

Table des matières

1	Stabilité et Réactivité Nucléaire	7
1.1	Energie, énergie thermonucléaire	7
1.2	Energies de liaison et de réaction	9
1.3	Sections efficaces, taux de réactions	11
2	Fusion et Combustion	17
2.1	Formule de Larmor	17
2.2	Pertes radiatives	19
2.3	Critère de Lawson	23
3	Confinement Thermonucléaire	27
3.1	Principes et caractéristiques	27
3.2	Phénoménologie des tokamaks	31
3.3	Le Projet international ITER	35
4	Cohérence et Dissipation	39
4.1	Diamagnétisme	41
4.1.1	Interaction magnétique	41
4.1.2	Moment magnétique	42
4.1.3	Pression magnétique	44
4.2	Longueurs, Vitesses et Temps Collectifs	46
4.2.1	Fréquences propres	46
4.2.2	Longueurs d'écrantage	50
4.2.3	Vitesses collectives	53
4.3	Collisions et Diffusion Landau	59
4.3.1	Equations de Fokker-Planck	60
4.3.2	Diffusion et marche aléatoire	63
4.3.3	Diffusions Rutherford et Landau	66
4.4	Relaxation et Transport	71
4.4.1	Ions rapides	71
4.4.2	Electrons Runaway	75
4.4.3	Coefficients de Braginsky et Spitzer	77
5	Adiabaticité et Chaos	89
5.1	Centre Guide et Adiabaticité	90
5.1.1	Lagrangien adiabatique	90
5.1.2	Actions et angles dans les tokamaks	92
5.1.3	Actions et angles cyclotroniques	96

5.1.4	Relations d'Einstein et Liouville	97
5.2	Résonances dans les Tokamaks	101
5.2.1	Perturbations résonnantes	101
5.2.2	Largeur des résonances	104
5.2.3	Hamiltonien adiabatique	106
5.2.4	Hamiltonien gyro-cinétique	108
5.3	Théories Linéaire et Quasi-linéaire	111
5.3.1	Tenseur diélectrique gyro-cinétique	111
5.3.2	Chaos et critère de Chirikov	115
5.3.3	Opérateur quasi-linéaire	117
6	Confinement Orbital	121
6.1	Invariance Adiabatique et Dérives	122
6.1.1	Invariance du moment magnétique	122
6.1.2	Force diamagnétique	123
6.1.3	Dérives électriques et magnétiques	125
6.2	Orbites Circulantes et Piégées	130
6.2.1	Champs toroïdal et poloïdal	130
6.2.2	Orbites circulantes	133
6.2.3	Orbites piégées	135
6.2.4	Précession toroïdale	139
6.3	Confinement des Particules Alpha	142
6.3.1	Invariants et orbites	142
6.3.2	Orbites non-standards	145
7	Equilibres Magnétohydrodynamiques	149
7.1	Courants Diamagnétiques et Résistifs	149
7.1.1	Courants diamagnétiques	151
7.1.2	Courants de Pfirsch-Schlüter	153
7.1.3	Courants Ohmiques	154
7.1.4	Nombres de Reynolds et Lundquist	155
7.1.5	Equilibre magnétohydrodynamique	157
7.2	Lignes, Surfaces et Flux	160
7.2.1	Lignes et surfaces magnétiques	160
7.2.2	Flux poloïdaux et toroïdaux	163
7.2.3	Hamiltonien magnétique	165
7.3	Equation de Grad-Shafranov	168
7.3.1	Equation de Grad-Shafranov	168
7.3.2	Solution de Solovév	170
7.3.3	Développement de Shafranov	172
8	Ondes, Dispersion et Absorption	177
8.1	Dispersion Fluide et Cinétique	180
8.1.1	Dispersion adiabatique fluide	181
8.1.2	Résonances et coupures	185
8.1.3	Modes cinétiques de Bernstein	190
8.1.4	Force pondéromotrice	194
8.2	Dissipation Quasi-linéaire	195
8.2.1	Absorptions Landau et cyclotron	195
8.2.2	Puissances active et réactive	203

8.2.3	Générations de courant et de rotation	205
9	Instabilités, Dérives, Echange et Torsion	213
9.1	Energie Libre et Stabilité	213
9.1.1	Relaxation thermodynamique	213
9.1.2	Couplages réactif et dissipatif	217
9.2	Instabilités de Dérives	222
9.2.1	Modes de dérives	222
9.2.2	Couplages cinétiques	228
9.2.3	Modes de gradient de température	233
9.3	Instabilités d'Interchange	235
9.3.1	Modes d'interchange	235
9.3.2	Couplages alfvéniques	238
9.3.3	Ballonnement	239
9.4	Instabilités de Torsion	241
9.4.1	Torsion hélicoïdale	241
9.4.2	Mode de torsion	242
9.4.3	Modes de torsion externes	245
10	Collisions et Relaxations	249
10.1	Equation de Landau	250
10.1.1	Forme de Landau	250
10.1.2	Forme de Boltzmann, moments fluides	253
10.2	Relaxations Cinétiques Internes	254
10.2.1	Friction et transfert d'impulsion	255
10.2.2	Thermalisation et transfert d'énergie	256
10.3	Fonctions de Green Suprathermiques	258
10.3.1	Fonction de Green des alphas	260
10.3.2	Fonction de Green des électrons	262
11	Transports Néo-classique et Turbulent	267
11.1	Production d'Entropie	267
11.1.1	Transports de matière et chaleur	267
11.1.2	Flux et forces thermodynamiques	270
11.1.3	Opérateur de Vlasov-Landau et réduction fluide	279
11.1.4	Principes variationnels	284
11.1.5	Modèle de Lorentz-Landau	287
11.2	Effets Néo-classiques	292
11.2.1	Equation cinétique de dérive	292
11.2.2	Polarisation néo-classique	296
11.2.3	Relation de Green-Kubo	297
11.2.4	Régimes Pfirsch-Schlüter et plateau	301
11.2.5	Régime de Galeev-Sagdeev	303
11.2.6	Courant de bootstrap, pinch de Ware	306
11.3	Turbulences Electrique et Magnétique	310
11.3.1	Régime de centre guide	313
11.3.2	Régime gyro-cinétique	314
11.3.3	Régime non-linéaire de Böhm	315
11.3.4	Turbulence magnétique	317

12 Chauffages et Génération de Courant	321
12.1 Propagation, Absorption et Conversion	323
12.1.1 Ordering eikonal	323
12.1.2 Hamiltonien optique	327
12.1.3 Intensité spécifique	329
12.1.4 Absorption résonnante	331
12.1.5 Conversion de modes	333
12.2 Résonances Ioniques et Electroniques	335
12.2.1 Résonances ioniques	336
12.2.2 Résonances électroniques	343
12.2.3 Résonance hybride	348
12.3 Génération Non-Inductive de Courant	355
12.3.1 Effets capacitif, inductif et thermoélectrique	356
12.3.2 Efficacité de Fisch	357
12.3.3 Réponse non-locale	361
13 Injection et Extraction des Particules	365
13.1 Injection et Diffusion des Neutres	367
13.1.1 Echange de charge et ionisation	367
13.1.2 Injection de neutres	370
13.1.3 Diffusion des neutres	374
13.2 Extraction des Particules	375
13.2.1 Scrape-off layer	375
13.2.2 Gaines et Divertor	381
13.2.3 Régime de Knudsen	387
13.2.4 Extraction des neutres	389
14 Transports des Champs et des Neutrons	397
14.1 Lignes, Guides, Antennes	397
14.1.1 Antennes capacitives et inductives	398
14.1.2 Lignes de transmission ICRH	400
14.1.3 Guides d'ondes LH et ECRH	404
14.2 Thermalisation et Diffusion des Neutrons	408
14.2.1 Régénération et multiplication	408
14.2.2 Ralentissement	410
14.2.3 Diffusion	415
Bibliographie	419