



**e** lectronique  
expérimentale

**Michel KROB**

**ellipses**

# Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Oscilloscopes et générateurs de fonction</b>                       | <b>9</b>  |
| 1.1      | Organisation de l'oscilloscope . . . . .                              | 9         |
| 1.1.1    | Système vertical . . . . .  | 10        |
| 1.1.2    | Système horizontal . . . . .  | 11        |
| 1.1.3    | Oscilloscope analogique - oscilloscope numérique . . . . .            | 14        |
| 1.1.4    | Bande passante . . . . .  | 18        |
| 1.1.5    | Ce qu'il faut retenir . . . . .                                       | 19        |
| 1.2      | Caractérisation d'un générateur de fonction . . . . .                 | 20        |
| 1.2.1    | Impédance interne . . . . .   | 20        |
| 1.2.2    | Saturation en tension . . . . .                                       | 21        |
| 1.2.3    | Saturation en courant - puissance maximale fournie . . . . .          | 21        |
| 1.2.4    | Pureté spectrale du générateur . . . . .                              | 23        |
| 1.3      | Rôle des impédances du générateur et de l'oscilloscope . . . . .      | 24        |
| 1.3.1    | Mesure d'une fonction de transfert . . . . .                          | 24        |
| 1.3.2    | Mesure d'une réponse indicielle . . . . .                             | 27        |
| 1.3.3    | Conclusion . . . . .  | 29        |
| 1.4      | Les problèmes de masse . . . . .                                      | 29        |
| <b>2</b> | <b>Filtrage</b>   | <b>33</b> |
| 2.1      | Quelques éléments théoriques . . . . .                                | 33        |
| 2.1.1    | Définition d'un système linéaire et invariant dans le temps . . . . . | 34        |
| 2.1.2    | Définition d'un filtre linéaire . . . . .                             | 34        |
| 2.1.3    | Un exemple . . . . .  | 35        |
| 2.1.4    | Transformée de Fourier dans l'étude des filtres . . . . .             | 36        |
| 2.1.5    | Interprétation physique de la fonction de transfert . . . . .         | 37        |
| 2.1.6    | Réponse du filtre à une excitation périodique . . . . .               | 38        |
| 2.1.7    | Réalisation électronique des filtres . . . . .                        | 40        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2      | Filtre passe-bas du 1er ordre . . . . .                               | 41        |
| 2.2.1    | Réponse à une excitation périodique . . . . .                         | 42        |
| 2.2.2    | Régime transitoire précédant un régime sinusoïdal permanent . . . . . | 43        |
| 2.2.3    | Réponse impulsionnelle . . . . .                                      | 44        |
| 2.2.4    | Réalisation active du filtre . . . . .                                | 45        |
| 2.3      | Filtre passe-bande du 2ème ordre . . . . .                            | 47        |
| 2.3.1    | Un autre avantage d'une réalisation active . . . . .                  | 47        |
| 2.3.2    | Fonction de transfert . . . . .                                       | 48        |
| 2.3.3    | Régimes transitoires . . . . .  | 49        |
| 2.3.4    | Réponse à une excitation périodique . . . . .                         | 53        |
| 2.4      | Application à la réalisation d'un analyseur de spectre . . . . .      | 54        |
| 2.4.1    | Principe . . . . .  | 55        |
| 2.4.2    | Filtre à capacités commutées . . . . .                                | 56        |
| 2.4.3    | Organisation de l'analyseur . . . . .                                 | 58        |
| 2.4.4    | Compromis résolution - vitesse de balayage . . . . .                  | 60        |
| 2.4.5    | Résultats expérimentaux . . . . .                                     | 62        |
| <b>3</b> | <b>Circuits à diodes</b>  | <b>65</b> |
| 3.1      | Circuit détecteur d'enveloppe . . . . .                               | 65        |
| 3.1.1    | Définition . . . . .  | 65        |
| 3.1.2    | Fonctionnement . . . . .  | 66        |
| 3.1.3    | Ondulation résiduelle en sortie . . . . .                             | 68        |
| 3.1.4    | Courants traversant le détecteur et précautions d'emploi . . . . .    | 69        |
| 3.1.5    | Modélisation de la diode et influence du GBF . . . . .                | 71        |
| 3.1.6    | Influence de l'oscilloscope . . . . .                                 | 72        |
| 3.1.7    | Allure expérimentale de la tension de sortie . . . . .                | 73        |
| 3.1.8    | Mesure expérimentale des courants traversant le détecteur . . . . .   | 74        |
| 3.2      | Visualisation du module d'une fonction de transfert . . . . .         | 77        |
| 3.2.1    | Position du problème . . . . .  | 77        |
| 3.2.2    | Spectre d'amplitude du signal d'entrée . . . . .                      | 78        |
| 3.2.3    | Organisation du wobulateur . . . . .                                  | 81        |
| 3.2.4    | Vitesse de balayage et temps de réponse du filtre . . . . .           | 82        |
| 3.2.5    | Principe du réglage du détecteur d'enveloppe . . . . .                | 82        |
| 3.2.6    | Manipulations . . . . .   | 85        |
| <b>4</b> | <b>Amplificateurs opérationnels</b>                                   | <b>89</b> |
| 4.1      | Quelques éléments théoriques . . . . .                                | 89        |
| 4.1.1    | Présentation . . . . .  | 89        |
| 4.1.2    | Régime linéaire - régime non linéaire . . . . .                       | 90        |
| 4.1.3    | Introduction à la rétroaction . . . . .                               | 91        |
| 4.1.4    | Modélisations linéaires et fonctionnement non-linéaire . . . . .      | 93        |
| 4.1.5    | Autres intérêts de la rétroaction . . . . .                           | 96        |
| 4.2      | Mesures de quelques caractéristiques de l'ampli. op. . . . .          | 98        |
| 4.2.1    | Tension de décalage . . . . .   | 99        |
| 4.2.2    | Compensation de la tension de décalage . . . . .                      | 101       |
| 4.2.3    | Courants de polarisation . . . . .                                    | 101       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.2.4    | Produit gain $\times$ bande passante . . . . .                       | 104        |
| 4.2.5    | Vitesse limite de balayage (slew-rate) . . . . .                     | 104        |
| 4.2.6    | Courant de saturation de sortie . . . . .                            | 105        |
| 4.2.7    | Conclusion pour une bonne utilisation de l'ampli. op. . . . .        | 105        |
| 4.3      | Etude de quelques applications . . . . .                             | 106        |
| 4.3.1    | Montage intégrateur . . . . .  | 106        |
| 4.3.2    | Montage dérivateur . . . . .   | 109        |
| 4.3.3    | Diode sans seuil . . . . .   | 113        |
| 4.3.4    | Comparateurs . . . . .   | 115        |
| <b>5</b> | <b>Oscillateurs en électronique</b> . . . . .                        | <b>119</b> |
| 5.1      | Quelques rappels théoriques . . . . .                                | 119        |
| 5.1.1    | Définition d'un oscillateur . . . . .                                | 119        |
| 5.1.2    | Stabilité d'un système linéaire et invariant dans le temps . . . . . | 121        |
| 5.1.3    | Cas limite . . . . .   | 122        |
| 5.1.4    | Stabilité des systèmes bouclés . . . . .                             | 123        |
| 5.1.5    | Démarrage des oscillations . . . . .                                 | 124        |
| 5.1.6    | Lien avec les oscillateurs à résistance négative . . . . .           | 125        |
| 5.1.7    | Stabilisation de l'amplitude des oscillations . . . . .              | 126        |
| 5.1.8    | Stabilité en fréquence d'un oscillateur . . . . .                    | 130        |
| 5.2      | Un premier exemple: l'oscillateur à pont de Wien . . . . .           | 131        |
| 5.2.1    | Quelques résultats . . . . .   | 131        |
| 5.2.2    | Etude expérimentale . . . . .  | 134        |
| 5.2.3    | Amélioration du taux de distorsion . . . . .                         | 142        |
| 5.3      | Oscillateurs hautes fréquences . . . . .                             | 147        |
| 5.3.1    | Schéma général . . . . .   | 147        |
| 5.3.2    | Oscillateur Colpitts . . . . .                                       | 148        |
| 5.3.3    | Oscillateur à quartz . . . . .                                       | 151        |
| 5.4      | Oscillateurs de relaxation . . . . .                                 | 153        |
| 5.4.1    | Oscillateur à comparateur à hystérésis . . . . .                     | 153        |
| 5.4.2    | Passage aux oscillations quasi-sinusoïdales . . . . .                | 155        |
| 5.5      | Générateur de signaux . . . . .                                      | 158        |
| 5.5.1    | Analyse du circuit de base . . . . .                                 | 158        |
| 5.5.2    | Variation du rapport cyclique . . . . .                              | 160        |
| 5.5.3    | Transformation triangle - sinus . . . . .                            | 161        |
| 5.5.4    | Synthèse . . . . .   | 163        |
| <b>6</b> | <b>Phénomènes non-linéaires en Physique</b> . . . . .                | <b>167</b> |
| 6.1      | Réalisation d'une non-linéarité polynomiale cubique . . . . .        | 167        |
| 6.1.1    | Caractéristique du circuit . . . . .                                 | 168        |
| 6.1.2    | Analyse expérimentale du circuit . . . . .                           | 169        |
| 6.2      | Oscillateur de Van der Pol . . . . .                                 | 170        |
| 6.2.1    | Rappels . . . . .  | 170        |
| 6.2.2    | Analyse de la réalisation pratique . . . . .                         | 171        |
| 6.2.3    | Partie expérimentale . . . . .                                       | 172        |
| 6.3      | Oscillateur anharmonique en régime libre . . . . .                   | 176        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.3.1    | Rappels . . . . .  | 176        |
| 6.3.2    | Analyse de la réalisation pratique . . . . .                           | 178        |
| 6.3.3    | Partie expérimentale . . . . .   | 179        |
| 6.4      | Oscillateur anharmonique en régime forcé . . . . .                     | 181        |
| 6.4.1    | Rappels . . . . .  | 181        |
| 6.4.2    | Réalisation expérimentale . . . . .                                    | 182        |
| 6.4.3    | Comparaison des courbes de résonance . . . . .                         | 183        |
| 6.5      | Oscillateur anharmonique en régime chaotique . . . . .                 | 184        |
| 6.5.1    | Espace des phases . . . . .  | 184        |
| 6.5.2    | Régime chaotique . . . . .   | 185        |
| 6.5.3    | Cascade sous-harmonique . . . . .                                      | 185        |
| 6.5.4    | Réalisation pratique . . . . .   | 186        |
| <b>7</b> | <b>Acquisition et traitement des signaux</b>                           | <b>191</b> |
| 7.1      | Position du problème . . . . .   | 191        |
| 7.2      | Filtre du premier ordre: la cellule R-C . . . . .                      | 193        |
| 7.2.1    | Obtention de la réponse impulsionnelle . . . . .                       | 194        |
| 7.2.2    | Identification de la fonction de transfert . . . . .                   | 196        |
| 7.3      | Filtre du second ordre: le circuit R-L-C série . . . . .               | 199        |
| 7.3.1    | Obtention de la réponse impulsionnelle . . . . .                       | 200        |
| 7.3.2    | Identification de la fonction de transfert . . . . .                   | 202        |
| 7.3.3    | Réponse indicielle . . . . .   | 205        |
| 7.3.4    | Comparaison des méthodes . . . . .                                     | 207        |
| 7.4      | Analyse spectrale de signaux transitoires . . . . .                    | 207        |
| 7.4.1    | Durée d'observation - période d'échantillonnage . . . . .              | 208        |
| 7.4.2    | Position des instants d'échantillonnage - calcul de la phase . . . . . | 209        |
| 7.4.3    | Programmation dans le cas du filtre passe-bas . . . . .                | 210        |
| 7.4.4    | Réponse impulsionnelle du filtre passe-bas . . . . .                   | 210        |
| 7.4.5    | Réponse impulsionnelle du filtre passe-bande . . . . .                 | 211        |
| 7.4.6    | Réponse indicielle du filtre passe-bande . . . . .                     | 212        |
| 7.5      | Conclusion . . . . .   | 213        |
| <b>8</b> | <b>Modélisation d'un dipôle électrocinétique</b>                       | <b>215</b> |
| 8.1      | Position du problème . . . . .   | 215        |
| 8.1.1    | Circuit . . . . .  | 215        |
| 8.1.2    | Conditions initiales . . . . .   | 216        |
| 8.1.3    | Bilan énergétique . . . . .  | 216        |
| 8.1.4    | Résistance totale du circuit et modélisation de la bobine . . . . .    | 217        |
| 8.2      | Protocole expérimental . . . . .                                       | 219        |
| 8.2.1    | Mesures des conditions initiales . . . . .                             | 219        |
| 8.2.2    | Mesures de la résistance totale du circuit . . . . .                   | 220        |
| 8.2.3    | Mesure de l'énergie dissipée dans le circuit . . . . .                 | 221        |
| 8.3      | Expérimentation . . . . .  | 221        |
| 8.3.1    | Ordres de grandeur et dipôles utilisés . . . . .                       | 221        |
| 8.3.2    | Mesures préliminaires . . . . .  | 222        |
| 8.3.3    | Acquisition de la tension aux bornes de la résistance . . . . .        | 222        |

|            |              |   |            |
|------------|--------------|---|------------|
| 176        | 8.3.4        | Estimation de l'énergie dissipée . . . . .                          | 223        |
| 178        | 8.3.5        | Comparaison et critique des résultats . . . . .                     | 224        |
| 179        | 8.3.6        | Validation du modèle basses fréquences de la bobine à air . . . . . | 224        |
| 181        | 8.4          | Modélisation de la bobine à air . . . . .                           | 226        |
| 181        | 8.4.1        | Description qualitative . . . . .                                   | 226        |
| 182        | 8.4.2        | Hypothèses et notations . . . . .                                   | 227        |
| 183        | 8.4.3        | Définition de la résistance . . . . .                               | 228        |
| 184        | 8.4.4        | Cas du fil cylindrique de section circulaire . . . . .              | 228        |
| 184        | 8.4.5        | Cas du solénoïde illimité à 1 couche . . . . .                      | 231        |
| 185        | 8.4.6        | Cas du solénoïde illimité à n couches . . . . .                     | 238        |
| 185        | 8.5          | Comparaison avec l'expérience et conclusion . . . . .               | 242        |
| 186        |              |   |            |
| <b>191</b> | <b>9</b>     | <b>Asservissement d'une grandeur physique</b>                       | <b>245</b> |
| 191        | 9.1          | Nécessité et avantages des systèmes bouclés . . . . .               | 245        |
| 193        | 9.1.1        | But recherché . . . . .   | 246        |
| 194        | 9.1.2        | Relation entrée-sortie de l'élément à asservir . . . . .            | 246        |
| 196        | 9.1.3        | Première réponse: système en boucle ouverte . . . . .               | 247        |
| 199        | 9.1.4        | Deuxième réponse: système en boucle fermée . . . . .                | 248        |
| 200        | 9.1.5        | Qualité d'un asservissement . . . . .                               | 252        |
| 202        | 9.2          | Précision et stabilité . . . . .                                    | 252        |
| 205        | 9.2.1        | Critères de stabilité . . . . .                                     | 253        |
| 207        | 9.2.2        | Précision statique . . . . .  | 255        |
| 207        | 9.2.3        | Compromis précision-stabilité . . . . .                             | 257        |
| 208        | 9.2.4        | Conclusion . . . . .  | 261        |
| 209        | 9.3          | Correction des systèmes asservis . . . . .                          | 261        |
| 210        | 9.3.1        | Premier exemple . . . . .   | 263        |
| 210        | 9.3.2        | Second exemple . . . . .  | 263        |
| 211        | 9.4          | Un exemple: asservissement de la vitesse d'un moteur . . . . .      | 265        |
| 212        | 9.4.1        | Schéma global de l'asservissement . . . . .                         | 265        |
| 213        | 9.4.2        | Dynamique de l'ensemble moteur - génératrice . . . . .              | 265        |
| 215        | 9.4.3        | Nécessité de l'asservissement . . . . .                             | 268        |
| 215        | 9.4.4        | Commande en puissance du moteur . . . . .                           | 268        |
| 216        | 9.4.5        | Fonction de transfert de la chaîne directe . . . . .                | 273        |
| 216        | 9.4.6        | Mise en équation du système bouclé . . . . .                        | 275        |
| 217        | 9.4.7        | Correction et réalisation pratique du système bouclé . . . . .      | 277        |
| 219        | 9.5          | Manipulations . . . . .   | 281        |
| 219        | 9.5.1        | Identification de la boucle ouverte . . . . .                       | 281        |
| 220        | 9.5.2        | Validation du modèle . . . . .                                      | 284        |
| 221        | 9.5.3        | Analyse de l'ondulation du courant rotorique . . . . .              | 291        |
| 221        | 9.5.4        | Correction du système . . . . .                                     | 293        |
| 222        |              |   |            |
| 222        |              |   |            |
|            | <b>Index</b> |   | <b>301</b> |

Ce livre est le fruit d'une expérience d'enseignement de plusieurs années en préparation à l'agrégation de Physique. Son objet est de décrire tant du point de vue conceptuel qu'expérimental des manipulations d'Électronique s'inscrivant dans le cadre de ce concours. Il s'adresse donc en premier lieu aux candidats à l'agrégation de Physique et à l'agrégation de Physique et Électricité appliquée, mais également aux enseignants et aux étudiants (non nécessairement électroniciens) des classes préparatoires, des premiers et deuxièmes cycles universitaires, intéressés par la richesse expérimentale de cette discipline.



ISBN 2-7298-1328-4