

Table des matières

Avant-propos	11
Chapitre 1. Introduction à la CEM	17
1.1. Interférences électromagnétiques	17
1.2. Source, victime et chemin de couplage	18
1.3. Unités usuelles en CEM	19
1.4. Conversions élémentaires temps/fréquence	22
1.5. Cas de l'impulsion isolée	25
1.6. Interférences intra- et intersystèmes	28
Chapitre 2. Principales sources de perturbations environnantes	31
2.1. Champs créés par des émetteurs radio	31
2.2. Champs créés par les émetteurs radars	34
2.3. Perturbations existant sur le secteur	35
2.3.1. Les fluctuations lentes (MD)	35
2.3.2. Les microcoupures	38
2.3.3. Distorsions de la sinusoïde secteur (MD)	38
2.3.4. Surtensions, unipolaires ou oscillatoires (MD, MC)	39
2.3.5. Bruit HF (MD, MC)	39
2.4. Convertisseurs et générateurs HF	40
2.5. Foudre	40
2.6. Décharges électrostatiques (DES, ou ESD en anglais)	45
2.7. Impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN)	48
2.8. Récapitulation des menaces ambiantes	50

Chapitre 3. Principales victimes des perturbations électromagnétiques (PEM) et comportement.	55
3.1. Distinction entre les circuits victimes	55
3.2. Susceptibilité des circuits analogiques	57
3.3. Susceptibilité des circuits numériques	60
3.4. Réponse hors bande. Détection parasite d'enveloppe	66
3.5. Désensibilisation à la détection parasite. Quelques remèdes	74
3.6. Quelques autres circuits victimes typiques	75
 Chapitre 4. Couplages par impédance commune (CIC).	77
4.1. Principe	77
4.2. Impédance des conducteurs typiques	81
4.2.1. Impédance d'un fil rond	81
4.2.2. Impédance d'un conducteur méplat	85
4.2.3. Impédance d'un plan conducteur et structures assimilables	86
4.2.4. Cas du plan non idéal	89
4.2.5. Impédance d'une grille ou treillis	90
4.3. Réduction du CIC applications	92
4.3.1. Réduction du CIC au niveau des cartes	92
4.3.2. Réduction du CIC au niveau des fonds de panier et cartes-mères	98
4.3.3. Réduction du CIC au niveau du packaging	99
4.3.4. Réduction du CIC au niveau de l'installation	99
4.4. Conversion du mode commun en mode différentiel	105
 Chapitre 5. Couplage d'un champ dans une boucle en mode commun	109
5.1. Principe : coefficients de couplage champ-boucle	109
5.2. Boucles typiques de mode commun	118
5.3. Réduction de la tension captée en mode commun	121
5.4. Conversion MC-MD	125
 Chapitre 6. Conversion du mode commun en mode différentiel	129
6.1. Principe	131
6.2. Conversion MC-MD. Circuit asymétrique	131
6.3. Conversion MC-MD. Circuit symétrique	147
6.4. Remèdes-réduction du C_{MD}	149
6.4.1. Remèdes consistant à ouvrir la boucle de mode commun	150

6.4.2. Remèdes consistant à neutraliser ou dérouter le courant de mode commun	162
Chapitre 7. Couplage d'un champ dans un fil isolé (mode commun)	179
7.1. Principe. Comparaison avec la boucle fermée	179
7.2. Calcul de I mode commun et applications	182
7.3. Remèdes	185
Chapitre 8. Couplage d'un champ dans une paire ou boucle en mode différentiel. Récapitulation des couplages champ-à-câble MC et MD	189
8.1. Principe	189
8.2. Diminution du couplage en mode différentiel	193
8.3. Récapitulation des couplages champ-câble MC et MD exercices pratiques	198
8.4. Prédiction sur un large domaine de fréquence	207
Chapitre 9. Diaphonie ou couplage fil-à-fil	209
9.1. Principe	209
9.2. Diaphonie capacitive	212
9.3. Diaphonie magnétique	220
9.4. Superposition des diaphonies capacitatives et magnétiques. Applications	225
9.5. Remèdes à la diaphonie. Exemples	230
9.6. Diaphonie de mode commun	235
9.7. Diaphonie dans les circuits imprimés et câbles plats	236
9.8. Cas des lignes longues	243
9.9. Diaphonie pour des trajets irréguliers	249
Chapitre 10. Récapitulation sur les blindages de câbles	255
10.1. Le blindage du câble, chaînon de l'immunité d'un système	255
10.2. Câble coaxial et paire blindée	258
10.3. Connaissance de l'efficacité d'un blindage de câble par l'impédance de transfert	260
10.4. Utilisation de l'impédance de transfert dans les calculs	263
10.4.1. Calcul de V_{MD} connaissant le courant de gaine	264
10.4.2. Calcul de V_{MD} connaissant le champ incident sur une boucle fermée	265

10.4.3. Calcul de V_{MD} pour une paire blindée illuminée par un champ	267
10.4.4. Calcul de V_{MD} en fonction du champ incident pour un câble blindé arrivant sur un équipement « en l'air »	272
10.4.5. Réversibilité de Z_t . Champ rayonné par un câble blindé dont on connaît le courant interne.	274
10.4.6. Emploi de Z_t dans le domaine temporel	275
10.5. Influence des raccordements de blindage sur Z_t	276
10.6. Corrélation entre Z_t et efficacité de blindage.	278
Chapitre 11. Couplage par le secteur. Susceptibilité des alimentations . . .	281
11.1. Circuit équivalent réseau et victime. Répartition des impédances . . .	281
11.2. Couplage par le transformateur d'alimentation. Transformateurs à écran	286
11.3. Réduction du couplage par un conditionneur de réseau	292
11.4. Réduction par filtrage (MC et MD)	293
11.4.1. Sélection d'un filtre	293
11.4.2. Performances des filtres sur réseau d'alimentation	296
11.5. Atténuation par le régulateur d'alimentation	298
11.5.1. Régulateurs avec isolement entrée-sortie.	299
11.5.2. Régulateurs sans isolement entrée-sortie	303
11.6. Ecrêtage des transitoires	305
Chapitre 12. Emissions parasites. Réciprocité avec la susceptibilité	309
12.1. Réciprocité	310
12.1.1. La source émettrice.	310
12.1.2. Le couplage	312
12.2. Emissions conduites. Parasitage du secteur.	314
12.2.1. Parasitage créé par le redressement simple ou double alternance	314
12.2.2. Parasitage créé par des redresseurs débitant sur une charge capacitive	316
12.2.3. Parasitage créé par les régulateurs à découpage (RAD)	319
12.2.4. Parasitage secteur dû aux commutations numériques dans l'équipement	325
12.3. Emissions rayonnées	327
12.3.1. Champ rayonné par une boucle	328
12.3.2. Champ rayonné par un fil rectiligne.	336
12.3.3. Extension des modèles simples à des cas réels	341
12.3.4. Rayonnement des câbles externes, en mode commun	349

12.3.5. Excitation des câbles externes, en MC, par des signaux parasites. Remèdes	354
Chapitre 13. Récapitulation des pratiques de CEM dans la conception d'un équipement	355
13.1. Conception et tracé des cartes.	356
13.2. Conception des circuits de fonds de panier et cartes-mères	358
13.3. Packaging et câblage interne	360
13.4. Blindage des coffrets et armoires. Entrées de câble	363
Annexe A. Champ rayonné par un émetteur	367
Annexe B. Tensions et courants induits par un champ dans une boucle	371
Annexe C. Courant induit par un champ sur un fil.	377
Annexe D. Efficacité de blindage des métaux et matériaux conducteurs	381
Annexe E. Atténuation d'une paroi munie d'ouvertures	387
E.1. Cas général	387
E.2. Atténuation d'un treillis ou tôle perforée.	390
E.3. Atténuation d'une enceinte avec ouvertures	392
Annexe F. Capacités et inductances mutuelles entre conducteurs	395
Annexe G. Diaphonie dans un connecteur	399
Annexe H. Champs rayonnés par une boucle, un fil court, un fil long, une paire longue.	403
H.1. Champ rayonné par une boucle	402
H.2. Champ rayonné par un fil rectiligne	406
H.3. Comparaison boucle rayonnante, fil rayonnant	407
H.4. Rayonnement de circuits réels. Le dipôle modifié	408
H.5. Champ rayonné par un fil long	411
H.6. Champ rayonné par une paire bifilaire longue	412

Annexe I. Cas du plan de masse non idéal 415

Annexe J. Niveaux des principales normes de CEM 419

 J.1. Emissions de perturbations conduites 419

 J.2. Emissions de perturbations rayonnées. 421

 J.3. Susceptibilité aux perturbations conduites 423

 J.4. Susceptibilité aux perturbations rayonnées. 424

Bibliographie. 425

Index 429