

l'intégrale

TOUT-EN-UN

MP | MP*

BERNARD **SALAMITO**

MARIE-NOËLLE **SANZ**

FRANÇOIS **VANDENBROUCK**

MARC **TULOUP**

Physique

tout-en-un

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Conception et création de couverture : Atelier 3+

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^{er} 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, 2014

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-071362-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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.

Table des matières

I	Mécanique	19
1	Changements de référentiels en mécanique classique	21
1	Exemples	21
1.1	Cas de deux référentiels en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre	21
1.2	Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un autre référentiel	22
1.3	Conclusion	22
2	Référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel	23
2.1	Transformation de Galilée	23
2.2	Composition des vitesses	24
3	Référentiel en translation par rapport à un autre référentiel	25
3.1	Présentation de la situation	25
3.2	Composition des vitesses	26
3.3	Composition des accélérations	26
4	Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un autre référentiel	27
4.1	Présentation de la situation	27
4.2	Composition des vitesses	29
4.3	Composition des accélérations	30
5	Notion de point coïncident	32
5.1	Point coïncident	32
5.2	Lien avec la vitesse et l'accélération d'entraînement	33
6	Complément : cinématique classique et relativiste	34

TABLE DES MATIÈRES

2	Dynamique dans un référentiel non galiléen	45
1	Référentiels galiléens	45
2	Référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen . . .	46
2.1	Principe fondamental de la dynamique dans un référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen	46
2.2	Autres lois de la dynamique dans un référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen	47
2.3	Exemples d'études dans un référentiel en translation accélérée par rapport à un référentiel galiléen	49
2.4	Cas d'un référentiel en translation rectiligne uniformément accélérée par rapport à un référentiel galiléen	53
3	Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen	54
3.1	Principe fondamental de la dynamique dans un référentiel en rotation autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen	54
3.2	Forces d'inertie	55
3.3	Autres lois de la dynamique dans un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen	56
3.4	Énergie potentielle associée à la force d'inertie d'entraînement	57
3.5	Exemples d'études dans un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un référentiel galiléen	58
4	Les différents référentiels classiques de la mécanique et la question de leur caractère galiléen	63
4.1	Critère pour déterminer si un référentiel est galiléen ou non	63
4.2	Le référentiel terrestre	63
4.3	Le référentiel géocentrique	64
4.4	Le référentiel de Copernic	66
3	Lois du frottement solide	85
1	Introduction	85
2	Observations expérimentales	85
2.1	Dispositif	85
2.2	Première expérience	86
2.3	Deuxième expérience	86
3	Lois de Coulomb pour le frottement de glissement	86
3.1	Modélisation, définitions et notations	86
3.2	Loi de Coulomb pour la composante normale \vec{N}	88
3.3	Loi de Coulomb pour la composante tangentielle \vec{T} dans le cas du non-glissement	88

3.4	Loi de Coulomb pour la composante tangentielle \vec{T} dans le cas du glissement	88
3.5	Les coefficients de frottement	89
3.6	Cas d'un contact sans frottement	89
4	Méthode de résolution d'un problème avec frottement solide	90
5	Interprétations des observations expérimentales	90
5.1	Notations et mise en équation générale	90
5.2	Interprétation de la première expérience	91
5.3	Interprétation de la deuxième expérience	92
6	Aspect énergétique	93
6.1	Puissance de la force de contact s'exerçant sur un solide	93
6.2	Puissance totale des forces de contact entre deux solides	94

II Éléments de traitement du signal 109

4 Signaux périodiques, filtrage 111

1	Signaux périodiques non sinusoïdaux	111
1.1	Spectre d'un signal périodique	111
1.2	Signification physique	112
2	Action d'un filtre sur un signal périodique non sinusoïdal	116
2.1	Filtres	116
2.2	Effet d'un filtre sur un signal sinusoïdal	118
2.3	Effet d'un filtre sur un signal périodique de forme quelconque	118
2.4	Diagramme de Bode et type du filtre	119
2.5	Composition spectrale du signal de sortie	121
2.6	Caractère intégrateur ou dérivateur du filtre	121
3	Exemples de filtrage de signaux périodiques non sinusoïdaux	123
3.1	Filtrage d'un créneau par un filtre passe-bas du premier ordre	123
3.2	Filtrage d'un signal triangulaire par un filtre passe-haut du premier ordre	126
3.3	Filtrage par un filtre passe-bande du deuxième ordre	129
4	Génération d'harmoniques due à une non-linéarité	132
4.1	Première exemple : redressement d'une tension sinusoïdale	132
4.2	Deuxième exemple : écrêtage d'un signal	134
4.3	Conclusion	135

5 Électronique numérique 155

1	Échantillonnage	155
---	---------------------------	-----

TABLE DES MATIÈRES

1.1	Introduction	155
1.2	Acquisition, échantillonnage	155
1.3	Spectre d'un signal échantillonné	156
1.4	Critère de Nyquist-Shannon	159
1.5	Pratique de l'analyse spectrale	161
2	Filtrage numérique	167
2.1	Filtre passe-bas du premier ordre	167
2.2	Limitations	168
2.3	Filtres d'ordre supérieur	170
2.4	Génération d'un signal analogique à partir d'un signal numérique	171

III Optique **179**

6 Modèle scalaire des ondes lumineuses **181**

1	Le modèle scalaire de la lumière	181
1.1	Nature de l'onde lumineuse	181
1.2	La vibration lumineuse	182
1.3	Éclairement et intensité vibratoire	183
2	Lumière monochromatique	185
2.1	Définition	185
2.2	Domaine visible	186
2.3	Notation complexe	186
2.4	Expression de l'éclairement	186
3	Chemin optique	187
3.1	Définition	187
3.2	Calcul pratique du chemin optique	187
3.3	Chemin optique et retard de phase	188
3.4	Surface d'onde	189
3.5	Théorème de Malus	190
3.6	Égalité des chemins optiques entre points conjugués	190
4	Onde sphérique, onde plane	191
4.1	Onde sphérique	191
4.2	Onde plane	192
4.3	Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss	194
5	Lumières réelles	196
5.1	Composition spectrale	196
5.2	Sources de lumière blanche	197

5.3	Lampes spectrales	197
5.4	Faisceaux lasers	198
6	Trains d'ondes	198
6.1	La largeur des raies spectrales	198
6.2	Interprétation	199
6.3	Longueur de cohérence	200
6.4	Modèle des trains d'ondes aléatoires	201
7	Interférences de 2 ondes lumineuses	213
1	Interférences lumineuses	213
2	Intensité vibratoire résultante	214
2.1	Terme d'interférences	214
2.2	Notion d'ondes cohérentes	215
3	Formule de Fresnel	216
3.1	Énoncé	216
3.2	Interprétation physique	217
3.3	Différence de marche et ordre d'interférences	218
4	Figure d'interférences	219
4.1	Champ d'interférences	219
4.2	Franges d'interférences	219
4.3	Contraste	220
5	Retour sur la notion de cohérence	222
5.1	Cas de deux sources distinctes	222
5.2	Cas de deux sources mutuellement cohérentes	222
8	Dispositif interférentiel par division du front d'onde : les trous d'Young	227
1	Le dispositif des trous d'Young	227
1.1	Présentation du dispositif	227
1.2	Notion de dispositif interférentiel à division du front d'onde	228
1.3	Description du champ d'interférences	229
1.4	Généralisation à d'autres dispositifs interférentiels par division du front d'onde	233
1.5	Montage de Fraunhofer	234
2	Modifications du dispositif	236
2.1	Influence du déplacement de la source ponctuelle	236
2.2	Influence de la largeur spectrale	242
2.3	Éclairage en lumière blanche	245
2.4	Complément : influence d'une lame à faces parallèles	246

TABLE DES MATIÈRES

9	L'interféromètre de Michelson	263
1	L'interféromètre de Michelson	263
1.1	Présentation du dispositif	263
1.2	Les deux voies de l'interféromètre	264
1.3	Le dispositif séparateur	264
1.4	Schéma de principe de l'interféromètre	265
2	Configuration de la lame d'air éclairée par une source étendue	266
2.1	Définition	266
2.2	Observation des franges	267
2.3	Applications	274
3	Configuration du coin d'air éclairé par une source étendue	278
3.1	Définition	278
3.2	Observation des franges	278
3.3	Application : détection des défauts d'une lame de verre	281
10	Interférences de N ondes cohérentes	295
1	Superposition de N ondes lumineuses	295
1.1	Expression de la vibration lumineuse résultante	295
1.2	Intensité vibratoire résultante	296
1.3	Maxima principaux d'intensité	298
1.4	Interprétation à l'aide de la représentation de Fresnel	299
2	Réseaux de diffraction	301
2.1	Définition	301
2.2	Diffraction par un réseau	301
2.3	Formule fondamentale des réseaux	302
2.4	Principe du spectromètre à réseau	304
IV	Électromagnétisme	317
11	Champ électrostatique	319
1	Charge électrique	319
1.1	Rappels	319
1.2	Charges ponctuelles	319
1.3	Distributions continues de charges	320
2	Champ créé par une charge ponctuelle	322
2.1	Loi de Coulomb	322
2.2	Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle	323

3	Champ créé par une distribution de charges	324
3.1	Principe de superposition	324
3.2	Champ créé par une distribution discrète de charges ponctuelles . . .	324
3.3	Champ créé par une distribution continue de charges	325
4	Propriétés de symétrie	326
4.1	Symétries usuelles des distributions de charges	326
4.2	Symétries du champ	329
5	Circulation du champ électrostatique, potentiel électrostatique	333
5.1	Circulation d'un champ de vecteurs	334
5.2	Potentiel électrostatique	335
5.3	Lien entre le champ et le potentiel électrostatiques	336
5.4	Propriétés de symétrie du potentiel	337
5.5	Énergie potentielle d'une charge placée dans un champ extérieur . . .	338
6	Flux du champ électrostatique - Théorème de Gauss	338
6.1	Flux d'un champ de vecteurs	338
6.2	Théorème de Gauss	340
7	Topographie du champ électrostatique	340
7.1	Lignes de champ et équipotentiels	340
7.2	Propriétés des lignes de champ électrostatique et des équipotentiels	341
7.3	Quelques exemples	344
8	Analogie avec le champ gravitationnel	347
8.1	Interaction gravitationnelle	347
8.2	Champ de gravitation	347
8.3	Propriétés du champ de gravitation	348
12	Exemples de champs électrostatiques	365
1	Méthodes d'étude des champs et des potentiels	365
2	Exemple de problème à symétrie sphérique : sphère uniformément chargée. .	366
2.1	Étude des symétries	366
2.2	Application du théorème de Gauss	367
2.3	Champ et potentiel créés par la sphère.	368
3	Exemple de problème à symétrie cylindrique : cylindre uniformément chargé	370
3.1	Étude des symétries	370
3.2	Application du théorème de Gauss	370
3.3	Champ et potentiel électrostatiques créés par le cylindre	371
4	Exemples de problèmes à symétrie plane	372
4.1	Étude des symétries	372
4.2	Calcul du champ par le théorème de Gauss	373

TABLE DES MATIÈRES

4.3	Expression du potentiel	374
4.4	Modélisation surfacique	375
4.5	Application au condensateur plan	376
13	Dipôle électrostatique	395
1	Potentiel et champ créés	395
1.1	Introduction	395
1.2	Dipôle électrostatique, approximation dipolaire	395
1.3	Moment dipolaire	396
1.4	Potentiel créé par un dipôle électrostatique	397
1.5	Champ créé par un dipôle électrostatique	398
1.6	Topographie du champ	399
1.7	Application aux molécules polaires	400
2	Action d'un champ extérieur sur un dipôle	400
2.1	Cas d'un champ uniforme	400
2.2	Cas d'un champ non uniforme	402
2.3	Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique extérieur	404
14	Champ magnétostatique	415
1	Courant électrique	415
1.1	Vecteur densité de courant	415
1.2	Intensité traversant une surface orientée	417
1.3	Distributions filiformes	417
2	Propriétés globales du champ magnétostatique	417
2.1	Flux du champ magnétostatique	417
2.2	Circulation du champ magnétostatique - Théorème d'Ampère	418
3	Symétries et invariances du champ magnétique	419
3.1	Symétries et invariances usuelles des distributions de courants	419
3.2	Symétries du champ magnétique	421
4	Topographie du champ magnétostatique	425
4.1	Propriétés des lignes de champ du champ magnétostatique	425
4.2	Comment distinguer une carte de champ électrostatique d'une carte de champ magnétostatique?	426
4.3	Exemples	426
5	Exemples de calculs de champ magnétostatique	428
5.1	Comment appliquer le théorème d'Ampère?	428

5.2	Exemple de problème à symétrie cylindrique : fil infini, de rayon a , parcouru par un courant uniformément réparti en volume	428
5.3	Solénoïde long	431
15	Dipôle magnétique	451
1	Moments magnétiques	451
1.1	Notion de moment magnétique	451
1.2	Ordres de grandeur	452
2	Champ créé par un dipôle magnétique	453
2.1	Approximation dipolaire	453
2.2	Champ magnétique créé par le dipôle	454
3	Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique	455
3.1	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique uniforme	455
3.2	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique non uniforme	456
3.3	Approche documentaire : l'expérience Stern et Gerlach	456
16	Équations de Maxwell	469
1	La loi de la conservation de la charge électrique	469
1.1	Cas unidimensionnel	469
1.2	Cas général	470
2	Champ électromagnétique - Équations de Maxwell	471
2.1	Définition du champ électromagnétique	471
2.2	Équations de Maxwell	471
2.3	Remarques et commentaires	472
2.4	Compatibilité des équations de Maxwell avec la loi de conservation de la charge	473
3	Forme intégrale des équations de Maxwell	473
3.1	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Gauss : théorème de Gauss	474
3.2	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-flux	474
3.3	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday : loi de Faraday	474
3.4	Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Ampère : théorème d'Ampère généralisé	476
4	Équation de propagation des champs dans un milieu vide de charge et de courant	477
4.1	Couplage spatio-temporel entre le champ électrique et le champ magnétique	477
4.2	Démonstration de l'équation de propagation	477
4.3	Nature de l'onde lumineuse	478
5	Champs statiques	479

TABLE DES MATIÈRES

5.1	Équations de Maxwell en régime stationnaires	479
5.2	Théorème de Gauss et théorème d'Ampère	479
5.3	Existence d'un potentiel électrostatique	479
5.4	Équation de Poisson et équation de Laplace de l'électrostatique	480
6	Approche numérique : résolution de l'équation de Laplace	480
6.1	Méthodes de résolution numérique	480
6.2	Premier exemple : condensateur plan fini	481
6.3	Deuxième exemple : capteur capacitif	483
17	Énergie du champ électromagnétique	503
1	Interaction entre le champ électromagnétique et la matière	503
1.1	Densité volumique de force électromagnétique	503
1.2	Puissance volumique	504
1.3	Cas d'un conducteur ohmique	505
2	Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting	506
2.1	Définitions	506
2.2	Expressions	506
2.3	Quelques ordres de grandeur	507
3	Bilan d'énergie électromagnétique	508
3.1	Bilan global	508
3.2	Équation locale de Poynting	509
3.3	Complément : justification des expressions de la densité volumique d'énergie et du vecteur de Poynting	509
4	Exemples	510
4.1	Régime stationnaire	510
4.2	Solénoïde en régime variable	514
18	Propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide	527
1	Équation de d'Alembert	527
1.1	Définition	527
1.2	Solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle	528
1.3	Complément : démonstration de la solution	529
2	Onde électromagnétique plane progressive dans le vide	530
2.1	Définition d'une onde plane progressive (OPP)	530
2.2	Structure de l'OPP électromagnétique dans le vide	531
2.3	Lien du modèle de l'OPP électromagnétique avec la réalité	532
3	Onde électromagnétique plane progressive et monochromatique dans le vide	533
3.1	Définition d'une onde plane progressive et monochromatique (OPPM)	533

3.2	Expression générale d'une OPPM et notation complexe	534
3.3	Lien du modèle de l'OPPM électromagnétique avec la réalité	535
3.4	Spectre électromagnétique	535
4	Polarisation rectiligne	537
5	Étude énergétique des OPP électromagnétiques	539
5.1	Expressions des grandeurs énergétiques	539
5.2	Cas des OPPM électromagnétiques, valeurs moyennes	540
6	La notation complexe pour les OPPM	541
6.1	Choix d'une convention de notation complexe	541
6.2	Dérivation et notation complexe	541
6.3	Équations de Maxwell en représentation complexe	542
6.4	Grandeurs énergétiques en notation complexe	542
6.5	Application à une OPPM électromagnétique se propageant dans le vide	543
7	Approche expérimentale : polarisation rectiligne de la lumière	544
7.1	Lumière naturelle	544
7.2	Le polariseur (ou polaroïd)	544
7.3	Production de lumière polarisée rectilignement	544
7.4	Loi de Malus	545
19	Propagation d'ondes électromagnétiques dans un plasma, dispersion	559
1	Onde électromagnétique plane progressive dans un plasma	559
1.1	Interaction entre une OPPM et un plasma	559
1.2	Relation de dispersion du plasma	561
1.3	Vitesse de phase, dispersion	562
1.4	Complément : étude du cas où $\omega > \omega_p$	564
1.5	Complément : étude du cas où $\omega < \omega_p$	565
1.6	Approche documentaire : ionosphère et télécommunications	566
2	Propagation d'un paquet d'ondes	571
2.1	Le modèle du paquet d'ondes	571
2.2	Étude de deux exemples	572
2.3	Propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu dispersif	575
2.4	Complément : étude théorique de l'évolution du paquet d'ondes	576
2.5	Retour sur la propagation dans un plasma	578
20	Onde électromagnétique dans un conducteur, réflexion	591
1	Propagation d'une onde électromagnétique dans un conducteur	591
1.1	Conductivité d'un métal en régime variable	591
1.2	Relation de dispersion d'un conducteur ohmique	593

TABLE DES MATIÈRES

1.3	Cas des basses fréquences, effet de peau	595
2	Réflexion d'une OPPM électromagnétique sur un conducteur parfait	600
2.1	Le modèle du conducteur parfait	600
2.2	Réflexion d'une OPPM en incidence normale sur un conducteur	603
2.3	Onde électromagnétique stationnaire	608
2.4	Onde électromagnétique dans une cavité	612
21	Rayonnement dipolaire électrique	631
1	Dipôle électrique oscillant	631
1.1	Moment dipolaire électrique	631
1.2	Définition d'un dipôle électrique oscillant	632
2	Champ électromagnétique créé par un dipôle oscillant	632
2.1	Étude des symétries	633
2.2	Zone de rayonnement	634
2.3	Champ électromagnétique dans la zone de rayonnement	634
2.4	Anisotropie du rayonnement	636
2.5	Affaiblissement de l'onde avec la distance	637
2.6	Puissance totale rayonnée	640
3	Approche documentaire : diffusion Rayleigh	640
3.1	Couleur du ciel	640
3.2	Polarisation par diffusion Rayleigh	641
V	Thermodynamique	657
22	Systèmes ouverts en régime stationnaire	659
1	Énergie et entropie d'un système	659
1.1	Équilibre thermodynamique et équilibre thermodynamique local	659
1.2	Énergie d'un système thermodynamique	661
1.3	Entropie d'un système thermodynamique	662
2	Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé	663
2.1	Le premier principe	663
2.2	Le second principe	669
3	Principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire	674
3.1	Système ouvert	674
3.2	Bilan d'une grandeur extensive Y en régime stationnaire	675
3.3	Premier principe pour un système ouvert en régime stationnaire	676
3.4	Second principe pour un système ouvert en régime stationnaire	680

3.5	Premier et second principes pour un système ouvert sous forme infinitésimale	681
4	Diagramme $(\ln P, h)$ d'un fluide	682
4.1	Principe d'un diagramme thermodynamique	682
4.2	Zone d'équilibre entre le liquide et le gaz et courbe isotitre	683
4.3	Le diagramme $(\ln P, h)$ ou diagramme des frigoristes	684
4.4	Application des deux principes à l'aide du diagramme	687
5	Exemples d'application des principes de la thermodynamique pour un système ouvert	688
5.1	Application 1 : étude du circuit d'eau d'une centrale électrique thermique	688
5.2	Application 2 : étude d'une machine frigorifique	695
23	Transferts thermiques	727
1	Les trois modes de transfert thermique	727
1.1	Transfert thermique conductif	727
1.2	Transfert thermique convectif	728
1.3	Transfert thermique radiatif	728
2	Le courant thermique	730
2.1	Vecteur densité de courant thermique	730
2.2	Flux thermique	731
3	Loi de Fourier - Conductivité thermique	731
3.1	Loi phénoménologique de Fourier	731
3.2	Limites de validité de la loi de Fourier	732
3.3	Ordre de grandeur des conductivités thermiques	732
4	Équation locale de bilan thermique	733
4.1	Bilan thermique local à une dimension	733
4.2	Bilan thermique local en symétrie cylindrique	735
4.3	Bilan thermique local en symétrie sphérique	736
4.4	Complément : équation locale de bilan thermique	738
5	Équation de la diffusion thermique	739
5.1	Diffusion thermique en l'absence de sources	739
5.2	Diffusion thermique en présence de sources	743
5.3	Conditions aux limites pour le champ de température	744
5.4	Champ de température en régime stationnaire	746
5.5	Approche numérique : exemples de résolution de l'équation de diffusion thermique	749
6	Résistance thermique	752

TABLE DES MATIÈRES

6.1	Définition	752
6.2	Résistance thermique dans le cas d'un transfert unidimensionnel . . .	754
6.3	Résistance thermique en géométries cylindrique et sphérique	755
6.4	Lois d'association des résistances thermiques	757
6.5	Résistance thermique d'une interface solide-fluide	759
6.6	Cas du régime lentement variable	760
7	Comment déterminer expérimentalement une conductivité thermique ?	760
7.1	Mesure de conductivité thermique	760
7.2	Mesure de résistance thermique	762
8	Complément : irréversibilité du phénomène de conduction thermique	764
8.1	Irréversibilité	764
8.2	Production d'entropie	764
VI Physique quantique		787
24 Introduction à la mécanique quantique.		789
1	Ondes ou particules ?	789
1.1	Interférences avec des ondes lumineuses	789
1.2	Interférences avec des ondes de matière	793
1.3	Principe de complémentarité de Bohr	794
2	La fonction d'onde et l'équation de Schrödinger	795
2.1	Description de l'état d'une particule	795
2.2	Amplitude de probabilité et condition de normalisation	796
2.3	Interprétation probabiliste	796
2.4	L'équation de Schrödinger	797
2.5	L'équation de Schrödinger indépendante du temps	798
3	Inégalités de Heisenberg	801
3.1	Inégalité de Heisenberg spatiale	801
3.2	Inégalité temps - énergie	802
4	De la limite quantique à la limite classique	803
4.1	Exemple de l'oscillateur harmonique	803
4.2	Quantique ou classique ?	807
4.3	Principe de correspondance de Bohr	808
25 Évolution d'une particule quantique libre		823
1	La particule quantique libre	823
1.1	Définition	823

1.2	États stationnaires d'une particule quantique libre	823
1.3	Représentation d'une particule quantique par un paquet d'ondes	826
1.4	Vecteur densité de courant de probabilité	831
26	Évolution d'une particule quantique dans un potentiel	849
1	Marche de potentiel	850
1.1	Premier cas : $E > V_0$	851
1.2	Second cas : $E < V_0$	854
2	Barrière de potentiel et effet tunnel	857
2.1	Expression de la fonction d'onde propre	858
2.2	Probabilités de réflexion et de transmission. Effet tunnel	859
2.3	Représentation de la densité de probabilité de présence	860
2.4	Approximation d'une barrière épaisse	861
2.5	Interprétation qualitative de l'effet tunnel	863
3	Applications de l'effet tunnel	864
3.1	Première approche documentaire : le microscope à effet tunnel	864
3.2	Deuxième approche documentaire : la radioactivité α	868
4	Puits de potentiel infiniment profond	873
4.1	Fonctions d'onde propres	873
4.2	Niveaux d'énergie	875
4.3	Interprétation de l'existence d'un état d'énergie minimale	876
4.4	Densité de probabilité de présence	878
5	États non stationnaires d'une particule quantique	879
5.1	Premier exemple : puits de potentiel infiniment profond	879
5.2	Second exemple : le double puits de potentiel symétrique	880
VII	Thermodynamique statistique	923
27	Éléments de thermodynamique statistique	925
1	Monde microscopique, monde macroscopique	925
1.1	Ordres de grandeur moléculaires	925
1.2	Mouvements moléculaires	927
1.3	Échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique	928
2	Objet de la thermodynamique statistique	929
2.1	Système thermodynamique	929
2.2	Macro-état et micro-état	929
2.3	Système à l'équilibre thermodynamique	930

TABLE DES MATIÈRES

2.4	Probabilité d'un micro-état	930
2.5	Valeurs moyennes et fluctuations	931
3	Facteur de Boltzmann	931
3.1	Pression dans une atmosphère isotherme	931
3.2	Poids de Boltzmann pour une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat	937
4	Systèmes à spectre discret d'énergie	938
4.1	Probabilité d'occupation d'un état quantique donné par une particule donnée	938
4.2	Énergie moyenne	939
4.3	Système à deux niveaux d'énergie non dégénérés	941
5	Capacités thermiques classiques des gaz et des solides	945
5.1	Théorème d'équirépartition de l'énergie	945
5.2	Théorie classique de la capacité thermique des gaz parfaits	948
5.3	Amélioration du modèle du gaz parfait diatomique	950
5.4	Capacité thermique à volume constant d'un solide	953

VIII Appendice 983

A Outils mathématiques 985

1	Analyse vectorielle	985
1.1	Gradient d'un champ scalaire	985
1.2	Divergence d'un champ de vecteurs	986
1.3	Rotationnel d'un champ de vecteurs	987
1.4	Laplacien scalaire	989
1.5	Laplacien vectoriel	990
1.6	Le vecteur symbolique "nabla"	991
1.7	Cas des champs proportionnels à $\exp(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}))$	991
2	Analyse de Fourier	992
2.1	Décomposition d'une fonction périodique en série de Fourier	992
2.2	Synthèse de Fourier d'un signal non périodique	993
3	Équations aux dérivées partielles	996
3.1	Équations fondamentales	996
3.2	Résolution par substitution d'une forme donnée	997
3.3	Conditions aux limites et conditions initiales	997
4	Calcul différentiel	998
4.1	Dérivées partielles d'une fonction de plusieurs variables	998

TABLE DES MATIÈRES

4.2	Différentielle d'une fonction de plusieurs variables	998
5	Variables aléatoires	999
5.1	Variables aléatoires discrètes	999
5.2	Variables aléatoires à densité	999

Première partie

Mécanique

Changements de référentiels en mécanique classique

1

En première année, la mécanique du point et du solide se plaçait dans le cadre d'un seul référentiel, supposé galiléen. Dans ce chapitre, on va étudier les effets cinématiques lorsque deux référentiels différents sont utilisés, tout en restant dans le cadre de la mécanique classique. Au chapitre suivant on verra comment on doit modifier les lois de la dynamique dans un référentiel non galiléen.

1 Exemples

1.1 Cas de deux référentiels en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre

a) Premier exemple

Un observateur O se trouve, immobile, sur le quai de la gare. Un train passe à vitesse constante sur la voie rectiligne. Dans ce train, un enfant E joue à faire rebondir une balle. Pour l'en-

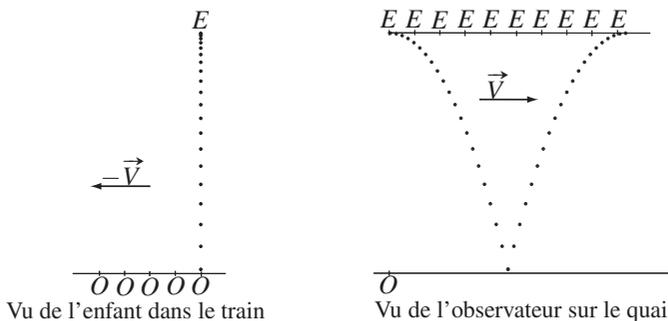


Figure 1.1 – Mouvement de la balle vu par l'enfant dans le train et vu par l'observateur sur le quai.

fant, la trajectoire de la balle est rectiligne : la balle descend, rebondit sur le sol du train et remonte verticalement jusqu'à sa main. La trajectoire de la balle vue par l'observateur O est complètement différente : il voit la balle suivre une trajectoire parabolique vers le bas puis parabolique vers le haut pour revenir dans la main de l'enfant.

Chacun des deux, enfant et observateur, voit une trajectoire différente et attribue à la balle un vitesse différente. Pour l'enfant, le mouvement de la balle sera le même que si le train est immobile. On reviendra plus loin sur ce fait.

b) Deuxième exemple

On suppose maintenant que le train freine avec une accélération constante. Pour l'enfant, la trajectoire de la balle sera toujours rectiligne mais elle ne sera plus verticale. La trajectoire de la balle vue par l'enfant est représentée sur la figure ci-dessous :

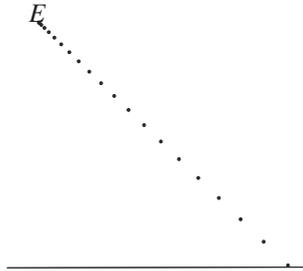


Figure 1.2 – Trajectoire de la balle dans le train qui freine, vue par l'enfant.

De la même façon, si le bus dans lequel on se trouve, debout car il y a du monde, freine, on se sent projeté vers l'avant.

1.2 Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un autre référentiel

Le plateau circulaire d'un manège tourne autour de son axe vertical à vitesse angulaire constante. Deux amis se trouvent sur ce manège. L'un d'eux (A) est assis au niveau de l'axe de rotation alors que l'autre (B) se trouve en un point de la périphérie du manège.

(A) demande à (B) de lui lancer son téléphone portable. Celui-ci, pour ne pas risquer de l'endommager, préfère lui envoyer en le posant sur le manège et en le faisant glisser sur le plateau. S'il ne se déplace pas, (A) ne pourra pas se saisir du téléphone.

En effet, la trajectoire du téléphone, si on néglige les frottements avec le plateau du manège est représentée figure 1.3.

Sur cet exemple, on constate que la rotation du plateau a entraîné une déviation de la trajectoire du téléphone.

1.3 Conclusion

À partir des exemples présentés, on a mis en évidence que le mouvement d'un référentiel par rapport à un autre modifie les trajectoires des objets donc leurs vitesses et leurs accélérations.

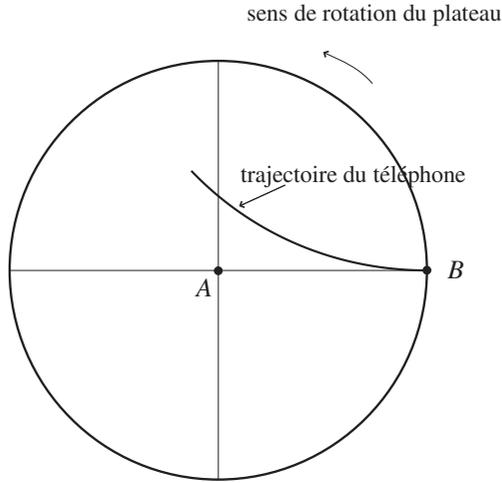


Figure 1.3 – Trajectoire du téléphone sur le plateau du manège

Dès lors, quand deux référentiels différents, \mathcal{R} et \mathcal{R}' , interviennent, il faut impérativement préciser vis-à-vis de quel référentiel on calcule le vecteur vitesse ou le vecteur accélération. On notera $\vec{v}_{|\mathcal{R}}(M)$, $\vec{v}_{|\mathcal{R}'}(M)$ les vitesses d'un point matériel M par rapport aux deux référentiels et $\vec{a}_{|\mathcal{R}}(M)$ et $\vec{a}_{|\mathcal{R}'}(M)$ ses accélérations. Dans la suite du chapitre, on va voir quelles relations existent entre ces vecteurs.

2 Référentiel en translation rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel

2.1 Transformation de Galilée

On reprend l'exemple du paragraphe (1.1). On associe des repères d'espace au quai de la gare et au train :

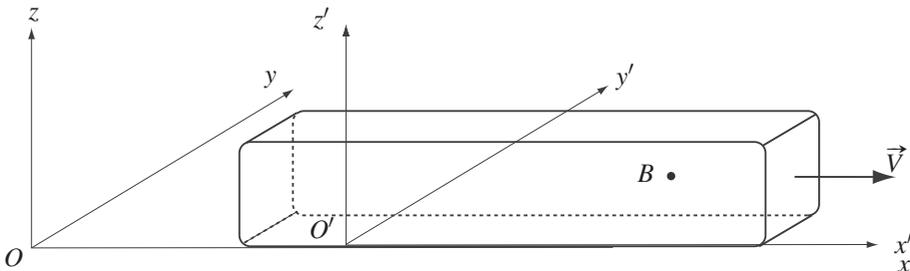


Figure 1.4 – Référentiel lié au quai et référentiel lié au train

Le référentiel $\mathcal{R}(O, x, y, z)$ est lié au quai, le référentiel $\mathcal{R}'(O', x', y', z')$ est lié au train qui est animé de la vitesse $\vec{V} = V\vec{u}_x$ par rapport au quai où V est une constante. \mathcal{R}' est en translation

rectiligne uniforme par rapport à \mathcal{R} . La balle se trouve au point B .

On imagine que l'enfant dans le train et l'observateur sur le quai de la gare aient réglé leurs montres à la même heure le matin. Au moment où le train passe en gare, les deux montres indiquent toujours la même heure : dans le cadre de la mécanique classique, le temps revêt un caractère absolu, il est le même dans tous les référentiels (on reviendra sur ce point plus loin). Si on suppose que les points O et O' coïncident à l'instant initial, alors : $\overrightarrow{OO'} = Vt\vec{u}_x$.

On peut écrire :

$$\overrightarrow{OB} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'B} \tag{1.1}$$

En projection sur les trois axes et en posant $\overrightarrow{OB} = x\vec{u}_x + y\vec{u}_y + z\vec{u}_z$ et $\overrightarrow{O'B} = x'\vec{u}_x + y'\vec{u}_y + z'\vec{u}_z$, cette équation donne :

$$\begin{cases} x = x' + Vt \\ y = y' \\ z = z' \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x' = x - Vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}, \tag{1.2}$$

Ces relations constituent la **transformation de Galilée** valable pour un référentiel \mathcal{R}' en translation rectiligne uniforme à la vitesse $\vec{V} = V\vec{u}_x$ par rapport \mathcal{R} , dans le cadre de la mécanique classique.

2.2 Composition des vitesses

Le vecteur vitesse de la balle, pour l'observateur sur le quai de la gare, est égal à la dérivée par rapport au temps du vecteur position \overrightarrow{OB} , calculée dans \mathcal{R} , référentiel lié au quai :

$$\vec{v}_{|\mathcal{R}}(B) = \left(\frac{d\overrightarrow{OB}}{dt} \right)_{\mathcal{R}} = \dot{x}(t)\vec{u}_x + \dot{y}(t)\vec{u}_y + \dot{z}(t)\vec{u}_z,$$

car les vecteurs \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z sont des vecteurs fixes (donc indépendants du temps) dans \mathcal{R} . De même la vitesse de la balle pour l'enfant est égale à la dérivée par rapport au temps du vecteur position $\overrightarrow{O'B}$, calculée dans \mathcal{R}' , référentiel lié au train :

$$\vec{v}_{|\mathcal{R}'}(B) = \left(\frac{d\overrightarrow{O'B}}{dt} \right)_{\mathcal{R}'} = \dot{x}'(t)\vec{u}_x + \dot{y}'(t)\vec{u}_y + \dot{z}'(t)\vec{u}_z,$$

car les vecteurs \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z sont aussi fixes dans \mathcal{R} . Or, avec la transformation de Galilée :

$$\dot{x}(t) = \dot{x}'(t) + V, \quad \dot{y}(t) = \dot{y}'(t) \quad \text{et} \quad \dot{z}(t) = \dot{z}'(t).$$

On a donc : $\vec{v}_{|\mathcal{R}}(B) = \vec{v}_{|\mathcal{R}'}(B) + V\vec{u}_x$. La **formule de composition des vitesses** dans le cadre de la transformation de Galilée est :

$$\vec{v}_{|\mathcal{R}}(B) = \vec{v}_{|\mathcal{R}'}(B) + \vec{V}. \tag{1.3}$$

3 Référentiel en translation par rapport à un autre référentiel

On généralise ici le résultat précédent au cas d'une translation quelconque.

3.1 Présentation de la situation

Deux référentiels \mathcal{R} et \mathcal{R}' sont en **translation** l'un par rapport à l'autre si les axes de \mathcal{R}' gardent toujours une direction constante par rapport à ceux de \mathcal{R} .

On peut, sans perte de généralité, choisir les axes de \mathcal{R}' parallèles à ceux de \mathcal{R} . Le mouvement de \mathcal{R}' par rapport à \mathcal{R} est entièrement décrit par celui de son origine O' dans \mathcal{R} . Si le mouvement de O' est rectiligne dans \mathcal{R} , on parle de **translation rectiligne** (on peut penser au référentiel lié à un wagon d'un train se déplaçant le long d'une voie rectiligne). Si le mouvement de O' est circulaire dans \mathcal{R} , on parle de **translation circulaire** (on peut penser au référentiel lié à une nacelle de grande roue, à condition qu'un mécanisme maintienne la nacelle verticale).

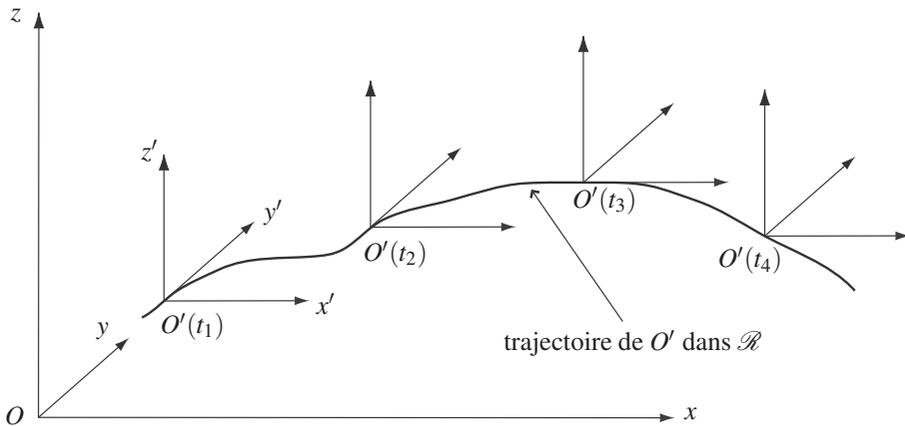


Figure 1.5 – Le référentiel \mathcal{R}' est en translation par rapport au référentiel \mathcal{R} . Il est représenté à quatre instants différents, t_1 , t_2 , t_3 et t_4 .

Deux observateurs, l'un lié au référentiel \mathcal{R} (c'est-à-dire immobile dans le référentiel \mathcal{R}), l'autre lié au référentiel \mathcal{R}' observent le mouvement d'un point M . Quelle vitesse et quelle accélération attribuent-ils au point M ? Quelle relation y-a-t-il entre la vitesse ou l'accélération du point M vue par l'un et celle vue par l'autre? On va maintenant répondre à ces questions.

La position du point M est repérée :

- dans le référentiel \mathcal{R} par le vecteur position :

$$\overrightarrow{OM} = x(t)\vec{u}_x + y(t)\vec{u}_y + z(t)\vec{u}_z,$$

- dans le référentiel \mathcal{R}' par le vecteur position :

$$\overrightarrow{O'M} = x'(t)\vec{u}'_x + y'(t)\vec{u}'_y + z'(t)\vec{u}'_z.$$

Le mouvement du point O' dans le référentiel \mathcal{R} est décrit par le vecteur :

$$\overrightarrow{OO'} = x_{O'}(t)\vec{u}_x + y_{O'}(t)\vec{u}_y + z_{O'}(t)\vec{u}_z.$$

3.2 Composition des vitesses

Comme vu précédemment :

$$\begin{aligned} \vec{v}_{/\mathcal{R}}(M) &= \left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} \right)_{\mathcal{R}} = \dot{x}(t)\vec{u}_x + \dot{y}(t)\vec{u}_y + \dot{z}(t)\vec{u}_z, \\ \vec{v}_{/\mathcal{R}'}(M) &= \left(\frac{d\overrightarrow{O'M}}{dt} \right)_{\mathcal{R}'} = \dot{x}'(t)\vec{u}_x + \dot{y}'(t)\vec{u}_y + \dot{z}'(t)\vec{u}_z. \end{aligned}$$

On déduit de $\overrightarrow{OM} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'M}$: $\vec{v}_{/\mathcal{R}}(M) = \left(\frac{d\overrightarrow{OM}}{dt} \right)_{\mathcal{R}} = \left(\frac{d\overrightarrow{O'M}}{dt} \right)_{\mathcal{R}} + \left(\frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} \right)_{\mathcal{R}}$. Or : $\left(\frac{d\overrightarrow{OO'}}{dt} \right)_{\mathcal{R}} = \vec{v}_{/\mathcal{R}}(O')$. Cette vitesse est la vitesse, par rapport au référentiel \mathcal{R} , commune à tous les points du référentiel \mathcal{R}' . On la note \vec{v}_e et on l'appelle vitesse d'entraînement. Cette vitesse d'entraînement dépend *a priori* du temps.

La **formule de composition des vitesses** dans le cas où le référentiel \mathcal{R}' est en translation par rapport au référentiel \mathcal{R} s'écrit :

$$\vec{v}_{/\mathcal{R}}(M) = \vec{v}_{/\mathcal{R}'}(M) + \vec{v}_e \tag{1.4}$$

où $\vec{v}_e = \vec{v}_{/\mathcal{R}}(O')$ est la **vitesse d'entraînement**.

3.3 Composition des accélérations

L'accélération de O' par rapport à \mathcal{R} est : $\vec{a}_{/\mathcal{R}}(O') = \left(\frac{d^2\overrightarrow{OO'}}{dt^2} \right)_{\mathcal{R}}$. De la même façon, en dérivant par rapport au temps l'expression (1.4), et en faisant le même type de travail, on obtient la formule de composition des accélérations. On pose $\vec{a}_e = \vec{a}_{/\mathcal{R}}(O')$ et on l'appelle accélération d'entraînement.

La **formule de composition des accélérations** dans le cas où le référentiel \mathcal{R}' est en translation par rapport au référentiel \mathcal{R} s'écrit :

$$\vec{a}(M)_{/\mathcal{R}} = \vec{a}(M)_{/\mathcal{R}'} + \vec{a}_e \tag{1.5}$$

où $\vec{a}_e = \vec{a}_{/\mathcal{R}}(O')$ est l'**accélération d'entraînement**.

Remarque

Dans le cas où \mathcal{R}' est en translation *rectiligne uniforme* par rapport à \mathcal{R} , on a $\vec{a}_e = \vec{0}$, et donc $\vec{a}(M)_{|\mathcal{R}} = \vec{a}(M)_{|\mathcal{R}'}$. Cette remarque prendra toute son importance quand on étudiera la dynamique en référentiel non galiléen.

4 Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe par rapport à un autre référentiel

4.1 Présentation de la situation

a) Définition

Un référentiel \mathcal{R}' est en **rotation uniforme** autour de l'axe Δ , fixe dans le référentiel \mathcal{R} , si tous les points fixes dans \mathcal{R}' sont animés dans \mathcal{R} d'un mouvement circulaire uniforme de même axe Δ et de même vecteur rotation $\vec{\omega}$ constant.

Ce vecteur rotation commun est appelé **vecteur rotation** de \mathcal{R}' par rapport à \mathcal{R} et noté $\vec{\omega}_{\mathcal{R}'|\mathcal{R}}$.

b) Paramétrage

Comme tous les points de l'axe Δ sont fixes dans \mathcal{R} et dans \mathcal{R}' , on peut, sans perte de généralité, choisir le même point pour les origines O et O' des deux référentiels en le prenant sur l'axe Δ . Par ailleurs, il semble naturel de choisir un des axes des référentiels selon l'axe Δ . On le note (Oz) :

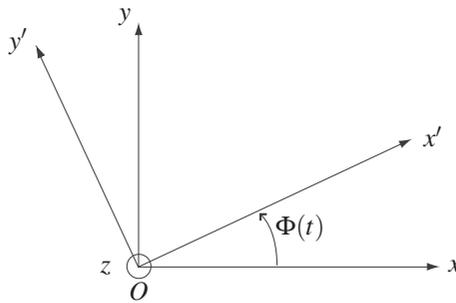


Figure 1.6 – Le référentiel $\mathcal{R}'(O, x', y', z)$ est en rotation autour de l'axe fixe (Oz) .

La rotation est uniforme ce qui fait que

$$\frac{d\Phi}{dt} = \omega = \text{constante}$$

en notant ω la composante du vecteur rotation le long de l'axe (Oz) : $\vec{\omega}_{\mathcal{R}'|\mathcal{R}} = \omega \vec{u}_z$.

Un point M sera repéré par le vecteur position \vec{OM} . On l'exprime en utilisant un repérage cartésien :

- dans le référentiel \mathcal{R} par :

$$\vec{OM} = x(t)\vec{u}_x + y(t)\vec{u}_y + z(t)\vec{u}_z,$$

- dans le référentiel \mathcal{R}' par :

$$\vec{OM} = x'(t)\vec{u}_{x'} + y'(t)\vec{u}_{y'} + z(t)\vec{u}_z.$$

Attention, les vecteurs $\vec{u}_{x'}$ et $\vec{u}_{y'}$ dépendent du temps pour un observateur fixe dans le référentiel \mathcal{R} , tout comme les vecteurs \vec{u}_x et \vec{u}_y en dépendent pour un observateur fixe dans \mathcal{R}' . On peut exprimer les vecteurs $\vec{u}_{x'}$ et $\vec{u}_{y'}$ en fonction de \vec{u}_x et \vec{u}_y :

$$\begin{cases} \vec{u}_{x'} = \cos(\Phi(t))\vec{u}_x + \sin(\Phi(t))\vec{u}_y \\ \vec{u}_{y'} = -\sin(\Phi(t))\vec{u}_x + \cos(\Phi(t))\vec{u}_y. \end{cases} \quad (1.6)$$

c) Formule de dérivation vectorielle

Pour établir l'expression des relations de composition des vitesses et des accélérations, il faut calculer la dérivée d'une même quantité vectorielle dans deux référentiels en rotation l'un par rapport à l'autre. On sait, d'après les exemples introductifs, que ces deux dérivées sont *a priori* différentes. Il existe cependant un lien entre elles, que l'on va établir maintenant.

Soit une grandeur vectorielle $\vec{A}(t)$ variant au cours du temps. On peut exprimer cette grandeur

- dans le référentiel \mathcal{R} par :

$$\vec{A}(t) = A_x(t)\vec{u}_x + A_y(t)\vec{u}_y + A_z(t)\vec{u}_z,$$

- dans le référentiel \mathcal{R}' par :

$$\vec{A}(t) = A'_x(t)\vec{u}_{x'} + A'_y(t)\vec{u}_{y'} + A_z(t)\vec{u}_z.$$

On calcule la dérivée de \vec{A} dans le référentiel \mathcal{R} en utilisant chacune des deux expressions.

On a d'abord très simplement :

$$\left(\frac{d\vec{A}}{dt} \right)_{|\mathcal{R}} = \dot{A}_x\vec{u}_x + \dot{A}_y\vec{u}_y + \dot{A}_z\vec{u}_z,$$

car les vecteurs \vec{u}_x , \vec{u}_y et \vec{u}_z sont constants dans \mathcal{R} . En utilisant la deuxième expression il vient :

$$\left(\frac{d\vec{A}}{dt} \right)_{|\mathcal{R}} = \dot{A}'_x\vec{u}_x + \dot{A}'_y\vec{u}_y + \dot{A}_z\vec{u}_z + A'_x(t) \left(\frac{d\vec{u}_{x'}}{dt} \right)_{|\mathcal{R}'} + A'_y(t) \left(\frac{d\vec{u}_{y'}}{dt} \right)_{|\mathcal{R}'}. \quad (1.7)$$

Les trois premiers termes du second membre s'identifient très facilement à la dérivée de \vec{A} dans le référentiel \mathcal{R}' . Il reste à examiner les deux derniers termes.

En dérivant par rapport au temps les formules (1.6), on obtient :

$$\begin{cases} \left(\frac{d\vec{u}_{x'}}{dt} \right)_{|\mathcal{R}} = -\omega \sin(\Phi(t))\vec{u}_x + \omega \cos(\Phi(t))\vec{u}_y = \vec{\omega}_{\mathcal{R}'|\mathcal{R}} \wedge \vec{u}_{x'}(t) \\ \left(\frac{d\vec{u}_{y'}}{dt} \right)_{|\mathcal{R}} = -\omega \cos(\Phi(t))\vec{u}_x - \omega \sin(\Phi(t))\vec{u}_y = \vec{\omega}_{\mathcal{R}'|\mathcal{R}} \wedge \vec{u}_{y'}(t) \end{cases} \quad (1.7)$$