

# PHYSIQUE

# PC-PC\*

TOUT-EN-UN



Sous la direction de **MARIE-NOËLLE SANZ**

FRANÇOIS VANDENBROUCK | BERNARD SALAMITO | DOMINIQUE CHARDON

**PHYSIQUE**

**PC-PC\***

**TOUT-EN-UN**

**5<sup>e</sup> édition**

**DUNOD**

*l'intégrale*

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, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

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

ISBN 978-2-10-079053-1

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

<b>I</b>	<b>Thermodynamique</b>	<b>23</b>
<b>1</b>	<b>Systèmes en écoulement stationnaire</b>	<b>25</b>
1	Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé . . . . .	25
1.1	Le premier principe . . . . .	25
1.2	Le second principe . . . . .	29
2	Principes de la thermodynamique pour un système en écoulement en régime stationnaire . . . . .	32
2.1	Système ouvert . . . . .	32
2.2	Bilan d'une grandeur extensive $Y$ en régime stationnaire . . . . .	33
2.3	Premier principe pour un système en écoulement en régime stationnaire	34
2.4	Second principe pour un système en écoulement en régime stationnaire	38
2.5	Premier et second principes pour un système ouvert sous forme infinitésimale . . . . .	39
3	Diagrammes $(T, s)$ et $(P, h)$ . . . . .	40
3.1	Principe d'un diagramme thermodynamique . . . . .	40
3.2	Le diagramme entropique $(T, s)$ . . . . .	44
3.3	Le diagramme des frigoristes $(P, h)$ . . . . .	46
3.4	Application des deux principes à l'aide des diagrammes . . . . .	48
4	Applications : étude du circuit d'eau d'une centrale électrique thermique . . .	51
4.1	Le cycle de Rankine . . . . .	51
4.2	Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme $(\ln P, h)$ . . .	52
4.3	Application des deux principes . . . . .	53
4.4	Rendement . . . . .	54
4.5	Représentation du cycle de Rankine dans le diagramme $(T, s)$ . . . .	54
4.6	Exemple de valeurs numériques . . . . .	55

TABLE DES MATIÈRES

<b>2</b>	<b>Diffusion de particules</b>	<b>87</b>
1	Diffusion moléculaire . . . . .	87
1.1	Mise en évidence expérimentale . . . . .	87
1.2	Diffusion et convection . . . . .	87
2	Courant de particules . . . . .	88
2.1	Flux de particules à travers une surface . . . . .	88
2.2	Vecteur densité de courant de particules - Exemple dans un cas convectif	88
3	Bilans de particules . . . . .	89
3.1	Bilan de particules à une dimension . . . . .	89
3.2	Equation de conservation dans le cas tridimensionnel . . . . .	91
3.3	Exercice : cas d'un problème à symétrie cylindrique . . . . .	93
4	Loi de Fick . . . . .	94
4.1	Loi phénoménologique de Fick . . . . .	94
4.2	Limites de validité de la loi de Fick . . . . .	95
5	Équation de diffusion . . . . .	95
5.1	Équation de diffusion à une dimension . . . . .	95
5.2	Équation de diffusion à trois dimensions . . . . .	96
5.3	Phénomènes diffusifs . . . . .	97
5.4	Conditions aux limites et condition initiale . . . . .	98
5.5	Exemple : diffusion d'une goutte d'encre . . . . .	98
5.6	Longueur et temps caractéristiques associés . . . . .	99
5.7	Cas du régime stationnaire . . . . .	100
6	Approche microscopique . . . . .	101
6.1	Diffusion et marche au hasard . . . . .	101
6.2	Expression du coefficient de diffusion . . . . .	104
<b>3</b>	<b>Diffusion thermique</b>	<b>127</b>
1	Généralités sur les transferts thermiques . . . . .	127
1.1	Introduction . . . . .	127
1.2	Hypothèse de l'équilibre thermodynamique local . . . . .	128
1.3	Les trois modes de transfert thermique . . . . .	128
2	Flux thermique - Vecteur densité de courant thermique . . . . .	129
2.1	Flux thermique surfacique . . . . .	129
2.2	Vecteur densité de courant thermique . . . . .	130
2.3	Flux thermique traversant une surface . . . . .	131
2.4	Exemple : le flux conducto-convectif . . . . .	131
3	Généralités sur les bilans énergétiques . . . . .	132
3.1	Production d'énergie . . . . .	132

3.2	Bilan énergétique . . . . .	132
3.3	Continuité du flux thermique surfacique . . . . .	134
4	Équation locale de bilan thermique . . . . .	135
4.1	Hypothèses de travail . . . . .	135
4.2	Bilan énergétique local à une dimension . . . . .	136
4.3	Bilan thermique local tridimensionnel . . . . .	137
4.4	Exercice : bilan énergétique local en symétrie sphérique . . . . .	138
5	Loi de Fourier - Conductivité thermique . . . . .	139
5.1	Loi phénoménologique de Fourier . . . . .	139
5.2	Limites de validité de la loi de Fourier . . . . .	139
5.3	Conductivités thermiques . . . . .	140
6	Équation de la diffusion thermique . . . . .	141
6.1	Équation de la diffusion thermique à une dimension . . . . .	141
6.2	Cas d'une géométrie quelconque . . . . .	141
6.3	Cas où il n'y a pas de sources internes . . . . .	142
6.4	Longueur et temps caractéristiques associés . . . . .	143
6.5	Exercice : bilan entropique à une dimension . . . . .	143
7	Conditions aux limites pour le champ de température . . . . .	144
8	Propriétés du régime permanent . . . . .	145
8.1	Densité de courant thermique en régime permanent . . . . .	146
8.2	Champ de température en régime permanent . . . . .	147
9	Résistance thermique . . . . .	148
9.1	Analogie avec l'électrocinétique . . . . .	148
9.2	Cas unidimensionnel . . . . .	149
9.3	Exercice : résistance thermique d'un manchon cylindrique . . . . .	150
9.4	Approximation des régimes quasi stationnaires . . . . .	151
10	Un exemple de résolution de l'équation de diffusion de la chaleur en régime variable . . . . .	151
<b>4</b>	<b>Approche descriptive du rayonnement thermique</b>	<b>169</b>
1	Corps noir . . . . .	169
1.1	Réflexion, transmission, absorption . . . . .	169
1.2	Le modèle du corps noir . . . . .	170
2	Le rayonnement d'équilibre thermique . . . . .	170
2.1	Quelques définitions . . . . .	171
2.2	Loi de Planck . . . . .	173
2.3	Loi de Stefan-Boltzmann . . . . .	174
2.4	Loi du déplacement de Wien . . . . .	174

## TABLE DES MATIÈRES

2.5	Flux surfacique émis par un corps noir . . . . .	175
3	Application à l'étude de l'effet de serre . . . . .	175
3.1	Effet de serre d'une vitre idéale . . . . .	175
3.2	Température d'équilibre de la Terre sans atmosphère . . . . .	177
3.3	Température d'équilibre de la Terre en tenant compte de la présence de l'atmosphère . . . . .	177
3.4	Amélioration du modèle . . . . .	178
<b>II Mécanique</b>		<b>181</b>
<b>5 Changements de référentiels en mécanique classique</b>		<b>183</b>
1	Exemples . . . . .	183
1.1	Cas de deux référentiels en translation rectiligne l'un par rapport à l'autre . . . . .	183
1.2	Cas d'un référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe d'un autre référentiel . . . . .	184
1.3	Conclusion . . . . .	185
2	Référentiel en translation par rapport à un autre . . . . .	185
2.1	Transformation de Galilée . . . . .	185
2.2	Composition des vitesses . . . . .	186
2.3	Composition des accélérations . . . . .	187
3	Référentiel en rotation uniforme autour d'un axe fixe . . . . .	188
3.1	Présentation de la situation . . . . .	188
3.2	Composition des vitesses . . . . .	189
3.3	Composition des accélérations . . . . .	189
4	Le point coïncidant . . . . .	190
4.1	Notion de point coïncidant . . . . .	190
4.2	Cas d'un référentiel en translation . . . . .	190
4.3	Cas d'un référentiel en rotation uniforme par rapport à un axe fixe . . . . .	190
<b>6 Dynamique dans un référentiel non galiléen</b>		<b>201</b>
1	Référentiels galiléens et référentiels non galiléens . . . . .	201
1.1	Référentiels galiléens . . . . .	201
1.2	À la recherche d'un référentiel galiléen . . . . .	202
2	Loi de la quantité de mouvement dans un référentiel non galiléen . . . . .	205
2.1	Cas d'un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen . . . . .	205
2.2	Cas d'un référentiel en rotation par rapport à un axe fixe d'un référentiel galiléen . . . . .	207



2.3	Récapitulation . . . . .	208
2.4	Exemples d'étude de mouvement dans un référentiel non galiléen . . .	209
3	Loi du moment cinétique dans un référentiel non galiléen . . . . .	212
3.1	Cas d'un référentiel en translation par rapport à un référentiel galiléen	212
3.2	Cas d'un référentiel en rotation par rapport à un axe fixe d'un référentiel galiléen . . . . .	213
3.3	Exemples . . . . .	213
4	Étude énergétique dans un référentiel non galiléen . . . . .	215
4.1	Théorème de l'énergie cinétique en référentiel non galiléen . . . . .	215
4.2	La force d'inertie d'entraînement dérive-t-elle d'une énergie potentielle ? . . . . .	216
4.3	Système conservatif dans un référentiel non galiléen . . . . .	217
4.4	Retour sur deux exemples étudiés . . . . .	218
5	Mécanique terrestre . . . . .	219
5.1	Champ de pesanteur . . . . .	219
5.2	Approche documentaire : les marées . . . . .	222
<b>7</b>	<b>Approche descriptive du fonctionnement d'un véhicule à roues</b>	<b>249</b>
1	Pré-requis . . . . .	249
2	Description du mouvement de roulement d'une roue . . . . .	250
2.1	Mouvement de roulement sans glissement d'une roue . . . . .	250
2.2	Vitesse de glissement d'une roue . . . . .	250
2.3	Les lois de Coulomb du frottement de glissement . . . . .	251
3	Étude du mouvement horizontal d'une bicyclette . . . . .	252
3.1	Présentation du dispositif . . . . .	252
3.2	Bilan des actions mécaniques extérieures au système . . . . .	253
3.3	Condition de roulement sans glissement . . . . .	253
3.4	Loi de la quantité de mouvement . . . . .	253
3.5	Loi du moment cinétique . . . . .	254
3.6	Vitesse de déplacement et condition de roulement sans glissement . .	254
3.7	Puissance développée par le cycliste . . . . .	255
3.8	Traction d'une charge . . . . .	256
<b>III</b>	<b>Mécanique des fluides</b>	<b>259</b>
<b>8</b>	<b>Description d'un fluide en mouvement</b>	<b>261</b>
1	L'approximation des milieux continus . . . . .	261
1.1	Description d'un milieu à différentes échelles . . . . .	261

## TABLE DES MATIÈRES

1.2	L'échelle mésoscopique et la particule de fluide . . . . .	262
1.3	Fluides et solides . . . . .	263
2	Le champ de vitesse dans un fluide en écoulement . . . . .	264
2.1	Description eulérienne . . . . .	264
2.2	Lignes de courant et tubes de champ . . . . .	265
2.3	Écoulement stationnaire . . . . .	267
2.4	Accélération en variables d'Euler ; notion de dérivée particulaire . . .	267
3	Conservation de la masse dans un écoulement . . . . .	270
3.1	Vecteur densité de courant de masse ; débit massique . . . . .	270
3.2	Débit volumique . . . . .	271
3.3	Équation de conservation de la masse . . . . .	272
3.4	Cas particulier d'un écoulement stationnaire . . . . .	275
4	Conditions aux limites cinématiques . . . . .	277
4.1	Cas d'une paroi fixe . . . . .	277
4.2	Cas d'une paroi déformable ou mobile . . . . .	277
4.3	Interface entre deux fluides non miscibles . . . . .	277
4.4	Loin d'un obstacle . . . . .	278
5	Exemples fondamentaux d'écoulements . . . . .	278
5.1	Écoulement incompressible . . . . .	278
5.2	Écoulement tourbillonnaire . . . . .	280
5.3	Écoulement tourbillonnaire et incompressible . . . . .	283
5.4	Écoulement irrotationnel . . . . .	285
<b>9</b>	<b>Actions mécaniques dans un fluide en mouvement</b>	<b>301</b>
1	Actions mécaniques s'exerçant sur un fluide . . . . .	301
1.1	Actions à distance ; forces volumiques . . . . .	301
1.2	Actions de contact ; forces surfaciques . . . . .	302
1.3	Forces de pression . . . . .	303
1.4	Équivalent volumique des forces de pression . . . . .	304
1.5	Force de viscosité de cisaillement . . . . .	305
1.6	Transport diffusif de quantité de mouvement et de vortacité . . . . .	310
2	L'équation de Navier-Stokes . . . . .	313
2.1	Expression pour l'écoulement incompressible d'un fluide newtonien .	313
2.2	Le nombre de Reynolds . . . . .	314
2.3	Équation de Navier-Stokes sous forme adimensionnée . . . . .	315
2.4	Notion de couche limite . . . . .	317
2.5	Modèle de l'écoulement parfait . . . . .	319
3	Conditions aux limites dans un écoulement . . . . .	319

3.1	Conditions aux limites cinématiques . . . . .	319
3.2	Conditions aux limites dynamiques . . . . .	321
3.3	Tableau récapitulatif des conditions aux limites . . . . .	322
4	Étude descriptive de l'écoulement autour d'une sphère . . . . .	323
4.1	Force de traînée et force de portance . . . . .	323
4.2	Analyse de résultats expérimentaux . . . . .	323
4.3	Généralisation . . . . .	327
5	Écoulements laminaires et turbulents . . . . .	328
5.1	Expérience de Reynolds (1883) . . . . .	328
5.2	Écoulement autour d'une sphère . . . . .	330
6	La tension superficielle . . . . .	332
6.1	Origine microscopique de la tension superficielle liquide/vapeur . . . . .	332
6.2	Interprétation énergétique . . . . .	334
6.3	Loi de Laplace . . . . .	335
6.4	Lois de Jurin et de Young-Dupré . . . . .	337
6.5	Angle de mouillage . . . . .	339
6.6	Longueur capillaire . . . . .	339
6.7	Mesure de la tension superficielle par la méthode d'arrachement . . . . .	340
<b>10</b>	<b>Équations locales de la dynamique des fluides</b>	<b>355</b>
1	Écoulements de fluides réels . . . . .	355
1.1	L'équation de Navier-Stokes . . . . .	355
1.2	Écoulements parallèles . . . . .	356
2	Équation d'Euler . . . . .	363
2.1	Énoncé . . . . .	363
2.2	Commentaires . . . . .	364
2.3	Quelques conséquences immédiates . . . . .	364
3	Statique des fluides en référentiel non galiléen . . . . .	368
3.1	Premier exemple : équilibre d'un fluide dans une citerne . . . . .	368
3.2	Second exemple : l'aplatissement de la Terre . . . . .	370
4	Approche documentaire : écoulements atmosphériques . . . . .	372
4.1	L'atmosphère au repos . . . . .	373
4.2	Écoulements dans l'atmosphère . . . . .	373
4.3	L'équilibre géostrophique . . . . .	374
5	Le théorème de Bernoulli . . . . .	378
5.1	Énoncé . . . . .	378
5.2	Applications . . . . .	381

## TABLE DES MATIÈRES

<b>11 Bilans macroscopiques</b>	<b>435</b>
1 Introduction . . . . .	435
1.1 Systèmes fermés . . . . .	435
1.2 Exemple : bilan de masse . . . . .	436
2 Bilans de quantité de mouvement . . . . .	438
2.1 Principe . . . . .	438
2.2 Premier exemple : force exercée par un fluide sur les parois d'une conduite de section variable . . . . .	438
2.3 Deuxième exemple : action d'un jet cylindrique sur une plaque . . . . .	441
2.4 Troisième exemple : retour sur l'écoulement de Poiseuille . . . . .	444
3 Bilans d'énergie cinétique . . . . .	446
3.1 Principe . . . . .	446
3.2 Premier exemple : puissance d'une pompe . . . . .	446
3.3 Deuxième exemple : retour sur l'écoulement de Couette plan . . . . .	448
3.4 Troisième exemple : retour sur l'écoulement de Poiseuille . . . . .	450
<b>IV Électromagnétisme</b>	<b>475</b>
<b>12 Sources du champ électromagnétique</b>	<b>477</b>
1 Charge électrique . . . . .	477
1.1 Rappels . . . . .	477
1.2 Charges ponctuelles . . . . .	477
1.3 Densité volumique de charges . . . . .	478
2 Vecteur densité de courant électrique . . . . .	479
2.1 Définition . . . . .	479
2.2 Intensité traversant une surface . . . . .	481
3 Équation de conservation de la charge . . . . .	482
3.1 Cas unidimensionnel . . . . .	482
3.2 Cas général . . . . .	483
3.3 Cas du régime stationnaire . . . . .	484
<b>13 Champ électrostatique</b>	<b>487</b>
1 Charge ponctuelle . . . . .	487
1.1 Loi de Coulomb . . . . .	487
1.2 Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle . . . . .	488
1.3 Potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle . . . . .	489
2 Champ créé par une distribution de charges . . . . .	490

2.1	Principe de superposition . . . . .	490
2.2	Champ et potentiel créés par une distribution discrète de charges ponctuelles . . . . .	490
2.3	Champ et potentiel créés par une distribution volumique de charges . . . . .	491
3	Propriétés de symétrie . . . . .	492
3.1	Symétries usuelles des distributions de charges . . . . .	492
3.2	Symétries du champ et du potentiel . . . . .	496
4	Circulation du champ électrostatique - Équation de Maxwell-Faraday . . . . .	500
4.1	Circulation d'un champ de vecteur . . . . .	500
4.2	Circulation du champ électrostatique . . . . .	501
4.3	Équation locale de Maxwell-Faraday . . . . .	503
5	Flux du champ électrostatique - Équation de Maxwell-Gauss . . . . .	504
5.1	Flux d'un champ de vecteurs . . . . .	504
5.2	Équation de Maxwell-Gauss . . . . .	505
5.3	Théorème de Gauss . . . . .	506
5.4	Équation aux dérivées partielles vérifiée par le potentiel . . . . .	507
6	Topographie du champ électrostatique . . . . .	507
6.1	Lignes de champs et équipotentiels . . . . .	507
6.2	Propriétés des lignes de champ électrostatique et des équipotentiels . . . . .	508
6.3	Quelques exemples . . . . .	511
7	Analogie avec le champ gravitationnel . . . . .	513
7.1	Interaction gravitationnelle . . . . .	513
7.2	Champ de gravitation . . . . .	513
7.3	Propriétés du champ de gravitation . . . . .	514
<b>14</b>	<b>Exemples de champs électrostatiques</b>	<b>533</b>
1	Méthodes d'étude des champs et des potentiels . . . . .	533
2	Exemple de problème à symétrie sphérique : sphère uniformément chargée. . . . .	534
2.1	Étude des symétries . . . . .	534
2.2	Application du théorème de Gauss . . . . .	535
2.3	Champ créé par la sphère . . . . .	536
2.4	Application : énergie de constitution d'une sphère uniformément chargée . . . . .	537
3	Exemple de problème à symétrie cylindrique : cylindre uniformément chargé . . . . .	539
3.1	Étude des symétries . . . . .	539
3.2	Application du théorème de Gauss . . . . .	540
3.3	Champ créé par le cylindre . . . . .	541
4	Exemples de problèmes à symétrie plane . . . . .	541

## TABLE DES MATIÈRES

4.1	Étude des symétries . . . . .	541
4.2	Calcul du champ et du potentiel par résolution des équations de Maxwell . . . . .	542
4.3	Calcul du champ par le théorème de Gauss . . . . .	543
4.4	Modélisation surfacique . . . . .	544
4.5	Application au condensateur plan . . . . .	545
<b>15</b>	<b>Dipôle électrostatique</b>	<b>571</b>
1	Potentiel et champ créés . . . . .	571
1.1	Introduction . . . . .	571
1.2	Dipôle électrostatique, approximation dipolaire . . . . .	571
1.3	Moment dipolaire . . . . .	572
1.4	Analyse des symétries et des invariances . . . . .	572
1.5	Potentiel créé par un dipôle électrostatique . . . . .	573
1.6	Champ créé par un dipôle électrostatique . . . . .	574
1.7	Topographie du champ . . . . .	575
2	Action d'un champ extérieur sur un dipôle . . . . .	576
2.1	Cas d'un champ uniforme . . . . .	576
2.2	Cas d'un champ non uniforme . . . . .	578
2.3	Énergie potentielle d'un dipôle rigide dans un champ électrostatique extérieur . . . . .	580
3	Approche descriptive des interactions moléculaires . . . . .	582
3.1	Moment dipolaire permanent . . . . .	582
3.2	Quelques valeurs de moments dipolaires . . . . .	583
3.3	Interactions ion-molécules . . . . .	583
3.4	Interaction molécule - molécule . . . . .	584
4	Moment dipolaire induit . . . . .	586
4.1	Polarisabilité . . . . .	586
4.2	Modèle de Thomson . . . . .	586
4.3	Interaction entre un dipôle induit et un dipôle permanent . . . . .	587
4.4	Forces de Van der Waals . . . . .	588
<b>16</b>	<b>Conduction électrique dans un conducteur ohmique</b>	<b>597</b>
1	Loi d'Ohm . . . . .	597
1.1	Modèle de Drude de la conduction électrique . . . . .	597
1.2	Loi d'Ohm en régime variable . . . . .	600
1.3	Résistance électrique . . . . .	601
2	Approche descriptive de l'effet Hall . . . . .	603

2.1	Étude du phénomène . . . . .	603
2.2	Tension de Hall . . . . .	604
2.3	Application à la mesure de champ magnétique . . . . .	606
2.4	Interprétation de la force de Laplace . . . . .	606
3	Aspect énergétique . . . . .	607
<b>17</b>	<b>Champ magnétostatique</b>	<b>609</b>
1	Propriétés locales et globales du champ magnétostatique . . . . .	609
1.1	Équations de Maxwell du champ magnétostatique . . . . .	609
1.2	Flux du champ magnétostatique . . . . .	609
1.3	Circulation du champ magnétostatique - Théorème d'Ampère . . . . .	610
2	Symétries et invariances du champ magnétique . . . . .	611
2.1	Symétries et invariances usuelles des distributions de courant . . . . .	611
2.2	Symétries du champ magnétique . . . . .	613
3	Topographie du champ magnétostatique . . . . .	618
3.1	Propriétés des lignes de champ du champ magnétostatique . . . . .	618
3.2	Comment distinguer une carte de champ électrostatique d'une carte de champ magnétostatique ? . . . . .	618
3.3	Exemples . . . . .	619
4	Exemples de champs magnétostatiques . . . . .	620
4.1	Méthodes d'étude du champ magnétostatique . . . . .	620
4.2	Exemple de problème à symétrie cylindrique : câble infini, de rayon $a$ , parcouru par un courant uniformément réparti en volume . . . . .	621
4.3	Solénoïde long . . . . .	624
<b>18</b>	<b>Dipôle magnétique</b>	<b>649</b>
1	Moment magnétique d'une boucle de courant plane . . . . .	649
1.1	Rappels de première année . . . . .	649
1.2	Moment magnétique atomique . . . . .	650
1.3	Quelques notions sur les propriétés magnétiques de la matière . . . . .	652
1.4	Caractéristiques d'un aimant . . . . .	652
2	Action d'un champ magnétique extérieur sur un dipôle magnétique . . . . .	654
2.1	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique uniforme . . . . .	654
2.2	Actions subies par un dipôle dans un champ magnétique non uniforme . . . . .	654
2.3	Énergie potentielle du dipôle dans un champ extérieur . . . . .	655
2.4	Approche documentaire : l'expérience Stern et Gerlach . . . . .	655
<b>19</b>	<b>Équations de Maxwell</b>	<b>669</b>
1	Champ électromagnétique - Équations de Maxwell . . . . .	669

## TABLE DES MATIÈRES

1.1	Définition du champ électromagnétique . . . . .	669
1.2	Équations de Maxwell . . . . .	669
1.3	Remarques et commentaires . . . . .	670
1.4	Compatibilité des équations de Maxwell avec la loi de conservation de la charge . . . . .	671
2	Forme intégrale des équations de Maxwell . . . . .	672
2.1	Théorème de Gauss . . . . .	672
2.2	Flux du champ magnétique . . . . .	672
2.3	Loi de Faraday . . . . .	673
2.4	Théorème d'Ampère généralisé . . . . .	674
3	Énergie électromagnétique . . . . .	675
3.1	Puissance cédée par le champ électromagnétique à la matière . . . . .	675
3.2	Bilan d'énergie électromagnétique . . . . .	675
3.3	Équation locale de Poynting . . . . .	677
3.4	Exemples . . . . .	679
4	Approximation des régimes quasi stationnaires . . . . .	682
4.1	Équation de propagation des champs dans un milieu vide de charge et de courant . . . . .	682
4.2	Cadre de l'approximation des régimes quasi stationnaires . . . . .	683
4.3	Exercice : solénoïde en régime lentement variable . . . . .	684
4.4	Approximation des régimes quasi stationnaires à dominante magnétique	686
4.5	Équations locales de l'électromagnétisme dans le cadre de l'A.R.Q.S à dominante magnétique . . . . .	687
4.6	Retour sur l'exemple du solénoïde : aspect énergétique . . . . .	690

## V Optique

**703**

### 20 Modèle scalaire des ondes lumineuses

**705**

1	Le modèle scalaire de la lumière . . . . .	705
1.1	Nature de l'onde lumineuse . . . . .	705
1.2	La vibration lumineuse . . . . .	706
1.3	Propriétés de la vibration lumineuse . . . . .	707
2	Éclairement et intensité vibratoire . . . . .	707
2.1	Les récepteurs de l'onde lumineuse . . . . .	707
2.2	Éclairement ou intensité vibratoire . . . . .	709
3	Lumière monochromatique . . . . .	709
3.1	Définitions . . . . .	709
3.2	Domaine visible . . . . .	710



3.3	Notation complexe . . . . .	710
3.4	Expression de l'éclairement . . . . .	711
4	Chemin optique . . . . .	711
4.1	Définition . . . . .	711
4.2	Calcul pratique du chemin optique . . . . .	712
4.3	Relation fondamentale entre le chemin optique et le retard de phase . . . . .	713
4.4	Des exceptions à la règle précédente . . . . .	713
5	Surface d'onde . . . . .	714
5.1	Définition . . . . .	714
5.2	Théorème de Malus . . . . .	714
5.3	Égalité des chemins optiques entre points conjugués . . . . .	715
6	Onde sphérique . . . . .	715
6.1	Définition . . . . .	715
6.2	Expression d'une onde sphérique monochromatique ou harmonique . . . . .	716
7	Onde plane . . . . .	717
7.1	Définition . . . . .	717
7.2	Expression . . . . .	718
8	Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss . . . . .	720
8.1	Approximation paraxiale de l'onde sphérique harmonique . . . . .	720
8.2	Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss . . . . .	722
8.3	Formule de conjugaison . . . . .	722
9	Lumières réelles . . . . .	723
9.1	Composition spectrale . . . . .	723
9.2	Différents types de lumière . . . . .	724
9.3	Les lampes spectrales . . . . .	725
9.4	Faisceau laser . . . . .	726
10	Notions sur la transformée de Fourier . . . . .	726
10.1	Définition . . . . .	726
10.2	Exemples . . . . .	727
11	Trains d'onde . . . . .	729
11.1	Le profil des raies spectrales . . . . .	729
11.2	Interprétation . . . . .	730
11.3	Longueur de cohérence . . . . .	731
11.4	Caractère aléatoire de l'émission lumineuse . . . . .	731
<b>21</b>	<b>Superposition d'ondes lumineuses</b>	<b>745</b>
1	Superposition de deux ondes lumineuses . . . . .	745
1.1	Éclairement résultant . . . . .	745

## TABLE DES MATIÈRES

1.2	Formule de Fresnel . . . . .	749
1.3	Figure d'interférences . . . . .	752
1.4	Retour sur la notion de cohérence . . . . .	754
2	Superposition de $N$ ondes lumineuses . . . . .	757
2.1	Expression de la vibration lumineuse résultante . . . . .	757
2.2	Éclairement résultant . . . . .	758
2.3	Interprétation à l'aide de la représentation de Fresnel . . . . .	760
<b>22</b>	<b>Dispositif interférentiel par division du front d'onde : les trous d'Young</b>	<b>765</b>
1	Le dispositif des trous d'Young . . . . .	765
1.1	Présentation du dispositif . . . . .	765
1.2	Notion de dispositif interférentiel à division du front d'onde . . . . .	766
1.3	Description du champ d'interférences . . . . .	767
1.4	Généralisation à d'autres dispositifs interférentiels par division du front d'onde . . . . .	772
1.5	Montage de Fraunhofer . . . . .	772
2	Modifications du dispositif . . . . .	774
2.1	Influence du déplacement de la source ponctuelle . . . . .	774
2.2	Influence d'une lame à faces parallèles . . . . .	781
2.3	Influence de la largeur spectrale . . . . .	785
2.4	Éclairage en lumière blanche . . . . .	788
3	Dispositif interférentiel de $N$ trous d'Young . . . . .	789
3.1	Description du dispositif . . . . .	789
3.2	Ordre d'interférences et éclairement . . . . .	790
3.3	Condition d'interférences totalement constructives . . . . .	791
3.4	Du modèle des $N$ trous d'Young au réseau plan de diffraction . . . . .	792
<b>23</b>	<b>L'interféromètre de Michelson</b>	<b>813</b>
1	L'interféromètre de Michelson . . . . .	813
1.1	Présentation du dispositif . . . . .	813
1.2	Les deux voies de l'interféromètre . . . . .	814
1.3	Le dispositif séparateur . . . . .	814
1.4	Schéma de principe de l'interféromètre . . . . .	816
2	Configuration de la lame d'air éclairée par une source étendue . . . . .	816
2.1	Définition . . . . .	817
2.2	Observation des franges . . . . .	817
3	Configuration du coin d'air éclairé par une source étendue . . . . .	823
3.1	Définition . . . . .	823

3.2	Observation des franges . . . . .	824
<b>24</b>	<b>Diffraction</b>	<b>845</b>
1	Introduction . . . . .	845
1.1	Historique . . . . .	845
1.2	Démarche suivie . . . . .	846
2	Superposition d'ondes planes progressives harmoniques . . . . .	847
2.1	Notion de fréquence spatiale . . . . .	847
2.2	Superposition de deux ondes planes progressives harmoniques . . . . .	848
2.3	Superposition de trois ondes planes progressives harmoniques . . . . .	848
2.4	Bilan . . . . .	849
3	Action d'un objet transparent sur une onde . . . . .	850
3.1	Étude d'une expérience . . . . .	850
3.2	Interprétation . . . . .	853
4	Transmittance d'un objet mince . . . . .	855
4.1	Définition . . . . .	855
4.2	Objet d'amplitude . . . . .	856
4.3	Objet de phase . . . . .	856
4.4	Fréquences spatiales d'un objet plan . . . . .	857
4.5	Plan de Fourier . . . . .	859
5	Réseau de traits équidistants d'extension infinie . . . . .	860
5.1	Structure de l'objet . . . . .	860
5.2	Observations . . . . .	860
5.3	Interprétation . . . . .	860
6	Diffraction par une fente . . . . .	862
6.1	Spectre de fréquences spatiales . . . . .	862
6.2	Amplitude transmise . . . . .	862
6.3	Éclairement dans le plan de la lentille . . . . .	863
7	Étude de la transmission de lumière monochromatique par un objet mince : bilan . . . . .	864
8	Filtrage optique . . . . .	865
8.1	Montage expérimental . . . . .	865
8.2	Interprétation simple de la formation de l'image . . . . .	866
8.3	Exemples . . . . .	867
8.4	Conclusion . . . . .	869
9	Compléments . . . . .	869
9.1	Éclairage en incidence oblique . . . . .	869
9.2	Largeur finie des réseaux . . . . .	870

<b>VI</b>	<b>Physique des ondes</b>	<b>883</b>
<b>25</b>	<b>Ondes mécaniques unidimensionnelles</b>	<b>885</b>
1	Corde vibrante . . . . .	885
1.1	Tension d'une corde . . . . .	885
1.2	Mise en place du modèle . . . . .	885
1.3	Équation d'onde . . . . .	886
2	Onde acoustique dans un solide élastique . . . . .	888
2.1	Module d'Young . . . . .	888
2.2	Ondes de déformations longitudinales . . . . .	891
2.3	Récapitulation . . . . .	892
3	Solutions de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle . . . . .	892
3.1	Rappels de première année : onde progressive . . . . .	892
3.2	Solution en onde progressive harmonique . . . . .	894
3.3	Solution en ondes progressives . . . . .	896
3.4	Célérité des ondes . . . . .	897
3.5	Onde stationnaire . . . . .	897
4	Régime libre d'une corde fixée à ses deux extrémités . . . . .	900
4.1	Conditions aux limites et conditions initiales . . . . .	900
4.2	Pulsations propres, modes propres . . . . .	901
4.3	Solution générale . . . . .	902
5	Corde fixée à une extrémité : oscillations forcées, résonance . . . . .	903
5.1	Description de l'expérience . . . . .	903
5.2	Étude théorique . . . . .	904
<b>26</b>	<b>Ondes acoustiques dans les fluides</b>	<b>933</b>
1	Approximation acoustique, propagation des ondes sonores . . . . .	933
1.1	Introduction . . . . .	933
1.2	Approximation acoustique . . . . .	934
1.3	Mise en équation eulérienne . . . . .	934
1.4	Équation de propagation pour la surpression . . . . .	937
1.5	Célérité du son . . . . .	938
2	Ondes planes progressives harmoniques . . . . .	941
2.1	Ondes planes . . . . .	941
2.2	Ondes planes progressives harmoniques . . . . .	942
3	Aspect énergétique . . . . .	944
3.1	Puissance transférée à travers une surface $S$ . . . . .	944
3.2	Densité volumique d'énergie . . . . .	944

3.3	Bilan énergétique . . . . .	945
3.4	Densité volumique d'énergie potentielle . . . . .	946
3.5	Densité volumique d'énergie . . . . .	946
3.6	Récapitulation . . . . .	947
3.7	Cas d'une onde plane progressive . . . . .	947
3.8	Cas d'une onde plane progressive harmonique. Valeurs moyennes . . . . .	948
3.9	Cas général . . . . .	950
3.10	Intensité sonore . . . . .	950
4	Ondes sphériques harmoniques . . . . .	953
4.1	Surpression . . . . .	953
4.2	Champ des vitesses . . . . .	954
4.3	Intensité sonore . . . . .	954
5	Effet Doppler longitudinal . . . . .	956
5.1	Présentation du phénomène . . . . .	956
5.2	Effet Doppler . . . . .	957
5.3	Comment mesurer une faible différence de fréquence ? . . . . .	958
6	Complément : tuyaux sonores, ondes stationnaires. Application aux instru- ments à vent . . . . .	959
6.1	Introduction . . . . .	959
6.2	Conditions aux limites, ondes stationnaires . . . . .	959
6.3	Aspect énergétique . . . . .	963
<b>27</b>	<b>Ondes électromagnétiques dans le vide</b>	<b>983</b>
1	Équation de propagation des champs . . . . .	983
2	Ondes planes progressives harmoniques . . . . .	984
2.1	Onde plane . . . . .	984
2.2	Onde plane progressive harmonique . . . . .	984
2.3	Polarisation des ondes planes progressives harmoniques . . . . .	989
3	Aspect énergétique des ondes planes progressives . . . . .	993
3.1	Densité volumique d'énergie . . . . .	993
3.2	Vecteur de Poynting . . . . .	994
3.3	Valeurs moyennes . . . . .	995
3.4	Quelques ordres de grandeur . . . . .	996
3.5	Interprétation corpusculaire . . . . .	997
<b>28</b>	<b>Phénomènes de propagation linéaires - Dispersion, absorption</b>	<b>1013</b>
1	Propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma peu dense . . . . .	1013
1.1	Description d'un plasma . . . . .	1013

TABLE DES MATIÈRES

1.2	Interaction entre une onde plane progressive harmonique et un plasma	1016
1.3	Propagation d'une onde électromagnétique plane transverse électrique	1019
1.4	Étude de la relation de dispersion	1022
2	Propagation d'une onde dans un conducteur	1023
2.1	Conductivité en régime variable	1023
2.2	Conductivité complexe	1024
2.3	Équations de Maxwell dans le conducteur	1025
2.4	Équation de propagation du champ électrique	1026
2.5	Relation de dispersion	1026
3	Dispersion, absorption	1026
3.1	Expression des champs réels	1026
3.2	Vitesse de phase	1027
3.3	Distance d'atténuation	1027
4	Paquets d'ondes	1028
4.1	Signal comportant deux fréquences voisines	1028
4.2	Paquet d'ondes	1029
4.3	Évolution du paquet d'ondes	1032
4.4	Récapitulation	1034
5	Retour sur la propagation d'une onde dans un plasma - Aspect énergétique	1036
5.1	Cas $\omega > \omega_p$	1036
5.2	Cas $\omega < \omega_p$	1037
6	Retour sur la propagation d'une onde dans un conducteur	1038
6.1	Relation de dispersion	1038
6.2	Effet de peau	1039
6.3	Limite des hautes fréquences	1042
<b>29</b>	<b>Interface entre deux milieux</b>	<b>1059</b>
1	Réflexion et transmission d'une onde sonore plane progressive sous incidence normale	1059
1.1	Relation de passage	1059
1.2	Coefficients de réflexion et de transmission en amplitude	1060
1.3	Coefficients de réflexion et de transmission en énergie	1062
2	Réflexion et transmission d'une onde électromagnétique plane progressive harmonique à l'interface entre deux milieux	1064
2.1	Indice complexe	1064
2.2	Position du problème	1064
2.3	Coefficients de réflexion et de transmission du champ électrique	1066
2.4	Cas d'une interface vide-plasma	1067

2.5	Cas d'une interface vide-conducteur . . . . .	1068
3	Analyse d'une lumière polarisée . . . . .	1069
3.1	Lumière polarisée et lumière naturelle . . . . .	1069
3.2	Lumière polarisée rectilignement . . . . .	1070
3.3	Action d'une lame cristalline biréfringente . . . . .	1072
3.4	Lames demi-onde . . . . .	1073
3.5	Lames quart d'onde . . . . .	1076
3.6	Utilisation d'une lame quart-d'onde pour analyser une lumière polarisée elliptiquement ou circulairement . . . . .	1080
3.7	Analyse d'une lumière non polarisée . . . . .	1081
3.8	Analyse d'une lumière quelconque . . . . .	1081
<b>30</b>	<b>Oscillateur optique</b>	<b>1115</b>
1	Interaction lumière matière . . . . .	1115
1.1	Repères historiques . . . . .	1115
1.2	Les différentes approches . . . . .	1115
1.3	Modèle des probabilités de transition (A. Einstein 1917) . . . . .	1117
1.4	Bilans de population : « rate equations » . . . . .	1123
2	Amplification d'une onde lumineuse . . . . .	1124
2.1	Bilan de puissance - Gain . . . . .	1124
2.2	Populations à l'équilibre thermique . . . . .	1127
2.3	Nécessité d'une inversion de population . . . . .	1127
2.4	Réalisation de l'inversion de population . . . . .	1127
3	Obtention d'oscillations en électronique . . . . .	1127
3.1	Nature de la démarche . . . . .	1127
3.2	Notion de système bouclé . . . . .	1128
3.3	Amplificateur de tension . . . . .	1128
3.4	Filtre sélectif de Wien . . . . .	1130
3.5	Fonctionnement en boucle fermée . . . . .	1131
3.6	Rôle des non linéarités . . . . .	1133
3.7	Exercice : bilan de puissance . . . . .	1134
4	Oscillateur optique : le LASER . . . . .	1135
4.1	Repères historiques . . . . .	1135
4.2	Utilisation de l'analogie électronique . . . . .	1136
4.3	Réalisation du bouclage . . . . .	1136
4.4	Fonctionnement en régime permanent . . . . .	1137
5	Conclusion . . . . .	1141

## TABLE DES MATIÈRES

<b>31 Faisceau laser</b>	<b>1143</b>
1 Introduction . . . . .	1143
2 Description du mode fondamental gaussien . . . . .	1144
2.1 Solution paraxiale de l'équation de Helmholtz à symétrie cylindrique	1144
2.2 Répartition d'éclairement . . . . .	1145
2.3 Répartition de phase - Forme des surfaces d'onde . . . . .	1149
2.4 Récapitulation : le modèle cône-cylindre . . . . .	1152
3 Transformation d'un faisceau gaussien par une lentille . . . . .	1153
3.1 Transformation de la phase . . . . .	1153
3.2 Transformation de l'éclairement . . . . .	1154
3.3 Synthèse . . . . .	1154
4 Utilisation du modèle cône-cylindre . . . . .	1155
4.1 Principe d'étude . . . . .	1155
4.2 Cas des grandes longueurs de Rayleigh . . . . .	1155
4.3 Cas des petites longueurs de Rayleigh. . . . .	1156
5 Applications . . . . .	1157
5.1 Focalisation d'un faisceau gaussien . . . . .	1157
5.2 Réduction de la divergence d'un faisceau gaussien à l'aide d'un système afocal . . . . .	1157
<b>VII Mécanique quantique</b>	<b>1175</b>
<b>32 Introduction à la mécanique quantique</b>	<b>1177</b>
1 Ondes ou particules ? . . . . .	1177
1.1 Interférences avec des ondes lumineuses . . . . .	1177
1.2 Interférences avec des ondes de matière . . . . .	1180
1.3 Principe de complémentarité de Bohr . . . . .	1182
2 La fonction d'onde et l'équation de Schrödinger . . . . .	1182
2.1 Description de l'état d'une particule . . . . .	1182
2.2 Amplitude de probabilité et condition de normalisation . . . . .	1183
2.3 Interprétation probabiliste . . . . .	1183
2.4 L'équation de Schrödinger . . . . .	1185
2.5 L'équation de Schrödinger indépendante du temps . . . . .	1186
3 Inégalités de Heisenberg . . . . .	1189
3.1 Inégalité de Heisenberg spatiale . . . . .	1189
3.2 Inégalité temps - énergie . . . . .	1190
4 De la limite quantique à la limite classique . . . . .	1191



4.1	Exemple de l'oscillateur harmonique . . . . .	1191
4.2	Quantique ou classique ? . . . . .	1195
4.3	Principe de correspondance de Bohr . . . . .	1195
<b>33</b>	<b>Évolution d'une particule quantique libre</b>	<b>1211</b>
1	La particule quantique libre . . . . .	1211
1.1	Définition . . . . .	1211
1.2	États stationnaires d'une particule quantique libre . . . . .	1211
1.3	Représentation d'une particule quantique par un paquet d'ondes . . .	1214
1.4	Vecteur densité de courant de probabilité . . . . .	1219
2	Interférences et diffraction d'ondes de matière . . . . .	1220
2.1	Diffraction par une fente . . . . .	1220
2.2	Diffraction par deux fentes . . . . .	1221
2.3	Expérience des fentes d'Young avec des atomes d'hélium . . . . .	1223
<b>34</b>	<b>Évolution d'une particule quantique dans un potentiel</b>	<b>1243</b>
1	Cas d'un puits de potentiel infiniment profond . . . . .	1244
1.1	Fonctions d'onde propres . . . . .	1244
1.2	Analogie avec les modes propres de vibration d'une corde . . . . .	1246
1.3	Niveaux d'énergie . . . . .	1248
1.4	Interprétation de l'existence d'un état d'énergie minimale . . . . .	1249
1.5	Densité de probabilité de présence . . . . .	1250
1.6	Évolution temporelle d'une superposition d'états stationnaires . . . .	1251
2	Cas d'un puits de potentiel de profondeur finie . . . . .	1252
2.1	États symétriques et antisymétriques . . . . .	1253
2.2	États liés et états de diffusion . . . . .	1253
2.3	Détermination des fonctions d'onde propres symétriques et antisymétriques des états liés . . . . .	1254
2.4	Niveaux d'énergie . . . . .	1255
2.5	Profondeur de pénétration . . . . .	1257
2.6	Interprétation à l'aide de l'inégalité temps-énergie . . . . .	1258
2.7	Comparaison avec le puits de potentiel infiniment profond . . . . .	1258
3	Barrière de potentiel et effet tunnel . . . . .	1261
3.1	Expression de la fonction d'onde propre . . . . .	1262
3.2	Probabilités de réflexion et de transmission. Effet tunnel . . . . .	1263
3.3	Représentation de la densité de probabilité de présence . . . . .	1264
3.4	Approximation d'une barrière épaisse . . . . .	1265
3.5	Interprétation qualitative de l'effet tunnel . . . . .	1266

TABLE DES MATIÈRES

4	Applications de l'effet tunnel . . . . .	1267
4.1	Approche documentaire : le microscope à effet tunnel . . . . .	1267
4.2	Approche documentaire : la radioactivité $\alpha$ . . . . .	1271
4.3	Le double puits de potentiel symétrique . . . . .	1275

**VIII Appendice 1331**

<b>A</b>	<b>Outils mathématiques</b>	<b>1333</b>
1	Calcul différentiel . . . . .	1333
1.1	Dérivées partielles . . . . .	1333
1.2	Théorème de Schwarz . . . . .	1333
1.3	Différentielle . . . . .	1334
2	Analyse vectorielle . . . . .	1335
2.1	Gradient d'un champ scalaire . . . . .	1335
2.2	Divergence d'un champ de vecteurs . . . . .	1337
2.3	Rotationnel d'un champ de vecteurs . . . . .	1338
2.4	Laplacien scalaire et laplacien vectoriel . . . . .	1341
2.5	Opérateur « b scalaire gradient » . . . . .	1342
2.6	Le vecteur symbolique « nabra » . . . . .	1343
2.7	Quelques propriétés des opérateurs différentiels . . . . .	1344
2.8	Théorèmes de Stokes . . . . .	1345
2.9	Théorème d'Ostrogradski . . . . .	1346

**Première partie**

**Thermodynamique**



# Systèmes en écoulement stationnaire

# 1

Ce chapitre reprend les deux principes de la thermodynamique qui ont été introduits en première année dans deux cas nouveaux : le cas d'une transformation infinitésimale d'un système fermé entre deux instants  $t$  et  $t + dt$  infiniment proches et le cas d'un système en écoulement stationnaire. Ces résultats seront appliqués à des situations réelles grâce à l'utilisation de diagrammes thermodynamiques.

## 1 Les deux principes de la thermodynamique pour un système fermé

Dans la première partie de ce chapitre le système considéré est un système fermé.

✔ Il faut toujours préciser clairement le système et la transformation considérés.

### 1.1 Le premier principe

#### a) Rappel - Premier principe entre deux instants $t_1$ et $t_2$

On considère un système fermé  $\Sigma$  qui évolue dans le temps. On considère le système à deux instants successifs  $t_1$  et  $t_2 > t_1$  et on note :

$$\Delta E = E(t_2) - E(t_1),$$

la variation de l'énergie du système  $\Sigma$  entre ces deux instants. L'énergie  $E$  est la somme de l'énergie interne  $U$ , de l'énergie cinétique  $E_c$  et de l'énergie potentielle extérieure  $E_{p,ext}$  du système  $\Sigma$ .

D'après le premier principe, l'énergie de  $\Sigma$  ne peut varier que si des échanges d'énergie entre  $\Sigma$  et l'extérieur ont lieu. Ces échanges peuvent prendre deux formes :

- le **travail mécanique**  $W$ ,
- le **transfert thermique**  $Q$ .

Le travail mécanique  $W$  provient d'une action mécanique exercée par l'extérieur sur le système à l'échelle macroscopique. Le transfert thermique  $Q$  résulte de phénomènes à l'échelle microscopique selon des mécanismes qui ont été vus dans le cours de première année.

Ainsi :

Le **premier principe de la thermodynamique** pour un système fermé entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  s'écrit :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_{p,\text{ext}} = W + Q. \quad (1.1)$$

- ✓  $W$  et  $Q$  sont algébriques : positifs si l'énergie est gagnée par  $\Sigma$  (donc perdue par l'extérieur) et négatifs si l'énergie est perdue par  $\Sigma$  (donc gagnée par l'extérieur).

Les termes de l'équation (1.1) n'ont pas tous le même statut :

- $\Delta U$ ,  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_{p,\text{ext}}$  sont des **variations** de grandeurs instantanées relatives au système et on peut les calculer à partir de mesures faites sur le système à l'instant initial  $t_1$  et à l'instant final  $t_2$  uniquement ;
- $Q$  et  $W$  ne peuvent être calculés que si l'on connaît toute l'évolution du système entre les instants  $t_1$  et  $t_2$  : ils *ne* sont *pas* des variations de grandeurs relatives au système.

Cette différence est soulignée par la notation : les variations sont repérées par un «  $\Delta$  » que les termes de transfert n'ont pas. La notation doit être absolument respectée.

- ✗ Il ne faut surtout pas écrire «  $\Delta Q$  », ni «  $\Delta W$  ».

### b) Premier principe entre deux instants infiniment proches $t$ et $t + dt$

On considère maintenant un système  $\Sigma$  qui évolue entre deux instants infiniment proches  $t$  et  $t + dt$ . Concrètement, la durée  $dt$  est très faible devant le temps  $\tau$  caractéristique de l'évolution de  $\Sigma$  et elle est traitée sur le plan mathématique comme une quantité infinitésimale. Entre l'instant  $t$  et l'instant  $t + dt$ , les variables d'états du système varie d'une quantité très faible appelée **variation infinitésimale**.

L'énergie du système varie également de façon infinitésimale :

$$dE = E(t + dt) - E(t).$$

De même, l'énergie interne de  $\Sigma$  varie de  $dU$ , son énergie cinétique de  $dE_c$  et son énergie potentielle de  $dE_p$ . Ces variations infinitésimales vérifient :

$$dE = dU + dE_c + dE_{p,\text{ext}}.$$

- ✓ Si le système est un gaz parfait ou une phase condensée idéale (solide ou liquide incompressible et indilatable) et que la température  $T$  est uniforme dans tout le système aux instants  $t$  et  $t + dt$  la variation infinitésimale de l'énergie interne est :

$$dU = C_V dT,$$

où  $C_V$  est la capacité thermique à volume constant du système.