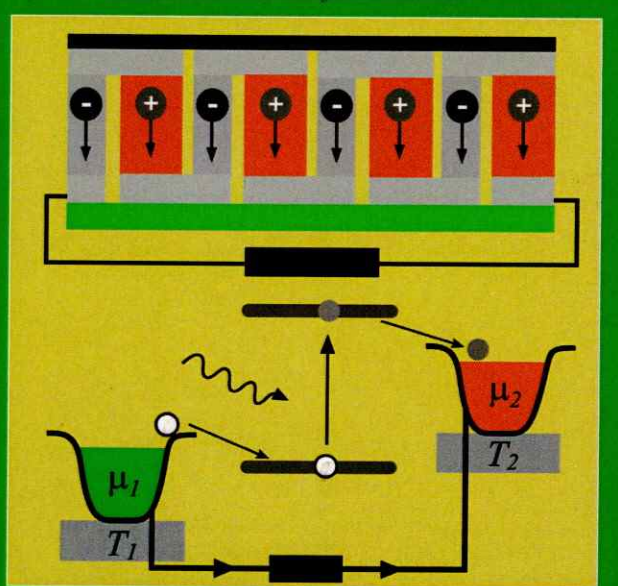


PHYSIQUE DE LA CONVERSION D'ÉNERGIE



JEAN-MARCEL RAX

Table des matières

1	Conversion et dissipation	5
1.1	Conservation et conversion	5
1.1.1	Structure de la matière	5
1.1.2	Hierarchie des énergies	10
1.1.3	Exemples éolien et hydraulique	13
1.1.4	Conversion directe	16
1.2	Collisions, fluctuations et transport	23
1.2.1	Flux moléculaires	24
1.2.2	Section efficace	26
1.2.3	Flux collisionnels	34
1.2.4	Équation de Fokker-Planck phénoménologique	40
1.2.5	Introduction au transport	43
2	Énergie et entropie	55
2.1	Conservation et évolution	55
2.1.1	Représentations énergétique et entropique	55
2.1.2	Principes de conservation et d'évolution	61
2.2	Facteurs de Boltzmann et Gibbs	69
2.2.1	Équilibres canoniques	70
2.2.2	Électrons et photons	76
2.2.3	Potentiels chimiques des gaz idéaux	80
3	Évolutions markoviennes	85
3.1	Processus markoviens	85
3.1.1	Échelles structurelles et dynamiques	85
3.1.2	Systèmes markoviens canoniques	88
3.2	Conversion d'énergie et transitions	93
3.2.1	Échange et production d'entropie	93
3.2.2	Machine markovienne ditherme	94
3.3	Équations cinétiques	97
3.3.1	Équation de Boltzmann	97
3.3.2	Équations de Fokker-Planck canoniques	99
3.3.3	Introduction à la réactivité	103

4 Flux dissipatifs	111
4.1 Flux et forces thermodynamiques	111
4.1.1 Flux d'extensités et gradients d'intensités	111
4.1.2 Échange et production d'entropie	115
4.1.3 Coefficients cinétiques linéaires	118
4.2 Conversion d'énergie et transport linéaire	124
4.2.1 Conversion et transport actif	124
4.2.2 Machine linéaire ditherme	127
5 Machines thermiques et chimiques	131
5.1 Machines de Carnot	132
5.1.1 Cycle de Carnot	132
5.1.2 Rendement de Carnot	133
5.2 Machines de Van't Hoff	137
5.2.1 Cycle de Van't Hoff	137
5.2.2 Rendement de Van't Hoff	138
5.3 Machines endoreversibles	140
5.3.1 Machines thermiques endoreversibles	142
5.3.2 Cycle exoreversible à régénération	145
5.3.3 Machines chimiques endoreversibles	148
5.4 Cycles chimique et thermique équivalents	149
6 Conversion magnétohydrodynamique	155
6.1 Conversion électrohydrodynamique	155
6.1.1 Modèle de Townsend des décharges	156
6.1.2 Générateurs électrohydrodynamiques	161
6.1.3 Efficacité de conversion EHD	163
6.2 Modèle d'Alfven-Saha des plasmas	167
6.2.1 Hautes températures	167
6.2.2 Loi de Saha	170
6.2.3 Diffusion magnétique	172
6.3 Couplage magnétohydrodynamique	174
6.3.1 Dérive d'entraînement	174
6.3.2 Magnétohydrodynamique	178
6.3.3 Loi d'Ohm	179
6.4 Convertisseurs Hall et Faraday	182
6.4.1 Courants Hall et Faraday	182
6.4.2 Extraction MHD d'enthalpie	186
7 Conversion thermoionique	191
7.1 Modèles de Lorentz-Sommerfeld des métaux	193
7.1.1 Surfaces des métaux	193
7.1.2 Potentiels de Galvani et Volta	198
7.2 Relation de Richardson-Dushman	205
7.2.1 Modèle d'équilibre	205
7.2.2 Modèle cinétique	207

7.2.3 Doubles couches	208
7.2.4 Caractéristiques thermoioniques	212
7.3 Diodes de Langmuir et Schottky	218
7.3.1 Régime de Langmuir	218
7.3.2 Régime de Schottky	226
8 Conversion thermoélectrique	235
8.1 Modèle classique des semiconducteurs	236
8.1.1 Semiconducteurs intrinsèques	236
8.1.2 Semiconducteurs dopés	241
8.2 Effets thermoélectriques	244
8.2.1 Effets Peltier et Seebeck	244
8.2.2 Modèle cinétique	247
8.2.3 Effet Thomson	252
8.3 Machines thermoélectriques	254
8.3.1 Générateur Seebeck	255
8.3.2 Réfrigérateur Peltier	260
8.3.3 Matériaux thermoélectriques	262
9 Conversion photovoltaïque	267
9.1 Modèle de Planck du rayonnement thermique	269
9.1.1 Luminance du corps noir	269
9.1.2 Conservation de l'étendue optique	272
9.1.3 Entropie et concentration du rayonnement	275
9.2 Conversion photovoltaïque	279
9.2.1 Efficacité de Landsberg	279
9.2.2 Cellule à deux niveaux	281
9.2.3 Cellule à gap	284
9.3 Jonction P-N photovoltaïque	288
9.3.1 Jonction P-N à l'équilibre	288
9.3.2 Jonction P-N illuminée	292
9.3.3 Relation de Shockley	295
10 Conversion électrochimique	303
10.1 Modèle de Nernst de l'équilibre redox	305
10.1.1 Équilibre de Nernst	305
10.1.2 Interface métal-solution	309
10.1.3 Machines électrochimiques	312
10.2 Surtensions et polarisations	314
10.2.1 Surtension d'activation	316
10.2.2 Concentration et conduction	320
10.3 Piles à hydrogène	324
10.3.1 Oxydation de l'hydrogène	325
10.3.2 Surtensions, convection et diffusion	327
10.3.3 Conversion et stockage de l'énergie	333

PHYSIQUE DE LA CONVERSION D'ÉNERGIE

JEAN-MARCEL RAX

Les gradients des variables thermodynamiques intensives, potentiels mécanique et électrique, pression, température et potentiel chimique, constituent des écarts à l'équilibre thermodynamique permettant d'extraire du travail de notre environnement. Les processus de conversion d'énergie utilisant ces sources d'énergies libres sont accompagnés d'une production d'entropie qui dégrade l'efficacité de conversion.

Cet ouvrage de *Physique de la conversion d'énergie* est issu de plusieurs cours enseignés en France et à l'étranger, principalement en M1 et M2 à la Faculté des sciences d'Orsay et à l'École Polytechnique. Il est articulé autour de deux axes principaux :

- l'étude des concepts et méthodes de la physique des *processus irréversibles*, orientée vers l'identification et l'analyse des mécanismes de production d'entropie ;
- la description et l'analyse physique des principes et limitations des *générateurs magnétohydrodynamiques, thermoélectriques, thermoioniques, photovoltaïques et électrochimiques*.

Ce livre vise à offrir aux étudiants de nos facultés, aux élèves de nos écoles et aux chercheurs de nos instituts, une monographie permettant d'aborder les questions de l'efficacité et du rendement des systèmes de conversion d'énergie dans la continuité des cursus de *physique appliquée*, de *physique fondamentale*, ou d'*ingénierie généraliste*, aux niveaux M1-M2-D.

Jean-Marcel Rax est professeur à l'École Polytechnique et professeur à l'Université de Paris-XI, il a travaillé au JET à Oxford et au PPPL à Princeton où ses travaux originaux sur l'extraction d'énergie libre dans les réacteurs thermonucléaires lui ont valu plusieurs prix et distinctions : il est Fellow de l'APS, a reçu la Médaille d'argent du CNRS, le Prix Plasma de la SFP et le Prix de la Recherche pour l'Énergie.

Série Physique et collection dirigée par Michèle LEDUC

SAVOIRS ACTUELS

CNRS ÉDITIONS
www.cnrseditions.fr

edpsciences
www.edpsciences.org

Création graphique : Béatrice Couzédal



9 782759 807925

45 €

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0792-5
ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-08670-9

Ces ouvrages, écrits par des chercheurs, reflètent des enseignements dispensés dans le cadre de la formation à la recherche. Ils s'adressent donc aux étudiants avancés, aux chercheurs désireux de perfectionner leurs connaissances ainsi qu'à tout lecteur passionné par la science contemporaine.