

*Paul Horowitz & Winfield Hill*

# TRAITÉ DE L'ÉLECTRONIQUE

ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE

VOLUME 2 :

TECHNIQUES

NUMÉRIQUES & ANALOGIQUES

PUBLITRONIC  
ELEKTOR

# TABLE DES MATIÈRES (volume 1)

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 Filtres RC . . . . .	35
1.20 $\phi$ 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**

2.1 Premier modèle du transistor : amplificateur de courant . . . . . 61  
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 et 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 ◊ Étages de sortie *push-pull* . . . . . 91  
2.16 Configuration Darlington . . . . . 94  
2.17 ◊ 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 *FET* . . . . . 114  
3.2 Types de *FET* . . . . . 116  
3.3 Caractéristiques universelles des *FET* . . . . . 119  
3.4 Caractéristiques de drain des *FET* . . . . . 120  
3.5 Dispersion des caractéristiques des *FET* . . . . . 122

**CIRCUITS DE BASE À *FET***

3.6 Sources de courant à *JFET* . . . . . 124  
3.7 Amplificateurs à *FET* . . . . . 129  
3.8 Sources suiveuses . . . . . 132  
3.9 Courant de grille de *FET* . . . . . 135  
3.10 *FET* 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**

**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 OPÉR.**

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

**$\diamond$  L'AMPLIFICATEUR OPÉR. AVEC UNE TENSION D'ALIM. SIMPLE 227**

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 235**

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 241**

4.28 Amplificateur de laboratoire universel . . . . . 241  
 4.29 Oscillateur commandé par tension . . . . . 243  
 4.30  $\diamond$  Commutateur linéaire *JFET* avec compensation de  $R_{ON}$  . . . . . 244  
 4.31  $\diamond$  Détecteur de passage à zéro TTL . . . . . 245  
 4.32  $\diamond$  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  $\diamond$  Réponse en fréquence du réseau de rétroaction . . . . . 250

**CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES 254**

**EXERCICES COMPLÉMENTAIRES 254**

**5 FILTRES ACTIFS ET OSCILLATEURS**

**FILTRES ACTIFS 267**

5.1 Réponse en fréquence des filtres *RC* . . . . . 267  
 5.2 Caractéristiques idéales des filtres *LC* . . . . . 268

## TABLE DES MATIÈRES (volume 1)

5.3	Introduction aux filtres actifs . . . . .	269
5.4	Principaux critères de qualité des filtres. . . . .	271
5.5	Types de filtres . . . . .	272
<b>CIRCUITS DE FILTRES ACTIFS</b>		<b>276</b>
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
<b>OSCILLATEURS</b>		
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
<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES</b>		<b>308</b>
<b>EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES</b>		<b>308</b>
<b>6 RÉGULATEURS DE TENSION ET CIRCUITS DE PUISSANCE</b>		
<b>RÉGULATEURS DE BASE AVEC LE CLASSIQUE 723</b>		
6.1	Le régulateur 723 . . . . .	313
6.2	Régulateur positif . . . . .	315
6.3	Régulateur à fort courant . . . . .	317
<b>CHALEUR ET SCHÉMAS DE PUISSANCE</b>		
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
<b>ALIMENTATION NON RÉGULÉE</b>		<b>330</b>
6.11	Composants côté secteur . . . . .	331
6.12	Transformateur . . . . .	333
6.13	Composants en continu . . . . .	334
<b>RÉFÉRENCES DE TENSION</b>		
6.14	◊ Diodes Zener . . . . .	336
6.15	◊ Références à barrière de potentiel ( $V_{BE}$ ) . . . . .	342
<b>RÉGULATEURS À TROIS BORNES ET À QUATRE BORNES</b>		
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
<b>ALIMENTATIONS À USAGE SPÉCIAL</b>		
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

<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT-D'EUX-MÊMES</b>	<b>389</b>
<b>EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES</b>	<b>389</b>
<b>7 CIRCUITS DE PRÉCISION ET CIRCUITS À FAIBLE BRUIT</b>	
<b>CIRCUITS DE PRÉCISION À AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS</b>	
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
<b>AMPLIFICATEURS DIFFÉRENTIELS ET AMPLIFICATEURS DE MESURE</b>	<b>424</b>
7.9 Amplificateur de différence . . . . .	425
7.10 Amplificateur de mesure standard à trois amplificateurs opérationnels . . . . .	429
<b>BRUIT INTRINSÈQUE DES AMPLIFICATEURS</b>	<b>432</b>
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 $\diamond$ 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 $\diamond$ Bruit des amplificateurs différentiels et des amplificateurs à rétroaction . . . . .	449
<b><math>\diamond</math> MESURES DE BRUIT ET SOURCES DE BRUIT</b>	
7.18 $\diamond$ Mesure sans source de bruit . . . . .	453
7.19 $\diamond$ Mesures avec une source de bruit . . . . .	454
7.20 $\diamond$ Sources de bruit et de signaux . . . . .	456
7.21 $\diamond$ Limitation de la bande passante et mesure de tensions efficaces . . . . .	457
7.22 Pot pourri de bruit . . . . .	459
<b>INTERFÉRENCES : BLINDAGE ET MISE À LA TERRE</b>	
7.23 Parasites . . . . .	459
7.24 Masses de signal . . . . .	462
7.25 $\diamond$ Raccordement de la masse entre les appareils . . . . .	462
<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT-D'EUX-MÊMES</b>	
7.26 Idées de circuits . . . . .	470
<b>EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES</b>	<b>470</b>
<b>APPENDICES</b>	
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 <i>LC</i> BUTTERWORTH . . . . .	497
APPENDICE I: PRÉFIXES DES RÉFÉRENCES DE CIRCUITS INTÉGRÉS . . . . .	501
APPENDICE J: FEUILLES DE CARACTÉRISTIQUES . . . . .	504
<b>INDEX</b> . . . . .	<b>527</b>

# TABLES DES MATIÈRES (volume 2)

## 8 ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE

<b>NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE LOGIQUE</b>	<b>1</b>
8.1 Numérique, analogique . . . . .	1
8.2 États logiques . . . . .	1
8.3 Systèmes de numération . . . . .	3
8.4 Opérateurs logiques et tables de vérité . . . . .	7
8.5 $\diamond$ Portes discrètes . . . . .	10
8.6 Exemple de circuit de porte . . . . .	11
8.7 Notation logique assertorique . . . . .	12
<b>TTL ET CMOS</b>	<b>13</b>
8.8 Catalogue de portes courantes . . . . .	13
8.9 Circuit interne des portes . . . . .	14
8.10 Caractéristiques des familles <i>TTL</i> et <i>CMOS</i> . . . . .	15
8.11 Composants à trois états et à collecteur ouvert . . . . .	16
<b>LOGIQUE COMBINATOIRE</b>	<b>20</b>
8.12 Identités logiques . . . . .	20
8.13 Simplification et tableaux de Karnaugh . . . . .	21
8.14 Fonctions combinatoires intégrées . . . . .	23
8.15 Réalisation de tables de vérité arbitraires . . . . .	29
<b>LOGIQUE SÉQUENTIELLE</b>	<b>35</b>
8.16 Circuits à mémoire : bascules . . . . .	35
8.17 Bascule synchrone . . . . .	36
8.18 Mémoires et opérateurs logiques : logique séquentielle . . . . .	41
8.19 Synchroniseur . . . . .	44
<b>MULTIVIBRATEUR MONOSTABLES</b>	<b>46</b>
8.20 Caractéristiques des monostables . . . . .	46
8.21 Exemple de circuit à monostable . . . . .	48
8.22 Précautions avec les monostables . . . . .	48
8.23 Temporisation par des compteurs . . . . .	51
<b>FONCTIONS SÉQUENTIELLES DISPONIBLES EN CIRCUITS INTÉGRÉS</b>	<b>52</b>
8.24 Verrous et registres . . . . .	52
8.25 Compteurs . . . . .	53
8.26 Registres à décalage . . . . .	55
8.27 PAL séquentielles . . . . .	56
8.28 Fonctions séquentielles diverses . . . . .	70
<b>QUELQUES CIRCUITS NUMÉRIQUES TYPIQUES</b>	<b>71</b>
8.29 Compteur modulo $n$ : exemple de synchronisation . . . . .	73
8.30 Affichage numérique à LED multiplexé . . . . .	75
8.31 $\diamond$ Pilote de télescope astronomique . . . . .	77
8.32 $\diamond$ Générateur de $n$ impulsions . . . . .	77
<b>PATHOLOGIES LOGIQUES</b>	<b>80</b>
8.33 Problèmes en courant continu . . . . .	80
8.34 Problèmes de commutation . . . . .	81
8.35 Faiblesses congénitales des <i>TTL</i> et <i>CMOS</i> . . . . .	83
<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES</b>	<b>85</b>
8.36 Idées de circuits . . . . .	85
8.37 Mauvaises idées . . . . .	85
<b>EXERCICES COMPLÉMENTAIRES</b>	<b>85</b>

<b>9</b>	<b>LE NUMÉRIQUE RENCONTRE L'ANALOGIQUE</b>	
	<b>COMMENT ASSURER L'INTERFACE ENTRE CMOS ET TTL ?</b>	<b>95</b>
9.1	◊ L'épopée des familles logiques . . . . .	95
9.2	Caractéristiques d'entrée et de sortie . . . . .	100
9.3	Comment assurer l'interface entre familles logiques ? . . . . .	103
9.4	Comment attaquer les entrées CMOS et TTL ? . . . . .	105
9.5	Commandé de logique numérique par comparateur et amplificateur opérationnel . . . . .	108
9.6	Commentaires à propos des entrées logiques . . . . .	109
9.7	Comparateurs . . . . .	110
9.8	Commande de dispositifs numériques externes en CMOS et TTL . . . . .	113
9.9	Comment réaliser les interfaces des LSI en NMOS . . . . .	118
9.10	Optoélectronique . . . . .	120
	<b>SIGNAUX NUMÉRIQUES ET LONGS FILS</b>	<b>130</b>
9.11	Interconnexions sur platines . . . . .	130
9.12	Connexions entre platines . . . . .	132
9.13	◊ Bus de données . . . . .	132
9.14	Commande de liaisons par câbles . . . . .	134
	<b>CONVERSION ANALOGIQUE/NUMÉRIQUE</b>	<b>144</b>
9.15	Introduction aux convertisseurs A/N . . . . .	144
9.16	Convertisseurs numériques/analogiques (CNA) . . . . .	145
9.17	◊ CNA du domaine temporel (à valeur moyenne) . . . . .	149
9.18	CNA à multiplication . . . . .	150
9.19	Choix d'un CNA . . . . .	151
9.20	Convertisseurs analogiques-numériques . . . . .	151
9.21	Techniques d'équilibre de charges . . . . .	157
9.22	◊ Quelques raretés en convertisseurs A/N et N/A . . . . .	161
9.23	Choix d'un CAN . . . . .	167
	<b>QUELQUES EXEMPLES DE CONVERSION A/N</b>	<b>168</b>
9.24	Systèmes de saisie de données A/N à seize canaux . . . . .	168
9.25	Voltmètre numérique à trois chiffres et demi . . . . .	170
9.26	◊ Coulombmètre . . . . .	172
	<b>BOUCLES À PHASE ASSERVIE</b>	<b>173</b>
9.27	Introduction aux boucles à phase asservie . . . . .	173
9.28	◊ Calcul des PLL . . . . .	178
9.29	◊ Exemple de conception : le multiplieur de fréquence . . . . .	179
9.30	◊ Synchronisation et asservissement . . . . .	183
9.31	◊ Quelques applications des PLL . . . . .	183
	<b>SUITES BINAIRES PSEUDO-ALÉATOIRES ET GÉNÉRATEURS DE BRUIT</b>	<b>187</b>
9.32	◊ Générateur numérique de bruit . . . . .	187
9.33	◊ Séquences de registres à décalage à rétroaction . . . . .	187
9.34	◊ Générateurs de bruit analogique à séquences de longueur maximale . . . . .	190
9.35	◊ Spectre de puissance des séquences de registres à décalage . . . . .	190
9.36	◊ Filtre passe-bas . . . . .	192
9.37	◊ Bouclage . . . . .	193
9.38	◊ Filtres numériques . . . . .	196
	<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES</b>	<b>200</b>
	<b>EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES</b>	<b>200</b>
<b>10</b>	<b>MICRO-ORDINATEURS</b>	
	<b>MINI-ORDINATEURS, MICRO-ORDINATEURS ET MICROPROCESSEURS</b>	<b>205</b>
10.1	Architecture d'un ordinateur . . . . .	206
	<b>EXEMPLE DE JEU D'INSTRUCTIONS</b>	<b>210</b>

## TABLE DES MATIÈRES (volume 2)

10.2 Langage assembleur et langage machine . . . . .	210
10.3 Jeu d'instructions simplifié du 8086 . . . . .	210
10.4 Exemple de programme . . . . .	215
<b>SIGNAUX DE BUS ET INTERFACES</b>	<b>216</b>
10.5 Signaux fondamentaux du bus : données, adresses, scrutation . . . . .	216
10.6 Entrées/sorties programmées : sortie de données . . . . .	217
10.7 Entrées/sorties programmées : entrée de données . . . . .	221
10.8 Entrées/sorties programmées : registres d'état . . . . .	222
10.9 Interruptions . . . . .	225
10.10 Traitement des interruptions . . . . .	227
10.11 Interruptions en général . . . . .	230
10.12 Accès direct à la mémoire . . . . .	234
10.13 Résumé des signaux du bus de l'IBM PC . . . . .	238
10.14 $\diamond$ Bus synchrone contre bus asynchrone . . . . .	239
10.15 Autres bus de micro-ordinateurs . . . . .	241
10.16 Raccordement de périphériques à l'ordinateur . . . . .	244
<b>NOTIONS DE SYSTÈMES LOGICIELS</b>	<b>246</b>
10.17 Programmation . . . . .	247
10.18 Systèmes d'exploitation, fichiers et utilisation de la mémoire . . . . .	249
<b>NOTIONS DE COMMUNICATION DE DONNÉES</b>	<b>251</b>
10.19 Communication sérielle et ASCII . . . . .	252
10.20 Communication parallèle : Centronics, SCSI, IPI, GPIB (488) . . . . .	263
10.21 Réseaux locaux . . . . .	267
10.22 $\diamond$ Exemple d'interface : compactage des données par le matériel . . . . .	268
10.23 Formats des nombres . . . . .	271
<b>11 MICROPROCESSEURS</b>	
<b>APERÇU DÉTAILLÉ DU 68008</b>	<b>276</b>
11.1 Registres, mémoire et entrées/sorties . . . . .	276
11.2 Jeu d'instructions et adressage . . . . .	277
11.3 Représentation en langage machine . . . . .	282
11.4 Signaux du bus 68008 . . . . .	284
<b>EXEMPLE DE PROJET COMPLET : MOYENNEUR DE SIGNAL ANALOGIQUE</b>	<b>291</b>
11.5 Conception du circuit . . . . .	292
11.6 Programmation : cahier des charges . . . . .	306
11.7 Programmation : les détails . . . . .	309
11.8 $\diamond$ Performances . . . . .	330
11.9 Quelques réflexions <i>a posteriori</i> . . . . .	331
<b>CIRCUITS INTÉGRÉS AUXILIAIRES DE MICROPROCESSEURS</b>	<b>333</b>
11.10 Circuits intégrés à échelle moyenne . . . . .	333
11.11 Circuits intégrés à grande échelle . . . . .	336
11.12 Mémoire . . . . .	344
11.13 Autres microprocesseurs . . . . .	354
11.14 Émulateurs, systèmes de mise au point, analyseurs logiques et cartes d'évaluation . . . . .	355
<b>12 TECHNIQUES DE CONSTRUCTION ÉLECTRONIQUE</b>	
<b>RÉALISATION DU PROTOTYPE</b>	<b>361</b>
12.1 Montage d'essai . . . . .	361
12.2 Platines préimprimées pour prototypes . . . . .	361
12.3 Plaquettes à connexions enroulées . . . . .	363
<b>CIRCUITS IMPRIMÉS</b>	<b>366</b>
12.4 Fabrication des platines . . . . .	366
12.5 $\diamond$ Conception des platines . . . . .	368

12.6	Implantation des composants . . . . .	372
12.7	Quelques conseils supplémentaires à propos des platines . . . . .	374
12.8	Techniques spécialisées . . . . .	375
<b>CONSTRUCTION DES APPAREILS</b>		<b>386</b>
12.9	Logement d'une platine dans un appareil . . . . .	386
12.10	Boîtiers . . . . .	388
12.11	Conseils de construction . . . . .	389
12.12	Refroidissement . . . . .	390
12.13	Quelques conseils électriques . . . . .	392
12.14	Où se procurer les composants ? . . . . .	394
<b>13 HAUTES FRÉQUENCES ET COMMUTATION RAPIDE</b>		
<b>AMPLIFICATEURS HAUTES FRÉQUENCES</b>		<b>397</b>
13.1	Amplificateur à transistor en hautes fréquences : premier contact . . . . .	397
13.2	◊ Le modèle en alternatif . . . . .	398
13.3	◊ Exemple de calcul de circuit HF . . . . .	401
13.4	Configurations d'amplificateurs HF . . . . .	402
13.5	◊ Un exemple d'amplificateur à large bande . . . . .	404
13.6	◊ Quelques améliorations du schéma équivalent . . . . .	407
13.7	◊ Le montage à double contre-réaction ou paire à rétro-action série . . . . .	408
13.8	◊ Amplificateurs modulaires . . . . .	408
<b>CIRCUITS EN RADIOFRÉQUENCES</b>		<b>415</b>
13.9	Lignes de transmission . . . . .	415
13.10	◊ Snubs, baluns et transformateurs . . . . .	418
13.11	Amplificateurs accordés . . . . .	419
13.12	Sous-ensembles de circuits radiofréquences . . . . .	422
13.13	Mesure de la tension ou de la puissance ? . . . . .	426
<b>COMMUNICATIONS RADIOFRÉQUENCES : AM</b>		<b>431</b>
13.14	Quelques concepts de communications . . . . .	431
13.15	Modulation d'amplitude . . . . .	432
13.16	Récepteur superhétérodyne . . . . .	434
<b>TECHNIQUES DE MODULATION AVANCÉES</b>		<b>437</b>
13.17	◊ Bande latérale unique . . . . .	437
13.18	◊ Modulation de fréquence . . . . .	438
13.19	◊ Modulation par décalage de fréquence . . . . .	441
13.20	◊ Modèles de modulation par impulsions . . . . .	441
<b>TRUCS ET ASTUCES EN RADIOFRÉQUENCES</b>		<b>443</b>
13.21	◊ Techniques d'assemblage . . . . .	443
13.22	◊ Amplificateurs et composants HF peu ordinaires . . . . .	444
<b>COMMUTATION À HAUTE VITESSE</b>		<b>446</b>
13.23	Modèle de transistor et équations . . . . .	447
13.24	Outils informatiques de modélisation . . . . .	451
<b>◊ QUELQUES EXEMPLES DE COMMUTATION À HAUTE VITESSE</b>		<b>452</b>
13.25	◊ Commande en haute tension . . . . .	452
13.26	◊ Commande de bus à collecteur ouvert . . . . .	453
13.27	◊ Exemple : préamplificateur pour tube photomultiplicateur . . . . .	455
<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES</b>		<b>457</b>
<b>EXERCICES COMPLÉMENTAIRES</b>		<b>457</b>
<b>14 CONCEPTION DES CIRCUITS À FAIBLE CONSOMMATION</b>		
<b>INTRODUCTION</b>		<b>461</b>
14.1	Faible puissance : quand et pourquoi ? . . . . .	462

## TABLE DES MATIÈRES (volume 2)

<b>SOURCES D'ÉNERGIE</b>	<b>465</b>
14.2 Piles et accumulateurs . . . . .	465
14.3 Modules d'alimentation par le secteur . . . . .	478
14.4 ◊ Cellules solaires . . . . .	479
14.5 Courants de signalisation . . . . .	483
<b>COMMUTATION DES ALIMENTATIONS ET RÉGULATEURS</b>	
<b>POUR MICROPUISSANCE</b>	<b>488</b>
14.6 Commutation des alimentations . . . . .	488
14.7 Régulateurs pour circuits de micropuissance . . . . .	492
14.8 Masses flottantes . . . . .	496
14.9 Références de tension de micropuissance et capteurs de température . . . . .	500
<b>CIRCUITS LINÉAIRES À TRÈS FAIBLE CONSOMMATION</b>	<b>502</b>
14.10 Contraintes de la conception de circuits linéaires à faible consommation . . . . .	502
14.11 Exemple de schéma linéaire discret . . . . .	504
14.12 Amplificateurs opérationnels à très faible puissance . . . . .	505
14.13 Comparateurs à très faible consommation . . . . .	518
14.14 Temporisateurs et oscillateurs à très faible consommation . . . . .	520
<b>CIRCUITS NUMÉRIQUES À TRÈS FAIBLE CONSOMMATION</b>	<b>523</b>
14.15 Familles <i>CMOS</i> . . . . .	523
14.16 Maintenir faible la consommation des <i>CMOS</i> . . . . .	524
14.17 Microprocesseurs et périphériques à très faible consommation . . . . .	528
14.18 Exemple de projet à microprocesseur : enregistreur de températures journalières . . . . .	532
<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES</b>	<b>540</b>
14.19 Idées . . . . .	540
<b>15 MESURES ET TRAITEMENT DE SIGNAUX</b>	
<b>CAPTEURS</b>	<b>543</b>
15.1 Température . . . . .	544
15.2 Intensité lumineuse . . . . .	553
15.3 Contrainte et déplacement . . . . .	560
15.4 Accélération, pression, force et vitesse . . . . .	565
15.5 Champ magnétique . . . . .	568
15.6 Mesure du vide . . . . .	569
15.7 Détecteurs de particules . . . . .	569
15.8 Sondes de tension pour la biologie et la chimie . . . . .	575
<b>ÉTALONS ET MESURES DE PRÉCISION</b>	<b>579</b>
15.9 ◊ Étalons de fréquence . . . . .	580
15.10 Mesure de fréquence, de période et d'intervalle de temps . . . . .	583
15.11 ◊ Étalons et mesures de tension et de résistance . . . . .	591
<b>TECHNIQUES DE LIMITATION DE BANDE PASSANTE</b>	<b>593</b>
15.12 Le problème du rapport signal/bruit . . . . .	593
15.13 Calcul de valeur moyenne et échantillonnage à canaux multiples . . . . .	593
15.14 Rendre un signal périodique . . . . .	598
15.15 Détection cohérente . . . . .	600
15.16 Analyse d'amplitude d'impulsion . . . . .	604
15.17 Convertisseurs temps/amplitude . . . . .	605
<b>ANALYSE SPECTRALE ET TRANSFORMÉES DE FOURIER</b>	<b>605</b>
15.18 Analyseurs de spectre . . . . .	605
15.19 Les analyseurs de spectre à l'écoute de l'univers . . . . .	609
<b>CIRCUITS QUI S'EXPLIQUENT D'EUX-MÊMES</b>	<b>609</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> 614	<b>LEXIQUE</b> 620
	<b>INDEX</b> 626

Paul Horowitz & Winfield Hill

# TRAITÉ DE L'ÉLECTRONIQUE

ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE

VOLUME 2: TECHNIQUES

NUMÉRIQUES & ANALOGIQUES

séquentielle jusqu'aux microprocesseurs, en passant par les convertisseurs numérique-analogique et analogique-numérique, les boucles à phase asservie et les générateurs aléatoires. Ces sujets sont abordés sous l'angle de la pratique, de ses aléas et de l'expérience qui en résulte ; les auteurs n'hésitent pas à aborder franchement la question du logiciel, fait assez rare dans les livres d'électronique. Quatre autres chapitres de ce volume sont consacrés l'un aux techniques HF et à la commutation rapide, l'autre aux circuits à très faible consommation, aussi bien analogiques que numériques, le troisième à la mise en coffret des circuits, et le dernier à la mesure et au traitement des signaux : température, luminosité, accélération, pression, vitesse, magnétisme... Les auteurs entraînent même leurs lecteurs électroniciens du côté des détecteurs de particules, de la bio-chimie et de l'astronomie. C'est donc un ouvrage à la fois exhaustif et facile d'accès grâce à sa conception hautement didactique. L'attention du lecteur est sans cesse relancée par des astuces récoltées dans la pratique de la conception et de l'enseignement. Chaque explication est assortie d'exercices pour stimuler l'assimilation active des connaissances. Les préalables théoriques requis sont succincts. L'approche intuitive (« à l'américaine ») fait merveille dans cet ouvrage, idéal pour l'auto-formation mais aussi pour le soutien d'une formation scolaire et universitaire. La traduction française respecte avec bonheur le style vivant et la manière agréable du texte américain.

Paul Horowitz est professeur de physique à l'Université Harvard.  
Winfried Hill est chercheur et Directeur du Département d'Électronique du Rowland Institute For Science.



BIBLIOTHÈQUE  
D'ÉLECTRONIQUE

La BIBLIOTHÈQUE D'ÉLECTRONIQUE D'ELEKTOR est  
une collection de manuels didactiques sur tous  
les sujets de l'électronique moderne.

**PUBLITRONIC/ELEKTOR**  
**ISBN : 2-86661-071-7 / Catalogue : 023977**

