

Sous la direction de BERNARD **SALAMITO**

STÉPHANE **CARDINI** | DAMIEN **JURINE** | MARIE-NOËLLE **SANZ**

PHYSIQUE

MPSI

TOUT-EN-UN

Avec la collaboration de :
ANNE-EMMANUELLE **BADEL**
FRANÇOIS **CLAUSSET**

DUNOD

l'intégrale

Conception et création de couverture : Hokus Pokus Créations
Les photos du chapitre 5 ont été réalisées par Pierre Canaguier

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, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-079402-7

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	Signaux physiques	22
1	Oscillateur harmonique	23
1	Un oscillateur harmonique mécanique	23
1.1	Système étudié	23
1.2	Obtention d'une équation différentielle	24
1.3	Définition d'un oscillateur harmonique	24
1.4	Résolution de l'équation différentielle	25
1.5	Conservation de l'énergie mécanique	27
1.6	Amplitude et période du mouvement	29
2	Signal sinusoïdal	30
2.1	Définition du signal sinusoïdal	30
2.2	Phase instantanée, phase initiale	30
2.3	Période, fréquence	31
2.4	Une interprétation géométrique	32
2.5	Représentation de Fresnel	33
2.6	Déphasage	34
2	Propagation d'un signal	47
1	Signaux physiques, spectre	47
1.1	Ondes et signaux physiques	47
1.2	Notion de spectre	48
1.3	Cas d'un signal périodique de forme quelconque	50
1.4	Analyse harmonique expérimentale	53
1.5	Exemple : analyse de signaux sonores	54
2	Phénomène de propagation	56

TABLE DES MATIÈRES

2.1	Observations expérimentales	56
2.2	Onde progressive	57
2.3	Onde progressive sinusoïdale	61
3	Superpositions de deux signaux sinusoïdaux	77
1	Interférences entre deux ondes de même fréquence	77
1.1	Somme de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence	77
1.2	Phénomène d'interférences	81
2	Ondes stationnaires et modes propres	86
2.1	Superposition de deux ondes progressives de même amplitude	86
2.2	Onde stationnaire	86
2.3	Expérience de la corde de Melde	88
2.4	Modes propres	92
4	Onde lumineuse	117
1	L'onde lumineuse	117
1.1	Existence et nature de l'onde lumineuse	117
1.2	Célérité de l'onde lumineuse	117
1.3	Longueurs d'onde et fréquences optiques	118
2	Récepteurs lumineux, éclairement	120
2.1	Comparaison avec les récepteurs d'onde sonore	120
2.2	Exemples de récepteurs d'onde lumineuse	121
2.3	Éclairement	122
2.4	Éclairement spectral	122
3	Les sources lumineuses	123
3.1	Les sources de lumière blanche	123
3.2	Les lampes spectrales	123
3.3	Faisceau laser	124
4	Rayon lumineux et source ponctuelle	124
4.1	Expérience	124
4.2	Définition d'un rayon lumineux	125
4.3	Propagation rectiligne	125
4.4	Modèle de la source ponctuelle et monochromatique	126
5	La diffraction de la lumière	127
5.1	Diffraction par une fente	127
5.2	Universalité du phénomène de diffraction	129

5	Optique géométrique	147
1	Approximation de l'optique géométrique	147
2	Lois de Descartes	148
2.1	Lois de Descartes pour la réflexion	148
2.2	Lois de Descartes pour la réfraction	149
3	Miroir plan	151
3.1	Image d'un point objet par un miroir plan	151
3.2	Image d'un objet par un miroir plan	153
4	Systèmes centrés et approximation de Gauss	153
4.1	Systèmes optiques centrés	153
4.2	Approximation de Gauss	153
4.3	Propriétés d'un système centré dans les conditions de Gauss	154
4.4	Foyers objet, foyers image	155
5	Lentilles minces	157
5.1	Présentation des lentilles	157
5.2	Constructions géométriques	159
5.3	Relations de conjugaison	165
5.4	Complément : démonstration des formules de conjugaison	166
6	Applications des lentilles	166
6.1	Projection d'une image	166
6.2	Le microscope	169
6.3	La lunette de Galilée	171
6.4	La lunette astronomique	172
7	L'œil	173
7.1	Description et modélisation	173
7.2	Caractéristiques optiques	174
7.3	Défauts de l'œil	174
8	Approche documentaire : influence des réglages sur l'image produite par un appareil photographique numérique	175
8.1	Modélisation	175
8.2	Influence du diaphragme d'ouverture	176
8.3	Influence de la distance focale	179
6	Introduction au monde quantique	205
1	La dualité onde-particule de la lumière	205
1.1	Introduction	205
1.2	Historique de la découverte du photon	206
1.3	Le photon	208

TABLE DES MATIÈRES

1.4	Une expérience avec des photons uniques	210
1.5	Franges d'interférences et photons	211
2	La dualité onde-particule de la matière	213
2.1	La longueur d'onde de de Broglie	213
2.2	Expériences d'interférences de particules	217
3	Fonction d'onde et probabilités	219
3.1	Analyse d'une expérience d'interférences quantiques	219
3.2	Notion de fonction d'onde et probabilité de détection	221
3.3	Interprétation de l'expérience des fentes de Young	221
3.4	Complémentarité	221
4	Quantification de l'énergie d'une particule confinée	222
4.1	Notion de quantification	222
4.2	Particule dans un puits infini à 1 dimension	222
4.3	Généralisation : lien entre confinement spatial et quantification	224
7	Circuits électriques dans l'ARQS	237
1	Intensité du courant électrique	237
1.1	Charge électrique	237
1.2	Conducteurs électriques	238
1.3	Le courant électrique	239
1.4	Intensité d'un courant stationnaire dans un fil	240
1.5	Mesure de l'intensité d'un courant	242
1.6	L'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires (ARQS)	242
1.7	Intensité d'un courant variable	243
1.8	Loi des nœuds	244
2	Circuit électrique	245
3	Tension électrique	245
3.1	Mesure d'une tension	246
3.2	Additivité des tensions	247
3.3	Loi des mailles	247
3.4	Potentiel électrique	248
3.5	La masse	249
4	Dipôles électrocinétiques en courant continu	250
4.1	Puissance, conventions générateur et récepteur	250
4.2	Caractéristique d'un dipôle en courant continu	251
4.3	Le résistor	252
4.4	Les générateurs de tension	252
4.5	Point de fonctionnement d'un circuit	254

5	Associations de dipôles	255
5.1	Associations série et parallèle	255
5.2	Lois d'association des résistances	255
5.3	Associations de générateurs	256
6	Ponts diviseurs	257
6.1	Diviseur de tension	257
6.2	Diviseur de courant	257
7	Résistances de sortie et d'entrée	258
7.1	Résistance d'entrée	258
7.2	Résistance de sortie	259
8	Dipôles électrocinétiques fondamentaux du régime variable	259
8.1	Le générateur idéal de tension variable	259
8.2	Le résistor	260
8.3	Le condensateur	260
8.4	La bobine	261
9	Puissance et énergie en régime variable	262
9.1	Les unités	262
9.2	Puissance instantanée reçue par un dipôle en régime variable	262
9.3	Puissance dissipée dans un résistor	262
9.4	Énergie stockée dans un condensateur	262
9.5	Énergie stockée dans une bobine	263
8	Circuit linéaire du premier ordre	285
1	Étude expérimentale d'un circuit RC série	285
1.1	Montage	285
1.2	Régimes transitoire et établi	286
2	Modélisation	286
2.1	Simplification du montage	286
2.2	Équation différentielle sur $u_C(t)$	287
2.3	Constante de temps	287
2.4	Calcul de la tension $u_C(t)$	288
2.5	Interprétation physique	289
2.6	Portrait de phase	291
2.7	Bilan énergétique	293
3	Régime libre du circuit RC	294
3.1	Observation de la réponse à un signal créneau	294
3.2	Modélisation du régime libre	295
4	Étude de la tension $u_R(t)$	296

TABLE DES MATIÈRES

4.1	Réponse indicielle	297
4.2	Équation différentielle sur $u_R(t)$	297
4.3	Utilisation du portrait de phase	298
4.4	Résolution de l'équation différentielle	299
4.5	Régime libre	299
5	Exemple de circuit inductif	300
5.1	Schéma du montage	300
5.2	Équation différentielle sur $i(t)$	301
5.3	Calcul de l'intensité $i(t)$	301
5.4	Bilan énergétique	302
9	Circuit linéaire du second ordre	313
1	Étude expérimentale d'un circuit <i>RLC</i> série	313
1.1	Montage	313
1.2	Régimes transitoire et établi	314
1.3	Portraits de phase	315
2	Équation différentielle sur la tension u_C	316
2.1	Mise en équation	317
2.2	Pulsation propre et facteur de qualité	317
3	Détermination de la tension $u_C(t)$	318
3.1	Recherche des conditions initiales	318
3.2	Solution particulière $u_{C,p}(t)$	319
3.3	Différents régimes pour $u_{C,h}(t)$	319
3.4	Solution complète	321
4	Durée du régime transitoire	322
5	Réponse à un signal créneaux	323
5.1	Observations expérimentales	323
5.2	Modélisation du régime libre	324
6	Bilan énergétique	326
7	Analogie entre un circuit <i>RLC</i> et un oscillateur mécanique	327
10	Régime sinusoïdal	337
1	Régime transitoire et régime sinusoïdal forcé	337
1.1	Exemple	337
1.2	Généralisation	339
2	Signaux complexes en régime sinusoïdal forcé	339
2.1	Fondements de la méthode complexe	339
2.2	Exemple d'application	341

3	Impédance complexe	344
3.1	Impédance complexe d'un dipôle passif	344
3.2	Impédance complexe des dipôles de base	344
3.3	Association d'impédances complexes	345
3.4	Ponts diviseurs	346
4	Résonance d'intensité dans un circuit <i>RLC</i> série	347
4.1	Expérience	347
4.2	Interprétation par la méthode complexe	348
4.3	Interprétation par les vecteurs de Fresnel	350
4.4	Facteur de qualité	352
4.5	Détermination expérimentale des paramètres de la résonance	353
5	Résonance de charge d'un circuit <i>RLC</i> série	354
5.1	Étude en notation complexe	354
5.2	Détermination expérimentale de ω_0 et Q	356
5.3	Complément : étude par la méthode des vecteurs de Fresnel	357
6	Résonance dans un système mécanique	358
11	Analyse fréquentielle d'un circuit linéaire	375
1	Fonction de transfert	375
1.1	Position du problème	375
1.2	Définition de la fonction de transfert	375
1.3	Fonction de gain et fonction de phase	376
1.4	Réponse du filtre à un signal sinusoïdal	376
1.5	Lien entre équation différentielle et fonction de transfert	378
2	Diagramme de Bode	378
2.1	Le gain en décibel	379
2.2	Mesure d'un gain en décibel	379
2.3	Le diagramme de Bode	380
2.4	Étude de la courbe d'amplitude	381
2.5	Domaine dérivateur, domaine intégrateur	385
3	Exemples de filtres	386
3.1	Filtre passe-bas du premier ordre	386
3.2	Filtre passe-bas du deuxième ordre	388
3.3	Filtre passe-haut du premier ordre	389
3.4	Filtre passe-haut du deuxième ordre	391
3.5	Filtre passe-bande du deuxième ordre	392
4	Annexe 1 : courbes d'amplitude et de phase des filtres du premier et du deuxième ordre	394

TABLE DES MATIÈRES

4.1	Filtres du premier ordre	394
4.2	Filtres du deuxième ordre	395
5	Annexe 2 : diagrammes de Bode des filtres du premier et du deuxième ordre .	397
5.1	Filtres du premier ordre	397
5.2	Filtres du deuxième ordre	398
12	Filtrage d'un signal	411
1	Signaux non sinusoïdaux	411
1.1	Superposition de signaux sinusoïdaux en nombre fini	411
1.2	Exemples	411
2	Valeur moyenne, Valeur efficace	412
2.1	Valeur moyenne	412
2.2	Valeur efficace	413
3	Réponse d'un filtre à un signal périodique non sinusoïdal	414
3.1	Expression du signal de sortie	414
3.2	Principe du filtrage	416
3.3	Bande passante à -3dB	416
4	Exemples de filtrage	417
4.1	Filtrage par un filtre passe-bas	417
4.2	Filtrage par un filtre passe-haut	419
4.3	Filtrage par un filtre passe-bande	421
5	Filtre intégrateur ou dérivateur	421
5.1	Intégrateur	421
5.2	Dérivateur	422
6	Approche documentaire : accéléromètre	423
II	Mécanique 1	439
13	Cinématique du point	441
1	Notion de point en physique	441
1.1	Définition d'un solide	441
1.2	Définition d'un point	441
1.3	Quand peut-on assimiler un système à un point ?	442
2	Repérage d'un point du plan	442
2.1	Intérêt d'avoir plusieurs systèmes de coordonnées	442
2.2	Repérage d'un point sur une droite	444
2.3	Repérage d'un point dans le plan	445

3	Repérage d'un point dans l'espace	448
3.1	Repérage cartésien	448
3.2	Repérage cylindrique	448
3.3	Repérage sphérique	449
4	Cinématique du point	452
4.1	Notion de référentiel	452
4.2	Vecteurs position, déplacement, vitesse et accélération	454
5	Utilisation des différents systèmes de coordonnées	456
5.1	Coordonnées cartésiennes	456
5.2	Coordonnées cylindro-polaire	458
5.3	Coordonnées sphériques	462
6	Études de mouvements en coordonnées cartésiennes	465
6.1	Mouvements rectilignes	465
6.2	Mouvements à vecteur accélération constante	467
6.3	Mouvement rectiligne sinusoïdal : mouvement harmonique	469
7	Mouvements circulaires	470
7.1	Mouvement circulaire et uniforme	470
7.2	Généralisation : mouvement circulaire quelconque	471
8	Interprétation du vecteur accélération	472
8.1	Le vecteur vitesse et sa norme	472
8.2	Vecteur accélération et variation de la norme de la vitesse	473
8.3	Vecteur accélération et courbure de la trajectoire	474
9	Étude expérimentale de mouvements	475
9.1	Généralités	475
9.2	Étude expérimentale en coordonnées cartésiennes	476
9.3	Étude expérimentale en coordonnées polaires	479
14	Cinématique du solide	493
1	Repérage d'un solide	493
1.1	Définition d'un solide	493
1.2	Repérage d'un solide dans l'espace	493
2	Mouvement de translation	494
2.1	Définition	494
2.2	Mouvement d'un point d'un solide en translation	494
2.3	Conséquences	495
2.4	Deux mouvements de translations remarquables	495
3	Solides en rotation autour d'un axe fixe	496
3.1	Définition	496

TABLE DES MATIÈRES

3.2	Mouvement d'un point d'un solide en rotation	496
3.3	Conséquences	497
3.4	Quelques exemples de rotation autour d'un axe fixe	498
15	Principes de la dynamique newtonienne	505
1	Éléments cinétiques d'un point matériel	505
1.1	Masse	505
1.2	Quantité de mouvement	506
2	Les trois lois de Newton	507
2.1	Première loi de Newton : Principe d'inertie	507
2.2	Deuxième loi de Newton : Principe fondamental de la dynamique	508
2.3	Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques	510
3	Limite de validité de la mécanique classique	511
3.1	Qu'est-ce qu'un principe ?	511
3.2	Les hypothèses de la mécanique classique	511
3.3	Les limites de la mécanique classique	511
4	Premières applications : détermination d'une loi de force	512
4.1	Détermination dynamique d'une force : mesure de g	512
4.2	Détermination statique d'une force	513
5	Classification des forces	513
5.1	Les quatre interactions fondamentales	514
5.2	Forces à distance	514
5.3	Forces de contact	518
6	Résolution d'un problème de mécanique du point	522
7	Chute libre dans le champ de pesanteur	523
7.1	Mise en équation	523
7.2	Chute libre dans le vide	523
7.3	Chute libre avec frottements proportionnels à la vitesse	524
7.4	Chute libre avec frottements proportionnels au carré de la vitesse	527
7.5	Comparaison des deux modèles de frottements	528
8	Tir d'un projectile dans le champ de pesanteur	529
8.1	Mise en équation	529
8.2	Tir dans le vide	530
8.3	Tir en tenant compte de la résistance de l'air	532
9	Le pendule simple	534
9.1	Modélisation	535
9.2	Équation du mouvement	535
9.3	Résolution numérique	536

9.4	Cas des oscillations de faibles amplitudes	537
16	Aspects énergétiques de la dynamique du point	559
1	Travail et puissance d'une force	559
1.1	Introduction et notations	559
1.2	Puissance d'une force	560
1.3	Travail élémentaire d'une force	561
1.4	Travail d'une force au cours d'un déplacement	561
2	Premiers exemples de calculs de travaux	562
2.1	Travail d'une force constamment perpendiculaire au mouvement	562
2.2	Travail d'une force constante	562
2.3	Travail d'une force de frottement de norme constante	562
3	Théorème de l'énergie cinétique	563
3.1	Définition de l'énergie cinétique	563
3.2	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel galiléen	563
3.3	Utilisation du théorème de l'énergie cinétique	565
3.4	Intérêt d'une approche énergétique	565
3.5	Étude d'un problème à l'aide du théorème de l'énergie cinétique	565
4	Énergie potentielle et forces conservatives	567
4.1	Définitions	567
4.2	Exemples de forces conservatives	567
4.3	Exemples de forces non conservatives	570
5	Énergie mécanique	571
5.1	Définition de l'énergie mécanique	571
5.2	Conservation de l'énergie mécanique	571
5.3	Cas général : non conservation de l'énergie mécanique	572
6	Étude qualitative des mouvements et des équilibres	572
6.1	Exemple introductif	572
6.2	Position du problème	573
6.3	Analyse du mouvement à l'aide d'un graphe énergétique	574
6.4	Analyse des équilibres à l'aide d'un graphe énergétique	575
7	Portraits de phase et lien avec le profil d'énergie potentielle	578
7.1	Définitions	578
7.2	Exemple introductif	578
7.3	Caractéristiques principales des portraits de phase	580
17	Mouvement dans un puits de potentiel	599
1	Mouvement conservatif dans un puits de potentiel	599

TABLE DES MATIÈRES

1.1	Mouvement dans un puits de potentiel harmonique	599
1.2	Mouvement dans un puits de potentiel quelconque	602
2	Mouvements dans un puits de potentiel : influence des frottements	606
2.1	Équation différentielle du mouvement	606
2.2	Équation caractéristique et observation	607
2.3	Résolution : les trois régimes	608
2.4	Évaluation rapide de la durée des différents régimes	612
2.5	Aspects énergétiques	613
18	Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	635
1	Force de Lorentz	635
1.1	Rappel de l'expression	635
1.2	Différence fondamentale entre la composante électrique et la composante magnétique	636
1.3	Ordre de grandeur et conséquences	636
2	Mouvement dans un champ électrique uniforme	637
2.1	Équation du mouvement	637
2.2	Étude de la trajectoire	638
2.3	Accélération d'une particule chargée par un champ électrique	639
3	Mouvement dans un champ magnétique	643
3.1	Le mouvement est uniforme	643
3.2	Étude de la trajectoire	644
4	Quelques applications de ces mouvements	646
4.1	Expérience de Thomson	646
4.2	Spectromètre de masse	649
4.3	Cyclotron	650
5	Approche documentaire : limites relativistes en microscopie électronique	651
III	Mécanique 2	669
19	Loi du moment cinétique pour un point matériel	671
1	Observations préliminaires	671
1.1	Exemples introductifs	671
1.2	Notion intuitive de bras de levier	672
2	Moment cinétique d'un point matériel	672
2.1	Définition du moment cinétique	672
3	Moment d'une force	675
3.1	Moment d'une force par rapport à un point O	675

3.2	Moment d'une force par rapport à un axe orienté Δ	675
4	Loi du moment cinétique pour un point matériel	677
4.1	Loi du moment cinétique par rapport à un point fixe	677
4.2	Cas de conservation du moment cinétique	678
4.3	Loi du moment cinétique par rapport à un axe fixe	678
20	Mouvement dans un champ de force centrale. Champs newtoniens.	691
1	Force centrale conservative	691
1.1	Qu'est-ce qu'une force centrale conservative?	691
1.2	Exemples de forces centrales conservatives	692
1.3	Observations de mouvements à force centrale conservative	694
2	Généralités sur les forces centrales conservatives	695
2.1	Conséquence du caractère central de la force	695
2.2	Conséquence du caractère conservatif de la force	698
3	Cas particulier de l'attraction gravitationnelle	699
3.1	Position du problème	699
3.2	Étude qualitative du mouvement radial	700
4	Étude directe de la trajectoire circulaire	701
4.1	Position du problème	701
4.2	Étude à partir du principe fondamental de la dynamique	702
4.3	Application aux satellites géostationnaires	704
4.4	Vitesses cosmiques	707
4.5	Compléments : autres trajectoires envisageables	709
21	Moment cinétique et solide en rotation	723
1	Moment cinétique d'un solide ou d'un système de points	723
1.1	Cas d'un point matériel : notion de moment d'inertie	723
1.2	Cas d'un système déformable	724
1.3	Cas d'un solide en rotation par rapport à un axe	725
2	Loi du moment cinétique pour un solide en rotation	727
2.1	Rappel sur le moment d'une force	727
2.2	Loi scalaire du moment cinétique pour un solide	727
2.3	Cas de conservation du moment cinétique	728
2.4	Couples	728
3	Application aux dispositifs rotatifs	731
3.1	Liaison pivot d'axe (Oz)	731
3.2	Notions sur les moteurs et les freins dans les dispositifs rotatifs	732
4	Pendule pesant	733

TABLE DES MATIÈRES

4.1	Position du problème et équation du mouvement	733
4.2	Oscillations de faible amplitude	734
4.3	Intégrale première du mouvement et étude qualitative	735
4.4	Portrait de phase	736
4.5	Résolution numérique	737
5	Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	738
5.1	Énergie cinétique d'un solide en rotation	738
5.2	Puissance d'une force appliquée à un solide en rotation	739
5.3	Loi de l'énergie cinétique pour un solide indéformable	739

IV Thermodynamique 753

22 Système thermodynamique à l'équilibre 755

1	Descriptions microscopique et macroscopique de la matière	755
1.1	Les phases solide, liquide et gaz	755
1.2	L'agitation thermique	756
1.3	Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique	757
1.4	Le point de vue de la thermodynamique	757
2	Système thermodynamique, variables d'état	758
2.1	Système thermodynamique	758
2.2	Variables d'état	759
3	Équilibre thermodynamique	762
3.1	Définition	762
3.2	Équilibre thermodynamique local	762
3.3	Conditions d'équilibre	762
4	Équation d'état	764
4.1	Définition	764
4.2	Équation d'état d'un gaz parfait	764
4.3	Équation d'état d'une phase condensée idéale	766
5	Énergie interne, capacité thermique à volume constant	767
5.1	L'énergie interne U	767
5.2	La capacité thermique à volume constant C_V	768
5.3	Cas d'un gaz parfait	768
5.4	Cas d'une phase condensée incompressible	769
6	Corps pur diphasé en équilibre	770
6.1	Changements d'état physique	770
6.2	Diagramme de phases (P, T)	771

6.3	Variables d'état d'un système diphasé	774
7	Étude de l'équilibre liquide-gaz	775
7.1	Pression de vapeur saturante	775
7.2	Variation de P_{sat} avec T	776
7.3	Température d'ébullition	777
7.4	Diagramme de Clapeyron	777
7.5	Composition du mélange liquide-gaz	778
7.6	Point critique	780
7.7	Le stockage des fluides	781
23	Énergie échangée par un système au cours d'une transformation	791
1	Transformation thermodynamique	791
1.1	Transformation, état initial, état final	791
1.2	Différents types de transformations	792
1.3	Influence du choix du système	794
2	Travail des forces de pression	795
2.1	Expression générale du travail de la pression extérieure	795
2.2	Cas particulier d'un fluide en écoulement	798
2.3	Travail des forces de pression dans deux cas particuliers	799
2.4	Travail des forces de pression dans le cas d'une transformation mécaniquement réversible	800
3	Transfert thermique	803
3.1	Définition	803
3.2	Transformation adiabatique	804
3.3	Notion de thermostat	805
3.4	Retour sur les transformations monotherme et isotherme	806
3.5	Choix d'un modèle : adiabatique ou isotherme ?	806
24	Premier principe. Bilans d'énergie	815
1	Le premier principe de la thermodynamique	815
1.1	Énergie d'un système	815
1.2	Premier principe de la thermodynamique	816
1.3	Obtention de la valeur du transfert thermique	817
1.4	Transfert thermique dans une transformation isochore sans travail autre que celui de la pression et sans variation d'énergie cinétique	818
1.5	Exemples d'application du premier principe	818
2	La fonction d'état enthalpie	822
2.1	Définitions	822

TABLE DES MATIÈRES

2.2	Premier principe pour une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final	823
2.3	Transfert thermique dans une transformation isobare sans travail autre que celui de la pression et sans variation d'énergie cinétique	823
2.4	Enthalpie d'un gaz parfait	824
2.5	Enthalpie d'une phase condensée indilatable et incompressible	826
2.6	Enthalpie d'un système diphasé	827
2.7	Variations d'enthalpie isobares	828
3	Mesures de grandeurs thermodynamiques	830
3.1	Le calorimètre	830
3.2	Détermination d'une capacité thermique massique	831
3.3	Détermination d'une enthalpie de changement d'état	833
3.4	Mesure de la valeur en eau du calorimètre	834
25	Deuxième principe. Bilans d'entropie.	845
1	Le deuxième principe de la thermodynamique	845
1.1	Transformations irréversibles et transformations réversibles	845
1.2	Le deuxième principe de la thermodynamique	848
2	Entropie d'un échantillon de corps pur	849
2.1	Entropie d'un gaz parfait	849
2.2	Entropie d'une phase condensée indilatable et incompressible	853
2.3	Entropie d'un système diphasé	853
3	Exemples de bilans d'entropie	855
3.1	Méthode générale	855
3.2	Exemple 1 : détente de Joule - Gay Lussac	856
3.3	Exemple 2 : mise en contact avec un thermostat	856
3.4	Exemple 3 : compression d'un gaz parfait	859
3.5	Exemple 4 : chauffage par effet Joule	861
3.6	Exemple 5 : solidification d'un liquide surfondu	863
26	Machines thermiques	877
1	Machine monotherme	877
2	Machines thermiques dithermes	878
2.1	Généralités sur les machines dithermes	878
2.2	Moteur thermique	879
2.3	Machine frigorifique	881
2.4	Pompe à chaleur	882
3	Étude de cycles théoriques réversibles	883

3.1	Cycle de Carnot pour un gaz parfait	883
3.2	Cycle de Carnot pour un système diphasé	885
4	Étude de machines thermiques réelles	886
4.1	Moteur à explosion	886
4.2	Machine frigorifique	889

V Induction et forces de Laplace 919

27 Champ magnétique 921

1	Notion de champ	921
1.1	Champ scalaire et champ vectoriel	921
1.2	Champ stationnaire, champ uniforme	922
1.3	Lignes de champ	922
1.4	Un champ vectoriel permet de décrire une interaction à distance . . .	922
2	Champ magnétique, cartographie et exemples	923
2.1	Définition du champ magnétique	923
2.2	Unité de champ magnétique et ordres de grandeur	923
2.3	Source du champ magnétique	923
2.4	Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini	924
2.5	Champ magnétique créé par une spire circulaire	925
2.6	Norme du champ magnétique	926
2.7	Bobine longue	926
2.8	Aimant	929
3	Moment magnétique	929
3.1	Vecteur surface d'une spire plane	929
3.2	Moment magnétique d'une spire plane	930
3.3	Moment magnétique d'une bobine	930
3.4	Moment magnétique d'un aimant, ordre de grandeur	930
3.5	Lignes de champ d'un moment magnétique	931

28 Actions d'un champ magnétique 939

1	Force de Laplace	939
1.1	Force de Laplace sur un tronçon rectiligne dans un champ uniforme .	939
1.2	Puissance de la force de Laplace	940
2	Couple magnétique	940
2.1	Expression du couple magnétique	940
2.2	Exemple : couple magnétique exercé par un champ magnétique uni- forme sur une spire rectangulaire	941

TABLE DES MATIÈRES

3	Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant	944
3.1	Orientation d'un aimant	944
3.2	Positions d'équilibre	944
3.3	Application : la boussole	945
3.4	Effet moteur d'un champ magnétique tournant	945
29	Lois de l'induction	953
1	Expériences d'induction électromagnétique	953
1.1	Expérience historique de Faraday	953
1.2	Autres expériences	954
1.3	Interprétation	955
2	Loi de Faraday	956
2.1	Flux magnétique	956
2.2	Force électromotrice induite	957
2.3	Convention d'algébrisation	958
2.4	La loi de Faraday est-elle toujours applicable?	958
3	Loi de Lenz	960
30	Circuit fixe dans un champ magnétique variable	965
1	Auto-induction	965
1.1	Coefficient d'auto-induction	965
1.2	Exemple de calcul d'une inductance propre	967
1.3	Force électromotrice auto-induite	967
1.4	Schéma électrique	968
1.5	Loi de Lenz	968
1.6	Mesure de l'inductance propre d'une bobine	968
1.7	Bilan d'énergie	969
2	Induction mutuelle	970
2.1	Coefficient d'induction mutuelle	970
2.2	Forces électromotrices induites dans des circuits couplés par mutuelle induction	972
2.3	Schéma électrique	972
2.4	Étude de deux circuits couplés	973
31	Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	987
1	Conversion de puissance mécanique en puissance électrique	987
1.1	Rails de Laplace générateurs	987
1.2	Freinage par induction	993

1.3	Alternateur	994
2	Conversion de puissance électrique en puissance mécanique	997
2.1	Rails de Laplace moteurs	997
2.2	Haut-parleur électrodynamique	1001
VI Appendices		1023
A Mesures et incertitudes		1025
1	Mesure d'une grandeur physique	1025
1.1	Représentation d'une grandeur physique	1025
1.2	Mesure d'une grandeur physique	1026
2	Incertitudes et intervalle de confiance	1029
2.1	Notion d'intervalle de confiance	1029
2.2	Évaluation d'une incertitude-type	1030
2.3	Incertitude-type composée	1033
3	Présentation d'un résultat expérimental	1034
3.1	Notation d'un résultat	1034
3.2	Chiffres significatifs et arrondis	1035
4	Validité d'un résultat expérimental	1036
4.1	Comparaison entre une valeur mesurée et une valeur de référence	1036
4.2	Vérification d'une relation linéaire entre des données	1036
B Outils mathématiques		1041
1	Équations algébriques	1041
1.1	Système linéaire de n équations à p inconnues	1041
1.2	Équation non linéaire	1042
2	Équations différentielles	1044
2.1	Équation différentielle linéaire d'ordre 1 à coefficients constants	1044
2.2	Équation différentielle linéaire homogène d'ordre 2 à coefficients constants	1048
2.3	Équation différentielle linéaire d'ordre 2 à coefficients constants, avec un second membre non nul	1051
2.4	Autres équations différentielles	1054
3	Fonctions	1057
3.1	Fonctions usuelles	1057
3.2	Dérivée	1059
3.3	Développements limités	1061
3.4	Primitive et intégrale	1062

TABLE DES MATIÈRES

3.5	Développement en série de Fourier	1065
4	Géométrie	1067
4.1	Projection d'un vecteur, produit scalaire	1067
4.2	Produit vectoriel	1069
4.3	Transformations géométriques	1071
4.4	Courbes planes	1074
4.5	Courbes paramétrées	1077
4.6	Longueurs, aires et volumes classiques	1080
4.7	Barycentre d'un système de points	1080
5	Trigonométrie	1082
5.1	Angle orienté	1082
5.2	Fonctions trigonométriques	1083
5.3	Nombres complexes	1086

Avant propos

Cette nouvelle édition du *Tout-en-un de Physique, option MPSI* est totalement conforme au programme officiel des classes préparatoires. Cependant quelques paragraphes, intitulés « complément », proposent des développements en dehors du programme.

Les encadrés sur fond gris contiennent l'ensemble de ce qu'il faut retenir. Ils peuvent être lus indépendamment du texte, dans une phase de révision. En fin de chaque chapitre, une synthèse récapitule les savoirs et savoir-faire qui doivent être acquis par l'étudiant et les mots clés dont il doit avoir la maîtrise.

Les exercices sont regroupés en deux catégories : dans la rubrique *s'entraîner* des exercices d'application directe du cours et dans la rubrique *approfondir* des exercices demandant plus de réflexion. Les solutions proposées sont complètes et peuvent servir de modèle de rédaction.

Deux appendices complètent l'ouvrage. Le premier traite du délicat problème des incertitudes expérimentales. Le deuxième expose toutes les méthodes mathématiques dont la maîtrise peut être nécessaire lors d'une épreuve de physique.

Les auteurs seront heureux d'avoir des retours de lecteurs sur leur expérience de travail avec ce livre. Bonne lecture et bon travail à tous !

Première partie

Signaux physiques

Oscillateur harmonique

1

On appelle **signal physique** une grandeur physique dépendant du temps. Dans cette partie du cours, on s'intéressera surtout à des **signaux périodiques**. Un signal périodique est un signal qui se reproduit identique à lui-même au cours du temps. Le plus fondamental des signaux périodiques est le **signal sinusoïdal**.

Dans ce chapitre, on introduit un modèle physique qui produit un signal sinusoïdal appelé l'**oscillateur harmonique**. Les adjectifs harmonique et sinusoïdal sont synonymes : on rencontre parfois les expressions « signal harmonique » ou « oscillateur sinusoïdal ».

L'exemple étudié dans ce chapitre est un oscillateur harmonique mécanique. Cependant on retrouve ce modèle dans bien d'autres domaines de la physique, notamment l'électricité.

1 Un oscillateur harmonique mécanique

1.1 Système étudié

Le système mécanique oscillant le plus simple est une masse accrochée à un ressort.

On considère dans ce paragraphe un mobile de masse m qui se déplace sans frottement le long d'une tige horizontale (voir figure 1.1). Sa position est repérée par l'abscisse x de son centre d'inertie G mesurée sur l'axe (Ox) matérialisé par la tige. On choisit de placer l'origine de l'axe (Ox) de manière que G coïncide avec O dans la position d'équilibre (voir figure 1.1).

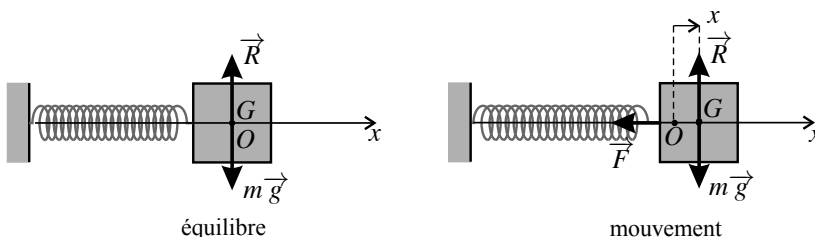


Figure 1.1 – Un exemple d'oscillateur harmonique mécanique.

1.2 Obtention d'une équation différentielle

a) Forces s'exerçant sur le système

Le ressort exerce sur le mobile une force qui s'écrit :

$$\vec{F} = -kx\vec{u}_x,$$

où k est la **constante de raideur** du ressort. Cette force est une force de rappel : son sens est opposé au sens du déplacement du mobile par rapport à sa position d'équilibre (la position $x = 0$). Lorsque x est positif, la force est de sens opposé à \vec{u}_x et inversement. On trouvera plus de renseignements sur la force d'un ressort dans le chapitre *Principes de la dynamique newtonienne*.

Le mobile est aussi soumis à son poids $m\vec{g}$ ainsi qu'à une réaction \vec{R} de la tige. Ces deux forces sont verticales et n'ont pas d'influence sur le mouvement qui est horizontal.

b) Application du principe fondamental de la dynamique

Le mouvement du mobile est régi par le principe fondamental de la dynamique (ou deuxième loi de Newton), qui s'écrit :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

où \vec{p} est la quantité de mouvement du mobile. En notant \vec{v}_G la vitesse instantanée du centre d'inertie G du mobile, on a :

$$\vec{p} = m\vec{v}_G = m\frac{dx}{dt}\vec{u}_x.$$

Dans cette relation, $\frac{dx}{dt}$ est la dérivée de la fonction $x(t)$. On notera $\frac{d^2x}{dt^2}$ la dérivée seconde de cette fonction. Le principe fondamental de la dynamique conduit donc à la relation, vérifiée à chaque instant : $\frac{d}{dt}\left(m\frac{dx}{dt}\vec{u}_x\right) = -kx\vec{u}_x$, soit : $m\frac{d^2x}{dt^2}\vec{u}_x = -kx\vec{u}_x$, soit après simplification :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x. \quad (1.1)$$

La relation qui vient d'être obtenue est appelée **équation différentielle**. Une équation différentielle est une relation entre une fonction $x(t)$ et ses dérivées par rapport au temps $\frac{dx}{dt}$, $\frac{d^2x}{dt^2}$, ..., qui est vérifiée à chaque instant. Ici, on a trouvé une équation du deuxième ordre, car l'ordre de dérivation le plus grand qui apparaît dans l'équation (le seul ici, mais il pourrait y en avoir plusieurs) est égal à deux.

1.3 Définition d'un oscillateur harmonique

L'équation différentielle (1.1) est une équation différentielle d'oscillateur harmonique.

On appelle **oscillateur harmonique** un système physique décrit par une grandeur $x(t)$ dépendant du temps et vérifiant une équation différentielle de la forme :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x(t) \quad (1.2)$$

où ω_0 est une constante réelle positive qui est appelée **pulsation propre** de l'oscillateur harmonique et qui s'exprime en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

Remarque

L'unité de ω_0 se déduit de l'homogénéité de l'équation différentielle. En effet, la dérivée seconde par rapport au temps a pour dimension physique la dimension de x divisée par un temps au carré. Donc ω_0^2 a la dimension des s^{-2} et ω_0 a la dimension des s^{-1} . Le radian n'a pas de dimension physique.

La masse accrochée au ressort du paragraphe précédent est un oscillateur harmonique mécanique, de pulsation :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

On en verra d'autres exemples, en mécanique ou en électricité.

1.4 Résolution de l'équation différentielle

a) Position du problème

Résoudre une équation différentielle consiste à trouver l'expression de la fonction inconnue $x(t)$ qui vérifie cette relation. Mais l'équation ne détermine pas de manière unique $x(t)$. Parmi les fonctions qui la vérifient, on doit choisir celle qui respecte des **conditions initiales** qui sont connues *a priori*.

Pour une équation du deuxième ordre, comme l'équation d'un oscillateur harmonique, les conditions initiales consistent en la donnée :

- de la valeur de la fonction inconnue à l'instant initial $t = 0$: $x(0)$;
- de la valeur de la dérivée première de la fonction inconnue à l'instant initial : $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0}$.

On va résoudre cette équation dans le cas du mobile accroché au ressort. Les conditions initiales sont :

- la position initiale : $x(0) = x_0$;
- la vitesse initiale : $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = v_0$.

b) Solutions dans deux cas particuliers

Cas où $x_0 \neq 0$ et $v_0 = 0$. On considère la fonction :

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) \quad (1.3)$$

où x_0 est une constante. On a alors, en utilisant des formules classiques de dérivation (voir l'appendice mathématique) :

$$\frac{dx}{dt} = -\omega x_0 \sin(\omega_0 t), \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d}{dt}(-\omega_0 x_0 \sin(\omega_0 t)) = -\omega_0^2 x_0 \cos(\omega_0 t) = -\omega_0^2 x(t) = -\frac{k}{m}x(t).$$

Ainsi cette fonction $x(t)$ vérifie l'équation différentielle (1.1).

À quelle situation physique la solution trouvée correspond-elle ? Les conditions initiales vérifiées sont :

$$x(0) = x_0 \cos(0) = x_0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = \omega x_0 \sin(0) = 0.$$

Il s'agit du cas où on lâche le mobile dans la position $x = x_0$ sans lui communiquer de vitesse initiale. Dans ce cas, $x(t)$ oscille entre $-x_0$ et x_0 puisque la fonction cosinus oscille entre -1 et 1 (voir figure 1.2).

Cas où $x_0 = 0$ et $v_0 \neq 0$. On peut imaginer une autre manière de lancer le mobile : sans l'écarter de sa position d'équilibre, lui communiquer une vitesse $v_0 \vec{u}_x$. Quelle est alors la loi du mouvement $x(t)$? Les conditions initiales que doit vérifier cette solution sont :

$$x(0) = 0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = v_0.$$

La fonction : $x(t) = b \sin(\omega_0 t)$, où b est une constante est aussi une solution de l'équation différentielle du mouvement comme le montre le calcul suivant :

$$\frac{dx}{dt} = \omega_0 b \cos(\omega_0 t), \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d}{dt}(\omega_0 b \cos(\omega_0 t)) = -\omega_0^2 b \sin(\omega_0 t) = -\omega_0^2 x(t) = -\frac{k}{m}x(t).$$

Elle vérifie les conditions initiales si : $x(0) = b \sin(0) = 0$, et si : $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = \omega_0 b \cos(0) = v_0$.

Il faut donc que : $b = \frac{v_0}{\omega}$. Finalement, la solution de l'équation différentielle correspondant à ces conditions initiales est :

$$x(t) = \frac{v_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t). \tag{1.4}$$

Cette solution $x(t)$ oscille entre $-\frac{v_0}{\omega_0}$ et $\frac{v_0}{\omega_0}$ puisque la fonction sinus oscille entre -1 et 1 (voir figure 1.2).

c) Solution pour des conditions initiales quelconques

On peut vérifier facilement que la somme des deux solutions précédemment trouvées,

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{v_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t), \tag{1.5}$$

est aussi une solution de l'équation différentielle et qu'elle vérifie les conditions initiales $x(0) = x_0$ et $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=0} = v_0$. On a ainsi la solution pour un jeu de conditions initiales quelconque. Sur la figure 1.2 on voit que $x(t)$ oscille entre deux valeurs opposées $-A$ et A .

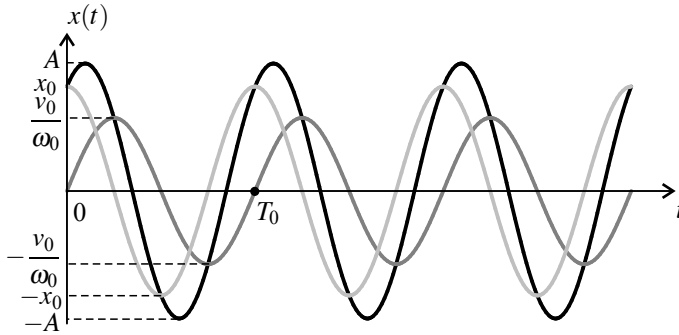


Figure 1.2 – Représentation graphique de $x(t)$ en fonction de t . En gris clair : cas $x_0 \neq 0$ et $v_0 = 0$; en gris foncé : cas $x_0 = 0$ et $v_0 \neq 0$; en noir : cas $x_0 \neq 0$ et $v_0 \neq 0$. La période des oscillations est $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (voir paragraphe 2).

d) Généralisation

La solution de l'équation de l'oscillateur harmonique (1.2) est de la forme :

$$x(t) = a \cos(\omega_0 t) + b \sin(\omega_0 t)$$

où a et b sont des constantes fixées par les conditions initiales.

1.5 Conservation de l'énergie mécanique

Lorsqu'il est en mouvement le mobile possède une **énergie cinétique** qui se calcule par la formule :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2.$$

Le ressort quant à lui n'a pas de masse donc pas d'énergie cinétique, mais il possède une énergie appelée **énergie potentielle** liée à sa déformation et dont on admettra ici l'expression :

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2.$$

La somme de ces deux énergies est l'**énergie mécanique** :

$$E_m = E_p + E_c = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2.$$

Que valent ces énergies au cours du temps ?

Si l'on injecte la solution $x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{v_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t)$ dans les expressions précédentes

on trouve :

$$\begin{aligned} E_c(t) &= \frac{1}{2}m(-\omega_0 x_0 \sin(\omega_0 t) + v_0 \cos(\omega_0 t))^2 \\ &= \frac{1}{2}m(\omega_0^2 x_0^2 \sin^2(\omega_0 t) + v_0^2 \cos^2(\omega_0 t) - 2\omega_0 x_0 v_0 \cos(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t)), \end{aligned}$$

et :

$$\begin{aligned} E_p(t) &= \frac{1}{2}k \left(x_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{v_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right)^2 \\ &= \frac{1}{2}k \left(x_0^2 \cos^2(\omega_0 t) + \frac{v_0^2}{\omega_0^2} \sin^2(\omega_0 t) + 2x_0 \frac{v_0}{\omega_0} \cos(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t) \right) \\ &= \frac{1}{2}m(\omega_0^2 x_0^2 \cos^2(\omega_0 t) + v_0^2 \sin^2(\omega_0 t) + 2\omega_0 x_0 v_0 \cos(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t)), \end{aligned}$$

en utilisant la relation $k = m\omega_0^2$. L'énergie mécanique s'écrit :

$$\begin{aligned} E_m(t) &= E_p(t) + E_c(t) \\ &= \frac{1}{2}m(\omega_0^2 x_0^2 (\cos^2(\omega_0 t) + \sin^2(\omega_0 t)) + v_0^2 (\cos^2(\omega_0 t) + \sin^2(\omega_0 t))) \\ &= \frac{1}{2}m(\omega_0^2 x_0^2 + v_0^2) = \frac{1}{2}k \left(x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega_0^2} \right) = \frac{1}{2}kx_0^2 + \frac{1}{2}mv_0^2. \end{aligned} \quad (1.6)$$

en utilisant encore la relation $k = m\omega_0^2$. L'énergie mécanique est donc constante dans le temps. On reconnaît dans la dernière expression la valeur de l'énergie mécanique à l'instant initial. Ce résultat est cohérent avec le fait que l'on étudie un système idéalisé dont l'amortissement est négligé : on ne prend en compte aucun type de frottement. C'est pourquoi il y a conservation de l'énergie mécanique.

Remarque

Dans les deux cas particuliers du paragraphe b) on fournit son énergie au système :

- sous forme d'énergie potentielle uniquement quand $x_0 \neq 0$ et $v_0 = 0$;
- sous forme d'énergie cinétique uniquement quand $x_0 = 0$ et $v_0 \neq 0$.



L'équation différentielle (1.1) peut être établie à partir de la relation de conservation de l'énergie mécanique : $E_m = \frac{1}{2}m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2}kx(t)^2 = \text{constante}$. En effet, il vient si l'on dérive par rapport au temps :

$$m \frac{dx}{dt} \frac{d^2x}{dt^2} + kx(t) \frac{dx}{dt} = 0,$$

ce qui redonne l'équation différentielle (1.1), après simplification par le terme $\frac{dx}{dt}$.