

# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Avant-propos</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Table des matières</b>                                       | <b>7</b>  |
| <b>1 Supports physiques de communication</b>                    | <b>11</b> |
| 1.1 Naissance des télécommunications                            | 11        |
| 1.1.1 Introduction  | 11        |
| 1.1.2 Aux origines  | 12        |
| 1.1.3 Le télégraphe optique                                     | 13        |
| 1.1.4 Le télégraphe électrique                                  | 14        |
| 1.1.5 Le télégraphe parlant                                     | 15        |
| 1.1.6 Du transistor au circuit intégré                          | 17        |
| 1.1.7 L'émergence des radiocommunications                       | 18        |
| 1.1.8 Transmission des images                                   | 19        |
| 1.1.9 La transmission par fibre optique                         | 20        |
| 1.2 Source d'information et support de transmission             | 22        |
| 1.2.1 Sources d'information                                     | 22        |
| 1.2.2 Supports de transmission                                  | 23        |
| 1.2.3 Des communications au traitement du signal                | 26        |
| 1.2.4 Du système au réseau                                      | 28        |
| 1.3 Conclusion  | 30        |
| <b>2 Modélisation des signaux physiques</b>                     | <b>33</b> |
| 2.1 Systèmes d'unités en physique                               | 33        |
| 2.1.1 Introduction  | 33        |
| 2.1.2 Unités du système international et dérivées               | 34        |
| 2.1.3 Equation aux dimensions                                   | 36        |
| 2.1.4 Constantes physiques fondamentales                        | 37        |
| 2.2 Signal, bruit et information                                | 37        |
| 2.2.1 Signal physique   | 37        |
| 2.2.2 Une première approche du bruit                            | 39        |
| 2.2.3 Information et entropie                                   | 40        |
| 2.3 Modélisation de la réalité physique : les distributions     | 42        |
| 2.4 Représentation et caractérisation des signaux déterministes | 47        |
| 2.4.1 Aspect temporel : puissance et énergie d'un signal        | 47        |
| 2.4.2 Unités logarithmiques - décibels                          | 49        |
| 2.4.3 Modélisation fréquentielle                                | 51        |
| 2.4.4 L'« énigme » des fréquences négatives                     | 54        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.4.5    | Notion de fréquence spatiale . . . . .                         | 57         |
| 2.4.6    | Onde progressive et amplitude complexe . . . . .               | 59         |
| 2.5      | Conclusion . . . . .   | 62         |
| <b>3</b> | <b>Notions de bruit physique</b>                               | <b>69</b>  |
| 3.1      | Introduction . . . . .   | 69         |
| 3.1.1    | Types et sources de bruits . . . . .                           | 70         |
| 3.1.2    | Une première approche . . . . .                                | 70         |
| 3.2      | Modélisation du bruit en physique . . . . .                    | 71         |
| 3.2.1    | Notion de fonction aléatoire . . . . .                         | 71         |
| 3.2.2    | Stationnarité . . . . .  | 73         |
| 3.2.3    | Ergodicité . . . . .   | 75         |
| 3.2.4    | Puissance moyenne d'un signal aléatoire stationnaire . . . . . | 76         |
| 3.2.5    | Bruit blanc gaussien . . . . .                                 | 77         |
| 3.3      | Exemples de bruits physiques . . . . .                         | 79         |
| 3.3.1    | Bruit thermique électronique . . . . .                         | 79         |
| 3.3.2    | Bruit de grenaille électronique . . . . .                      | 82         |
| 3.3.3    | Bruit de photodétection . . . . .                              | 84         |
| 3.4      | Conclusion . . . . .   | 86         |
| <b>4</b> | <b>Filtrage linéaire des signaux physiques</b>                 | <b>93</b>  |
| 4.1      | Introduction . . . . .   | 93         |
| 4.2      | Contexte et définitions . . . . .                              | 94         |
| 4.3      | Modélisation des filtres . . . . .                             | 95         |
| 4.3.1    | Réponse impulsionnelle . . . . .                               | 95         |
| 4.3.2    | Réponse indicielle . . . . .                                   | 99         |
| 4.3.3    | Réponse harmonique . . . . .                                   | 100        |
| 4.4      | Exemples de filtres physiques . . . . .                        | 101        |
| 4.4.1    | Circuit électronique du premier ordre . . . . .                | 101        |
| 4.4.2    | Système mécanique masse-ressort . . . . .                      | 102        |
| 4.5      | Filtres causaux . . . . .                                      | 104        |
| 4.5.1    | Définition . . . . .   | 104        |
| 4.5.2    | Permittivité des milieux diélectriques . . . . .               | 105        |
| 4.6      | Filtrage des signaux à bande étroite . . . . .                 | 108        |
| 4.6.1    | Signaux à bande étroite - enveloppe complexe . . . . .         | 108        |
| 4.6.2    | Retard de phase et de groupe d'un filtre . . . . .             | 110        |
| 4.6.3    | Dispersion chromatique d'une fibre optique . . . . .           | 112        |
| 4.7      | Filtrage des signaux aléatoires . . . . .                      | 113        |
| 4.7.1    | Cas général . . . . .  | 113        |
| 4.7.2    | Cas d'un bruit blanc . . . . .                                 | 115        |
| 4.7.3    | Bande équivalente de bruit . . . . .                           | 115        |
| 4.8      | Conclusion . . . . .   | 116        |
| <b>5</b> | <b>Quadripôles physiques linéaires</b>                         | <b>127</b> |
| 5.1      | Contexte et définitions . . . . .                              | 127        |
| 5.2      | Opérateurs linéaires : les quadripôles . . . . .               | 128        |
| 5.2.1    | Représentation matricielle des quadripôles . . . . .           | 128        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.2.2    | Quadripôles aux hautes fréquences . . . . .                                   | 130        |
| 5.2.3    | Association de quadripôles . . . . .  | 138        |
| 5.2.4    | Détermination des paramètres des matrices $Z, Y, ABCD, H, S$ . . . . .        | 139        |
| 5.2.5    | Caractéristiques particulières des quadripôles passifs . . . . .              | 141        |
| 5.3      | Quadripôle connecté à son environnement extérieur . . . . .                   | 143        |
| 5.3.1    | Immittance, transmittance . . . . .   | 143        |
| 5.3.2    | Détermination de la transmittance en tension dans le formalisme $Z$ . . . . . | 144        |
| 5.3.3    | Gain en puissance . . . . .   | 144        |
| 5.4      | Asservissement : réaction et contre-réaction . . . . .                        | 146        |
| 5.4.1    | Introduction . . . . .  | 146        |
| 5.4.2    | Applications . . . . .  | 148        |
| 5.5      | Conclusion . . . . .  | 151        |
| <b>6</b> | <b>Bruit dans les dispositifs</b>   | <b>159</b> |
| 6.1      | Facteur de bruit . . . . .  | 159        |
| 6.2      | Température équivalente de bruit . . . . .                                    | 161        |
| 6.3      | Facteur de bruit d'un quadripôle actif . . . . .                              | 161        |
| 6.3.1    | Sources de bruit non corrélées du quadripôle actif . . . . .                  | 163        |
| 6.3.2    | Sources de bruit partiellement corrélées du quadripôle actif . . . . .        | 164        |
| 6.4      | Facteur de bruit d'un quadripôle passif à pertes . . . . .                    | 166        |
| 6.5      | Mise en cascade de quadripôles bruyants . . . . .                             | 167        |
| 6.6      | Puissance de bruit captée par une antenne . . . . .                           | 169        |
| 6.7      | Puissance de bruit dans un récepteur optique . . . . .                        | 171        |
| 6.8      | Conclusion . . . . .  | 173        |
| <b>7</b> | <b>Opérateurs paramétriques et opérateurs non-linéaires</b>                   | <b>181</b> |
| 7.1      | Opérateur paramétrique . . . . .  | 181        |
| 7.2      | Opérateur de modulation . . . . .   | 182        |
| 7.2.1    | Généralités . . . . .   | 182        |
| 7.2.2    | Modulations d'amplitude . . . . .   | 183        |
| 7.2.3    | Modulations de fréquence . . . . .  | 188        |
| 7.2.4    | Modulation de phase et d'amplitude-phase . . . . .                            | 192        |
| 7.2.5    | Démodulation d'amplitude . . . . .  | 196        |
| 7.2.6    | Démodulation de fréquence . . . . .   | 198        |
| 7.2.7    | Démodulation de phase . . . . .   | 199        |
| 7.3      | Echantillonnage . . . . .   | 201        |
| 7.4      | Opérateur non-linéaire . . . . .  | 203        |
| 7.4.1    | Définition et modèle mathématique . . . . .                                   | 203        |
| 7.4.2    | Distorsion dans le cas de l'amplificateur . . . . .                           | 204        |
| 7.4.3    | Modèle polynomial à l'ordre 3 . . . . .                                       | 205        |
| 7.5      | Conclusion . . . . .  | 209        |
| <b>8</b> | <b>Bilan de liaison et rapport signal-à-bruit</b>                             | <b>219</b> |
| 8.1      | Introduction . . . . .  | 219        |
| 8.2      | L'émetteur . . . . .  | 220        |
| 8.3      | Le récepteur . . . . .  | 222        |
| 8.4      | Le canal de transmission . . . . .  | 224        |

---

|                      |   |            |
|----------------------|---|------------|
| 8.4.1                | Cas du canal radio-électrique . . . . .   | 225        |
| 8.4.2                | Calcul de la puissance reçue au récepteur dans les conditions d'es-<br>pace libre . . . . . | 229        |
| 8.4.3                | Modèle du canal guidé : la fibre optique . . . . .  | 234        |
| 8.5                  | Calcul du rapport signal-à-bruit en entrée d'un récepteur . . . . .                         | 237        |
| 8.5.1                | Généralités . . . . .   | 237        |
| 8.5.2                | Cas du récepteur radio . . . . .  | 241        |
| 8.5.3                | Cas du récepteur optique . . . . .  | 242        |
| 8.6                  | Conclusion . . . . .  | 244        |
| <b>Annexes</b>       |   | <b>255</b> |
|                      | Annexe 1. Excitation sinusoïdale et notation complexe . . . . .                             | 255        |
|                      | Annexe 2. Transformée de Laplace . . . . .  | 257        |
|                      | Annexe 3. Calcul de la puissance fournie à une charge . . . . .                             | 261        |
|                      | Annexe 4. Calcul de la matrice S d'une ligne de transmission . . . . .                      | 263        |
|                      | Annexe 5. Rayonnement du corps noir - loi de Planck . . . . .                               | 265        |
|                      | Annexe 6. Densité spectrale de puissance d'un signal aléatoire numérique . . . . .          | 267        |
|                      | Annexe 7. Introduction aux distributions . . . . .  | 269        |
| <b>Index</b>         |   | <b>281</b> |
| <b>Bibliographie</b> |   | <b>285</b> |