

# TABLE DES MATIÈRES

## PREMIÈRE PARTIE : BOÎTE À Outils

### DIFFÉRENTIELLES & 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	7
3.2 Théorème de Poincaré	7

#### 4. APPLICATIONS ⊗

4.1 Fonctions implicites ⊗	9
4.2 Calculs intégraux ⊗	10

### LES SYSTÈMES DE COORDONNÉES

#### 1. COORDONNÉES CARTÉSIENNES

1.1 Définition	13
1.2 Déplacement, volume et surfaces élémentaires	13

#### 2. COORDONNÉES CYLINDRIQUES

2.1 Définition	14
2.2 Déplacement, volume et surfaces élémentaires	15

#### 3. COORDONNÉES SPHÉRIQUES

3.1 Définition	16
3.2 Déplacement, volume et surfaces élémentaires	17

### ANALYSE DE FOURIER

#### 1. SÉRIE DE FOURIER

1.1 Théorème pour une fonction $f$ à valeurs réelles	19
1.2 Théorème pour les fonctions $f$ à valeurs complexes (complément hors-programme)	25

#### 2. TRANSFORMÉE DE FOURIER

2.1 Théorème	26
2.2 Démonstration (complément hors-programme)	26
2.3 Propriétés	27
2.4 Exemples	28
2.5 Distribution de Dirac $\delta$	30
2.6 Réponse d'un système linéaire à une entrée quelconque ⊗	32

### CHAMPS & 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	37
1.5 Flux d'un champ de vecteur	38

#### 2. LES OPÉRATEURS DIFFÉRENTIELS LINÉAIRES

2.1 Gradient	39
2.2 Rotationnel	41
2.3 Divergence	44
2.4 Laplacien scalaire	47
2.5 Laplacien vectoriel	48
2.6 Formules utiles	50
2.7 Théorème de Helmholtz (complément hors-programme)	50

#### 3. CHAMPS PARTICULIERS

3.1 Champ à circulation conservative	51
3.2 Champ à flux conservatif	54

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

4.1 Bilan global	57
4.2 Grandeur reçue	58
4.3 Grandeur produite	59
4.4 Bilan local	60

### GRANDEURS PHYSIQUES : DIMENSIONS & UNITÉS

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

1.1 Grandeur mesurable	61
1.2 Unités	61
1.3 Choix des unités / Système international (SI)	62

#### 2. DIMENSIONS

2.1 Homogénéité	64
2.2 Équation aux dimensions	65
2.3 Intérêt de l'adimensionnalisation / facteur d'échelle ⊗	68
2.4 Simplification des équations par comparaison des ordres de grandeur	74

## DEUXIÈME PARTIE : ÉLECTRONIQUE

### RÉPONSE TEMPORELLE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE / STABILITÉ

#### 1. PROPRIÉTÉS D'UN SYSTÈME LINÉAIRE

1.1 Linéarité	79
1.2 Régime transitoire / régime forcé	80
1.3 Régime sinusoïdal forcé / régime stationnaire	82
1.4 Lien entre la fonction de transfert et l'équation différentielle / critère de stabilité	84

#### 2. CIRCUITS LINÉAIRES

2.1 Dipôles linéaires passifs	85
2.2 Sources linéaires, théorème de Thévenin	87
2.3 Loi des nœuds en termes de potentiel (théorème de Millman)	90

#### 3. CIRCUIT LINÉAIRE EN RÉGIME TRANSITOIRE

3.1 Obtention de l'équation différentielle reliant $s$ et $e$	92
3.2 Conditions initiales et portrait de phase	93
3.3 Signaux appliqués	95
3.4 Temps de réponse / dépassement	97

#### 4. RÉPONSES INDICIELLES D'UN SYSTÈME LINÉAIRE DU PREMIER OU DU SECOND ORDRE

4.1 Systèmes du premier ordre	98
4.2 Systèmes du second ordre	100

#### 5. COMPLÉMENT : TRANSFORMÉES DE LAPLACE

5.1 Définitions et propriétés	106
5.2 Tableau de transformées de Laplace	108
5.3 Application à la réponse temporelle ©	109

### A.L.I / RÉTROACTION

#### 1. AMPLIFICATEUR LINÉAIRE INTÉGRÉ (A.L.I)

1.1 Présentation	113
1.2 Défauts linéaires et non linéaires	115
1.3 A.L.I idéal	116

#### 2. RÉTROACTION / STABILITÉ

2.1 Introduction à la rétroaction	117
2.2 Exemple fondamental du montage amplificateur non inverseur	120
2.3 Généralisation : stabilité des montages à A.L.I	124

#### 3. PRINCIPAUX MONTAGES LINÉAIRES À A.L.I (SUPPOSÉ IDÉAL)

3.1 Grandes fonctions linéaires	125
3.2 Montage suiveur	127
3.3 Montage amplificateur inverseur	128
3.4 Montage intégrateur / montage dérivateur	129
3.5 Montage amplificateur non inverseur	130
3.6 Source de courant commandée par une tension ©	131
3.7 Simulation d'inductance ©	132
3.8 Montage à deux entrées : sommateur / soustracteur	133

### RÉPONSE FRÉQUENTIELLE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE

#### 1. ÉTUDE DE LA FONCTION DE TRANSFERT

1.1 Diagrammes de Bode	135
1.2 Bande passante	136
1.3 Comportement en basses et hautes fréquences	136
1.4 Ordre d'un circuit	137

#### 2. FILTRES FONDAMENTAUX

2.1 Filtres du premier ordre	138
2.2 Filtres du second ordre	141
2.3 Diagrammes de Bode des principaux filtres d'ordre $n \leq 2$	148
2.4 Lien entre réponse temporelle et réponse fréquentielle	150

#### 3. FILTRAGE

3.1 Réponse à un signal $T$ -périodique	152
3.2 Filtrage	153
3.3 Filtres actifs / passifs et cascades de filtres	155

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

4.1 Intégrateur	158
4.2 Dérivateur	160

### ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE

#### 1. PRINCIPE DE LA NUMÉRISATION

1.1 Signaux analogiques / numériques	163
1.2 Intérêt de la numérisation	163

#### 2. ÉCHANTILLONNAGE

2.1 Périodisation du spectre	165
2.2 Théorème de Shannon	167
2.3 Repliement de spectre	168
2.4 Filtre anti-repliement	169
2.5 Analogie avec la stroboscopie	170

#### 3. QUANTIFICATION

3.1 Codage binaire	172
3.2 Erreur de codage	173
3.3 Bruit de quantification / dynamique	174

#### 4. ANALYSE SPECTRALE NUMÉRIQUE

4.1 Principe	175
4.2 Problèmes liés à $T_a$ finie	176
4.3 Paramètres optimaux	178
4.4 Exemples d'analyse spectrale ©	178

### SYSTÈMES NON-LINÉAIRES / MODULATION & DÉMODULATION D'AMPLITUDE

#### 1. COMPOSANTS NON-LINÉAIRES

1.1 Diode	181
1.2 Diode Zener	182
1.3 A.L.I idéal en fonctionnement non-linéaire	183
1.4 Multiplieur	183

#### 2. CIRCUITS NON-LINÉAIRES

2.1 Causes de non-linéarité	184
2.2 Caractérisation de la non-linéarité	187
2.3 Méthode d'étude d'un système non-linéaire	188
2.4 Comparateur à hystérésis	189

#### 3. MODULATION ET DÉMODULATION D'AMPLITUDE

3.1 Les différentes modulations et leur intérêt	192
3.2 Modulation d'amplitude	195
3.3 Démodulation d'amplitude par détection synchrone	197
3.4 Démodulation d'amplitude par détection de crête ©	198
3.5 Détection synchrone d'un signal sinusoïdal	201

### OSCILLATEURS ÉLECTRONIQUES

#### 1. PRÉSENTATION

1.1 Définition	203
1.2 Intérêt	203

#### 2. OSCILLATEURS QUASI-SINUSOÏDAUX

2.1 Exemple fondamental : oscillateur à pont de Wien	204
2.2 Équations du système	205
2.3 Démarrage des oscillations	205
2.4 Simulations / conditions d'oscillations quasi-sinusoidales	207
2.5 Entretien des oscillations	208

#### 3. OSCILLATEURS DE RELAXATION

3.1 Principe	209
3.2 Générateur de créneaux et de triangles	210
3.3 Multivibrateur astable	214

### ☐ TROISIÈME PARTIE : ÉLECTROMAGNÉTISME

### LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

#### 1. CHARGE ET COURANT ÉLECTRIQUES

1.1 Charge	219
1.2 Courant	221
1.3 Conservation de la charge à 1D	223

## Table des matières

1.4 Conservation de la charge à 3D	224
<b>2. ÉQUATIONS DE MAXWELL / PREMIÈRES PROPRIÉTÉS</b>	
2.1 Les équations	224
2.2 Les différents régimes étudiés	225
2.3 Linéarité des équations de Maxwell	226
2.4 Courant de déplacement et conservation de la charge	227

### 3. THÉORÈME DE POYNTING, ÉNERGIE ET PUISSANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUES

3.1 Localisation de l'énergie dans le champ électromagnétique	228
3.2 Interaction entre le champ électromagnétique et la matière : force de Lorentz	228
3.3 Puissance cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge	229
3.4 Théorème de Poynting	230

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

4.1 Relation de passage pour le champ électrique $\vec{E}$	231
4.2 Relation de passage pour le champ magnétique $\vec{B}$	232

## CHAMP ÉLECTRIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

### 1. PROPRIÉTÉS DU CHAMP ÉLECTRIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

1.1 Équations locales / potentiel électrique	235
1.2 Équations intégrales / théorème de Gauss	235
1.3 Unités et ordres de grandeur	236
1.4 Calcul du champ et du potentiel électriques créés par des distributions de charges stationnaires	237
1.5 Continuité / discontinuité des champs	239
1.6 Caractère polaire du champ électrique	240
1.7 Symétries	240
1.8 Énergie d'une distribution de charges	244

### 2. CALCULS DE CHAMP ÉLECTRIQUE STATIONNAIRE AVEC LE THÉORÈME DE GAUSS

2.1 Méthode	246
2.2 Sphère chargée uniformément en surface $\odot$	247
2.3 Cylindre infini à section circulaire chargé uniformément en volume $\odot$	249
2.4 Plan infini chargé uniformément $\odot$	250

### 3. LE DIPÔLE ÉLECTRIQUE

3.1 Définition / moment dipolaire électrique	252
3.2 Champ électrique créé	253
3.3 Actions subies par un dipôle électrique	255
3.4 Topologie du champ électrique stationnaire	257

### 4. ANALOGIES AVEC LA GRAVITATION

4.1 Théorème de Gauss « gravitationnel »	258
4.2 Champ de gravitation d'un astre sphérique homogène $\odot$	259
4.3 Énergie gravitationnelle d'un astre sphérique homogène $\odot$	261

## CONDENSATEUR

### 1. CONDUCTEUR EN ÉQUILIBRE ÉLECTROSTATIQUE

1.1 Influence électrostatique	263
1.2 Théorème de Coulomb	264

1.3 Propriétés du potentiel dans le vide / application à la topologie du champ électrique stationnaire	265
--	-----

### 2. CONDENSATEUR

2.1 Définition	266
2.2 Calcul de capacité / exemple fondamental du condensateur plan	269
2.3 Énergie emmagasinée	271

## TRANSPORT DE CHARGES

### 1. CONDUCTEUR OHMIQUE

1.1 Définition	273
1.2 Modèle de Drude	274
1.3 Puissance reçue par un dipôle électrocinétique	276

### 2. COURANTS STATIONNAIRES

2.1 Définition : électrostatique / régime stationnaire	278
2.2 Conservation de $I$ le long d'un tube de courant	279
2.3 Équation de Laplace pour un conducteur ohmique	280
2.4 Résistance d'un conducteur ohmique / loi d'Ohm	280
2.5 Calcul de résistance, exemple fondamental d'un conducteur rectiligne	282
2.6 Autre exemple : symétrie cylindrique, résistance d'une couronne cylindrique $\odot$	283
2.7 Puissance reçue	284

### 3. FORCE DE LAPLACE SUR UN CONDUCTEUR

3.1 Force de Laplace volumique	284
3.2 Force de Laplace sur un conducteur filiforme	286

## CHAMP MAGNÉTIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

### 1. PROPRIÉTÉS DU CHAMP MAGNÉTIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

1.1 Équations locales	287
1.2 Équations intégrales / théorème d'Ampère	287
1.3 Unités et ordres de grandeur	288
1.4 Calcul du champ magnétique créé par des distributions de courants stationnaires (complément hors-programme)	288
1.5 Continuité / discontinuité du champ magnétique	289
1.6 Caractère axial du champ magnétique	289
1.7 Symétries du champ magnétique stationnaire	290
1.8 Énergie d'une distribution de courants	294

### 2. CALCULS DE CHAMP MAGNÉTIQUE STATIONNAIRE AVEC LE THÉORÈME D'AMPÈRE

2.1 Méthode	294
2.2 Bobine torique $\odot$	295
2.3 Solénoïde $\odot$	297
2.4 Solénoïde à section circulaire	298
2.5 Fil rectiligne infini	299
2.6 Nappe infinie de courants $\odot$	300

### 3. LE DIPÔLE MAGNÉTIQUE

3.1 Définition / moment magnétique	302
3.2 Champ magnétique créé	303
3.3 Actions subies par un dipôle magnétique	305
3.4 Topologie du champ magnétique stationnaire	307

### 4. INDUCTANCE D'UN CIRCUIT

4.1 Inductance propre	309
4.2 Inductance mutuelle	311

4.3 Énergie magnétique d'un ensemble de circuits	313
--	-----

### 5. COMPARAISON DES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE STATIONNAIRES

5.1 Sources du champ / action du champ sur une particule chargée	316
5.2 Équations locales	316
5.3 Circulation	316
5.4 Flux	316
5.5 Continuité / discontinuité des champs	316
5.6 Caractère polaire ou axial	316
5.7 Symétrie / antisymétrie plane	317
5.8 Invariance des distributions	317
5.9 Énergie de D	317
5.10 Monopôles / dipôles	317

## 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	319
1.2 A.R.Q.S magnétique dans un conducteur / effet de peau	321
1.3 A.R.Q.S électrique dans le vide	323

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

2.1 Force électromotrice	326
2.2 Lois expérimentales de l'induction	328

### 3. INDUCTION DE NEUMANN ET APPLICATIONS

3.1 Démonstration de la loi de Faraday	331
3.2 Chauffage par induction dans un conducteur cylindrique $\odot$	332
3.3 Conducteur cylindrique semi-infini / épaisseur de peau $\odot$	335

### 4. INDUCTION DE LORENTZ ET APPLICATIONS

4.1 Exemple fondamental des rails de Laplace	339
4.2 Le haut-parleur électrodynamique $\odot$	342

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

5.1 Dipôles dans l'A.R.Q.S	346
5.2 Couplage par inductance mutuelle $\odot$	349

**QUATRIÈME PARTIE :**  
**THERMODYNAMIQUE DES TRANSFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES**

## RÉVISIONS ET COMPLÉMENTS : LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

### 1 SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

1.1 État d'un système macroscopique	355
1.2 Bilan différentiel d'une grandeur extensive pour un système fermé	356
1.3 Transformations réversibles / irréversibles	356
1.4 Réversibilité / irréversibilité en Physique	360

### 2 LE PREMIER PRINCIPE POUR UN SYSTÈME FERMÉ

2.1 Grandeurs énergétiques	362
----------------------------	-----

2.2 Échanges énergétiques / premier principe	363
2.3 Travail des forces de pression sur un système	365

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

3.1 Énoncé du second principe	366
3.2 Calcul de variations d'entropie	367

### 4 PROPRIÉTÉS DES CORPS PURS

4.1 Coefficients thermoélastiques	368
4.2 Coefficients calorimétriques	368
4.3 Gaz parfait (G.P)	370
4.4 Phase condensée	371

### 5 TRANSFORMATIONS D'UN FLUIDE

5.1 Transformations réversibles	372
5.2 Transformations particulières, applications aux gaz parfaits	373

### 6 LOI DE BOLTZMANN / THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ

6.1 Loi de Boltzmann	376
6.2 Modèle du gaz parfait	377
6.3 Distribution des vitesses pour un gaz parfait monoatomique (complément hors programme)	377
6.4 Pression cinétique	379
6.5 Équations d'état	380

### 7 INTERPRÉTATION STATISTIQUE DE L'ENTROPIE (complément hors-programme)

7.1 Exemple fondamental	380
7.2 Entropie statistique et information	382
7.3 Définition de l'entropie thermodynamique	383

## APPLICATIONS DU PREMIER PRINCIPE AUX TRANSFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

### 1 SYSTÈME EN RÉACTION CHIMIQUE

1.1 Avancement de réaction	385
1.2 Grandeurs de réaction	387
1.3 État réel d'un système	388
1.4 État standard d'un système	390
1.5 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r Y^0$ à la température des tables $T_0$	391
1.6 Systèmes parfaits	393
1.7. Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r Y^0$ à une température quelconque $T$	394
1.8 Énergies, ordres de grandeur	396

### 2. APPLICATIONS DU PREMIER PRINCIPE : CALORIMÉTRIE ET TEMPÉRATURES DE FLAMME

2.1 Chaleur de réaction à $p_{\text{ext}} = Cte$ et $T_{\text{ext}} = Cte$ , température de flamme adiabatique	397
2.2 Chaleur de réaction à $V = Cte$ et $T_{\text{ext}} = Cte$ , température d'explosion adiabatique	402

## APPLICATIONS DU SECOND PRINCIPE AUX TRANSFORMATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

### 1 POTENTIELS THERMODYNAMIQUES

1.1 Fonctions $F$ et $G$	407
1.2 Sens d'évolution d'un système à $p$ et $T$ constantes	409
1.3 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r G^0$ et $\Delta_r S^0$ à la température des tables $T_0$	410

## Table des matières

- 1.4 Calcul des grandeurs standard de réaction  $\Delta_r S^0(T)$  et  $\Delta_r G^0(T)$  à toutes températures 411

**2. POTENTIEL CHIMIQUE**

- 2.1 Définition 413  
 2.2 Variation du potentiel chimique avec la pression 414  
 2.3 Potentiel chimique d'un gaz parfait pur, puis d'un constituant d'un mélange parfait de gaz parfaits 414  
 2.4 Potentiel chimique d'un corps pur condensé, puis d'un constituant d'un mélange parfait sous une phase condensée 415  
 2.5 Potentiel chimique d'un solvant et d'un soluté dans une solution parfaite 416  
 2.6 Activité chimique d'un constituant 417  
 2.7 Complément hors-programme : potentiel chimique d'un constituant d'un mélange réel 417

**3. ÉQUILIBRE CHIMIQUE**

- 3.1 Condition d'équilibre à pression et température fixées 418  
 3.2 Loi de Guldberg et Waage 419

**4. DÉPLACEMENT D'ÉQUILIBRE**

- 4.1 Évolution d'un système hors d'équilibre 421  
 4.2 Problème de la rupture d'équilibre 422  
 4.3 Variance 423  
 4.4 Problème du déplacement d'équilibre 428  
 4.5 Influence de la température 428  
 4.6 Influence de la pression 430  
 4.7 Influence de l'introduction d'un composé 431  
 4.8 Optimisation d'un rendement 432

**5. EXEMPLES D'APPLICATIONS** ☉

- 5.1 Synthèse de l'ammoniac ☉ 434  
 5.2 Réduction du dioxyde de germanium ☉ 436

**TRANSITIONS DE PHASE DU CORPS PUR****1 DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE ( $p, T$ ) DU CORPS PUR**

- 1.1 Système diphasé 439  
 1.2 Système triphasé 440  
 1.3 Grandeurs molaires et massiques de transition de phase 442  
 1.4 Formule de Clapeyron 444

**2. ÉTUDE DE L'ÉQUILIBRE LIQUIDE-VAPEUR**

- 2.1 Intérêt 446  
 2.2 Isothermes d'Andrews 447  
 2.3 Diagramme enthalpique (diagramme de Mollier) 449

**DIAGRAMMES BINAIRES SOLIDE-LIQUIDE****1 DÉFINITIONS / DIAGRAMMES SIMPLES**

- 1.1 Définition / variance 451  
 1.2 Diagramme binaire 452  
 1.3 Analyse thermique 455

**2 DIAGRAMMES PLUS COMPLEXES**

- 2.1 Diagramme à deux fuseaux / point indifférent 457  
 2.2 Miscibilité nulle à l'état solide / eutectique 458  
 2.3 Miscibilité partielle à l'état solide 460  
 2.4 Composés définis 461

☐ **CINQUIÈME PARTIE :**  
**PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT ET**  
**BILANS**

**STATIQUE DES FLUIDES****1. PRESSION DANS UN FLUIDE**

- 1.1 Définition d'un fluide 465  
 1.2 Évaluation du libre parcours moyen dans un fluide 466  
 1.3 Particule fluide, échelle mésoscopique 467  
 1.4 Pression dans un fluide 469  
 1.5 Résultante des actions de pression / équivalent volumique 471

**2. RELATION FONDAMENTALE DE LA STATIQUE DES FLUIDES ET APPLICATIONS**

- 2.1 Actions sur une particule fluide 472  
 2.2 Relation fondamentale de la statique (R.F.S) 473  
 2.3 Fluide incompressible au repos dans le champ de pesanteur 473  
 2.4 Fluide compressible au repos dans le champ de pesanteur ☉ 476  
 2.5 Fluide incompressible au repos dans un référentiel tournant ☉ 478  
 2.6 Poussée d'Archimède 479

**DESCRIPTION D'UN FLUIDE EN MOUVEMENT****1. CHAMP DE VITESSE D'UN FLUIDE**

- 1.1 Description eulérienne 483  
 1.2 Description lagrangienne 484  
 1.3 Passage de la description eulérienne à la description lagrangienne 485  
 1.4 Champ de vitesse au voisinage d'un point (complément hors-programme) 488  
 1.5 Écoulement irrotationnel / tourbillonnaire 491

**2. CONSERVATION DE LA MASSE**

- 2.1 Vecteur densité volumique de courants de masse / débits massique et volumique 491  
 2.2 Conservation de la masse à 1D 492  
 2.3 Conservation de la masse à 3D 493  
 2.4 Écoulement stationnaire 494  
 2.5 Écoulement incompressible 494

**3. EXEMPLES D'ÉCOULEMENTS** ☉

- 3.1 Écoulement parallèle cisailé entre deux plaques ☉ 496  
 3.2 Analogie électromagnétique / exemple du vortex ☉ 499

**4. LES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES D'ÉTUDE D'UN ÉCOULEMENT** ☉ 501**DYNAMIQUE DES FLUIDES****1. ACTIONS DE CONTACT SUR UN FLUIDE**

- 1.1 Contraintes tangentielles / viscosité 503  
 1.2 Conditions aux limites pour un écoulement réel 505  
 1.3 Interprétation microscopique de la viscosité et de la pression 506  
 1.4 Loi de pression dans une direction orthogonale à un écoulement parallèle 508

**2. NOMBRE DE REYNOLDS**

- 2.1 Types d'écoulement et dimensions caractéristiques 508

2.2 Les deux modes de transfert de quantité de mouvement	509
2.3 Définition du nombre de Reynolds et signification	511
2.4 Équivalent volumique des actions visqueuses pour un écoulement incompressible (complément hors-programme)	511
2.5 Équation de Navier-Stokes pour un écoulement incompressible (complément hors-programme) / nombre de Reynolds	512

### 3. ÉCOULEMENT EXTERNE STATIONNAIRE INCOMPRESSIBLE AUTOUR D'UN OBSTACLE

3.1 Couche limite	513
3.2 Traînée / Portance	516
3.3 Écoulement autour d'une sphère	519
3.4 Écoulement autour d'autres corps	525
3.5 Écoulement autour d'une aile d'avion / portance	526
3.6 Décollage et commande d'un avion / finesse et polaire d'Eiffel ©	528

### 4. ÉCOULEMENT INTERNE STATIONNAIRE INCOMPRESSIBLE DANS UNE CONDUITE CIRCULAIRE

4.1 Les différents régimes	532
4.2 Écoulement laminaire / loi de Poiseuille	533
4.3 Régime quelconque : diagramme de Moody	539

## BILANS POUR UN ÉCOULEMENT & FLUIDE PARFAIT

### 1. BILAN D'UNE GRANDEUR EXTENSIVE $x$

1.1 Description eulérienne / lagrangienne	543
1.2 Cas des écoulements stationnaires unidimensionnels	545

### 2. BILANS D'ÉNERGIE ET D'ENTROPIE

2.1 Premier principe pour un écoulement stationnaire 1D	547
2.2 Second principe pour un écoulement stationnaire 1D	549
2.3 Application fondamentale : pertes de charge dans un écoulement stationnaire incompressible	550

### 3. FLUIDE PARFAIT / THÉORÈME DE BERNOULLI, EFFET VENTURI ET APPLICATIONS

3.1 Modèle du fluide parfait et théorème de Bernoulli	551
3.2 Écoulement quasi-parallèle / effet Venturi et applications	552
3.3 Tube de Pitot	555
3.4 Formule de Torricelli	557
3.5 Régimes d'un cours d'eau / nombre de Froude	558

### 4. FLUIDE PARFAIT ET PORTANCE

4.1 Équation d'Euler / Théorème de Lagrange (complément hors-programme)	561
4.2 Théorème de Bernoulli à partir de l'équation d'Euler (complément hors-programme)	561
4.3 Écoulement parfait autour d'un cylindre circulaire en rotation ©	562
4.4 Écoulement parfait autour d'une aile d'avion (complément hors-programme)	568

## APPLICATIONS DES BILANS D'ÉNERGIE, DE QUANTITÉ DE MOUVEMENT ET DE MOMENT CINÉTIQUE

### 1. MACHINES THERMIQUES

1.1 Machines thermiques dithermes, cycle de Carnot	571
1.2 Cas des pseudo-sources	575
1.3 Installation frigorifique ©	576

### 2. TUYÈRES ET FUSÉES ©

2.1 Principe	579
2.2 Géométrie de la tuyère	579
2.3 Vitesse d'éjection	581
2.4 Force de poussée sur la fusée	583

### 3. TURBORÉACTEUR ©

3.1 Description	584
3.2 Pression de l'atmosphère standard internationale	585
3.3 Détermination des autres inconnues	586
3.4 Poussée des réacteurs et rendement d'un réacteur	587
3.5 Finesse de l'avion	588

### 4. TURBINE PELTON ©

4.1 Action d'un jet sur un auget en translation rectiligne uniforme	589
4.2 Bilans d'énergie et de moment cinétique sur la roue Pelton	592
4.3 Barrage et récupération d'énergie hydraulique	594

## DIFFUSION THERMIQUE

### 1. FLUX THERMIQUES

1.1 Système hors d'équilibre	597
1.2 Densité volumique de courant thermique	597
1.3 Conduction (ou diffusion) thermique / loi de Fourier	598
1.4 Convection	600
1.5 Rayonnement thermique	602

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

2.1 Diffusion pure 1D	604
2.2 Diffusion pure 3D	606
2.3 Propriétés de la diffusion thermique	607

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

3.1 Conditions aux limites	609
3.2 Les différents régimes	610
3.3 Régime stationnaire / résistance thermique	611
3.4 A.R.Q.S ©	616
3.5 Ondes thermiques ©	618
3.6 Régime transitoire / utilisation des séries de Fourier ©	620

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

4.1 Autres causes de variation d'énergie interne	623
4.2 Convection pour un système 1D ©	626

## DIFFUSION DE PARTICULES

### 1. FLUX DE PARTICULES

1.1 Système hors d'équilibre	629
1.2 Densité volumique de courant de particules	630
1.3 Diffusion / loi de Fick	631
1.4 Convection	633

<b>2. ÉQUATION DE LA DIFFUSION DE PARTICULES</b>	
2.1 Diffusion avec production	634
2.2 Propriétés de la diffusion	635
<b>3. RÉOLUTION DE L'ÉQUATION DE DIFFUSION / EXEMPLES</b>	
3.1 Conditions aux limites	636
3.2 Influence de la gravité pour les fluides en régime stationnaire ©	636
3.3 A.R.Q.S : durée d'évaporation de l'éther ©	640
3.4 Régime transitoire : réacteur nucléaire ©	641
3.5 Diffusion d'un pic de concentration (complément hors-programme)	644
<b>4. ANALOGIES ENTRE PHÉNOMÈNES DIFFUSIFS</b>	
4.1 Analogies en régime stationnaire	646
4.2 Analogies entre phénomènes 1D	646

□ **SIXIÈME PARTIE : PHYSIQUE DES ONDES**

**PHÉNOMÈNES ONDULATOIRES NON DISPERSIFS**

<b>1. PROPAGATION NON DISPERSIVE LE LONG D'UNE CORDE / L'ÉQUATION DE D'ALEMBERT</b>	
1.1 Exemple fondamental de la corde vibrante, équation de D'Alembert 1D	651
1.2 L'équation de D'Alembert 3D, premières propriétés	654
1.3 Solutions d'onde plane de l'équation de D'Alembert	654
<b>2. ONDES PLANES PROGRESSIVES HARMONIQUES (O.P.P.H)</b>	
2.1 Décomposition d'une O.P.P quelconque	657
2.2 Notation complexe	658
<b>3. ONDES PLANES STATIONNAIRES</b>	
3.1 Définition / obtention	659
3.2 Nœuds et ventres de vibration	661
3.3 Modes propres de vibration	662
3.4 Somme d'ondes stationnaires vérifiant des conditions initiales	664
3.5 Application à la corde de guitare ©	665
3.6 Régime sinusoïdal forcé / corde de Melde	668
3.7 Autre exemple de C.A.L : corde lestée en son milieu ©	670
<b>4. PROPAGATION NON DISPERSIVE LE LONG D'UN CÂBLE COAXIAL</b>	
4.1 Le câble coaxial	673
4.2 Équations de couplage et équation d'onde	673
4.3 Impédance caractéristique du câble	674
4.4 Réflexion en bout de ligne, cas d'une charge résistive	676
4.5 Réflexion en bout de ligne, cas d'une charge quelconque en r.s.f ©	679
<b>5. PROPAGATION NON DISPERSIVE LE LONG D'UNE CHAÎNE D'OSCILLATEURS ©</b>	
5.1 Équations de couplage	681
5.2 Approximation des milieux continus / équation de D'Alembert	681
5.3 Application : ondes sonores dans les solides	682

<b>6. PROPAGATION NON DISPERSIVE À LA SURFACE D'UNE MEMBRANE CIRCULAIRE ©</b>	
6.1 Équation d'onde	684
6.2 Ondes stationnaires	685

**ONDES ACOUSTIQUES DANS LES FLUIDES**

<b>1. ÉQUATION DE PROPAGATION</b>	
1.1 Modèle étudié	689
1.2 Linéarisation	690
1.3 Équation de D'Alembert	692
1.4. Calcul de $c$	693
<b>2. ASPECT ÉNERGÉTIQUE</b>	
2.1 Bilan d'énergie	694
2.2 Intensité acoustique	695
<b>3. ONDES PLANES ACOUSTIQUES / TUYAUX SONORES</b>	
3.1 Équations de propagation	697
3.2 O.P.P / impédance acoustique	699
3.3 Calcul numérique d'une perturbation acoustique pour une O.P.P.H dans l'air	700
3.4 Réflexion / transmission en une discontinuité de structure	702
3.5 Une application : la couche anti-reflet ©	704
3.6 Réflexion totale en bout de tuyau / ondes stationnaires	707
3.7 Modes propres	709
3.8 Résonances	710
<b>4. ONDES SPHÉRIQUES ACOUSTIQUES / EFFET DOPPLER</b>	
4.1 Ondes sphériques	711
4.2 Modes propres d'une cavité sphérique ©	714
4.3 Effet Doppler	715
<b>5. ONDES DE GRAVITATION 1D DANS UN FLUIDE INCOMPRESSIBLE PEU PROFOND ©</b>	
5.1 Équations de couplage	721
5.2 Vitesse des ondes de gravitation en eau peu profonde et applications	723

**ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE**

<b>1. O.P.P ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE</b>	
1.1 Équations de Maxwell dans le vide	725
1.2 Équation de D'Alembert	726
1.3 Structure des O.P.P dans le vide	726
1.4 Aspect énergétique	728
<b>2. O.P.P.H / POLARISATION</b>	
2.1 Les différents états de polarisation	729
2.2 Modification de la polarisation	733
2.3 Notation complexe	737
<b>3. LA LUMIÈRE, ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE</b>	
3.1 Domaine de l'optique	737
3.2 Émission de la lumière par une source classique	738
3.3 Émission de la lumière par un laser	740
3.4 Réception par un capteur	744
<b>4. RÉFLEXION NORMALE D'UNE O.P.P.H SUR UN CONDUCTEUR PARFAIT</b>	
4.1 Conditions aux limites imposées par la présence d'un conducteur parfait	745
4.2 Onde réfléchie / onde résultante	747

4.3 Aspect énergétique / bilan photonique	749
4.4 Complément hors-programme : détermination des charges et courants surfaciques / pression de radiation	751

### 5. RÉFLEXION OBLIQUE, CÂBLE COAXIAL, CAVITÉ PARALLÉLÉPIPÉDIQUE ☉

5.1 Interférences à deux ondes par réflexion sur un miroir ☉	752
5.2 Mode de propagation non dispersif dans un câble coaxial ☉	756
5.3 Cavité parallélépipédique, four à micro-ondes ☉	761

## DISPERSION & ATTÉNUATION DES ONDES / ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LES PLASMAS & LES CONDUCTEURS

### 1. PROPAGATION DISPERSIVE LE LONG D'UNE CORDE / DISPERSION / ATTÉNUATION

1.1 Exemple de la corde vibrante amortie	765
1.2 Recherche de solutions d'ondes planes	766
1.3 Amortissement temporel ☉	769
1.4 Cas des O.P.P.H électromagnétiques	771
1.5 Vitesse de phase	772
1.6 Vitesse de groupe	774
1.7 Aspect énergétique	777
1.8 Atténuation	777

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

2.1 Modèle microscopique	779
2.2 Dispersion	781
2.3 Aspect énergétique	786
2.4 Ondes de type hélicon ☉	787

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

3.1 Modèle microscopique	790
3.2 Dispersion	792
3.3 Aspect énergétique	794
3.4 Conducteur parfait	794
3.5 Réflexion normale sur un conducteur réel ☉	795

### 4. AUTRES EXEMPLES CLASSIQUES DE LA DISPERSION D'ONDES PLANES ☉

4.1 Chaîne d'oscillateurs mécaniques ☉	796
4.2 Câble coaxial avec pertes ☉	798
4.3 Pavillon acoustique exponentiel ☉	801

### 6. DISPERSION D'ONDES NON PLANES : EXEMPLE DU GUIDE D'ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES À SECTION RECTANGULAIRE ☉

6.1 Mode étudié, détermination complète du champ électromagnétique	805
6.2 Relation de dispersion	807
6.3 Aspect énergétique	809

## SEPTIÈME PARTIE : CONVERSION DE PUISSANCE

### PUISSANCE ÉLECTRIQUE

#### 1. PUISSANCE EN RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ

1.1 Intérêt de la puissance électrique	813
1.2 Puissance reçue par un dipôle linéaire / facteur de	

puissance	814
1.3 Adaptation d'impédance	815
1.4 Diagramme de Fresnel	817
1.5 Relèvement du $\cos\phi$ ☉	820

#### 2. PUISSANCE D'UN SIGNAL T-PÉRIODIQUE

2.1 Valeur efficace	822
2.2 Puissance en décibel	823
2.3 Relation de Parseval	824

## CONVERSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE STATIQUE : TRANSFORMATEUR & FERROMAGNÉTISME

### 1. FERROMAGNÉTISME

1.1 Magnétisme	825
1.2 Milieu L.H.I et classification	826
1.3 Diamagnétisme, paramagnétisme	827
1.4 Ferromagnétisme	828

### 2. TRANSFORMATEUR PARFAIT ET APPLICATIONS

2.1 Les équations du transformateur parfait	835
2.2 Transfert d'impédance au primaire ☉	838
2.3 Transport d'énergie électrique ☉	839
2.4 Transformateur d'isolement	844
2.5 Circuit magnétique / réluctance ☉	846

### 3. TRANSFORMATEUR RÉEL / PERTES

3.1 Pertes fer	849
3.2 Modélisation linéaire du transformateur réel	851
3.3 Méthode d'étude expérimentale d'un transformateur	855
3.4 Tracé expérimental du cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique	857

## CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE

### 1. CONTACTEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE EN TRANSLATION

1.1 Énergie magnétique	859
1.2 Force intérieure	860

### 2. MACHINE SYNCHRONE

2.1 Champ statorique	862
2.2 Champ rotorique	865
2.3 Énergie magnétique	865
2.4 Couple s'exerçant sur le rotor	867
2.5 Bilan énergétique	870
2.6 Complément : machine synchrone à $p$ paires de pôles	873

### 3. MACHINE À COURANT CONTINU (M.C.C)

3.1 Champs statorique et rotorique	874
3.2 Couple électromagnétique exercé sur le rotor	878
3.3 Bilan énergétique / f.e.m induite dans le rotor	878
3.4 Réversibilité	878
3.5 Moteur	879
3.6 Génératrice	879

### 4. COMPLÉMENT HORS-PROGRAMME : MACHINE ASYNCHRONE ☉

4.1 Principe	881
4.2 Énergie magnétique et inductances mutuelles	881
4.3 Couple s'exerçant sur le rotor	882
4.4 Courants induits dans les phases du rotor	882
4.5 Étude du couple s'exerçant sur le rotor	883
4.6 Comparaison des machines électriques	885

**CONVERSION ÉLECTRONIQUE**

<b>1. PRINCIPE DE LA CONVERSION</b>	
1.1 Convertisseurs	887
1.2 Exemple d'une charge résistive	889
1.3 Éléments de commutation	891
1.4 Sources	894
1.5 Règles de connexion	895
1.6 Convertisseur direct entre deux sources de natures différentes	896
1.7 Convertisseur indirect entre deux sources de même nature	898
<b>2. HACHEUR TENSION / COURANT</b>	
2.1 Structure étudiée	899
2.2 Formes d'ondes en régime établi	900
2.3 Nature des interrupteurs	902
2.4 Commande du moteur	902
2.5 Récupération d'énergie lors du freinage	904
<b>3. REDRESSEUR / ONDULEUR</b>	
3.1 Structure à 4 interrupteurs	906
3.2 Redresseur	907
3.3 Onduleur	908
<b>4. EXEMPLES D'APPLICATIONS</b> ☉	
4.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur) ☉	913
4.2 Gradateur ☉	916

☐ **HUITIÈME PARTIE :****ÉLECTROCHIMIE****ÉTUDE THERMODYNAMIQUE DES RÉACTIONS D'OXYDO-RÉDUCTION & DIAGRAMMES POTENTIEL-pH**

<b>1 COUPLES OX / RED, NOMBRE D'OXYDATION</b>	
1.1 Définition	921
1.2 Nombre d'oxydation	921
<b>2 SYSTÈME ÉLECTROCHIMIQUE / LOI DE NERNST</b>	
2.1 Électrode	923
2.2 Système étudié / travail électrique	925
2.3 Potentiel d'électrode	926
2.4 Loi de Nernst	928
2.5 Cas où le solvant intervient, définition du potentiel standard	928
2.6 Mesure du potentiel d'électrode $E$ , électrodes de référence	930
2.7 Classification des couples ox / red	931
2.8 Constantes d'équilibre des réactions ox / red	932
<b>3 DOMAINES DE PRÉDOMINANCE / EXISTENCE, DIAGRAMME E - pH</b>	
3.1 Conventions pour les frontières	933
3.2 Diagramme $E$ -pH de l'eau	936
3.3 Diagramme $E$ -pH du fer ☉	938
3.4 Diagramme $E$ -pH du chlore ☉	941

**ÉTUDE CINÉTIQUE DES RÉACTIONS D'OXYDO-RÉDUCTION & COURBES INTENSITÉ-POTENTIEL**

<b>1. COURBES <math>i(V)</math></b>	
1.1 Lien entre intensité $i$ et vitesse de réaction $v$	945
1.2 Facteurs cinétiques	946
1.3 Tracé des courbes $i(V)$ : montage à trois électrodes	947
1.4 Systèmes rapides et lents / surtensions	948
1.5 Cas des couples de l'eau	950
1.6 Paliers de diffusion	951
<b>2. ÉLECTROLYSE</b>	
2.1 Condition de l'électrolyse	953
2.2 Application : élaboration électrochimique du zinc ☉	955
<b>3. PILE</b>	
3.1 Tension de fonctionnement	959
3.2 Application : accumulateurs au plomb ☉	961
<b>4. APPLICATIONS DES COURBES <math>i(V)</math></b> ☉	
4.1 Cémentation ☉	964
4.2 Attaque acide des métaux ☉	965
<b>5. CORROSION HUMIDE DES MÉTAUX</b>	
5.1 Corrosion / Passivation	966
5.2 Corrosion humide	969
5.3 Corrosion différentielle	971
5.4 Oxygénation différentielle	972
5.5 Protection du fer contre la corrosion	973

☐ **ANNEXES**

Classification périodique des éléments	975
Formulaire sur les opérateurs différentiels	976
Les constantes de la Physique	978

☐ **INDEX**

979