

I – LA PROPAGATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

I.1 - Propriétés d'une onde électromagnétique plane	1
I.1.1 Equation d'onde ou de propagation	1
I.1.2 Vitesse de propagation	3
I.1.3 Densité surfacique de puissance ou puissance surfacique	3
I.1.4 Champ créé en espace libre par une antenne isotrope	4
I.2 Ouverture rayonnante	5
I.2.1 Expression du gain	5
I.2.2 Diagramme de rayonnement	7
I.2.3 Champ proche et champ lointain d'une ouverture rayonnante	10
I.2.4 Aire effective	12
I.2.5 Effet pelliculaire	12
I.3 Caractéristiques générales des antennes	13
I.3.1 Expression du gain et de l'angle d'ouverture	13
I.3.2 Gabarits de rayonnement	14
I.4 Affaiblissement de propagation et champ électromagnétique reçu	17
I.4.1 Affaiblissement de propagation	17
I.4.2 Champ électromagnétique reçu	18
I.5 Réflecteur et répéteur passif	19
I.5.1 Réflecteur en champ lointain	19
I.5.2 Répéteur passif en champ lointain	23
I.5.3 Réflecteur en champ proche (Périscope)	25
I.6 Modèle de propagation	27
I.6.1 Diffraction sphérique	27
I.6.2 Ellipsoïde de FRESNEL	27
I.7 Réflexion et réfraction	28
I.7.1 Lois générales de la réflexion et de la réfraction	28
I.7.2 Facteur de divergence	34
I.7.3 Facteur de rugosité	35
I.7.4 Facteur de limitation de la zone de réflexion	36
I.8 Influence de l'atmosphère	36
I.8.1 Coïndice de réfraction	36
I.8.2 Gradient vertical de l'indice de réfraction	37
I.8.3 Courbure des rayons radioélectriques	52
I.8.4 Rayon terrestre équivalent	52
I.8.5 Variation des angles de départ et d'arrivée des rayons	56

1.8.6	Valeur minimale positive du facteur K	57
1.8.7	Les conduits troposphériques	59
1.8.7.1	Conditions d'apparition des conduits troposphériques	59
1.8.7.2	Trajectoire des rayons dans un conduit troposphérique	61
1.9	Propagation par diffraction	62
1.9.1	Diffraction sur Terre sphérique	63
1.9.2	Diffraction sur une arête en lame de couteau	67
1.9.3	Diffraction sur un obstacle unique de sommet arrondi	68
1.9.4	Diffraction sur deux arêtes isolées	69
1.9.5	Cas général	71
1.10	Effets des réflexions sur la propagation	72
1.10.1	Réflexion sur le sol	72
1.10.1.1	Incidence sur le champ électromagnétique reçu	74
1.10.1.2	Retard différentiel	75
1.10.1.3	Franges d'interférence	75
1.10.1.4	Influence des variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère	75
1.10.1.5	Intégration des franges d'interférence par l'antenne	79
1.10.2	Réflexions multiples	79
1.10.3	Onde stationnaire	81
1.11	Affaiblissement par les gaz de l'atmosphère	83
1.11.1	Liaisons terrestres	83
1.11.2	Liaisons Terre-espace	85
1.12	Atténuation et transpolarisation par les hydrométéores	87
1.12.1	Atténuation par la pluie	87
1.12.1.1	Trajet terrestre	89
1.12.1.2	Trajet Terre-espace	91
1.12.1.3	Diversité d'emplacement	92
1.12.1.4	Affaiblissement dû aux gaz, aux nuages et au brouillard	97
1.12.2	Transpolarisation par les hydrométéores	98
1.12.2.1	Polarisation d'une onde électromagnétique	98
1.12.2.2	Transpolarisation	99
1.13	Influence de l'ionosphère	102
1.13.1	Scintillation	102
1.13.2	Rotation de FARADAY	103
1.13.3	Retard de propagation	104
1.14	Rayonnement thermique	105
1.14.1	Origine du rayonnement thermique	105
1.14.2	Propagation du rayonnement thermique	105
1.14.3	Corps noir	106
1.14.4	Corps gris	108
1.15	Bruit thermique	109
1.15.1	Origine du bruit thermique	109
1.15.2	Tension de bruit thermique	109
1.15.3	Analogie entre rayonnement thermique et bruit thermique	110

I.15.4	Température apparente de bruit	112
I.15.5	Facteur de bruit	112
I.15.6	Température équivalente de bruit	114
I.15.7	Bruit rayonné	116
I.15.8	Sources de bruit externes	116
I.15.8.1	Principales sources de bruit naturelles et artificielles	118
I.15.8.2	Emission radioélectrique due aux gaz de l'atmosphère	119
I.15.8.3	Emission radioélectrique due aux hydrométéores	120
I.15.8.4	Bruit externe total	120
I.16	Lois de probabilité	121
I.16.1	Généralités	121
I.16.2	Loi de distribution de GAUSS	121
I.16.3	Loi de distribution de RAYLEIGH	123

II – LES LIAISONS EN VISIBILITE

II.1	Eléments d'ingénierie d'une liaison à vue directe	125
II.1.1	Généralités	125
II.1.2	Etablissement du profil de la liaison	125
II.1.2.1	Détermination des azimuts et de la distance	125
II.1.2.2	Données nécessaires pour l'établissement du profil	126
II.2	Architecture d'une liaison à vue directe (méthode interférométrique)	127
II.2.1	Tracé du profil	127
II.2.2	Critères de dégagement	128
II.2.3	Détermination de la ligne de régression et de la rugosité du terrain	128
II.2.4	Détermination des zones de réflexion	129
II.2.5	Retard différentiel	129
II.2.6	Atténuation différentielle	129
II.2.7	Réception en diversité d'espace et/ou de fréquence	130
II.2.8	Exemple de liaison	131
II.2.9	Résultats de mesure en conditions de guidage	141
II.2.10	Diversité angulaire	147
II.2.11	Pointage des antennes	148
II.2.11.1	Centrage de la source d'illumination	148
II.2.11.2	Prépointage en azimut	148
II.2.11.3	Pointage final de l'antenne	149
II.2.11.3.1	Pré-positionnement en site	149
II.2.11.3.2	Pointage final en azimut	150
II.2.11.3.3	Pointage final en site	151
II.2.11.3.4	Vérification du plan de polarisation	151
II.2.11.4	Tenue aux conditions climatiques	151
II.3	Bilan de liaison	152
II.3.1	Généralités	152
II.3.2	Objectifs de performance	152
II.3.3	Bilan de transmission	155
II.3.3.1	Puissance médiane reçue et marge uniforme	155
II.3.3.2	Puissance de seuil du récepteur	156

II.4	Méthode de prévision.....	157
II.4.1	Facteur géoclimatique.....	157
II.4.2	Inclinaison du trajet.....	158
II.4.3	Pourcentage de temps d'évanouissement.....	159
II.4.4	Méthode pour tous les pourcentages de temps d'évanouissement.....	159
II.4.5	Prévision des interruptions dues aux évanouissements sélectifs et non sélectifs.....	160
II.4.6	Méthode de prédiction des renforcements de champ.....	161
II.4.7	Passage du mois quelconque à l'année moyenne.....	163
II.4.8	Prévision des interruptions dans les systèmes numériques sans diversité.....	163
II.4.8.1	Signature du récepteur.....	164
II.4.8.2	Probabilité d'interruption.....	166
II.4.9	Prévision des interruptions dans les systèmes numériques avec diversité.....	167
II.4.9.1	Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité d'espace.....	167
II.4.9.2	Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité de fréquence.....	169
II.4.9.3	Prévision des interruptions en diversité double d'espace et de fréquence (système à deux récepteurs).....	169
II.4.9.4	Prévision des interruptions en diversité quadruple d'espace et de fréquence (système à quatre récepteurs).....	170
II.4.9.5	Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité angulaire.....	170
II.4.10	Prévision de la probabilité totale d'interruption.....	171
II.4.10.1	Prévision de la probabilité d'interruption due aux évanouissements par temps clair.....	172
II.4.10.2	Prévision de la probabilité d'interruption due à la pluie.....	172
II.4.10.3	Prévision de la probabilité d'interruption due à la réduction du découplage de polarisation croisée.....	172
II.4.10.3.1	Réduction du découplage de polarisation croisée par temps clair.....	172
II.4.10.3.2	Réduction du découplage de polarisation croisée due aux précipitations.....	173
II.4.11	Effet dû à un perturbateur.....	174
II.4.11.1	Dégradation du seuil du récepteur par un perturbateur.....	175
II.4.11.2	Mesure du niveau du perturbateur et du seuil dégradé.....	177
II.4.12	Effet dû à un obstacle.....	178
II.4.13	Exemple de bilan de liaison.....	179
II.4.14	Evolution de la méthode de prévision.....	183

III – LES LIAISONS TRANSHORIZON

III.1	Eléments d'ingénierie d'une liaison transhorizon.....	185
III.1.1	Généralités.....	185
III.1.2	Etablissement du profil d'une liaison transhorizon.....	186
III.2	Méthode de prévision.....	187
III.2.1	Affaiblissement médian de propagation à long terme.....	187
III.2.1.1	Distance angulaire et angles de site à l'horizon radioélectrique.....	187
III.2.1.2	Fonction d'affaiblissement.....	188
III.2.1.3	Affaiblissement par l'atmosphère.....	190
III.2.1.4	Gain en fréquence.....	190
III.2.1.5	Rendement de diffusion.....	192
III.2.2	Variation de l'affaiblissement médian à long terme sur l'année.....	192

III.2.2.1	Hauteur effective des antennes.....	194
III.2.2.2	Distance d'occultation	194
III.2.2.3	Distance équivalente	194
III.2.2.4	Affaiblissement non dépassé pendant $p\%$ du temps	195
III.2.2.5	Probabilité de service	203
III.3	Bilan de transmission	203
III.3.1	Perte de couplage d'antenne	204
III.3.2	Perte de directivité transversale	206
III.3.2.1	Pointage manuel des antennes.....	210
III.3.2.2	Pointage automatique des antennes.....	211
III.3.2.2.1	Processus par approximations successives	212
III.3.2.2.2	Processus par itération	214
III.3.3	Fréquence des évanouissements rapides	214
III.3.4	Réception en diversité	215
III.3.4.1	Diversité d'espace.....	219
III.3.4.2	Diversité de fréquence	219
III.3.4.3	Diversité quadruple d'espace et de fréquence	219
III.3.4.4	Diversité angulaire	220
III.3.4.5	Diversité de polarisation	221
III.3.5	Disponibilité de la liaison	221
III.3.6	Bande de cohérence du canal	222
III.3.6.1	Méthode de SUNDE	223
III.3.6.2	Modèle de RICE	223
III.3.6.3	Modèle de COLLIN	224
III.3.7	Composition de l'onde diffusée et de l'onde diffractée	225
III.3.8	Influence des réflexions sur le sol	226
III.3.9	Passage de l'année moyenne au mois quelconque	227
III.4	Exemples de liaisons transhorizon	228
III.4.1	Liaison en diffraction sur arête	228
III.4.2	Liaison en double diffraction	231
III.4.3	Liaison en diffusion sur Terre sphérique	234
III.5	Autres modèles de prédiction	237
III.5.1	Méthode II de l'UIT-R.....	237
III.5.2	Méthode I de l'UIT-R	238
III.5.3	Méthode III de l'UIT-R	240

IV – LES LIAISONS SPATIALES

IV.1	Eléments d'ingénierie d'une liaison par Satellite.....	247
IV.1.1	Généralités	247
IV.1.2	Géométrie d'une liaison avec un Satellite géostationnaire.....	247
IV.1.2.1	Distance de géosynchronisme	248
IV.1.2.2	Détermination de l'azimut	248
IV.1.2.3	Détermination de la distance.....	249
IV.1.2.4	Détermination de l'élévation	249
IV.1.2.5	Détermination de l'angle vu par le Satellite	250
IV.1.2.6	Limite de visibilité optique	250
IV.1.2.7	Angle de polarisation	250

IV.2 Architecture d'une liaison par Satellite	250
IV.2.1 Caractéristiques générales du répéteur	251
IV.2.1.1 Zones de couverture	251
IV.2.1.2 Bande du répéteur	251
IV.2.1.3 Facteur de mérite	252
IV.2.1.4 Amplificateur de puissance	252
IV.2.1.4.1 Amplificateur à TOP	254
IV.2.1.4.2 Amplificateur à état solide	256
IV.2.1.5 Flux saturant	257
IV.2.1.6 PIRE à saturation	257
IV.2.1.7 Bruit ramené à l'entrée du répéteur	258
IV.2.2 Caractéristiques générales d'une Station Terrienne	258
IV.2.2.1 Sources de bruit du système de réception	258
IV.2.2.2 Température de bruit de l'antenne	259
IV.2.2.3 Température totale de bruit du système de réception	260
IV.3 Bilan de liaison	261
IV.3.1 Chemin descendant	261
IV.3.2 Allocation de ressource du répéteur	261
IV.3.3 Chemin montant	261
IV.3.4 Rapport signal à bruit total	262
IV.3.5 Densité spectrale du répéteur	263
IV.3.6 Taux d'occupation du répéteur par la porteuse	263
IV.3.7 Antenne de réception optimale	263
IV.3.8 Caractéristiques générales du signal	264
IV.3.8.1 Relations générales	264
IV.3.8.2 Types de modulation	265
IV.3.8.3 Caractéristique E_b/N_0	265
IV.3.8.4 Codage correcteur d'erreurs	266
IV.3.8.5 Densité spectrale de puissance	268
IV.3.9 Objectif de qualité de la liaison	270
IV.3.10 Techniques d'accès multiple	270
IV.3.10.1 Accès multiple par répartition en fréquence (AMRF)	270
IV.3.10.2 Accès multiple par répartition dans le temps (AMRT)	271
IV.3.10.3 Accès multiple par répartition en code (AMRC)	271
IV.3.11 Effet DOPPLER-FIZEAU	272
IV.4 Méthode de prévision	274
IV.4.1 Phénomènes qui entrent en jeu dans la propagation Terre-espace	274
IV.4.1.1 Affaiblissement atmosphérique	274
IV.4.1.2 Effets dus aux hydrométéores	274
IV.4.1.3 Baisse de gain de l'antenne	274
IV.4.1.4 Effets dus à la scintillation troposphérique et aux trajets multiples	274
IV.4.1.5 Effets dus à l'ionosphère	276
IV.4.1.6 Sources de bruit externes	276
IV.4.2 Prédiction de la probabilité totale d'interruption	276
IV.4.3 Exemple de bilan de liaison	277

V – LES LIAISONS OPTIQUES

V.1 Les liaisons par fibres optiques	279
V.1.1 Généralités	279
V.1.2 Propagation guidée.....	279
V.1.3 Fibres monomodes	280
V.1.3.1 Caractéristiques géométriques	281
V.1.3.2 Caractéristiques de propagation	281
V.1.3.2.1 Pertes par diffusion	281
V.1.3.2.2 Pertes par absorption	281
V.1.3.2.3 Dispersion chromatique	282
V.1.3.2.4 Dispersion de polarisation modale	284
V.1.3.2.5 Effets non linéaires	284
V.1.3.2.6 Pertes de courbure	284
V.1.3.2.7 Pertes de couplage	284
V.1.3.3 Bilan de liaison.....	285
V.1.3.3.1 Puissances minimale et maximale de réception	285
V.1.3.3.2 Atténuation due à la dispersion	285
V.1.3.3.3 Exemple de bilan de liaison.....	286
V.1.3.4 Techniques de multiplexage.....	287
V.1.3.5 Autres types de fibres optiques	288
V.2 Les liaisons optiques en espace libre	288
V.2.1 Généralités	288
V.2.2 Propagation des ondes lumineuses dans l'atmosphère	288
V.2.3 Propriétés des faisceaux gaussiens.....	291
V.2.4 Liaisons spatiales optiques.....	292

VI – L'INFRASTRUCTURE DES STATIONS DE TELECOMMUNICATIONS

VI.1 Eléments d'ingénierie d'une Station de Télécommunications	293
VI.1.1 Généralités	293
VI.1.2 Types de Stations de Télécommunications	293
VI.2 Conditions d'environnement.....	294
VI.2.1 Caractéristiques climatiques	294
VI.2.2 Propriétés de l'air humide	295
VI.2.2.1 Composition de l'air	295
VI.2.2.2 Enthalpie de l'air humide.....	296
VI.2.2.3 Chaleur sensible et chaleur latente	297
VI.2.2.4 Détermination des caractéristiques de l'air humide.....	298
VI.2.2.5 Variation des caractéristiques de l'air humide avec l'altitude	299
VI.2.2.6 Pressions statique et dynamique	300
VI.2.2.7 Relation entre pression, volume et température.....	301
VI.3 Systèmes de ventilation et de climatisation	302
VI.3.1 Ventilation directe.....	302
VI.3.2 Echangeurs de chaleur	305
VI.3.2.1 Echangeur air-air	305
VI.3.2.2 Echangeur calorifique.....	305

VI.3.2.3	Echangeur hydronique	306
VI.3.2.4	Système à évaporation d'eau	308
VI.3.2.5	Système VAPOTRON	309
VI.3.2.6	Système de conditionnement d'air	310
VI.4	Processus d'échange thermique	312
VI.4.1	Conduction	312
VI.4.2	Convection	312
VI.4.3	Rayonnement	313
VI.4.4	Coefficient de transfert global	313
VI.5	Abris de télécommunications	314
VI.5.1	Abris de surface à intégration thermique	314
VI.5.1.1	Abris à intégration thermique passif	318
VI.5.1.2	Abris à intégration thermique actif	320
VI.5.1.3	Abris hydronique	321
VI.5.2	Abris enterré	323
VI.5.2.1	Exemple d'abris enterré à ventilation directe	325
VI.5.2.2	Exemple d'abris merlonné à échangeur caloduc	327
VI.6	Energie	328
VI.6.1	Détermination de la consommation en énergie	328
VI.6.2	Energie secondaire	328
VI.6.3	Energie primaire	329
VI.6.3.1	Groupe électrogène	330
VI.6.3.2	Système photovoltaïque	331
VI.6.3.3	Eolienne	334
VI.6.3.4	Générateur thermoélectrique	334
VI.6.3.5	Générateur à combustion externe	334
VI.6.3.6	Pile à combustible	334
VI.6.3.7	Combinaison de différentes sources	334
VI.7	Disponibilité globale des Systèmes de Télécommunications	335
VI.7.1	Disponibilité liée à la propagation	335
VI.7.2	Disponibilité due au matériel	335