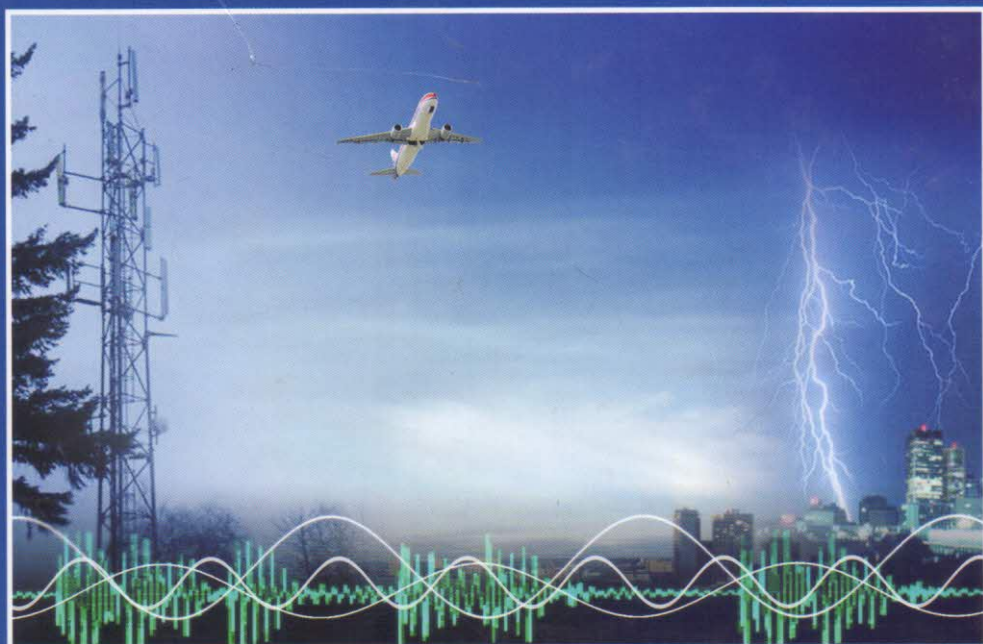


collection technique et scientifique des télécommunications



Compatibilité électromagnétique 1

des concepts de base aux applications

sous la direction de

Pierre Degauque

Ahmed Zeddou

hermes

Lavoisier

TABLE DES MATIÈRES

Préface	15
Flavio CANAVERO	
Introduction	19
Pierre DEGAUQUE et Ahmed ZEDDAM	
Chapitre 1. Sources de bruit	31
Jean-Claude ALLIOT	
1.1. Sources de bruits naturels	31
1.1.1. Champ magnétique terrestre et orages magnétiques	32
1.1.1.1. Origine du champ magnétique terrestre	32
1.1.1.2. Caractéristiques du champ magnétique terrestre	34
1.1.1.3. La magnétosphère	37
1.1.2. Champ électrique dit « de beau temps »	38
1.1.2.1. Conductivité de l'atmosphère	38
1.1.2.2. Origine et caractéristiques du champ électrique	40
1.1.3. Courants et champs telluriques	42
1.1.4. Bruits cosmiques	42
1.1.5. Bruit atmosphérique	44
1.1.6. Décharges orageuses	46
1.1.6.1. Origine et nature des décharges orageuses	47
1.1.6.2. Décharges négatives entre nuage et sol	52
1.1.6.3. Décharges positives entre nuage et sol	65
1.1.6.4. Décharges intra- et internuages	68
1.1.6.5. Mécanismes mis en jeu lors du foudroiement en vol d'un aéronef	71

1.1.6.6. Modélisation du rayonnement de décharges se produisant entre un nuage et le sol	78
1.1.6.7. Critères permettant de définir l'activité orageuse sur un site donné	102
1.1.6.8. Autres types de décharges atmosphériques.	110
1.1.7. Décharges électrostatiques	113
1.1.7.1. Electrification des avions évoluant dans la basse atmosphère	113
1.1.7.2. Décharges électrostatiques sur satellites	118
1.2. Sources de bruits artificiels	119
1.2.1. Sources non intentionnelles	120
1.2.1.1. Appareils industriels, scientifiques et médicaux (ISM)	121
1.2.1.2. Appareils de traitement de l'information (ATI)	123
1.2.1.3. Appareils électrodomestiques et appareils similaires.	124
1.2.1.4. Systèmes d'allumage des véhicules à moteur à explosion.	125
1.2.1.5. Alimentations à découpage et convertisseurs continu/continu	126
1.2.1.6. Réseaux haute et basse tension.	127
1.2.1.7. Effet couronne sur les lignes de transport d'énergie	127
1.2.1.8. Tubes fluorescents et enseignes lumineuses	130
1.2.1.9. Traction électrique	132
1.2.1.10. Oscillateurs locaux des récepteurs radioélectriques.	137
1.2.1.11. Systèmes à très haute tension (THT) des visuels et récepteurs de télévision.	137
1.2.1.12. Flashes électroniques.	138
1.2.1.13. Briquets et allume-gaz piézoélectriques.	139
1.2.1.14. Systèmes de commutation électromécanique.	139
1.2.1.15. Moteurs à collecteurs.	139
1.2.1.16. Émetteurs radioélectriques	139
1.2.1.17. Brouilleurs	157
1.2.2. Sources intentionnelles.	158
1.2.2.1. Armes à micro-ondes de forte puissance	158
1.2.2.2. Brouilleurs militaires	161
1.2.2.3. Sources d'origine nucléaire.	162
1.3. Conclusion	180
1.4. Bibliographie.	184
Chapitre 2. Couplage aux structures filaires	195
Pierre DEGAUQUE et Jean-Philippe PARMANTIER	
2.1. Introduction.	195
2.2. Distribution du courant sur un fil isolé dans l'espace	198
2.2.1. Équation intégrale du courant.	198

2.2.2. Principe de résolution par la méthode des moments.	201
2.3. Le couplage champ câble : de la théorie de Maxwell à celle des lignes de transmission	204
2.3.1. Remarque préliminaire sur les courants de mode commun et de mode différentiel	204
2.3.2. Obtention de l'équation des lignes à partir de l'équation intégró-différentielle du courant.	206
2.3.3. Obtention de l'équation des lignes de transmission à partir des équations de Maxwell	207
2.3.3.1. Rappel du schéma équivalent d'une ligne de transmission.	207
2.3.3.2. Equations différentielles reliant courants et tensions au champ perturbateur	208
2.3.3.3. Remarque : cas d'un plan de masse de conductivité finie comme le sol	212
2.3.4. Cas particulier d'une ligne de longueur infinie excitée par une onde plane	213
2.3.5. Introduction des conditions aux limites et influence des fils de connexion de masse.	214
2.3.6. Remarques sur la définition des couplages par champ électrique et (ou) magnétique et recensement des modèles équivalents	218
2.3.6.1. Principes de base	218
2.3.6.2. Modèle de Taylor.	219
2.3.6.3. Modèle d'Agrawal	220
2.3.6.4. Modèle de Rachidi	222
2.3.6.5. Synthèse des trois types de couplages dans les modèles de Taylor et d'Agrawal	222
2.3.7. Exemple d'application : distribution du courant sur une ligne courte.	223
2.4. Théorie des lignes de transmission multifilaires	225
2.4.1. Equations différentielles des courants et tensions	225
2.4.2. Traitement modal de la ligne multifilaire	227
2.4.2.1. Cas particulier : ligne de transmission multifilaire en milieu homogène	227
2.4.2.2. Définition des ondes de propagation	229
2.4.2.3. Equation de propagation sur la ligne multifilaire	230
2.4.3. Construction des matrices impédances et admittances linéiques	231
2.4.3.1. Techniques d'assemblage des matrices de lignes	232
2.4.3.2. Formules analytiques simples	235
2.5. Les blindages.	244
2.5.1. Définition de l'impédance et de l'admittance de transfert	244
2.5.2. Impédance de transfert d'un câble coaxial à blindage homogène.	248

2.5.3. Câbles coaxiaux à blindages tressés	249
2.5.3.1. Diffraction par les ouvertures	250
2.5.3.2. Diffusion à travers le blindage tressé	252
2.5.3.3. Discussion sur la formulation de l'impédance et de l'admittance de transfert	252
2.5.4. Rubans conducteurs hélicoïdaux	254
2.5.5. Câbles multifilaires blindés	255
2.5.6. Introduction des câbles blindés dans le formalisme des lignes de transmission multifilaires	258
2.5.6.1. Modèle de ligne de transmission multifilaire pour un seul blindage	258
2.5.7. Configurations à multiples blindages	265
2.5.8. Application du formalisme « champ-câble » à un câble multifilaire blindé	267
2.6. Lignes de transmission dans le domaine temporel	268
2.6.1. Introduction : principes de base.	268
2.6.2. Principe de modélisation dans le domaine temporel	269
2.6.2.1. Méthode aux différences finies.	269
2.6.2.2. Méthode des ondes mobiles	273
2.7. Formalisme des réseaux de lignes de transmission multiconducteurs.	285
2.7.1. Justification du besoin d'un formalisme de réseau	285
2.7.2. Terminologie topologique	287
2.7.3. Equation de propagation sur les tubes	290
2.7.4. Répartition des ondes aux jonctions	290
2.7.4.1. Equation de répartition sur les jonctions	290
2.7.4.2. Relation entre les matrices S et les matrices de circuits électriques	291
2.7.4.3. Paramètres-S topologiques de jonctions particulières	295
2.7.4.4. Cas particulier des paramètres-S hyperfréquences	296
2.7.5. L'équation BLT	300
2.7.6. L'expression des tensions et des courants.	301
2.8. Exemples d'applications de la théorie des réseaux.	302
2.8.1. Application à un câble coaxial : généralités	302
2.8.1.1. Analyse topologique : découpage en deux domaines.	305
2.8.1.2. Réseau topologique associé.	306
2.8.2. Cas réel : résolution numérique.	315
2.8.3. Emission électromagnétique	321
2.8.3.1. Position du problème dans le cadre d'une problématique CEM.	321
2.8.3.2. Principe de calcul des champs émis par un câblage sur un plan de masse parfaitement conducteur	321
2.8.3.3. Application à un câble blindé.	323
2.9. Bibliographie.	329

Annexes du chapitre 2	335
Annexe A2.1. Calcul de la matrice des coefficients de propagation dans le cas du traitement modal de la ligne multifilaire . . .	335
Annexe A2.2. Techniques d'assemblage de lignes : calcul de la matrice impédance d'une ligne multifilaire	339
Annexe A2.3. Techniques d'assemblage de lignes : calcul de la matrice admittance d'une ligne multifilaire	341
Annexe A2.4. Construction des matrices de paramètres linéiques dans les configurations de blindage multiple	343
Annexe A2.5. Exemple de construction des matrices du réseau.	349
Annexe A2.6. Interprétation physique des tensions et courants obtenus en extrémité d'un câble coaxial.	353
A2.6.1. Interprétation physique du courant sur le blindage du câble coaxial	353
A2.6.1.1. Approximation basse fréquence	353
A2.6.1.2. Approximation haute fréquence	354
A2.6.2. Interprétation physique des tensions et courants sur l'âme du câble coaxial.	355
A2.6.2.1. Approximation basse fréquence	355
A2.6.2.2. Approximation haute fréquence	356
Annexe A2.7. Construction de la matrice des paramètres-Y d'un multiport constitué de plusieurs admittances en parallèle	357
 Chapitre 3. Pénétration et couplage dans les structures tridimensionnelles	359
Vincent GOBIN et Jean-Philippe PARMANTIER	
3.1. Modèles approchés ou modèles numériques ?	359
3.2. Pénétration dans les structures.	362
3.2.1. Premier exemple de couplage magnétique	362
3.2.2. Premier exemple de couplage électrique	363
3.2.3. Pénétration à travers les ouvertures	365
3.2.3.1. Diffraction par une ouverture dans un plan infini parfaitement conducteur.	365
3.2.3.2. « Dipôles équivalents » au rayonnement des petites ouvertures	366
3.2.3.3. Polarisabilités	369
3.2.3.4. Domaine de validité de l'approximation dipolaire	371
3.2.3.5. Diffraction par une ouverture dans une cavité	372
3.2.3.6. Câble et « fil mince »	372
3.2.3.7. Couplage sur un câble à travers une ouverture	373
3.2.3.8. Exemple 1 : couplage sur un câble à travers une ouverture dans un plan infini	374

3.2.3.9. Exemple 2 : couplage sur un câble à travers une ouverture dans la paroi d'un cylindre	375
3.2.3.10. Généralisation des calculs de couplage à travers des ouvertures	377
3.2.3.11. Synthèse sur les couplages par les ouvertures dans les parois conductrices des blindages	379
3.2.4. Pénétration à travers les matériaux	380
3.2.4.1. Impédance de surface	380
3.2.4.2. « Efficacité de blindage »	382
3.2.4.3. Efficacité de blindages de forme canonique à un champ magnétique quasi statique	383
3.2.4.4. Interprétation physique de l'efficacité des blindages homogènes vis-à-vis d'un champ magnétique quasi statique	385
3.2.4.5. Efficacité d'un câble blindé vis-à-vis d'un champ magnétique quasi statique	388
3.2.4.6. Efficacité d'un blindage à un champ électrique quasi statique	390
3.2.4.7. Blindage en haute fréquence et « effet de peau »	392
3.2.4.8. Autres paramètres influençant la qualité des blindages	395
3.2.4.9. Prévoir l'efficacité d'un blindage	395
3.3. Introduction aux méthodes numériques appliquées à la CEM	396
3.3.1. La méthode PEEC	396
3.3.2. La méthode des différences finies dans le domaine temporel	398
3.3.2.1. Schéma de Yee et condition de stabilité	399
3.3.2.2. Conditions aux limites et couches absorbantes	400
3.3.2.3. Dispersion et dissipation	401
3.3.2.4. Modèles de détails plus petits que la maille	402
3.3.2.5. Coût numérique	403
3.3.3. La méthode TLM (<i>transmission line matrix</i>) dans le domaine temporel	405
3.3.3.1. Algorithme de la TLM	406
3.3.3.2. Sources d'erreurs de la TLM	408
3.3.3.3. Modèles complémentaires	408
3.3.3.4. Coût numérique	408
3.3.4. La méthode des volumes finis dans le domaine temporel	409
3.3.5. La méthode des éléments finis	412
3.3.6. La méthode intégrale	415
3.3.6.1. Sources équivalentes	415
3.3.6.2. Diffraction par une ouverture	417
3.3.6.3. Diffraction par un objet conducteur	417
3.3.6.4. Résolution d'une équation intégrale	418
3.3.6.5. Fonctions de bases	419

3.3.6.6. EFIE, MFIE et CFIE	419
3.3.6.7. Coût numérique.	420
3.3.6.8. La révolution FMM	420
3.3.7. Vers d'autres méthodes	423
3.4. Analyse topologique d'un système	423
3.4.1. Topologie qualitative : conception électromagnétique	423
3.4.2. Topologie quantitative : l'équation BLT	425
3.4.3. La topologie électromagnétique comme guide à la modélisation électromagnétique.	428
3.4.3.1. Exemple d'analyse topologique sur un avion	428
3.4.3.2. Chaînage de calculs guidés par la topologie électromagnétique	430
3.4.4. Enchaînement de calculs reposant sur une analyse topologique.	433
3.4.4.1. Approche idéale	433
3.4.4.2. Critique de l'approche idéale.	434
3.4.4.3. Approche pratique	437
3.5. Exemple d'applications sur systèmes complexes.	440
3.5.1. Modélisation du couplage sur câblage prototype de l'avion EMPTAC.	441
3.5.1.1. Principe de modélisation du câblage	441
3.5.1.2. Exemple d'application 1 : analyse de l'efficacité de blindage amenée par un surblindage de câble	444
3.5.1.3. Exemple d'application 2 : injection locale sur l'ensemble du réseau prototype.	449
3.5.2. Modélisation du couplage sur câblage au travers d'une ouverture de petites dimensions	452
3.5.3. Modélisation du couplage sur câblage prototype d'un véhicule automobile	458
3.6. Bibliographie.	463
Index	473
Sommaire du volume 2	477