

Paul Horowitz & Winfield Hill

TRAITÉ DE L'ÉLECTRONIQUE

ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE

VOLUME 1 :

TECHNIQUES ANALOGIQUES

ELEKTOR

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE

XVII

1 LES BASES

INTRODUCTION

1

TENSION, COURANT ET RÉSISTANCE

1.1 Tension et courant	1
1.2 Relation entre tension et courant : la résistance	3
1.3 Diviseurs de tension	7
1.4 Sources de tension et sources de courant	8
1.5 Circuits équivalents de Thévenin	9
1.6 Résistance dynamique	13

SIGNAUX

1.7 Signaux sinusoïdaux	15
1.8 Amplitudes des signaux et décibels	16
1.9 Autres signaux	17
1.10 Niveaux logiques	19
1.11 Sources de signaux	19

CONDENSATEURS ET CIRCUITS ALTERNATIFS

1.12 Condensateurs	20
1.13 Circuits RC : tension et courant en fonction du temps	23
1.14 Différentiateurs	25
1.15 Intégrateurs	26

INDUCTANCES ET TRANSFORMATEURS

1.16 Inductances	27
1.17 Transformateurs	28
1.18 Analyse en fréquence de circuits réactifs	30
1.19 Filtrés RC	35
1.20 $\diamond$ Diagramme de phase	39
1.21 Pôles et décibels par octave	40
1.22 Circuits résonants et filtres actifs	41
1.23 Autres applications des condensateurs	42
1.24 Généralisation du théorème de Thévenin	42

DIODES ET CIRCUITS À DIODES

1.25 Diodes	42
1.26 Redressement	44
1.27 Filtrage d'alimentation	45
1.28 Configurations de redresseurs pour alimentations	46
1.29 Régulateur	48
1.30 Applications pratiques des diodes	48
1.31 Charges inductives et protection par diode	52

AUTRES COMPOSANTS PASSIFS

1.32 Composants électro-mécaniques	53
1.33 Indicateurs	56
1.34 Composants variables	57

EXERCICES COMPLÉMENTAIRES

2 TRANSISTORS	
INTRODUCTION	61
2.1 Premier modèle du transistor : amplificateur de courant	62
QUELQUES CIRCUITS DE BASE À TRANSISTORS	
2.2 Interrupteur à transistor	63
2.3 Émetteur-suiveur	64
2.4 Émetteurs-suiveurs comme régulateurs de tension	68
2.5 Polarisation des émetteurs-suiveurs	69
2.6 Source de courant à transistor	72
2.7 Amplificateur en émetteur commun	76
2.8 Déphaseur à gain unitaire	77
2.9 Transconductance	78
MODÈLE D'EBERS-MOLL APPLIQUÉ	
AUX CIRCUITS À TRANSISTORS ÉLÉMENTAIRES	
2.10 Modèle amélioré du transistor : amplificateur à transconductance	79
2.11 Révision de l'émetteur-suiveur	82
2.12 Révision de l'amplificateur en émetteur commun	82
2.13 Polarisation de l'amplificateur en émetteur commun	84
2.14 Miroirs de courant	88
QUELQUES ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION D'AMPLIFICATEURS	
2.15 $\diamond$ Étages de sortie <i>push-pull</i>	91
2.16 Configuration Darlington	94
2.17 $\diamond$ Auto-élévation	96
2.18 Amplificateurs différentiels	98
2.19 Capacité et effet Miller	102
2.20 Transistors à effet de champ	104
QUELQUES CIRCUITS À TRANSISTORS TYPIQUES	
2.21 Alimentations régulées	104
2.22 Thermostat	105
2.23 Logique simple à transistors et à diodes	107
CIRCUITS QUI-S'EXPLIQUENT-D'EUX-MÊMES	
2.24 Bons circuits	107
2.25 Mauvais circuits	107
EXERCICES COMPLÉMENTAIRES	110
 3 TRANSISTORS À EFFET DE CHAMP	
INTRODUCTION	
3.1 Caractéristiques des <i>FET</i>	114
3.2 Types de <i>FET</i>	116
3.3 Caractéristiques universelles des <i>FET</i>	119
3.4 Caractéristiques de drain des <i>FET</i>	120
3.5 Dispersion des caractéristiques des <i>FET</i>	122
CIRCUITS DE BASE À <i>FET</i>	
3.6 Sources de courant à <i>JFET</i>	124
3.7 Amplificateurs à <i>FET</i>	129
3.8 Sources suiveuses	132
3.9 Courant de grille de <i>FET</i>	135
3.10 <i>FET</i> comme résistances variables	138

COMMUTATEURS À FET

3.11 Commutateurs analogiques à FET	141
3.12 Limites des commutateurs à FET	144
3.13 Quelques exemples de commutateurs analogiques à FET	150
3.14 MOSFET, logique et commutateurs de puissance	152
3.15 Précautions pour la manipulation des MOSFET	170

CIRCUITS QUI-S'EXPLIQUENT-D'EUX-MÊMES

3.16 Idées de circuits	171
3.17 Mauvaises idées	171

4 RÉTROACTION ET AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

INTRODUCTION

4.1 Introduction à la rétroaction	175
4.2 Amplificateurs opérationnels	176
4.3 Les règles d'or	177

CIRCUITS DE BASE À AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

4.4 Amplificateur inverseur	177
4.5 Amplificateur non-inverseur	178
4.6 Suiveur	179
4.7 Sources de courant	180
4.8 Avertissements essentiels pour les circuits à amplificateur opérationnel	182

ASSIETTE ANGLAISE DE CIRCUITS À AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

4.9 Circuits linéaires	183
4.10 Circuits non linéaires	187

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

4.11 Divergence de fonctionnement par rapport à l'amplificateur opérationnel idéal	190
4.12 Effets des imperfections de l'amplificateur opérationnel sur le comportement d'un circuit	194
4.13 Amplificateurs opérationnels à faible puissance et programmables	211

ÉTUDE DÉTAILLÉE D'UN CHOIX DE CIRCUITS

À AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

4.14 Amplificateur logarithmique	217
4.15 Détecteur de crête actif	218
4.16 Échantillonneur-bloqueur	221
4.17 Écrêteur actif	223
4.18 Circuit de valeur absolue	224
4.19 Intégrateurs	224
4.20 $\diamond$ Différentiateurs	227

$\diamond$ FONCTIONNEMENT DE L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

AVEC UNE TENSION D'ALIMENTATION SIMPLE

4.21 $\diamond$ Polarisation des amplificateurs en alternatif à alimentation simple	228
4.22 $\diamond$ Amplificateurs opérationnels à alimentation simple	228

COMPARATEURS ET TRIGGER DE SCHMITT

4.23 Comparateurs	232
4.24 Trigger de Schmitt	234

RÉTROACTION AVEC AMPLIFICATEURS À GAIN FINI

4.25 Equation du gain	235
4.26 Effets de la rétroaction sur des circuits amplificateurs	236
4.27 $\diamond$ Deux exemples d'amplificateurs à transistors avec rétroaction	239

CIRCUITS À AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS TYPIQUES

4.28 Amplificateur de laboratoire universel	241
4.29 Oscillateur commandé par tension	243

TABLE DES MATIÈRES

4.30	◊ Commutateur linéaire <i>JFET</i> avec compensation de R_{ON}	244
4.31	◊ Détecteur de passage à zéro TTL	245
4.32	◊ Circuit de lecture du courant de charge	245
COMPENSATION DE FRÉQUENCE D'UN AMPLIFICATEUR À RÉTROACTION		246
4.33	Gain et déphasage en fonction de la fréquence	247
4.34	Méthodes de compensation d'un amplificateur	248
4.35	◊ Réponse en fréquence du réseau de rétroaction	250
CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES		254
4.36	Idées de circuit	254
4.37	Mauvais circuits	254
EXERCICES COMPLÉMENTAIRES		254

5 FILTRES ACTIFS ET OSCILLATEURS

FILTRES ACTIFS		267
5.1	Réponse en fréquence des filtres <i>RC</i>	267
5.2	Caractéristiques idéales des filtres <i>LC</i>	268
5.3	Introduction aux filtres actifs	269
5.4	Principaux critères de qualité des filtres.	271
5.5	Types de filtres	272
CIRCUITS DE FILTRES ACTIFS		276
5.6	Circuits à source commandée	277
5.7	Notre tableau simplifié pour le calcul des filtres à VCVS	278
5.8	Filtres programmables	280
5.9	◊ Filtre de réjection en double T	283
5.10	◊ Filtres à gyrateur	284
5.11	Filtres à commutation de condensateur	285
OSCILLATEURS		
5.12	Introduction aux oscillateurs	288
5.13	Oscillateurs à relaxation	288
5.14	Circuit temporisateur classique : le 555	290
5.15	Oscillateurs commandés en tension	295
5.16	Oscillateurs en quadrature	297
5.17	◊ Oscillateur à pont de Wien	301
5.18	◊ Oscillateurs <i>LC</i>	302
5.19	Oscillateurs à quartz	305
CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES		
5.20	Idées de circuit	308
EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES		308

6 RÉGULATEURS DE TENSION ET CIRCUITS DE PUISSANCE

RÉGULATEURS DE BASE AVEC LE CLASSIQUE 723

6.1	Le régulateur 723	313
6.2	Régulateur positif	315
6.3	Régulateur à fort courant	317

CHALEUR ET SCHÉMAS DE PUISSANCE

6.4	Transistors de puissance et évacuation de la chaleur	318
6.5	◊ Limitation de courant par repliement	321
6.6	Protection contre les surtensions	323
6.7	◊ Considérations annexes sur la conception des alimentations à fort courant	325

6.8	◊ Alimentations programmables	328
6.9	◊ Exemple de circuit d'alimentation	328
6.10	Autres circuits intégrés régulateurs	330
ALIMENTATION NON RÉGULÉE		330
6.11	Composants côté secteur	331
6.12	Transformateur	333
6.13	Composants en continu	334
RÉFÉRENCES DE TENSION		
6.14	◊ Diodes Zener	336
6.15	◊ Références à barrière de potentiel (V_{BE})	342
RÉGULATEURS À TROIS BORNES ET À QUATRE BORNES		
6.16	Régulateurs à trois bornes	348
6.17	Régulateurs tripodes ajustables	349
6.18	Commentaires sur les régulateurs tripodes	352
6.19	Régulateurs à découpage et convertisseurs continu-continu	360
ALIMENTATIONS À USAGE SPÉCIAL		
6.20	◊ Régulateurs à haute tension	373
6.21	◊ Alimentations à faible bruit et à faible dérive	379
6.22	◊ Régulateurs à micropuissance	381
6.23	Convertisseurs de tension à condensateurs flottants (pompes de charge)	382
6.24	Alimentations à courant constant	384
6.25	Modules d'alimentation du commerce	387
CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT-D'EUX-MÊMES		
6.26	Idées de circuits	389
6.27	Mauvaises idées	389
EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES		389

7 CIRCUITS DE PRÉCISION ET CIRCUITS À FAIBLE BRUIT

TECHNIQUES DE CONCEPTION DE CIRCUITS DE PRÉCISION À AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

7.1	Précision et plage dynamique	395
7.2	Budget d'erreur	396
7.3	Exemple de circuit : amplificateur de précision avec compensation automatique du décalage	396
7.4	Budget d'erreur d'un circuit de précision	397
7.5	Erreurs des composants	398
7.6	Erreurs d'entrée de l'amplificateur	400
7.7	Erreurs de sortie de l'amplificateur	407
7.8	Amplificateurs à zéro automatique (à découpage)	418

AMPLIFICATEURS DIFFÉRENTIELS ET AMPLIFICATEURS DE MESURE

7.9	Amplificateur de différence	425
7.10	Amplificateur de mesure standard à trois amplificateurs opérationnels	429

BRUIT INTRINSÈQUE DES AMPLIFICATEURS

7.11	Origines et sortes de bruit	434
7.12	Rapport signal-bruit et facteur de bruit	437
7.13	Tension et courant de bruit de l'amplificateur à transistors	440
7.14	◊ Montages à faible bruit à transistors	442
7.15	Bruit des <i>FET</i>	448
7.16	Choix des transistors à faible bruit	449
7.17	◊ Bruit des amplificateurs différentiels et des amplificateurs à rétroaction	449

TABLE DES MATIÈRES

◇ MESURES DE BRUIT ET SOURCES DE BRUIT

7.18 ◇ Mesure sans source de bruit	453
7.19 ◇ Mesures avec une source de bruit	454
7.20 ◇ Sources de bruit et de signaux	456
7.21 ◇ Limitation de la bande passante et mesure de tensions efficaces	457
7.22 Pot pourri de bruit	459

INTERFÉRENCES : BLINDAGE ET MISE À LA TERRE

7.23 Parasites	459
7.24 Masses de signal	462
7.25 ◇ Raccordement de la masse entre les appareils	462

CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT-D'EUX-MÊMES

7.26 Idées de circuits	470
----------------------------------	-----

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

470

APPENDICES

APPENDICE A: L'OSCILLOSCOPE	477
APPENDICE B: RAPPEL DE MATHÉMATIQUES	483
APPENDICE C: CODE DE COULEURS DES RÉSISTANCES À 5%	486
APPENDICE D : RÉSISTANCES DE PRÉCISION À 1 %	487
APPENDICE E: COMMENT DESSINER LES SCHÉMAS	489
APPENDICE F: DROITE DE CHARGE	492
APPENDICE G : TRANSISTOR EN SATURATION	495
APPENDICE H : LES FILTRES LC BUTTERWORTH	497
APPENDICE I : PRÉFIXES DES RÉFÉRENCES DES CIRCUITS INTÉGRÉS	501
APPENDICE J : FEUILLES DE CARACTÉRISTIQUES	504

INDEX

527