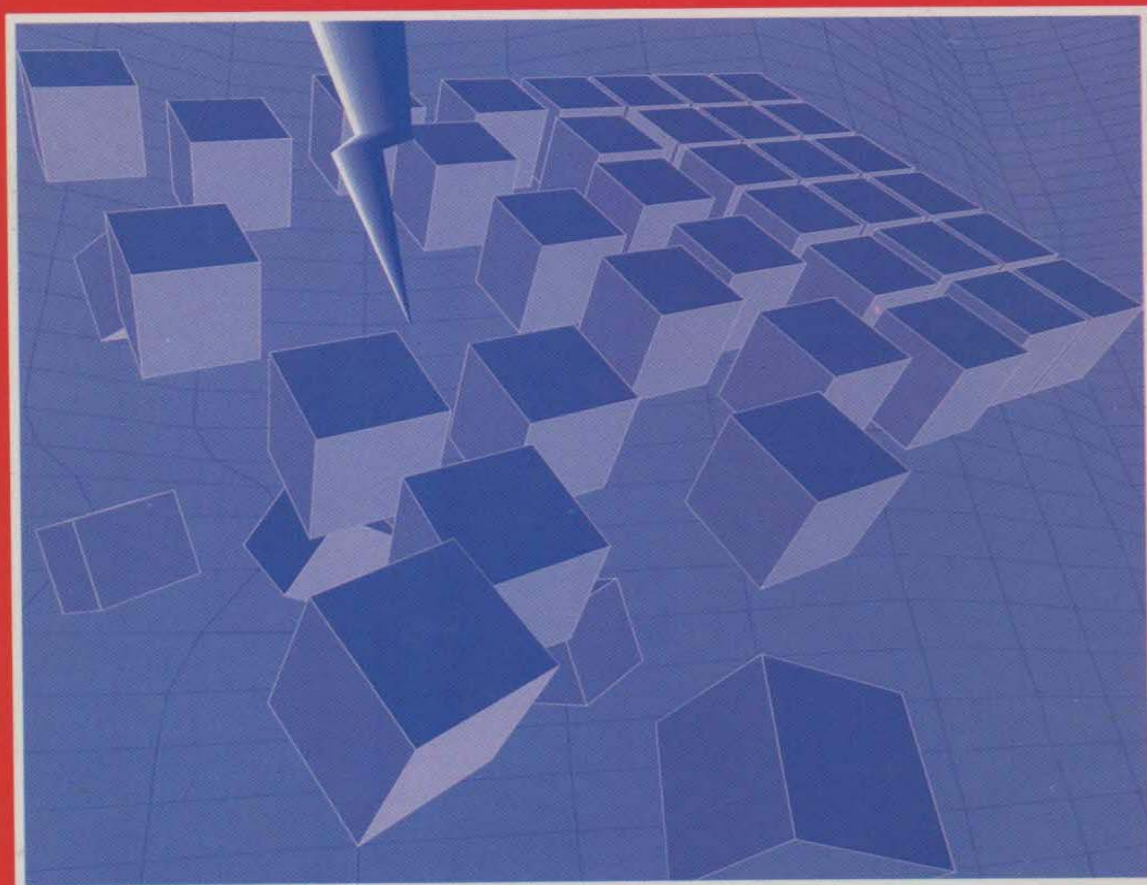


**Sous la direction de  
P. Degauque et J. Hamelin**

# **Compatibilité électromagnétique**

**bruits et perturbations radioélectriques**



Publié sous l'égide du CNET et de l'ENST et avec le concours du Ministère de la Recherche et de la Technologie  
et du Centre National de la Recherche Scientifique

**Dunod**

# Table des matières

<b>Préface</b> .....	<b>V</b>
<b>Avant-propos</b> .....	<b>IX</b>
<b>Principaux symboles mathématiques utilisés</b> .....	<b>XI</b>
<b>Chapitre 1 — Domaine de la compatibilité électromagnétique</b> ...	<b>1</b>
1.1. <i>Introduction</i> .....	<b>1</b>
1.2. <i>Sources de perturbation</i> .....	<b>2</b>
1.3. <i>Couplages</i> .....	<b>6</b>
1.4. <i>Moyens de mesures et de test</i> .....	<b>11</b>
1.5. <i>Conclusion</i> .....	<b>13</b>
<b>Chapitre 2 — Sources de bruit naturel</b> .....	<b>15</b>
2.1. <i>Nature des sources de bruits naturels</i> .....	<b>15</b>
2.1.1. Champs magnétiques au sol et orages magnétiques .....	15
2.1.2. Champ électrique de beau temps, circuit électrique global .	19
2.1.3. Activité orageuse et bruit atmosphérique .....	23
2.1.4. Courants et champs telluriques .....	32
2.1.5. Bruits cosmiques .....	34
2.1.6. Conclusion .....	34
2.2. <i>Phénomènes orageux</i> .....	<b>35</b>
2.2.1. Développement du nuage d'orage .....	35
2.2.2. Processus d'électrisation et répartition des charges .....	36
2.2.3. La décharge — processus de l'éclair .....	41
2.2.4. Caractéristiques des courants de foudre .....	47
2.2.5. Modèle électrogéométrique .....	59
2.2.6. Déclenchement artificiel de la foudre .....	61

## LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

2.3. <i>Champs rayonnés par une décharge orageuse</i> .....	64
2.3.1. Arcs en retour .....	65
2.3.2. Intranuage .....	78
2.3.3. Phénoménologie, rayonnement VHF-UHF .....	84
2.4. <i>Courants et champs rayonnés par une décharge orageuse, modèles théoriques</i> .....	93
2.4.1. Présentation des modèles existants .....	93
2.4.2. Relation courant/champs rayonnés .....	94
2.4.3. Conclusion .....	101
2.5. <i>Moyens de détection et de localisation</i> .....	105
2.5.1. Introduction .....	105
2.5.2. Système de localisation utilisant les atmosphériques .....	106
2.5.3. Détection de la signature temporelle des arcs en retour et localisation .....	108
2.5.4. Détection du rayonnement VHF/UHF des précurseurs, localisation trois dimensions .....	112
2.6. <i>Conclusion générale</i> .....	114
<i>Bibliographie</i> .....	114
<b>Chapitre 3 — Bruit industriel</b> .....	<b>121</b>
3.1. <i>Introduction</i> .....	121
3.2. <i>Caractérisation des signaux perturbateurs</i> .....	122
3.2.1. Classification des signaux perturbateurs en fonction de leur spectre en fréquence .....	122
3.2.2. Grandeurs électromagnétiques mesurées et unités usuelles .....	123
3.2.3. Méthodes d'identification des perturbations .....	124
3.3. <i>Sources de bruit et perturbations radioélectriques</i> .....	127
3.3.1. Émetteurs radioélectriques .....	129
3.3.2. Sources non intentionnelles de rayonnement .....	137
3.4. <i>Effets des signaux perturbateurs</i> .....	151
3.4.1. Distribution statistique du niveau de bruit .....	151
3.4.2. Brouillage des récepteurs radioélectriques .....	153
3.4.3. Détermination des valeurs limites de rayonnement parasite des équipements rayonnant non intentionnellement ..	155

3.4.4. Perturbation par rayonnement d'un équipement non radioélectrique .....	156
3.5. Conclusion .....	157
Références bibliographiques .....	158
Annexe .....	159
<b>Chapitre 4 — Sources d'origine nucléaire .....</b>	<b>161</b>
4.1. <i>L'explosion nucléaire à l'origine d'une impulsion électromagnétique</i> .....	<b>161</b>
4.1.1. Les explosions nucléaires et leurs effets .....	161
4.1.2. Les rayonnements nucléaires et leurs interactions avec le milieu environnant .....	162
4.1.3. La création de courants électriques et d'un milieu ionisé ..	165
4.2. <i>Impulsion électromagnétique générée par une explosion nucléaire en atmosphère homogène</i> .....	<b>167</b>
4.2.1. La zone source, la densité de courant, l'ionisation .....	167
4.2.2. La création de l'impulsion électromagnétique .....	168
4.3. <i>Impulsion électromagnétique générée par une explosion nucléaire de surface</i> .....	<b>173</b>
4.3.1. La zone source, les densités de courant électrique, l'ionisation .....	173
4.3.2. La création de l'impulsion électromagnétique .....	174
4.4. <i>Impulsion électromagnétique générée par une explosion exoatmosphérique</i> .....	<b>179</b>
4.4.1. La zone source .....	179
4.4.2. Les densités de courant électrique et l'ionisation .....	182
4.4.3. La création de l'impulsion électromagnétique — cas d'une géométrie plane .....	184
4.4.4. Répartition de l'impulsion électromagnétique au sol par rapport au point zéro d'explosion .....	188
4.5. <i>Aperçu sur l'effet SGEMP et l'effet TREE</i> .....	<b>190</b>

## LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

4.6. <i>Les protections spécifiques</i> .....	192
4.6.1. Généralités sur la protection d'un matériel ou d'une installation .....	192
4.6.2. Notions de protection contre l'IEM, le SGEMP, le TREE ..	193
<i>Références bibliographiques</i> .....	195
<b>Chapitre 5 — Gestion du spectre des fréquences et réglementation des radiocommunications</b> .....	<b>197</b>
5.1. <i>Généralités</i> .....	197
5.1.1. Considérations générales sur le spectre des fréquences ....	197
5.1.2. Historique sommaire des services de radiocommunications .....	198
5.1.3. Compatibilité et nécessité d'une réglementation des radiocommunications .....	199
5.2. <i>Classification des services de radiocommunications</i> .....	200
5.2.1. Services de terre et services spatiaux .....	201
5.2.2. Le service fixe .....	201
5.2.3. Le service mobile .....	201
5.2.4. Le service de radiodiffusion .....	202
5.2.5. Services divers .....	203
5.2.6. Les utilisations industrielles, scientifiques et médicales (ISM) .....	203
5.3. <i>Utilisation du spectre des fréquences par les services de radiocommunications</i> .....	203
5.3.1. Utilisation liée aux caractéristiques de la propagation .....	203
5.3.2. Problèmes de compatibilité .....	208
5.3.3. Nécessité d'une répartition du spectre entre services .....	209
5.4. <i>Institutions internationales</i> .....	210
5.4.1. L'Union internationale des Télécommunications .....	210
5.4.2. Les Conférences administratives .....	211
5.4.3. Le comité international d'enregistrement des fréquences ..	211
5.4.4. Les comités consultatifs internationaux .....	212
5.5. <i>La réglementation internationale des radiocommunications, le règlement des radiocommunications</i> .....	212
5.5.1. Le règlement des radiocommunications .....	212
5.5.2. Tableau d'attribution des bandes de fréquences .....	213

5.5.3. Méthodes d'assignation des fréquences ; rôle de l'IFRB . . . . .	214
5.5.4. Contrôle international des émissions . . . . .	215
<b>5.6. Réglementation nationale des radiocommunications . . . . .</b>	<b>216</b>
5.6.1. Relations de l'administration française avec les organismes internationaux . . . . .	216
5.6.2. Le Comité de Coordination des Télécommunications . . . . .	217
5.6.3. Rôle des administrations chargées de la gestion du spectre des fréquences . . . . .	217
5.6.4. Partage du spectre entre les divers utilisateurs . . . . .	218
<b>5.7. Protection des radiocommunications contre les perturbations pro- duites par des équipements autres que des émetteurs radioélec- triques . . . . .</b>	<b>219</b>
5.7.1. Limitation des perturbations radioélectriques produites par des équipements autres que des émetteurs radio . . . . .	220
5.7.2. Méthodes de mesure du pouvoir perturbateur des équipe- ments . . . . .	223
5.7.3. Immunité des équipements . . . . .	224
5.7.4. Méthode de mesure de l'immunité électromagnétique . . . . .	224
<i>Références bibliographiques . . . . .</i>	<b>225</b>
<b>Chapitre 6 — Caractérisation des câbles blindés . . . . .</b>	<b>227</b>
6.1. Introduction . . . . .	227
6.2. Méthodes de mesure de l'impédance et de l'admittance de trans- fert d'un câble coaxial . . . . .	253
6.2.1. Principe de la mesure . . . . .	233
6.2.2. Les méthodes de mesure usuelles . . . . .	239
6.2.3. Méthodes de mesure perfectionnées . . . . .	243
6.2.4. Méthodes utilisant des courants transitoires . . . . .	248
6.2.5. Limitation de la mesure aux fréquences élevées . . . . .	249
6.3. Couplage électromagnétique dans les blindages et modélisation de l'impédance et de l'admittance de transfert . . . . .	251
6.3.1. Câbles coaxiaux à blindage homogène . . . . .	251
6.3.2. Câbles coaxiaux à blindages tressés . . . . .	252
6.3.3. Rubans conducteurs hélicoïdaux . . . . .	263

## LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

6.4. <i>Les câbles coaxiaux à blindages multiples</i> .....	266
6.4.1. Influence du mode de connexion des blindages .....	271
6.4.2. Mise en œuvre des blindages ferromagnétiques .....	273
6.4.3. Technologie des câbles à blindages multiples .....	275
6.5. <i>Les câbles multifilaires blindés</i> .....	278
6.5.1. Généralités .....	278
6.5.2. Impédances de transfert pour le mode commun et pour le mode différentiel .....	280
6.5.3. Mesure de l'impédance de transfert pour le mode différentiel .....	285
6.5.4. Influence du conducteur de référence sur l'efficacité de blindage des câbles multifilaires .....	288
6.6. <i>Le coefficient réducteur d'un blindage</i> .....	290
6.7. <i>Conclusion</i> .....	294
<i>Références bibliographiques</i> .....	297

## **Chapitre 7 — Couplage aux lignes et aux câbles en présence du sol ou d'un plan de masse** .....

303

7.1. <i>Introduction</i> .....	303
7.2. <i>Couplage entre une onde et une ligne aérienne parallèle à un plan de masse parfaitement conducteur</i> .....	305
7.2.1. Équations différentielles des courants et tensions .....	308
7.2.2. Cas particulier d'une ligne de longueur infinie .....	311
7.2.3. Introduction des conditions aux limites et influence des fils de descente .....	312
7.2.4. Exemple montrant l'influence de la modification de longueur de la ligne .....	315
7.2.5. Remarques concernant l'approche basée sur les couplages « magnétique » et « électrique » .....	320
7.2.6. Distribution de courant sur des câbles courts .....	323
7.2.7. Distribution du courant sur un long câble .....	326
7.3. <i>Couplage à un câble coaxial</i> .....	330
7.3.1. Introduction .....	330
7.3.2. Cas de câbles courts .....	331
7.3.3. Cas de câbles longs .....	332

7.4. <i>Discontinuités de blindage et connecteurs</i> .....	335
7.4.1. Discontinuité de passage avec contact électrique .....	336
7.4.2. Discontinuité terminale avec contact électrique .....	337
7.4.3. Discontinuité sans contact électrique .....	339
7.4.4. Conclusion .....	345
7.5. <i>Couplage à une ligne parallèle à la surface du sol</i> .....	345
7.5.1. Introduction .....	345
7.5.2. Détermination des exposants linéiques de propagation ....	346
7.5.3. Distribution du courant le long d'une ligne excitée en un point.....	354
7.5.4. Courant induit par une onde plane incidente .....	356
7.6. <i>Couplage à une ligne enterrée</i> .....	363
7.6.1. Détermination des exposants linéiques.....	363
7.6.2. Ligne de transmission équivalente .....	366
7.6.3. Excitation de la ligne par une onde plane .....	369
7.7. <i>Conclusion</i> .....	372
<i>Références bibliographiques</i> .....	373
<b>Chapitre 8 — Couplage d'une onde plane à des antennes filaires</b>	<b>377</b>
8.1. <i>Introduction</i> .....	377
8.2. <i>Équations intégrales du courant induit dans le domaine fréquentiel</i> .....	378
8.2.1. Équation en champ électrique et magnétique .....	379
8.2.2. Approximation des fils minces et traitement des singularités .....	383
8.3. <i>Résolution par la méthode des moments</i> .....	388
8.3.1. Principe de la méthode.....	389
8.3.2. Choix usuel des fonctions de base et de test.....	390
8.3.3. Matrice impédance .....	393
8.3.4. Pas de discrétisation, convergence .....	396
8.4. <i>Exemples d'application</i> .....	399
8.4.1. Antenne isolée dans l'espace .....	399
8.4.2. Antenne en présence d'un sol parfaitement conducteur ...	406
8.4.3. Antenne comportant une ou plusieurs charges localisées ..	408

## LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

8.5. Antenne présentant des jonctions, des discontinuités de rayon — rayon équivalent d'un pylône . . . . .	409
8.5.1. Jonctions et discontinuités de rayon . . . . .	409
8.5.2. Rayon équivalent à un pylône . . . . .	414
8.6. Antennes en présence d'un sol réel imparfaitement conducteur ou pénétrant dans le sol . . . . .	416
8.6.1. Formalisme exact pour une structure filiforme quelconque au-dessus du sol . . . . .	417
8.6.2. Algorithmes rapides pour le calcul des intégrales de Sommerfeld d'une structure filiforme au-dessus du sol . . . . .	418
8.6.3. Formalisme exact pour un fil pénétrant dans le sol . . . . .	423
8.6.4. Algorithmes rapides pour le calcul des intégrales de Sommerfeld relatives à un fil pénétrant dans le sol . . . . .	425
8.6.5 Applications numériques . . . . .	426
8.7. Grandes structures filaires — méthode mixte . . . . .	428
8.7.1. Description de la méthode . . . . .	429
8.7.2. Applications numériques . . . . .	435
8.8. Étude dans le régime temporel . . . . .	439
8.8.1. Équation intégrale dans le domaine temporel . . . . .	441
8.8.2. Approximation des fils minces . . . . .	443
8.8.3. Algorithme de résolution numérique . . . . .	444
8.8.4. Avantages et inconvénients de l'approche temporelle . . . . .	446
8.8.5. Exemple d'application . . . . .	448
Annexe . . . . .	448
Références bibliographiques . . . . .	449

## **Chapitre 9 — Pénétration dans les structures tridimensionnelles et couplages . . . . . 455**

9.1. Approche du problème — topologie . . . . .	455
9.2. Détermination des champs et des courants sur les surfaces externes des structures . . . . .	456
9.2.1. Solutions exactes et approches analytiques . . . . .	456
9.2.2. Équations intégrales en régime harmonique . . . . .	460
9.2.3. Équations intégrales en régime temporel . . . . .	471
9.2.4. Méthode des éléments finis . . . . .	480

9.2.5. Méthode de développement des singularités (MDS) .....	482
9.2.6. Méthode aux différences finies .....	483
9.2.7. Résolution par des programmes d'analyse de circuits .....	485
9.2.8. Méthode « hautes fréquences » .....	486
9.2.9. Méthode « basses fréquences » .....	487
9.2.10. Résumé des différentes méthodes .....	487
<b>9.3. Pénétration par les ouvertures .....</b>	<b>488</b>
9.3.1. Méthodes de calcul .....	488
9.3.2. Dipôles équivalents .....	489
<b>9.4. Pénétration à travers une paroi homogène .....</b>	<b>491</b>
9.4.1. Effet de peau .....	491
9.4.2. Exemple de la coque sphérique homogène .....	491
9.4.3. Pénétration dans d'autres formes de coques .....	497
9.4.4. Pénétration dans un bâtiment .....	499
<b>9.5. Conclusion .....</b>	<b>501</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>501</b>
<b>Chapitre 10 — Mesures en compatibilité électromagnétique .....</b>	<b>507</b>
<b>10.1. Introduction .....</b>	<b>507</b>
<b>10.2. Maîtrise de l'environnement électromagnétique .....</b>	<b>509</b>
10.2.1. Site de mesure en espace libre .....	509
10.2.2. Chambre anechoïde blindée .....	511
10.2.3. Galerie souterraine à faible surtension .....	514
10.2.4. Cellule TEM .....	514
10.2.5. Enceinte à modes mélangés .....	518
<b>10.3. Mesures en conduction .....</b>	<b>519</b>
10.3.1. Mesures, en régime harmonique, des perturbations conduites émises par un appareil .....	519
10.3.2. Mesure, en régime harmonique, de la susceptibilité par conduction d'un appareil .....	524
10.3.3. Mesures, en régime transitoire, des perturbations conduites émises par un appareil .....	526
10.3.4. Mesures, en régime transitoire, de la susceptibilité par conduction d'un appareil .....	526

## LA COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

10.4. Mesures en rayonnement .....	529
10.4.1. Rappel sur le comportement des antennes .....	529
10.4.2. Mesures de perturbations rayonnées : antennes utilisées .....	530
10.4.3. Mesures de perturbations rayonnées : exemples de procédures .....	534
10.4.4. Mesures de susceptibilité par rayonnement .....	535
10.5. Autres types d'essais .....	538
10.5.1. Méthodes d'injection de courants .....	538
10.5.2. Tenue aux décharges électrostatiques .....	540
10.5.3. Injecteur de charges pour essai au sol des avions .....	541
10.5.4. Vérification des métallisations et mesure des résistances de surface .....	542
10.5.5. Mesure de l'impédance des prises de terre .....	543
10.5.6. Mesure de l'efficacité de matériaux pour blindages .....	546
10.6. Modélisation à échelle réduite .....	547
10.6.1. Introduction .....	547
10.6.2. Approche théorique .....	548
10.6.3. Approche expérimentale .....	550
10.7. Compléments .....	553
10.7.1. Perturbations à bande étroite, perturbations à bande large .....	553
10.7.2. Comparaison des techniques de mesure en régime fréquentiel et des techniques de mesure en régime temporel .....	556
10.7.3. Estimation des erreurs .....	558
10.7.4. Choix de l'appareillage .....	560
10.8. Conclusion .....	561
Références bibliographiques .....	562
<b>Chapitre 11 — Moyens de simulation et d'analyse de systèmes soumis aux effets des perturbations électromagnétiques impulsionnelles .....</b>	<b>567</b>
11.1. Simulateurs d'impulsions électromagnétiques .....	568
11.1.1. Dispositifs générateurs de champs stationnaires .....	568
11.1.2. Simulateurs rayonnants .....	569
11.1.3. Simulateurs à ondes guidées .....	575
11.1.4. Simulateurs hybrides .....	593

## TABLE DES MATIÈRES

11.2. <i>Injecteurs d'impulsions de tension et de courant</i> .....	596
11.2.1. Injection à faible niveau .....	597
11.2.2. Injection à niveau moyen .....	597
11.2.3. Injection à fort niveau et très fort niveau .....	602
11.3. <i>Instrumentation destinée à la métrologie des effets des perturbations électromagnétiques</i> .....	616
11.3.1. Capteurs de champs électromagnétiques et sondes de mesure .....	617
11.3.2. Moyens de transmission de mesures .....	638
11.3.3. Moyens d'acquisition de mesures .....	642
11.4. <i>Conclusion</i> .....	644
<i>Références bibliographiques</i> .....	645