

**E. Fernandez et M. Mathieu**

**Les faisceaux  
hertziens  
analogiques et  
numériques**



Publié sous l'égide du CNET et de l'ENST

**Dunod**

# Table des matières

## **PARTIE 1.– STRUCTURE GÉNÉRALE ET CARACTÉRISTIQUES RADIOÉLECTRIQUES DES FAISCEAUX HERTZIENS**

---

<b>Chapitre 1 – Structure générale d’une transmission par faisceaux hertziens .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 2 – Les plans de fréquences .....</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Bandes de fréquences attribuées aux faisceaux hertziens en visibilité .....</i>	7
2.2. <i>Etablissement des plans de fréquences – disposition des canaux radioélectriques .....</i>	9
2.3. <i>Principaux plans de fréquences .....</i>	15
2.4. <i>Utilisation des fréquences sur un territoire donné .....</i>	23
<b>Chapitre 3 – Caractéristiques générales des émetteurs-récepteurs de faisceaux hertziens .....</b>	<b>25</b>
3.1. <i>L’émetteur .....</i>	25
3.2. <i>Le récepteur .....</i>	34
3.3. <i>Structure des émetteurs-récepteurs dans les stations relais .....</i>	40
3.4. <i>Emetteurs-récepteurs dont la structure est spécifique de la transmission numérique .....</i>	40
<b>Chapitre 4 – Les antennes de faisceaux hertziens et les liaisons entre les antennes et les émetteurs-récepteurs .....</b>	<b>41</b>
4.1. <i>Définition d’une antenne [1] [2] [3] [4] .....</i>	41
4.2. <i>Paramètres caractérisant une antenne .....</i>	41
4.3. <i>Rayonnement des ouvertures équiphasées planes [5] .....</i>	50
4.4. <i>Divers types d’antennes utilisées dans les faisceaux hertziens .....</i>	59
4.5. <i>Utilisation de radomes .....</i>	74

## LES FAISCEAUX HERTZIENS ANALOGIQUES ET NUMÉRIQUES

4.6. Antenne périscopique .....	74
4.7. Liaisons entre les émetteurs-récepteurs et les antennes .....	77
4.8. Réduction de la longueur des lignes de transmission entre les antennes et les équipements .....	86
Annexe. Rappels théoriques concernant le bruit thermique dans les dipôles et les quadripôles .....	87
<b>Chapitre 5 – Rappels sur la propagation .....</b>	<b>93</b>
5.1. Propagation en espace libre .....	93
5.2. Propagation en visibilité ou proche de la visibilité .....	98
5.3. Protection contre les perturbations dues à la propagation .....	126

## **PARTIE 2. – LES FAISCEAUX HERTZIENS ANALOGIQUES**

---

<b>Chapitre 6 – Considérations générales sur les faisceaux hertziens analogiques de téléphonie, de télévision avec voies son et de radiophonie .....</b>	<b>141</b>
6.1. Introduction .....	141
6.2. Caractéristiques des signaux transmis par les faisceaux hertziens analogiques .....	141
6.3. Structures d'un faisceau hertzien analogique de téléphonie et de télévision avec voies son .....	150
<b>Chapitre 7 – Modulation de fréquence par un signal téléphonique ou par un signal de télévision avec voies son .....</b>	<b>157</b>
7.1. La modulation .....	157
7.2. Choix de la fréquence à moduler et de l'excursion de fréquence ..	172
7.3. Note sur la réalisation d'un modulateur de fréquence .....	173
<b>Chapitre 8 – Démodulation en présence de bruit d'un signal de téléphonie et d'un signal de télévision avec voies son .....</b>	<b>175</b>
8.1. Constitution d'un démodulateur .....	175

8.2. <i>Démodulation</i> .....	176
8.3. <i>Notion de signal test et unités de tension et de puissance en radiophonie</i> .....	194
8.4. <i>Evaluation du rapport signal sur bruit en radiophonie</i> .....	196
8.5. <i>Pourquoi une référence à + 9dB ?</i> .....	196
8.6. <i>Transmission des signaux radiophoniques analogiques de haute qualité sur circuits mixtes analogiques numériques</i> .....	197
<b>Annexe. Puissance de bruit à la sortie d'un démodulateur de fréquence en présence de bruit blanc</b> .....	199

**Chapitre 9 – Distorsions et bruits dans les faisceaux hertziens analogiques** ..... 205

9.1. <i>Généralités</i> .....	205
9.2. <i>Classification des distorsions et conditions de non-distorsions</i> .....	205
9.3. <i>Analyse et classification des distorsions non linéaires du signal en bande de base</i> .....	207
9.4. <i>Distorsion et bruit dans les faisceaux hertziens de téléphonie</i> .....	211
9.5. <i>Distorsions et bruits dans les faisceaux hertziens de télévision (transmission de l'image)</i> .....	214
9.6. <i>Le bruit d'équipement dans les faisceaux hertziens de télévision</i> ..	223
9.7. <i>Règle d'addition des tensions de bruit</i> .....	223
9.8. <i>Les distorsions dans les voies son transmises par faisceau hertzien analogique de télévision ou de radiophonie</i> .....	224
9.9. <i>Bruit d'équipement pour la voie son</i> .....	225
9.10. <i>Règle de sommation des bruits</i> .....	226
9.11. <i>Ordre de grandeur des distorsions d'amplitude et de temps de groupes admises pour les faisceaux hertziens analogiques</i> .....	226
<b>Annexe. Analyse des effets de la distorsion non-linéaire de seconde espèce sur les signaux analogiques et application à la téléphonie des effets des distorsions de première et seconde espèce</b> .....	228

**Chapitre 10 – Les brouillages dans les faisceaux hertziens analogiques** ..... 241

10.1. <i>Introduction</i> .....	241
10.2. <i>Brouillages dus aux signaux parasites émanant des émetteurs et des récepteurs</i> .....	242
10.3. <i>Brouillages dans les liaisons par faisceaux hertziens analogiques</i> .....	244

## LES FAISCEAUX HERTZIENS ANALOGIQUES ET NUMÉRIQUES

10.4. Diminution de l'effet du brouillage par l'emploi de la dispersion d'énergie .....	261
10.5. Effet d'un limiteur lorsqu'un signal et un brouilleur sont présents à son entrée .....	261
10.6. Une perturbation particulière : le transfert tertiaire .....	263

### **Chapitre 11 – Objectifs de qualité et de disponibilité pour les faisceaux hertziens analogiques .....** 265

11.1. Distinction entre qualité et disponibilité .....	265
11.2. Circuits fictifs de référence en téléphonie et en télévision avec voies son .....	266
11.3. Clauses de disponibilité .....	268
11.4. Clauses de qualité pour les faisceaux hertziens de téléphonie .....	270
11.5. Faisceaux hertziens de télévision – Transmission de l'image .....	273
11.6. Objectifs de qualité dans le cas de la transmission du son .....	281

### **Chapitre 12 – Bilans de liaison en transmission analogique .....** 287

12.1. Bilan de liaison dans le cas d'une transmission analogique de téléphonie .....	287
12.2. Bilan de liaison dans le cas de la transmission analogique d'une image de télévision avec voie son .....	294

## **PARTIE 3.– LES FAISCEAUX HERTZIENS NUMÉRIQUES**

---

### **Chapitre 13 – Considérations générales sur les faisceaux hertziens numériques .....** 303

13.1. Introduction .....	303
13.2. Bref historique sur le développement en France des faisceaux hertziens numériques .....	303
13.3. Principaux paramètres caractérisant les faisceaux hertziens numériques .....	307
13.4. Structures générales d'un faisceau hertzien numérique .....	318

<b>Chapitre 14 – Modulations, modulateurs et conditions optimales de transmission</b> .....	<b>325</b>
14.1. Introduction .....	325
14.2. Modulations de phase ou d'amplitude et phase .....	326
14.3. Modulation de fréquence à phase continue .....	344
14.4. Densité spectrale de puissance des signaux modulés .....	346
14.5. Conditions de filtrage optimal dans une transmission numérique de type MDP ou MAQ .....	349
14.6. Conditions de filtrage optimal dans le cas des signaux modulés en fréquence .....	356
<b>Chapitre 15 – Démodulations et démodulateurs</b> .....	<b>357</b>
15.1. Introduction .....	357
15.2. Principe de la démodulation cohérente et de la démodulation différentielle .....	358
15.3. Trois circuits essentiels dans toutes les démodulations .....	359
15.4. Démodulation cohérente .....	366
15.5. Démodulation différentielle .....	393
15.6. Les erreurs apportées par le bruit du canal de transmission .....	397
<i>Annexe 1. Rappels concernant les boucles d'asservissement à verrouillage de phase en régime linéaire</i> .....	415
<i>Annexe 2. Quelques éléments d'information sur la technique des générateurs pseudo-aléatoires</i> .....	418
<b>Chapitre 16 – Dégradation des performances des transmissions MAQ et MDP dues aux défauts des équipements et aux brouillages</b> .....	<b>423</b>
16.1. Introduction .....	423
16.2. Effet d'un filtrage non optimal sur les performances d'une transmission MDP ou MAQ .....	424
16.3. Principales dégradations des performances de transmission liées aux différents sous-ensembles constituant la chaîne d'émission et de réception .....	427
16.4. Utilisation de codes détecteurs et correcteurs d'erreurs pour diminuer l'effet des imperfections .....	431

<i>16.5. Effets du brouillage</i> .....	432
<i>16.6. Cas particulier de la compatibilité analogique-numérique en téléphonie</i> .....	437
<b>Annexe. Modélisation en bande de base des modulations numériques sur fréquence porteuse</b> .....	439
<b>Chapitre 17 – Effet de la propagation sur les transmissions par faisceaux hertziens numériques et systèmes de correction et d'égalisation</b> .....	443
<i>17.1. Introduction</i> .....	443
<i>17.2. Des essais et des constatations</i> .....	444
<i>17.3. Evaluation de l'effet des brouillages résultant d'un découplage de polarisation ou d'un rapport d'isolement insuffisant</i> .....	460
<i>17.4. La correction des effets de la propagation : correcteurs et égaliseurs</i> .....	466
<b>Chapitre 18 – Objectifs de qualité, de disponibilité et de gigue des faisceaux hertziens numériques</b> .....	495
<i>18.1. Introduction</i> .....	495
<i>18.2. Les objectifs de qualité</i> .....	496
<i>18.3. Objectifs de disponibilité</i> .....	510
<i>18.4. La caractérisation de la gigue et du dérapage dans les liaisons numériques</i> .....	511
<b>Chapitre 19 – Bilans de liaison en transmission numérique par faisceaux hertziens</b> .....	523
<i>19.1. Introduction</i> .....	523
<i>19.2. Exemples de calcul de bilans de liaison dans le cas de transmissions numériques liées à l'objectif de qualité</i> .....	524
<i>19.3. Exemple de calcul du bilan de liaison dans le cas des liaisons radioélectriques dont la portée est limitée de façon prépondérante par l'effet de la pluie</i> .....	536
<i>19.4. Calcul de l'effet d'une interférence cofréquence dans un point nodal</i> .....	538

<b>Chapitre 20 – Structures particulières d'émetteurs-récepteurs et systèmes point multipoints à accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) .....</b>	<b>543</b>
20.1. Introduction .....	543
20.2. Systèmes spécifiquement numériques .....	544
20.3. Cas particulier d'une transmission mixte analogique numérique ..	548
20.4. Systèmes point à multipoints utilisant les techniques d'accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) .....	550

#### **PARTIE 4.- SYSTÈMES D'EXPLOITATION DES FAISCEAUX HERTZIENS ANALOGIQUES ET NUMÉRIQUES**

---

<b>Chapitre 21 – Les points d'accès à un faisceau hertzien .....</b>	<b>559</b>
21.1. Introduction .....	559
21.2. Cas des faisceaux hertziens de téléphonie analogique, de télévision avec voie son ou de transmission radiophonique .....	559
21.3. Cas des faisceaux hertziens numériques .....	562
<b>Chapitre 22 – Aides à l'exploitation et techniques d'extraction et d'insertion de signaux dans les terminaux et dans les relais .....</b>	<b>579</b>
22.1. Introduction .....	579
22.2. Le multiplexeur-démultiplexeur d'exploitation .....	581
22.3. Procédure d'interconnection des équipements hertziens dans les relais, transmission d'un multiplex d'exploitation en terminal et en relais dans le cas des faisceaux hertziens analogiques et technique d'extraction -insertion de multiplex téléphoniques .....	584
22.4. Procédure d'interconnection des équipements hertziens dans les relais et transmission d'un multiplex d'exploitation et des signaux en provenance des accès supplémentaires en terminal et en relais dans le cas des faisceaux hertziens numériques .....	590
22.5. Télésurveillance et télécommande .....	595
22.6. La commutation des canaux et la mesure de la qualité et de la disponibilité .....	598
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>613</b>