

2-621-2



2-621-278-1/1

MICHEL GIRARD

Institut Universitaire de Technologie, Cachan
Département Automatismes et Electronique de Puissance

COMPOSANTS ACTIFS DISCRETS



1

McGRAW-HILL

Paris — Auckland — Bogota — Caracas — Hambourg — Jakarta
— Lisbonne — Londres — Madrid — Mexico — Milan — Montréal
— New Delhi — New York — Panama — San Juan — São Paulo
— Singapour — Sydney — Tokyo — Toronto.

1990

Table des matières

Chapitre 1. Généralités	1
1.1. Présentation	1
1.2. Méthodes d'étude	1
1.2.1. Éléments de base de l'électricité, caractéristiques statiques associées	1
1.2.1.1. Résistances – Loi d'Ohm	2
1.2.1.2. Fem génératrices d'énergie	3
1.2.1.3. Fem réceptrices d'énergie	4
1.2.1.4. Sources de courant « génératrices » d'énergie	5
1.2.1.5. Sources de courant « réceptrices » d'énergie	7
1.2.1.6. Exercices	8
1.2.2. Lois générales de l'électricité	10
1.2.2.1. Théorèmes de Kirchoff, superposition et Thévenin	10
1.2.2.2. Théorèmes de Norton et Millman	13
1.2.2.3. Théorèmes de Kennely et Miller	14
1.2.2.4. Exercices	16
1.2.3. Schéma-blocs	18
1.2.3.1. Définitions	18
1.2.3.2. Exercice	20
1.2.4. Quadripôles en régime variable	22
1.2.4.1. Équations « tensions » – paramètres impédance z	22
1.2.4.2. Équations « courant » – paramètres admittance y	23
1.2.4.3. Équations « tension-courant » – paramètres hybrides h	23
1.2.4.4. Équations « courant-tension » – paramètres hybrides h'	24
1.2.4.5. Remarques – paramètres s	24
1.2.5. Réponses en fréquence	28
1.2.5.1. Représentations classiques	28
1.2.5.2. Abaque de Smith	29
1.2.5.3. Exercices	34
1.2.6. Simulation sur ordinateur	36
1.2.6.1. Simulation de composants et de circuits analogiques ...	36
1.2.6.2. Mécanisme de l'élaboration des éléments de simulation	37

1.3. Semiconducteurs	37
1.3.1. Atomes et structures cristallines	37
1.3.1.1. Atomes	37
1.3.1.2. Structures cristallines	39
1.3.2. Conduction dans les solides (corps conducteurs)	42
1.3.2.1. Phénomène qualitatif	42
1.3.2.2. Phénomène quantitatif	43
1.3.2.3. Cas des semiconducteurs purs ou intrinsèques	45
1.3.2.4. Remarques générales	49
1.3.2.5. Exercices	50
1.3.3. Semiconducteurs dopés	52
1.3.3.1. Matériau de type <i>N</i>	52
1.3.3.2. Matériau de type <i>P</i>	53
1.3.3.3. Concentration des charges libres	55
1.3.3.4. Niveau de Fermi et diagrammes d'énergie	56
1.3.3.5. Conduction dans un matériau semiconducteur dopé ...	58
1.3.3.6. Remarques générales	62
1.3.3.7. Exercices	63
1.4. Jonction <i>PN</i>	66
1.4.1. Présentation	66
1.4.2. Étude qualitative de la jonction <i>PN</i>	66
1.4.2.1. Jonction non polarisée	66
1.4.2.2. Courant de diffusion et courant de saturation	68
1.4.2.3. Jonction polarisée en direct	70
1.4.2.4. Jonction polarisée en inverse	71
1.4.3. Étude quantitative de la jonction <i>PN</i>	72
1.4.3.1. Jonction abrupte non polarisée	72
1.4.3.2. Jonction abrupte polarisée en direct	76
1.4.3.3. Jonction abrupte polarisée en inverse	78
1.4.4. Jonction <i>PN</i> en régime dynamique	80
1.4.4.1. Régime en petits signaux	80
1.4.4.2. Régime de commutation	83
1.4.4.3. Bruit généré dans la jonction <i>PN</i>	86
1.4.5. Exercices	87
Chapitre 2. Diodes et dispositifs semiconducteurs bipolaires	95
2.1. Diodes à jonction – Présentation générale	95
2.1.1. Technologie de fabrication	95
2.1.1.1. Technologie Méssa	96
2.1.1.2. Technologie Planar	96
2.1.1.3. Technologie intégrée	97
2.1.2. Caractéristique d'une diode	97
2.1.3. Les différents modèles de diodes	100

2.1.4.	Contraintes technologiques des diodes	101
2.1.4.1.	Repérage code PRO.ELECTRON	101
2.1.4.2.	Contraintes mécaniques et thermiques	102
2.2.	Diodes à jonction d'utilisation courante	104
2.2.1.	Présentation des diodes et de leurs caractéristiques	104
2.2.1.1.	Diodes de redressement basse et moyenne tension	104
2.2.1.2.	Diodes de redressement à avalanche contrôlée	109
2.2.1.3.	Diodes haute tension	113
2.2.1.4.	Diodes rapides de puissance	115
2.2.1.5.	Diodes Schotky de puissance	119
2.2.1.6.	Diodes rapides de signal	120
2.2.2.	Méthodes d'étude des montages à diodes	123
2.2.2.1.	Méthode par modélisation	123
2.2.2.2.	Méthode graphique	129
2.2.2.3.	Méthode mathématique	131
2.2.3.	Exemples d'application des diodes d'utilisation courante	131
2.2.3.1.	Redressement sur charge résistive	131
2.2.3.2.	Redressement sur charge capacitive	138
2.2.3.3.	Redressement sur charge inductive	140
2.2.3.4.	Doubleurs de tension	141
2.2.3.5.	Commutation et roue libre	144
2.2.3.6.	Remarques générales concernant le redressement	145
2.2.4.	Exemples d'application des diodes de signal	146
2.2.4.1.	Détection de crête	146
2.2.4.2.	Montage clamping	147
2.2.4.3.	Protection d'entrée de circuits analogiques	147
2.2.4.4.	Protection des circuits intégrés numériques	149
2.2.4.5.	Utilisation de la tension de seuil - translation de potentiel	150
2.2.4.6.	Commutateur à diodes	151
2.2.4.7.	Modulateur en anneau	152
2.2.4.8.	Démodulateur en anneau	152
2.2.4.9.	Générateur de fonction	153
2.2.4.10.	Détection d'une onde sinusoïdale modulée en amplitude	155
2.2.4.11.	Circuits logiques à diodes	156
2.2.5.	Exercices	157
2.3.	Diodes utilisées en avalanche inverse	168
2.3.1.	Présentation des diodes et caractéristiques	168
2.3.1.1.	Stabistors	168
2.3.1.2.	Diodes stabilisatrices de tension ou diodes Zener	169
2.3.1.3.	Diodes de référence de tension	174
2.3.1.4.	Diodes de protection	175

2.3.2.	Méthodes d'étude des diodes utilisées en avalanche	176
2.3.2.1.	Méthode par modélisation	176
2.3.2.2.	Méthode graphique	178
2.3.2.3.	Remarques	178
2.3.3.	Domaines d'application des diodes travaillant en avalanche	178
2.3.3.1.	Stabilisation de tension idéalisée	178
2.3.3.2.	Stabilisation de tension réelle	181
2.3.3.3.	Protection contre les surtensions	183
2.3.3.4.	Translation de tension	184
2.3.3.5.	Association des diodes Zener	185
2.3.4.	Exercices	186
2.4.	Diodes de l'électronique rapide (hyperfréquences)	196
2.4.1.	Diode tunnel et diode backward	197
2.4.1.1.	Présentation de la diode tunnel	197
2.4.1.2.	Exemple de caractéristiques	199
2.4.1.3.	Quelques applications	199
2.4.1.4.	Diode backward	201
2.4.2.	Diode Schotky	202
2.4.2.1.	Jonction métal-semiconducteur, barrière de Schotky ..	202
2.4.2.2.	Cas où $W_m > W_s$	203
2.4.2.3.	Cas où $W_m < W_s$	208
2.4.2.4.	Technologie et caractéristiques	210
2.4.2.5.	Domaines d'application de la diode Schotky	213
2.4.3.	Diodes à capacité variable	217
2.4.3.1.	Principe et technologie	217
2.4.3.2.	Exemples de caractéristiques	219
2.4.3.3.	Domaines d'application des diodes à capacité variable .	220
2.4.4.	Diodes PIN	222
2.4.4.1.	Principe, technologie et caractéristiques	222
2.4.4.2.	Principales applications	224
2.4.5.	Diodes Gunn	226
2.4.5.1.	Principes de l'effet Gunn	226
2.4.5.2.	Technologie et caractéristiques	228
2.4.5.3.	Utilisation de la diode Gunn	229
2.4.6.	Autres diodes hyperfréquences	229
2.4.6.1.	Diodes IMPATT	230
2.4.6.2.	Autres diodes à avalanche et temps de transit	231
2.4.6.3.	Diodes snap-off	231
2.4.7.	Exercices	232
2.5.	Composants dipolaires de l'optoélectronique	236
2.5.1.	Diodes électroluminescentes	236
2.5.1.1.	Éléments théoriques	236
2.5.1.2.	Technologie des diodes électroluminescentes	237

2.5.1.3.	Caractéristiques des diodes électroluminescentes	240
2.5.1.4.	Application des DEL	242
2.5.2.	Diodes laser	245
2.5.2.1.	Principe simplifié	245
2.5.2.2.	Technologie des diodes laser	245
2.5.2.3.	Caractéristiques et application des diodes laser	246
2.5.3.	Photodiodes	248
2.5.3.1.	Principe de la photodiode	248
2.5.3.2.	Technologie des photodiodes	251
2.5.3.3.	Caractéristiques et application des photodiodes	252
2.5.4.	Photopiles, cellules photovoltaïques	253
2.5.4.1.	Caractéristiques courant-tension	253
2.5.4.2.	Cellules solaires	255
2.5.4.3.	Diodes détectrices de particules	257
2.5.5.	Cellules photoconductrices (ou photorésistances)	257
2.5.6.	Exercices	259
2.6.	Autres dispositifs dipolaires	264
2.6.1.	Thermistances	264
2.6.1.1.	Thermistances CTN	264
2.6.1.2.	Thermistances CTP	268
2.6.2.	Varistances	270
2.6.3.	Sondes à effet Hall, magnétorésistances	272
2.6.4.	Exercices	275
Chapitre 3. Transistors bipolaires		277
3.1.	Présentation et principe de fonctionnement	277
3.1.1.	Idée directrice	277
3.1.2.	Étude qualitative du transistor <i>NPN</i> en fonctionnement normal .	279
3.1.2.1.	Évolution du transistor	279
3.1.2.2.	Conditions de bon fonctionnement d'un transistor	279
3.1.2.3.	Diagrammes d'énergie	280
3.1.2.4.	Déplacement des porteurs de charge	282
3.1.3.	Étude quantitative du transistor <i>NPN</i> en fonctionnement normal	283
3.1.3.1.	Bilan des courants	283
3.1.3.2.	Relation entre les courants pour V_{CE} constant	284
3.1.3.3.	Relation entre les courants pour V_{CE} variable	285
3.1.3.4.	Détermination approchée de la valeur des courants	286
3.1.4.	Exercice	288
3.2.	Aspect technologique du transistor bipolaire	290
3.2.1.	Fabrication	290
3.2.2.	Caractéristiques réelles	292

3.2.2.1.	Caractéristiques de sortie en direct, $I_C (V_{CE})$	292
3.2.2.2.	Caractéristiques de sortie en inverse	294
3.2.2.3.	Caractéristique de transfert $I_C (I_B)$	298
3.2.2.4.	Caractéristique d'entrée $I_B (V_{BE})$	299
3.2.2.5.	Caractéristiques de réaction $V_{BE} (V_{CE})$	300
3.2.2.6.	Limitations technologiques – calcul de θ_j	301
3.2.2.7.	Méthodes de mesure des transistors bipolaires	304
3.2.3.	Influence de la température et dispersion de fabrication	306
3.2.4.	Point de repos, polarisation	309
3.2.4.1.	Droites de charge statique et dynamique associée	309
3.2.4.2.	Conditions de bon fonctionnement du transistor en amplificateur	311
3.2.4.3.	Conditions de bon fonctionnement en commutateur	313
3.2.4.4.	Schéma équivalent statique du transistor <i>NPN</i> non saturé	314
3.2.4.5.	Schéma de base d'une polarisation, influence de la variation des paramètres, stabilité thermique	315
3.2.5.	Le montage Darlington	318
3.2.5.1.	Darlington classique	318
3.2.5.2.	Darlington composite	319
3.2.6.	Idéalisation des transistors <i>NPN</i> et <i>PNP</i>	321
3.2.7.	Quelques exemples de caractéristiques réelles	322
3.2.8.	Exercices	326
3.3.	Applications du transistor à partir du schéma équivalent statique simplifié	342
3.3.1.	Générateurs de tension	342
3.3.1.1.	Générateur de tension typique	342
3.3.1.2.	Variantes	344
3.3.2.	Générateurs de courant	345
3.3.2.1.	Générateurs de courant typiques	345
3.3.2.2.	Variantes	347
3.3.3.	Commutation sur différentes charges	349
3.3.3.1.	Charge résistive	349
3.3.3.2.	Commutation sur charge capacitive	350
3.3.3.3.	Commutation sur charge inductive	350
3.3.4.	Principe de base des opérateurs logiques <i>DTL</i> et <i>TTL</i>	351
3.3.4.1.	Opérateur Nand à deux entrées, en technologie <i>DTL</i> ...	351
3.3.4.2.	Opérateur Nand à deux entrées en technologie <i>TTL</i>	353
3.3.5.	Principe de l'amplification à transistors	354
3.3.5.1.	Montage émetteur commun	354
3.3.5.2.	Montage à charge répartie	359
3.3.6.	Exercices	360
3.4.	Amplificateurs continus et basses fréquences	368

3.4.1.	Généralités	368
3.4.1.1.	Paramètres électriques d'un amplificateur	368
3.4.1.2.	Liaisons capacitives	369
3.4.1.3.	Droites de charge statique et dynamique, dynamique de sortie associée	370
3.4.1.4.	Réponse en fréquence	373
3.4.2.	Schéma équivalent du transistor en régime variable	373
3.4.2.1.	Insuffisance du schéma équivalent statique	373
3.4.2.2.	Présentation graphique de l'amplificateur en émetteur commun	373
3.4.2.3.	Schéma équivalent du transistor bipolaire en régime variable, paramètres hybrides	375
3.4.2.4.	Détermination de la valeur des paramètres hybrides ...	377
3.4.2.5.	Schémas équivalents simplifiés du transistor bipolaire en émetteur commun	380
3.4.3.	Montages fondamentaux	381
3.4.3.1.	Les configurations en émetteur commun	382
3.4.3.2.	Les configurations en charge répartie	393
3.4.3.3.	Les configurations en collecteur commun	397
3.4.3.4.	Montage base commune, montage cascode	401
3.4.3.5.	Amplificateurs à couplage d'émetteurs, amplificateurs différentiels	405
3.4.4.	Les imperfections des amplificateurs continus	416
3.4.4.1.	Imperfections statiques de l'amplificateur différentiel ..	417
3.4.4.2.	Dérives en température	418
3.4.4.3.	Imperfections dynamiques de l'amplificateur différentiel	420
3.4.4.4.	Distorsion	421
3.4.5.	Contre-réactions partielles	422
3.4.5.1.	Cas des montages fondamentaux	423
3.4.5.2.	Cas des montages à deux étages	425
3.4.6.	Exercices	432
3.5.	Amplificateurs vidéofréquences, radiofréquences et hyperfréquences ...	444
3.5.1.	Position du problème	444
3.5.2.	Transistors bipolaires en hautes fréquences	445
3.5.2.1.	Paramètres naturels du transistor bipolaire	445
3.5.2.2.	Influence de la fréquence	448
3.5.2.3.	Technologie du transistor bipolaire en hautes fréquences	450
3.5.2.4.	Modèles électriques utilisés	451
3.5.3.	Caractéristiques d'un amplificateur hautes fréquences	459
3.5.3.1.	Puissances et gains	460
3.5.3.2.	Stabilité d'un quadripôle actif	463

3.5.3.3.	Bruit dans les transistors bipolaires – bruit dans un quadripôle	464
3.5.4.	Amplificateurs large bande ou vidéofréquences	468
3.5.4.1.	Caractéristiques des amplificateurs vidéofréquences ...	468
3.5.4.2.	Structures de base constituant les amplificateurs vidéofréquences	468
3.5.4.3.	Exemples d'amplificateurs vidéofréquences à éléments discrets	472
3.5.5.	Amplificateurs radiofréquences	474
3.5.5.1.	Présentation	474
3.5.5.2.	Structures utilisées en radiofréquences	475
3.5.5.3.	Exemples d'amplificateurs radiofréquences	483
3.5.6.	Amplificateurs hyperfréquences ou micro-ondes	487
3.5.6.1.	Présentation des amplificateurs micro-ondes	487
3.5.6.2.	Présentation succincte des structures d'amplificateurs micro-ondes	487
3.5.6.3.	Exemple d'amplificateur micro-ondes à transistor bipolaire	488
3.5.7.	Exercices	488
3.6.	Optotransistors	496
3.6.1.	Principe de phototransistor	496
3.6.1.1.	Fonctionnement en statique	496
3.6.1.2.	Fonctionnement en dynamique	498
3.6.2.	Exemple de caractéristiques	498
3.6.3.	Variantes du phototransistor	500
3.6.4.	Photocoupleurs ou optocoupleurs	501
3.6.4.1.	Présentation	501
3.6.4.2.	Optoisolateur	501
3.6.4.3.	Exemples de caractéristiques	501
3.6.5.	Quelques exemples d'application des phototransistors et des optoisolateurs	505
3.6.6.	Exercices	507