

Horst Stöcker • Francis Jundt • Georges Guillaume

# Toute la Physique

2<sup>E</sup> ÉDITION

DUNOD

L'édition originale de ce livre a été publiée en Allemagne par Verlag Harri Deutsch, Francfort-sur-le-Main, sous le titre : *Taschenbuch der Physik* (3e édition).

© Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1998

Illustration de couverture : ascain64-Fotolia.com

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 1<sup>er</sup> 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).



© Dunod, 2007, 2020 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN : 978-2-10-082026-9

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

Cette nouvelle édition de “Toute la Physique”, tout en conservant sa structure première, recèle de nombreuses modifications, additions et corrections.

L'ouvrage **Toute la Physique** a été rédigé dans l'esprit “**toute la physique à portée de main**” par un ensemble d'enseignants, de scientifiques et d'ingénieurs : les **formules** importantes, les **tables** de données numériques et les **applications** ont été réunies sous une forme compacte.

**Toute la Physique** rassemble :

- les **connaissances fondamentales** pour les élèves de terminales scientifiques, les étudiants des cycles techniques et des cycles des sciences fondamentales, ainsi que pour ceux des classes préparatoires et des écoles d'ingénieurs
- les **connaissances complémentaires** pour des études avancées
- la **culture scientifique générale** pour les scientifiques et les ingénieurs en activité.

**Toute la Physique** est particulièrement conçu

- pour un accès rapide à une source d'information lors de la résolution de problèmes
- comme aide-mémoire lors de la préparation d'examens
- comme livre de référence pour les personnels de la recherche et du développement.

Chaque chapitre constitue une unité en soi qui réunit :

- les **notions, formules, règles et lois**,
- des **exemples** et des **applications** pratiques,
- ▷ des conseils, des mises en garde et des indications pour éviter des erreurs fréquentes,
- ▣ d'importantes **méthodes de mesures** utilisées dans la pratique,

ainsi que de nombreuses **tables** de constantes physiques et de propriétés de matériaux.

Soulignons le traitement et la représentation uniformes des concepts physiques et des formules : pour chaque grandeur, toutes les propriétés, les procédés de mesure, les lois importantes, les grandeurs reliées, les dimensions, les unités du système SI et des conseils d'application sont donnés dans une forme compacte. De nombreux exemples d'application et de figures illustrent les différentes sections du livre.

L'utilisateur peut trouver rapidement les renseignements recherchés, grâce à :

- une table des matières structurée
- une liste des tables
- un index détaillé constitué de mots-clé.

Le livre **Toute la Physique** constitue un **ouvrage de référence** et un complément utile aux manuels spécialisés usuels.

Cette édition française a été adaptée pour s'adresser aux étudiants des cycles universitaires, aux élèves des classes préparatoires, aux étudiants de l'enseignement technique, aux élèves-ingénieurs ainsi qu'aux chercheurs, ingénieurs et techniciens qui souhaitent trouver une source de référence sur divers domaines de la physique et de ses applications. Certains passages ont été développés, d'autres raccourcis, afin de les rendre conformes à l'esprit des programmes d'enseignement de nos cycles universitaires.

Dans ses versions américaine “**Handbook of Physics**” (Springer, New-York) et allemande “**Taschenbuch der Physik**” (5ème édition, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main), ce livre a connu un grand succès auprès des étudiants de physique, des étudiants des cycles techniques ainsi qu’auprès d’ingénieurs, de techniciens et de chercheurs du secteur professionnel. Les contenus tiennent compte non seulement des spécificités des cursus d’enseignements de chaque pays mais également des uniformisations qui sont susceptibles d’intervenir notamment dans les cursus des pays européens.

**Collaborateurs principaux :**

Dr. Christoph Hartnack, École des Mines et Subatech, Nantes, France

Dr. Ludwig Neise, Universität Frankfurt

Dr. Christoph Best, Konrad Zuse Zentrum, Berlin

Dipl.-Phys. Klaus Horn, Fachhochschule Frankfurt Dr. Markus Hofmann, Universität Frankfurt

**Avec des contributions de :**

Dr. Wolfgang Schäfer, (Bosch-Telecom), Paris, France

Dr. Maria-Suski Antony, Institut de Recherches Subatomiques (IReS), Strasbourg

Dr. Christian Jundt, Telco, Bruxelles, Belgique

Prof. John Harris, Yale University, USA

Prof. Walter F. Benenson, Michigan State University, USA

Cet ouvrage constitue une synthèse exhaustive des divers domaines de la physique. Nous espérons que **Toute la Physique** sera pour le lecteur attentif la source de référence et l’aide précieuse qu’il attend dans son travail personnel.

# Table des Matières

## I MÉCANIQUE

<b>1</b>	<b>Cinématique</b>	<b>1</b>
1.1	<b>Description du mouvement</b>	<b>1</b>
	Repères d'espace	1
	Temps	5
	Longueur, surface, volume	7
	Angle	9
	Systèmes mécaniques	11
1.2	<b>Mouvement à une dimension</b>	<b>12</b>
	Vitesse	13
	Accélération	16
	Mouvement rectiligne à une dimension	18
1.3	<b>Mouvement à plusieurs dimensions</b>	<b>21</b>
	Vecteur vitesse	22
	Vecteur accélération	24
	Chute des corps et mouvement d'un projectile	27
1.4	<b>Mouvement curviligne, rotation</b>	<b>29</b>
	Vitesse angulaire, vecteur rotation	30
	Accélération angulaire	32
	Vitesse orbitale	32
<b>2</b>	<b>Dynamique</b>	<b>34</b>
2.1	<b>Lois fondamentales de la dynamique</b>	<b>34</b>
	Masse et quantité de mouvement	34
	Lois de Newton	36
	Moment cinétique	46
	Moment d'une force, couple	47
2.2	<b>Forces</b>	<b>51</b>
	Force de poids	51
	Force élastique et de torsion	52
	Forces de frottement	53
2.3	<b>Forces d'inertie dans un repère tournant</b>	<b>57</b>
	Force centripète et force centrifuge	57
	Force de Coriolis	59
2.4	<b>Travail et énergie</b>	<b>60</b>
	Travail	61
	Énergie	62
	Énergie cinétique	63
	Énergie potentielle	65
	Travail des forces de frottement	68
2.5	<b>Puissance</b>	<b>68</b>

	Rendement	69
<b>2.6</b>	<b>Chocs</b>	<b>70</b>
	Choc élastique, direct, central	73
	Choc élastique, oblique, central	74
	Choc élastique, oblique avec un corps immobile	74
	Chocs inélastiques	76
<b>2.7</b>	<b>Fusées</b>	<b>77</b>
	Poussée	77
	Équation des fusées	79
<b>2.8</b>	<b>Systèmes de points matériels</b>	<b>80</b>
	Équations du mouvement	81
	Conservation de la quantité de mouvement totale	82
	Conservation du moment cinétique	83
	Conservation de l'énergie	84
<b>2.9</b>	<b>Équations de Lagrange et de Hamilton</b>	<b>85</b>
	Équations de Lagrange et principe de Hamilton	85
	Équations de Hamilton	88
<b>3</b>	<b>Solide rigide</b>	<b>91</b>
<b>3.1</b>	<b>Cinématique</b>	<b>91</b>
	Masse volumique	91
	Centre de gravité	91
	Grandeurs cinématiques fondamentales	93
<b>3.2</b>	<b>Statique</b>	<b>95</b>
	Vecteurs force	95
	Moment d'une force, couple	96
	Couple de forces	97
	Équilibre statique	99
	Technologie mécanique	100
	Machines simples	102
<b>3.3</b>	<b>Dynamique</b>	<b>107</b>
<b>3.4</b>	<b>Moment d'inertie, moment cinétique</b>	<b>107</b>
	Moment d'inertie	108
	Couple	113
	Moment cinétique	113
<b>3.5</b>	<b>Travail, énergie et puissance</b>	<b>116</b>
	Énergie cinétique de rotation	117
	Énergie potentielle de Torsion	119
<b>3.6</b>	<b>Théorie du gyroscope</b>	<b>119</b>
	Tenseur d'inertie	120
	Précession et nutation	122
	Applications des effets gyroscopiques	125

<b>4</b>	<b>Micromécanique</b>	<b>127</b>
4.1	Technique des couches minces	127
4.2	Insolation et décapage chimique	128
4.3	Applications	130
	Capteurs	130
	Actionneurs	131
	Applications pratiques	132
<b>5</b>	<b>Gravitation et théorie de la relativité</b>	<b>134</b>
5.1	Champ de gravitation	134
	Loi de la gravitation	134
	Mouvement des planètes	136
	Système planétaire	137
5.2	Relativité restreinte	141
	Principe de la relativité	142
	Transformation de Lorentz	144
	Effets relativistes	149
	Dynamique relativiste	151
5.3	Relativité générale et cosmologie	154
	Étoiles et galaxies	156
<b>6</b>	<b>Mécanique des corps déformables</b>	<b>160</b>
6.1	Élasticité	160
	Contrainte (effort, sollicitation)	160
	Déformation élastique	163
	Déformation plastique	174
6.2	Hydrostatique	179
	Liquides et gaz, fluides	179
	Pression	179
	Poussée d'Archimède	189
	Cohésion, adhésion, tension superficielle	191
6.3	Hydrodynamique	195
	Champ d'écoulement	196
	Équations fondamentales des fluides parfaits	197
	Fluide réel incompressible	208
	Écoulement turbulent	214
	Lois de similitude	216
	Écoulement de fluides compressibles	220
<b>7</b>	<b>Dynamique non-linéaire, chaos et fractales</b>	<b>222</b>
7.1	Systèmes dynamiques et chaos	223
	Systèmes dynamiques	223
	Systèmes conservatifs	229
	Systèmes dissipatifs	231

7.2	<b>Bifurcations</b>	<b>234</b>
	Application de premier retour	234
	Universalité	237
7.3	<b>Fractales</b>	<b>237</b>
<b>Symboles de la mécanique</b>		<b>241</b>
<b>8</b>	<b>Tables de la mécanique</b>	<b>242</b>
8.1	<b>Masse volumique</b>	<b>242</b>
	Solides	242
	Liquides	247
	Gaz	248
8.2	<b>Propriétés élastiques</b>	<b>249</b>
8.3	<b>Propriétés dynamiques</b>	<b>252</b>
	Coefficients de frottements	252
	Compressibilité	254
	Viscosité	257
	Résistance d'écoulement	260
	Tension superficielle	261
<b>II VIBRATIONS et ONDES</b>		
<b>9</b>	<b>Oscillations</b>	<b>262</b>
9.1	<b>Oscillations libres non amorties</b>	<b>265</b>
	Pendule élastique, ressort à boudin	265
	Pendule simple	267
	Pendule pesant composé	271
	Pendule de torsion	273
	Pendule liquide	274
	Circuit électrique oscillant	275
9.2	<b>Oscillations amorties</b>	<b>276</b>
	Frottements	277
	Circuit électrique oscillant amorti	280
9.3	<b>Oscillations forcées</b>	<b>282</b>
9.4	<b>Superposition de vibrations</b>	<b>284</b>
	Superposition de vibrations de même fréquence	285
	Superposition de vibrations de fréquences différentes	286
	Addition d'oscillations de fréquences et directions différentes	287
	Analyse de Fourier, décomposition en oscillations simples	289
9.5	<b>Oscillateurs couplés</b>	<b>290</b>
<b>10</b>	<b>Ondes</b>	<b>293</b>
10.1	<b>Propriétés fondamentales des ondes</b>	<b>293</b>
10.2	<b>Polarisation</b>	<b>299</b>
10.3	<b>Interférences</b>	<b>300</b>

Cohérence	300
Interférences	301
Ondes stationnaires	302
Ondes de fréquences différentes	305
<b>10.4 Effet Doppler</b>	<b>306</b>
Ondes de Mach et ondes de choc	308
<b>10.5 Réfraction</b>	<b>308</b>
<b>10.6 Réflexion</b>	<b>309</b>
Relations de phase	310
<b>10.7 Dispersion</b>	<b>311</b>
<b>10.8 Diffraction</b>	<b>311</b>
Diffraction par une fente rectangulaire	311
Diffraction par un réseau plan	313
<b>10.9 Modulation</b>	<b>314</b>
<b>10.10 Ondes de surface et ondes de gravitation</b>	<b>315</b>
<b>11 Acoustique</b>	<b>317</b>
<b>11.1 Ondes sonores</b>	<b>317</b>
Vitesse du son	317
Caractéristiques du son	319
Grandeurs relatives	324
<b>11.2 Sources et récepteurs de sons</b>	<b>326</b>
Émetteur d'ondes mécaniques	326
Transducteurs électroacoustiques	328
Absorption des sons	332
Insonorisation	334
Bruits d'écoulement	335
<b>11.3 Ultrason</b>	<b>336</b>
<b>11.4 Acoustique physiologique et appareil auditif</b>	<b>336</b>
Audiométrie	337
Évaluation de niveaux acoustiques	339
<b>11.5 Acoustique musicale</b>	<b>339</b>
<b>12 Optique</b>	<b>343</b>
<b>12.1 Optique géométrique</b>	<b>344</b>
Images optiques	346
Réflexion	349
Réfraction	354
<b>12.2 Lentilles</b>	<b>367</b>
Lentilles épaisses	368
<b>12.3 Associations de lentilles</b>	<b>374</b>
Lentilles avec des diaphragmes	375
Aberrations	376
<b>12.4 Instruments optiques</b>	<b>378</b>
Chambre noire	378

Appareil photographique	378
L'œil	379
Défauts de la vision et leurs corrections	380
Loupe	380
Microscope	381
Lunette astronomique	382
<b>12.5 Optique physique</b>	<b>385</b>
Diffusion	385
Diffraction et limite du pouvoir séparateur	386
Réfraction des ondes	389
Interférences	389
Éléments optiques diffractants	394
Dispersion	399
Appareils spectroscopiques	401
Polarisation de la lumière	402
<b>12.6 Photométrie</b>	<b>407</b>
Grandeurs photométriques	408
Éclairagisme	415
<b>Symboles pour vibrations et ondes</b>	<b>418</b>
<b>13 Tables de l'acoustique et de l'optique</b>	<b>419</b>
13.1 Tables de l'acoustique	419
13.2 Tables de l'optique	424
<b>III ÉLECTRICITÉ</b>	
<b>14 Charges et courants</b>	<b>426</b>
14.1 Charge électrique	426
Loi de Coulomb	428
14.2 Densité de charge électrique	429
14.3 Courant électrique	431
Loi d'Ampère	433
14.4 Densité de courant électrique	434
Champ de courant	436
14.5 Résistance et conductance	436
Résistance électrique	436
Conductance électrique	438
Résistivité et conductivité	438
Mobilité des porteurs de charge	439
Dépendance en température de la résistance	440
Résistance variable	441
Association de résistances	441
<b>15 Champ électrique et magnétique</b>	<b>444</b>

<b>15.1</b>	<b>Champ électrique</b>	<b>444</b>
<b>15.2</b>	<b>Influence</b>	<b>445</b>
	Lignes de champ électrique	446
	Champ électrique produit par une charge ponctuelle	449
<b>15.3</b>	<b>Force</b>	<b>450</b>
<b>15.4</b>	<b>Tension électrique</b>	<b>450</b>
<b>15.5</b>	<b>Potentiel électrique</b>	<b>452</b>
	Surfaces équipotentiellles	453
	Champ et potentiel pour quelques distributions de charges	454
	Flux du champ électrique	457
	Déplacement électrique dans le vide	458
<b>15.6</b>	<b>Polarisation électrique</b>	<b>460</b>
	Diélectrique	461
<b>15.7</b>	<b>Capacité</b>	<b>462</b>
	Condensateur à plaques planes parallèles	463
	Montage de condensateurs en parallèle	464
	Montage de condensateurs en série	464
	Capacités de quelques montages simples	465
<b>15.8</b>	<b>Énergie et densité d'énergie du champ <math>\vec{E}</math></b>	<b>466</b>
<b>15.9</b>	<b>Champ électrique aux interfaces</b>	<b>467</b>
<b>15.10</b>	<b>Champ magnétique</b>	<b>468</b>
<b>15.11</b>	<b>Magnétisme</b>	<b>469</b>
	Lignes de champ magnétique	470
<b>15.12</b>	<b>Induction ou densité de flux magnétique</b>	<b>471</b>
<b>15.13</b>	<b>Flux Magnétique</b>	<b>474</b>
<b>15.14</b>	<b>Champ magnétique</b>	<b>475</b>
<b>15.15</b>	<b>Potentiel magnétique et circuit magnétique</b>	<b>477</b>
	Théorème d'Ampère	478
	Loi de Biot-Savart	480
	Champ magnétique d'un conducteur rectiligne	481
	Champs magnétiques de diverses distributions de courant	483
<b>15.16</b>	<b>La matière dans le champ magnétique</b>	<b>484</b>
	Diamagnétisme	485
	Paramagnétisme	486
	Ferromagnétisme	486
	Antiferromagnétisme	489
	Ferrimagnétisme	490
<b>15.17</b>	<b>Champs magnétiques aux interfaces</b>	<b>490</b>
<b>15.18</b>	<b>Induction</b>	<b>491</b>
	Induction de déplacement	491
	Induction par variation de champ	493
<b>15.19</b>	<b>Auto-induction</b>	<b>493</b>
	Inductances de quelques montages	495

Inductance magnétique	497
<b>15.20 Induction mutuelle</b>	<b>497</b>
Transformateur	498
<b>15.21 Énergie du champ magnétique</b>	<b>499</b>
<b>15.22 Équations de Maxwell</b>	<b>502</b>
Courant de déplacement	503
Ondes électromagnétiques	503
Vecteur de Poynting	505
<b>16 Applications à l'électrotechnique</b>	<b>506</b>
<b>16.1 Circuit en courant continu</b>	<b>507</b>
Lois de Kirchhoff en courant continu	508
Résistance dans un circuit en courant continu	509
Générateur de tension réel, générateur de Thévenin	511
Générateur de courant réel, générateur de Norton	512
Puissance et énergie en courant continu	512
Adaptation de puissance	514
Mesure de courant et de tension	514
Mesures de résistances par la méthode de comparaison	515
Charge et décharge d'un condensateur	517
Courant dans un circuit RL	518
<b>16.2 Circuits en courant alternatif</b>	<b>519</b>
Grandeurs alternatives	519
Représentation complexe d'une grandeur sinusoïdale	522
Règles de calcul pour les nombres complexes	524
Technologie du courant alternatif	526
Bipôles élémentaires en alternatif	533
Montage série d'une résistance et d'un condensateur	537
Montage parallèle d'une résistance et d'un condensateur	538
Montage parallèle d'une résistance et d'une inductance	539
Montage en série d'une résistance et d'une inductance	540
Circuit oscillant série	541
Circuit oscillant parallèle	542
Équivalence entre circuits série et parallèle	544
Ondes radioélectriques	545
<b>16.3 Machines électriques</b>	<b>547</b>
Principe de fonctionnement	548
Machines à courant continu	549
Moteurs à courant alternatif	551
<b>17 Conduction dans les liquides, les gaz et le vide</b>	<b>555</b>
<b>17.1 Électrolyse</b>	<b>555</b>
Quantité de matière	555
Ions	555

Électrodes	556
Électrolyte	556
Éléments galvaniques, piles	561
Effets électrocinétiques	564
<b>17.2 Conduction dans les gaz</b>	<b>565</b>
Décharge semi-autonome	565
Décharges autonomes	569
<b>17.3 Émission électronique</b>	<b>570</b>
Émission thermoïonique	570
Photoémission	571
Émission froide, émission de champ	572
Émission d'électrons secondaire	572
<b>17.4 Tubes électroniques</b>	<b>573</b>
Diode à vide	574
Triode	574
Tétrode	577
Rayons cathodiques	577
Rayons canaux	578
<b>18 Physique du Plasma</b>	<b>579</b>
<b>18.1 Propriétés d'un plasma</b>	<b>579</b>
Caractéristiques d'un plasma	579
Rayonnement de plasma	586
Plasmas dans les champs électriques et magnétiques	586
Ondes du plasma	589
<b>18.2 Production de plasmas</b>	<b>591</b>
Production thermique de plasmas	592
Production de plasmas par compression	592
<b>18.3 Production d'énergie à l'aide de plasmas</b>	<b>594</b>
Générateur magnétohydrodynamique (générateur MHD)	594
Réacteurs à fusion nucléaire	595
Fusion sous confinement magnétique	596
Fusion sous confinement inertiel	597
<b>Symboles de l'électricité</b>	<b>599</b>
<b>19 Tables de l'électricité</b>	<b>601</b>
<b>19.1 Métaux et alliages</b>	<b>601</b>
Résistivité	601
Série des tensions	603
<b>19.2 Diélectriques</b>	<b>605</b>
<b>19.3 Tables pratiques pour l'électrotechnique</b>	<b>611</b>
<b>19.4 Propriétés magnétiques</b>	<b>613</b>
<b>19.5 Propriétés ferromagnétiques</b>	<b>615</b>

	Anisotropie magnétique	617
<b>19.6</b>	<b>Ferrites</b>	<b>618</b>
<b>19.7</b>	<b>Antiferromagnétisme</b>	<b>619</b>
<b>19.8</b>	<b>Mobilité d'ions</b>	<b>620</b>

## IV THERMODYNAMIQUE

<b>20</b>	<b>Équilibres et variables d'état</b>	<b>621</b>
<b>20.1</b>	<b>Systèmes, phases et équilibres</b>	<b>621</b>
	Systèmes	621
	Phases	622
	Équilibres	623
<b>20.2</b>	<b>Grandeurs thermodynamiques</b>	<b>625</b>
	Notions	625
	Température	628
	Pression	633
	Nombre de particules, quantité de matière et nombre d'Avogadro	636
	Entropie	639
<b>20.3</b>	<b>Potentieux thermodynamiques</b>	<b>641</b>
	Principe d'entropie maximum - d'énergie minimum	641
	Énergie interne comme potentiel thermodynamique	641
	Entropie comme potentiel thermodynamique	642
	Énergie libre	643
	Enthalpie	644
	Enthalpie libre	647
	Équations de Maxwell de la thermodynamique	649
	Stabilité thermodynamique	650
<b>20.4</b>	<b>Gaz parfaits</b>	<b>650</b>
	Loi de Boyle - Mariotte	651
	Loi de Gay-Lussac	652
	Équation d'état	653
<b>20.5</b>	<b>Théorie cinétique des gaz parfaits</b>	<b>653</b>
	Pression et température	653
	Distribution de Maxwell-Boltzmann	655
	Degrés de liberté	657
	Loi de l'équipartition	658
	Phénomènes de transport	658
<b>20.6</b>	<b>Équations d'état</b>	<b>661</b>
	Équation d'état d'un gaz parfait	661
	Équation d'état des gaz réels	665
	Équation d'état des liquides et des solides	671

<b>21</b>	<b>Chaleur, conversion de l'énergie et changements d'état</b>	<b>675</b>
-----------	---	------------

<b>21.1 Les formes de l'énergie</b>	<b>675</b>
Unités d'énergie	675
Travail	676
Potentiel chimique	677
Chaleur	678
<b>21.2 Conversion de l'énergie</b>	<b>679</b>
Conversion de formes d'énergie en chaleur	680
Conversion de la chaleur en d'autres formes d'énergie	683
Exergie et anergie	684
<b>21.3 Capacités calorifiques</b>	<b>685</b>
Capacité calorifique totale	685
Capacité calorifique molaire	686
Capacité calorifique massique	687
<b>21.4 Analyses de processus</b>	<b>691</b>
Processus réversible et irréversible	691
Processus isotherme	693
Processus isobare	694
Processus isochore	695
Processus adiabatique (ou isentropique)	696
<b>21.5 Principes de la thermodynamique</b>	<b>698</b>
Principe zéro de la thermodynamique	698
Premier principe de la thermodynamique	699
Deuxième principe de la thermodynamique	701
Troisième principe de la thermodynamique	702
<b>21.6 Cycle de Carnot</b>	<b>703</b>
Processus cyclique	703
Machine thermique	703
Étapes d'un cycle de Carnot	704
Bilan d'énergie et rendement d'un cycle de Carnot	705
Chaleur réduite	706
Théorème de Carnot	707
<b>21.7 Machines thermiques</b>	<b>708</b>
Cycles direct et inverse	708
Pompe à chaleur et machine réfrigérante	709
Cycle de Stirling	710
Machine à vapeur	712
Systèmes ouverts	712
Moteurs de Otto et de Diesel	714
Turbines à gaz	716
<b>21.8 Liquéfaction des gaz</b>	<b>717</b>
Production des basses températures	717
Effet Joule–Thomson	718

<b>22.1 Phases et états d'agrégation</b>	<b>721</b>
Phases	721
États d'agrégation	721
Transitions entre états d'agrégation	722
Vapeur	724
<b>22.2 Classification des transitions de phase</b>	<b>725</b>
Transitions de phase du premier ordre	725
Transitions de phase du second ordre	726
Régions de coexistence de phase	726
Exposants critiques	727
<b>22.3 Transitions de phase et gaz de van der Waals</b>	<b>728</b>
Équilibre de phase	728
Construction de Maxwell	729
Retards à la vaporisation et à la condensation	731
Théorème des états correspondants	732
<b>22.4 Exemples de transitions de phase</b>	<b>732</b>
Changement de phase en magnétisme	732
Transitions de phase ordre–désordre	733
Changements de la structure cristalline	734
Cristaux liquides	735
Supraconductivité	736
Superfluidité	737
<b>22.5 Gaz composés</b>	<b>737</b>
Pression partielle et loi de Dalton	738
Identité d'Euler et équation de Gibbs–Duhem	739
<b>22.6 Systèmes à plusieurs phases</b>	<b>739</b>
Équilibre de phase	740
Règle des phases de Gibbs	740
Équation de Clapeyron	741
<b>22.7 Pression de vapeur des solutions</b>	<b>742</b>
Loi de Raoult	742
Augmentation du point d'ébullition et abaissement du point de fusion	742
Loi de Henry	744
Pression osmotique des solutions	744
Mélange air-vapeur (air humide)	745
<b>22.8 Réactions chimiques</b>	<b>749</b>
Stœchiométrie	750
Règle des phases pour les réactions chimiques	752
Loi d'action de masse	752
Valeur du pH et produit de solubilité	753
<b>22.9 Égalisation des températures</b>	<b>755</b>
Température de mélange de deux systèmes	755
Processus réversible et irréversible	756

<b>22.10 Transfert de la chaleur</b>	<b>757</b>
Courant thermique	758
Transmission de la chaleur	758
Conduction thermique	760
Résistance thermique	764
Transfert thermique	766
Rayonnement thermique	771
Effet de serre	771
Comportement d'un matériau sous rayonnement thermique	772
<b>22.11 Transport de chaleur et de masse</b>	<b>774</b>
Loi de Fourier	774
Équation de continuité	774
Équation de conduction de la chaleur	775
Loi de Fick et équation de diffusion	776
Solutions des équations de conduction et de diffusion	777

## **Symboles de la thermodynamique** **779**

<b>23 Tables de la thermodynamique</b>	<b>782</b>
<b>23.1 Températures caractéristiques</b>	<b>782</b>
Échelles et points de référence	782
Points de fusion et d'ébullition	783
Températures de Curie et de Néel	790
<b>23.2 Données concernant des gaz réels</b>	<b>791</b>
<b>23.3 Propriétés thermiques de substances</b>	<b>792</b>
Viscosité	792
Dilatation, capacité calorifique et conductibilité thermique	793
<b>23.4 Transfert thermique</b>	<b>798</b>
<b>23.5 Données de corrections pratiques</b>	<b>799</b>
Mesure de pression	799
Mesure de volume - Conversion à la température standard	803
<b>23.6 Production de bains froids</b>	<b>804</b>
<b>23.7 Déshydrateurs</b>	<b>804</b>
<b>23.8 Pression de vapeur</b>	<b>805</b>
Solutions	805
Humidité relative	805
Pression de vapeur d'eau	806
<b>23.9 Enthalpies massiques</b>	<b>807</b>
<b>23.10 Diffusion dans les gaz</b>	<b>810</b>
<b>23.11 Diffusion dans les liquides</b>	<b>812</b>
<b>23.12 Diffusion dans les solides</b>	<b>813</b>

## V PHYSIQUE QUANTIQUE

<b>24 Photons - rayonnement électromagnétique et quanta de lumière</b>	<b>819</b>
24.1 Loi du rayonnement de Planck	819
24.2 Effet photoélectrique	822
24.3 Effet Compton	824
<b>25 Ondes de matière - Mécanique ondulatoire des particules</b>	<b>826</b>
25.1 Nature ondulatoire des corpuscules	826
25.2 Relations d'incertitude de Heisenberg	828
25.3 Fonction d'onde et observable	828
25.4 Équation de Schrödinger	836
Potentiels constants par parties	838
Oscillateur harmonique	843
Principe de Pauli	845
25.5 Spin et moment magnétique	846
Spin	846
Moments magnétiques	849
<b>26 Physique atomique et moléculaire</b>	<b>852</b>
26.1 Principes de base de la spectroscopie	853
26.2 Atome d'Hydrogène	855
Postulats de Bohr	856
26.3 États stationnaires et nombres quantiques	861
26.4 Atomes à plusieurs électrons	866
26.5 Rayons X	871
Applications des rayons X	872
26.6 Spectres moléculaires	874
26.7 Atomes dans des champs externes	877
26.8 Système périodique des éléments	880
26.9 Interaction des photons avec des atomes et des molécules	882
Émission spontanée et émission induite	882
<b>27 Physique nucléaire</b>	<b>885</b>
27.1 Composition du noyau atomique	885
27.2 Grandeurs fondamentales du noyau	888
27.3 Interaction nucléon-nucléon	890
Potentiel nucléon-nucléon phénoménologique	890
Potentiel d'échange mésonique	892
27.4 Modèles du noyau	893
Modèle du gaz de Fermi	893
Matière nucléaire	893
Modèle de la goutte liquide	893

Modèle des couches	895
Modèle collectif	899
<b>27.5 Réactions nucléaires</b>	<b>901</b>
Voies de réaction et sections efficaces	901
Diffusion élastique	906
Formation d'un noyau composé	907
Modèle optique	909
Réaction directe	910
Réactions par ions lourds	911
Fission nucléaire	914
<b>27.6 Décroissance radioactive</b>	<b>916</b>
Loi de décroissance	916
Décroissance alpha	920
Désintégration bêta	921
Décroissance gamma	924
Émission de nucléons et de clusters	925
<b>27.7 Réacteurs nucléaires</b>	<b>926</b>
Réactions en chaîne	926
Types de réacteurs nucléaires	928
<b>27.8 Fusion nucléaire</b>	<b>931</b>
<b>27.9 Interaction rayonnement - matière</b>	<b>934</b>
Particules ionisantes	934
Rayonnement gamma	937
<b>27.10 Dosimétrie</b>	<b>939</b>
Méthodes de mesures dosimétriques	943
Radioactivité ambiante	944
Radioprotection	947
<b>28 Physique des particules – le modèle standard</b>	<b>949</b>
<b>28.1 Unification des interactions</b>	<b>949</b>
Le modèle standard	949
Quanta de champ et bosons de jauge	953
Fermions et bosons	955
<b>28.2 Leptons, quarks et hadrons</b>	<b>957</b>
Leptons	957
Quarks	958
Hadrons	959
Accélérateurs et détecteurs	964
<b>28.3 Symétries et lois de conservation</b>	<b>967</b>
Conservation de la parité et interaction faible	968
Conservation de la charge et création de paires	969
Conjugaison de charge et antiparticule	970
Invariance par inversion du temps et réaction inverse	971
Lois de conservation	972
<b>28.4 Au-delà du modèle standard</b>	<b>972</b>

<b>29</b>	<b>Physique du solide</b>	<b>977</b>
<b>29.1</b>	<b>Structure des solides</b>	<b>977</b>
	Quelques bases de la physique du solide	977
	Structure des cristaux	978
	Réseau de Bravais	980
	Méthodes d'analyse de structure	985
	Liaisons dans les cristaux	987
<b>29.2</b>	<b>Défauts de réseau</b>	<b>990</b>
	Défauts ponctuels	990
	Défauts linéaires	992
	Défauts bi-dimensionnels dans les réseaux	994
	Solide amorphe	995
<b>29.3</b>	<b>Propriétés mécaniques de matériaux</b>	<b>996</b>
	Solides macromoléculaires	997
	Matériaux composites	1000
	Alliages	1001
	Cristaux liquides	1004
<b>29.4</b>	<b>Phonons et vibrations d'un réseau</b>	<b>1005</b>
	Ondes élastiques	1005
	Phonons et capacité calorifique spécifique	1009
	Modèle d'Einstein	1011
	Modèle de Debye	1012
	Conductibilité thermique	1013
<b>29.5</b>	<b>Électrons dans les solides</b>	<b>1015</b>
	Gaz d'électrons	1015
	Modèle des bandes	1021
<b>29.6</b>	<b>Semiconducteurs</b>	<b>1026</b>
	Conduction d'impuretés	1029
	Diode semiconductrice	1032
	Transistor	1040
	Transistors unipolaires (à effet de champ)	1048
	Thyristor	1051
	Circuits intégrés (IC)	1054
	Amplificateur opérationnel	1057
<b>29.7</b>	<b>Supraconduction</b>	<b>1064</b>
	Propriétés fondamentales des supraconducteurs	1064
	Supraconducteurs à haute température critique	1068
<b>29.8</b>	<b>Propriétés magnétiques</b>	<b>1070</b>
	Ferromagnétisme	1073
	Antiferromagnétisme et ferrimagnétisme	1075
<b>29.9</b>	<b>Propriétés diélectriques</b>	<b>1077</b>
	Paraélectricité	1081
	Ferroélectricité	1081
<b>29.10</b>	<b>Propriétés optiques des cristaux</b>	<b>1083</b>
	Excitons et leurs propriétés	1083

Photoconductivité	1085
Luminescence	1086
Propriétés optoélectroniques	1086
<b>Symboles de la physique quantique</b>	<b>1088</b>
<b>30 Tables de la physique quantique</b>	<b>1093</b>
30.1 Potentiels d'ionisation	1093
30.2 Rayons atomiques et ioniques des éléments	1098
30.3 Émission électronique	1100
30.4 Rayons X	1104
30.5 Réactions nucléaires	1104
30.6 Interaction rayonnement-matière	1105
30.7 Effet Hall	1106
30.8 Supraconducteurs	1107
30.9 Semiconducteurs	1109
Propriétés thermiques, magnétiques et électriques des semiconducteurs	1109
<b>VI ANNEXE</b>	
<b>31 Mesures et erreurs de mesure</b>	<b>1111</b>
31.1 Description de mesures	1111
Grandeurs physiques et unités du système international (SI)	1111
31.2 Calcul d'erreur et statistique	1114
Type d'erreurs	1114
Valeurs moyennes de séries de mesures	1116
Dispersion	1117
Corrélation	1118
Ajustement, régression	1119
Distribution de fréquence	1119
Fiabilité	1124
<b>32 Calcul vectoriel</b>	<b>1127</b>
32.1 Vecteurs	1127
32.2 Multiplication par un scalaire	1128
32.3 Addition et soustraction de vecteurs	1128
32.4 Multiplication de vecteurs	1129
<b>33 Calcul différentiel et intégral</b>	<b>1132</b>
33.1 Calcul différentiel	1132
Règles de dérivation	1132
33.2 Calcul intégral	1133
Règles d'intégration	1134
33.3 Dérivées et intégrales de fonctions élémentaires	1135
<b>34 Système SI</b>	<b>1136</b>

# Liste des Tables

<b>8</b>	<b>Tables de la mécanique</b>	<b>242</b>
8.1/1	Corps purs	242
8.1/2	Matériaux de construction	243
8.1/3	Alliages utilisés en électricité	243
8.1/4	Alliages à propriétés magnétiques	244
8.1/5	Ferrites	244
8.1/6	Verre	244
8.1/7	Matériaux de synthèse	245
8.1/8	Céramiques	246
8.1/9	Semiconducteurs	246
8.1/10	Matériaux de construction	246
8.1/11	Matériaux en vrac	247
8.1/12	Liquides dans les conditions TPN	247
8.1/13	Masse volumique de quelques métaux à l'état liquide	248
8.2/1	Propriétés élastiques	249
8.2/2	Tensions critiques	250
8.2/3	Fils	250
8.2/4	Cristaux filamenteux	250
8.2/5	Acier	251
8.2/6	Matériaux céramiques	251
8.2/7	Matériaux synthétiques	252
8.2/8	Fibres	252
8.3/1	Frottement de roulement	252
8.3/2	Coefficient de frottement cinématique	253
8.3/3	Frottement statique	253
8.3/4	Hélium	254
8.3/5	Azote	254
8.3/6	Hydrogène	255
8.3/7	Méthane	255
8.3/8	Monoxyde d'azote	256
8.3/9	Dioxyde de carbone	256
8.3/10	Compressibilité en fonction de la température	256
8.3/11	Compressibilité de liquides	257
8.3/12	Compressibilité de solides	257
8.3/13	Viscosité de liquides	257
8.3/14	Viscosité de liquides cryogéniques	257
8.3/15	Viscosité de solutions aqueuses	257
8.3/16	Viscosité de l'eau	258
8.3/17	Viscosité en fonction de la température	258
8.3/18	Viscosité de gaz	258
8.3/19	Viscosité des gaz	259
8.3/20	Correction de température	259

8.3/21	Coefficients aérodynamiques	260
--------	-----------------------------	-----

### 13 Tables de l'acoustique et de l'optique 419

13.1/1	Facteurs correctifs pour les oscillations harmoniques	419
13.1/2	Vitesse du son dans les gaz	419
13.1/3	Vitesse du son dans l'air	419
13.1/4	Coefficient d'affaiblissement du son dans les gaz	419
13.1/5	Champ sonore dans l'air	419
13.1/6	Vitesse du son dans les produits pétroliers	420
13.1/7	Vitesse du son dans les liquides	420
13.1/8	Coefficient d'affaiblissement du son dans les liquides	420
13.1/12	Intensité sonore	421
13.1/13	Atténuation du son dans l'air	422
13.1/14	Coefficients d'affaiblissement	422
13.1/15	Bruits nuisibles à la santé	422
13.1/16	Indices d'absorption acoustique	423
13.2/1	Indices de réfraction	424
13.2/2	Éclairement	424
13.2/3	Flux lumineux	424
13.2/4	Rayons ultra-violet	424
13.2/5	Principaux types de Laser	425
13.2/6	Longueurs de cohérence	425
13.2/7	Sensibilité spectrale	425
13.2/8	Raies de Fraunhofer	425

### 19 Tables de l'électricité 601

19.1/1	Métaux à température ambiante	601
19.1/2	Dépendance en pression	601
19.1/3	Variation relative près du point de fusion	602
19.1/4	Alliages	602
19.1/5	Série des tensions électrochimiques	603
19.1/6	Série des tensions thermoélectriques	603
19.1/7	Tension de quelques éléments thermoélectriques	604
19.1/8	Couples thermoélectriques usuels	604
19.1/9	Coefficient de Peltier pour divers métaux	605
19.2/1	permittivité relative	605
19.2/2	Céramiques	607
19.2/3	Verres	607
19.2/4	Propriétés électriques de polymères	607
19.2/5	Résistivité d'isolants	608
19.2/6	Propriétés électriques d'isolants	608
19.2/7	Propriétés électriques d'huiles pour transformateurs	610
19.2/8	Quelques propriétés d'électrets	610

19.2/9	Ferroélectricité de composés oxygénés à structure octaédrique	610
19.3/1	Alliages résistifs	611
19.3/2	Force électromotrice des étalons Weston	611
19.3/3	Matériaux pour contacts	611
19.3/4	Domaines de tensions en électrotechnique	611
19.3/6	Perméabilité aux gaz de quelques verres au Quartz	612
19.3/7	Action d'un courant électrique	612
19.4/1	Susceptibilité magnétique	613
19.4/2	Susceptibilité magnétique de composés inorganiques	613
19.4/3	Alliages magnétiques	615
19.5/1	Éléments ferromagnétiques	615
19.5/2	Alliages de Fer binaires	616
19.5/3	Alliages de Nickel binaires	616
19.5/4	Coefficients d'anisotropie	617
19.5/5	Directions d'aimantation dans les cristaux cubiques	618
19.6/1	Propriétés magnétiques	618
19.7/1	Propriétés antiferromagnétiques	619
19.8/1	Mobilité $\mu$ d'ions dans l'air à 18 °C et pression normale	620

## 22 Tables de la thermodynamique

781

23.1/2	Points de référence	782
23.1/3	Points de fusion et d'ébullition – Éléments	783
23.1/4	Points de fusion et d'ébullition - Composés minéraux	784
23.1/5	Points de fusion et d'ébullition - Composés organiques	786
23.1/6	Points de fusion et d'ébullition - Huile	788
23.1/7	Points de fusion et d'ébullition - Alliages	789
23.1/8	Points de fusion et d'ébullition - Céramiques réfractaires	789
23.1/9	Température de Curie de ferromagnétiques	790
23.1/10	Température de Néel	790
23.1/11	Température de Curie!ferroélectriques	790
23.2/1	Température, pression et masse volumique au point critique	791
23.2/2	Pression et température au point triple	791
23.2/3	Constantes de Van der Waals	791
23.2/4	Masse molaire, constante massique et masse volumique de gaz	792
23.3/1	Viscosité dynamique de gaz	792
23.3/2	Viscosité dynamique de liquides	792
23.3/3	Propriétés therm. de métaux purs	793
23.3/4	Propriétés therm. de matériaux de construction	794
23.3/5	Propriétés therm. de gaz	795
23.3/6	Propriétés thermiques de liquides	796
23.3/7	Propriétés therm. de synthétiques	796
23.3/8	Conductivités thermiques à différentes températures	796

23.3/9	Propriétés therm. de matériaux solides	797
23.3/10	Conductivités thermiques d'isolants thermiques	797
23.3/11	Coefficients de dilatation volumique de liquides	797
23.3/12	Expansion de l'eau à différentes températures	798
23.4/1	Coefficient de transfert thermique de matériaux	798
23.5/1	Atmosphère normale à différentes altitudes	799
23.5/2	Nivellement barométrique	800
23.5/3	Mesure de pression : facteur température - altitude	800
23.5/4	Mesure de pression : correction additionnelle	801
23.5/5	Mesure de pression : expansion due au cuivre	802
23.5/6	Mesure de pression : expansion due au verre	802
23.5/7	Mesure de volume : expansion de l'enceinte en verre	803
23.5/8	Mesure de volume : correction de température	803
23.6/1	Bains froids	804
23.7/1	Déshydrateur : agents chimiques	804
23.7/2	Déshydrateur : agents physiques	804
23.8/1	Pression de vapeur saturée à 20°C	805
23.8/2	Constantes cryoscopiques et ébullioscopiques	805
23.8/3	Psychrométrie	805
23.8/4	Pression de vapeur d'eau aux températures ordinaires	806
23.8/5	Pression de vapeur et enthalpie mass. de l'eau	806
23.8/6	Volume et enthalpie massiques de la vapeur d'eau	807
23.9/1	Pouvoir calorifique massique	807
23.9/2	Enthalpies massiques de fusion et de vaporisation de métaux purs	808
23.9/3	Enthalpies mass. de fusion et de vaporisation d'autres substances	809
23.9/4	Chaleur de vaporisation en fonction de la température	809
23.9/5	Variation relative de volume lors de la fusion	810
23.10/1	Paramètre de diffusion	810
23.11/1	Paramètre de diffusion de corps dissous	812
23.11/2	Paramètre de diffusion de solvants	812
23.12/1	Diffusion dans un métal en fusion	813
23.12/3	Diffusion dans des métaux	814

### 30 Tables de la physique quantique

1093

30.1/1	Énergie d'ionisation des éléments	1093
30.1/2	Énergie d'ionisation de composés azotés	1095
30.1/3	Énergie d'ionisation d'hydrocarbures	1095
30.1/4	Énergie d'ionisation d'hallogénures	1096
30.1/5	Énergie d'ionisation de composés de l'oxygène	1096
30.1/6	Énergie de dissociation de molécules diatomiques	1097
30.2/1	Rayons atomiques et ioniques des éléments	1098
30.3/1	Travail d'extraction $W_A$ des électrons d'un élément	1100

30.3/2	Travail de sortie pour des surfaces adsorbées	1102
30.3/3	Propriétés thermo-émissives d'une cathode de tungstène	1102
30.3/4	Photocathodes alcaline	1103
30.3/5	Propriétés fondamentales de l'émission d'électrons secondaires	1103
30.4/1	Principales lignes caractéristiques de quelques éléments (série K)	1104
30.5/1	Section efficace de diffusion de neutrons	1104
30.5/2	Réactions de fusion nucléaire	1105
30.6/1	Coefficient d'atténuation massique de rayons X	1105
30.6/2	Coefficient d'absorption massique d'électrons dans l'aluminium	1105
30.6/3	Parcours de particules $\alpha$ dans l'air, les tissus biologiques et l'aluminium	1105
30.7/1	Coefficient de Hall de métaux	1106
30.8/1	Éléments supraconducteurs	1107
30.8/2	Alliages et composés supraconducteurs	1108
30.9/1	Éléments semiconducteurs	1109
30.9/2	Semiconducteurs binaires	1109
30.9/3	Dopage du Si	1109
30.9/4	Dopage du Ge	1110
30.9/5	Rayonnements ionisants dans les semiconducteurs	1110

**34 Tables du système SI****1136**

34/1	Grandeurs fondamentales du système SI	1136
34/2	Préfixes décimaux	1136
34/3	Unités SI dérivées	1137
34/5	Table de conversion des unités d'énergie	1141
34/6	Forces des vents	1141
34/7	Unités anglo-américaines	1142

# Partie I Mécanique

## 1 Cinématique

La **cinématique** est l'étude du mouvement d'un corps en fonction du temps, indépendamment de toute cause pouvant le provoquer ou le modifier. L'objet de la cinématique est la description mathématique du mouvement à partir des notions de position (rayon vecteur) par rapport à un repère, de trajectoire (vecteur déplacement), de temps et des vecteurs vitesse et accélération.

### 1.1 Description du mouvement

**Mouvement** : modification de la position d'un corps pendant un intervalle de temps. Pour sa description, on attribue à la **position** d'un corps dans un référentiel une ou plusieurs valeurs numériques (**coordonnées**), dont la variation au cours du temps caractérise le mouvement.

**Mouvement uniforme** : le corps couvre des distances égales pendant des intervalles de temps égaux. Antonyme : **mouvement accéléré**.

**Référentiel** : pour déterminer si un objet est en mouvement, il est nécessaire de repérer sa position par rapport aux objets qui l'entourent à chaque instant. L'association d'un **repère d'espace** (par ex.  $[O, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}]$ ) et d'un repère de **temps**  $t$  constitue un référentiel  $R$ .

#### 1.1.1 Repères d'espace

##### 1. Dimension des espaces

**Dimension** d'un **espace** : le nombre de valeurs numériques nécessaires pour déterminer la position d'un point dans cet espace.

- Une droite est un espace à une dimension, une surface est un espace à deux dimensions et un volume est un espace à trois dimensions.
- À la surface de la terre un lieu peut être défini, par exemple, par sa longitude et sa latitude. La surface de la terre est un espace à deux dimensions. Pour préciser entièrement un lieu, il faut également donner son altitude.
- L'espace, dans lequel nous déplaçons, est un espace à trois dimensions. Un mouvement plan est un mouvement à deux dimensions, un mouvement sur un rail est un mouvement à une dimension. Une généralisation ultérieure utilise un espace à quatre dimensions (espace-temps) dont les coordonnées sont les trois coordonnées d'espace, une coordonnée de temps ainsi que le point de dimension nulle.

##### 2. Systèmes de coordonnées

**Systèmes de coordonnées** : utilisés pour la description mathématique du mouvement, ils attribuent des valeurs numériques à la position d'un corps (plus généralement : position à laquelle un **événement** se produit). De ce fait, le mouvement d'un mobile peut être décrit par une fonction  $x(t)$  qui, à chaque instant  $t$ , lui affecte la coordonnée  $x(t)$ .

Divers systèmes de coordonnées peuvent être utilisés :

a) **Système de coordonnées affines** : dans l'espace à deux dimensions, les axes de coordonnées sont deux droites concourantes en un point  $O$ , faisant un angle quelconque entre elles (Fig. 1.1). Dans l'espace

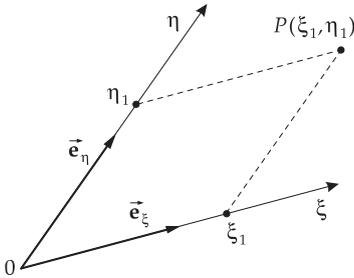
à trois dimensions, les axes de coordonnées sont trois droites non coplanaires, concourantes en un point O. Les coordonnées  $\xi, \eta, \zeta$  d'un point de l'espace sont définies par ses projections, parallèles aux trois plans formés par les axes de coordonnées, sur les axes de coordonnées.

**b) Système de coordonnées cartésiennes :** c'est un cas particulier du système de coordonnées affines, il est constitué d'axes de coordonnées orthogonaux entre eux. Les coordonnées d'un point sont les projections orthogonales de sa position sur ces axes (Fig. 1.2).

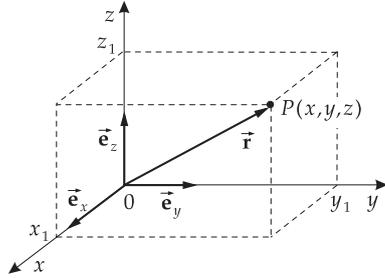
Élément de longueur :  $d\vec{r} = dx \vec{e}_x + dy \vec{e}_y + dz \vec{e}_z$ .

Élément de surface dans le plan  $x, y$  :  $dA = dx dy$ .

Élément de volume :  $dV = dx dy dz$ .



**Fig. 1.1 :** Coordonnées affines dans le plan. Coordonnées du point  $P : \xi, \eta$



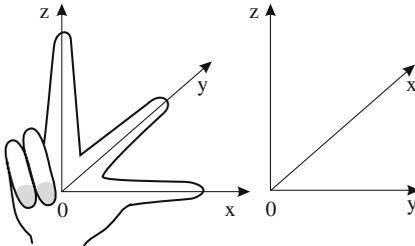
**Fig. 1.2 :** Coordonnées cartésiennes dans l'espace. Coordonnées du point  $P : x, y, z$

**Système cartésien droit :** dans l'espace à trois dimensions, les axes de coordonnées sont rangés de façon à ce que les 3 axes du système forment un trièdre orthogonal droit. Par exemple, les axes  $x, y$  et  $z$  pointent dans l'ordre successif des directions du pouce, de l'index et du médius (majeur) de la main droite.

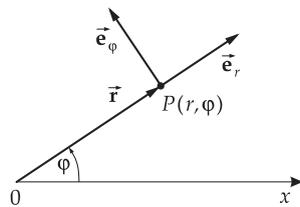
**c) Système de coordonnées polaires :** système de coordonnées dans le plan, dont les coordonnées sont la distance  $r$  du point à l'origine (pôle) et l'angle  $\phi$  (angle polaire) entre le vecteur position (rayon vecteur) et une direction de référence (axe polaire = sens positif de l'axe  $x$  par exemple).

Élément de longueur :  $d\vec{r} = dr \vec{e}_r + r d\phi \vec{e}_\phi$ .

Élément de surface :  $dA = r dr d\phi$ .



**Fig. 1.3 :** Système droit et gauche



**Fig. 1.4 :** Coordonnées polaires planes du point  $P : r, \phi$

**d) Système de coordonnées cylindriques :** extension du système de coordonnées polaires à l'espace à trois dimensions. Les coordonnées cylindriques d'un point sont obtenues à partir de la projection

orthogonale  $z$  du point sur l'axe  $z$  et de ses coordonnées polaires  $(\rho, \varphi)$  dans le plan perpendiculaire à l'axe  $z$ , c'est-à-dire la longueur  $\rho$  de sa perpendiculaire à l'axe  $z$  et l'angle  $\varphi$  entre cette perpendiculaire et l'axe polaire  $x$ .

Élément de longueur :  $d\vec{r} = d\rho\vec{e}_\rho + \rho d\varphi\vec{e}_\varphi + dz\vec{e}_z$ .

Élément de volume :  $dV = \rho d\rho d\varphi dz$ .

**e) Système de coordonnées sphériques** : généralisation des coordonnées polaires dans l'espace à trois dimensions. Les coordonnées polaires d'un point sont : sa distance  $r$  à l'origine, l'angle azimutal  $\theta$  du rayon vecteur par rapport à l'axe  $z$  et l'angle polaire  $\varphi$ , formé par la projection du rayon vecteur sur le plan  $x,y$  et l'axe  $x$ .

Élément de longueur :  $d\vec{r} = dr\vec{e}_r + r d\theta\vec{e}_\theta + r \sin\theta d\varphi\vec{e}_\varphi$ .

Élément de volume :  $dV = r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi$ .

Élément d'angle solide :  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ .

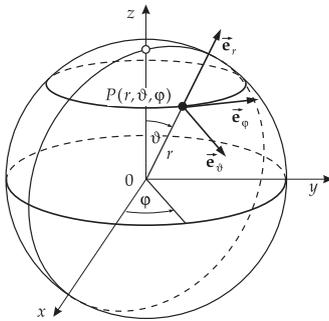


Fig. 1.5 : Coordonnées sphériques

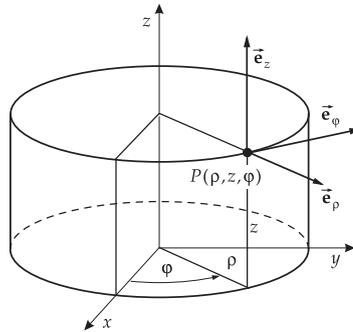


Fig. 1.6 : Coordonnées cylindriques

### 3. Référentiel

Un référentiel est constitué d'un système de coordonnées (repère) pour déterminer la position d'un corps dans l'espace et d'une horloge pour définir sa position dans le temps (espace-temps).

- Pour un système de coordonnées cartésiennes de l'espace à deux dimensions, il est nécessaire de définir l'origine et la direction de l'axe  $x$  ; dans l'espace à trois dimensions la direction de l'axe  $y$  doit également être indiquée. Autrement dit, respectivement deux ou trois points de référence doivent être définis.
- Tout mouvement est un mouvement relatif, c'est-à-dire que sa description mathématique dépend du repère d'espace choisi. Il est physiquement impossible de définir un mouvement **absolu**. Il est nécessaire de préciser le repère d'espace par rapport auquel un mouvement est décrit.
- ▷ Un même mouvement peut être décrit dans différents repères d'espace. Le choix judicieux d'un repère peut souvent faciliter la résolution d'un problème.

### 4. Vecteur position

Le vecteur position,  $\vec{r}$ , décrit une position (lieu) dans un système à plusieurs dimensions. Le vecteur position est décrit par un vecteur colonne dont les composantes sont les coordonnées du lieu.

(→ Calcul vectoriel) :

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Dans le cas d'un mouvement à une dimension le symbole flèche d'un vecteur peut être omis. L'équation horaire (fonction position ou rayon vecteur  $\vec{r}(t)$ ) donne la position d'un corps à tout instant  $t$ .

### 5. Trajectoire

La trajectoire est l'ensemble de tous les points successivement occupés par le corps lors de son mouvement. Ces points se trouvent généralement sur une courbe.

- La trajectoire d'un point d'une circonférence tournant autour de son axe fixe est un cercle. Si, en plus, l'axe se déplace avec un vecteur vitesse constant, la trajectoire est une cycloïde (Fig. 1.7).

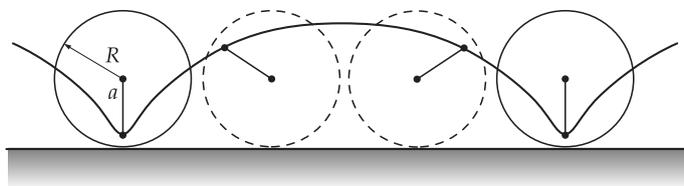


Fig. 1.7 : Cycloïde, résulte de la superposition d'une rotation et d'une translation.

### 6. Paramétrisation d'une trajectoire

Une trajectoire peut être représentée par une fonction ou un système de fonctions  $\vec{r}(p)$  d'un paramètre  $p$ , qui peut être le chemin parcouru ou le temps. Lorsque la valeur du paramètre augmente, la trajectoire est parcourue dans le sens positif (Fig. 1.8).

- ▷ De la trajectoire seule, sans la connaissance de la fonction position dépendante du temps, il est impossible de déduire la vitesse d'un corps.

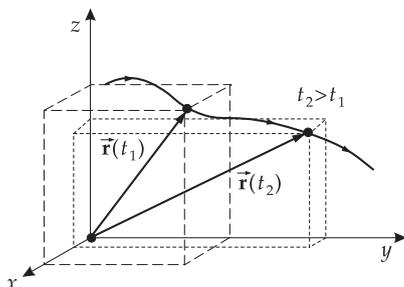


Fig. 1.8 : Représentation paramétrique d'une trajectoire  $\vec{r}(p)$  en fonction du paramètre  $t$ .

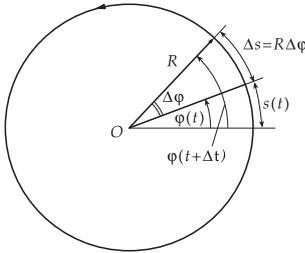
Un mouvement n'est défini que par rapport à un référentiel donné. La relation entre les événements physiques et le référentiel est établie par des points de référence et/ou des directions de référence.

- a) **Mouvement circulaire d'un point matériel.** Le mouvement d'un point matériel sur la circonférence d'un cercle de rayon  $R$  du plan  $x, y$ , peut être paramétrisé par l'angle  $\varphi$  en fonction du temps  $t$  :

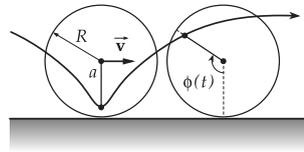
- en coordonnées sphériques :  $r = R, \theta = \pi/2, \varphi = \varphi(t)$ ,
- en coordonnées cylindriques :  $x(t) = R \cdot \cos \varphi(t), y(t) = R \cdot \sin \varphi(t), z(t) = 0$  (Fig. 1.9).

**b) Mouvement d'un point sur une roue.** La trajectoire d'un point qui se trouve à la distance  $a < R$  du centre d'une roue de rayon  $R$  tournant à vitesse constante, est une hypocycloïde. Sa représentation paramétrique en coordonnées cartésiennes en fonction de l'angle de rotation  $\varphi(t)$  sont : (Fig. 1.10)

$$\begin{aligned}x(t) &= vt - a \sin \varphi(t) \\y(t) &= R - a \cos \varphi(t)\end{aligned}$$



**Fig. 1.9 :** Mouvement circulaire. Déplacement élémentaire :  $\Delta s = R \cdot \Delta \varphi$



**Fig. 1.10 :** Représentation paramétrique d'une cycloïde

## 7. Degré de liberté

Degré de liberté d'un système physique : dimension de l'espace de configuration, c'est-à-dire que le nombre de paramètres scalaires indépendants (valeurs numériques) nécessaires pour déterminer la position ou l'état (de mouvement) d'un corps.

- Dans l'espace à trois dimensions, un point matériel a trois degrés de liberté de mouvement, c'est-à-dire dans trois directions distinctes ( $x, y, z$ ) de l'espace. Un système isolé de  $N$  points matériels possède  $3 \cdot N$  degrés de liberté dans l'espace à 3 dimensions.

Si les coordonnées  $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N$ , d'un système de  $N$  points matériels, dont le mouvement est limité par des contraintes internes ou externes, sont soumises à  $k$  conditions :

$$g_\alpha(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N, t) = 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, k$$

alors le système ne possède plus que  $n = 3 \cdot N - k$  degrés de liberté.

- Si un corps est assujéti à se déplacer à la surface d'une sphère, il n'a plus que deux degrés de liberté et le long d'un rail il ne lui reste plus qu'un seul degré de liberté. Un solide rigide, dans l'espace à trois dimensions, peut en plus avoir un mouvement de rotation, par conséquent posséder trois degrés de liberté supplémentaires. Un système constitué de deux points matériels reliés par une tige rigide de longueur  $l$ , possède  $n = 6 - 5$  degrés de liberté (condition :  $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2 = l^2$ , avec  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  : vecteurs position des points matériels). Un solide rigide en rotation autour d'un axe fixe, ne possède qu'un seul degré de liberté (rotation).

## 1.1.2 Temps

### 1. Définition et mesure du temps

**Temps  $t$**  : pour la quantification de phénomènes variables au cours du temps. Certains **phénomènes périodiques** (récurrents) de la nature sont utilisés pour définir l'unité de temps.

**Durée ou intervalle de temps** : la différence en temps  $\Delta t$  de deux événements.

**M** La mesure du temps au moyen d'**horloges** est basée sur des phénomènes naturels périodiques (pendule) ou continus (clepsydre, consommation d'une chandelle, etc.) La période  $T$  d'un **pendule simple** ne dépend que de sa longueur  $l$  (et de la valeur locale de l'accélération de la pesanteur  $g$ ) :  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ . Les montres mécaniques utilisent le mouvement circulaire périodique entretenu par un ressort spiral. Les procédés modernes de mesure du temps utilisent des circuits oscillants électriques dont la fréquence est stabilisée par la fréquence de résonance d'un cristal de quartz ou celle de phénomènes de physique atomique.

**Chronomètre** : sert à la mesure précise d'intervalles de temps, souvent utilisé conjointement à des capteurs mécaniques ou électriques (interrupteurs, barrières optiques, etc.). Le nombre de périodes d'oscillations est compté par un dispositif mécanique ou électronique. Typiquement, la précision des horloges se situe dans le domaine de la minute par jour pour des horloges mécaniques ordinaires, de la seconde par jour pour des horloges à quartz et jusqu'à  $10^{-14}$  (une seconde par plusieurs millions d'années) pour une horloge atomique.

## 2. Unités de temps

**Seconde** (s) : unité de temps du système d'unités SI, c'est une des unités fondamentales du système SI, définie comme 9 192 631 770 périodes du rayonnement électromagnétique de la transition entre les niveaux de structure hyperfine de l'état fondamental du Césium. Initialement définie comme la 86 400-ème partie d'un jour solaire moyen divisé en 24 heures de 60 minutes, chacune d'une durée de 60 secondes.

$$[t] = s = \text{Seconde}$$

Autres unités :

1 Minute (min)	=	60 s
1 heure (h)	=	60 min = 3 600 s
1 Jour (j)	=	24 h = 1 440 min = 86 400 s
1 Année (a)	=	365,2425 j

- ▷ Le temps standard est disponible par réception d'un émetteur radio (en général par l'émetteur ondes-longues DLF77 situé à Brunswick en Allemagne). Certaines pendules et montres-bracelet reçoivent directement cette information.
- ▷ Pour la définition de l'année ainsi que du mois  $\rightarrow$  *Système planétaire*. L'année grégorienne comporte 365,2425 jours et ne dévie que de 3/10 000 de jour par an de l'année tropique.

Le temps est encore subdivisé en semaines (de 7 jours) et en mois (de 28 à 31 jours) (Calendrier grégorien).

## 3. Calendrier

Un calendrier est utilisé pour la subdivision de périodes de temps longues. Les systèmes de calendrier se réfèrent au cycle lunaire d'environ 28 jours et au cycle solaire d'environ  $365\frac{1}{4}$  jours. Parce que ces cycles ne sont pas compatibles, on est obligé d'intercaler des jours mobiles de façon à ce que les mêmes mois désignent les mêmes saisons.

En Europe on utilise le **calendrier grégorien** qui, depuis 1582, a remplacé le **calendrier julien**. Ainsi, le printemps débute toujours un 21 mars.

- ▷ Dans certains pays de l'Europe de l'est, le calendrier julien est resté en usage jusqu'après 1917. Il dévie de deux à trois semaines de notre calendrier grégorien. C'est ainsi que la révolution russe du 17 octobre 1917 a, en réalité, eu lieu en novembre de notre calendrier actuel.

**Jour intercalaire** : à toutes les années dont le nombre est divisible par 4 (année bissextile), à l'exception des années non divisibles par 400, on ajoute un jour à la fin du mois de février. L'an 2008 sera une année bissextile, l'an 1900 ne l'était pas.

**Semaine** : subdivision de l'année en 52 ou 53 semaines. Par convention, la première semaine d'une année est la semaine qui comprend le premier jeudi de l'année.

- ▷ Le premier jour de la semaine est le lundi. Par contre, d'après la tradition chrétienne, le dimanche est le premier jour de la semaine.

Les années du calendrier grégorien sont numérotées **de façon continue**. Les années antérieures à l'année 1 sont notées av. J.C. (avant Jésus Christ) ou avant l'ère chrétienne soit encore B.C. (before Christ).

- ▷ Il n'y a pas d'année zéro, l'année 1 suit directement l'année -1 (av. J.C.). Exception : en astronomie, on numérote les années d'après une extrapolation du calendrier julien.

D'autres **systèmes de calendrier** sont :

- Le calendrier israélite, mélange de calendrier solaire et lunaire, (luni-solaire) avec des années et des mois intercalaires de durées variables. Les années sont comptées à partir du 7 octobre 3761 (av. J.C.) [Création de l'Univers], l'année débute en septembre-octobre, en 2007 commence l'année 5768.
- Le calendrier musulman (calendrier lunaire pur) : les années sont comptées à partir de la fuite de Mahomet de La Mecque le 16 juillet 622 (hgire), (en 2007 débute l'année 1386).

### 1.1.3 Longueur, surface, volume

#### 1. Longueur

Longueur  $l$ , la **distance** la plus courte entre deux points de l'espace.

**Mètre** (m), unité de longueur du système SI. C'est une des grandeurs fondamentales du système SI, définie comme le chemin parcouru par la lumière dans le vide pendant  $1/299\,792\,458$  seconde. Initialement défini comme la 40 millionième partie de la circonférence terrestre et matérialisé par un **Mètre étalon** en platine irridié déposé au *Bureau Internationale des Poids et Mesures* à Sèvres près de Paris.

$$[l] = \text{m} = \text{Mètre}$$

Autres unités → Tab. 34/3 (→ Tab. 34/4 et Tab. 34/7).

Unités pratiques non SI :

$$\begin{aligned} 1 \text{ \AA} &= 10^{-10} \text{ m} \\ 1 \text{ mille nautique (mm)} &= 1\,852 \text{ m} \end{aligned}$$

#### 2. Mesure de longueurs

**M** À l'origine, les mesures de longueur étaient effectuées par comparaison à des copies de l'unité de mesure (règle, mètre pliant, mètre ruban, pied à coulisse, vis micrométrique, parfois munie d'un vernier pour une lecture plus précise, etc.). Actuellement, les mesures de longueur précises sont effectuées à l'aide **d'interféromètres** optiques (→ *Optique*), utilisant la longueur d'onde d'une lumière monochromatique comme étalon de longueur.

La télémétrie acoustique est réalisée en mesurant le temps de vol d'une onde ultrasonore (**sonar**, utilisé en navigation marine, plus rarement de nos jours pour les appareils photographiques et les caméras). Le **radar** mesure l'éloignement d'un objet par l'intermédiaire du temps de vol d'une onde électromagnétique réfléchie par l'objet.

Les mesures de longueurs sont actuellement possibles avec une précision relative de  $10^{-14}$ . En utilisation courante, des précisions de l'ordre du micromètre sont obtenues à l'aide de vis micrométriques (Palmer).

**Triangulation** : procédé géométrique pour l'arpentage de terrains mettant à profit le fait que, pour déterminer tous les côtés d'un triangle il suffit de connaître la longueur d'un de ses côtés et deux de ses angles. À partir d'une distance connue, n'importe quelle distance peut être mesurée par une suite de mesures d'angles à l'aide d'un **théodolite**.

**Parallaxe** : différence angulaire des directions sous lesquelles un objet apparaît quand il est vu de deux points d'observation distincts (Fig.1.11).

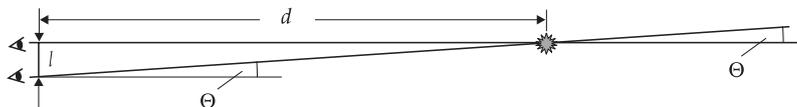


Fig. 1.11 : Parallaxe  $\Theta = \arctan d/l$  pour une séparation entre yeux  $l$  à la distance  $d \gg l$

### 3. Surfaces et volumes

**Surface**  $S$  et **volume**  $V$  sont des grandeurs déduites de mesures de longueurs.

**Mètre carré** ( $m^2$ ), unité SI de surface, c'est la surface d'un carré de 1 m de côté.

$$[S] = m^2 = \text{mètre carré}$$

**Mètre cube** ( $m^3$ ), unité SI de volume, c'est le volume d'un cube dont les arêtes mesurent 1 mètre.

$$[V] = m^3 = \text{mètre cube}$$

Autres unités  $\rightarrow$  Tab. 34/3 et  $\rightarrow$  Tab. 34/4.

Autres unités de surface :

1 Hectare (ha)	=	10 000 m <sup>2</sup>
1 Are (a)	=	100 m <sup>2</sup>
1 Pouce carré (sq in)	=	6,452 cm <sup>2</sup>
1 Pied carré (sq ft)	=	0,929 m <sup>2</sup>

Autres unités de volume :

1 Litre	=	1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> = 1000 cm <sup>3</sup>
1000 l	=	1 m <sup>3</sup>
1 US-Gallon (gal)	=	3,785 dm <sup>3</sup>
1 brit. Gallon (gal)	=	4,546 dm <sup>3</sup>

**M** Des surfaces quelconques peuvent être mesurées en les divisant en figures géométriques simples (rectangles, triangles) dont on mesure les côtés (par exemple : par triangulation). Une mesure directe d'une surface peut être effectuée en comptant le nombre de carrés d'un réseau à mailles carrées recouvrant la surface à mesurer. De manière analogue, le volume d'un corps creux peut être déterminé en le remplissant de corps géométriques simples (cubes, pyramides, cônes, ...). Le volume de corps solides peut également être déterminé par immersion dans un liquide ( $\rightarrow$  balance (densimètre) de Mohr).

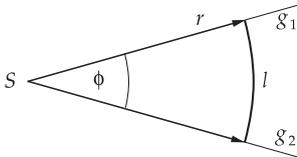
Si la masse volumique d'un corps est connue, son volume peut être déduit de sa masse.

## 1.1.4 Angle

### 1. Définition d'un angle

**Angle  $\phi$  :** intersection de deux droites ou de deux surfaces. Dans le plan ou l'espace, différence de direction entre deux droites. Pour déterminer la grandeur d'un angle, on trace un arc de cercle de rayon  $r$  quelconque, centré à l'intersection, et on mesure la longueur  $l$  de l'arc délimité par les deux droites (cf. Fig. 1.12).

Angle et arc			1
$\phi = \frac{l}{r}$	Symbole	Unité	Dénomination
	$\phi$	rad	angle
	$l$	m	longueur de l'arc
	$r$	m	longueur du rayon



**Fig. 1.12 :** Mesure de l'angle  $\phi$ , formé par les demi-droites  $g_1$  et  $g_2$ , par celle de l'arc  $l$ .

### 2. Unités d'angle

**a) Radian (rad) :** unité d'angle dans le système SI. Un radian est l'angle qui, dans un cercle centré au sommet de l'angle, découpe un arc de même longueur que son rayon. Puisque la circonférence d'un cercle a une longueur  $2\pi r$ , à un cercle correspond l'angle  $2\pi$  radians.

▷ Radian, degré et grade sont des unités complémentaires au système SI, ils sont sans dimension.

**b) Degré (°) :** c'est la 360<sup>ème</sup> partie d'un cercle :

$$1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = 57,3^\circ$$

$$1^\circ = \frac{2\pi}{360^\circ} = 0,0175 \text{ rad}$$

ses sous-multiples (division sexagésimale) sont :

$$1 \text{ degré} (^\circ) = 60 \text{ minutes d'arc} (') = 3\,600 \text{ secondes d'arc} (")$$

**c) grade :** unité d'angle utilisée en géodésie, c'est la 400<sup>ème</sup> partie d'un cercle :

$$1 \text{ grade} = 0,9^\circ = 0,0157 \text{ rad}$$

$$1^\circ = 1,11 \text{ grade}$$

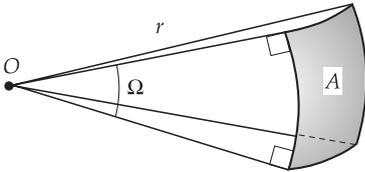
$$1 \text{ rad} = 63,7 \text{ grades}$$

**[M]** Les mesures d'angles peuvent être effectuées directement à l'aide d'un rapporteur, ou déduites par calcul à partir de la mesure de la corde de l'angle au moyen d'un compas. Le **théodolite** sert aux mesures angulaires par  $\rightarrow$  *Triangulation*.

### 3. Angle solide

**Angle solide**  $\Omega$  : angle dans l'espace sous lequel un observateur voit une surface  $S$  distante de  $r$ . C'est la partie de la surface d'une sphère de rayon unité découpée par le cône d'observation dont le sommet est placé en son centre (Fig. 1.13).

Angle solide			
$\Omega = \frac{S}{r^2}$	Symbole	Unité	Dénomination
	$\Omega$	rad	angle
	$S$	$m^2$	aire délimitée par un cône
	$r$	m	rayon de la sphère

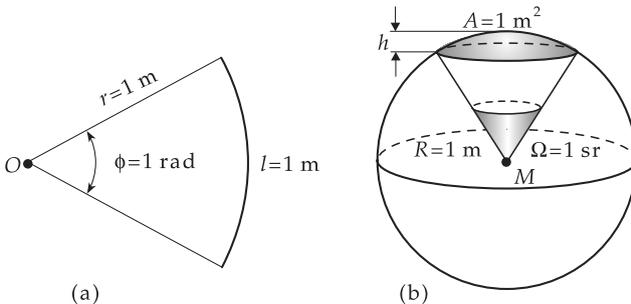


**Fig. 1.13 :** Mesure de l'angle solide  $\Omega$  par celle de l'aire  $A$  et de  $r(\Omega = A/r^2)$ .

**Steradian (sr)** : unité d'angle solide dans le système SI.

Un steradian est l'angle solide formé par un cône qui délimite une surface de  $1 \text{ m}^2$  sur la sphère de rayon  $1 \text{ m}$  centrée en son sommet.

- L'angle solide correspondant à tout l'espace est de  $4\pi \text{ sr}$ .
- ▷ Le steradian, comme le radian, est sans dimension. Il est utilisé pour désigner un angle solide (dans l'espace à trois dimensions).



**Fig. 1.14 :** Définition des unités d'angle radian (a) et steradian (b). L'aire  $A$  de la calotte sphérique est  $A = 2\pi R \cdot h$ .