

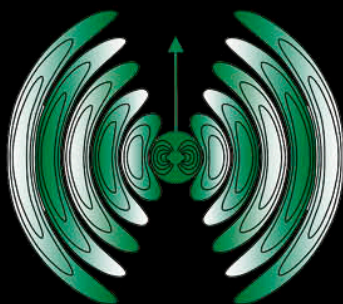
Pascal Olive

# PHYSIQUE CHIMIE

en MP/MP\*

---

Le cours complet



# TABLE DES MATIÈRES

## PREMIÈRE PARTIE : BOÎTE À

### OUTILS

#### DIFFÉRENTIELLES ET FORMES DIFFÉRENTIELLES

##### 1. FONCTIONS DE PLUSIEURS VARIABLES

1.1 Dérivées partielles	3
1.2 Théorème de Schwarz	3

##### 2. DIFFÉRENTIELLES

2.1 Fonction d'une seule variable	4
2.2 Fonction de plusieurs variables	5
2.3 Intégration	5

##### 3. FORMES DIFFÉRENTIELLES

3.1 Définition	6
3.2 Théorème de Poincaré	7

##### 4. APPLICATIONS

4.1 Fonctions implicites	8
4.2 Calculs intégraux	9

#### LES SYSTÈMES DE COORDONNÉES

##### 1. COORDONNÉES CARTÉSIENNES

1.1 Définition	11
1.2 Déplacement, volume et surfaces élémentaires	11

##### 2. COORDONNÉES CYLINDRIQUES

2.1 Définition	12
2.2 Déplacement, volume et surfaces élémentaires	13

##### 3. COORDONNÉES SPHÉRIQUES

3.1 Définition	14
3.2 Déplacement, volume et surfaces élémentaires	15

#### ANALYSE DE FOURIER

##### 1. SÉRIE DE FOURIER

1.1 Théorème pour une fonction $f$ à valeurs réelles	17
1.2 Théorème de Parseval	22
1.3 Théorème pour les fonctions $f$ à valeurs complexes (complément hors-programme)	22

##### 2. TRANSFORMÉE DE FOURIER

2.1 Théorème	23
2.2 Démonstration (complément hors-programme)	24
2.3 Propriétés	24
2.4 Théorème de Parseval-Plancherel (hors-programme) et conséquences	25
2.5 Exemples	28
2.6 Distribution de Dirac $\delta$	29
2.7 Réponse d'un système linéaire à une entrée quelconque	31

#### CHAMPS ET OPÉRATEURS DIFFÉRENTIELS

##### 1. DÉFINITIONS ET OPÉRATIONS DE BASE

1.1 Définitions	33
1.2 Lignes, tubes et cartes de champ pour un champ de vecteur	34
1.3 Opérations de base sur les vecteurs	35
1.4 Circulation d'un champ de vecteur	36
1.5 Flux d'un champ de vecteur	37

##### 2. LES OPÉRATEURS DIFFÉRENTIELS LINÉAIRES

2.1 Gradient	38
--------------	----

2.2 Rotationnel	39
2.3 Divergence	42
2.4 Laplacien scalaire	45
2.5 Laplacien vectoriel	46
2.6 Formules utiles	47
2.7 Théorème de Helmholtz (complément hors-programme)	48

##### 3. CHAMPS PARTICULIERS

3.1 Champ à circulation conservative	48
3.2 Champ à flux conservatif	51

##### 4. BILAN LOCAL D'UNE GRANDEUR EXTENSIVE $x$

4.1 Bilan global	53
4.2 Grandeur reçue	54
4.3 Grandeur produite	55
4.4 Bilan local	56

#### GRANDEURS PHYSIQUES : DIMENSIONS ET UNITÉS

##### 1. UNITÉS ET SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS (SI)

1.1 Grandeur mesurable / Unités	57
1.2 Choix des unités / Système international (SI)	57

##### 2. DIMENSIONS

2.1 Homogénéité	59
2.2 Équation aux dimensions	60
2.3 Intérêt de l'adimensionnalisation / Facteur d'échelle	63
2.4 Simplification des équations par comparaison des ordres de grandeur	66

## DEUXIÈME PARTIE : MÉCANIQUE

#### RÉVISIONS ET COMPLÉMENTS : MOUVEMENT D'UN SOLIDE

##### 1. THÉORÈMES GÉNÉRAUX POUR LES SYSTÈMES DE POINTS MATÉRIELS

1.1 Théorème de la quantité de mouvement / Théorème du centre d'inertie	71
1.2 Théorème du moment cinétique	72
1.3 Théorème de l'énergie cinétique	73
1.4 Cas d'un solide $\Sigma$ en translation	74

##### 2. SOLIDE EN ROTATION AUTOUR D'UN AXE FIXE

2.1 Théorème du moment cinétique	75
2.2 Théorème de l'énergie cinétique	78
2.3 Liaison pivot, couple et analogies avec le solide en translation	79
2.4 Pendule pesant	80
2.5 Pendule de torsion	84
2.6 Pendules couplés par torsion	85
2.7 Modes propres des oscillations de trois disques couplés par torsion	89

#### DYNAMIQUE DANS UN RÉFÉRENTIEL NON GALILÉEN

##### 1. CHANGEMENT DE RÉFÉRENTIEL

1.1 Repère et référentiel	91
1.2 Vecteur rotation instantané	92
1.3 Mouvement de translation	93
1.4 Mouvement de rotation autour d'un axe fixe	95
1.5 Changement quelconque de référentiel	98

**2. DYNAMIQUE DANS UN RÉFÉRENTIEL NON GALILÉEN**

2.1 Ensemble des référentiels galiléens	99
2.2 Principe fondamental et forces d'inertie	99
2.3 Théorème du moment cinétique et théorème de l'énergie cinétique dans un référentiel non galiléen	100

**3. DYNAMIQUE DANS UN RÉFÉRENTIEL EN MOUVEMENT PAR RAPPORT AU RÉFÉRENTIEL TERRESTRE  $\mathcal{R}_t$  SUPPOSÉ GALILÉEN ©**

3.1 Force d'inertie de Coriolis dans un manège ©	102
3.2 Mouvement d'un anneau sur un cerceau en rotation ©	104
3.3 Impesanteur / Effet de marée ©	105

**4. DYNAMIQUE DANS LE RÉFÉRENTIEL TERRESTRE  $\mathcal{R}_t$  EN MOUVEMENT PAR RAPPORT AU RÉFÉRENTIEL GÉOCENTRIQUE  $\mathcal{R}_g$  SUPPOSÉ GALILÉEN**

4.1 Étude du champ de pesanteur terrestre	108
4.2 Déviation vers l'est d'un corps lâché sans vitesse initiale	111
4.3 Vents géostrophiques ©	112
4.4 Pendule de Foucault	115

**5. LES MARÉES**

5.1 Champ de pesanteur, terme de marée	119
5.2 Terme de marée dû à la Lune	120
5.3 Influence du Soleil	125

**LOIS DU FROTTEMENT SOLIDE****1. ACTIONS MÉCANIQUES DE CONTACT ENTRE DEUX SOLIDES**

1.1 Vitesse de glissement	127
1.2 Actions de contact entre deux solides	128
1.3 Lois de Coulomb du frottement de glissement	128
1.4 Aspect énergétique	131
1.5 Méthode de résolution	132

**2. ÉTUDE DE SYSTÈMES À L'ÉQUILIBRE ©**

2.1 Stabilité d'une échelle ©	135
2.2 Tension le long d'une corde enroulée sur un solide ©	136

**3. ÉTUDE DE SYSTÈMES EN MOUVEMENT ©**

3.1 Kilomètre lancé ©	137
3.2 Glissement d'une gomme sur une règle ©	139
3.3 Oscillateur amorti par frottement solide ©	140
3.4 Collé-glissé (stick-slip) ©	143

**TROISIÈME PARTIE : ÉLÉMENTS DE TRAITEMENT DU SIGNAL****SIGNAUX PÉRIODIQUES****1. ÉTUDE DE LA FONCTION DE TRANSFERT D'UN SYSTÈME LINÉAIRE**

1.1 Équivalence entre fonction de transfert et équation différentielle	149
1.2 Diagrammes de Bode	150
1.3 Bande passante	151
1.4 Comportement en basses et hautes fréquences	151
1.5 Ordre d'un circuit	152

**2. FILTRES FONDAMENTAUX**

2.1 Filtres du premier ordre	152
2.2 Filtres du second ordre	155

2.3 Diagrammes de Bode des principaux filtres d'ordre $n \leq 2$	161
--	-----

**3. FILTRAGE**

3.1 Réponse à un signal $T$ -périodique	163
3.2 Filtrage	164

**4. CARACTÈRE INTÉGRATEUR / DÉRIVATEUR D'UN FILTRE**

4.1 Intégrateur	166
4.2 Dérivateur	170

**5. NOTIONS SUR L'AMPLIFICATEUR LINÉAIRE INTÉGRÉ (A.L.I.)**

5.1 Présentation	173
5.2 Principaux défauts linéaires et non linéaires	175
5.3 A.L.I idéal	175
5.4 Stabilité des montages à A.L.I	176
5.5 Montages linéaires à A.L.I supposé idéal	176
5.6 Filtres actifs / passifs et cascades de filtres	178
5.7 Filtres à A.L.I ©	181
5.8 Montages non-linéaires à A.L.I supposé idéal	182

**ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE****1. PRINCIPE DE LA NUMÉRISATION**

1.1 Signaux analogiques / numériques	185
1.2 Intérêt de la numérisation	185

**2. ÉCHANTILLONNAGE**

2.1 Périodisation du spectre	186
2.2 Théorème de Shannon	188
2.3 Repliement de spectre	189
2.4 Filtre anti-repliement	190
2.5 Analogie avec la stroboscopie	191

**3. QUANTIFICATION**

3.1 Codage binaire	192
3.2 Erreur de codage	193
3.3 Bruit de quantification / Dynamique	194

**4. ANALYSE SPECTRALE NUMÉRIQUE**

4.1 Principe, algorithme F.F.T	195
4.2 Problèmes liés à $T_a$ finie	195
4.3 Paramètres optimaux	197
4.4 Exemples d'analyses spectrales ©	197

**5. FILTRAGE NUMÉRIQUE**

5.1 Principe / Exemple de la moyenne glissante	199
5.2 Filtrage passe-bas du premier ordre	201

**QUATRIÈME PARTIE : OPTIQUE****MODÈLE SCALAIRE DES ONDES LUMINEUSES****1. PROPAGATION DES ONDES LUMINEUSES**

1.1 O.P.P.H scalaires	205
1.2 La lumière, onde électromagnétique	206
1.3 Théorie scalaire de Fresnel	207
1.4 Chemin optique	207
1.5 Théorème de Malus	210

**2. ÉMISSION / RÉCEPTION DES ONDES LUMINEUSES**

2.1 Émission de la lumière / Longueur de cohérence	212
2.2 Réception par un capteur / Domaine de l'optique	215

**INTERFÉRENCES LUMINEUSES****1. SUPERPOSITION DE DEUX ONDES LUMINEUSES**

1.1 Somme de deux ondes scalaires harmoniques	217
---	-----

## Table des matières

1.2 Somme de deux ondes scalaires harmoniques lumineuses	218
1.3 Notation complexe / Diagramme de Fresnel	222
1.4 Ordre d'interférence	224
1.5 Franges d'interférence	226

## 2. COHÉRENCE SPATIALE / LOCALISATION DES FRANGES

2.1 Théorème de localisation (complément hors-programme)	227
2.2 Résultats à connaître sur la localisation	230

## INTERFÉRENCES PAR DIVISION DU FRONT D'ONDE

### 1. DIFFRACTION DES ONDES LUMINEUSES

1.1 Diffraction à l'infini d'une onde plane par un trou circulaire	231
1.2 Application à la formation des images optiques	233
1.3 Diffraction à l'infini d'une onde plane par une fente fine	235

### 2. TROUS D'YOUNG / FENTES D'YOUNG

2.1 Nature des franges / Interfrange	237
2.2 Élargissement de la source	240
2.3 Fentes d'Young	243
2.4 Montages pour l'étude expérimentale des trous ou des fentes d'Young	245
2.5 Interposition d'une lame à faces parallèles	247
2.6 Mesure de l'indice de réfraction de l'air	248

### 3. AUTRES EXEMPLES DE DIVISION DU FRONT D'ONDE

3.1 Miroir de Lloyd	249
3.2 Vélométrie laser à franges / Biprisme de Fresnel	251

## INTERFÉRENCES PAR DIVISION D'AMPLITUDE : INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

### 1. PRÉSENTATION / INTÉRÊT

1.1 Description de l'interféromètre	255
1.2 Montage équivalent	257
1.3 Montage en coin d'air et en lame d'air (à faces parallèles)	259

### 2. INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON EN COIN D'AIR

2.1 Localisation, différence de marche et interfrange	260
2.2 Montage expérimental	261
2.3 Mesure de l'indice de réfraction d'un gaz	262

### 3. INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON EN LAME D'AIR

3.1 Localisation	263
3.2 Différence de marche	264
3.3 Rayon des anneaux	266
3.4 Montage expérimental	267

## INTERFÉRENCES À N ONDES

### 1. INTERFÉRENCES À N ONDES PAR DIVISION DU FRONT D'ONDE : RÉSEAUX OPTIQUES

1.1 Superposition de $N$ ondes cohérentes de même amplitude dont les phases sont en progression arithmétique	269
1.2 Exemple : réseau de $N$ trous alignés équidistants	271
1.3 Réseau d'amplitude par transmission	273
1.4 Réseau échelle	278

### 2. INTERFÉRENCES À N ONDES PAR DIVISION D'AMPLITUDE : INTERFÉROMÈTRE DE FABRY-PÉROT

2.1 Description de l'interféromètre de Fabry-Pérot	280
2.2 Différence de marche et franges d'interférence	281
2.3 Intensité en fonction du déphasage	282
2.4 Rayon des anneaux	284

## INTERFÉRENCES EN LUMIÈRE POLYCHROMATIQUE

### 1. BATTEMENTS OPTIQUES

1.1 Interférences avec un doublet de longueurs d'onde très proches	285
1.2 Interféromètre de Michelson en lame d'air avec le doublet jaune du sodium	287

### 2. INTERFÉRENCES AVEC UNE SOURCE DE LUMIÈRE BLANCHE

2.1 Figures d'interférences en lumière blanche	288
2.2 Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre	291

### 3. SPECTROSCOPIE / POUVOIR DE RÉOLUTION

3.1 Intérêt de la spectroscopie	291
3.2 Spectroscopie avec un réseau de fentes	292
3.3 Spectroscopie avec un interféromètre de Fabry-Pérot	296
3.4 Spectroscopie par transformée de Fourier	298

## □ CINQUIÈME PARTIE : ÉLECTROMAGNÉTISME

### ÉLECTROSTATIQUE

#### 1. PROPRIÉTÉS DU CHAMP ÉLECTROSTATIQUE

1.1 Charge	303
1.2 Loi de Coulomb / Champ et potentiel électriques créés par une charge ponctuelle	304
1.3 Champ et potentiel créés par une distribution de charges	305
1.4 Unités et ordres de grandeur	306
1.5 Continuité / discontinuité des champs	307
1.6 Caractère polaire du champ électrique	307
1.7 Symétries	308
1.8 Énergie d'une distribution de charges	311

#### 2. CALCULS DE CHAMP ÉLECTROSTATIQUE AVEC LE THÉORÈME DE GAUSS

2.1 Théorème de Gauss	313
2.2 Méthode	314
2.3 Sphère chargée uniformément	314
2.4 Boule chargée uniformément	315
2.5 Cylindre infini à section circulaire chargé uniformément en volume	316

#### 3. CONDENSATEUR PLAN / CAPACITÉ

3.1 Champ électrostatique créé par un plan infini chargé uniformément	317
3.2 Condensateur plan	319
3.3 Énergie emmagasinée	321

#### 4. LE DIPÔLE ÉLECTROSTATIQUE

4.1 Définition / Moment dipolaire électrique	322
4.2 Champ électrique créé	323
4.3 Actions subies par un dipôle électrostatique	325
4.4 Topologie du champ électrostatique	326

#### 5. ANALOGIES AVEC LA GRAVITATION

5.1 Théorème de Gauss « gravitationnel »	327
--	-----

5.2 Champ de gravitation d'un astre sphérique homogène	
⊙	328
5.3 Énergie gravitationnelle d'un astre sphérique homogène	⊙
	329

## MAGNÉTOSTATIQUE

<b>1. PROPRIÉTÉS DU CHAMP MAGNÉTOSTATIQUE</b>	
1.1 Courant électrique	331
1.2 Champ créé par des distributions de courants stationnaires	333
1.3 Unités et ordres de grandeur	334
1.4 Continuité / discontinuité du champ magnétique	334
1.5 Caractère axial du champ magnétique	334
1.6 Symétries	335
1.7 Énergie d'une distribution de courants	338

<b>2. CALCULS DE CHAMP MAGNÉTOSTATIQUE AVEC LE THÉORÈME D'AMPÈRE</b>	
2.1 Théorème d'Ampère	338
2.2 Méthode	339
2.3 Bobine torique ⊙	340
2.4 Solénoïde ⊙	342
2.5 Solénoïde à section circulaire	342
2.6 Câble rectiligne infini / Fil rectiligne infini	343

<b>3. LE DIPÔLE MAGNÉTIQUE</b>	
3.1 Définition / Moment magnétique	344
3.2 Champ magnétique créé	345
3.3 Actions subies par un dipôle magnétique	346
3.4 Magnéton de Bohr	349
3.5 Expérience de Stern et Gerlach / Moment magnétique de spin	350
3.6 Topologie du champ magnétique stationnaire	353

<b>4. INDUCTANCE D'UN CIRCUIT</b>	
4.1 Inductance propre	355
4.2 Inductance mutuelle	357
4.3 Énergie magnétique d'un ensemble de circuits	359

## LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

<b>1. LES ÉQUATIONS, RÉGIMES ÉTUDIÉS, PREMIÈRES PROPRIÉTÉS</b>	
1.1 Les équations	361
1.2 Les différents régimes étudiés	362
1.3 Linéarité des équations de Maxwell	363
1.4 Conservation de la charge	364

<b>2. CONDUCTION ÉLECTRIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE DANS UN CONDUCTEUR OHMIQUE</b>	
2.1 Conservation de $I$ le long d'un tube de courant en régime stationnaire	366
2.2 Conducteur ohmique	366
2.3 Le modèle de Drude	367
2.4 Résistance d'un conducteur ohmique filiforme / Loi d'Ohm	371
2.5 Effet thermique du courant électrique : loi de Joule locale	372
2.6 Force de Laplace sur un conducteur	373

<b>3. THÉORÈME DE POYNTING, ÉNERGIE ET PUISSANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUES</b>	
3.1 Localisation de l'énergie dans le champ électromagnétique	375
3.2 Interaction entre le champ électromagnétique et la matière : force de Lorentz	376

3.3 Puissance cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge	376
3.4 Théorème de Poynting	377

## 4. CONTINUITÉ / DISCONTINUITÉ DES CHAMPS À LA TRAVERSÉE D'UNE DISTRIBUTION SURFACIQUE DE CHARGES ET DE COURANTS

4.1 Relation de passage pour le champ électrique $\vec{E}$	378
4.2 Relation de passage pour le champ magnétique $\vec{B}$	379

## 5. RETOUR SUR L'ÉLECTROSTATIQUE ET LA MAGNÉTOSTATIQUE

5.1 Équations locales	381
5.2 Équations intégrales / Théorèmes de Gauss et d'Ampère	382
5.3 Comparaison des champs électrostatique et magnétostatique	384

## ÉLECTROMAGNÉTISME DANS L'A.R.Q.S

### 1. INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE DANS L'A.R.Q.S

1.1 A.R.Q.S magnétique dans le vide	387
1.2 Étude d'un solénoïde dans l'A.R.Q.S magnétique ⊙	389
1.3 A.R.Q.S magnétique dans un conducteur / Effet de peau	391
1.4 A.R.Q.S électrique dans le vide (complément hors-programme)	392

### 2. F.E.M ET LOIS EXPÉRIMENTALES DE L'INDUCTION DANS L'A.R.Q.S MAGNÉTIQUE

2.1 Force électromotrice	396
2.2 Lois expérimentales de l'induction	398

### 3. INDUCTION DE NEUMANN ET APPLICATIONS

3.1 Démonstration de la loi de Faraday	400
3.2 Chauffage par induction dans un conducteur cylindrique	400
3.3 Conducteur cylindrique semi-infini / Épaisseur de peau ⊙	404

### 4. INDUCTION DE LORENTZ ET APPLICATIONS

4.1 Exemple fondamental des rails de Laplace	407
4.2 Le haut-parleur électrodynamique ⊙	410

### 5. ÉLECTRODYNAMIQUE DANS L'A.R.Q.S

5.1 Dipôles dans l'A.R.Q.S	413
5.2 Couplage par inductance mutuelle ⊙	416

## ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE

### 1. ONDES PLANES PROGRESSIVE (O.P.P) ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE

1.1 Équations de Maxwell dans le vide	419
1.2 Équation de d'Alembert	419
1.3 Structure des O.P.P dans le vide	420
1.4 Aspect énergétique	424

### 2. ONDES PLANES PROGRESSIVE HARMONIQUES (O.P.P.H) / POLARISATION

2.1 Décomposition d'une O.P.P quelconque	425
2.2 Les différents états de polarisation	426
2.3 Polariseurs et lames à retard	429
2.4 Applications de la polarisation	432
2.5 Notation complexe	433
2.6 Interférences et polarisation	434

### 3. RÉFLEXION NORMALE D'UNE O.P.P.H SUR UN CONDUCTEUR PARFAIT / ONDES STATIONNAIRES / MODES PROPRES

3.1 Conditions aux limites (C.A.L) imposées par la présence d'un conducteur parfait	438
3.2 Onde réfléchie / Onde stationnaire résultante	439
3.3 Recherche directe d'une solution d'onde stationnaire	441
3.4 Aspect énergétique	443
3.5 Modes propres d'une cavité à une dimension	444
3.6 Modes propres d'une cavité à trois dimensions, four à micro-ondes ☉	447

### 4. RÉFLEXION OBLIQUE, CÂBLE COAXIAL ☉

4.1 Interférences à deux ondes par réflexion oblique sur un miroir ☉	449
4.2 Mode de propagation non dispersif dans un câble coaxial ☉	453

### DISPERSION ET ATTÉNUATION / O.P.P.H ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LES PLASMAS ET LES CONDUCTEURS

#### 1. DISPERSION / ATTÉNUATION

1.1 Relation de dispersion	463
1.2 Cas des O.P.P.H électromagnétiques	464
1.3 Vitesse de phase	465
1.4 Vitesse de groupe	467
1.5 Aspect énergétique	471
1.6 Atténuation	471

#### 2. O.P.P.H ÉLECTROMAGNÉTIQUE TRANSVERSALE DANS UN PLASMA PEU DENSE

2.1 Notions sur les plasmas	473
2.2 Modèle étudié	475
2.3 Dispersion	477
2.4 Aspect énergétique	481

#### 3. O.P.P.H ÉLECTROMAGNÉTIQUE DANS UN CONDUCTEUR

3.1 Modèle microscopique	483
3.2 Dispersion	484
3.3 Aspect énergétique	487
3.4 Conducteur parfait	487

#### 4. DISPERSION D'ONDES NON PLANES : EXEMPLE DU GUIDE D'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE À SECTION RECTANGULAIRE ☉

4.1 Guides d'onde	488
4.2 Mode étudié, détermination complète du champ électromagnétique	489
4.3 Relation de dispersion	491
4.4 Aspect énergétique	493

#### 5. RÉFLEXION ET TRANSMISSION D'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE À L'INTERFACE ENTRE DEUX MILIEUX ☉

5.1 Onde en incidence normale sur l'interface entre deux milieux linéaires d'indices complexes ☉	494
5.2 Onde en incidence normale sur l'interface entre le vide et un plasma ☉	497
5.3 Onde en incidence normale sur l'interface entre le vide et un conducteur réel ☉	498
5.4 Onde en incidence oblique sur l'interface entre deux milieux linéaires d'indices réels / Lois de Snell-Descartes ☉	500
5.5 Réflexion interne totale frustrée ☉	504

### RAYONNEMENT DIPOLAIRE ÉLECTRIQUE

#### 1. MODÈLE DU RAYONNEMENT DIPOLAIRE ÉLECTRIQUE

1.1 Modèle du dipôle oscillant (dipôle de Hertz)	507
1.2 Champ électromagnétique dans la zone de rayonnement	508
1.3 Champ rayonné par une particule chargée accélérée	510

#### 2. APPLICATIONS

2.1 Durée de vie de l'atome d'hydrogène dans la théorie classique ☉	511
2.2 Rayonnement d'une antenne demi-onde ☉	512
2.3 Modèle de l'électron élastiquement lié / Couleur du ciel et polarisation ☉	516

### ❑ SIXIÈME PARTIE : THERMODYNAMIQUE

#### RÉVISIONS ET COMPLÈMENTS : LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

##### 1. SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

1.1 État d'un système macroscopique	525
1.2 Bilan différentiel d'une grandeur extensive	526
1.3 Transformations réversibles / irréversibles	526
1.4 Réversibilité / irréversibilité en Physique	529

##### 2. LE PREMIER PRINCIPE POUR UN SYSTÈME FERMÉ

2.1 Grandeurs énergétiques	531
2.2 Échanges énergétiques / Premier principe	532
2.3 Travail des forces de pression sur un système	534

##### 3. LE SECOND PRINCIPE POUR UN SYSTÈME FERMÉ

3.1 Énoncé du second principe	535
3.2 Interprétation statistique de l'entropie	536
3.3 Calcul de variations d'entropie	537

##### 4. PROPRIÉTÉS DES CORPS PURS

4.1 Coefficients thermoélastiques	537
4.2 Coefficients calorimétriques	538
4.3 Gaz parfait (G.P)	539
4.4 Phase condensée	541

##### 5. TRANSFORMATIONS D'UN FLUIDE

5.1 Transformations réversibles	541
5.2 Transformations particulières, applications aux gaz parfaits	542

##### 6. ÉLÉMENTS DE STATIQUE DES FLUIDES

6.1 Libre parcours moyen	545
6.2 Échelle mésoscopique	545
6.3 Pression dans un fluide	547
6.4 Fluide incompressible au repos dans le champ de pesanteur	548
6.5 Fluide compressible au repos dans le champ de pesanteur, modèle de l'atmosphère isotherme	551

#### SYSTÈMES OUVERTS EN RÉGIME STATIONNAIRE

##### 1. BILANS D'ÉNERGIE ET D'ENTROPIE

1.1 Méthode d'étude d'un système ouvert	553
1.2 Premier principe pour un écoulement stationnaire 1D	555
1.3 Second principe pour un écoulement stationnaire 1D	558

##### 2. MACHINES THERMIQUES

2.1 Machines thermiques dithermes, cycle de Carnot	558
2.2 Cas des pseudo-sources	563

2.3 Installation frigorifique ☉	564
2.4 Circuit secondaire d'une centrale REP ☉	567

### DIFFUSION THERMIQUE

#### 1. FLUX THERMIQUES

1.1 Système hors équilibre	571
1.2 Densité volumique de courants thermiques	571
1.3 Conduction (ou diffusion) thermique / Loi de Fourier	572
1.4 Convection	575

#### 2. ÉQUATION DE LA DIFFUSION THERMIQUE (ÉQUATION DE LA CHALEUR)

2.1 Diffusion pure à 1D	577
2.2 Diffusion pure à 3D	578
2.3 Propriétés de la diffusion thermique	579

#### 3. RÉOLUTION DE L'ÉQUATION DE LA CHALEUR

3.1 Conditions aux limites	581
3.2 Les différents régimes	582
3.3 Régime stationnaire / Résistance thermique	583
3.4 A.R.Q.S ☉	587
3.5 Ondes thermiques ☉	590
3.6 Régime transitoire / Utilisation des séries de Fourier ☉	591

#### 4. DÉTERMINATION DU CHAMP DE TEMPÉRATURE DANS D'AUTRES SITUATIONS

4.1 Autres causes de variation d'énergie interne	594
4.2 Convection pour un système 1D ☉	597

#### 5. ANALOGIES ENTRE PHÉNOMÈNES DIFFUSIFS

5.1 Analogies en régime stationnaire	599
5.2 Analogies entre phénomènes 1D	600

### SEPTIÈME PARTIE : PHYSIQUE QUANTIQUE

#### RÉVISIONS ET COMPLÉMENTS : INTRODUCTION À LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

#### 1. LA NAISSANCE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

1.1 Les insuffisances des théories classiques	603
1.2 La théorie de Planck du rayonnement du corps noir	603
1.3 Effet photoélectrique / Effet Compton et les quanta d'Einstein	604
1.4 Le spectre d'émission et d'absorption de l'atome d'hydrogène / Modèle de Bohr	607
1.5 L'hypothèse de de Broglie : dualité onde-corpuscule	609

#### 2. FONCTION D'ONDE ET INÉGALITÉS DE HEISENBERG

2.1 La fonction d'onde et son interprétation probabiliste	612
2.2 Inégalités de Heisenberg	613
2.3 Expérience fondamentale des fentes d'Young	615
2.4 Conséquences des inégalités de Heisenberg	619

#### APPROCHE ONDULATOIRE DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

#### 1. L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER / PAQUET D'ONDES

1.1 L'équation de Schrödinger	625
-------------------------------	-----

1.2 Paquet d'ondes libre / Évolution temporelle	627
1.3 Complément : paquet d'ondes dans un potentiel $V(x)$ quelconque	631
1.4 Courant de probabilité	631

#### 2. SOLUTIONS STATIONNAIRES DE L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER

2.1 États stationnaires à une dimension	633
2.2 Combinaison linéaire de solutions stationnaires	634
2.3 Orbitales atomiques	635

#### 3. ÉTATS STATIONNAIRES DANS UN POTENTIEL UNIFORME PAR MORCEAUX

3.1 Propriétés des solutions stationnaires pour une particule dans un potentiel uniforme par morceaux	637
3.2 Marche de potentiel	638
3.3 Puits de potentiel infini et boîte quantique	642
3.4 Puits de potentiel fini	646
3.5 Potentiel non uniforme par morceaux : puits de potentiel harmonique	652

#### 4. EFFET TUNNEL, COUPLAGE TUNNEL ENTRE DEUX PUITS ET APPLICATIONS

4.1 Barrière de potentiel / Effet tunnel	654
4.2 Couplage tunnel entre deux puits de potentiel symétriques	660

### HUITIÈME PARTIE : ÉLÉMENTS DE THERMODYNAMIQUE STATISTIQUE

#### ÉLÉMENTS DE THERMODYNAMIQUE STATISTIQUE

#### 1. DESCRIPTION STATISTIQUE D'UN SYSTÈME MACROSCOPIQUE / FACTEUR DE BOLTZMANN

1.1 Macro-état et micro-état	669
1.2 Moyennes temporelles, moyennes d'ensemble et postulat ergodique	669
1.3 Loi de Boltzmann	671

#### 2. SYSTÈMES À SPECTRE DISCRET D'ÉNERGIE

2.1 Probabilité d'occupation d'un micro-état par une particule	673
2.2 Énergie moyenne et écart quadratique moyen de l'énergie d'un système de $N$ particules identiques indépendantes	675
2.3 Systèmes de $N$ particules à deux niveaux non dégénérés	677
2.4 Système de $N$ oscillateurs harmoniques indépendants dans l'approximation classique	680
2.5 Système de $N$ particules indépendantes dans un puits de potentiel infini, dans l'approximation classique	681

#### 3. CAPACITÉS THERMIQUES CLASSIQUES DES GAZ ET DES SOLIDES

3.1 Théorème d'équipartition pour un degré de liberté énergétique indépendant quadratique	684
3.2 Capacités thermiques des gaz parfaits	685
3.3 Capacités thermiques des solides cristallins	688

#### 4. THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ

4.1 Distribution des vitesses pour un gaz parfait dans l'approximation classique	690
4.2 Pression cinétique	693
4.3 Équations d'état	694
4.4 Longueur d'onde thermique de de Broglie et approximation classique	694

<b>5. RAYONNEMENT D'ÉQUILIBRE THERMIQUE, LOI DE PLANCK ☉</b>	
5.1 Rayonnement d'équilibre	696
5.2 Énergie moyenne du mode de fréquence $\nu$	697
5.3 Densité volumique spectrale d'énergie électromagnétique	697
<b>6. INTERPRÉTATION STATISTIQUE DE L'ENTROPIE (complément hors-programme)</b>	
6.1 Exemple fondamental	699
6.2 Entropie statistique et information	700
6.3 Définition de l'entropie thermodynamique	701
<b>7. ANNEXE : INTÉGRALES GAUSSIENNES UTILES DANS CE CHAPITRE</b>	
	703

**NEUVIÈME PARTIE : TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE : ASPECTS THERMODYNAMIQUES**

**PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉ AUX TRANSFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES**

<b>1. SYSTÈME EN RÉACTION CHIMIQUE</b>	
1.1 Avancement de réaction	707
1.2 Grandeurs de réaction	709
1.3 État réel d'un système	710
1.4 État standard d'un système	712
1.5 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r Y^0$ à la température des tables $T_0$	713
1.6 Systèmes parfaits	715
1.7. Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r Y^0$ à une température quelconque $T$	716
1.8 Énergies, ordres de grandeur	717

**2. APPLICATIONS DU PREMIER PRINCIPE : CALORIMÉTRIE ET TEMPÉRATURE DE FLAMME**

2.1 Chaleur de réaction à $p_{\text{ext}} = Cte$ et $T_{\text{ext}} = Cte$ , température de flamme adiabatique	718
2.2 Chaleur de réaction à $V = Cte$ et $T_{\text{ext}} = Cte$ , température d'explosion adiabatique (complément hors programme)	723

**SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉ AUX TRANSFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES**

<b>1. POTENTIELS THERMODYNAMIQUES</b>	
1.1 Fonctions $F$ et $G$	727
1.2 Sens d'évolution d'un système à $p$ et $T$ constantes	729
1.3 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r S^0$ et $\Delta_r G^0$ à la température des tables $T_0$	730
1.4 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r S^0$ et $\Delta_r G^0$ à toutes températures	731

<b>2. POTENTIEL CHIMIQUE</b>	
2.1 Définition	733
2.2 Variation du potentiel chimique avec la pression	733
2.3 Potentiel chimique d'un gaz parfait pur, puis d'un constituant d'un mélange parfait de gaz parfaits	733
2.4 Potentiel chimique d'un corps pur condensé, puis	

d'un constituant d'un mélange parfait sous une phase condensée	734
2.5 Potentiel chimique d'un solvant et d'un soluté dans une solution parfaite	735
2.6 Activité chimique d'un constituant	735
2.7 Potentiel chimique d'un constituant d'un mélange réel (complément hors-programme) :	736

<b>3. ÉQUILIBRE CHIMIQUE</b>	
3.1 Condition d'équilibre à pression et température fixées	737
3.2 Loi de Guldberg et Waage	737

<b>4. DÉPLACEMENT D'ÉQUILIBRE</b>	
4.1 Évolution d'un système hors équilibre à $p$ et $T$ fixées	739
4.2 Problème de la rupture d'équilibre	740
4.3 Variance	741
4.4 Problème du déplacement d'équilibre	745
4.5 Influence de la température	746
4.6 Influence de la pression	747
4.7 Influence de l'introduction d'un composé à $p$ et $T$ fixées	748
4.8 Optimisation d'un rendement	750

<b>5. EXEMPLES D'APPLICATIONS ☉</b>	
5.1 Synthèse de l'ammoniac ☉	751
5.2 Réduction du dioxyde de germanium ☉	753

**TRANSITIONS DE PHASE DU CORPS PUR**

<b>1. DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE (<math>p, T</math>) DU CORPS PUR</b>	
1.1 Système diphasé	755
1.2 Système triphasé	756
1.3 Grands molaires et massiques de transition de phase	758
1.4 Formule de Clapeyron	759

<b>2. ÉTUDE DE L'ÉQUILIBRE LIQUIDE-VAPEUR</b>	
2.1 Intérêt	761
2.2 Isothermes d'Andrews	761
2.3 Diagramme enthalpique $p = f(h)$	764

**DIXIÈME PARTIE : ASPECTS THERMODYNAMIQUES ET CINÉTIQUES DE L'ÉLECTROCHIMIE**

**ÉTUDE THERMODYNAMIQUE DES RÉACTIONS D'OXYDO-RÉDUCTION : DIAGRAMMES POTENTIEL-pH**

<b>1. COUPLES OX / RED, NOMBRE D'OXYDATION</b>	
1.1 Définition	767
1.2 Nombre d'oxydation	767
<b>2. SYSTÈME ÉLECTROCHIMIQUE / LOI DE NERNST</b>	
2.1 Électrode	769
2.2 Système étudié / Travail électrique	770
2.3 Potentiel d'électrode	772
2.4 Loi de Nernst	773
2.5 Cas où le solvant intervient, définition du potentiel standard	774
2.6 Mesure du potentiel d'électrode $E$ , électrodes de référence	775
2.7 Classification des couples ox / red	776
2.8 Constantes d'équilibre des réactions rédox	777
<b>3. DOMAINES DE PRÉDOMINANCE / EXISTENCE, DIAGRAMME E - pH</b>	
3.1 Conventions pour les frontières	778



3.2 Diagramme $E$ -pH de l'eau	780
3.3 Diagramme $E$ -pH du fer ☉	781
3.4 Diagramme $E$ -pH du chlore ☉	784

### ÉTUDE CINÉTIQUE DES RÉACTIONS D'OXYDO-RÉDUCTION : COURBES INTENSITÉ-POTENTIEL

#### 1. COURBES $i$ ( $V$ )

1.1 Lien entre intensité $i$ et vitesse de réaction $v$	789
1.2 Facteurs cinétiques	790
1.3 Tracé des courbes $i$ ( $V$ ) : montage à trois électrodes	791
1.4 Systèmes rapides et lents / Surtensions	792
1.5 Cas des couples de l'eau	793
1.6 Paliers de diffusion	794

#### 2. ÉLECTROLYSE

2.1 Condition de l'électrolyse	796
2.2 Application : élaboration électrochimique du zinc ☉	798

#### 3. PILE

3.1 Tension de fonctionnement	802
3.2 Application : accumulateurs au plomb ☉	803

#### 4. APPLICATIONS DES COURBES $i$ ( $V$ ) ☉

4.1 Cémentation ☉	807
4.2 Attaque acide des métaux ☉	808

#### 5. CORROSION HUMIDE DES MÉTAUX

5.1 Corrosion / Passivation	809
5.2 Corrosion humide	811
5.3 Corrosion différentielle	813
5.4 Oxygénation différentielle	814
5.5 Protection du fer contre la corrosion	815

#### ANNEXES

Classification périodique des éléments	817
Formulaire : les opérateurs différentiels	818
Les constantes physiques	820

#### INDEX

821

#### TABLE DES MATIÈRES

827

### CAHIER COULEUR (pages centrales)

#### 1. BATTEMENTS OPTIQUES

#### 2. INTERFÉRENCES AVEC UNE SOURCE DE LUMIÈRE BLANCHE

#### 3. SPECTROSCOPIE / POUVOIR DE RÉOLUTION

#### 4. POLARISATION PAR RÉFLEXION VITREUSE

#### 5. DIFFUSION RAYLEIGH : COULEUR DU CIEL

#### 6. POLARISATION PAR DIFFUSION

#### 7. INTERFÉRENCES ET POLARISATION