	stéradian	sr

3. Équations aux dimensions

Le principe des équations aux dimensions consiste à ramener les différents paramètres qui interviennent dans une formule aux grandeurs fondamentales du système international d'unités.

Le tableau ci-après donne quelques grandeurs physiques et leur dimension.

Grandeur physique	Dimension	Unité
Masse	M	kg
Longueur	L	m
Temps	T	s
Intensité du courant électrique	I	A

Exemples

■ Unité d'une accélération.

Comme $a = \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2}$ (cas d'un mouvement rectiligne), alors

$[a] = \dfrac{[x]}{\left[t^2\right]}$ ($[a]$: se lit dimension de a).

Or $[x] = L$ et $[t] = T$, donc $[a] = \dfrac{L}{T^2} = LT^{-2}$

Dans le système (S.I.), une accélération s'exprime donc en $\mathrm{m.s^{-2}}$.

■ Unité d'une force.

Comme $F = ma$, alors $[F] = [m]\,[a]$, soit $[F] = MLT^{-2}$

Dans le système (S.I.), une force s'exprime en $\mathrm{kg.m.s^{-2}}$.

Le tableau ci-dessous donne quelques grandeurs dérivées (elles dérivent des unités fondamentales) ainsi que leurs unités.

Grandeur	Équations aux dimensions	Unités de base	Noms
Force	MLT^{-2}	kg.m.s^{-2}	newton : N
Pression	$ML^{-1}T^{-2}$	kg.m^{-1}.s^{-2}	pascal : Pa
Travail	ML^2T^{-2}	kg.m^2.s^{-2}	joule : J
Puissance	ML^2T^{-3}	kg.m^2.s^{-3}	watt : W
Charge	$Q = IT$	A.s	coulomb : C
Potentiel	$ML^2T^{-2}Q^{-1}$	kg.m^2.s^{-3}A^{-1}	volt : V
Capacité	$M^{-1}L^{-2}T^2Q^2$	kg^{-1}m^{-2}s^{4}A^2	farad : F
Résistance	$ML^2T^{-1}Q^{-2}$	kg.m^2.s^{-3}A^{-2}	ohm : Ω
Conductance	$M^{-1}L^{-2}TQ^2$	kg^{-1}.m^{-2}.s^{3}A^2	siemens : S
Champ magnétique	$MT^{-1}Q^{-1}$	kgs^{-2}A^{-1}	tesla : T
Inductance	$ML^2T^{-2}I^{-2}$	kgm^{2}s^{-2}A^{-2}	henry : H

4. Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle permet :

- de vérifier l'homogénéité d'une formule ;
- de rechercher les relations entre les différentes grandeurs physiques liées entres elles.

Exemple

L'étude du mouvement d'un pendule montre que sa période T_p dépend à priori de la masse m, de la longueur l du fil et de la valeur de g (accélération de la pesanteur du lieu de la mesure).

Supposons que la période T_p s'exprime par une relation de la forme :

$$T_p = \text{Cste}.m^\alpha l^\beta g^\gamma$$

La relation doit être homogène, donc $\left[T_p\right] = [m]^\alpha\ [l]^\beta\ [g]^\gamma$

Comme $[m] = M$, $[l] = L$ et $[g] = LT^{-2}$, alors $\left[T_p\right] = T = M^\alpha L^\beta (LT^{-2})^\gamma = M^\alpha L^{\beta+\gamma}T^{-2\gamma}$

L'identification des exposants des différentes dimensions conduit à :

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta + \gamma = 0 \\ -2\gamma = 1 \end{cases} \quad \text{d'où} \quad \begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \dfrac{1}{2} \\ \gamma = -\dfrac{1}{2} \end{cases}$$

La période du pendule simple s'écrit donc : $T_p = \text{Cste}.l^{\frac{1}{2}} g^{-\frac{1}{2}} = \text{Cste}\sqrt{\dfrac{l}{g}}$

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Synthèse

Je sais définir
- Une grandeur physique
- Le système international d'unités

Je connais
- Le principe des équations aux dimensions
- Les unités de base des grandeurs physiques usuelles

Je sais
- Établir une équation aux dimensions
- Retrouver l'unité d'une grandeur physique dans le système S.I.

Questions à choix multiples

1 Un corps solide, en mouvement dans un fluide visqueux, reçoit de la part du fluide une force de frottement $\vec{f}$.
Dans le cas d'un écoulement laminaire et pour un corps sphérique de rayon r, $\vec{f} = -6\pi\eta r\vec{v}$ où η représente le coefficient de viscosité du fluide et $\vec{v}$ le vecteur vitesse du solide.
La dimension de η est : ❐ **1.** $L^{-1}.T^{-1}$ ❐ **2.** $M.L^{-1}.T^{-1}$
L'unité de η dans le système S.I. est : ❐ **3.** $N.m^{-2}.s$ ❐ **4.** Pa.s ❐ **5.** $kg.s^{-1}.m^{-1}$

2 La valeur de la force d'interaction entre deux corps ponctuels, séparés d'une distance r et portant respectivement les charges q_1 et q_2, est donnée par la loi de Coulomb :

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q_1q_2|}{r^2}$$

❐ **1.** La dimension de f est $M.L^{-1}.T^{-2}$,
❐ **2.** L'unité de f est le $kg.m.s^{-2}$.
3. La dimension de ϵ_0 est : ❐ **a)** $M.L^{-3}.T^4.A$ ❐ **b)** $M^{-1}.L^{-3}.T^4.A^2$.
❐ **4.** L'unité de ϵ_0 est $kg^{-1}.m^{-3}.s^4.A^2$.

3 Isaac Newton établit au XVII^e siècle l'expression de la célérité du son dans l'air :

$$v = \sqrt{\frac{P}{\mu}} \quad \text{avec} \quad \left|\begin{array}{l} P : \text{pression de l'air ;} \\ \mu : \text{masse volumique de l'air} \end{array}\right.$$

La dimension de P est :
❐ **1.** $M^3.L^2.T^{-2}$ ❐ **3.** $M.L^{-1}.T^{-2}$ ❐ **5.** $M^{-1}.L.T^{-2}$
❐ **2.** $M^{-2}.L.T^{-1}$ ❐ **4.** $M.L.T^{-1}$

Corrigés

1 Bonnes réponses 2. et 5.

De $f = 6\pi\eta r v$, il vient : $[\eta] = \dfrac{[f]}{[r].[v]}$

De $f = ma$, on déduit $[f] = \text{M.L.T}^{-2}$.

Ainsi : $[\eta] = \dfrac{\text{M.L.T}^{-2}}{\text{L.L.T}^{-1}} = \text{M.L}^{-1}.\text{T}^{-1}$

L'unité de η est donc le $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

2 Bonnes réponses 2. 3.b. et 4.

De $f = ma$ (2ème loi de Newton), on déduit $[f] = [m] \cdot [a]$

Comme $[m] = \text{M}$ et $[a] = \text{L.T}^{-2}$, alors $[f] = \text{M.L.T}^{-2}$.

L'unité de f est donc le kg.m.s^{-2}.

On a $f = \dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\dfrac{|q_1q_2|}{r^2}$, donc : $\epsilon_0 = \dfrac{1}{4\pi f}\dfrac{|q_1q_2|}{r^2}$

Et par suite : $[\epsilon_0] = \dfrac{1}{[f]}\dfrac{[q]^2}{[r]^2}$

Déterminons la dimension d'une charge.

De la définition de l'intensité d'un courant électrique (qui est débit de charges), il vient :

$$i = \frac{dq}{dt}, \text{ soit } dq = idt$$

Ainsi $[q] = [i].[\Delta t] = \text{I.T}$.

Dimension de ϵ_0 : $[\epsilon_0] = \dfrac{1}{\text{M.L.T}^{-2}}\dfrac{(\text{I.T})^2}{\text{L}^2} = \text{M}^{-1}.\text{L}^{-3}.\text{T}^4.\text{I}^2$

L'unité de ϵ_0 est donc le $\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-3}.\text{s}^4.\text{A}^2$.

3 Bonne réponse 3.

Comme $v = \sqrt{\dfrac{P}{\mu}}$, alors $v^2 = \dfrac{P}{\mu}$. Ainsi $P = v^2 \cdot \mu$

Comme $[v] = \text{L.T}^{-1}$ et $[\mu] = \text{M.L}^{-3}$, alors $[P] = (\text{L.T}^{-1})^2 \times \text{M.L}^{-3} = \text{L}^2.\text{T}^{-2} \times \text{M.L}^{-3} = \text{M.L}^{-1}.\text{T}^{-2}$

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

2 Cinématique du point

Plan

1. Référentiels et repères
2. Vitesse et accélération
3. Étude de quelques mouvements
4. Mouvements relatifs et absolus

Objectifs

- Savoir repérer un mobile dans les différents systèmes de coordonnées
- Savoir établir l'expression d'une vitesse et d'une accélération dans les différents systèmes de coordonnées
- Savoir calculer une vitesse et une accélération
- Déterminer l'équation d'une trajectoire dans un référentiel donné
- Savoir faire une décomposition de vitesse et d'accélération

La cinématique est l'étude du mouvement d'un corps indépendamment des actions qui le produisent et qui sont capables de le modifier. Dans ce chapitre, on s'intéresse au mouvement d'un point matériel, objet de dimensions négligeables par rapport aux distances parcourues. Dans le cas d'un solide (ensemble de points matériels), on s'intéressera au mouvement d'un point particulier : le centre d'inertie G du solide. Le mobile désignera donc, soit le point matériel M, soit le centre d'inertie G du solide.

1. Référentiels et repères

1.1. La relativité du mouvement

Un objet est en mouvement par rapport à un autre objet (celui qui sert de référence) si sa position change au cours du temps par rapport à cet objet de référence.

Exemple

Observons le mouvement d'une personne assise dans un train. Pour un observateur (A) situé dans le même wagon, cette personne peut apparaître immobile ; mais pour un observateur (B) situé sur le quai d'une gare, et qui voit passer le train, la personne assise se déplace bien sûr en même temps que celui-ci (Fig. 2.1).

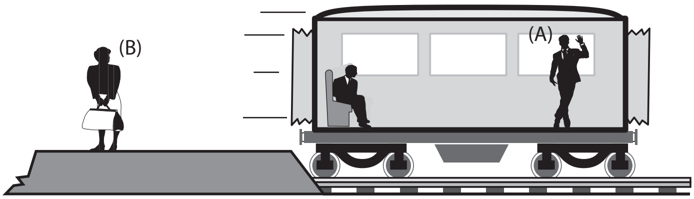

Figure 2.1

Ainsi, pour repérer la position d'un point mobile M, il est donc nécessaire de préciser le référentiel. Dans toute la suite, le référentiel sera supposé fixe et non déformable au cours du temps. Lorsque le référentiel est choisi, on doit définir un repère d'espace, lié au référentiel, pour déterminer chaque position du mobile. De même, il faut définir une chronologie et un repère de temps.

1.2. Repères

Au référentiel choisi, on associe un repère. Le repère sera fixe par rapport au référentiel.

En coordonnées cartésiennes

Tout point M peut être repéré par ses coordonnées cartésiennes (x, y, z). Si O est l'origine du repère, le vecteur position s'écrit :

$$\overrightarrow{OM} = \vec{r} = x\,\vec{i} + y\,\vec{j} + z\,\vec{k}$$

où $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ est une base orthonormale directe liée au référentiel (Fig. 2.2).

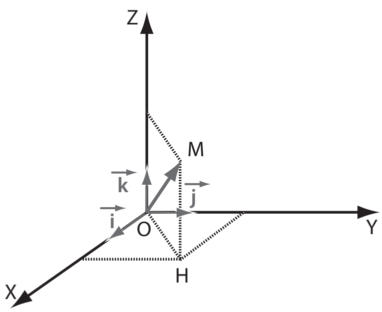

Figure 2.2

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

En coordonnées polaires (cas d'un mouvement plan)

On définit un axe Ox, axe polaire, et une origine O ou pôle.
Un point mobile M peut être repéré par ses coordonnées polaires (r, θ) où $r = OM$ et $\theta = (\overrightarrow{Ox}, \overrightarrow{OM})$ (Fig. 2.3).

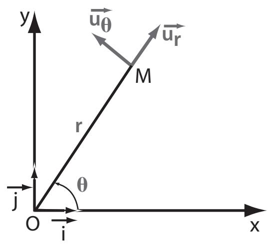

Figure 2.3

Le vecteur position s'écrit donc : $\overrightarrow{OM} = \vec{r} = r\vec{u_r}$.
où $\vec{r}$ est appelé rayon vecteur et θ l'angle polaire,
et $(\vec{u_r}, \vec{u_\theta})$ est une base locale mobile, orthonormée directe, liée à M.

En coordonnées cylindriques

Le mobile sera repéré par ses coordonnées cylindriques (r, θ, z) et le vecteur position s'écrit : $\overrightarrow{OM} = \vec{r} = \overrightarrow{OH} + \overrightarrow{HM} = r\vec{u_r} + z\vec{u_z}$.
où $(\vec{u_r}, \vec{u_\theta}, \vec{u_z})$ est une base orthonormée directe mobile liée à H (Fig. 2.4).

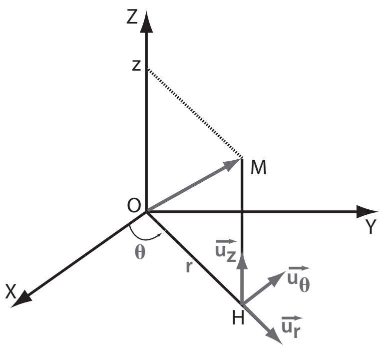

Figure 2.4

En coordonnées sphériques

Le mobile sera repéré par ses coordonnées sphériques (r, θ, φ) et le vecteur position s'écrit $\overrightarrow{OM} = \vec{r} = r\vec{u_r}$ (Fig. 2.5).

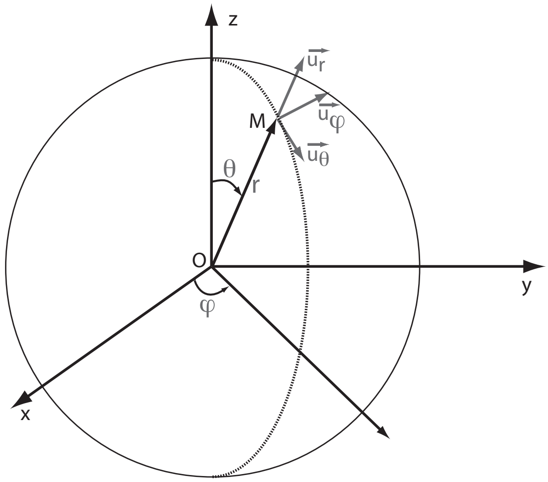

Figure 2.5

Les vecteurs $\overrightarrow{u_r}$, $\overrightarrow{u_\theta}$ et $\overrightarrow{u_\varphi}$ sont définis à partir du point M.
Dans la base cartésienne, les coordonnées des vecteurs de base s'écrivent :

$$\overrightarrow{u_r}\begin{pmatrix} \sin\theta\cos\varphi \\ \sin\theta\sin\varphi \\ \cos\theta \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{u_\theta}\begin{pmatrix} \cos\theta\cos\varphi \\ \cos\theta\sin\varphi \\ -\sin\theta \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{u_\varphi}\begin{pmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

La correspondance entre coordonnées cartésiennes et coordonnées sphériques est :

$$\begin{cases} x = r\sin\theta\cos\varphi \\ y = r\sin\theta\sin\varphi \\ z = r\cos\theta \end{cases} \text{avec} \begin{cases} \theta \in [0,\ \pi] \\ \varphi \in [0,\ 2\pi] \end{cases}$$

En coordonnées curvilignes

Si on choisit sur la trajectoire un sens de parcours positif, un point mobile M peut être repéré sur sa trajectoire C par son abscisse curviligne $s = \overset{\frown}{AM}$ où A est un point origine fixe de la trajectoire (Fig. 2.6).

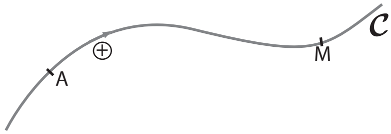

Figure 2.6

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

2. Vitesse et accélération

2.1. Vitesse

Définition

Soit un point M mobile dont la position dans un référentiel $(\mathcal{R})$ est repérée par les coordonnées cartésiennes (x, y, z).

La **trajectoire** du mobile M relativement à $(\mathcal{R})$ est l'ensemble des points de l'espace occupés successivement par le mobile M au cours du temps.

Soient deux points M et M', les positions occupées par le mobile aux instants t et t'.

La **vitesse moyenne** du mobile entre les dates t et t' est le vecteur $\overrightarrow{v_m} = \dfrac{\overrightarrow{MM'}}{t' - t}$ (Fig. 2.7).

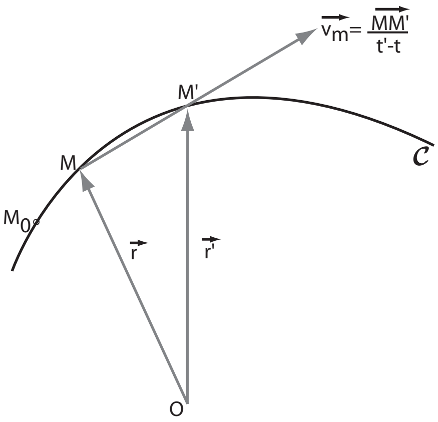

Figure 2.7

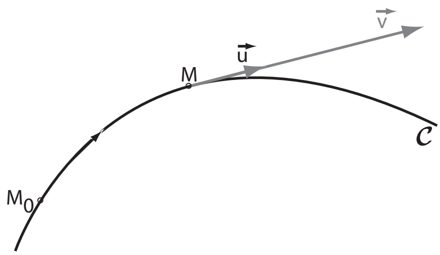

Figure 2.8

La vitesse instantanée du mobile, à l'instant t, est un vecteur $\vec{v}$ porté par la tangente à la trajectoire au point M (Fig. 2.8), dirigé suivant le sens du mouvement, et qui s'écrit :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \text{ où } \vec{r} = \overrightarrow{OM} \tag{2.1}$$

Expression de la vitesse dans différents systèmes de coordonnées

En coordonnées cartésiennes

Soit $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ une base orthonormale directe liée au référentiel $(\mathcal{R})$.

Le vecteur position s'exprime : $\vec{r} = \overrightarrow{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$.
Ainsi :

$$\vec{v} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} \text{ car } \vec{i}, \vec{j} \text{ et } \vec{k} \text{ sont des vecteurs constants.}$$

Si on pose $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$, $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ et $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$, alors $\vec{v}$ a pour coordonnées

$$\begin{cases} \dot{x} = \dfrac{dx}{dt} \\ \dot{y} = \dfrac{dy}{dt} \\ \dot{z} = \dfrac{dz}{dt} \end{cases} \tag{2.2}$$

En coordonnées polaires (cas d'un mouvement plan)

Le point M est repéré par ses coordonnées polaires (r, θ) « mais ici, la base employée $(\overrightarrow{u_r}, \overrightarrow{u_\theta})$ est mobile par rapport au repère ».

Le vecteur position $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ s'écrit donc $\vec{r} = r\overrightarrow{u_r}$.

Le vecteur vitesse est : $\vec{v} = \dfrac{d\vec{r}}{dt} = \dfrac{d}{dt}\left(r\overrightarrow{u_r}\right)$, soit

$$\vec{v} = \frac{dr}{dt}\overrightarrow{u_r} + r\frac{d\overrightarrow{u_r}}{dt} = \dot{r}\overrightarrow{u_r} + r\dot{\theta}\overrightarrow{u_\theta} \tag{2.3}$$

car $\dfrac{d\overrightarrow{u_r}}{dt} = \dot{\theta}\overrightarrow{u_\theta}$ (voir exercice 2)

Les composantes de $\vec{v}$ sont donc : $\begin{cases} \dot{r} \\ r\dot{\theta} \end{cases}$

Dans le repère de Frenet (Cas d'une trajectoire plane)

On introduit un repère mobile $(\vec{\tau}, \vec{n})$ (Fig. 2.9), lié au mobile M tel que :

$\begin{cases} \vec{\tau} : & \text{vecteur unitaire porté par la tangente à la courbe et orienté dans le sens du mouvement ;} \\ \vec{n} : & \text{vecteur unitaire orthogonal à } \vec{\tau} \text{ et dirigé vers la concavité de la trajectoire.} \end{cases}$

On a alors $\vec{v} = v\vec{\tau}$.

ρ représente le rayon de courbure de la trajectoire : c'est le rayon du cercle tangent à la trajectoire sur une petite portion autour du point M (Fig. 2.9).

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

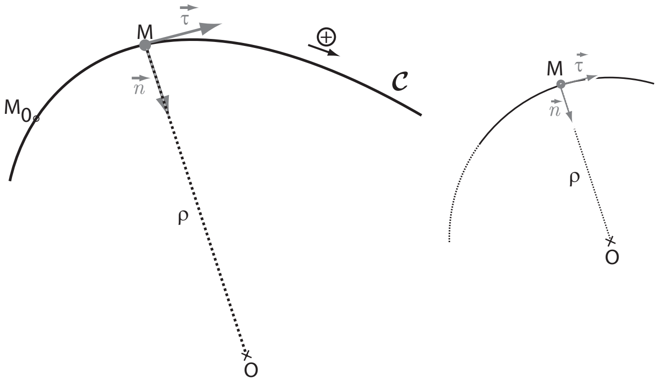

Figure 2.9

- Si la trajectoire est un cercle de rayon R, $\rho = R$.
- Si la trajectroire est une droite, le rayon de courbure ρ tend vers l'infini.

En coordonnées cylindriques

Le point M est repéré par ses coordonnées cylindriques (r, θ, z).

Le vecteur position $\overrightarrow{OM}$ s'écrit donc $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OH} + \overrightarrow{HM} = r\overrightarrow{u_r} + z\overrightarrow{u_z}$.

Ainsi $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OM}}{dt} = \dot{r}\overrightarrow{u_r} + r\dot{\theta}\overrightarrow{u_\theta} + \dot{z}\overrightarrow{u_z}$.

2.2. Accélération

Définition

L'**accélération** du mobile, à l'instant t, est la dérivée dans $(\mathcal{R})$ par rapport au temps, du vecteur vitesse, soit :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \tag{2.4}$$

Expression de l'accélération dans différents systèmes de coordonnées

En coordonnées cartésiennes

Comme $\vec{v} = \dfrac{dx}{dt}\vec{i} + \dfrac{dy}{dt}\vec{j} + \dfrac{dz}{dt}\vec{k}$, alors

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k} = \ddot{x}\,\vec{i} + \ddot{y}\,\vec{j} + \ddot{z}\,\vec{k} \tag{2.5}$$

En coordonnées polaires

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\dot{r}\vec{u_r} + r\dot{\theta}\vec{u_\theta}\right) = \ddot{r}\vec{u_r} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{u_\theta} + \dot{r}\dot{\theta}\vec{u_\theta} + r\ddot{\theta}\vec{u_\theta} - r\dot{\theta}^2\vec{u_r}, \text{ soit}$$

$$\boxed{\vec{a} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\vec{u_r} + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta})\vec{u_\theta}}$$

avec $\dfrac{d\vec{u_r}}{dt} = \dot{\theta}\vec{u_\theta}$ et $\dfrac{d\vec{u_\theta}}{dt} = -\dot{\theta}\vec{u_r}$.

Dans le repère de Frenet

$$\boxed{\vec{a} = a_\tau\vec{\tau} + a_n\vec{n} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} a_\tau = \dfrac{dv}{dt} \\ a_n = \dfrac{v^2}{\rho} \end{cases}}$$

En coordonnées cylindriques

$$\boxed{\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2)\vec{u_r} + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta})\vec{u_\theta} + \ddot{z}\vec{u_z}}$$

3. Étude de quelques mouvements

3.1. Les mouvements rectilignes

Le mobile M se déplace le long d'une droite sur laquelle sera choisi un vecteur unitaire $\vec{i}$ (Fig. 2.10). La trajectoire rectiligne sera orientée selon un axe $x'Ox$.

Le vecteur position s'écrit donc $\overrightarrow{OM} = x\,\vec{i}$.

On déduit donc $\vec{v} = \dot{x}\,\vec{i}$ et $\vec{a} = \ddot{x}\,\vec{i}$.

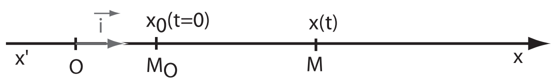

Figure 2.10

Mouvement rectiligne uniforme

Suivant l'axe $x'Ox$ la vitesse instantanée est $\vec{v} = \vec{v_0} = v_0\,\vec{i} = \overrightarrow{\text{cste}}$.

Comme $\vec{v} = \overrightarrow{\text{cste}}$ alors $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$.

De plus, comme $v = \dfrac{dx}{dt} = v_0$ alors, $x = \int_0^t v_0 dt = v_0 t + x_0$ où x_0 est l'abscisse du point M à la date $t = 0$.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.