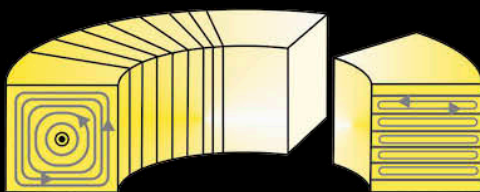


Pascal Olive

PHYSIQUE CHIMIE

en PSI/PSI*

Le cours complet



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 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)	23
2.3 Propriétés	24
2.4 Exemples	25
2.5 Distribution de Dirac δ	26
2.6 Réponse d'un système linéaire à une entrée quelconque ☉	28

**CHAMPS ET OPÉRATEURS
DIFFÉRENTIELS**

1. DÉFINITIONS ET OPÉRATIONS DE BASE

1.1 Définitions	29
1.2 Lignes, tubes et cartes de champ pour un champ de vecteur	30
1.3 Opérations de base sur les vecteurs	31
1.4 Circulation d'un champ de vecteur	32
1.5 Flux d'un champ de vecteur	33

**2. LES OPÉRATEURS DIFFÉRENTIELS
LINÉAIRES**

2.1 Gradient	34
2.2 Rotationnel	35
2.3 Divergence	38
2.4 Laplacien scalaire	41
2.5 Laplacien vectoriel	42
2.6 Formules utiles	43
2.7 Théorème de Helmholtz (complément hors-programme)	44

3. CHAMPS PARTICULIERS

3.1 Champ à circulation conservative	44
3.2 Champ à flux conservatif	47

**4. BILAN LOCAL D'UNE GRANDEUR
EXTENSIVE x**

4.1 Bilan global	49
4.2 Grandeur reçue	50
4.3 Grandeur produite	51
4.4 Bilan local	52

**GRANDEURS PHYSIQUES : DIMENSIONS
ET UNITÉS**

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

1.1 Grandeur mesurable / Unités	53
1.2 Choix des unités / Système international (SI)	53

2. DIMENSIONS

2.1 Homogénéité	55
2.2 Équation aux dimensions	56
2.3 Intérêt de l'adimensionnalisation / facteur d'échelle ☉	59
2.4 Simplification des équations par comparaison des ordres de grandeur	64

**DEUXIÈME PARTIE :
ÉLECTRONIQUE**

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

1. PROPRIÉTÉS D'UN SYSTÈME LINÉAIRE

1.1 Linéarité	69
1.2 Régime transitoire / régime forcé	70
1.3 Régime sinusoïdal forcé / régime stationnaire	72
1.4 Lien entre la fonction de transfert et l'équation différentielle / critère de stabilité	74

2. CIRCUITS LINÉAIRES

2.1 Dipôles linéaires passifs	75
2.2 Sources linéaires, théorème de Thévenin	77
2.3 Loi des nœuds en termes de potentiel (théorème de Millman)	80

**3. CIRCUIT LINÉAIRE EN RÉGIME
TRANSITOIRE**

3.1 Obtention de l'équation différentielle reliant s et e	81
3.2 Conditions initiales et portrait de phase	82
3.3 Signaux appliqués	83
3.4 Temps de réponse / dépassement	85

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

4.1 Systèmes du premier ordre	86
4.2 Systèmes du second ordre	88

**5. COMPLÉMENT : TRANSFORMÉE DE
LAPLACE**

5.1 Définitions et propriétés	93
5.2 Tableau de transformées de Laplace	95
5.3 Application à la réponse temporelle ☉	96

A.L.I / RÉTROACTION

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

1.1 Présentation	99
1.2 Défauts linéaires et non linéaires	100

1.3 A.L.I idéal	101
2. RÉTROACTION / STABILITÉ	
2.1 Introduction à la rétroaction	102
2.2 Exemple fondamental du montage amplificateur non inverseur	105
2.3 Généralisation : stabilité des montages à A.L.I	108

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

3.1 Grandes fonctions linéaires	109
3.2 Montage suiveur	111
3.3 Montage amplificateur inverseur	112
3.4 Montage intégrateur / montage dérivateur	112
3.5 Montage amplificateur non inverseur	113
3.6 Source de courant commandée par une tension ©	114
3.7 Simulation d'inductance ©	115
3.8 Montage à deux entrées : sommateur / soustracteur	115

RÉPONSE FRÉQUENTIELLE D'UN SYSTÈME LINÉAIRE

1. ÉTUDE DE LA FONCTION DE TRANSFERT

1.1 Diagrammes de Bode	117
1.2 Bande passante	118
1.3 Comportement en basses et hautes fréquences	118
1.4 Ordre d'un circuit	119

2. FILTRES FONDAMENTAUX

2.1 Filtres du premier ordre	119
2.2 Filtres du second ordre	122
2.3 Diagrammes de Bode des principaux filtres d'ordre $n \leq 2$	128
2.4 Lien entre réponse temporelle et réponse fréquentielle	130

3. FILTRAGE

3.1 Réponse à un signal T -périodique	132
3.2 Filtrage	133
3.3 Filtres actifs / passifs et cascades de filtres	135

4. CARACTÈRE INTÉGRATEUR / DÉRIVATEUR D'UN FILTRE

4.1 Intégrateur	137
4.2 Dérivateur	141

ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE

1. PRINCIPE DE LA NUMÉRISATION

1.1 Signaux analogiques / numériques	145
1.2 Intérêt de la numérisation	145

2. ÉCHANTILLONNAGE

2.1 Périodisation du spectre	146
2.2 Théorème de Shannon	148
2.3 Repliement de spectre	149
2.4 Filtre anti-repliement	150
2.5 Analogie avec la stroboscopie	151

3. QUANTIFICATION

3.1 Codage binaire	152
3.2 Erreur de codage	153
3.3 Bruit de quantification / Dynamique	154

4. ANALYSE SPECTRALE NUMÉRIQUE

4.1 Principe, algorithme F.F.T	155
4.2 Problèmes liés à T_a finie	155
4.3 Paramètres optimaux	157
4.4 Exemples d'analyse spectrale ©	157

5. FILTRAGE NUMÉRIQUE

5.1 Principe / Exemple de la moyenne glissante	159
5.2 Filtrage passe-bas du premier ordre	161

SYSTÈMES NON-LINÉAIRES / MODULATION ET DÉMODULATION D'AMPLITUDE

1. COMPOSANTS NON-LINÉAIRES

1.1 Diode	163
1.2 Diode Zener	164
1.3 A.L.I idéal en fonctionnement non-linéaire	164
1.4 Multiplieur	165

2. CIRCUITS NON-LINÉAIRES

2.1 Causes de non-linéarité	166
2.2 Caractérisation de la non-linéarité	169
2.3 Méthode d'étude d'un système non-linéaire	169
2.4 Comparateur à hystérésis	170

3. MODULATION ET DÉMODULATION D'AMPLITUDE

3.1 Les différentes modulations et leur intérêt	174
3.2 Modulation d'amplitude	176
3.3 Démodulation d'amplitude par détection synchrone	178
3.4 Démodulation d'amplitude par détection de crête ©	179
3.5 Détection synchrone d'un signal sinusoïdal	181

OSCILLATEURS ÉLECTRONIQUES

1. PRÉSENTATION

1.1 Définition	183
1.2 Intérêt	183

2. OSCILLATEURS QUASI-SINUSOÏDAUX

2.1 Exemple fondamental : oscillateur à pont de Wien	183
2.2 Équations du système	184
2.3 Démarrage des oscillations	184
2.4 Simulations / conditions d'oscillations quasi-sinusoidales	186
2.5 Entretien des oscillations	187

3. OSCILLATEURS DE RELAXATION

3.1 Principe	188
3.2 Générateur de créneaux et de triangles	189
3.3 Multivibrateur astable	192

☐ TROISIÈME PARTIE : ÉLECTROMAGNÉTISME

LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

1. CHARGE ET COURANT ÉLECTRIQUES

1.1 Charge	197
1.2 Courant	198
1.3 Conservation de la charge à 1D	200
1.4 Conservation de la charge à 3D	201

2. ÉQUATIONS DE MAXWELL / PREMIÈRES PROPRIÉTÉS

2.1 Les équations	202
2.2 Les différents régimes étudiés	202
2.3 Linéarité des équations de Maxwell	204
2.4 Courant de déplacement et conservation de la charge	204

3. THÉORÈME DE POYNTING, ÉNERGIE ET PUISSANCE ÉLECTROMAGNÉTIQUES

3.1 Localisation de l'énergie dans le champ électromagnétique	205
3.2 Interaction entre le champ électromagnétique et la matière : force de Lorentz	205
3.3 Puissance cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge	206
3.4 Théorème de Poynting	206

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} 208
 4.2 Relation de passage pour le champ magnétique \vec{B} 209

CHAMP ÉLECTRIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

1. PROPRIÉTÉS DU CHAMP ÉLECTRIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

- 1.1 Équations locales / potentiel électrique 211
 1.2 Équations intégrales / théorème de Gauss 211
 1.3 Unités et ordres de grandeur 212
 1.4 Calcul du champ électrique et du potentiel électrique créés par des distributions de charges stationnaires 213
 1.5 Continuité / discontinuité des champs 215
 1.6 Caractère polaire du champ électrique 215
 1.7 Symétries 216
 1.8 Énergie d'une distribution de charges 219

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

- 2.1 Méthode 221
 2.2 Sphère chargée uniformément \odot 221
 2.3 Cylindre infini à section circulaire chargé uniformément en volume \odot 223
 2.4 Plan infini chargé uniformément \odot 224

3. LE DIPÔLE ÉLECTRIQUE

- 3.1 Définition / Moment dipolaire électrique 226
 3.2 Champ électrique créé (complément hors-programme) 227
 3.3 Actions subies par un dipôle électrique (complément hors-programme) 228
 3.4 Topologie du champ électrique stationnaire 230

4. ANALOGIES AVEC LA GRAVITATION

- 4.1 Théorème de Gauss « gravitationnel » 231
 4.2 Champ de gravitation d'un astre sphérique homogène \odot 232
 4.3 Énergie gravitationnelle d'un astre sphérique homogène \odot 233

CONDENSATEUR

1. CONDUCTEUR EN ÉQUILIBRE ÉLECTROSTATIQUE

- 1.1 Influence électrostatique 235
 1.2 Théorème de Coulomb 236
 1.3 Propriétés du potentiel dans le vide / Application à la topologie du champ électrique stationnaire 265
 1.4 Boule sphérique métallique neutre dans un champ électrique uniforme \odot 238

2. CONDENSATEUR

- 2.1 Définition 240
 2.2 Calcul de capacité / Exemple fondamental du condensateur plan 242
 2.3 Énergie emmagasinée 244

TRANSPORT DE CHARGES

1. CONDUCTEUR OHMIQUE

- 1.1 Définition 245
 1.2 Le modèle de Drude et ses limites 246
 1.3 Puissance reçue par un dipôle électrocinétique 250

2. COURANTS STATIONNAIRES

- 2.1 Définition : électrostatique / régime stationnaire 251
 2.2 Conservation de I le long d'un tube de courant 252
 2.3 Équation de Laplace pour un conducteur ohmique 252
 2.4 Résistance d'un conducteur ohmique / Loi d'Ohm 253
 2.5 Calcul de résistance, exemple fondamental d'un conducteur rectiligne 254
 2.6 Autre exemple : symétrie cylindrique, résistance d'une couronne cylindrique \odot 255
 2.7 Puissance reçue 256

3. FORCE DE LAPLACE SUR UN CONDUCTEUR / EFFET HALL

- 3.1 Force de Laplace volumique 256
 3.2 Force de Laplace sur un conducteur filiforme 258
 3.3 Effet Hall 258

CHAMP MAGNÉTIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

1. PROPRIÉTÉS DU CHAMP MAGNÉTIQUE EN RÉGIME STATIONNAIRE

- 1.1 Équations locales 261
 1.2 Équations intégrales / Théorème d'Ampère 261
 1.3 Unités et ordres de grandeur 262
 1.4 Calcul du champ magnétique créé par des distributions de courants stationnaires (complément hors-programme) 262
 1.5 Continuité / Discontinuité du champ magnétique 263
 1.6 Caractère axial du champ magnétique 263
 1.7 Symétries du champ magnétique stationnaire 264
 1.8 Énergie d'une distribution de courants 267

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

- 2.1 Méthode 267
 2.2 Bobine torique \odot 268
 2.3 Solénoïde \odot 270
 2.4 Solénoïde à section circulaire 271
 2.5 Câble rectiligne infini / Fil rectiligne infini 272
 2.6 Nappe infinie de courants \odot 273

3. LE DIPÔLE MAGNÉTIQUE

- 3.1 Définition / Moment magnétique 274
 3.2 Champ magnétique créé 275
 3.3 Actions subies par un dipôle magnétique 277
 3.4 Magnéton de Bohr 279
 3.5 Topologie du champ magnétique stationnaire 280

4. INDUCTANCE D'UN CIRCUIT

- 4.1 Inductance propre 282
 4.2 Inductance mutuelle 284
 4.3 Énergie magnétique d'un ensemble de circuits 286

5. COMPARAISON DES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE STATIONNAIRES

- 5.1 Sources du champ / Action du champ sur une particule chargée 288
 5.2 Équations locales 288
 5.3 Circulation 288
 5.4 Flux 288
 5.5 Continuité / Discontinuité des champs 288
 5.6 Caractère polaire ou axial 288
 5.7 Symétrie / Antisymétrie plane 289
 5.8 Invariance des distributions 289

5.9 Énergie de D	289
5.10 Distributions monopolaires / dipolaires	289

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	291
1.2 Étude d'un solénoïde dans l'A.R.Q.S magnétique ☉	293
1.3 A.R.Q.S magnétique dans un conducteur / Effet de peau	295
1.4 A.R.Q.S électrique dans le vide	296
1.5 Étude d'un condensateur plan dans l'A.R.Q.S électrique ☉	299

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

2.1 Force électromotrice	300
2.2 Loix expérimentales de l'induction	302

3. INDUCTION DE NEUMANN ET APPLICATIONS

3.1 Démonstration de la loi de Faraday	305
3.2 Chauffage par induction dans un conducteur cylindrique ☉	305
3.3 Conducteur cylindrique semi-infini / Épaisseur de peau ☉	309

4. INDUCTION DE LORENTZ ET APPLICATIONS

4.1 Exemple fondamental des rails de Laplace	313
4.2 Le haut-parleur électrodynamique ☉	316

5. ÉLECTROCINÉTIQUE DANS L'A.R.Q.S

5.1 Dipôles dans l'A.R.Q.S	319
5.2 Couplage par inductance mutuelle ☉	322

☐ QUATRIÈME PARTIE : PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT

RÉVISIONS ET COMPLÉMENTS : LES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

1. SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

1.1 État d'un système macroscopique	327
1.2 Bilan différentiel d'une grandeur extensive pour un système fermé	328
1.3 Transformations réversibles / irréversibles	328
1.4 Réversibilité / Irréversibilité en Physique	331

2. LE PREMIER PRINCIPE POUR UN SYSTÈME FERMÉ

2.1 Grandeurs énergétiques	333
2.2 Échanges énergétiques / Premier principe	334
2.3 Travail des forces de pression sur un système	336

3. LE SECOND PRINCIPE POUR UN SYSTÈME FERMÉ

3.1 Énoncé du second principe	337
3.2 Interprétation statistique de l'entropie	338
3.3 Calcul de variations d'entropie	338

4. PROPRIÉTÉS DES CORPS PURS

4.1 Coefficients thermoélastiques	339
4.2 Coefficients calorimétriques	340
4.3 Gaz parfait (G.P)	341
4.4 Phase condensée	343

5. TRANSFORMATIONS D'UN FLUIDE

5.1 Transformations réversibles	343
5.2 Transformations particulières, applications aux gaz parfaits	344

6. LOI DE BOLTZMANN / THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ

6.1 Loi de Boltzmann	347
6.2 Modèle du gaz parfait	348
6.3 Distribution des vitesses pour un gaz parfait monoatomique (complément hors programme)	348
6.4 Pression cinétique	349
6.5 Résultats de la théorie cinétique des gaz	350

STATIQUE DES FLUIDES

1. PRESSION DANS UN FLUIDE

1.1 Définition d'un fluide	351
1.2 Évaluation du libre parcours moyen dans un fluide	352
1.3 Particule fluide, échelle mésoscopique	353
1.4 Pression dans un fluide	354
1.5 Résultante des actions de pression / Équivalent volumique	356

2. RELATION FONDAMENTALE DE LA STATIQUE DES FLUIDES ET APPLICATIONS

2.1 Actions sur une particule fluide	357
2.2 Relation fondamentale de la statique (R.F.S)	358
2.3 Fluide incompressible au repos dans le champ de pesanteur	358
2.4 Fluide compressible au repos dans le champ de pesanteur	361
2.5 Fluide incompressible au repos dans un référentiel tournant ☉	362
2.6 Poussée d'Archimède	364

DESCRIPTION D'UN FLUIDE EN MOUVEMENT

1. CHAMP DE VITESSE D'UN FLUIDE

1.1 Description eulérienne	367
1.2 Description lagrangienne	368
1.3 Passage de la description eulérienne à la description lagrangienne	369
1.4 Écoulement irrotationnel / tourbillonnaire (complément hors-programme)	372

2. CONSERVATION DE LA MASSE

2.1 Vecteur densité volumique de courants de masse / Débits massique et volumique	372
2.2 Conservation de la masse à 1D	373
2.3 Conservation de la masse à 3D	374
2.4 Écoulement stationnaire	375
2.5 Écoulement incompressible	375

3. EXEMPLES D'ÉCOULEMENTS ☉

3.1 Écoulement parallèle cisailé entre deux plaques ☉	377
3.2 Analogie électromagnétique / exemple du vortex ☉	378

4. LES TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES D'ÉTUDE D'UN ÉCOULEMENT ☉

	381
--	-----

DYNAMIQUE DES FLUIDES

1. ACTIONS DE CONTACT SUR UN FLUIDE

1.1 Contraintes tangentielles / Viscosité	383
1.2 Conditions aux limites pour un écoulement réel	385
1.3 Interprétation microscopique de la viscosité pour les gaz	386
1.4 Loi de pression dans une direction orthogonale à un écoulement parallèle	387

2. NOMBRE DE REYNOLDS

2.1 Types d'écoulement et dimensions caractéristiques	387
---	-----

Table des matières

2.2 Les deux modes de transfert de quantité de mouvement	388
2.3 Définition du nombre de Reynolds et signification	389
2.4 Équivalent volumique des actions visqueuses pour un écoulement incompressible (complément hors-programme)	390
2.5 Équation de Navier-Stokes pour un écoulement incompressible (complément hors-programme) / Nombre de Reynolds	390

3. ÉCOULEMENT EXTERNE STATIONNAIRE INCOMPRESSIBLE AUTOUR D'UN OBSTACLE

3.1 Couche limite	392
3.2 Traînée / Portance	394
3.3 Écoulement autour d'une sphère	396
3.4 Écoulement autour d'autres corps	401
3.5 Écoulement autour d'une aile d'avion / Portance	402
3.6 Décollage et commande d'un avion / Finesse et polaire d'Eiffel ☉	404

4. ÉCOULEMENT INTERNE STATIONNAIRE INCOMPRESSIBLE DANS UNE CONDUITE CIRCULAIRE

4.1 Les différents régimes	407
4.2 Écoulement laminaire / loi de Poiseuille	408
4.3 Régime quelconque : diagramme de Moody	415

DIFFUSION THERMIQUE

1. FLUX THERMIQUES

1.1 Système hors équilibre	419
1.2 Densité volumique de courant thermique	419
1.3 Conduction (ou diffusion) thermique / Loi de Fourier	420
1.4 Convection	423
1.5 Rayonnement thermique (complément hors programme)	424

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

2.1 Diffusion pure 1D	426
2.2 Diffusion pure 3D	428
2.3 Propriétés de la diffusion thermique	428

3. RÉOLUTION DE L'ÉQUATION DE LA CHALEUR

3.1 Conditions aux limites	430
3.2 Les différents régimes	431
3.3 Régime stationnaire / Résistance thermique	432
3.4 A.R.Q.S ☉	437
3.5 Ondes thermiques ☉	439
3.6 Régime transitoire / Utilisation des séries de Fourier ☉	440

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

4.1 Autres causes de variation d'énergie interne	443
4.2 Convection pour un système 1D ☉	446

DIFFUSION DE PARTICULES

1. FLUX DE PARTICULES

1.1 Système hors équilibre	449
1.2 Densité volumique de courant de particules	450
1.3 Diffusion / loi de Fick	451
1.4 Convection	453

2. ÉQUATION DE LA DIFFUSION DE PARTICULES

2.1 Diffusion avec production	453
-------------------------------	-----

2.2 Propriétés de la diffusion	454
--------------------------------	-----

3. RÉOLUTION DE L'ÉQUATION DE DIFFUSION ET APPLICATIONS

3.1 Conditions aux limites	455
3.2 Influence de la gravité pour les fluides en régime stationnaire ☉	455
3.3 A.R.Q.S : durée d'évaporation de l'éther ☉	458
3.4 Régime transitoire : réacteur nucléaire ☉	459

4. ANALOGIES ENTRE PHÉNOMÈNES DIFFUSIFS

4.1 Analogies en régime stationnaire	462
4.2 Analogies entre phénomènes 1D	462

MACROSCOPIQUES

BILANS POUR UN ÉCOULEMENT ET FLUIDE PARFAIT

1. BILAN D'UNE GRANDEUR EXTENSIVE x

1.1 Description eulérienne / lagrangienne	467
1.2 Cas des écoulements stationnaires unidimensionnels	469

2. BILANS D'ÉNERGIE ET D'ENTROPIE

2.1 Premier principe pour un écoulement stationnaire 1D	471
2.2 Bilan d'énergie mécanique pour un écoulement stationnaire 1D	473
2.3 Second principe pour un écoulement stationnaire 1D	474
2.4 Application fondamentale : pertes de charge dans un écoulement stationnaire incompressible	475

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

3.1 Modèle du fluide parfait	476
3.2 Théorème de Bernoulli	477
3.3 Nombre de Mach et écoulement incompressible	477
3.4 Écoulement quasi-parallèle / effet Venturi et applications	478
3.5 Tube de Pitot ☉	481
3.6 Formule de Torricelli ☉	482
3.7 Régimes d'un cours d'eau / Nombre de Froude ☉	484

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

1. MACHINES THERMIQUES

1.1 Machines thermiques dithermes, cycle de Carnot	487
1.2 Cas des pseudo-sources	491
1.3 Installation frigorifique ☉	493
1.4 Circuit secondaire d'une centrale REP ☉	495

2. TUYÈRES ET FUSÉES ☉

2.1 Principe	499
2.2 Géométrie de la tuyère	500
2.3 Vitesse d'éjection	501
2.4 Force de poussée sur la fusée	503

3. TURBORÉACTEUR ☉

3.1 Description	504
3.2 Pression de l'atmosphère standard internationale	505
3.3 Détermination des autres inconnues	506
3.4 Poussée d'un réacteur et rendement	507
3.5 Finesse de l'avion	508

4. TURBINE PELTON ☉	
4.1 Action d'un jet sur un auget en translation rectiligne uniforme	509
4.2 Bilan d'énergie et de moment cinétique sur la roue Pelton	512
4.3 Barrage et récupération d'énergie hydraulique	513

5. ÉOLIENNE ☉	
5.1 Principe	516
5.2 Efficacité maximale de Betz	516

☐ **SIXIÈME PARTIE : PHYSIQUE DES**

ONDES

PHÉNOMÈNES DE PROPAGATION NON DISPERSIFS : ÉQUATION DE D'ALEMBERT

1. PROPAGATION NON DISPERSIVE LE LONG D'UNE CORDE / L'ÉQUATION DE D'ALEMBERT

1.1 Exemple fondamental de la corde vibrante, équation de d'Alembert 1D	521
1.2 L'équation de d'Alembert 3D, premières propriétés	523
1.3 Solutions d'onde plane de l'équation de D'Alembert	523

2. ONDES PLANES PROGRESSIVES HARMONIQUES (O.P.P.H)

2.1 Décomposition d'une O.P.P quelconque	526
2.2 Notation complexe	527

3. ONDES PLANES STATIONNAIRES

3.1 Définition / Obtention	527
3.2 Nœuds et ventres de vibration	529
3.3 Modes propres de vibration	530
3.4 Somme d'ondes stationnaires vérifiant des conditions initiales	531
3.5 Application à la corde de guitare ☉	533
3.6 Régime sinusoïdal forcé / Corde de Melde	535
3.7 Autre exemple de C.A.L : corde lestée en son milieu ☉	537

4. PROPAGATION NON DISPERSIVE LE LONG D'UN CÂBLE COAXIAL

4.1 Le câble coaxial	539
4.2 Équations de couplage et équation d'onde	540
4.3 Impédance caractéristique du câble	540
4.4 Réflexion en bout de ligne, cas d'une charge résistive	541

5. PROPAGATION NON DISPERSIVE LE LONG D'UNE CHAÎNE D'OSCILLATEURS ☉

5.1 Équations de couplage	544
5.2 Approximation des milieux continus / équation de d'Alembert	545
5.3 Application : ondes sonores dans les solides	546

6. ANALOGIES ENTRE LES PHÉNOMÈNES VIBRATOIRES / ASPECT ÉNERGÉTIQUE

6.1 Corde vibrante ☉	548
6.2 Câble coaxial ☉	549
6.3 Chaîne d'oscillateurs ☉	550
6.4 Analogies entre phénomènes vibratoires non dispersifs	551
6.5 Non-linéarité des grandeurs énergétiques	551
6.6 Réflexion et transmission à la jonction entre deux cordes ☉	552
6.7 Coefficient de réflexion en puissance pour le câble coaxial avec une charge linéaire quelconque ☉	553

ONDES SONORES DANS LES FLUIDES

1. ÉQUATION DE PROPAGATION

1.1 Modèle étudié	555
1.2 Linéarisation	556
1.3 Équation de d'Alembert	557
1.4. Calcul de c	558

2. ASPECT ÉNERGÉTIQUE

2.1 Bilan d'énergie	559
2.2 Intensité acoustique	561

3. ONDES PLANES ACOUSTIQUES / TUYAUX SONORES

3.1 Équations de propagation	562
3.2 O.P.P / Impédance acoustique	564
3.3 Calcul numérique d'une perturbation acoustique pour une O.P.P.H dans l'air	565
3.4 Réflexion / Transmission en une discontinuité de structure	566
3.5 Une application : la couche anti-reflet ☉	568
3.6 Isolation phonique ☉	570
3.7 Réflexion totale en bout de tuyau / Ondes stationnaires	572
3.8 Modes propres	573
3.9 Résonances	574

4. ONDES SPHÉRIQUES ACOUSTIQUES / EFFET DOPPLER

4.1 Ondes sphériques	575
4.2 Modes propres d'une cavité sphérique ☉	577
4.3 Effet Doppler	578

5. ONDES DE GRAVITATION 1D DANS UN FLUIDE INCOMPRESSIBLE PEU PROFOND

☉ 5.1 Équations de couplage	585
5.2 Vitesse des ondes de gravitation en eau peu profonde et applications	587

ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE

1. O.P.P ÉLECTROMAGNÉTIQUES DANS LE VIDE

1.1 Équations de Maxwell dans le vide	589
1.2 Équation de d'Alembert	589
1.3 Structure des O.P.P dans le vide	590
1.4 Aspect énergétique	592

2. O.P.P.H / POLARISATION

2.1 Les différents états de polarisation	593
2.2 Modification de la polarisation	595
2.3 Notation complexe	598

3. LA LUMIÈRE, ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

3.1 Émission de la lumière	599
3.2 Réception par un capteur / Domaine de l'optique	603

4. REFLEXION NORMALE D'UNE O.P.P.H SUR UN CONDUCTEUR PARFAIT

4.1 Conditions aux limites imposées par la présence d'un conducteur parfait	604
4.2 Onde réfléchie / Onde résultante	606
4.3 Aspect énergétique / Bilan photonique et pression de radiation	607
4.4 Complément hors-programme : détermination des charges et courants surfaciques et calcul de la pression de radiation	609

5. RÉFLEXION OBLIQUE, CÂBLE COAXIAL, CAVITÉ PARALLÉLÉPIPÉDIQUE ☉

5.1 Interférences à deux ondes par réflexion sur un miroir ☉	610
5.2 Mode de propagation non dispersif dans un câble coaxial ☉	614
5.3 Cavité parallélépipédique, Four à micro-ondes ☉	618

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

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

1.1 Exemple de la corde vibrante amortie	621
1.2 Recherche de solutions d'O.P.P.H	622
1.3 Amortissement temporel ☉	625
1.4 Cas des O.P.P.H électromagnétiques	626
1.5 Vitesse de phase	627
1.6 Vitesse de groupe	629
1.7 Aspect énergétique	633
1.8 Atténuation	633

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

2.1 Notions sur les plasmas	635
2.2 Modèle étudié	637
2.3 Dispersion	639
2.4 Aspect énergétique	643
2.5 Onde en incidence normale sur l'interface entre le vide et un plasma ☉	644

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

3.1 Modèle microscopique	646
3.2 Dispersion	648
3.3 Aspect énergétique	650
3.4 Conducteur parfait	650
3.5 Réflexion normale sur un conducteur réel / Pression de radiation ☉	651

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

4.1 Chaîne d'oscillateurs mécaniques ☉	654
4.2 Câble coaxial avec pertes ☉	656
4.3 Pavillon acoustique exponentiel ☉	659

SEPTIÈME PARTIE : CONVERSION DE PUISSANCE

PUISSANCE ÉLECTRIQUE

1. PUISSANCE EN RÉGIME SINUSOÏDAL FORCÉ

1.1 Intérêt de la puissance électrique	665
1.2 Puissance reçue par un dipôle linéaire / Facteur de puissance	666
1.3 Adaptation d'impédance	667
1.4 Diagramme de Fresnel	668
1.5 Relèvement du $\cos\varphi$ ☉	671

2. PUISSANCE D'UN SIGNAL T -PÉRIODIQUE

2.1 Valeur efficace	673
2.2 Puissance en décibel	674
2.3 Relation de Parseval	674

CONVERSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE STATIQUE : MILIEUX FERROMAGNÉTIQUES ET TRANSFORMATEUR

1. FERROMAGNÉTISME

1.1 Magnétisme	675
1.2 Milieu L.H.I et classification	676
1.3 Diamagnétisme, paramagnétisme	676
1.4 Ferromagnétisme	678

2. TRANSFORMATEUR PARFAIT ET APPLICATIONS

2.1 Les équations du transformateur parfait	684
2.2 Transfert d'impédance au primaire ☉	687
2.3 Transport d'énergie électrique ☉	688
2.4 Transformateur d'isolement	692

3. RÉLUCTANCE / DOMAINE DE LINÉARITÉ ☉

3.1 Circuit magnétique / réluctance ☉	694
3.2 Transformateur chargé vu comme un système bouclé ☉	696

4. TRANSFORMATEUR RÉEL / PERTES

4.1 Pertes fer	697
4.2 Tracé expérimental du cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique	699
4.3 Modélisation linéaire d'un transformateur réel	701
4.4 Méthode d'étude expérimentale d'un transformateur	704

CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE

1. CONTACTEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE EN TRANSLATION

1.1 Énergie magnétique	707
1.2 Force intérieure	708

2. MACHINE SYNCHRONE

2.1 Champ statorique	710
2.2 Champ rotorique	713
2.3 Énergie magnétique	713
2.4 Couple s'exerçant sur le rotor	715
2.5 Bilan énergétique	717
2.6 Complément : machine synchrone à p paires de pôles (complément hors programme)	720

3. MACHINE À COURANT CONTINU (M.C.C.)

3.1 Champs statorique et rotorique	721
3.2 Couple électromagnétique exercé sur le rotor	724
3.3 Bilan énergétique / f.e.m induite dans le rotor	725
3.4 Réversibilité	725
3.5 Moteur	726
3.6 Génératrice	726

4. COMPLÉMENT HORS-PROGRAMME : MACHINE ASYNCHRONE ☉

4.1 Principe	727
4.2 Énergie magnétique et inductances mutuelles	728
4.3 Couple s'exerçant sur le rotor	728
4.4 Courants induits dans les phases du rotor	728
4.5 Étude du couple s'exerçant sur le rotor	729
4.6 Comparaison des machines électriques	731

CONVERSION ÉLECTRONIQUE

1. PRINCIPE DE LA CONVERSION

1.1 Convertisseurs	733
1.2 Exemple d'une charge résistive	735
1.3 Éléments de commutation	737
1.4 Sources	738
1.5 Règles de connexion	740

1.6 Convertisseur direct entre deux sources de natures différentes	741
1.7 Convertisseur indirect entre deux sources de même nature	743

2. HACHEUR TENSION / COURANT

2.1 Structure étudiée	743
2.2 Formes d'ondes en régime établi	744
2.3 Nature des interrupteurs	746
2.4 Commande du moteur	746
2.5 Récupération d'énergie lors du freinage	748

3. REDRESSEUR / ONDULEUR

3.1 Structure à 4 interrupteurs	750
3.2 Redresseur	751
3.3 Hacheur 4 quadrants / Commande d'une M.C.C	752
3.4 Onduleur	756

4. EXEMPLES D'APPLICATIONS

4.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)	762
4.2 Gradateur	764

□ HUITIÈME PARTIE :

TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE : ASPECTS THERMODYNAMIQUES ET CINÉTIQUES

PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉ AUX TRANSFORMATIONS PHYSICO- CHIMIQUES

1. SYSTÈME EN RÉACTION CHIMIQUE

1.1 Avancement de réaction	769
1.2 Grandeurs de réaction	771
1.3 État réel d'un système	772
1.4 État standard d'un système	774
1.5 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r Y^0$ à la température des tables T_0	775
1.6 Systèmes parfaits	777
1.7. Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r Y^0$ à une température quelconque T	778
1.8 Énergies, ordres de grandeur	779

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	780
2.2 Chaleur de réaction à $V = Cte$ et $T_{\text{ext}} = Cte$, température d'explosion adiabatique (complément hors programme)	785

SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉ AUX TRANSFORMATIONS PHYSICO- CHIMIQUES

1. POTENTIELS THERMODYNAMIQUES

1.1 Fonctions F et G	789
1.2 Sens d'évolution d'un système à p et T constantes	791
1.3 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r S^0$ et $\Delta_r G^0$ à la température des tables T_0	792
1.4 Calcul des grandeurs standard de réaction $\Delta_r S^0$ et $\Delta_r G^0$ à toutes températures	793

2. POTENTIEL CHIMIQUE

2.1 Définition	795
2.2 Variation du potentiel chimique avec la pression	795
2.3 Potentiel chimique d'un gaz parfait pur, puis d'un constituant d'un mélange parfait de gaz parfaits	795
2.4 Potentiel chimique d'un corps pur condensé, puis d'un constituant d'un mélange parfait sous une phase condensée	796
2.5 Potentiel chimique d'un solvant et d'un soluté dans une solution parfaite	797
2.6 Activité chimique d'un constituant	797
2.7 Potentiel chimique d'un constituant d'un mélange réel (complément hors-programme)	798

3. ÉQUILIBRE CHIMIQUE

3.1 Condition d'équilibre à pression et température fixées	799
3.2 Loi de Guldberg et Waage	799

4. DÉPLACEMENT D'ÉQUILIBRE

4.1 Évolution d'un système hors équilibre à p et T fixées	801
4.2 Problème de la rupture d'équilibre	802
4.3 Variance	803
4.4 Problème du déplacement d'équilibre	807
4.5 Influence de la température	808
4.6 Influence de la pression	809
4.7 Influence de l'introduction d'un composé à p et T fixées	810
4.8 Optimisation d'un rendement	812

5. EXEMPLES D'APPLICATIONS

5.1 Synthèse de l'ammoniac	813
5.2 Réduction du dioxyde de germanium	815

TRANSITIONS DE PHASE DU CORPS PUR

1. DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE (p, T) DU CORPS PUR

1.1 Système diphasé	817
1.2 Système triphasé	818
1.3 Grandeurs molaires et massiques de transition de phase	820
1.4 Formule de Clapeyron	821

2. ÉTUDE DE L'ÉQUILIBRE LIQUIDE- VAPEUR

2.1 Intérêt	823
2.2 Isothermes d'Andrews	823
2.3 Diagramme enthalpique $p = f(h)$	826

PROCÉDÉS INDUSTRIELS CONTINUS

1. PROTOCOLE DE LABORATOIRE ET PROCÉDÉ INDUSTRIEL

1.1 Protocole de laboratoire discontinu : le réacteur fermé	827
1.2 Protocole industriel continu : le réacteur ouvert	827
1.3 Facteurs cinétiques et thermodynamiques	828

2. BILAN DE QUANTITÉ DE MATIÈRE ET VITESSE DE RÉACTION POUR UN R.P.A

2.1 Bilan de quantité de matière	829
2.2 Lien entre consommation, production et vitesse de réaction	830
2.3 Temps de passage	833
2.4 Exemple d'étude d'une cinétique dans un R.P.A	834

3. BILAN DE QUANTITÉ DE MATIÈRE ET VITESSE DE RÉACTION POUR UN RÉACTEUR PISTON (R.P)

3.1 Bilan de quantité de matière	835
3.2 Lien entre consommation, production et vitesse de réaction locales	836
3.3 Temps de passage	837
3.4 Comparaison entre R.P.A et R.P : marche isotherme	838

3.5 Exemple d'application pour une réaction d'ordre global 2 ⊗	839
--	-----

4. BILAN ÉNERGÉTIQUE DANS UN R.P.A

4.1 Premier principe « industriel » : bilan énergétique	842
4.2 Marche adiabatique	845
4.3 Influence de la température de sortie sur le taux de conversion, courbes iso- τ	845
4.4 Point de fonctionnement d'un R.P.A calorifugé	848
4.5 Progression optimale de température (P.O.T)	851

NEUVIÈME PARTIE : ASPECTS THERMODYNAMIQUES ET CINÉTIQUES DE L'ÉLECTROCHIMIE

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

1. COUPLES OX / RED, NOMBRE D'OXYDATION

1.1 Définition	855
1.2 Nombre d'oxydation	855

2. SYSTÈME ÉLECTROCHIMIQUE / LOI DE NERNST

2.1 Électrode	857
2.2 Système étudié / Travail électrique	858
2.3 Potentiel d'électrode	860
2.4 Loi de Nernst	861
2.5 Cas où le solvant intervient, définition du potentiel standard	862
2.6 Mesure du potentiel d'électrode E , électrodes de référence	863
2.7 Classification des couples ox / red	864
2.8 Constantes d'équilibre des réactions ox / red	865

3. DOMAINES DE PRÉDOMINANCE / EXISTENCE, DIAGRAMME $E - pH$

3.1 Conventions pour les frontières	866
3.2 Diagramme $E-pH$ de l'eau	868
3.3 Diagramme $E-pH$ du fer ⊗	869
3.4 Diagramme $E-pH$ du chlore ⊗	872

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	877
1.2 Facteurs cinétiques	878
1.3 Tracé des courbes $i(V)$: montage à trois électrodes	879
1.4 Systèmes rapides et lents / Surtensions	880
1.5 Cas des couples de l'eau	881
1.6 Paliers de diffusion	882

2. ÉLECTROLYSE

2.1 Condition de l'électrolyse	885
2.2 Application : élaboration électrochimique du zinc ⊗	887

3. PILE

3.1 Tension de fonctionnement	890
3.2 Application : accumulateurs au plomb ⊗	892

4. APPLICATIONS DES COURBES $i(V)$ ⊗

4.1 Cémentation ⊗	895
4.2 Attaque acide des métaux ⊗	896

5. CORROSION HUMIDE DES MÉTAUX

5.1 Corrosion / Passivation	897
5.2 Corrosion humide	899
5.3 Corrosion différentielle	901
5.4 Oxygénation différentielle	902
5.5 Protection du fer contre la corrosion	903

ANNEXES

Classification périodique des éléments	905
Formulaire : les opérateurs différentiels	906
Les constantes physiques	908

INDEX	909
-------	-----

TABLE DES MATIÈRES	915
--------------------	-----