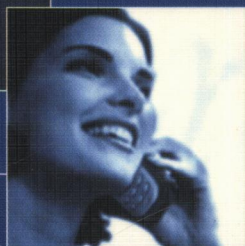


Hervé Sizun



La propagation  
des ondes  
radioélectriques



Springer

# Sommaire

<b>Chapitre 1 : La propagation des ondes radioélectriques</b> .....	<b>1</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>2 - Plan de l'ouvrage</b> .....	<b>5</b>
<b>Chapitre 2 : L'atmosphère terrestre</b> .....	<b>11</b>
<b>1 - Structure</b> .....	<b>11</b>
1.1 - L'homosphère .....	11
1.1.1 - La troposphère .....	12
1.1.2 - La stratosphère .....	12
1.1.3 - La mésosphère .....	12
1.2 - L'hétérosphère .....	12
1.2.1 - La thermosphère .....	12
1.2.2 - L'exosphère .....	12
1.3 - L'ionosphère .....	13
1.3.1 - La Région D .....	14
1.3.2 - La couche E .....	14
1.3.3 - La couche F .....	14
<b>2 - Composition gazeuse</b> .....	<b>16</b>
2.1 - Les constituants majoritaires .....	16
2.2 - Les constituants minoritaires .....	16
2.3 - Les aérosols .....	17
<b>3 - Les paramètres atmosphériques</b> .....	<b>17</b>
3.1 - La pression atmosphérique .....	18
3.2 - La température .....	18
3.3 - L'humidité de l'air .....	18
3.4 - Le point de rosée .....	20
3.5 - La pression partielle de vapeur d'eau .....	20
3.6 - La pression de la vapeur saturante de l'eau (hPa) .....	20
3.7 - La concentration en vapeur d'eau .....	21
<b>4 - Les phénomènes météorologiques</b> .....	<b>21</b>
4.1 - L'insolation .....	21
4.2 - Le rayonnement .....	21
4.3 - L'évaporation .....	21
4.4 - La condensation .....	21
4.5 - La solidification/la fusion .....	22
4.6 - La surfusion .....	22
4.7 - La sublimation .....	22
4.8 - Le vent .....	22
4.9 - La turbulence .....	22

4.10 - L'advection . . . . .	23
4.11 - La subsidence . . . . .	23
4.12 - La nébulosité . . . . .	23
4.13 - Les météores . . . . .	23
4.14 - Le brouillard, la brume . . . . .	24
4.15 - Les précipitations . . . . .	25
4.16 - Les nuages . . . . .	25
4.17 - Les aurores et l'activité aurorale . . . . .	26
<b>5 - Bibliographie . . . . .</b>	<b>26</b>

**Chapitre 3 : Ondes électromagnétiques et caractéristiques de la propagation . . . . . 29**

<b>1 - Généralités sur les ondes électromagnétiques . . . . .</b>	<b>29</b>
1.1 - Paramètres électromagnétiques permettant de caractériser la propagation des ondes . . . . .	29
1.2 - Les équations de MAXWELL . . . . .	30
1.3 - La vitesse de propagation (vitesse de phase) . . . . .	31
1.4 - Longueur d'onde et/ou fréquence . . . . .	32
1.5 - Impédance caractéristique du milieu de propagation . . . . .	32
1.6 - Le vecteur de Poynting . . . . .	33
1.7 - L'indice de réfraction . . . . .	33
1.8 - La polarisation de l'onde . . . . .	34
1.9 - La dépolarisation . . . . .	35
1.10 - La transpolarisation . . . . .	35
1.11 - La discrimination de polarisation ou rapport de découplage (XPD) . . . . .	35
1.12 - L'isolement de polarisation (XPI) . . . . .	36
<b>2 - Les différents mécanismes de propagation . . . . .</b>	<b>36</b>
2.1 - La réflexion . . . . .	37
2.1.1 - La réflexion spéculaire . . . . .	37
2.1.2 - La réflexion diffuse . . . . .	37
2.1.2.1 - Le modèle de LAMBERT . . . . .	39
2.1.2.2 - Le modèle de PHONG . . . . .	39
2.2 - La transmission . . . . .	40
2.3 - La diffraction . . . . .	41
2.4 - La diffusion . . . . .	43
2.5 - Le guidage . . . . .	43
<b>3 - Les principaux phénomènes physiques et dépendance en fréquence . . . . .</b>	<b>43</b>
3.1 - Les différents trajets de propagation . . . . .	43
3.2 - L'ellipsoïde de FRESNEL . . . . .	44
3.3 - L'affaiblissement de propagation en espace libre . . . . .	46
3.4 - Variabilité . . . . .	47
3.5 - Sélectivité en fréquence . . . . .	50
3.5.1 - Les différentes représentations du canal radio mobile . . . . .	50
3.5.1.1 - La représentation temps-retard . . . . .	51
3.5.1.2 - La représentation retard-décalage doppler . . . . .	52
3.5.1.3 - La représentation décalage en fréquence doppler-fréquence . . . . .	52
3.5.1.4 - La représentation affaiblissement-temps . . . . .	52

3.5.2 - Représentation large bande du canal radio mobile . . . . .	52
3.5.2.1 - Densité de puissance moyenne . . . . .	53
3.5.2.2 - Le retard moyen . . . . .	53
3.5.2.3 - La dispersion des retards . . . . .	54
3.5.2.4 - L'intervalle des retards . . . . .	54
3.5.2.5 - La fenêtre des retards . . . . .	55
3.5.2.6 - La bande de cohérence . . . . .	55
<b>4 - Bibliographie . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Chapitre 4 : Les liaisons ionosphériques . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>1 - Introduction . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>2 - La réfraction ionosphérique . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>3 - Trajectographie . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4 - Les prévisions ionosphériques . . . . .</b>	<b>70</b>
4.1 - Les prévisions à long terme . . . . .	70
4.1.1 - Prévision de l'activité solaire . . . . .	70
4.1.2 - Détermination des modes de propagation . . . . .	70
4.1.3 - Détermination de la bande de fréquence utilisable . . . . .	71
4.1.3.1 - Détermination de la fréquence maximale utilisable (MUF) . . . . .	72
4.1.3.1.1 - Détermination de la fréquence réfléchie sur la couche E . . . . .	72
4.1.3.1.2 - Détermination de la fréquence réfléchie sur la couche Es . . . . .	73
4.1.3.1.3 - Détermination de la fréquence réfléchie sur la couche F . . . . .	74
4.1.3.2 - Détermination de la fréquence minimale utilisable (LUF) . . . . .	74
4.1.3.2.1 - Détermination de la LUF d'absorption . . . . .	75
4.1.3.2.2 - Détermination de la LUF d'occultation . . . . .	75
4.1.4 - Les prévisions "Point à Point" . . . . .	76
4.1.5 - Les prévisions de zones géographiques normalisées . . . . .	76
4.2 - Les prévisions à moyen terme . . . . .	77
4.3 - Les prévisions à court terme . . . . .	78
<b>5 - Conclusions . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>6 - Bibliographie . . . . .</b>	<b>79</b>
<b>Chapitre 5 : Les liaisons fixes . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>1 - Introduction . . . . .</b>	<b>81</b>
<b>2 - Les paramètres radioélectriques de l'atmosphère . . . . .</b>	<b>82</b>
2.1 - Indice de réfraction . . . . .	82
2.2 - Indice de réfraction modifié . . . . .	83
2.3 - Atmosphère de référence pour la réfraction . . . . .	84
2.4 - Gradient vertical de l'indice de réfraction . . . . .	85
2.5 - Variabilité de l'indice de réfraction . . . . .	85
2.5.1 - Variations en distance et en temps . . . . .	85
2.5.2 - Influence des conditions atmosphériques . . . . .	86
<b>3 - La réfraction . . . . .</b>	<b>87</b>
3.1 - Trajectoires des ondes radioélectriques . . . . .	87
3.2 - Rayon de courbure . . . . .	88
3.3 - Rayon terrestre fictif . . . . .	89

3.4 - Effet de la variation du coïndice . . . . .	89
3.4.1 - L'infraréfraction . . . . .	90
3.4.2 - La super réfraction . . . . .	90
<b>4 - L'indice de réfraction : résultats expérimentaux . . . . .</b>	<b>91</b>
4.1 - Le coïndice . . . . .	91
4.2 - Le gradient du coïndice . . . . .	92
4.3 - La répartition cumulée du gradient du coïndice . . . . .	92
4.4 - Cartographie . . . . .	93
<b>5 - Modélisation des distributions cumulées du gradient d'indice. . . . .</b>	<b>94</b>
5.1 - Evaluation de la médiane . . . . .	94
5.2 - Pourcentage du temps pour lequel le gradient est inférieur à la médiane. . . . .	95
5.3 - Pourcentage du temps pour lequel le gradient est supérieur à la médiane . . . . .	95
<b>6 - Les principaux mécanismes de propagation . . . . .</b>	<b>96</b>
6.1 - Visibilité directe . . . . .	98
6.2 - Diffusion troposphérique . . . . .	98
6.2.1 - Généralités . . . . .	98
6.2.2 - Fluctuation du champ de diffusion . . . . .	100
6.2.2.1 - Fluctuations saisonnières . . . . .	100
6.2.2.2 - Fluctuations journalières . . . . .	100
6.2.2.3 - Fluctuations rapides . . . . .	100
6.2.3 - Géométrie de la diffusion . . . . .	101
6.2.4 - Affaiblissement de propagation . . . . .	101
6.2.4.1 - Modèles anciens . . . . .	102
6.2.4.2 - Modèles "BTRL-Yeh" . . . . .	102
6.2.4.3 - Autres modèles . . . . .	103
6.3 - Propagation par conduit . . . . .	103
6.4 - Réflexion sur des couches élevées de l'atmosphère . . . . .	106
6.5 - Diffraction . . . . .	107
6.5.1 - Généralités . . . . .	107
6.5.2 - Les différents modèles . . . . .	110
<b>7 - Liaison expérimentale : résultats expérimentaux . . . . .</b>	<b>110</b>
7.1 - Diffusion troposphérique . . . . .	110
7.2 - Conduit . . . . .	111
7.3 - Réflexion sur les couches élevées . . . . .	112
7.4 - Diffraction sphérique et superréfraction . . . . .	112
7.5 - Comportement journalier de l'affaiblissement de propagation . . . . .	113
7.6 - Comportement saisonnier de l'affaiblissement de propagation . . . . .	113
7.7 - Distribution statistique de l'affaiblissement de propagation . . . . .	114
7.7.1 - Distribution annuelle . . . . .	114
7.7.1.1 - Distribution cumulative . . . . .	114
7.7.1.2 - Densité de probabilité . . . . .	114
7.7.2 - Distribution journalière . . . . .	115
7.8 - Les mécanismes de propagation : résultats expérimentaux . . . . .	116
7.8.1 - Expérience trans-Manche . . . . .	116
7.8.2 - Expérience terrestre (Plaine d'Alsace) . . . . .	116
7.8.3 - Résultats expérimentaux . . . . .	116

<b>8 - Influence de la pluie sur la propagation</b> .....	<b>116</b>
8.1 - Le dispositif expérimental .....	116
8.2 - Les résultats .....	117
8.2.1 - Résultats théoriques .....	117
8.2.2 - Résultats statistiques .....	118
8.2.2.1 - Distribution statistique des intensités de pluie .....	118
8.2.2.2 - Affaiblissement de propagation en fonction de l'intensité de pluie .....	118
8.2.2.3 - Similitude en fréquence .....	119
8.2.2.4 - Distribution statistique des affaiblissements .....	120
8.2.2.5 - Caractéristiques dynamiques des affaiblissements .....	121
<b>9 - La modélisation de la propagation</b> .....	<b>123</b>
<b>10 - La prévision des performances</b> .....	<b>125</b>
10.1 - La prévision de la qualité d'une liaison .....	125
10.2 - La notion de signature d'un équipement .....	126
<b>11 - Bibliographie</b> .....	<b>128</b>
<b>Chapitre 6 : Les liaisons par satellite</b> .....	<b>133</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>133</b>
<b>2 - Affaiblissement en espace libre</b> .....	<b>133</b>
<b>3 - Les phénomènes liés aux indices de réfraction</b> .....	<b>134</b>
3.1 - La troposphère .....	134
3.2 - L'ionosphère .....	135
3.2.1 - Cas du milieu non absorbant et non soumis au champ magnétique terrestre .....	135
3.2.2 - Cas du milieu absorbant mais non soumis au champ magnétique terrestre .....	135
3.2.3 - Cas du milieu non absorbant, soumis à l'influence du champ magnétique .....	136
3.2.4 - Cas du milieu absorbant soumis à l'action du champ magnétique terrestre .....	136
3.3 - La réfraction .....	136
3.4 - Retard et distorsion du temps de propagation .....	138
3.5 - Direction d'arrivée .....	140
3.6 - Rotation du plan de polarisation .....	140
3.7 - Les scintillations .....	141
<b>4 - Affaiblissement par les gaz</b> .....	<b>141</b>
<b>5 - Affaiblissement par les hydrométéores</b> .....	<b>143</b>
5.1 - Affaiblissement par les nuages et le brouillard .....	143
5.2 - Affaiblissement par la pluie .....	145
<b>6 - Affaiblissement dû à la dépolarisation</b> .....	<b>148</b>
<b>7 - Affaiblissement de pénétration à l'intérieur d'un bâtiment</b> .....	<b>149</b>
<b>8 - Affaiblissement dû à l'environnement local (bâtiment, végétation)</b> .....	<b>149</b>
8.1 - Effets des bâtiments .....	150
8.2 - Effets de la végétation .....	150
<b>9 - Bibliographie</b> .....	<b>151</b>
<b>Chapitre 7 : Les liaisons radiomobiles</b> .....	<b>155</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>155</b>
<b>2 - Les différents types de modèles</b> .....	<b>157</b>
2.1 - Les modèles théoriques .....	157

2.2 - Les modèles empiriques ou statistiques . . . . .	157
2.3 - Les modèles semi-empiriques. . . . .	158
<b>3 - Les différents usages des modèles . . . . .</b>	<b>158</b>
<b>4 - Les modèles macrocellulaires. . . . .</b>	<b>159</b>
4.1 - Les modèles ruraux . . . . .	159
4.1.1 - Le modèle CAPADOCE . . . . .	159
4.1.2 - Le modèle UHF . . . . .	159
4.2 - Le modèle montagnoux . . . . .	160
<b>5 - Les modèles petites cellules . . . . .</b>	<b>162</b>
5.1 - Le modèle COST-CNET . . . . .	162
5.1.1 - Les pertes liées à la distance entre l'émetteur et le récepteur ( $L_0$ ) . . . . .	163
5.1.2 - Les pertes liées à la diffraction multiple sur les arêtes. . . . .	163
5.1.2.1 - Le modèle COST-231 . . . . .	163
5.1.2.2 - Le modèle FTR&D . . . . .	164
5.1.3 - Les pertes liées à la dernière diffraction et à la réflexion respective- ment sur les immeubles et derrière le mobile . . . . .	165
5.1.3.1 - Le modèle COST231. . . . .	165
5.1.3.2 - Le modèle FTR&D . . . . .	165
5.1.4 - Les pertes liées à la diffraction sur une arête principale. . . . .	166
5.2 - Le modèle de Lee. . . . .	168
<b>6 - Les modèles microcellulaires . . . . .</b>	<b>169</b>
6.1 - Introduction . . . . .	169
6.2 - Le modèle MicroG-CNET . . . . .	169
6.2.1 - Calcul le long des rues . . . . .	169
6.2.2 - Calcul sur le profil . . . . .	171
<b>7 - Modèle à lancer de rayons . . . . .</b>	<b>173</b>
<b>8 - Modèle de pénétration . . . . .</b>	<b>176</b>
<b>9 - Modèles à l'intérieur des bâtiments. . . . .</b>	<b>178</b>
9.1 - Modèles empiriques . . . . .	179
9.2 - Modèles déterministes . . . . .	180
<b>10 - Les modèles large bande . . . . .</b>	<b>180</b>
10.1 - Introduction . . . . .	180
10.2 - Les modèles à trajets . . . . .	181
10.2.1 - Les modèles COST 207 (ou GSM) . . . . .	181
10.2.2 - Les modèles ATDMA . . . . .	185
10.2.3 - Les modèles LUT-R . . . . .	186
10.2.4 - Les modèles CSELT . . . . .	187
10.3 - Les modèles de représentation . . . . .	189
10.3.1 - Les modèles CEPD (Canal Enregistré en Propagation Déterministe)	189
10.3.2 - Les modèles CEPD-SF (Canal Enregistré en Propagation Déter- ministe-Saut de Fréquence) . . . . .	191
10.4 - Les modèles à Rayons . . . . .	193
10.5 - Modèles géométriques . . . . .	194
10.6 - L'utilisation des modèles large bande dans les logiciels de simulation . . . . .	196
<b>11 - Bibliographie . . . . .</b>	<b>197</b>

<b>Annexe 1 : Le soleil et son activité</b> .....	<b>203</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>203</b>
<b>2 - La photosphère</b> .....	<b>204</b>
2.1 - La granulation .....	205
2.2 - Les tâches solaires .....	205
2.3 - Champs magnétiques des tâches .....	206
<b>3 - La chromosphère</b> .....	<b>206</b>
3.1 - Les plages (facules ou flocules) .....	206
3.2 - Les protubérances et les filaments .....	207
3.3 - Les fibriles (ou spicules) .....	207
<b>4 - La couronne</b> .....	<b>207</b>
<b>5 - Le vent solaire</b> .....	<b>208</b>
<b>6 - La configuration de la magnétosphère</b> .....	<b>208</b>
<b>7 - L'activité solaire</b> .....	<b>209</b>
7.1 - Le nombre de Wolf .....	210
7.2 - Le flux radioélectrique sur 10.7 cm (2800 MHz) .....	211
7.3 - Corrélation entre le nombre de Wolf et le flux solaire .....	212
<b>8 - Les éruptions solaires</b> .....	<b>212</b>
8.1 - Les émissions radioélectriques solaires .....	213
8.2 - Les émissions corpusculaires .....	213
8.3 - Les émissions d'ondes de choc .....	213
 <b>Annexe 2 : Les propriétés microphysiques des hydrométéores</b> .....	 <b>215</b>
<b>1 - La pluie, la bruine</b> .....	<b>215</b>
<b>2 - La neige</b> .....	<b>218</b>
<b>3 - La grêle</b> .....	<b>219</b>
<b>4 - Le brouillard</b> .....	<b>220</b>
<b>5 - Bibliographie</b> .....	<b>220</b>
 <b>Annexe 3 : Le spectre des fréquences</b> .....	 <b>223</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>223</b>
<b>2 - Les différentes gammes de fréquences</b> .....	<b>223</b>
2.1 - Ondes ELF (fréquence inférieure à 3 kHz) .....	223
2.2 - Ondes VLF (3-30 kHz) .....	224
2.3 - Ondes LF (30-300 kHz) .....	224
2.4 - Ondes MF (300-3000 kHz) .....	224
2.5 - Ondes HF (3-30 MHz) .....	225
2.6 - Ondes VHF (30-300 MHz) .....	225
2.7 - Ondes UHF (300-3000 MHz) .....	226
2.8 - Ondes SHF (3-30 GHz) .....	226
2.9 - Ondes EHF (30-300 GHz) .....	227
2.10 - Ondes sub-EHF (300-3000 GHz) .....	227
2.11 - Ondes Infra rouge (3-430 THz) et lumineuses (430-860 THz) .....	227
<b>3 - Disponibilité des fréquences IMT-2000</b> .....	<b>228</b>
<b>4 - Bandes utilisées dans les communications par satellites</b> .....	<b>229</b>

<b>5 - Les bandes P, L, S, X, K, Q, V et W</b> .....	<b>229</b>
5.1 - Bande P .....	229
5.2 - Bande L .....	230
5.3 - Bande S .....	230
5.4 - Bande X .....	231
5.5 - Bande K .....	231
5.6 - Bande Q .....	231
5.7 - Bande V .....	232
5.8 - Bande W .....	232
 <b>Annexe 4 : Transpolarisation due à l'atmosphère</b> .....	<b>233</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>234</b>
<b>2 - Les différents modèles de discrimination de polarisation (XPD)</b> .....	<b>234</b>
2.1 - Transpolarisation due à la pluie .....	234
2.1.1 - Le modèle de FLOCK .....	234
2.1.2 - Le modèle UIT-R .....	235
2.1.3 - Le modèle analytique de Dissanayake, Haworth et Watson .....	235
2.1.4 - Le modèle de CHU .....	236
2.1.5 - Le modèle de Stutzman and Runyon .....	236
2.1.6 - Le modèle de Nowland, Sharofsky and Olsen .....	237
2.1.7 - Le modèle de Van de Kamp .....	237
2.2 - Transpolarisation due à des cristaux de glace .....	238
2.3 - Transpolarisation due à la neige .....	238
2.4 - Transpolarisation due aux tempêtes de sable et de poussière .....	238
2.5 - Transpolarisation en atmosphère claire .....	238
<b>3 - Bibliographie</b> .....	<b>240</b>
 <b>Annexe 5 : Les relations de Fresnel</b> .....	<b>241</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>241</b>
<b>2 - Polarisation horizontale</b> .....	<b>243</b>
<b>3 - Polarisation verticale</b> .....	<b>243</b>
<b>4 - Polarisation quelconque</b> .....	<b>243</b>
<b>5 - Réflexion et transmission multiples</b> .....	<b>244</b>
 <b>Annexe 6 : Les perturbations ionosphériques et géomagnétiques associées aux événements solaires</b> .....	<b>247</b>
<b>1 - Introduction</b> .....	<b>247</b>
<b>2 - Les perturbations ionosphériques à début brusque (P.L.D.R.)</b> .....	<b>248</b>
2.1 - Renforcement soudain des atmosphériques (S.E.A.) .....	250
2.2 - Renforcement soudain du signal .....	251
2.3 - Brusque anomalie de phase en VLF .....	252
2.4 - Les évanouissements en ondes courtes (SWF) .....	253
2.5 - Absorption du bruit cosmique (SCNA) .....	255
2.6 - Accroissement soudain de fmin (fréquence minimale observable) .....	256
2.7 - Déviation soudaine de fréquence (SFD) .....	257

<b>3 - Absorption par la calotte polaire</b> .....	<b>258</b>
3.1 - Techniques de mesures radioélectriques .....	258
3.1.1 - Les riomètres .....	258
3.1.2 - Les ionosondes .....	259
3.1.3 - Les expériences de réflexion partielle .....	259
3.1.4 - Les observations en LF et VLF .....	259
3.1.5 - Propagation oblique en HF .....	260
3.1.6 - Les sondeurs à diffusion incohérente .....	260
3.2 - Classification des PCA .....	260
<b>4 - Les perturbations géomagnétiques</b> .....	<b>261</b>
<b>5 - Les orages ionosphériques</b> .....	<b>264</b>
5.1 - Les orages récurrents .....	264
5.2 - Les orages à début brusque .....	264
<b>6 - Les aurores</b> .....	<b>265</b>
<b>7 - Conclusion</b> .....	<b>266</b>
<b>8 - Bibliographie</b> .....	<b>267</b>
<b>Annexe 7 : Les moyens d'investigation de l'ionosphère</b> .....	<b>269</b>
1 - Sondage vertical en contre bas .....	269
2 - Sondage vertical en contre haut .....	270
3 - Le sondage par rétrodiffusion .....	270
4 - Le sondeur à diffusion incohérente .....	271
5 - Bibliographie .....	271
<b>Annexe 8 : Le champ magnétique terrestre</b> .....	<b>273</b>
1 - Le champ magnétique terrestre .....	273
2 - Les indices magnétiques .....	275
2.1 - L'indice K .....	275
2.2 - L'indice Kp .....	275
2.3 - L'indice Ap .....	275
2.4 - L'indice AA .....	275
2.5 - L'indice Dst .....	275
2.6 - L'indice AE .....	275
3 - Bibliographie .....	276
<b>Annexe 9 : L'affaiblissement par la pluie</b> .....	<b>277</b>
1 - Introduction .....	277
2 - Les modèles statistiques d'affaiblissement par la pluie .....	277
2.1 - Le modèle d'Assis-Einlofi .....	277
2.2 - Le modèle Brésilien .....	279
2.3 - Le modèle de Bryant .....	279
3 - Bibliographie .....	280
<b>Annexe 10 : L'affaiblissement par la végétation</b> .....	<b>281</b>
1 - Introduction .....	281
2 - Les différents modèles .....	281

2.1 - Le Modèle EXD (Exponential Decay Model) . . . . .	281
2.2 - Le Modèle MED (Modified Exponential Decay) . . . . .	282
2.3 - Le modèle de RICE . . . . .	283
2.4 - Le modèle de l'UIT)R . . . . .	283
2.5 - Le modèle de Al Nuaimi Hammoudeh . . . . .	283
2.6 - Le modèle de Stephens et al. . . . .	284
2.7 - Les modèles de transfert radiatif. . . . .	284
2.7.1 - Le transfert radiatif . . . . .	284
2.7.2 - Les paramètres de Stokes . . . . .	286
2.7.3 - Les paramètres de Stokes modifiés . . . . .	286
2.7.4 - La matrice de diffusion D . . . . .	287
2.7.5 - La matrice de Mueller M . . . . .	287
2.7.6 - La matrice de phase P . . . . .	287
2.7.7 - La matrice d'extinction $k_e$ . . . . .	288
2.7.8 - La diffusion d'une onde par une particule et ses approximations . . . . .	288
2.7.8.1 - L'approximation de l'optique physique . . . . .	288
2.7.8.2 - L'approximation de l'optique physique. . . . .	288
2.8 - Le modèle MIMICS (Michigan Microwave scattering model) . . . . .	288
2.9 - Le modèle Karam et Fung . . . . .	289
<b>3 - Expérimentations . . . . .</b>	<b>289</b>
3.1 - Liaison fixe . . . . .	290
3.1.1 - Description de l'expérimentation . . . . .	290
3.1.2 - Résultats. . . . .	290
3.2 - Mesures mobiles . . . . .	292
3.2.1 - Description de l'expérience. . . . .	292
3.2.2 - Résultats. . . . .	294
<b>4 - Bibliographie . . . . .</b>	<b>296</b>
<b>Annexe 11 : Les méthodes de calcul de la diffraction. . . . .</b>	<b>297</b>
<b>1 - Diffraction sur une arête mince (diffraction de Fresnel) . . . . .</b>	<b>297</b>
<b>2 - Diffraction sur plusieurs arêtes minces . . . . .</b>	<b>301</b>
2.1 - Méthodes théoriques . . . . .	301
2.1.1 - Méthode de Millington . . . . .	301
2.1.2 - Méthode de Vogler . . . . .	302
2.2 - Méthodes approximatives. . . . .	303
2.2.1 - Méthode de Epstein-Peterson . . . . .	303
2.2.2 - Méthode de Shibuya . . . . .	304
2.2.3 - Méthode de Deygout. . . . .	306
2.2.4 - Méthode de Giovanelli. . . . .	309
<b>3 - Diffraction sur arrondis . . . . .</b>	<b>311</b>
3.1 - Méthode de Wait . . . . .	311
3.2 - Méthode de l'IUT-R [IUT-R, 2000] . . . . .	313
<b>4 - Bibliographie . . . . .</b>	<b>314</b>
<b>Annexe 12 : Mesures radio-mobiles . . . . .</b>	<b>315</b>
<b>1 - Mesures de champ . . . . .</b>	<b>315</b>
<b>2 - Mesures de réponses impulsionnelles . . . . .</b>	<b>316</b>

3 - Mesures d'angle d'arrivée . . . . .	317
4 - Le sondeur AMERICC . . . . .	318
5 - Bibliographie . . . . .	319
<b>Annexe 13 : Les angles d'arrivée.</b> . . . . .	<b>321</b>
1 - Intérêt des directions d'arrivée . . . . .	321
2 - Détermination expérimentale des angles d'arrivée. . . . .	321
3 - La modélisation mathématique du signal . . . . .	322
4 - Les méthodes de détermination des directions d'arrivée . . . . .	323
4.1 - Les méthodes linéaires . . . . .	323
4.1.1 - Analyse de Fourier associée à l'inversion de Wiener . . . . .	323
4.1.2 - La reconstruction de phase . . . . .	325
4.2 - Les méthodes non linéaires ou à haute résolution . . . . .	327
4.2.1 - La méthode MUSIC . . . . .	327
4.2.1.1 - Le moyennage des échantillons . . . . .	328
4.2.1.2 - Transformation Beamspace . . . . .	329
4.2.1.2 - Estimation de la direction d'arrivée (DOA) de sources cohérentes . . . . .	330
4.2.1.4 - MULTiple Signal Classification (MUSIC) . . . . .	331
4.2.2 - La technique basée sur l'estimation du maximum de vraisemblance . . . . .	332
5 - Bibliographie . . . . .	333
<b>Annexe 14 : Les bases de données géographiques</b> . . . . .	<b>335</b>
1 - Introduction . . . . .	335
2 - Le Modèle Numérique de Terrain . . . . .	335
3 - Le sursol délocalisé. . . . .	336
4 - Les données localisées . . . . .	337
4.1 - Les contours de bâtiment . . . . .	338
4.2 - Les axes . . . . .	339
4.3 - Le pointé 25 m. . . . .	339
4.4 - Le sursol localisé 100 m. . . . .	340
5 - La hauteur des bâtiments . . . . .	341
6 - La largeur des rues . . . . .	342
7 - Les données à l'intérieur des bâtiments . . . . .	342
8 - Evolutions futures . . . . .	342
9 - Bibliographie . . . . .	342
<b>Annexe 15 : Les méthodes de calcul du champ électromagnétique suite à son interaction avec une structure.</b> . . . . .	<b>343</b>
1 - Introduction . . . . .	343
2 - La méthode de l'Optique Géométrique (OG) . . . . .	343
3 - La Théorie Géométrique de la Diffraction (TGD) . . . . .	344
4 - La théorie uniforme de la diffraction (TUD). . . . .	346
5 - La méthode FDTD . . . . .	347
6 - La méthode des moments. . . . .	349
7 - Bibliographie . . . . .	351