

Alain Charoy

GUIDE PRATIQUE DE LA CEM

Les sources de perturbations
Les techniques de protection

3^e édition

DUNOD

Photographie de couverture :
© James Thew – fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
	

© Dunod, 2000, 2012, 2017
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-076700-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos

IX

A

Principes de la CEM

1 • Introduction aux couplages	3
1.1 Petite histoire de l'électromagnétisme	4
1.2 Les six couplages électromagnétiques	11
1.3 Mode différentiel et mode commun	17
1.4 Couplage par impédance commune	21
1.5 Couplage capacitif carte à châssis	43
1.6 Couplage par diaphonie inductive	57
1.7 Couplage par diaphonie capacitive	67
1.8 Couplage champ à fil	71
1.9 Couplage champ à boucle	82
1.10 Retenons que les couplages...	86
2 • Les sources de perturbations	89
2.1 Perturbations à basses fréquences	90
2.2 Perturbations à hautes fréquences	115
2.3 Circuits numériques	131
2.4 Évaluons les ordres de grandeur	158
2.5 Les oscillateurs	160
2.6 Conversions d'unités	166
3 • Effets sur les victimes	167
3.1 Effets biologiques	167
3.2 Perturbations des circuits analogiques	180
3.3 Perturbations des récepteurs optiques	197

3.4	Perturbations sur les circuits numériques	199
3.5	Perturbations des tubes cathodiques	204
3.6	Perturbations des liaisons radioélectriques	205

B

Techniques, composants et remèdes

4 • Les terres	219
4.1 Rôles d'une terre	219
4.2 Mesure de la résistance de terre	231
4.3 Conception d'un réseau de terre	241
4.4 En résumé...	247
5 • Les masses	249
5.1 Définitions et rappels légaux	249
5.2 Réseau de masse	251
5.3 Masses des signaux	269
5.4 Conclusion du maillage des masses...	276
6 • Liaisons filaires et leurs protections	281
6.1 Symétriseurs et isolation galvanique	281
6.2 Les filtres	310
6.3 Les limiteurs de surtensions	340
6.4 Conclusions sur les protections en conduction	351
7 • Effets réducteurs et câbles blindés	353
7.1 Définition d'un effet réducteur	354
7.2 Routage des câbles	364
7.3 Protection étagée	377
7.4 De quel côté raccorder les câbles blindés ?	382
7.5 Choix du câble blindé	398
7.6 Comment raccorder les câbles blindés ?	405
7.7 En conclusion des effets des inductances mutuelles	412
8 • Blindages électromagnétiques	415
8.1 Notion d'écran électromagnétique	415
8.2 Calcul des blindages en BF	426
8.3 Blindages en HF	435

8.4	La corrosion	448
8.5	Conclusions sur les blindages	451
9	• Alimentation électrique	455
9.1	Qualité de l'alimentation électrique	456
9.2	Protection du réseau basse tension	472
9.3	Schéma de neutre	483
9.4	Interfaces d'alimentation	495
9.5	Conclusions sur l'alimentation électrique	507
10	• La protection foudre	509
10.1	Le phénomène foudre	510
10.2	La norme EN 61024-1	514
10.3	Protection contre les effets de la foudre	522
10.4	Protection contre le rayonnement foudre	531
10.5	Conclusions sur la foudre	534

C

Méthodes, procédures et conseils

11	• Méthodes en CEM	539
11.1	Réglementation et normalisation en CEM	539
11.2	Accompagnement CEM d'un projet de développement	545
11.3	Les dépannages CEM	557
11.4	Analyse des problèmes	567
11.5	Tests d'immunité sur site	575
11.6	Problèmes les plus fréquents	581
11.7	Remèdes	582
11.8	Psychologie, problèmes culturels et poids des idées reçues	587
11.9	Maintenance en CEM	592
11.10	Conclusions sur les méthodes et le management de la CEM	595
12	• Conseils pratiques	597
12.1	Analyse d'un schéma numérique	598
12.2	Analyse d'un schéma analogique	600
12.3	Analyse d'un convertisseur d'énergie	602
12.4	Tracé des cartes	603
12.5	Corrections sur site	606

13 • Un point sur des idées reçues en CEM	613
13.1 Idées reçues sur les sources de perturbations	613
13.2 Idées reçues sur les couplages électromagnétiques	614
13.3 Idées reçues sur les effets des perturbations	616
13.4 Idées reçues sur les terres et leurs rôles	617
13.5 Idées reçues sur l'équipotentialité	620
13.6 Idées reçues sur les liaisons filaires et l'isolation galvanique	622
13.7 Idées reçues sur les câbles blindés et leur utilisation	624
13.8 Idées reçues sur les écrans électromagnétiques	626
13.9 Idées reçues sur les problèmes d'alimentations	626
13.10 Idées reçues sur la foudre	630
13.11 Idées reçues sur le management en CEM	634
13.12 Et pour conclure...	635
Bibliographie	639
Lexique et acronymes	641
Lexique	641
Liste d'acronymes en CEM	664
Index	669

AVANT-PROPOS

Ce guide pratique s'adresse surtout aux personnes impliquées dans la conception, l'installation, la mise en œuvre, le dépannage ou la maintenance d'équipements ou de systèmes électroniques. Il complète, précise et met à jour nos quatre petits manuels chez le même éditeur. De nombreux conseils sont donnés sur la conception des équipements, le management, la réglementation et la normalisation en compatibilité électromagnétique (CEM).

Nous avons voulu que ce guide soit un outil facile à utiliser, avec des règles et des conseils clairs, pratiques et non ambigus. Nous nous sommes efforcés de replacer les phénomènes électromagnétiques dans leur cadre scientifique en limitant autant que possible les aspects théoriques ou abstraits. Un bagage scolaire de niveau baccalauréat nous semble nécessaire et suffisant.

Les chapitres sont indépendants les uns des autres; nous conseillons toutefois au débutant en CEM de commencer par le premier chapitre, où l'on expose les couplages, c'est-à-dire les principes des phénomènes électromagnétiques. À la fin de chaque chapitre, un court paragraphe en résume l'essentiel.

Lorsqu'une notion nouvelle apparaît, l'expression est notée en **gras** et une définition est proposée dans le lexique, à la fin de l'ouvrage. Nous utilisons le vocabulaire simple de chaque jour, sauf lorsque ce dernier est inadapté, en particulier quand il risque d'entraîner une confusion.

L'aspect économique des choix proposés est pris en compte. Le lecteur constatera que, dans la plupart des cas, le coût global des corrections CEM (étude, pièces, main-d'œuvre et validation) est faible. Ce que coûte la CEM est très inférieur à ce que coûtent les conséquences des perturbations.

Nous avons tenté de placer les phénomènes électromagnétiques en perspective. Le respect des quelques lois de la physique est nécessaire à la bonne CEM. Pour éviter les ambiguïtés, les limites de validité de nos recommandations, quand il y en a, sont précisées. La remise en cause de « règles de l'art » erronées est difficile, surtout pour des raisons psychologiques, mais elle est nécessaire. Si, après la lecture de ce guide, le lecteur gagnait du temps et de l'efficacité en appliquant correctement nos recommandations, nous serions comblés.

Outre la bonne compréhension des phénomènes, la maîtrise des ordres de grandeur garantit l'efficacité en CEM. C'est pourquoi nous avons illustré chaque point important par un exemple chiffré, dont les valeurs numériques, tirées de l'expérience, sont réalistes. Le lecteur allergique aux calculs (ce que nous comprenons bien) pourra ignorer ces applications numériques mais il est invité à retenir les

conclusions. Maîtriser la CEM, c'est-à-dire mettre le doigt là où ça fait mal et proposer un remède efficace, nécessite des simplifications. Pour négliger l'accès devant l'important, il est utile de savoir évaluer les amplitudes « à la louche ».

Les erreurs les plus fréquentes seront soulignées. Nous espérons avoir donné les conseils qui permettront à chacun d'abandonner les mauvaises habitudes et de respecter les lois de la physique. Nous avons résisté à la tentation de sous-titrer cet ouvrage « Éloge de la simplicité et du bon goût ». Nous vivons dans un monde confus dont les réalités sont simples, ou du moins compréhensibles. Nous souhaitons avoir donné à ce guide un style assez plaisant pour que le lecteur soit tenté de le parcourir en totalité. Ce n'est qu'après avoir corrigé les principales erreurs de CEM que le fonctionnement d'un système électronique peut devenir sûr. Croyez-en notre expérience, cet objectif raisonnable est tout à fait à notre portée.

Rien en CEM ne ressemble plus à la vérité que l'erreur, même commise de bonne foi. Corriger les idées reçues nécessite une large diffusion des concepts réels et une claire compréhension des phénomènes électromagnétiques. Citons par exemple la notion d'équipotentialité, le rôle des terres et les effets à hautes fréquences. Ces aspects sont encore mal, peu ou trop rapidement enseignés; en conséquence ils restent méconnus. De là découlent bien des erreurs, graves, tenaces et coûteuses.

Que le lecteur prenne la peine de vérifier lui-même nos informations par de petites expériences. Tout phénomène électromagnétique peut être mis en évidence par une petite manipulation ou une mesure simple, même non normalisée. C'est ainsi que travaillaient nos grands-pères. Il est regrettable que l'empirisme et l'expérimentation personnelle soient pratiquement tombés en désuétude, comme si l'activité intellectuelle pouvait remplacer la pratique ou se suffire à elle-même.

L'intérêt apparent des équations est qu'elles sont propres et donnent l'illusion de ne jamais défaillir; mais avoir des yeux ne suffit pas pour voir. La physique peut être comprise de façon théorique mais seule la pratique personnelle permet de rendre l'invisible réel. Rien de ce qui est naturel n'est caché, mais pour comprendre il est nécessaire d'observer.

Comprendre la théorie c'est excellent, mais la mettre en pratique est ce qui importe le plus. C'est toujours avec les mains que l'on finit par comprendre puis par faire fonctionner ce qui fonctionne mal. Travailler avec méthode et comprendre les conséquences de nos efforts est la meilleure façon de se convaincre des réalités et de progresser. C'est aussi le meilleur moyen d'être, ensuite, convaincant. Bien que têtues, les lois de la CEM sont simples...

Il est important d'abandonner en CEM les mauvaises habitudes qui camouflent mal l'ignorance. Efforçons-nous de faire passer les bons messages. Les efforts pour convaincre seront longs, difficiles et ingrats; mais ils importent. Tout le reste n'est que de la technique. Concluons par une observation optimiste : c'est le premier pas le plus difficile... Bon courage !

A

Principes de la CEM

1 • INTRODUCTION AUX COUPLAGES

A

PRINCIPES DE LA CEM

La compatibilité électromagnétique, ou CEM, ne devrait plus être considérée comme de la magie noire. Ce n'est que de la *physique* élémentaire et finalement amusante. Un *couplage* est la relation entre une cause et son effet. Même quand les phénomènes électromagnétiques sont bien compris, il subsiste en CEM une difficulté : les ordres de grandeur sont peu intuitifs. Nous tenterons de chiffrer les couplages de façon aussi simple que possible, et de fixer les idées par des ordres de grandeur réalistes.

Les ennuis apparaissent lorsque dans un environnement perturbé, c'est-à-dire en présence de *sources* de perturbations, on installe de façon négligée des équipements sensibles, appelés des *victimes*. De nombreuses sources de perturbation sont inévitables. Même quand elles peuvent être réduites, être sûr d'avoir traité toutes les sources (ou « coupables »), sans en omettre une seule, est une gageure.

Bien entendu, concevoir un équipement robuste en CEM est possible, nous en étudierons les points-clés. Mais quand un équipement est construit, il est souvent coûteux et difficile d'en améliorer l'immunité. De plus, vérifier après coup qu'une modification CEM n'entraîne aucune réduction de performance (risque appelé « régression ») peut être délicat. Il est en général plus facile d'améliorer l'installation et le câblage que le matériel lui-même. Le niveau d'immunité d'un appareil bien conçu en CEM est typiquement dix fois meilleur que celui d'un appareil mal réalisé. L'immunité d'un système bien installé et bien câblé est cent à mille fois meilleure que celle du même système installé « sans précaution ». Il y a ainsi beaucoup à gagner par la maîtrise du câblage.

Nous allons tout d'abord étudier l'influence des sources de parasites sur les circuits victimes. Chacun devrait avoir les idées claires sur les couplages électromagnétiques. Derrière quelques relations mathématiques, simples au demeurant, c'est la réalité des phénomènes physiques qui apparaît.

Pour concevoir correctement un système électronique ou corriger une installation à problèmes, il suffit le plus souvent de respecter quelques règles de base. Pour éviter les erreurs, il n'est pas indispensable de dominer les mathématiques ni même de bénéficier de nombreuses années d'expérience. Bien sûr, ici comme ailleurs, les efforts diminuent avec l'habitude. Mais le plus important est d'être convaincu que l'efficacité en CEM nécessite la compréhension claire des phénomènes, la connaissance de leurs grandeurs et les limites des options choisies (retenues ou imposées).

Avant d'aborder l'analyse des couplages, il est intéressant de survoler l'évolution de l'électromagnétisme et de la vision du monde qui en découle. L'exubérant et irrévérérencieux pédagogue Richard Feynman, prix Nobel de physique, enseignait que la théorie scientifique n'est que la meilleure devinette. Ce que nous appelons la réalité physique n'est qu'une ancienne théorie à laquelle on s'est habitué. Que le lecteur pressé ou indifférent passe directement au paragraphe suivant.

1.1 Petite histoire de l'électromagnétisme

L'histoire de la compréhension des phénomènes électriques est passionnante. L'électricité statique est connue depuis plus de quatre mille ans. Une fois de plus, ce sont les Grecs qui ont mis en évidence les premiers phénomènes électrostatiques. En frottant de l'ambre sur un tissu sec, les jeunes Grecs s'amusaient à attirer des feuilles sèches. Frotter en grec se dit τριβειν (*tribein*) et l'ambre se dit ηλεκτρον (*electron*). C'est ainsi qu'est né le mot « triboélectricité », puis « électricité » tout court.

L'expérience montre qu'il existe deux types de charges électriques : positive (on disait vitreuse) ou négative (on disait résineuse). Nous observons que deux charges de même signe se repoussent fortement. Elles s'attirent tout aussi fortement si elles sont de signes contraires. Pourquoi un tel comportement ? L'honnêteté nous oblige à répondre que nous n'en savons pas plus que les Grecs. La science ne modélise que les phénomènes. La cause profonde échappe à l'observation et, admettons-le, à notre compréhension. La réponse à une question scientifique qui commence par « pourquoi » ne peut être que philosophique. Pour répondre à une question fondamentale, un scientifique doit être un peu philosophe. C'est pourquoi les vrais scientifiques restent modestes.

Nous pouvons transposer à l'électrostatique la question d'Henri Coton-Alvart (à propos de la gravitation) : « Comment une charge inerte et aveugle ressent-elle à distance la présence d'une autre charge aussi inerte et aveugle ; quel petit signe mystérieux permet à deux sourds de s'entendre et les met en marche avec une énergie inattendue chez de tels paralytiques ? » À défaut de répondre au pourquoi, la science explique, et avec une excellente précision, le comment des phénomènes électriques et magnétiques observés jusqu'à ce jour. L'expérience montre que dans le *vide*, ou dans l'air, la force qui s'exerce entre deux charges électriques ponctuelles est proportionnelle au produit de leurs charges et inversement proportionnelle au carré de leur éloignement. Ce résultat est empirique mais aussi rigoureux que les plus précises des mesures le permettent. Dans notre système d'unités, la force électrostatique F vaut :

$$F = \frac{QQ'}{4\pi\epsilon_0 D^2}$$

Avec :

F : force, en newtons (N),

Q, Q' : charges électriques ponctuelles, en coulombs (C),

ϵ_0 : **permittivité diélectrique** du vide, en farads par mètre ($\approx 8,85$ pF/m),

D : distance entre les charges, en mètres (m).

Une configuration réelle n'utilise pas uniquement des charges ponctuelles. Un tube cathodique, un microscope électronique, un photomultiplicateur ou un tube à rayons X accélèrent des **électrons** grâce à une électrode positive (anode). Calculer la force résultante sur un électron devient alors si difficile (il faudrait sommer en trois dimensions une infinité de vecteurs) que l'on introduit une notion mathématique simple, un concept commode, un intermédiaire de calcul efficace : un **champ**.

On écrit que la force qui s'exerce sur une charge élémentaire est égale au produit de la charge électrique de la particule par le champ. Cet objet mathématique est un vecteur (une force est vectorielle) qui dépend des autres charges élémentaires et de leurs positions dans l'**espace**. On appelle ce vecteur **champ électrique** :

$$F = QE$$

Avec :

F : force exercée sur la charge Q , en newtons (N),

Q : charge électrique, en coulombs (pour un électron : $q \approx 1,602 \times 10^{-19}$ C),

E : champ électrique, en volts par mètre (V/m).

Ainsi exposée, la notion de champ électrique ressemble plus à une astuce qu'à une réalité tangible. Comme d'habitude avec un **modèle physique**, *tout se passe comme si* dans le vide il y avait un « champ de forces » (en réalité, il n'y a rien d'autre que des charges ici et là). Il n'y a donc rien de plus normal que d'avoir quelque peine à sentir « avec les mains » la réalité physique de cet artifice de calcul.

Peu importe qu'un champ existe ou non si en faisant comme s'il existait nous pouvons prévoir les phénomènes... Et ça marche, c'est superbe. Nous pourrions dire la même chose de la fonction d'onde en **mécanique quantique**.

Tout allait pour le mieux dans le meilleur des mondes électrostatiques possible quand Alessandro Volta inventa la pile électrique (en 1800... Pile !). On fit alors circuler un courant électrique significatif dans des fils, et on mit en évidence de nouvelles forces : une aiguille de boussole dévie, deux courants de même sens s'attirent... Comme toujours, si nous ignorons pourquoi, nous savons désormais comment. André Marie Ampère, « le Newton de l'électricité », en modélisant les forces magnétiques, et en inventant les outils de mesure, pose, vers 1825, les bases de l'électromagnétisme. Ampère ouvrit la voie à Maxwell.

Le mot « magnétisme » vient de la pierre aimantée de Magnésie, connue des Anciens (de l'oxyde magnétique de fer Fe_3O_4 , extrait de Magnésie, une colonie grecque d'Ionie). Démocrite, père de l'atomisme, vers 400 av. J.-C., nous a laissé un traité de l'aimant dont « les atomes pénètrent au milieu de ceux moins sensibles du fer pour les agiter ». Même maladroit, l'intuition reste admirable.

Le mot « magnétisme » désigne aujourd'hui des réalités diverses. Un magnétiseur est un praticien de parapsychologie tandis que la Faculté réserve le mot magnéticien à un scientifique du magnétisme. On parle aussi du magnétisme d'une personne mystérieusement attirante. Nous n'aborderons que l'aspect technique du magnétisme.

Le fer (Fe), le cobalt (Co) et le nickel (Ni), voisins dans le tableau de Dimitri Mendeleïev, constituent les trois seuls éléments ferromagnétiques parmi la centaine connue. Pierre Curie, en 1895, distingua le paramagnétisme du diamagnétisme.

Une substance paramagnétique s'aimante dans le même sens que le fer, mais beaucoup plus faiblement. Le ferromagnétisme devient brutalement diamagnétisme à partir d'une température critique appelée point de Curie (770 °C pour le fer).

Il n'y a que trois corps simples paramagnétiques : l'oxygène (ou plus exactement le dioxygène : O_2), le platine (Pt) et le sodium (Na). Tous les autres éléments et la plupart des substances sont diamagnétiques. Une substance diamagnétique prend une aimantation en sens inverse du champ magnétique extérieur. Les substances diamagnétiques n'aiment pas le champ magnétique : elles sont repoussées vers la région de champ faible. Leur perméabilité magnétique relative μ_r est très légèrement inférieure à 1 (l'écart par rapport à l'unité est en général de quelques pour mille). Le diamagnétisme est pratiquement indépendant de la température.

Les matériaux ferromagnétiques sont caractérisés par une aimantation spontanée (aussi dite rémanente); leurs performances s'améliorent d'année en année lentement mais sûrement. L'aimantation est une fonction compliquée du champ appliqué, de sa vitesse de variation, de la température, des impuretés dans la substance et de son passé magnétique... Ce sont les moments magnétiques des électrons (leur spin plus leur mouvement orbital) qui créent le moment magnétique atomique. Le moment magnétique du noyau est dix mille fois inférieur à celui des électrons.

Un matériau ferromagnétique doux (fer pur, ferrite pour transformateur...) conserve une très faible aimantation : son champ coercitif se compte en dixièmes d'ampères par mètre. Un matériau dur conserve au contraire une très forte aimantation : son champ coercitif dépasse 10^5 A/m. On utilise les matériaux durs pour fabriquer des aimants permanents ou des supports de mémoires magnétiques.

Les magnétomètres les plus sensibles (squids) détectent le picoampère par mètre. Le champ magnétique terrestre dans nos régions est voisin de 40 A/m. En 1998, le champ magnétique permanent le plus intense créé par l'homme atteignait 30 MA/m, soit plus de 37 T. Par la technique de l'implosion, il est possible d'obtenir des champs transitoires encore beaucoup plus intenses. Si le magnétisme a perdu depuis un siècle beaucoup de son mystère, les explications restent incomplètes. Les progrès des nouveaux matériaux sont empiriques car la théorie ne sait pas prévoir les performances magnétiques des alliages ou des céramiques.

Un courant provoque dans le vide un effet équivalent à celui d'un aimant. On observe que la force exercée sur un élément de courant électrique est perpendiculaire et proportionnelle à ce courant, à la longueur de l'élément de courant et, pour le reste (la condition externe), à un vecteur que l'on appelle **induction magnétique**.

$$F = BIL$$

Avec :

F : force exercée, en newtons (N),

B : induction magnétique, en teslas (T),

I : intensité du courant, en ampères (A),

L : longueur de l'élément de courant, en mètres (m).

B est l'induction provoquée soit par un aimant, soit par d'autres courants voisins. C'est ainsi que fonctionnent tout électroaimant et tout moteur électrique. Dans le

vide, le vecteur induction magnétique est, en tout point, rigoureusement proportionnel aux courants qui lui donnent naissance, ce qui n'est pas le cas dans les matériaux magnétiques. Ces derniers sont non linéaires et se comportent de façon plus complexe.

On définit alors un vecteur dit « d'excitation magnétique », appelé désormais plus simplement **champ magnétique** :

$$H = \frac{nI}{L}$$

Avec :

H : champ (d'excitation) magnétique, en ampères par mètre (A/m),

n : nombre de spires du bobinage d'excitation (entier sans dimension),

I : courant d'excitation, en ampères (A),

L : longueur moyenne d'une ligne de champ magnétique, en mètres (m).

Dans le vide, B et H sont rigoureusement proportionnels :

$$B = \mu_0 H$$

Avec :

B : induction, en teslas (T),

μ_0 : **perméabilité magnétique** du vide ($4\pi 10^{-7}$ H/m en système international),

H : champ magnétique, en ampères par mètre (A/m).

Le vide, qu'une tendance naturelle pourrait nous faire prendre pour le néant, bénéficie de deux attributs physiques considérés comme rigoureusement constants dans l'espace et le temps : une capacité linéique ϵ_0 et une inductance linéique μ_0 . Le vide n'est donc pas le néant. S'il y a un champ dans le vide (et la physique moderne montre qu'il y en a toujours un, même très petit), ce dernier stocke de l'énergie volumique. Il ne serait pas très difficile de calculer que, pour établir un champ E dans un volume vide, il faut fournir une énergie :

$$W = 0,5\epsilon_0 E^2 V$$

Avec :

W : énergie « électrique » stockée dans le volume V , en joules (J),

ϵ_0 : permittivité diélectrique du vide ($\approx 8,85$ pF/m),

E : champ électrique, en volts par mètre (V/m),

V : volume de vide dans lequel est établi le champ E en mètres cubes (m³).

De même, on peut calculer que pour établir un champ magnétique dans un volume de vide V , il faut fournir une énergie :

$$W = 0,5BH V = 0,5\mu_0 H^2 V$$

Avec :

W : énergie « magnétique » stockée dans le volume V , en joules (J),

B : induction magnétique, en teslas (T),

H : champ magnétique, en ampères par mètre (A/m),

μ_0 : perméabilité magnétique du vide ($= 4\pi 10^{-7}$ H/m).

Ces énergies stockées dans le vide, ou dans l'air, ont été prélevées aux circuits électriques qui leur donnent naissance. Elles seront restituées aux mêmes circuits électriques (ou à d'autres circuits voisins) quand on fera décroître le champ. On définira ainsi les notions de capacité électrique et d'inductance magnétique.

En statique, les notions de champ électrique et magnétique sont indépendantes. C'est Heinrich Lenz (en 1833) qui mit en évidence le couplage en alternatif entre courants et tensions induites. Il montra qu'une variation d'induction magnétique à travers une surface de circuit électrique (ce que l'on appelle un **flux d'induction magnétique**) y induit une force (contre-) électromotrice :

$$e = - \frac{S \Delta B}{\Delta t}$$

Avec :

e : force électromotrice induite, en volts (V),

S : surface de la boucle, en mètres carrés (m^2),

ΔB : variation de l'induction magnétique ($= \mu_0 \Delta H$ dans l'air), en teslas (T),

Δt : durée de la variation, en secondes (s).

Tous les alternateurs et les dynamos fonctionnent selon la loi de Lenz. Le signe négatif indique que la tension induite dans le circuit victime tend à y faire circuler un courant de sens opposé au courant qui lui donne naissance. On oublie souvent ce signe, tout comme on ignore en général le déphasage entre la tension et le courant. L'Écossais James Clerk Maxwell (en 1873) unifia et compléta toutes ces observations empiriques en les condensant en quatre équations différentielles. Retenir par cœur ces équations est de peu d'intérêt, mais il est intéressant de comprendre ce qu'elles contiennent, c'est-à-dire ce qu'elles signifient. Pour résoudre un problème à N inconnues, il faut nécessairement N équations. Or nous manipulons quatre vecteurs électromagnétiques fondamentaux : induction magnétique, déplacement électrique, champ électrique et champ magnétique. Avec quatre équations, le compte est bon.

La première équation de Maxwell exprime le théorème de Carl Friedrich Gauss : des charges établissent un champ électrique. La seconde équation exprime le théorème d'Ampère : un déplacement de charges, donc un courant électrique, crée un champ magnétique. La troisième équation exprime la loi de Lenz (ou de Maxwell-Faraday) : une variation d'induction magnétique dans un circuit y induit une tension. La quatrième équation de Maxwell est la plus simple : $\text{div } B = 0$. Elle signifie que contrairement aux lignes de champ électrique, les lignes d'induction magnétique sont fermées : il n'y a jamais d'aimant nord tout seul sans un pôle sud juste à côté.

Ces quatre équations issues de l'observation des phénomènes électriques sont si pertinentes que même la relativité qui ébranla toute la physique au début du vingtième siècle les conserva pratiquement intactes. Une analyse simple des équations de Maxwell donne un résultat inattendu : de l'énergie électromagnétique peut se propager dans le vide. La notion d'**onde** électromagnétique apparaît. Le plus étonnant (cas exceptionnel de l'histoire des sciences) est que la découverte de la propagation des ondes électromagnétiques par Heinrich Hertz est postérieure de plusieurs années à la théorie de Maxwell.

Les ondes électromagnétiques ou hertziennes transportent de la puissance et peuvent se propager dans le vide, sans support matériel. Mieux encore, la vitesse de propagation de ces ondes y est, à toutes fréquences, égale à la célérité de la lumière. Les équations de Maxwell mènent directement à la relativité, car elles prévoient que :

$$\mu_0 \varepsilon_0 c^2 = 1$$

Avec :

μ_0 : perméabilité magnétique (ou inductance linéique) du vide = $4\pi 10^{-7}$ H/m,

c : célérité de la lumière dans le vide (= 299 792 458 m/s),

ε_0 : permittivité diélectrique (ou capacité linéique) du vide ($\approx 8,854\,2$ pF/m).

Notons que la relation $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ ne serait exacte que si la célérité de la lumière était exactement de 300 000 km/s. Mais l'erreur commise ne dépasse pas 0,14 % ; seul un puriste pourrait être choqué par une telle approximation. À ce jour, l'électromagnétisme annonce que la lumière n'est rien d'autre que des ondes électromagnétiques. Mais l'histoire apprend à nous méfier de nos certitudes. Un modèle scientifique ne vaut que par ce qu'il contient, c'est-à-dire ce dont il rend compte. Si la nature se laisse mettre en équations, nous constatons aussi qu'elle est plus étonnante que nos modèles, moins prévisible, plus merveilleuse aussi. Un scientifique n'est jamais certain qu'un modèle physique est définitif ; c'est pourquoi les chercheurs continuent de chercher. L'admirable est que parfois nous trouvons.

La dualité onde-corpuscule invite à la réflexion. Une onde radio ou lumineuse est un modèle ondulatoire (fréquentiel). Un photon est un modèle corpusculaire (temporel) tout aussi valide. Selon le cas, il faut utiliser un modèle ou un autre. Pour expliquer des franges d'interférences, un champ est une oscillation, mais pour expliquer l'effet photoélectrique, il faut qu'il soit corpusculaire. Même en électromagnétisme, nos modèles sont relatifs, partiels et de validité limitée.

Mais il y a plus étonnant. La nature, bonne fille, nous répond selon la façon dont nous l'interrogeons, mais à une question à la fois. La science moderne enseigne que ce qui est observé dépend de l'observateur. Quelle est la réalité ? Où donc est la vérité ? On sait mesurer une fréquence avec une précision de 10^{-12} . On sait aussi mesurer l'instant de l'impact d'un photon sur un détecteur à quelques picosecondes près. Mais il nous est impossible de mesurer simultanément les deux avec précision.

Plus nous observons avec acuité un détail de la nature, plus elle nous voile le reste de ses aspects. Heisenberg modélisa, par un principe vérifié à l'échelle de l'atome, cette observation. Mais avons-nous raison de tout découper, avec méthode, en petits morceaux ? Que gagne-t-on à opposer science moderne et sagesse traditionnelle ? Finalement, nos nouvelles connaissances nous ont-elles rendus meilleurs ?

En 1881, par une nouvelle expérience, fondée sur l'indépendance de la vitesse de la lumière (c) et de celle de l'observateur, Albert Abraham Michelson montre que la vitesse de la lumière est constante. Patatras ! la théorie de Newton doit être corrigée. Par principe d'économie, on en profite pour abandonner l'éther : la science élimine toute notion improductive. Le **temps** devient relatif. La théorie de la relativité enseigne qu'un photon qui se propage, selon nous, durant des milliards d'années voyage, selon lui, pendant une durée nulle. Preuve scientifique que les

voyages forment la jeunesse ! Doit-on en déduire que, pour la lumière, l'Univers tout entier est ponctuel ? L'écrivain scientifique Roland Omnès, dans son livre *Alors l'un devint deux*, explique de façon intelligible et cohérente la *décorrélation*, c'est-à-dire comment la liberté atomique devient loi à l'échelle humaine, et invariance du cadre des lois à l'échelle universelle.

Ce n'est pas tout. En ajoutant l'accélération (c'est-à-dire la gravitation) à la relativité restreinte, on aboutit au modèle de relativité générale qui courbe l'espace-temps. Ce modèle prévoit que, malgré sa vitesse limite (car on n'a pas encore trouvé plus rapide) et sa masse théoriquement nulle, un photon pèse trop pour s'échapper de l'attraction d'un amas de matière dense, tel un trou noir.

Observons combien la matière propage mal la lumière (par absorption) par rapport au vide (avec simple dilution). La lumière aime et chauffe la matière qui le lui rend mal : la matière rejette sans cesse de la lumière par émission thermique. Comment expliquer que, quand elle s'entasse en un trou noir, la matière inverse son dégoût au point d'aspirer toute lumière ? L'annihilation d'une particule + antiparticule en pure lumière pose la question de l'équivalence profonde entre lumière et matière. La masse serait-elle de la lumière condensée ? Nous cherchons à comprendre. À ce jour, quatre interactions élémentaires (forces irréductibles) ont été mises en évidence. Une cinquième force, répulsive, a été postulée en 1986 par l'US Air Force. À suivre...

1. *La gravitation*. Elle n'agit que sur les corps massifs : une très grosse masse attire toute autre masse. En 1687, notre ami Isaac Newton proposa son modèle. On s'efforce depuis des années de détecter des ondes gravitationnelles. Si une particule virtuelle quantique y était associée, on l'appellerait **graviton**. La masse reste une profonde énigme scientifique : quelle est cette énergie à la fois inerte et pesante ?

2. *L'électromagnétisme*. Seule cette interaction agit à toute échelle (cosmos, nous, atomes). Cette théorie et la découverte de l'électron ont à peine plus d'un siècle. Les électrons circulent dans le sens opposé au sens conventionnel du courant : tant pis. La particule virtuelle associée à l'onde électromagnétique est le **photon**. Réactions chimiques, chocs, couleurs, lumières... sont des effets électromagnétiques.

3. *L'interaction forte*. Modélisée en 1961, elle colle les noyaux malgré la répulsion des protons. La particule virtuelle associée (médiateur) est le **gluon**, qui n'agit que sur les hadrons (neutrons, protons...) et ignore les leptons (électrons, **neutrinos**...). Nous ne savons pas encore maîtriser cette interaction à faible énergie.

4. *L'interaction faible*. Cette interaction provoque la désintégration β (émission d'électrons). Elle est un facteur de changement et de transmutation et non de cohésion. Le médiateur est le **boson intermédiaire** (W^+ , W^- et Z^0). À peu près unifiée avec l'électromagnétisme, on appelle ce modèle « interaction électrofaible ».

Neutrinos et autres neutralinos (particules massives à interaction faible) sont des particules extrêmement discrètes qui interagissent si peu avec la matière (mais avec une probabilité calculable) qu'elles restent mal connues. Elles pourraient constituer tout ou partie de la masse manquante de l'univers selon la théorie du big-bang. Le vide contient un rayonnement électromagnétique résiduel, des neutrinos, peut-être un gaz de neutralinos, voire des bouffées de gravitons. Qu'est-ce donc que le vide ?

Résumons : l'électromagnétisme est une interaction universelle. Tout corps chargé, quelle que soit sa taille, y est soumis. Inutile en CEM d'introduire l'aspect corpusculaire des ondes : une onde électromagnétique n'y est qu'une vibration. Nous négligeons en CEM le quantum d'énergie (le photon).

L'optique de l'infrarouge à l'ultraviolet, les rayons X, gamma et cosmiques sont également de l'électromagnétisme au sens large. Mais ces domaines qui font appel au photon (particule dont l'énergie est proportionnelle à sa fréquence) sortent de l'électromagnétisme au sens de la CEM. Le modèle corpusculaire étant statistique, il est moins séduisant que celui, déterministe, de Maxwell.

Un champ électromagnétique est toujours généré par une source matérielle. Ce champ peut, selon la nature de la source, s'évanouir lorsque l'on s'en éloigne ou au contraire se propager sous forme d'onde. En s'éloignant d'une inductance (respectivement d'un condensateur), l'énergie magnétique (respectivement électrique) s'évanouit. Le champ est alors dit évanescent et aucune énergie n'est rayonnée à distance. L'énergie stockée dans le composant et à son voisinage immédiat reste disponible pour son circuit électrique.

Lorsque l'on s'éloigne d'une antenne, de l'énergie se propage sous forme électrique et magnétique. La puissance émise en rayonnement est fournie par le circuit qui excite l'antenne. La propagation d'une onde dans le vide n'y produit strictement rien ; son amplitude diminue en s'éloignant par effet de dilution. Seule de la matière peut mettre cette onde en évidence (en l'interceptant). Sinon, l'onde poursuit son chemin.

Quand une onde rencontre de la matière, divers phénomènes peuvent se produire : **diffraction**, **réflexion** et **absorption** (sans parler d'autres effets possibles). Tout cela provoque la circulation de courants (c'est-à-dire de charges électriques) dans les conducteurs ou l'oscillation de charges dans les isolants. Les charges électriques sont excitées à la même fréquence que la source (à un éventuel effet Doppler près). Le modèle ondulatoire de Maxwell est une vision un peu simplifiée des phénomènes réels, mais en CEM (du continu à 300 GHz), ce modèle est très satisfaisant.

Nous nous contentons donc de modèles simples, continus, temporels ou fréquentiels. Nous simplifierons encore plus en ne retenant, pour les phénomènes conduits, que deux grandeurs scalaires (U et I) et en négligeant les deux autres vectorielles (E et H), comme si un circuit électrique ne rayonnait pas du tout. Que le lecteur méticuleux se rassure : en CEM, l'approximation ainsi commise est tout à fait acceptable.

1.2 Les six couplages électromagnétiques

Les modes d'action des perturbations électromagnétiques sur les électroniques s'appellent couplages. Leur nombre est limité : six en tout, pas un de plus. Décrivons-les en quelques mots.

1.2.1 Effet d'un courant circulant dans un conducteur utile

L'impédance d'un conducteur électrique n'est jamais nulle. Tout courant (utile ou parasite) qui parcourt un conducteur génère une tension entre ses extrémités. Ce

phénomène est particulièrement sévère pour les circuits à bas niveaux (capteurs, mesures) ou rapides (vidéo, radio). Il est appelé **couplage par impédance commune**.

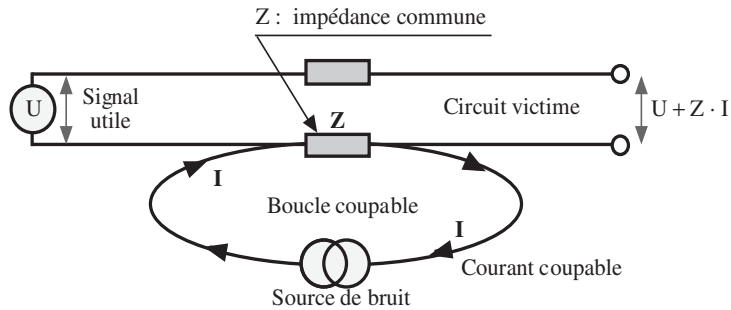


Figure 1.1 – Principe du couplage par impédance commune

Réduire le couplage par impédance commune peut être obtenu de deux façons : abaisser l'impédance commune Z ou réduire le courant parasite I qui y circule.

1.2.2 Effet d'une tension variable entre un circuit et la masse

La capacité entre deux conducteurs voisins n'est jamais nulle. Une variation de potentiel entre eux injecte un courant de l'un sur l'autre. Ce phénomène, le plus souvent ignoré des ouvrages de CEM, est appelé **couplage capacitif carte à châssis** ou aussi, de façon imagée, **couplage par « effet de main »**.

Ce couplage est particulièrement sévère en boîtier plastique. Même une fonction électronique purement numérique est exposée à ce couplage (circuit de reset par exemple). Contrairement aux couplages par les câbles, ce n'est pas toujours un circuit d'entrée ou de sortie qui est le plus exposé à ce couplage. Un circuit à bas niveaux et à haute impédance peut être perturbé, même s'il est limité au cœur de la carte.

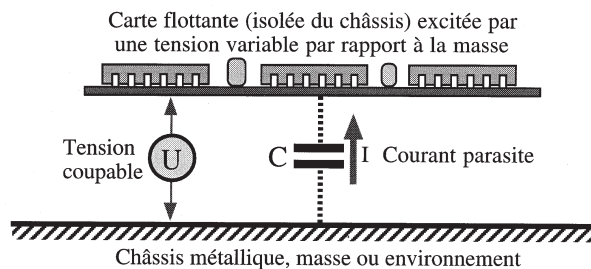


Figure 1.2 – Principe du couplage « carte à châssis »

Réduire le couplage carte à châssis peut être obtenu de deux façons : diminuer la capacité parasite entre le circuit sensible et la masse (mais cette solution est difficile) ou réduire les variations rapides de tension ($\Delta U/\Delta t$) entre la carte et son environnement. Par exemple, raccorder de façon équipotentielle le 0 V au châssis métallique résout ce problème.

1.2.3 Effet d'un courant variable sur un circuit parallèle et voisin

Le courant dans un fil ou une piste de circuit imprimé génère autour du conducteur un champ magnétique. Ce champ, s'il est variable, induit une force contre-électromotrice (une tension parasite) dans les boucles voisines. Ce phénomène est appelé **couplage par diaphonie inductive**.

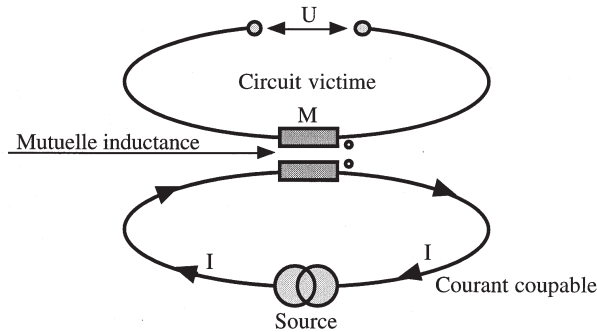


Figure 1.3 – Principe du couplage par diaphonie inductive

Réduire le couplage par diaphonie inductive peut être obtenu de deux façons : diminuer la mutuelle inductance entre les deux circuits (en les éloignant par exemple) ou limiter les variations rapides de courant ($\Delta i/\Delta t$) dans le circuit coupable.

1.2.4 Effet d'une tension variable entre deux conducteurs proches

La différence de potentiel entre un conducteur et son environnement génère autour de ce conducteur un champ électrique. Ce champ, s'il est variable, injecte à son tour un courant sur tous les conducteurs proches. Ce phénomène est appelé **couplage par diaphonie capacitive**.

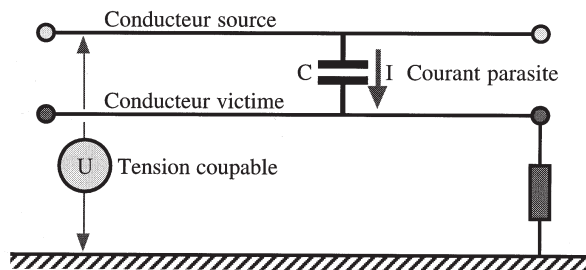


Figure 1.4 – Principe du couplage par diaphonie capacitive

Réduire le couplage par diaphonie capacitive peut être obtenu de deux façons : diminuer la capacité entre les deux circuits (en les éloignant par exemple) ou limiter les variations rapides de tension du circuit coupable.

1.2.5 Effet d'un champ électrique variable sur un conducteur

Un champ électrique variable se réfléchit sur un conducteur comme de la lumière sur un miroir. Cette réflexion s'opère avec circulation d'un courant en surface du conducteur éclairé. Ce phénomène s'appelle **couplage champ à fil** ou **champ à câble**.

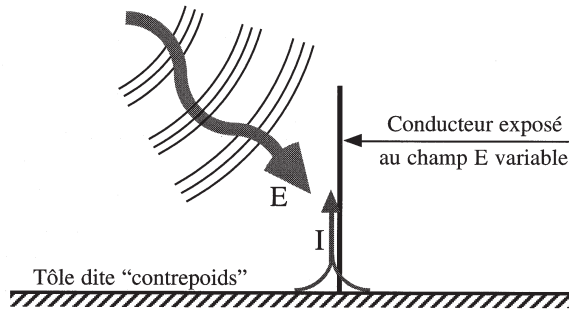


Figure 1.5 – Principe du couplage champ à câble

Réduire le couplage champ à fil peut être obtenu de deux façons : réduire l'effet d'antenne (par exemple en rapprochant le conducteur exposé de la masse) ou réduire, par blindage ou éloignement, le champ électrique coupable.

1.2.6 Effet d'un champ magnétique variable à travers une boucle

Un champ magnétique traversant une boucle y crée un flux magnétique. Toute variation de flux induit une « force contre-électromotrice » (une tension électrique). Ce phénomène est appelé **couplage champ à boucle**.

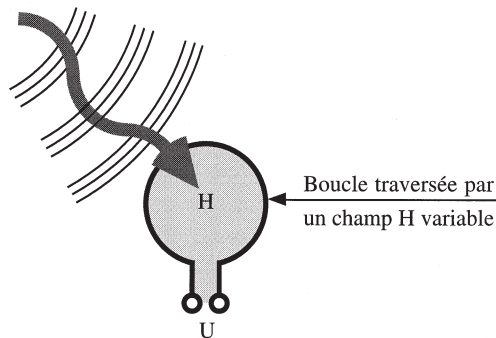


Figure 1.6 – Principe du couplage champ à boucle

Réduire le couplage champ à boucle peut être obtenu de deux façons : réduire la surface de la boucle victime ou atténuer le champ magnétique coupable.

La question de la compatibilité électromagnétique d'un système électronique semble donc a priori bien simple puisque, au pire, seuls six phénomènes sont à maîtriser. En fait, les choses sont un peu plus délicates qu'il n'y paraît.

Tout d'abord, même si sur ces six couplages, cinq sont nuls en continu, ils sont tous à craindre aux fréquences élevées. Seul le couplage par impédance commune n'est pas nul à fréquence nulle. Mais tous peuvent apparaître dès les basses fréquences industrielles. Un champ magnétique 50 Hz peut poser des problèmes à des tubes cathodiques ou à des colonnes de microscopes électroniques. Une « ronflette » capacitive ou inductive peut bruite le signal d'un amplificateur BF à bas niveau, etc.

Les électroniques jusqu'aux années 1970 utilisaient essentiellement des signaux à basses fréquences (BF). Elles étaient naturellement immunisées contre les perturbations HF. Des règles de l'art furent alors établies pour limiter la circulation de courants BF dans les conducteurs. Citons le câblage des équipements en étoile, l'isolement galvanique systématique (au moins à un bout), le raccordement des écrans de câbles blindés à une seule extrémité, etc.

Ces façons de faire avaient (et ont encore) le mérite d'interdire ou de limiter la circulation de courants continus **en mode commun** dans les circuits victimes. Malheureusement, les nouvelles technologies (circuits numériques CMOS, logiques bipolaires rapides, liaisons ADSL ou vidéo, réseaux locaux, liaisons LVDS, USB, etc.) sont désormais sensibles aux perturbations à fréquences élevées. Chacun des cinq couplages HF anciennement négligeable peut devenir préoccupant, plus sévère même que le vieux couplage par impédance commune. Modifier les règles de conception, d'installation, de câblage et d'exploitation des équipements et des systèmes électroniques est devenu nécessaire. La CEM des systèmes modernes est à ce prix.

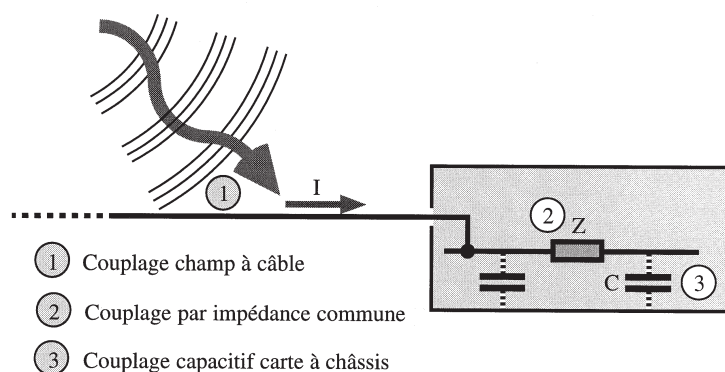


Figure 1.7 – Exemple d'une combinaison de trois couplages

Enfin, plusieurs couplages peuvent être simultanés : ils peuvent apparaître en série ou en parallèle. Par exemple, un équipement soumis à un champ collecte un courant HF sur un câble par couplage champ à fil. Ce courant peut ensuite circuler à travers une carte dont il bruite la référence de potentiel par couplage par impédance commune. Et si la référence de potentiel électronique (le « 0 V ») est flottante, le couplage carte à châssis peut injecter du courant sur une piste sensible au cœur même de la carte, sur un circuit vulnérable.

Dans l'exemple de la figure 1.7, un couplage (champ à câble) est en série avec deux autres couplages en parallèle (impédance commune et carte à châssis). L'analyse des couplages permet d'envisager plusieurs solutions pour résoudre le problème. Si l'on atténue le couplage champ à câble, par exemple en blindant le câble ou en ajoutant un tore de ferrite, il ne sera pas nécessaire de modifier l'équipement. L'ajout d'un filtre relié à la masse du châssis sur chaque fil à l'entrée du coffret, en réduisant le courant parasite dans la carte, peut également être une bonne solution. Si le courant collecté par le câble n'est pas réduit, il reste la possibilité d'agir sur la carte. Il convient de réduire à la fois le couplage par impédance commune (en maillant le 0 V ou en ajoutant un plan de masse) et le couplage carte à châssis en raccordant soigneusement (très près du point d'entrée) le 0 V de la carte à la masse du châssis conducteur. Correctement appliqué, ce dernier remède peut à la fois réduire le couplage par impédance commune et le couplage carte à châssis.

Comme nous le constatons, une solution d'un problème peut souvent être trouvée par divers remèdes. Le meilleur choix dépend beaucoup de l'étape à laquelle on se rend compte du problème. Un concepteur raisonnable choisira une carte non flottante et avec plan de masse. Le dépanneur sur site commencera par ajouter un tore de ferrite sur les câbles à problèmes, et parfois cela suffira.

Un problème de CEM ne doit toutefois être considéré comme résolu que si la marge de sécurité obtenue est satisfaisante, disons au moins un facteur 2 en amplitude (soit 6 dB) et même un peu mieux si possible. Une marge d'un facteur 3 (soit 10 dB) peut être considérée comme satisfaisante.

Un équipement qui respecte les normes d'immunité en CEM présente peu de risque de problèmes. Dans tous les cas, même avec des équipements correctement conçus, la maîtrise du câblage est souhaitable, pour ne pas dire nécessaire. Une notice d'installation bien conçue doit donner des conseils. De plus en plus de constructeurs proposent de bons guides CEM d'installation. Les recommandations de câblage d'un constructeur limitent ses risques commerciaux et juridiques en cas de plainte.

En plus de trente ans de CEM à plein-temps, nous avons rencontré d'innombrables cas graves, mais nous n'avons buté que sur une dizaine de cas désespérés. Nous considérons qu'un cas est désespéré quand il nécessite la refonte totale du système, celle du routage des cartes électroniques en particulier. Cela signifie, parfois après bien des efforts et des dépenses, que l'on finit par obtenir ce que l'on cherche : un fonctionnement satisfaisant.

Que ce regard optimiste n'incite pas le concepteur à reporter sa part de responsabilités sur les installateurs ou les utilisateurs. Il est bien préférable de concevoir des matériels sains qui bénéficient d'une marge de sécurité confortable. Seuls des équipements bien conçus peuvent supporter des erreurs de mises en œuvre CEM sans conséquences néfastes. Seul un matériel bien conçu est facile à mettre au point en CEM et pourra évoluer sans grandes difficultés.

1.3 Mode différentiel et mode commun

Un signal électrique, utile ou parasite, conduit par une liaison bifilaire n'a que deux façons de se propager : en **mode différentiel** ou en **mode commun**.

1.3.1 Mode différentiel

Le mode différentiel, noté MD, est la façon normale de transmettre un signal électrique. Il est aussi appelé **mode série**, **mode normal** ou **mode symétrique**. En intensité, le courant de MD se propage sur l'un des conducteurs et revient en opposition de phase sur les autres conducteurs. Les alimentations et tous les signaux électroniques sur deux fils sont transmis en mode différentiel.

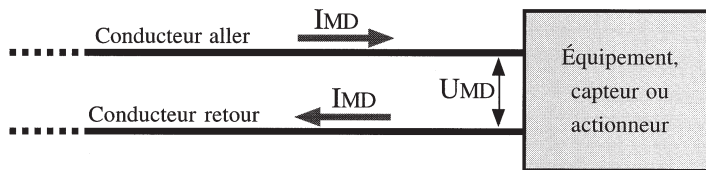


Figure 1.8 – Un signal est transmis en mode différentiel (MD)

La tension différentielle se mesure entre les conducteurs. Elle est simple à mesurer. Les bons voltmètres ou multimètres alimentés par piles mesurent sans difficulté les tensions différentielles BF jusqu'à une centaine de kilohertz. Avec un oscilloscope, en ambiance bruitée, il est souhaitable d'utiliser une sonde de tension différentielle.

Les perturbations électromagnétiques sur les câbles ne se couplent que de façon très faible directement en mode différentiel. Quand les conducteurs aller et retour sont proches et raisonnablement loin des sources de perturbations, on peut négliger les perturbations induites en MD. En pratique, c'est la conversion du mode commun en MD par la dissymétrie de l'étage d'entrée, ou des impédances de l'étage de sortie, qui pose problème.

Puisque les perturbations de mode différentiel sont négligeables pour un équipement raisonnablement câblé, où donc se trouve le problème principal en CEM ?... La réponse est presque toujours : *dans le mode commun*.

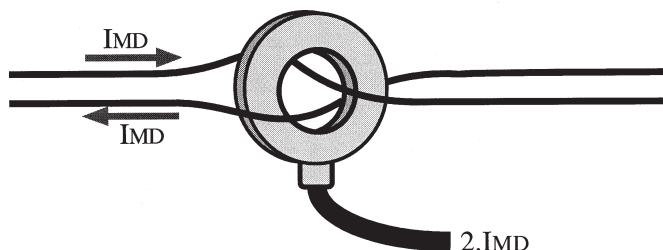


Figure 1.9 – Mesure du courant de mode différentiel

1.3.2 Mode commun

Le mode commun, noté MC, est un mode parasite, inutile et pour tout dire, néfaste. On l'appelle aussi **mode parallèle**, **mode longitudinal** ou **mode asymétrique** (bien que ce dernier qualificatif puisse prêter à confusion). Le courant de MC se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse. Depuis que la terre n'est plus utilisée comme conducteur de retour par les téléscripteurs, aucun signal utile (hormis quelques alimentations « en fantôme » entre deux paires) n'est plus transmis en mode commun sur les câbles de signaux.

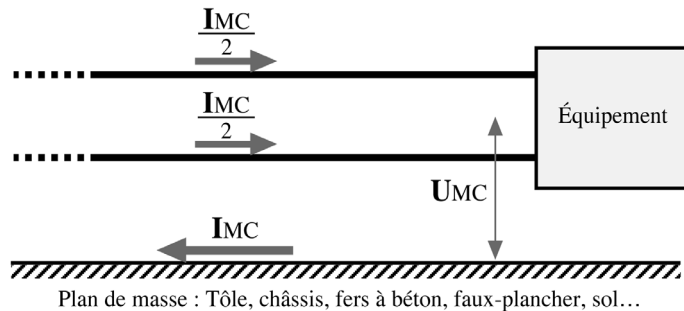


Figure 1.10 – Perturbation en mode commun (MC)

Une tension de mode commun se mesure entre le potentiel moyen de tous les fils d'une part et la masse d'autre part. Les perturbations électromagnétiques se couplent facilement sur les câbles en mode commun. Tous les mécanismes de couplage en MC sont efficaces en HF : impédance commune, effet de main, diaphonies inductive et capacitive, champ à câble et champ à boucle de masse. Le mode commun constitue le problème récurrent de la CEM.

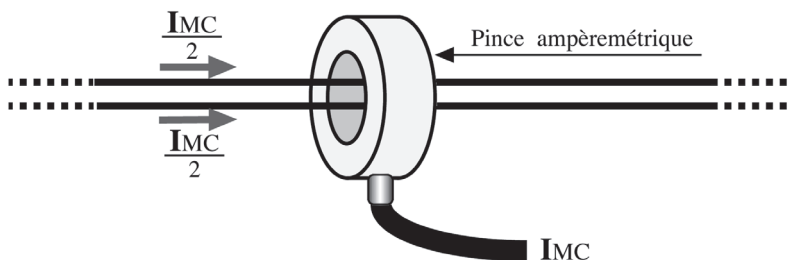


Figure 1.11 – Mesure (simple) du courant de mode commun

En environnement civil habituel, c'est-à-dire isolant, il n'y a pas, sauf exception, de plan de masse conducteur et accessible. En environnement de type militaire au contraire, il y a toujours une tôle ou un châssis qui peut servir de masse. Une masse (le châssis conducteur d'un équipement par exemple) peut servir à la fois de référence de potentiel pour les électroniques et de « poubelle » pour les courants parasites en mode commun.

Un courant qui pénètre en mode commun dans un équipement en ressort soit par les autres câbles, soit par les liaisons aux structures conductrices externes. Si l'équipement bénéficie d'un châssis conducteur électriquement relié à la masse de l'environnement, la plus grande part des courants de MC se referme par cette voie. En effet, l'impédance d'une tôle ou de structures métalliques maillées est très inférieure à celle des câbles. Cela est vrai à toutes fréquences, mais est particulièrement intéressant en HF. Tous les autres câbles sont alors efficacement préservés des courants parasites. Un environnement conducteur équipotentiel avec masse accessible est toujours favorable à la CEM.

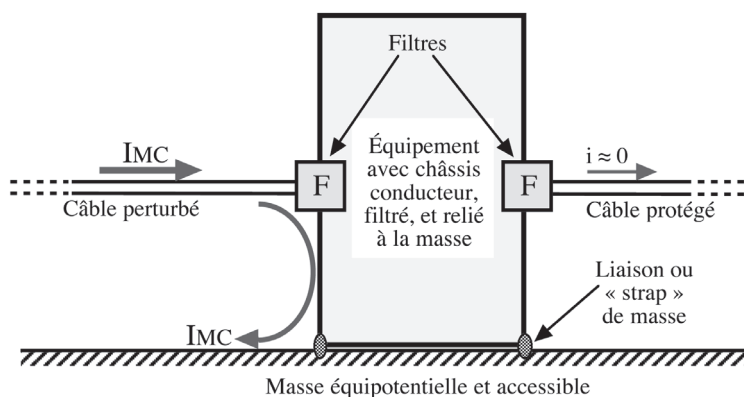


Figure 1.12 – Un environnement équipotentiel et accessible est favorable

Inversement, en environnement isolant, si un câble collecte ou propage un courant de mode commun, tous les autres câbles risquent de devenir bruités en évacuant une partie de ce courant. Les câbles qui étaient presque indépendants en environnement équipotentiel (avec châssis reliés entre eux et à la masse) sont toujours couplés en environnement isolant.

Un environnement isolant ne pose pas de problème de CEM aux fréquences basses à condition de faire flotter (d'isoler galvaniquement des masses) toutes les entrées/sorties. Malheureusement, empêcher la circulation de courants de mode commun n'est réalisable qu'en BF, nous verrons pourquoi un peu plus loin.

La différence essentielle entre les perturbations de mode commun et celles de mode différentiel est que ces dernières peuvent être filtrées localement, câble par câble. Au contraire, comme son nom l'indique, le mode commun est commun à tous les câbles, surtout en environnement isolant.

Les perturbations conduites en mode commun sur les câbles en HF représentent le problème principal de CEM. Tous les spécialistes peuvent en témoigner. La réduction des perturbations de MC sur les câbles, aux fréquences supérieures à 1 MHz, peut utiliser une ou plusieurs combinaisons des trois solutions suivantes :

- effets réducteurs : proximité des masses et câbles blindés ;
- filtres référencés à la masse mécanique en entrée de chaque équipement ;
- ferrites (parfois en grandes quantités) sur les câbles à problèmes.

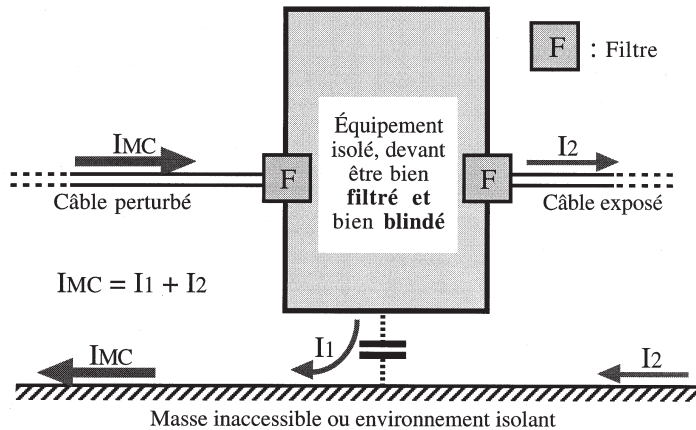


Figure 1.13 – Équipement exposé au mode commun HF en environnement isolant

Un courant de mode commun étant inutile, si on ne peut pas le réduire, il importe d'éviter sa transformation en mode différentiel. C'est le rôle des liaisons symétriques, aussi appelées « balancées » ou équilibrées. Un isolement galvanique n'est très efficace qu'aux fréquences basses. Une liaison symétrique peut ne pas être isolée et, contrairement à une simple isolation galvanique, conserver une efficacité honorable aux fréquences élevées.

L'aptitude d'un circuit à rejeter le mode commun est définie par un coefficient appelé **rapport de réjection de mode commun** (CMRR en anglais). Ce nombre sans dimension, souvent exprimé en décibels, est égal au rapport de la tension de mode commun divisée par la tension parasite résiduelle apparaissant en mode différentiel. Plus le CMRR est élevé, meilleure est la symétrie du circuit. À 50 Hz, un CMRR peut dépasser 120 dB (même sans isolement galvanique), mais il atteint difficilement 60 dB à 1 MHz. Il n'excède guère 40 dB au-delà de 10 MHz même avec un très bon câble.

Les perturbations HF en mode différentiel ont le plus souvent pour origine la conversion du mode commun en mode différentiel causée par la dissymétrie de la liaison. Cette conversion MC/MD provient de la dissymétrie de la ligne ou de celle des impédances par rapport à la masse des circuits d'extrémités (soit côté émission, soit côté réception).

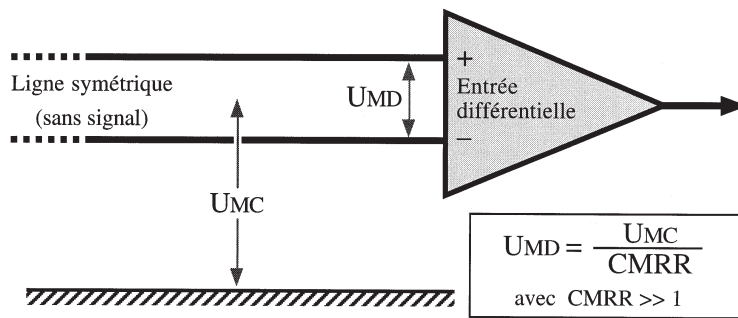


Figure 1.14 – Réjection du mode commun par une liaison symétrique

La dissymétrie d'une liaison différentielle en paire est principalement localisée à ses extrémités, du moins jusqu'à quelques mégahertz. Ce déséquilibre peut être provoqué par une dissymétrie électrique ou géométrique. Un déséquilibre électrique est causé par la différence des impédances d'extrémité par rapport à la masse : inégalité des résistances terminales ou, plus souvent encore, des capacités par rapport à la masse, ce qui déphase une entrée par rapport à l'autre (donc génère du MD à partir du MC).

Un déséquilibre géométrique peut être causé par la différence entre la longueur du conducteur aller et celle du retour. Au-delà de 10 MHz, une différence de longueur de quelques centimètres suffit à ruiner la symétrie d'une liaison, donc sa réjection du mode commun.

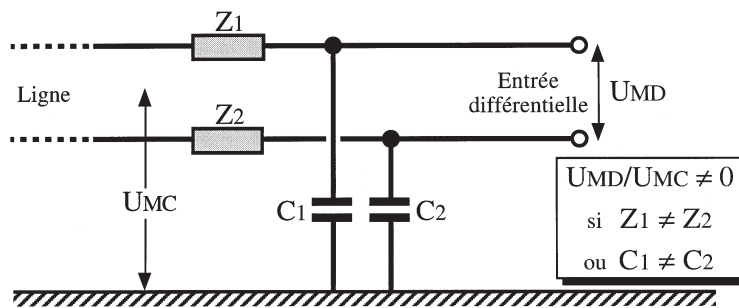


Figure 1.15 – Conversion du MC en MD par une dissymétrie d'impédance

Pour obtenir une bonne compatibilité électromagnétique, il importe de comprendre les phénomènes et de connaître les limites de chaque choix. Certaines options peuvent être appliquées sans crainte. L'interconnexion de toutes les terres d'un même site est un exemple (malheureusement pas toujours appliqué). Toute solution peu coûteuse et sans risque devrait être retenue sans hésitation.

Les corrections qui risquent de présenter des effets secondaires néfastes doivent être combinées avec d'autres précautions afin que le système supporte l'ensemble des perturbations (BF et HF, fugitives et permanentes, de faibles et de fortes amplitudes, etc.). Citons par exemple les isollements galvaniques, excellents en BF mais qui sont insuffisants (voire défavorables) en HF, les connecteurs filtrants qui sont incapables de supporter de fortes surtensions et provoquent souvent une sévère dissymétrie des liaisons symétriques, etc. La combinaison maîtrisée de différentes précautions s'appelle *coordination des protections*. Analysons en détail chacun des six couplages fondamentaux.

1.4 Couplage par impédance commune

La mise en équation de ce couplage est élémentaire puisqu'il s'agit de la loi d'Ohm (en alternatif tout de même) :

$$U = Z \cdot I$$

Avec :

U : tension aux bornes de l'impédance commune, en volts (V),

Z : impédance du conducteur entre ces deux points, en ohms (Ω),

I : courant circulant dans le conducteur, en ampères (A).

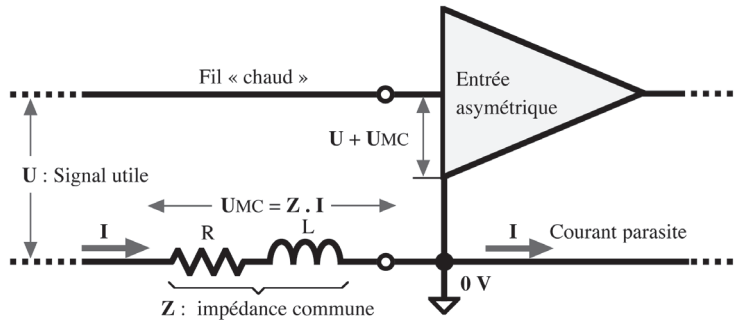


Figure 1.16 – Conversion du courant sur « fil froid » en tension de MD

Aux fréquences très basses, Z est une *résistance*, notée R . Elle n'est en général constante ni en fréquence, à cause de l'effet pelliculaire, ni en température. Pour un cylindre de cuivre (figure 1.17), à température ambiante :

$$R = \frac{17L}{S}$$

Avec :

R : résistance du conducteur, en milliohms ($m\Omega$),

L : longueur du conducteur, en mètres (m),

S : section du conducteur, en millimètres carrés (mm^2).

La résistance d'une piste de cuivre d'épaisseur courante de $35 \mu m$ (figure 1.17) se calcule par la relation très simple :

$$R = \frac{0,5L}{d}$$

Avec :

R : résistance de la piste, en milliohms ($m\Omega$),

L : longueur de la piste, dans la même unité que d ,

d : largeur de la piste, dans la même unité que L .

La résistivité des métaux ordinaires ne devient nulle qu'aux températures très basses, par supraconductivité (jusqu'à quelques degrés du zéro absolu, soit très peu au-dessus de $-273^\circ C$). Même à cette température extrême, l'inductance d'un circuit est inchangée. Nous verrons pourquoi un peu plus loin.

Application 1.1 : tension en BF le long d'une piste de circuit imprimé

Quelle est la différence de potentiel entre les extrémités d'une piste de circuit imprimé de 5 cm de long et 0,3 mm de large, parcourue par un courant continu de 1 A ?

Solution

Pour une piste d'épaisseur classique (35 μm) : $R = 0,5L/d$. Ici, en exprimant L et D en millimètres : $R = 0,5 \times 50/0,3 = 83 \text{ m}\Omega$.

C'est la loi d'Ohm qui s'applique en continu : $U = RI$.

$$U = 0,083 \times 1 = 83 \text{ mV}$$

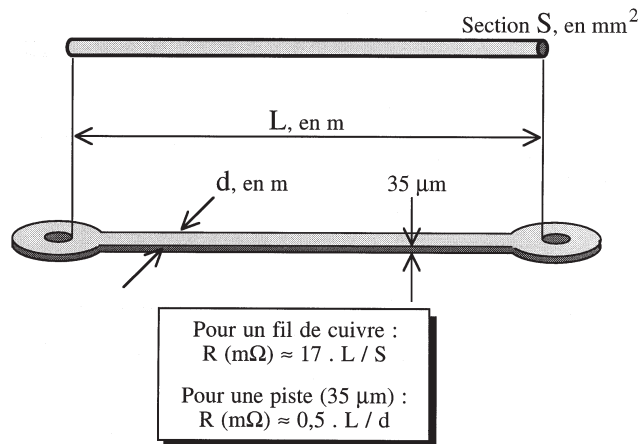


Figure 1.17 – Résistance d'un fil de cuivre et d'une piste de circuit imprimé

Cette tension parasite continue s'ajoute au signal transmis. Elle peut être acceptable en numérique mais sûrement pas en analogique. Même avec une épaisseur de cuivre de 105 μm (le maximum industriel) la chute de tension dépasse encore 25 mV. Un circuit à bas niveau craint la circulation de courants (à toute fréquence) dans le 0 V de la partie analogique, surtout sur une carte sans plan de masse.

Application 1.2 : résistance d'un conducteur de protection en BF

Quelle est la résistance d'un conducteur de terre de 10 m de 35 mm^2 de section ?

Solution

La résistance en milliohms d'un câble de cuivre : $R = 17L/S$. Soit ici :

$$R = 17 \times 10/35 = 5 \text{ m}\Omega$$

Il est difficile, et presque impossible, de garantir entre deux masses distantes une résistance inférieure à quelques milliohms. Il est à peu près impossible, en envi-

ronnement industriel classique, de garantir une tension inférieure à 1 mV entre deux points éloignés ; quelques centaines de millivolts à 50 Hz y sont habituels.

Lorsque la fréquence augmente, un curieux phénomène se produit : les lignes de courant ne se répartissent plus de façon homogène dans le volume du conducteur. C'est ce que l'on appelle **effet pelliculaire**, **effet Kelvin** ou **effet de peau**. Cet effet électromagnétique peut sembler paradoxal. En effet, deux courants dans le même sens exercent l'un sur l'autre une force mécanique d'attraction alors que l'on constate que, géométriquement, les lignes de courant se repoussent en surface. Pourquoi ?

Proposons une explication simple : un courant s'accompagne nécessairement d'un champ magnétique. Or les métaux refusent de laisser pénétrer les champs à fréquence élevée, même leur composante magnétique. Ainsi, puisqu'un champ magnétique variable décroît au fur et à mesure que l'on pénètre au cœur du conducteur, la densité de courant qui lui est obligatoirement associée fait de même : elle diminue quand on s'éloigne de la surface. C'est un phénomène d'auto-induction.

L'effet pelliculaire en conduction n'est rien d'autre que le phénomène d'absorption des champs dans les conducteurs. Une fois encore, la frontière entre conduction et rayonnement est artificielle. La profondeur de pénétration d'un courant diminue comme la racine carrée de la fréquence. Rares sont les phénomènes physiques qui suivent une telle loi. Les couplages par influence (capacitifs ou inductifs) sont dérivatifs : ils augmentent comme la fréquence. D'autres phénomènes, tel le rayonnement d'une petite boucle, augmentent comme le carré de la fréquence. Il en est de même dans la plupart des autres domaines (mécanique, hydraulique...).

La loi de décroissance de la densité de courant en fonction de la distance à la surface est exponentielle. La profondeur à laquelle la densité de courant est divisée par le nombre $e = 2,718$ est appelée **épaisseur de peau**. Notée δ , elle dépend de la nature du matériau conducteur et de la fréquence.

1.4.1 Impédance d'un plan de masse

Puisque l'on cherche à réduire les impédances et que les électrons refusent à fréquence élevée de pénétrer profondément dans un conducteur, peu importe l'épaisseur de ce dernier. Pour réduire sa résistance, il convient de fournir aux courants le maximum de surface. La meilleure géométrie est donc une tôle large. Ainsi, un plan de masse pour un équipement ou le plan de 0 V pour un circuit imprimé constituent les meilleures références de potentiel possibles.

On définit l'**impédance de surface** d'une tôle, aussi appelée impédance « par maille » ou impédance « par carré », comme le ratio de la tension entre deux côtés opposés d'un carré de tôle au courant qui le traverse. Le résultat qui s'exprime en ohms (Ω) ne dépend pas de la taille du carré : en prenant un carré deux fois plus grand, le chemin des lignes de courant est deux fois plus long, mais le passage est aussi deux fois plus large et ces deux effets se compensent exactement. L'impédance de surface d'une tôle ne dépend que de sa nature (sa matière) et de la fréquence.

En continu, l'effet de peau n'existe pas, l'impédance par carré d'une tôle est une simple résistance. Cette résistance par carré est d'autant plus faible que le matériau est bon conducteur et que la tôle est épaisse. Ainsi :

$$R = \frac{17}{\sigma_r e}$$

Avec :

R : résistance de surface, en micro-ohms ($\mu\Omega$),

σ_r : conductivité du métal par rapport au cuivre, sans dimension,

e : épaisseur de la tôle, en millimètres (mm).

Quand l'effet de peau apparaît (la fréquence dépend du matériau et de son épaisseur), la profondeur de pénétration des courants diminue comme la racine carrée de la fréquence. L'impédance de surface croît alors comme la racine carrée de la fréquence, c'est-à-dire plus lentement que l'impédance d'une inductance pure (qui augmente, elle, proportionnellement à la fréquence).

Si le conducteur est magnétique, alors son épaisseur de peau est très faible. Ainsi, pour réaliser d'excellents plans de masse, préférons les métaux amagnétiques (cuivre ou aluminium) et évitons les alliages ferreux. Si la conductivité des métaux est constante en fréquence, leur **perméabilité magnétique** μ diminue en général un peu en HF.

On peut démontrer, grâce aux équations de Maxwell intégrées dans la matière, que l'épaisseur de peau dans un conducteur à température ambiante vaut :

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{\sigma_r \mu_r F}}$$

Avec :

δ : épaisseur de peau, en micromètres (μm , on disait naguère « microns »),

σ_r : conductivité du conducteur par rapport au cuivre, sans dimension,

μ_r : perméabilité magnétique relative du matériau, sans dimension (= 1 si amagnétique),

F : fréquence, exprimée en mégahertz (MHz).

Pour calculer l'effet de peau dans le cuivre à une température de 120 °C (dans un transformateur par exemple), remplacer ci-dessus le coefficient 66 par 77. L'abaque de la figure 1.18 donne l'épaisseur de peau dans le cuivre selon la fréquence. On constate que l'influence de la température est assez faible. On peut aussi observer que l'épaisseur de peau à 50 Hz est d'environ 1 cm (exactement à 70 °C).

Les jeux de barres des postes électriques doivent être divisés en plusieurs barres en parallèle, l'épaisseur d'une barre ne devant pas dépasser un centimètre. Dans le cas contraire, on utiliserait plus de cuivre sans bénéficier d'une plus faible résistance. Ce phénomène apparaît aussi pour les très gros câbles électriques qui, en installation fixe, sont avantageusement remplacés par des tubes creux.

La conductivité relative de l'aluminium pur (attention aux alliages qui peuvent être nettement moins conducteurs) est voisine de 0,63. Sa variation en température est, comme pour tout métal pur, équivalente à celle du cuivre. Pour obtenir l'épaisseur

de peau dans l'aluminium, il suffit de multiplier celle du cuivre par $(0,63)^{-0,5}$ soit 1,26. Seul l'argent, avec une conductivité relative de 1,06, est meilleur conducteur que le cuivre. Son épaisseur de peau est de 0,97 fois celle du cuivre (pour ne pas dire égale). L'or est un peu moins bon conducteur que le cuivre ($\sigma_r = 0,7$).

L'acier doux est moins conducteur que le cuivre : sa conductivité relative avoisine 0,1 ($\sigma_r = 0,14$ pour du fer pur). Mais le fer est très magnétique, avec un μ_r qui peut dépasser 1 000. Au total, l'épaisseur de peau dans le fer est dix fois inférieure à celle du cuivre. À 50 Hz, la profondeur de pénétration des lignes de courant, ou de champ magnétique, n'y excède pas 1 mm.

On comprend pourquoi les tôles de transformateurs sont fines (typiquement de 0,2 à 0,4 mm) et électriquement isolées les unes des autres par une pellicule de carlite. Un coefficient de foisonnement (la section utile du fer est inférieure d'environ 2 % à la section géométrique) est le prix à payer pour laisser le champ magnétique pénétrer dans le métal. En électricité, il est parfois nécessaire de diviser pour régner.

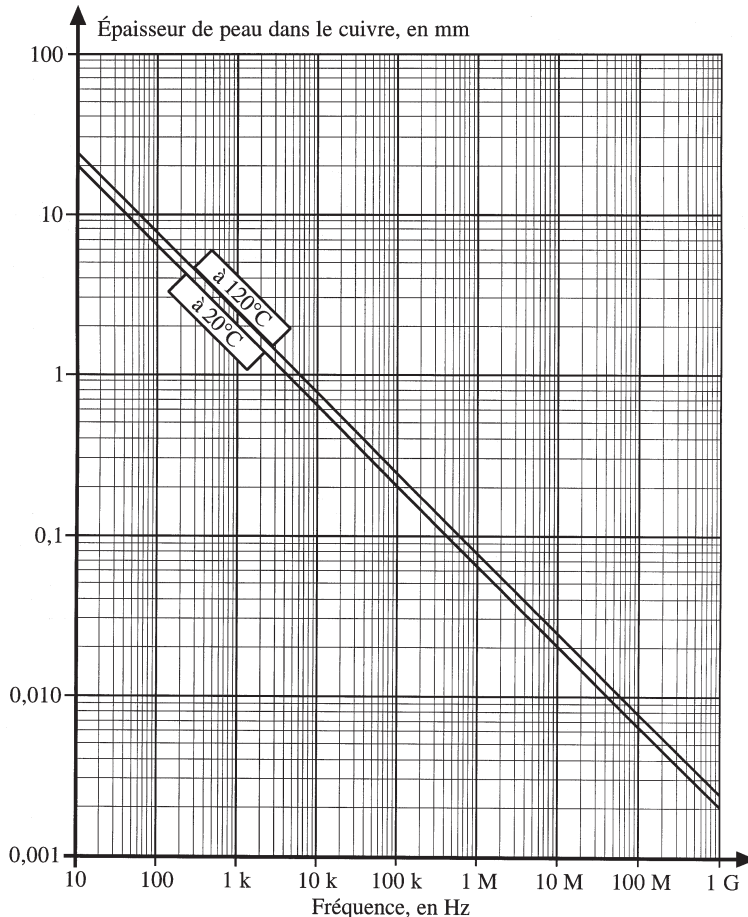


Figure 1.18 – Épaisseur δ de peau dans le cuivre à 20 °C et à 120 °C

L'électrotechnicien préoccupé par les fréquences industrielles retiendra que l'épaisseur de peau dans le cuivre est voisine de 1 cm à 50 Hz alors que l'électronicien se souviendra qu'elle est voisine de 70 μm à 1 MHz. Retenons que cette épaisseur diminue comme la racine carrée de la fréquence et qu'elle est inférieure quand l'alliage est magnétique. L'impédance de surface d'un conducteur aux fréquences élevées ne dépend pas de son épaisseur. Elle augmente comme la racine carrée de la fréquence. Au chapitre blindages nous verrons qu'elle vaut :

$$Z = 370 \frac{\sqrt{F\mu_r}}{\sqrt{\sigma_r}}$$

Avec :

Z : impédance de surface, en micro-ohms ($\mu\Omega$),

F : fréquence, exprimée en mégahertz (MHz),

μ_r : perméabilité magnétique relative du matériau, sans dimension,

σ_r : conductivité du conducteur par rapport au cuivre, sans dimension.

Application 1.3 : impédance du plan de cuivre d'un circuit imprimé

Quelle est l'impédance, en continu et à 100 MHz, d'un plan de cuivre (ni troué ni fendu) d'un circuit imprimé multicouches mince d'une épaisseur de 17 μm ?

Solution

En continu :

$$R = 17/\sigma_r e = 17/(1 \times 0,017) = 1\,000\ \mu\Omega$$

$$R = 1\ \text{m}\Omega \text{ par carré}$$

À 100 MHz :

$$Z = 370 \frac{\sqrt{F\mu_r}}{\sqrt{\sigma_r}} = 370 \frac{\sqrt{100 \times 1}}{\sqrt{1}} = 3\,700\ \mu\Omega$$

$$Z = 3,7\ \text{m}\Omega \text{ par carré}$$

L'impédance de surface d'une feuille de cuivre de 17 μm d'épaisseur à 100 MHz est environ quatre fois supérieure à sa résistance en continu. Une épaisseur supérieure réduirait la résistance en continu mais ne modifierait pas l'impédance à 100 MHz. En HF, l'épaisseur des conducteurs n'importe pas du tout. La figure 1.19 indique qu'il est inutile d'utiliser une tôle en cuivre plus épaisse que 1 mm dès 2 kHz, ou un circuit imprimé plus épais que 35 μm au-dessus de 2 MHz.

Remarquons aussi qu'une tôle se comporte comme une résistance tant que son épaisseur est inférieure à 0,78. Dès que l'épaisseur de peau devient inférieure à 1,4 fois l'épaisseur du conducteur, l'impédance de surface croît comme la racine de la fréquence. L'erreur commise en prenant comme impédance de surface la valeur maximale de R et de Z ne dépasse pas 1 dB, autant dire qu'elle est négligeable. Inutile de s'encombrer d'une fonction de Bessel de première espèce.