

ALAIN CHAROY
AEMC

COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Parasites et perturbations
des électroniques

TOME 4

ALIMENTATION, Foudre et REMÈDES
Règles et conseils d'installation

DUNOD The logo for DUNOD TECH features the word 'DUNOD' in a standard sans-serif font, followed by 'TECH' in a bold, italicized sans-serif font. The 'TECH' is partially enclosed by four parallel, slanted vertical lines that extend upwards and to the right.

© Dunod, Paris 1992
ISBN : 2-10-001442-0

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droits, ou ayant-cause (loi du 11 mars 1957, alinéa 1^{er} de l'article 40), cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contre-façon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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.

AVERTISSEMENT

Ce petit manuel s'adresse principalement aux techniciens et installateurs concernés par le câblage, la mise en œuvre, le dépannage ou la maintenance de systèmes électroniques. Nous l'avons voulu clair, concis, facile à utiliser, avec des règles et des conseils très pratiques. Il est conçu comme un outil.

Ce quatrième tome expose les divers problèmes liés à la qualité et à la distribution de l'alimentation électrique. Il présente, ordres de grandeur à l'appui, les risques de la foudre: ceux du courant et ceux du champ magnétique. Il propose des conseils pour comprendre, mesurer et limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les électroniques. Nous avons cherché à guider l'installateur confronté à un problème de CEM en donnant des recommandations pratiques et des automatismes. Enfin nous proposerons de valider toute installation afin d'acquérir une confiance raisonnable dans un bon fonctionnement futur.

La remise en cause d'un bon nombre de règles de l'art erronées ne sera possible que par une bonne compréhension par une majorité d'installateurs des concepts physiques essentiels, en particulier la notion d'impédance du réseau électrique, de l'équipotentialité des masses et la maîtrise des couplages en hautes fréquences. Ces aspects sont encore trop souvent négligés ou mal perçus.

Chaque tome est indépendant des autres. Nous recommandons toutefois au lecteur intéressé par l'ensemble de la compatibilité électromagnétique (la CEM) de commencer par le tome 1 qui présente la méthode générale d'analyse d'un problème.

Lorsque nous devons faire appel à une notion spécifique de CEM, l'expression est notée en *italique* et sa définition sera donnée en annexe. A la fin de chaque chapitre, un court paragraphe en résumé l'essentiel. Nous souhaitons avoir donné à ce guide un style assez plaisant pour inci-

ter le lecteur à le parcourir en totalité. Ce n'est que lorsque les plus graves erreurs d'installation sont corrigées que le fonctionnement d'un système électronique peut devenir sûr.

L'aspect économique des modifications est pris en compte, avec quelques exemples chiffrés. C'est la meilleure façon de présenter les choses aux décideurs pour obtenir l'autorisation de corriger les erreurs ! Nous pourrions constater que dans la plupart des cas, le coût global des corrections à apporter à une installation (la correction des reprises de masse par exemple) est très faible. Le coût des corrections raisonnables reste dans tous les cas très inférieur à celui des effets (directs et induits) des perturbations électromagnétiques.

Nous avons insisté sur les points qui permettent la compréhension claire des phénomènes. C'est selon nous la première clé de l'efficacité. Le respect des quelques lois fondamentales de la physique élémentaire est nécessaire à une bonne compatibilité électromagnétique. Si, après lecture de ce guide, le lecteur évitait les sacro-saintes erreurs de câblage pour respecter les règles simples et efficaces conformes à la physique de base, nous serions pleinement satisfaits.

Outre une bonne compréhension des phénomènes, la maîtrise des ordres de grandeur est pour nous la seconde clé de la bonne efficacité en CEM. C'est pourquoi nous avons illustré les points importants par un exemple chiffré, aussi simple que possible. Les valeurs numériques sont réalistes, elles sont tirées de l'expérience.

Enfin nous encourageons le lecteur à prendre le temps de vérifier nos affirmations par de petites expériences pratiques. Des manipulations simples sur un coin de table peuvent valider la plupart des phénomènes décrits dans ce petit manuel. C'est selon nous le meilleur moyen de se convaincre... donc d'être convaincant. C'est avec les mains que l'on finit toujours par comprendre puis par faire fonctionner ce qui ne marche pas...

Au risque de nous répéter, le plus important en CEM est d'éviter avant tout les grosses erreurs, en particulier d'abandonner les mauvaises habitudes. Tout le reste n'est que de la simple technique. La maîtrise technique est à notre portée.

SOMMAIRE

Chapitre I	L'ALIMENTATION	13
Chapitre II	LA PROTECTION Foudre	91
Chapitre III	REMÈDES EN C.E.M.	135
Chapitre IV	CONSEILS PRATIQUES	193
Chapitre V	INDEX	213



RENCONTRE AVEC LE PROFESSEUR EINSTEIN

Le Professeur Albert Einstein est interrogé par Marie Curieuse, journaliste, chargée d'écrire un article de vulgarisation sur la CEM.

M. C. Bonjour Professeur... selon vous pourquoi, la CEM est-elle mal comprise ?

A. E. Une cause est le manque de formation appliquée. Beaucoup croient encore que le champ magnétique terrestre provient d'un gisement de magnétite ! Dans ce contexte comment éviter les illusions sur les paratonnerres ?

M. C. Quels sont les points de CEM qu'il faudrait enseigner ?

A. E. Il serait utile d'exposer au lycée la notion d'équipotentialité, d'expliquer ce que sont les boucles de masse et entre masses, l'impédance d'un câble, etc. Il faudrait cesser d'affirmer qu'une terre doit avoir une faible résistance. Je souhaiterais qu'un jour l'expression "une terre sans bruit" apparaisse aussi ridicule que "un gaz sans pression".

M. C. C'était une première difficulté, mais il y en a d'autres je pense...

A. E. Un second point est que les hautes fréquences ne sont pas intuitives. En HF il est facile de commettre des erreurs et d'en tirer des conclusions erronées.

M. C. Par exemple...

A. E. Un installateur raccorde l'écran d'un câble blindé aux deux bouts mais il le relie au 0 volt d'une carte au lieu du châssis ou il effectue la reprise par une longue "queue de cochon". C'est évidemment mauvais, et la conclusion est qu'un raccordement bilatéral est à éviter ! Ainsi se perpétuent les erreurs.

M. C. En CEM, pourquoi est-il difficile de se faire comprendre ?

A. E. Le sens des mots est trompeur. Par exemple l'expression "se mettre au courant" qui signifie s'informer pourrait être comprise par un étranger comme "se jeter à la rivière", "faire son jogging", "se rallier à la majorité", "s'électrocuter", etc. ! En CEM un "défaut" est la conséquence d'une perturbation alors qu'en électricité ce même mot signifie une défaillance d'isolation. Les mots "masse" et "terre" sont trop souvent confondus. Les quiproquos sont faciles.

M. C. Les mots ne constituent pas les seules difficultés en CEM, n'est-ce-pas ?

A. E. Certes, il y en a bien d'autres. Les technologies évoluent plus vite que les habitudes. D'anciens métiers sont désormais impliqués dans la CEM: tôleurs, câbleurs, installateurs. Les responsabilités sont difficiles à répartir. Les équations sont insuffisantes à la résolution des problèmes. Les mesures en CEM nécessitent de coûteux moyens de mesure. La compétence des opérateurs est essentielle. La mise au point CEM d'un équipement est longue et elle ne peut s'effectuer que sur du matériel en fonctionnement. Elle peut remettre en cause des matériels existants. Des décideurs ne savent souvent pas comment aborder les problèmes techniques. Il est tentant de sacrifier la qualité à la quantité. Des règles d'installations de constructeurs sont mauvaises, etc.

M. C. La CEM est-elle coûteuse ?

A. E. Elle a évidemment un coût. Prétendre le contraire serait ridicule, mais elle coûte d'autant plus que l'on refuse de voir les réalités. Un remède tardif est toujours cher, souvent d'efficacité décevante et peut entraîner des conséquences fâcheuses sur l'ergonomie, la fiabilité, la pérennité, la maintenance, etc.

M. C. Je vous trouve bien pessimiste...

A. E. Moi ? Si je pensais que rien ne pouvait aller plus mal, je deviendrais optimiste ! En comptant en siècles, la terre a un âge de 45 millions, les mammifères deux millions, l'homme moderne 2 000, l'homo "sapiens" 200, la pile électrique est connue depuis 2 et le transistor 0,5. Et voyez tout ce que les hommes ont fait comme progrès et comme bêtises dans ce dernier siècle.

M. C. Je ne vous savais pas philosophe.

A. E. Nous autres scientifiques sommes trop impatientes pour l'être vraiment. Nous avons une tendance naturelle à sous-estimer les savoirs d'hier ou d'ailleurs... Savez-vous quelle est la grandeur physique que l'on sait mesurer avec la plus grande précision ?

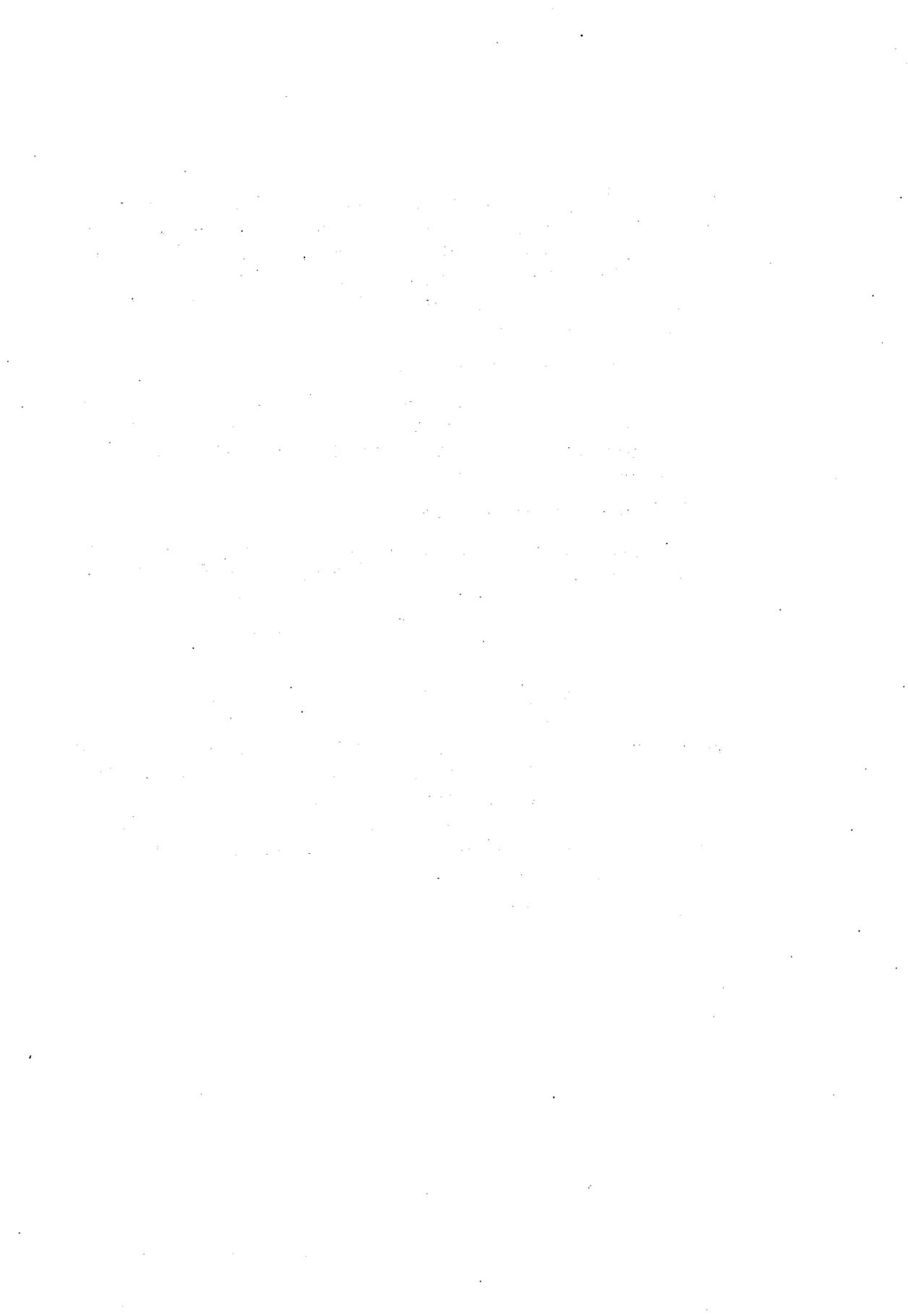
M. C. La fréquence d'un signal, je pense.

A. E. C'est exact ! On sait mesurer le temps avec une précision absolue meilleure qu'une partie par milliard. C'est devenu la base de la définition du mètre étalon. Et pourtant on ne sait pas vraiment ce qu'est le temps !

M. C. Les scientifiques devraient alors être plus modestes qu'ils ne le sont.

A. E. Souvent, un peu d'humilité nous siérait bien. L'histoire montre combien nous nous sommes égarés au milieu de progrès magnifiques. Posez à un scientifique trop sûr de lui la question "depuis quand ne se trompe-t-on plus ?". Les progrès les plus marquants, dont la gravitation et la relativité, ont résulté d'expériences élémentaires, avec des moyens extrêmement simples, presque risibles. Les systèmes modernes sont admirables, mais je suis persuadé qu'il reste encore beaucoup à apprendre et à comprendre sur un coin de table.

M. C. Merci professeur.



L'ALIMENTATION

L'alimentation en énergie électrique est indispensable aux équipements électroniques (quelle analyse !). Il est nécessaire de garantir à tout système une qualité d'alimentation compatible avec son bon fonctionnement. Si la qualité de l'onde de tension à la sortie des centrales est excellente, elle s'altère inévitablement au cours de son transport. Les pires menaces sont la foudre, les courts-circuits, les *chocs de manœuvre* ainsi que divers "parasites" générés par les usagers : à-coups de courant, *harmoniques*, perturbations HF entre autres choses.

Les perturbations collectées lors du transport de l'électricité ont principalement leur origine dans le réseau encore appelé "Moyenne Tension", souvent en 20 kV en France. Les grosses charges (compresseurs, pompes, fours, chauffages, éclairages, moteurs d'entraînement...) acceptent mieux les déformations de l'onde de tension, du moins à court terme, que beaucoup de systèmes électroniques ou informatiques. Les matériels nécessitant une bonne qualité de tension représentent typiquement moins de dix pour cent de la puissance totale d'un site. Il est donc raisonnable de les protéger par des interfaces d'alimentation.



L'analyse de l'alimentation d'un site peut se décomposer en trois parties :

- Les protections du réseau jusqu'au poste de transformation MT/BT. C'est EDF qui en France a le monopole du transport de l'électricité.
- L'installation BT, et en particulier le schéma de neutre, les protections contre les surtensions et les surintensités, la compensation de la puissance réactive, et le filtrage. S'il est mal structuré, le système d'alimentation peut provoquer des dysfonctionnements imputés à tort à EDF. L'installateur en est le responsable.
- Les interfaces d'alimentation dont les alimentations de secours.

Nous ne traiterons en détail ni du transport de l'énergie électrique ni des difficultés particulières des réseaux continus (coupure des circuits, élimination des défauts...). Les problèmes propres aux réseaux haute tension (protections, régimes de neutre, maillage, stabilité, entretien, fiabilité...) ont été jugés trop spécifiques ou trop éloignés des équipements électroniques pour être détaillés dans ce manuel.

Protection de l'alimentation MT

Ce que l'on appelle réseau "moyenne tension" ou "MT", c'est-à-dire pour EDF depuis 1961 le réseau 20 kV (entre phases), devrait s'appeler, depuis le décret du 14 novembre 1988, "haute tension A" ou "HTA" puisque sa *tension composée* est comprise entre 1 kV et 50 kV. L'usage du qualificatif de MT reste toléré (par habitude pour les tensions comprises entre... 3 et 33 kV).

Les réseaux triphasés

Les réseaux électriques de transport de forte puissance sont tous des réseaux triphasés. En effet, avec trois fils on peut transmettre trois fois plus de puissance qu'avec deux. De plus, il est possible de fournir en triphasé une puissance constante dans le temps, ce qui ne serait possible en monophasé qu'en "courant" continu.

La qualité du produit électricité peut être décrite par quelques paramètres : la fréquence, l'amplitude de la tension, la distorsion de l'onde et le déséquilibre des phases. Un réseau triphasé peut être défini par sa représentation sinusoïdale (temporelle) ou par une représentation vectorielle (angulaire).

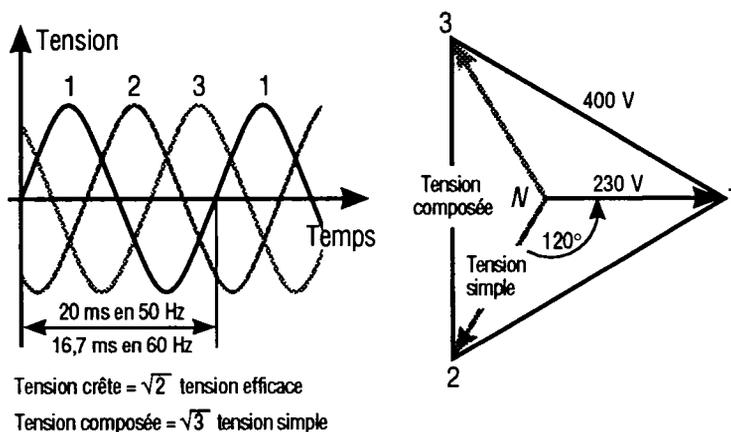


Figure 1-1 : Représentations temporelle et vectorielle des tensions d'un réseau triphasé



L'amplitude d'une tension, comme l'affichage de la plupart des appareils de mesure, est exprimée par sa valeur efficace. A l'oscilloscope, il est commode de mesurer une *tension crête à crête*. Pour une onde sinusoïdale, la valeur efficace vaut 0,354 fois la valeur crête à crête. La tension entre une phase et le neutre est appelée *tension simple*. La tension entre deux phases est appelée tension composée. La tension composée d'un réseau triphasé équilibré vaut $\sqrt{3} = 1,73$ fois la tension simple. Pour définir un réseau triphasé, il suffit de définir les amplitudes et phases des trois tensions (simples ou composées).

Il y a une autre façon de définir un réseau sinusoïdal dissymétrique : les trois tensions du réseau sont la somme de trois types de vecteurs dits "tournants" : la *composante directe*, la *composante inverse* et la *composante homopolaire*.

Qualité de l'alimentation électrique

Les diverses perturbations qui peuvent affecter un réseau électrique sont :

- Le déséquilibre des tensions
- Les fluctuations de tension
- Les variations de fréquence
- Les harmoniques
- Les surtensions

Le déséquilibre des tensions

La dissymétrie d'un réseau est appelée *déséquilibre*. Un réseau équilibré a des composantes inverses et homopolaires nulles. Il n'est composé que d'une composante directe. Un déséquilibre est essentiellement provoqué par la dissymétrie de la consommation sur les trois phases en aval du transformateur, en particulier par des charges monophasées mal réparties entre les phases.

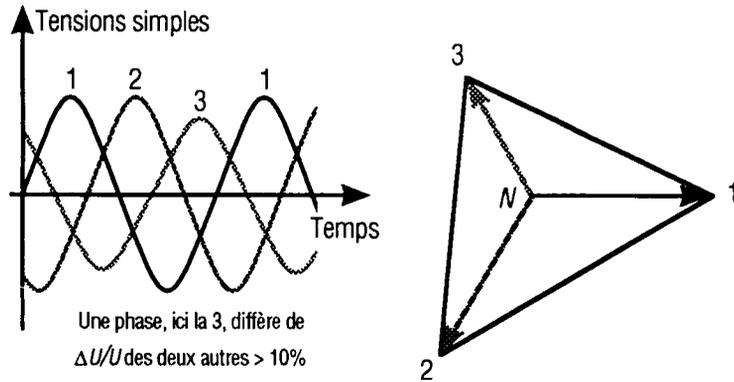


Figure 1-2 : Exemple de déséquilibre

Un déséquilibre entraîne des pertes supplémentaires dans les moteurs triphasés. Les équipements monophasés provoquent le déséquilibre d'un réseau triphasé mais ils sont eux-mêmes insensibles aux déséquilibres.

Un déséquilibre en BT de l'ordre de 0,5 à 1% est à peu près inévitable. Un déséquilibre permanent de 2 à 3% durant quelques minutes est toléré par toutes les charges.

On peut évaluer grossièrement le taux de déséquilibre V (exprimé en %) par la relation très simple : $V = P_m / P_{cc}$, avec P_m : puissance nominale de la charge monophasée qui crée le déséquilibre et P_{cc} : *puissance de court-circuit* de l'alimentation triphasée qui alimente cette charge.

Sur le réseau de transport EDF, le seul déséquilibre notable est provoqué par les lignes de traction ferroviaire. En effet les charges monophasées produisent inévitablement une composante homopolaire. Lorsqu'un déséquilibre de tension est jugé excessif, lorsqu'il excède 2% par exemple, il est souhaitable de mieux répartir les consommations sur les trois phases.

En cas d'impossibilité d'équilibrer les consommations entre les phases, il est possible d'augmenter la puissance de court-circuit (du transformateur et/ou de l'installation). L'astuce du "montage de Steinmetz" (ajouter un circuit L-C en triangle entre les deux autres phases) ne devrait être retenue que pour des réseaux sans neutre car ce montage tend à augmenter



les variations de tension simple. De plus, il est difficile de faire coïncider la consommation instantanée avec le “redressement” de ce montage. Enfin les enclenchements du condensateur (en BF) et les déclenchements de la self (en HF) par des contacteurs génèrent des déformations transitoires mais très perturbatrices de l’onde de tension.

Les équipements électroniques sensibles devraient être alimentés par des transformateurs à forte puissance de court-circuit. Par exemple, pour un transformateur BT de quelques dizaines de kilovolts-ampères, nous conseillons de spécifier une *tension de court-circuit* ne dépassant pas 4%, c’est-à-dire que l’installation devrait pouvoir fournir un courant de court-circuit d’au moins 25 In.

Un transformateur classique de plus de quelques kilovolts-ampères a une tension de court-circuit de l’ordre de 5 à 6% mais des modèles spéciaux, par une construction qui limite la self de fuite entre primaire et secondaire, peuvent être environ deux fois meilleurs. Certains transformateurs d’isolement BT avec primaire et secondaire entrelacés présentent une tension de court-circuit de l’ordre de 2%.

Une faible tension de court-circuit (donc une grande puissance de court-circuit) réduit les déséquilibres, le *flicker* et améliore la qualité de l’onde de tension pour des courants harmoniques donnés. Un dernier moyen, moderne mais coûteux, pour réduire la dissymétrie est d’installer un *compensateur statique*. Il s’agit d’un système actif à thyristors qui stocke de l’énergie dans une self par phase et qui la restitue dans l’alternance au moment opportun. Un compensateur statique est réservé actuellement aux grosses installations où il réduit le flicker. Il constitue l’une des meilleures solutions pour limiter les perturbations générées par les fours à arc dans leur phase de démarrage.

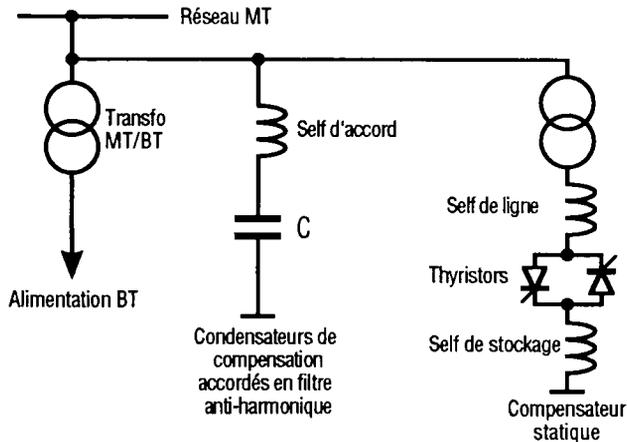


Figure 1-3 : Schéma type d'une installation de compensation statique

Les fluctuations de tension

Ces fluctuations de tension ont deux origines : les problèmes du réseau de transport et les perturbations sur le réseau BT. Pour le premier type, c'est EDF qui est responsable, pour le second, ce sont les usagers. L'ancienne tension nominale de 220 V / 380 V dans une fourchette de +10 à -15% en France passe partout en Europe à 230 V / 400 V dans une fourchette de +6 à -10%.

Les réseaux THT (ou HTB pour être conforme au décret), c'est-à-dire de 63 kV à 400 kV, sont rarement soumis à des problèmes de discontinuité de service. La menace majeure sur les lignes THT est la neige collante qui, quelques jours par an, risque de les surcharger mécaniquement (le "coup de fouet" suite à la décharge du manchon neigeux sur toute une portée peut casser les fils). En effet, la distance entre les conducteurs est telle que ni le vent, ni les branches d'arbres ni les grands oiseaux ne risquent de provoquer d'amorçages. Un ou deux fil(s) de garde en partie haute de ces lignes réduit l'occurrence des creux de tension provoqués par les contournements d'isolateurs sur choc de foudre.

L'exigence des utilisateurs sur la qualité de l'énergie distribuée est croissante. EDF, prenant en compte les enjeux économique de l'alimentation électrique a défini, début 1986, une réorientation de sa politique de qualité, avec des efforts particuliers dans les zones rurales exposées.



La qualité d'un réseau BT ne peut pas être meilleure que celle du réseau MT. Les réseaux enterrés en zone urbaine assurent une bonne qualité de tension et une excellente continuité de service. La qualité en zone rurale est bien plus aléatoire. En zone à faible densité de consommation les progrès en MT seront difficiles, surtout pour les réseaux peu structurés en départ court. La longueur moyenne des lignes MT (70 km en 1990) devrait passer à 30 km avant 2110.

La qualité de l'alimentation électrique s'améliore de façon notable. Le temps moyen de coupure en BT est passé de plus de 10 heures en 1965 à moins de 5 heures en 1985. Au cours de cette même année, 28 % des clients n'ont pas été coupés (mais 5 % l'ont été plus de 10 fois). De tels progrès sont naturellement lents et coûteux, particulièrement en région montagneuse.

L'objectif de qualité pour 1995 était qu'aucun client ne reçoive une qualité inférieure aux seuils annuels suivants :

- Chute de tension BT : 11 % (objectif final : + 6, -10 %)
- Durée moyenne de coupure programmée pour travaux : 1 heure
- Nombre de coupures longues (de plus de 1 minute) : 6
- Durée de coupure cumulée : 3 heures
- Nombre de coupures brèves (réenclenchements lents) : 30
- Nombre de coupures rapides : 70

Ces objectifs ne seront pas faciles à atteindre pour tous les usagers, en région neigeuse en particulier. Les solutions sont bien connues : multiplier les postes sources, raccourcir des départs, boucler et/ou enfouir les ossatures, réduire le courant de défaut simple puis ajouter des interrupteurs télécommandés et des disjoncteurs shunts. Une téléconduite informatisée des réseaux est progressivement mise en place. Enfin des efforts sont portés sur l'entretien classique des lignes : élagage des arbres, remplacement des isolateurs détériorés sans oublier le renouvellement du matériel usagé.

Une variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% s'appelle *fluctuation de tension* ou "à-coup" en cas de variation brusque. Une *chute de tension* est une variation longue due à une variation lente de la charge. Un *creux de tension* est une diminution de l'amplitude de plus de 10% qui dure de 10 millisecondes à 1 seconde environ. Il est généralement dû à un *défaut* sur le réseau. Les à-coups de tension sont des variations faibles mais brusques de l'amplitude.

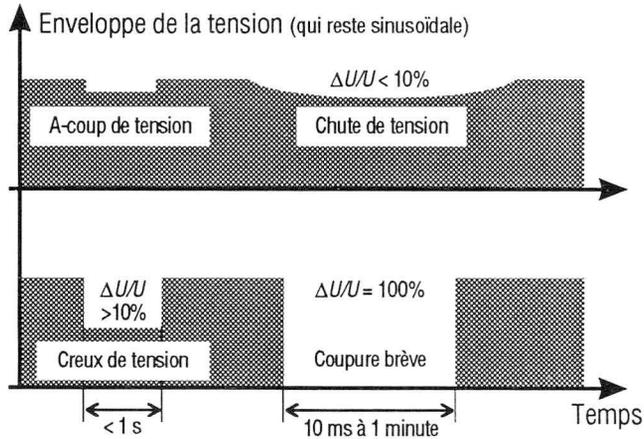


Figure 1-4 : Diverses fluctuations de tension

En cas de défaut sur le réseau 20 kV, un usager subit un creux de tension suivi ou non par une *coupure brève* selon que le défaut est placé ou non sur la ligne de l'usager. Les défauts fugitifs sur les lignes aériennes sont des amorçages qui peuvent être provoqués par des branches d'arbre, de grands oiseaux ou la foudre. Dans plus de 80% des cas, un défaut sur un réseau aérien disparaît pendant la coupure brève, avant la remise sous tension.

La séquence d'élimination d'un défaut sur une ligne 20 kV est fixée par les automatismes des disjoncteurs. Sur un défaut persistant, il y a trois tentatives d'éliminations du défaut, c'est-à-dire trois disjonctions suivies de trois réenclenchements : une fermeture rapide suivie de deux lentes. Si après la troisième tentative le défaut n'est pas éliminé, l'ouverture de la branche en défaut est définitive. Un défaut persistant provoque sur la branche concernée trois coupures brèves et une longue alors qu'une branche voisine subit quatre creux de tension. A partir du palier 63 kV et jusqu'à 400 kV, les réenclenchements sont lents (1,5 à 2 secondes sur défaut monophasé et environ 5 secondes sur défaut polyphasé).

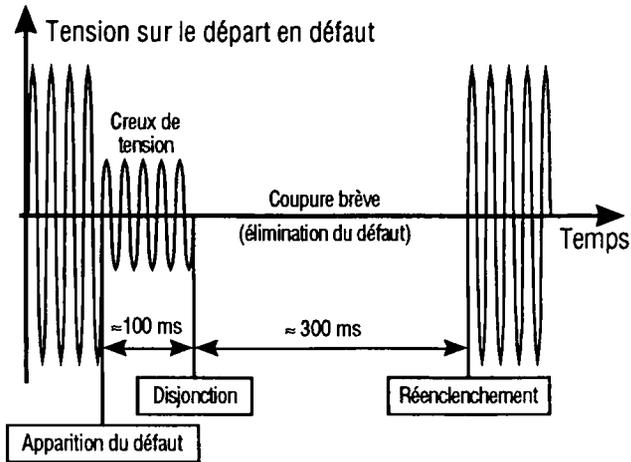


Figure 1-5 : Creux de tension et coupure brève

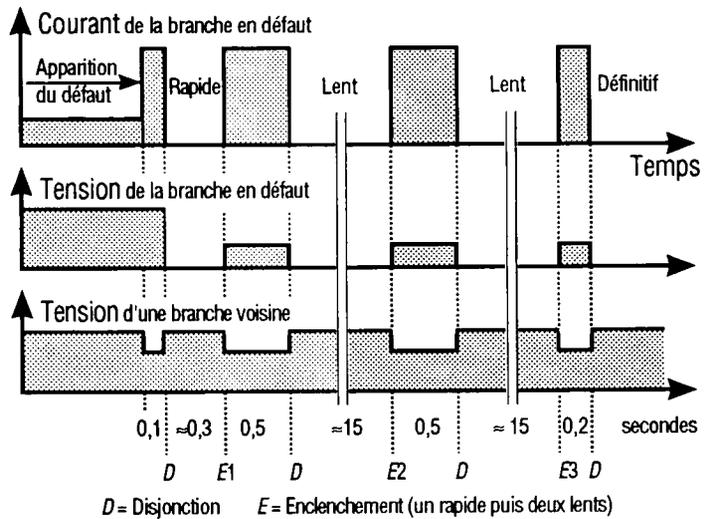


Figure 1-6 : Séquence d'élimination d'un défaut



Environ deux tiers des creux de tension ont une amplitude (on dit aussi une "profondeur") qui ne dépasse pas 25% et trois quarts durent moins de 320 ms. Selon le point de raccordement, le nombre mensuel de creux de tension est très variable : il était compris en France en 1990 dans la fourchette de 1 à 200 !

Un réseaux enterré provoque pour l'utilisateur environ dix fois moins de coupures longues qu'un réseau aérien, mais un défaut y est toujours permanent. La durée d'indisponibilité d'un réseau en câbles isolés (avec un diélectrique non gazeux) dépend du délai de l'intervention humaine.

Les fluctuations de tension de faible amplitude, disons dans la fourchette de + 6 à -10% de la tension nominale, ne posent pas de problème fonctionnel. Ils n'entraînent que des effets subjectivement désagréables si le phénomène est fréquent. L'effet le plus gênant est la variation fréquente de l'intensité lumineuse des éclairages à incandescence qui est appelé "flicker". Les équipements qui génèrent le plus de flicker sont les fours à arc lors des premiers amorçages (avant la fusion), les machines à souder par point et de manière générale les grosses charges au démarrage fréquent (compresseurs, moteurs d'ascenseurs...). Nous constatons à la figure 1-7 qu'aucune variation de tension de plus de 3% n'est acceptable. Une variation de 2,7% est tolérable une fois par minute et une variation de 0,8% ne l'est qu'une fois par seconde.

Le flicker ne peut généralement pas être totalement supprimé, mais il peut être réduit à un niveau supportable. Pour un particulier, le problème se pose surtout en zone rurale. L'augmentation de la puissance de court-circuit au point de livraison (c'est-à-dire aux bornes du compteur) est une bonne solution technique. EDF s'efforce de présenter une impédance maximale de $0,4 + j0,25 \Omega$ à 50 Hz, ce qui correspond à un courant de court-circuit d'environ 500 A.

Chez un particulier en zone urbaine, le courant de court-circuit est généralement compris entre 1 et 5 kA. En zone rurale, compte tenu de la longueur de la ligne BT entre l'abonné et le transformateur, le courant de court-circuit est généralement compris entre 500 et 2500 A. En industrie, le courant de court-circuit n'excède 10 kA que dans des cas exceptionnels, c'est-à-dire sur une ligne de forte section, à proximité du poste source. Il n'excède jamais 100 kA.

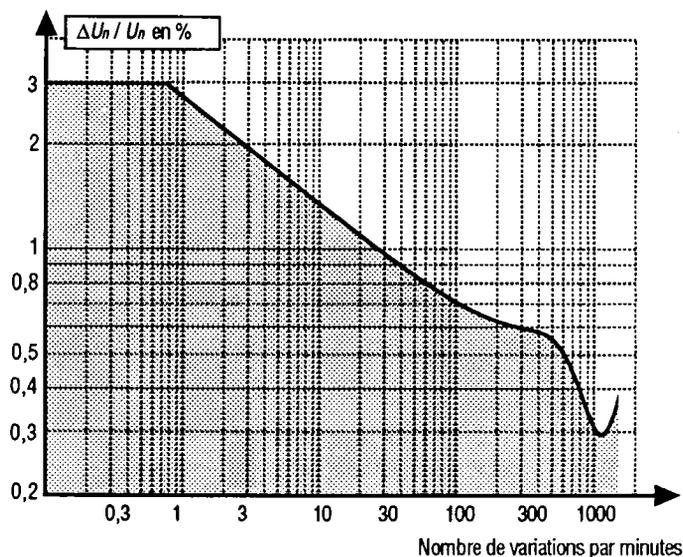


Figure 1-7 : Flicker tolérable selon la fréquence des variations

Pour les industriels soumis au flicker, une modification de l'installation est parfois nécessaire. Parmi les mesures qui permettent de limiter le flicker citons le câblage séparé des gros consommateurs, l'individualisation d'un transformateur, le fractionnement de la charge (un fractionnement en n charges indépendantes apporte un gain de l'ordre de \sqrt{n}), l'augmentation de l'hystérésis des régulations, la réduction des cadences de travail, le décalage avec étalement dans le temps des à-coups et enfin l'ajout d'un compensateur statique.

Rappelons que le flicker ne pose qu'un problème physiologique. Il n'entraîne aucun effet électromagnétique sur les électroniques.

Les variations de fréquence

Le réseau européen continental est maillé. Il se comporte en tout point comme un réseau de puissance infinie, c'est-à-dire qu'une consommation quelconque en quelque point que ce soit n'influe pas sur la fréquence. La précision instantanée de la fréquence est meilleure que 0,1% (valeur mesurée mais pas formellement garantie) et le nombre quotidien d'alternances est exact. Il n'en n'est pas de même des groupes électrogènes car leur puissance électrique est souvent du même ordre de grandeur que les impacts de charge. Le nombre de groupes électrogènes est en croissance, au moins grâce au contrat EJP (effacement des jours de pointe) qui incite les industriels à s'équiper d'un groupe de secours.

Par chance, les variations de fréquence ne perturbent pratiquement plus les équipements électroniques. D'anciennes consoles de visualisation et des variateurs supportaient mal les variations de fréquence et/ou de phase. Désormais en pratique seuls les automatismes de basculement entre un réseau normal et un réseau de secours restent souvent sensibles aux variations de phase. Bien sûr les moteurs calés à la fréquence du réseau subissent les variations de cette fréquence. Réciproquement, l'inertie des moteurs tend à lisser les à-coups de phase provoqués par tout accroissement brutal de la consommation.

Il importe que la fréquence d'un groupe électrogène ne tombe jamais en dessous de 48 Hz environ car le circuit magnétique de certains gros transformateurs saturerait et appellerait un fort courant magnétisant crête au primaire. A tout prendre, un excès de fréquence est moins nocif : une fréquence de 55 Hz pose moins de problèmes d'échauffements pour un équipement électrotechnique et moins de risques de perturbations d'un appareil électronique qu'une fréquence inférieure à 50 Hz.

Un des problèmes des variations de fréquence est que les harmoniques se déplacent en fréquence avec un décalage proportionnel à leur rang : une variation de 1 Hz à 50 Hz correspond à une variation de 11 Hz de l'harmonique 11. Les mesures de courants harmoniques deviennent en cas de fluctuations de fréquence instables et pénibles. Pour la même raison, le calage en fréquence de filtres anti-harmoniques devient délicat.

Les harmoniques

Les charges non linéaires : éclairages fluorescents, charges électroniques, fours à arc, etc. produisent des courants non sinusoïdaux, c'est-à-dire consomment des courants harmoniques. Tant que l'impédance du réseau

aux fréquences des courants harmoniques significatifs est basse, la distorsion de l'onde de tension reste faible. Un groupe électrogène, déjà quelque peu distordu sur charge résistive, peut considérablement augmenter sa distorsion sur charge non linéaire. Il importe en conséquence de surdimensionner nettement la puissance de l'alternateur par rapport à celle de son moteur d'entraînement (voir plus bas).

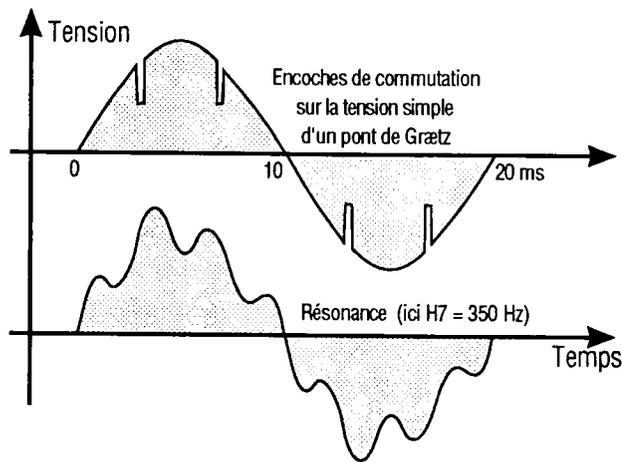


Figure 1-8 : Exemples de distorsions de tension

Une forte puissance de court-circuit aux bornes du comptage ne garantit pas à elle seule une faible distorsion. En effet, l'impédance des câbles et la résonance des condensateurs de compensation de puissance réactive augmentent l'impédance du réseau à sa fréquence de résonance (résonance parallèle, voir plus bas). L'onde de tension peut en être fortement affectée.

Les principaux problèmes d'harmoniques sont générés par les ponts de Grætz. Les ponts triphasés à diodes ou à thyristors se comportent en effet comme des générateurs de courant presque parfaits : l'amplitude des courants harmoniques est pratiquement indépendante de la distorsion de la tension. Un pont de Grætz à diode ne régule pas l'amplitude de la tension continue et présentent un $\cos \varphi$ voisin de 1. Un pont à thyristors

dont la décomposition harmonique est quasiment identique à celle d'un pont à diode régule la tension continue au prix d'un déphasage retard ($\cos \varphi \approx 0,85$ pour une régulation jusqu'à -15% de U_n).

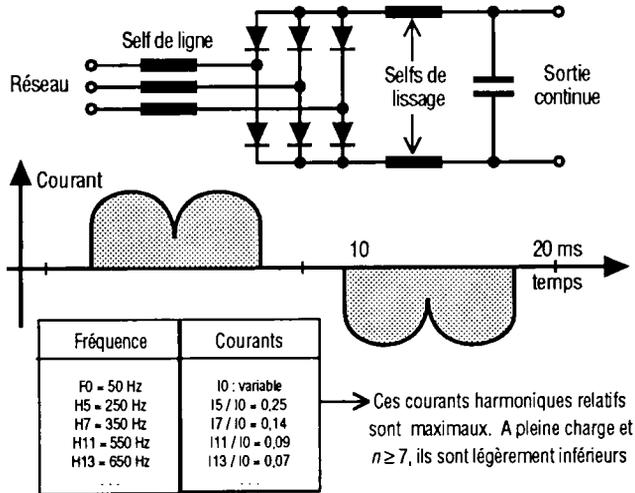


Figure 1-9 : Pont de Grætz : schéma et harmoniques

Les courants harmoniques 3 équilibrés et tous leurs multiples sont homopolaires. Les ponts triphasés ne consomment que des harmoniques impairs non multiples de 3. Le courant *fondamental* I_0 varie comme la puissance consommée. L'amplitude des premiers harmoniques est très proche de I_0/n , où n est le *rang de l'harmonique* (sauf pour $n = 5$ où l'on mesure 25% au lieu de 20%).

On définit le "taux de distorsion" d'une onde (c'est-à-dire d'un signal périodique) comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale :

$$K = \sqrt{(H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2)} / F_1$$

Un taux de distorsion vrai peut dépasser 100% (celui d'un courant homopolaire par exemple). Les distorsiomètres ne mesurent pas le vrai K mais une valeur approchée K' définie par le rapport de la valeur efficace des harmoniques (du signal total moins son fondamental) à la valeur efficace du signal total :

$$K' = \sqrt{(H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2)} / \sqrt{(F_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2)}$$

Lorsque le taux de distorsion est faible, les deux valeurs K et K' sont équivalentes. Quand K' dépasse 20%, il convient de corriger la mesure pour obtenir le véritable taux de distorsion : $K = K' / \sqrt{1 - K'^2}$. Ainsi, pour un taux K' mesuré à 45% (K' = 0,45) le véritable taux de distorsion vaut K = 0,50 (K = 50%). L'erreur dans notre exemple (la distorsion du courant d'un tube fluorescent) atteint de 10% de la mesure. Attention, une autre cause d'erreur peut apparaître : un distorsiomètre devrait mesurer la valeur efficace du signal (puis la comparer celle du signal moins la composante fondamentale). Ce n'est pas toujours le cas, certains distorsiomètres se contentant de mesurer la valeur moyenne du signal redressé. Leurs mesures sont le plus souvent encore inférieures à K'.

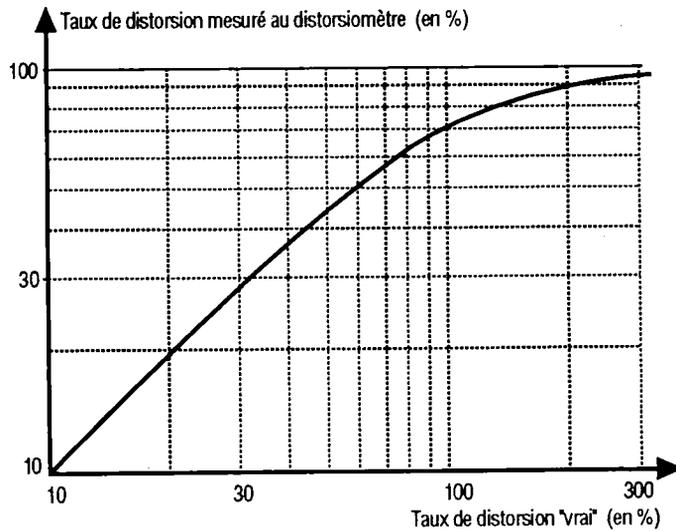


Figure 1-10 : Correction du taux de distorsion mesuré

En 1990, le taux de distorsion du réseau électrique était presque partout inférieur à 2% en THT, à 5% en MT et à 7% en BT. EDF recommandait de limiter la contribution au taux de distorsion total en tension par chaque abonné industriel ou tertiaire au point de couplage à 1,6% et à 1% pour le pire harmonique. La distorsion de l'onde de tension est proportionnelle à l'impédance du réseau et aux courants harmoniques. Son évaluation par le calcul est a priori précise. Elle est limitée en fait par la connaissance de l'impédance du réseau.

La distorsion de la tension pour un système informatique (et de manière générale pour tout matériel sensible) ne devrait pas dépasser 5% de distorsion totale, dont moins de 3% de H3 et de H5. On considère souvent que la distorsion totale de la tension devient excessive pour les équipements industriels au delà de 8%.

La déformation d'une onde peut être évaluée par son *facteur de crête*, c'est-à-dire le rapport de la valeur crête du signal à sa valeur efficace. Le facteur de crête d'une sinusoïde pure est $\sqrt{2}$. Le facteur de crête du courant d'une alimentation à découpage est typiquement compris entre 3 et 5.



Ainsi, pour un courant mesuré de 1 A à l'ampèremètre efficace vrai, le courant crête est voisin de 4 A. Un facteur de crête élevé peut saturer un filtre antiparasite mal choisi.

Signalons enfin le *facteur de forme*. Ce coefficient est le rapport de la valeur efficace du signal à la valeur moyenne du signal redressé. Le facteur de forme d'une sinusoïde vaut 1,11. Beaucoup de mesureurs économiques, calibrés pour afficher la valeur efficace d'un signal sinusoïdal, mesurent en fait la valeur moyenne du signal redressé. L'erreur par rapport à la valeur efficace, en général par défaut, dépend de la distorsion. Par exemple, un signal triangulaire d'amplitude unité en valeur efficace est mesuré 0,96 en "valeur moyenne". L'erreur sur d'un courant distordu peut dépasser 10%, ce qui est dangereux : elle entraîne une sous-évaluation de plus de 20 % de l'échauffement.

Les harmoniques pairs ne sont engendrés en pratique que par des redresseurs dissymétriques ou par des transformateurs saturés par un courant continu. Un courant continu peut être consommé par un mauvais chargeur, un gradateur ou un appareil de chauffage doté d'une diode série (division de la consommation par deux). Un transformateur sature par un courant continu très inférieur à son courant nominal, surtout lorsque son induction nominale est supérieure à 1,8 teslas crête. Sur le réseau français il y a très peu d'harmoniques pairs.

Des sous-harmoniques (de fréquence inférieure au fondamental) ou des *interharmoniques* (de fréquences non multiples du fondamental) sont produits par des cyclo-convertisseurs (moteurs entraînés entre 1 et 15 Hz environ), des systèmes de puissance à fréquence variable, le glissement de moteurs asynchrones à encoches profondes et les impulsions de *télécommande centralisée*.

Les conséquences de la distorsion de la tension peuvent être instantanées : amorçage intempestif de mauvais triacs, erreurs de mesures de la tension réseau (régulations, comptage, détection de passage à zéro...). La plupart des petits équipements, disons de puissance inférieure à 1 kW, tolèrent bien la distorsion, sauf lorsqu'ils utilisent de mauvais triacs. Nous avons constaté des problèmes d'irrégularité de vitesse de grosses unités de disques magnétiques ou optiques causés par une distorsion de la tension supérieure à 5%.

Les conséquences de la distorsion de la tension peuvent apparaître à moyen terme : échauffement des moteurs (synchrones comme asynchrones), pertes supplémentaires dans les gros transformateurs et dans les

gros câbles, le vieillissement des condensateurs de puissance, surtout en cas de mise en résonance. Il convient de veiller à l'amplitude de H3 dans le neutre (dimensionnement des câbles et des transformateurs), surtout dans les installations de type tertiaire.

Contre les risques d'échauffements, EDF conseille de manière générale de surdimensionner les condensateurs secteur au moins à 110% de la tension nominale et à 130% du courant nominal. Les inductances, moteurs et transformateurs devraient supporter au moins 110% du courant nominal. Il importe de maîtriser les risques de résonance des condensateurs de compensation de puissance réactive. Enfin il est possible d'ajouter des *filtres anti-harmoniques*.

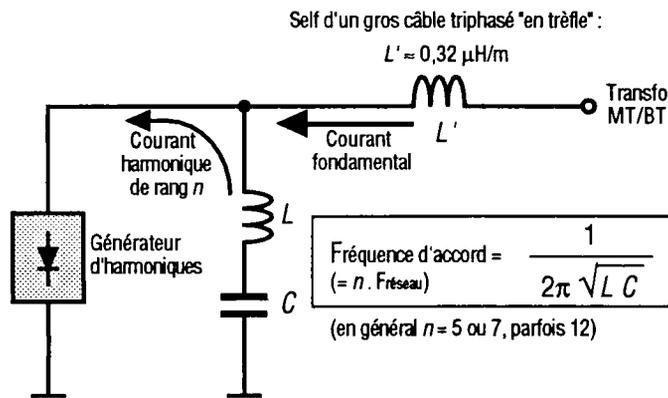


Figure 1-11 : Schéma unifilaire d'un filtre anti-harmonique

Un filtre anti-harmonique est un circuit L-C série installé en parallèle avec la source dont il court-circuite le courant à sa fréquence de résonance. Le condensateur doit supporter la tension secteur plus le courant maximal de l'harmonique à supprimer. La self est ajustée pour que l'ensemble résonne à la fréquence exacte. Elle ne doit ni saturer ni surchauffer. La puissance d'un filtre anti-harmonique varie selon l'installation de quelques kilovolts-ampères à plusieurs mégavolts-ampères.

Pour fournir les courants harmoniques produits par un pont de Grætz, on ajoute un filtre calé à l'harmonique 5, on en ajoute éventuellement un sur l'harmonique 7. Enfin, dans les cas critiques, on peut être amené à en ajouter un troisième calé sur l'harmonique 12 (qui n'existe pas) pour limiter simultanément les harmoniques de rangs 11 et 13.

Les problèmes posés par un filtre anti-harmonique sont multiples. Tout d'abord ils doivent être calculés pour rester d'un coût acceptable mais sans risquer d'être surchargés en courant. Le comportement capacitif d'un filtre anti-harmonique est plutôt favorable sur un réseau standard car il tend à compenser la consommation inductive mais il peut augmenter la tension à vide d'une source selfique (groupe électrogène en particulier).

Une autre difficulté est due à l'inductance des câbles. La fréquence de résonance d'un filtre anti-harmonique vu d'un point éloigné est décalée vers les basses fréquences. Ainsi, un filtre accordé à 250 Hz peut parfois, lorsque de longs câbles BT le séparent du transformateur du poste, court-circuiter les impulsions de télécommande centralisée à 175 Hz.

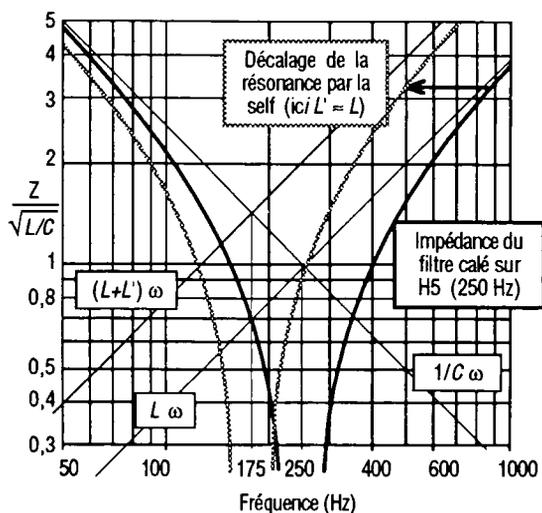


Figure 1-12 : Décalage de la résonance par self série



Retenons que la fréquence de résonance d'un filtre ou d'un banc de condensateurs varie d'un point du réseau à l'autre. De manière générale, plus on s'éloigne et plus la fréquence de résonance est décalée vers le bas. Il convient en outre de veiller à la bonne répartition des courants lors de la mise en parallèle de plusieurs filtres anti-harmoniques. Le risque est qu'un filtre anti-harmonique accordé exactement sur la fréquence à supprimer court-circuite un autre filtre en parallèle (sensé l'assister) mais légèrement décalé en fréquence. Ceci se traduirait par une surcharge suivie de la destruction du "bon" filtre.

Citons enfin un moyen moderne de limiter la distorsion : les *filtres actifs*. Ces filtres sont en fait des onduleurs à modulation de largeur d'impulsions avec stockage d'énergie réactive. Commandés par fonction d'erreur, leur rôle est d'injecter en un point quelconque du réseau un courant harmonique égal et opposé à celui consommé en aval. Leur principe de fonctionnement est comparable à celui des compensateurs statiques, mais ils doivent fonctionner à une fréquence de découpage nettement plus élevée. On peut demander à un filtre actif de compenser non seulement les courants des premiers harmoniques mais aussi la puissance réactive, voire le flicker, ce n'est qu'une question de dimensionnement. Les filtres actifs restent une solution nettement plus coûteuse que les filtres anti-harmoniques passifs.

Les surtensions

Des surtensions sont inévitables sur les réseaux électriques. Elles peuvent provenir aussi bien de l'extérieur (chocs de manœuvres, foudre...) que de l'intérieur (fusion fusible, enclenchement de condensateurs, coupure de selfs...). Les statistiques montrent une grande dispersion d'un site à l'autre. En zone exposée, une surtension dépassant 5 kV en BT peut survenir plusieurs fois par mois. La limitation de l'amplitude des surtensions lentes à une valeur résiduelle inoffensive est alors impérative.

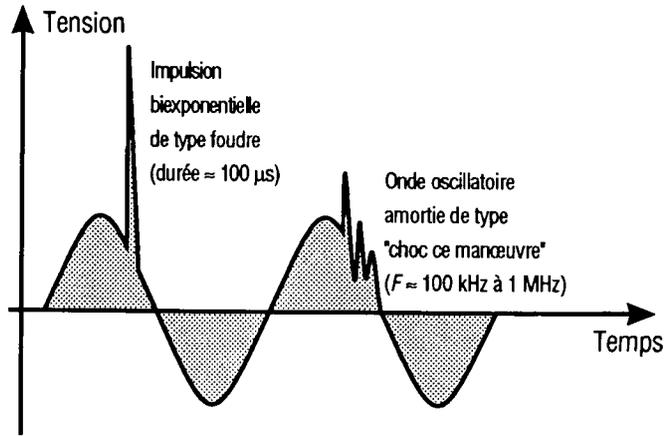


Figure 1-13 : Deux exemples de surtensions

Une surtension a peu d'effets sur les équipements électrotechniques mais elle peut perturber, fragiliser voire détruire des équipements électroniques. Si elle a un temps de montée très bref, disons moins de 30 ns, elle est perturbatrice. Il convient de coucher son temps de montée par un filtre passe-bas, installé en série avec la ligne d'alimentation, vissé à la masse en entrée d'équipement. Si la durée de la surtension est importante, disons lorsqu'elle atteint une centaine de microsecondes, elle est énergétique. Il convient alors d'en limiter l'amplitude par un écrêteur robuste et à faible *courant de suite* installé en parallèle sur la ligne d'alimentation. Un parafoudre, c'est-à-dire un éclateur en série avec une varistance, est un dispositif souvent robuste qui n'entraîne pas une disjonction à chaque allumage comme un simple éclateur.

Nous avons traité au tome 3 de la question du choix du filtre, de l'écrêteur et de leur coordination. Rappelons simplement qu'une protection parallèle doit être installée avec le minimum d'impédance commune. Il importe en conséquence, quelle que soit la *résistance* (de la prise) de terre, de relier au plus court l'écrêteur au *conducteur de protection*, et jamais directement à la barrette de terre. Les écrêteurs installés "entre phase et terre" doivent être reliés directement à la masse et non à la terre. Pour les protections entre phases la longueur de câblage est toujours faible, le soin du montage est moins critique que pour les protections en mode commun (entre phases et masse).

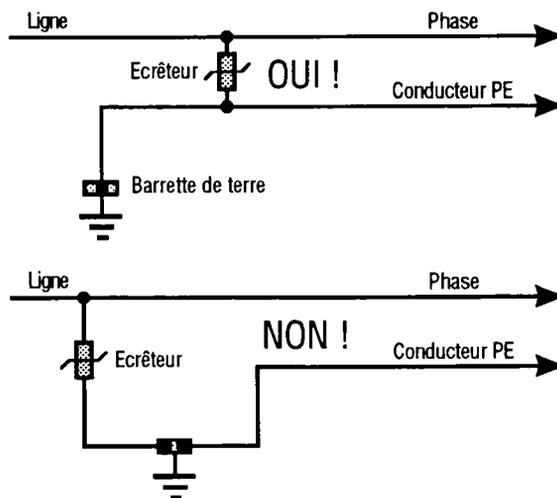


Figure 1-14 : Attention au montage d'un écreteur

Protection du poste MT/BT

La qualité de l'alimentation électrique dépend en grande partie de l'immunité du poste MT/BT aux surtensions et aux défauts de ligne. Les caractéristiques d'isolement des transformateurs MT et des circuits sont pour EDF :

- Tension crête entre enroulements MT et masse ou BT : 125 kV
- Tension crête entre enroulements secondaires BT et masse : 25 kV
- Tension crête de tenue du circuit BT dans le poste : 20 kV

Bien que satisfaisantes, ces valeurs de rigidité diélectrique seraient dépassées si des limiteurs de surtensions n'étaient pas installés. EDF qui utilisait jusqu'à la fin des années 1970 sur le réseau MT des éclateurs à cornes en parallèle avec les chaînes d'isolateurs équipe désormais tout ouvrage neuf de parafoudres à base de varistances. En outre, EDF procède au remplacement des anciens éclateurs par des parafoudres. L'opération s'achèvera un peu après l'an 2000.

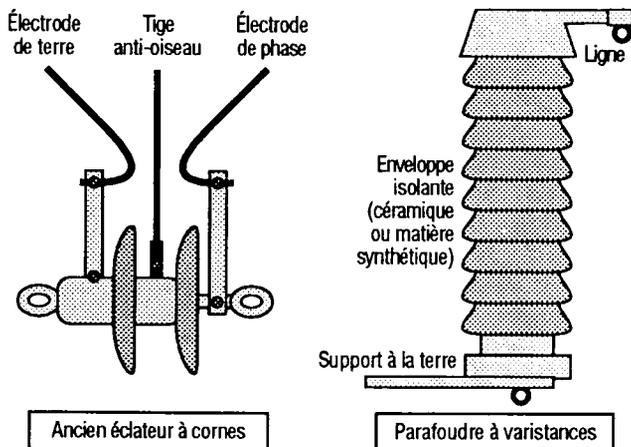


Figure 1-15 : Écrêteurs MT contre la foudre

Les parafoudres présentent par rapport aux éclateurs au moins trois avantages importants pour la qualité d'alimentation :

- Un courant de suite négligeable après l'écoulement de la surtension. Bien que relativement fragiles, les parafoudres réduisent le nombre de creux de tension et de coupures brèves de plus de la moitié par rapport aux éclateurs.
- La suppression des risques d'amorçage intempestifs par un corps étranger (paille, givre, volatile...).
- La limitation de la surtension du front raide avant l'amorçage.

En parafoudre, les parasurtenseurs ZnO sont préférés à ceux en carbure de silicium car ils ont une tension de coude plus franche, donc leur tension résiduelle est inférieure. Les varistances au carbure de silicium sont réservées à la démagnétisation des inductances (moteurs, selfs...) lors de l'ouverture des circuits. En effet dans ce cas l'énergie volumique et le coût priment sur la limitation de l'amplitude des surtensions. La combinaison parafoudre + *disjoncteur shunt* permet d'éliminer 85 % des défauts fugitifs sans creux de tension.

Le neutre des postes sources en MT n'est pas relié directement à la terre. Le réseau MT est en schéma de *neutre impédant*. Les transformateurs des postes de distribution sont en triangle en MT. Cette impédance limite le courant de *défaut simple* à quelques centaines d'ampères pour un réseau enterré, et guère plus de quelques dizaines pour un réseau aérien.

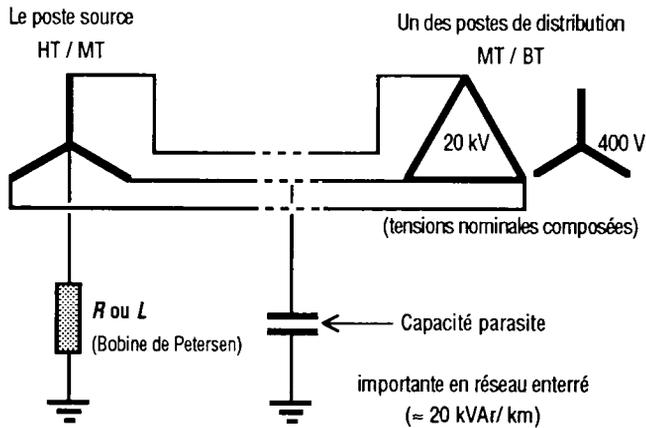
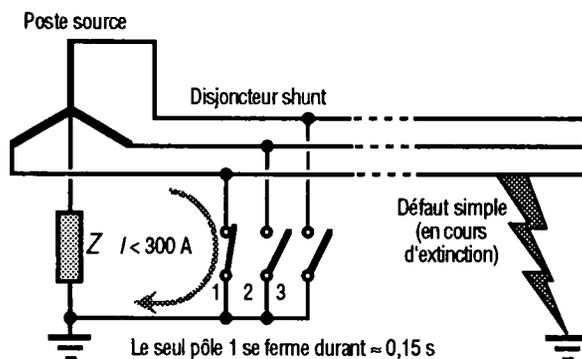


Figure 1-16 : Le réseau MT est en neutre indépendant

Le schéma de neutre impédant est excellent en MT car il ne pose aucun problème aux transformateurs et il permet l'élimination de tous les défauts simples fugitifs. Ces défauts représentent trois quarts de tous les défauts d'un réseau MT. Un disjoncteur shunt est composé de trois pôles indépendants habituellement ouverts. Il permet de court-circuiter dans le poste source une phase en défaut à la terre. Durant l'élimination du défaut, c'est-à-dire pendant environ 150 ms, le courant dans le disjoncteur shunt est celui du défaut, limité à quelques dizaines d'ampères. La distribution côté BT n'est pratiquement pas altérée, c'est-à-dire qu'elle ne subit aucun creux de tension notable.



La mise de la phase en défaut à la terre shunte le courant de défaut, l'arc s'éteint sans altérer la tension entre phases

Figure 1-17 : Principe du disjoncteur shunt

Il importe que le raccordement du pied du disjoncteur shunt au pied de l'impédance du neutre soit réalisé de façon équipotentielle. Un câble trop long ou une prise de terre séparée risquerait de perturber des équipements voisins, voire de ne pas éteindre l'arc.

Le neutre du poste source, celui avec le transfo HT/MT en étoile côté MT, était référencé à la terre par une résistance qui limitait le courant de défaut simple à quelques centaines d'ampères. Depuis la fin des années 1980 on préfère installer une self dite "bobine de Petersen". Elle est accordée à la capacité de la ligne (électriquement en parallèle, pour résonner à la fréquence du réseau) afin de limiter le courant de défaut simple à moins de 30 ampères. Il devient ainsi possible de fonctionner avec un premier défaut simple permanent sans perturber la distribution BT. Les seules difficultés sont d'ajuster la self à la capacité de la ligne et de l'adapter automatiquement à toute reconfiguration. Localiser le défaut nécessite alors des protections directionnelles sensibles.



Protection du réseau BT

Protection du réseau BT contre les surtensions

Même si les surtensions sont limitées en amont du poste MT/BT, une protection secondaire reste nécessaire sur le réseau BT. Des écrêteurs secondaires sont utiles pour limiter les surtensions résiduelles des parafoudres primaires ainsi que pour réduire les surtensions produites sur le réseau BT. Rappelons deux causes de surtensions énergétiques (des centaines de joules) : l'enclenchement de gros condensateurs entre phases et l'élimination d'un défaut franc par un petit fusible à fil. L'intérêt principal des fusibles est leur bonne qualité d'isolement après défaut et, selon les modèles (pas ceux à fil), leur fort pouvoir de coupure.

Nous conseillons dans le TGBT l'emploi de parafoudres à base de varistances de forte énergie. Il est souhaitable que la température de ces varistances soit contrôlée par un thermofusible série dont la fusion est reportée à distance. Une protection secondaire est en outre conseillée dans le tableau électrique des salles informatiques, de contrôle commande et de tous les îlots à forte densité d'électronique. La tension résiduelle en aval de ces protections secondaires (des varistances conviennent) ne devrait pas dépasser 700 volts crête sur un réseau 230 V.

La norme VDE 0160 concernant les équipements électroniques dans les installations à courant fort prévoit un test de surtension énergétique en fonctionnement. L'impulsion est superposée sur la crête de la tension alternative. Elle dure 1,3 ms à mi-hauteur et monte à 2,3 fois la tension crête nominale. L'onde de tension présente ainsi une crête de 750 V en 230 V et de 1300 V en 400 V.

Ce test correspond à une amplitude et une énergie proches de celles des perturbations courantes sur les réseaux industriels. Une norme récente, la CEI 1000-4-5, propose une impulsion en mode différentiel de plus forte amplitude mais beaucoup plus brève donc moins énergétique. Elle correspond aux impulsions de foudre et à la plupart des surtensions énergétiques sur un réseau BT de type tertiaire. Elle est insuffisante dans le cas d'un réseau à courants forts.

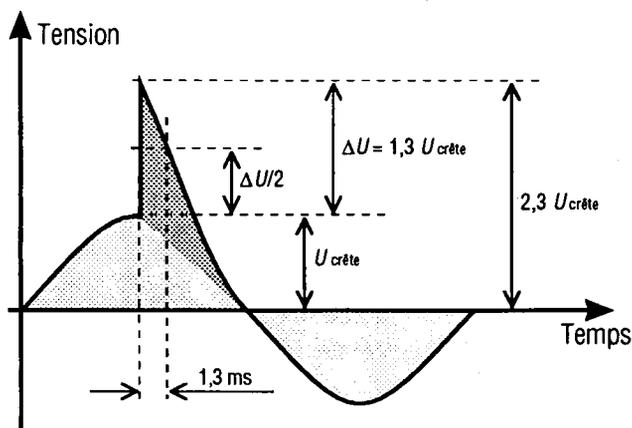


Figure 1-18 : L'impulsion énergétique de la norme VDE 0160

Impédance de l'alimentation électrique

L'impédance entre phases d'un réseau, donc le courant de court-circuit, varie selon le point considéré. Pour un réseau BT, le courant présumé de court-circuit peut parfois atteindre 100 kA. Il est généralement compris dans la fourchette entre 0,5 à 5 kA pour l'abonné en distribution publique.

En environnement industriel, le courant de court-circuit en basse tension est presque toujours limitée par l'impédance des câbles et non pas par celle du transformateur MT/BT. L'impédance à 50 Hz d'un gros câble est très voisine de $j.0,1$ ohm par kilomètre et par phase. Le courant de court-circuit en 230 V à 100 mètres d'un gros transformateur est ainsi limité aux alentours de 15 kA crête.

Il est souhaitable de distribuer l'alimentation de charges produisant de forts courants harmoniques directement à partir du TGBT afin de réduire l'impédance commune aux autres équipements. Alimenter en étoile les équipements sensibles à partir du TGBT réduit de façon simple la distorsion de la tension.



Application : Calcul d'une distorsion de tension

Un pont de Grætz de 400 kVA est alimenté sous $U_n = 400$ V par un transformateur MT/BT de $P_n = 1\ 600$ KVA et de tension de court-circuit = 6%. Calculer pour ce transformateur : courant nominal, tension de court-circuit, puissance de court-circuit et courant de court-circuit. Evaluer ensuite la distorsion en tension à 250 Hz aux bornes du transformateur. Mêmes questions aux bornes du pont installé au bout de 100 mètres de gros câble.

Solution :

En triphasé, $I_n = P_n / U_n \sqrt{3}$

$I_n = 1600\ 000 / (1,732 \times 400) = 2\ 310$ A (soit environ 1,5 A / kVA)

Aux bornes du transformateur : $U_{cc} / U_n = 6\%$

$U_{cc} = U_n \times 0,06 = 24$ V

$P_{cc} = P_n / 0,06 = 26,7$ MVA

$I_{cc} = I_n / 0,06 = 38\ 500$ A

Le courant nominal à 50 Hz produit aux bornes du transformateur une chute de tension (vectorielle) de 24 V.

La puissance nominale du pont représente $400 / 1600 = 25\%$ de la puissance nominale du transformateur. La chute de tension à 50 Hz provoquée par le pont vaut ainsi : $U_{50} = 0,25 \times 24 = 6$ V

Le courant de l'harmonique 5 égale 25% du fondamental (figure 1-9)

Par ailleurs, un gros transformateur se comporte pratiquement comme une self pure. Son impédance à 250 Hz est cinq fois supérieure à celle à 50 Hz.

L'amplitude de la tension harmonique à 250 Hz vaut :

$U_{250} = 5 \times U_{50} \times 0,25$

$U_{250} = 7,5$ volts efficaces entre phases, soit près de 2% de distorsion en tension pour ce seul harmonique.

Reprenons les calculs au bout de 100 mètres de gros câble

L'impédance du câble $Z_c = 10$ m Ω par phase à 50 Hz.

L'impédance du transformateur par phase vaut :

$Z_t = U_{simple} / I_{cc}$

$Z_t = 400 / \sqrt{3} \times 38\ 500 = 6$ m Ω

L'impédance de court-circuit est multipliée par $Z_c + Z_t / Z_t = 2,67$

Ainsi la nouvelle tension de court-circuit vaut 64 volts

Le courant de court-circuit est limité à 14400 A

Et la distorsion à 250 Hz est elle-même multipliée par 2,67. Elle atteint 20 volts efficaces, soit 5% pour le seul harmonique 5, ce qui est doit être considéré comme excessif pour alimenter un équipement sensible.

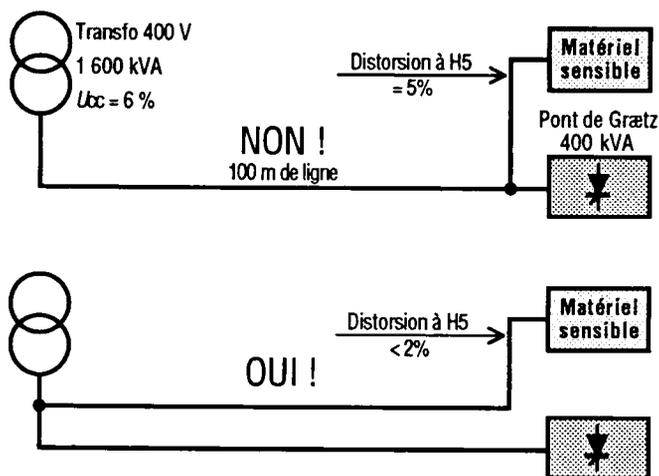


Figure 1-19 : Une ligne d'alimentation séparée réduit la distorsion

L'étoile, favorable en mode différentiel, ne doit jamais conduire à retenir ce mode de câblage pour les masses, la terre ou les 0 V. Il est souhaitable de séparer en mode différentiel l'alimentation des équipements perturbateurs de ceux à bas-niveaux. Il est en revanche dangereux d'imposer un chemin privilégié pour l'écoulement des courants de mode commun : cela augmenterait les d.d.p. entre masses, or les électroniques ont avant tout besoin d'équipotentialité. Pour un équipement perturbateur, tirer une ligne d'alimentation distincte de celle des équipements sensibles, oui ! Câbler la masse de quoi que ce soit uniquement en étoile autour de quelque barrette "de terre sans bruit" que ce soit, non !

La compensation d'énergie réactive

Depuis novembre 1987, le seuil de facturation de l'énergie réactive a été abaissé de $\tan \varphi = 0,6$ (soit $\cos \varphi = 0,86$) à $\tan \varphi = 0,4$ (soit $\cos \varphi = 0,93$). Des conséquences néfastes ont découlé de l'installation de

bancs de condensateurs : destruction d'alimentations lors des enclenchements, court-circuit de la télécommande centralisée, mises en résonance sur un harmonique de pont de Grætz. Bien que prévisibles, de telles conséquences sont pour le moins fâcheuses.

L'énergie active est celle qui est normalement facturée. Elle correspond à celle transformée en énergie mécanique (moteurs), thermique (résistances), lumineuse (éclairage), etc. La *puissance active* P est égale, en monophasé, au produit de la tension par le *courant actif*. Elle s'exprime en watts (W). Le courant actif I_a est en phase avec la tension.

L'énergie réactive sert à magnétiser les bobinages (moteurs asynchrones, relais, transformateurs, ballast de tubes fluorescents, etc.). La puissance réactive Q est égale, en monophasé, au produit de la tension par le *courant réactif*. Elle s'exprime en voltampères réactifs ou VAR. Le courant réactif I_r est en quadrature (déphasé de 90°) par rapport à la tension.

Le courant apparent, malgré son nom, est le courant réel qui circule dans le circuit (et qui fait chauffer les fils). Il est égal à la somme vectorielle $I_a + I_r$. En monophasé, si on le multiplie par la tension, on obtient la puissance apparente S qui s'exprime en voltampères (VA). Dans tous les cas, $S \geq P$.

Le " $\cos \varphi$ " d'une installation est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ou encore celui du courant actif au courant apparent. L'idéal est que $\cos \varphi = 1$.

$$\cos \varphi = P / S = I_a / I_{app}$$

Le *facteur de puissance* (FP) est un nombre sans dimension qui rend compte du rendement électrique de l'installation :

$$FP = \cos \varphi (I_1 / I)$$

avec :

I_1 : valeur efficace du courant fondamental (50 Hz)

I : valeur efficace du courant total consommé

FP = $\cos \varphi$ si le courant consommé est sinusoïdal. Ainsi :

$$0 \leq FP \leq \cos \varphi \leq 1$$

L'idéal serait que FP = 1, c'est à dire que $\cos \varphi = 1$, sans harmoniques.

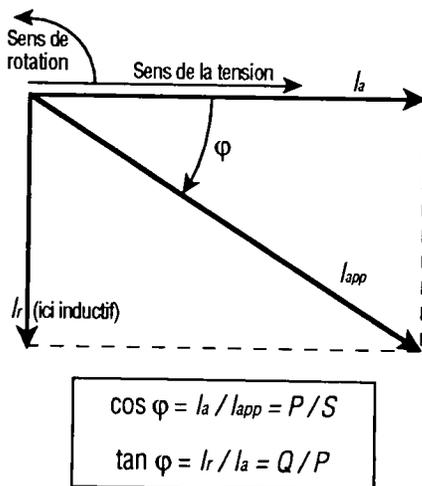


Figure 1-20 : Représentation vectorielle des courants

EDF facture P mais doit transporter S. Il est compréhensible, à la fois pour une question de pertes supplémentaires et de stabilité de réseau, qu'elle incite ses abonnés à consommer le moins possible de puissance réactive.

Pour des raisons pratiques de comptage, ce n'est pas $\cos \varphi$ qui est mesuré mais $\tan \varphi$:

$$\tan \varphi = Q / P = I_r / I_a$$

Lorsque le comptage s'effectue en BT, la $\tan \varphi$ est forfaitairement augmentée de 0,09 pour prendre en compte le courant magnétisant du transformateur MT/BT (même à vide) et le déphasage par ses selfs de fuite (en charge).

Condensateurs de compensation

Les réseaux industriels consomment de la puissance réactive, surtout par leurs moteurs asynchrones, leurs transformateurs et l'ensemble de leurs relayages. Les salles informatiques consomment une *puissance déformante* considérable mais souvent une faible puissance réactive : la plupart des convertisseurs à découpage déphasent peu le courant fondamental par rapport à la tension. La méthode la plus classique pour compenser la puissance réactive est d'installer des bancs de condensateurs. dits "de

compensation". Le principe est simple : on place sur le réseau des condensateurs qui consomment une puissance capacitive à peu près égale et opposée à la puissance inductive de l'installation.

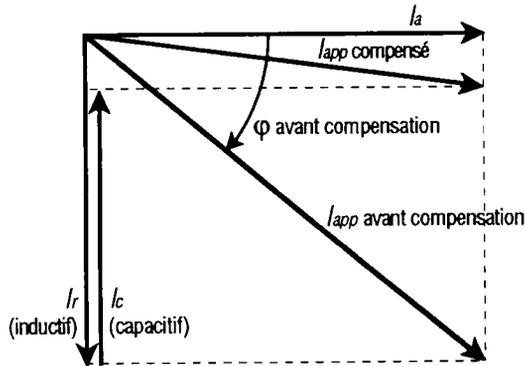


Figure 1-21 : Compensation capacitive de la puissance réactive

Pour réduire les pertes et la chute de tension correspondant à Q dans les câbles BT, il est souhaitable d'installer les condensateurs de compensation le plus près possible de la charge. Voyons les problèmes posés par les enclenchements.

A l'enclenchement des condensateurs, une impulsion sinusoïdale amortie en mode différentiel à une fréquence de quelques centaines de hertz peut atteindre une amplitude double de la crête de la tension si aucune impédance série n'en limite l'amplitude. Les équipements électrotechniques sont insensibles à ce type de perturbation mais elle peut suffire à détruire des convertisseurs à découpage.

Pour des raisons d'économie, les condensateurs de compensation sont souvent installés en MT, en amont du transformateur MT/BT. Lors de leur enclenchement, une impulsion à front raide de *vrai mode commun* (une centaine d'ampères crête dans les masses) est injectée via la capacité du transformateur dans le réseau BT. Une solution à ces problèmes est d'enclencher les condensateurs par un double contacteur temporisé, dont l'un court-circuite une résistance série d'amortissement. Une petite

self série dite “inductance de choc” avec le condensateur donne également de bons résultats. L'une ou l'autre de ces solutions est nécessaire dans le cas de plusieurs gradins.

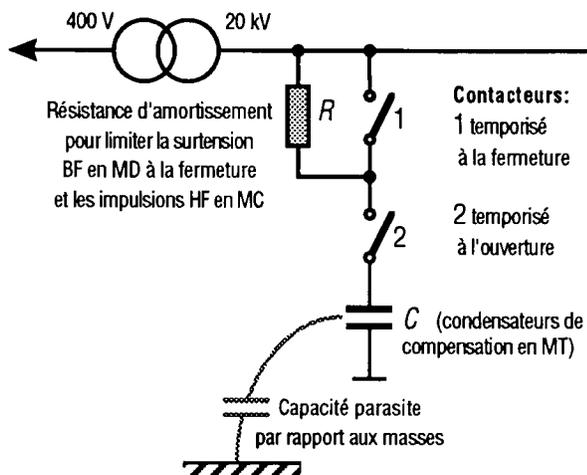


Figure 1-22 : Antiparasitage d'une batterie de condensateurs

Outre les perturbations transitoires lors des enclenchements, les condensateurs de compensation peuvent poser des problèmes permanents. Ils peuvent “amplifier” la distorsion de la tension. En effet, l'impédance de court-circuit d'un réseau est essentiellement inductive. Si en parallèle avec cette self on ajoute un condensateur, on obtient un circuit bouchon dont l'impédance à la fréquence de résonance peut être élevée. Un générateur de courant harmonique, un pont de Grætz en particulier, peut générer à cette fréquence une distorsion considérable de la tension (parfois supérieure à 10 %).

On définit le “facteur d'amplification” d'un réseau doté de condensateurs comme l'amplitude de la distorsion de la tension à la fréquence de résonance des condensateurs par rapport à celle du même réseau sans condensateur. Le facteur d'amplification est le plus souvent compris entre 1,5 et 5, mais on peut atteindre 10 dans un cas très défavorable.

Le facteur d'amplification est d'autant plus grand que la charge active consommée sur le réseau est faible par rapport à la puissance réactive des condensateurs et à celle de court-circuit. Les pires problèmes apparaissent donc principalement aux heures creuses : la nuit et le week-end. Un moteur asynchrone a tendance à mieux amortir la résonance que ne le laisse prévoir sa puissance active consommée... mais alors il chauffe.

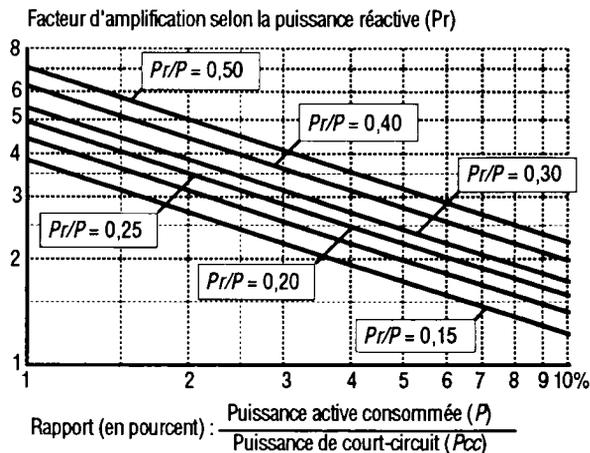


Figure 1-23 : Facteur d'amplification de la résonance

La fréquence de résonance d'un condensateur de compensation ne dépend pratiquement que de la puissance de court-circuit du réseau et pas de la consommation. Augmenter la puissance de court-circuit à puissance compensée égale permet d'élever la fréquence de résonance, donc de la reporter à un rang de plus faible distorsion en courant. Les condensateurs de compensation industriels résonnent généralement entre 200 et 500 Hz.

Les fréquences de résonance les plus critiques sont 175 Hz pour les télécommandes centralisées et 250 ou 350 Hz pour les ponts de Grætz triphasés (aussi appelés "ponts hexaphasés"). Pour un double pont de Grætz (à 12 thyristors et 2 demi-transformateurs ΔY), aussi appelé "pont dodécaphasé", les fréquences harmoniques prépondérantes sont repoussées aux rangs 11 et 13, soit vers 600 Hz sur un réseau 50 Hz.

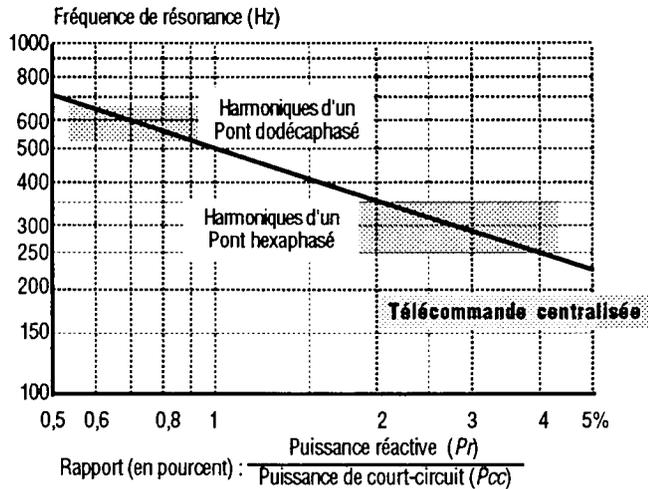


Figure 1-24 : Fréquence de résonance d'un condensateur

Les méthodes pour réduire les problèmes d'harmoniques dépendent du cas considéré. Il est parfois possible d'augmenter la puissance de court-circuit, ou de décaler la fréquence de résonance d'un banc vers le bas par une self série jusqu'à une fréquence peu gênante, vers 200 Hz par exemple, ou de transformer les condensateurs en filtre anti-harmonique (attention à la surcharge en tension des condensateurs), ou enfin de surdimensionner les matériels pour qu'ils acceptent la distorsion sans échauffement excessif.

L'objectif " $\tan \varphi < 0,4$ " est contraignant pour certaines installations et difficile à maintenir dans le temps lorsque la consommation varie. Signalons enfin la compensation du facteur de puissance par un moteur synchrone non saturé surexcité, aussi appelé "compensateur synchrone". Il permet une régulation permanente, rapide, précise, fiable et sans à-coups. Sa maintenance préventive est simple. Un compensateur synchrone tend à réduire la distorsion de la tension, réduire les creux de tension et abaisser l'impédance de court-circuit du réseau. Rien que du bon !



Protection contre les surcharges

La protection des réseaux électriques contre les surintensités est habituellement bien mieux assurée que celle contre les surtensions. Un dispositif de protection contre les surintensités est dit limiteur si le courant crête du défaut est inférieur à la valeur qu'il atteindrait si la protection n'agissait pas rapidement, dans la demi-alternance. En pratique, un organe de coupure n'est limiteur que si son temps de réaction est inférieur à 5 ms en 50 Hz, soit un quart de période.

L'élimination des défauts s'effectue habituellement soit par un fusible, soit par un disjoncteur. A l'avenir d'autres protections série se généraliseront peut-être, telles les résistances à coefficient de température positif ou CTP. Une CTP se comporte pratiquement comme un disjoncteur au réarmement automatique: il suffit d'attendre son refroidissement pour retrouver sa faible impédance.

Les fusibles

La protection par fusible est en France plus fréquente chez l'utilisateur que chez l'industriel, c'est l'inverse en Allemagne. Les fusibles sont à peu près sans concurrence sur les réseaux continus où leur fusion rapide peut être accélérée par pyrotechnique. Des fusibles rapides appelés "protistors" sont encore utilisés pour la protection de semi-conducteurs, de thyristors en particulier. Ils restent moins coûteux que les composants protégés et sont plus simples à changer.

Les fusibles à lames d'argent en cartouche de silice ont tendance à vieillir. En effet leur résistance tend à augmenter progressivement dans le temps. De plus, les courants d'appel (démarrages répétés) déforment les lames et les fragilisent. Les constructeurs conseillent de remplacer les cartouches de fusibles critiques tous les cinq ans.

Lors du changement d'un fusible, il faut toujours remplacer ceux des deux autres phases, même s'ils semblent encore "bons" car ils sont peut-être fragilisés (et pour le savoir, c'est comme pour les allumettes...). Rappelons qu'il ne faudrait jamais mettre de fusible en série avec le conducteur neutre : en cas de fusion, le déséquilibre détruirait certainement des équipements monophasés.

Les disjoncteurs

Les disjoncteurs ont un pouvoir de coupure important. On peut souvent leur adjoindre un déclencheur différentiel, une surveillance de tension (à minimum ou maximum), une télécommande, temporiser leur déclenchement, etc. Ils sont de plus en plus souvent “intelligents” : on peut les interroger à distance, programmer leur loi de déclenchement, etc.

La loi de déclenchement dite en “temps inverse” d’un disjoncteur magnétothermique est une courbe qui subit une discontinuité. Une faible surcharge fait intervenir une protection lente dite thermique par bilame. Une forte surcharge excite la protection dite magnétique qui agit en moins de 10 ms.

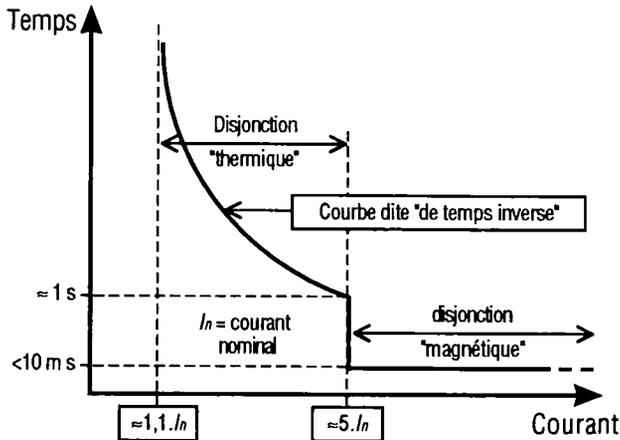


Figure 1-25 : Exemple de courbe de déclenchement d'un disjoncteur magnétothermique

Les “dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel”, plus simplement appelés *disjoncteurs différentiels* ne sont pas adaptés, même en schéma TN, à la protection des lignes de matériels électroniques ou informatiques. En effet, ces matériels sont protégés par des filtres antiparasites dont le courant de fuite est détecté par les protections différentielles



comme un défaut. Même en équilibrant la consommation entre les phases, un courant de fuite total de l'ordre de l'ampère permanent n'est pas anormal pour une grande salle informatique.

Nous pouvons tabler à priori sur un courant de fuite de l'ordre de 1 mA par kVA pour un matériel électrotechnique et 10 fois plus pour du matériel électronique. Cette petite règle empirique donne souvent d'excellentes estimations. Seuls les matériels médicaux en salle d'opération qui ont, par obligation légale, très peu de fuite, échappent évidemment à cette évaluation.

Signalons enfin que l'alimentation de plusieurs terminaux micro-informatique sur la même ligne protégée par un différentiel sensible (15 à 30 mA) pose un sérieux problème. Les courants de fuite des convertisseurs à découpage suffisent à faire déclencher la protection. Les protections différentielles ne devraient réagir qu'aux fréquences industrielles. Nous avons rencontré des variateurs de vitesse qui déclenchaient des protections différentielles de 300 mA.

La sélectivité

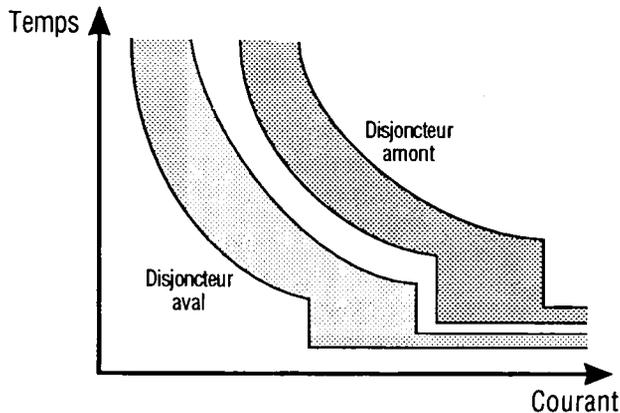
La sélectivité des protections d'un réseau est leur aptitude à éliminer une surintensité par la protection immédiatement en amont d'un défaut, quel qu'il soit, et par elle seule. La sélectivité est un gage de bonne continuité de service, même en cas de défaut. En pratique, elle est encore trop souvent illusoire.

La sélectivité est bien plus délicate à garantir qu'il n'y paraît au premier abord. D'une part si la protection contre les faibles surcharges est simple à garantir, aussi bien avec des fusibles qu'avec des disjoncteurs, la sélectivité est moins évidente en cas de court-circuit franc. Ensuite, un défaut peut être de faible intensité, or la sélectivité des protections à courant différentiel résiduel est difficile à assurer. Tout au plus arrive-t-on à temporiser une protection différentielle amont pour laisser agir celle en aval. Un risque, lors de l'évolution des systèmes, est d'ajuster le calibre de déclenchement des disjoncteurs selon les courants consommés sans s'apercevoir que la sélectivité n'est alors plus assurée.

Les trois principes pour garantir la sélectivité sont la sélectivité ampèremétrique, la chronologique et la logique. La sélectivité ampèremétrique est la plus simple. Elle fonctionne bien pour de faibles valeurs de surcharges : les protections thermiques aval sont normalement plus sensibles que celles en amont. La sélectivité chronologique est utile en cas

de court-circuit franc. Une protection amont doit laisser le temps à une éventuelle protection en aval d'éliminer le défaut. Un disjoncteur de tête dont le déclencheur magnétique est retardé (disjoncteur dit "deux coups") utilise ce principe. Enfin, dans bien des configurations, il serait nécessaire que des protections interactives échangent très rapidement des informations afin d'éliminer tout défaut une seule fois et juste en amont de celui-ci.

La sélectivité est une vertu souhaitable pour les salles informatiques, les locaux techniques et les salles de contrôle-commande, mais elle ne s'improvise pas. Elle nécessite une arborescence d'alimentation coordonnée, très "à plat", avec le moins de paliers possible, et elle doit être suivie dans le temps, validée à nouveau après chaque modification d'installation.



Pour que la sélectivité soit totale, il faut que les deux zones d'incertitudes soient totalement disjointes

Figure 1-26 : Condition de la sélectivité

Schéma de neutre

Un *schéma de neutre* (parfois appelé régime) est symbolisé par deux lettres :

- La première lettre indique le raccordement du neutre de la source (souvent le secondaire du transformateur MT/BT) par rapport à la terre :
 - T pour une liaison directe
 - I pour une liaison impédante par contrôleur permanent d'isolement
- La seconde lettre indique le raccordement des masses à la terre :
 - T pour un raccordement des masses à la terre locale
 - N pour un raccordement des masses au neutre (à la terre du neutre)

Il y a ainsi trois schémas de base légaux : TT, IT et TN. Bien entendu, le schéma IN est interdit puisque les masses pourraient être portées à un potentiel dangereux par rapport à la terre. Etudions un par un chacun de ces schémas.

Schéma TT

Le schéma TT est celui imposé en distribution publique basse tension. Le neutre est raccordé à la terre du poste de distribution. Les masses sont reliées à une autre terre dite "terre des masses". Chaque abonné a sa propre terre des masses.

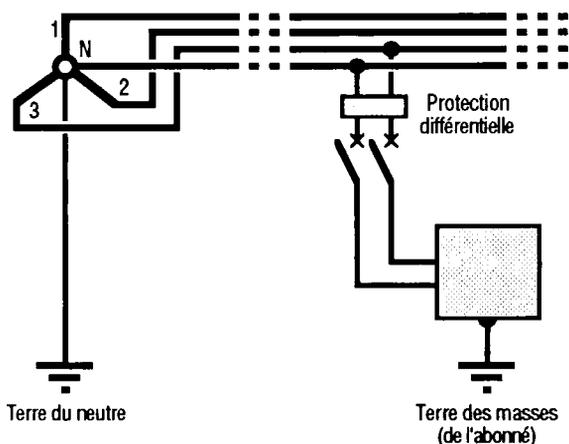


Figure 1-27 : Principe du schéma TT avec ses deux terres

En cas de défaut entre une phase et la masse, le courant se referme par la terre. Ce concept peut sembler curieux alors qu'il serait simple de raccorder par le conducteur neutre la terre des masses à celle du neutre. C'est pourtant le schéma encore obligatoire en France en distribution publique terminale. Le courant de défaut maximal est limité par la somme des résistances de la terre du neutre et celle des masses, typiquement plusieurs dizaines d'ohms. Un disjoncteur différentiel de sensibilité suffisante (500 mA) isole l'abonné en défaut franc... tant que le sol ne s'assèche pas trop autour des piquets de terre. Des non-déclenchements ont été constatés au début des années 1990 à cause de la sécheresse.

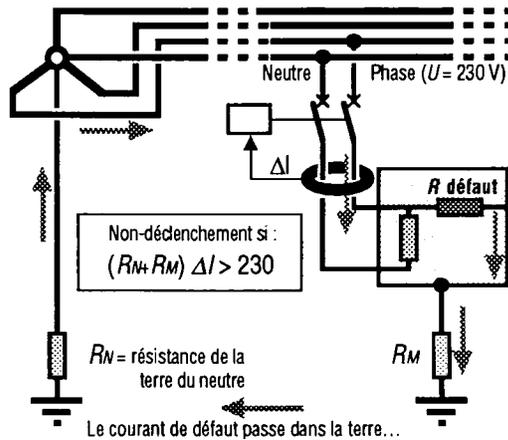


Figure 1-28 : Risque de non-élimination d'un défaut

Pour garantir la sécurité des personnes contre les contacts entre phase et terre, il faudrait limiter le courant permanent en dessous du "courant de non-lâcher", soit 30 mA environ pour une personne en bonne santé. Pourquoi choisir un seuil de 500 mA ? Un compteur électrique ne mesure jamais le courant dans le neutre. Le disjoncteur différentiel limitait pour les réseaux en 127 / 220 V le piquage d'énergie électrique non facturée entre le neutre et la terre. En cas de défaut phase-terre dans un équipement sans disjonction, si le défaut n'est pas franc ou si la terre des masses est coupée par exemple, les personnes ne sont pas en danger tant que toutes les masses accessibles restent équipotentielles.

Une règle de sécurité impose une résistance de terre d'abonné telle que le courant de déclenchement du différentiel n'élève pas le potentiel de la terre par rapport à une terre lointaine à plus d'une tension limite de sé-

curité (50 volts). Elle est difficile à justifier si toutes les masses sont interconnectées. Les outils de jardin électriques sont obligatoirement en double isolation, c'est-à-dire sans fil vert-et-jaune car la Terre n'est pas équipotentielle. Il est fréquent de mesurer en schéma TT plusieurs dizaines de volts permanents entre le neutre et la terre.

En schéma TT, la terre des parafoudres du poste MT/BT ne peut pas être celle du neutre : le courant de foudre la ferait monter en potentiel de façon dangereuse par rapport à la terre des masses. La rigidité diélectrique des matériels BT entre phases et terre ne dépasse guère 3 kV. Une troisième terre doit donc être réservée à cet effet. Selon la résistivité moyenne du sol, l'éloignement des prises de terre des parafoudres et du neutre est conventionnellement choisi à 8, 18 ou 28 mètres. La rigidité diélectrique des transformateurs MT/BT est suffisante pour qu'un claquage diélectrique entre primaire et secondaire soit rare, même sur un choc de foudre assez proche.

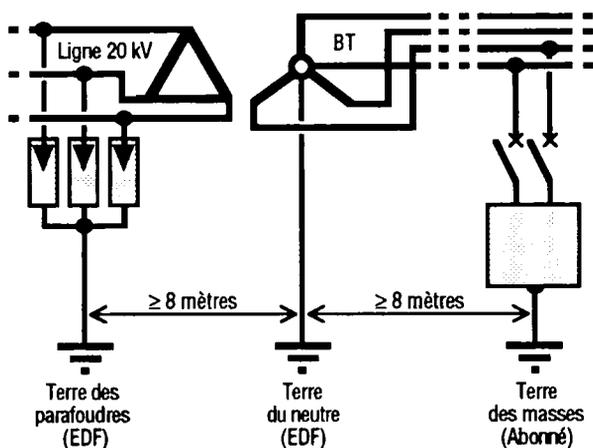


Figure 1-29 : Les trois terres de la distribution publique

En zone urbaine, ou lorsqu'un abonné est installé à moins de 8 mètres du poste, les trois terres sont heureusement interconnectées. Pour l'installation d'un paratonnerre chez l'abonné, le même problème se pose : la



montée en potentiel des masses par rapport aux phases. Une quatrième terre devrait être installée... et un amorçage entre descente de paratonnerre et masses serait alors probable.

Le régime de neutre TT viole l'exigence du *réseau de terre* unique. Le principal risque pour l'utilisateur est la destruction de matériel électrique en simple isolation. La d.d.p. entre neutre et masses pourrait atteindre plusieurs dizaines de kilovolts si l'appareil de plus faible rigidité diélectrique ne protégeait le reste des équipements... en amorçant et en étant souvent détruit. Un jour d'orage, l'auteur qui réside en zone rurale constata la destruction de son four à micro-ondes suite à un amorçage phase-terre. Désormais EDF accepte de relier la terre du neutre à celle des masses des nouvelles installations. Il suffit de le demander.

Plusieurs méthodes de protection peuvent être envisagées. Tout d'abord l'ajout de varistances entre phases et terre des masses. C'est assez efficace mais risqué : les varistances non dotées d'un thermofusible finissent par exploser, de préférence la nuit quand la tension est haute. Un éclateur d'environ 500 V de tension d'amorçage limite les surtensions entre phases et masse à une valeur acceptable pour les équipements mais une disjonction se produit à chaque amorçage. Après la destruction de son micro-ondes, l'auteur installa des éclateurs en parallèle avec ses équipements sensibles mais il fut lassé de réarmer son disjoncteur différentiel les jours d'orage. Seul un éclateur entre une phase et la terre amorçait car jamais un petit disjoncteur divisionnaire n'a ouvert.

Une autre méthode de protection consiste à ajouter un transformateur d'isolement à forte rigidité diélectrique en aval du comptage. Pour une tenue raisonnable aux chocs de foudre, nous conseillons de choisir un transformateur isolé à l'huile. Une tenue de 100 kV choc en onde 1,2/50 μ s entre le primaire et le secondaire et la masse présente souvent une sécurité convenable. En raccordant le neutre du secondaire à la masse de l'abonné, on reconstitue l'excellent régime TN-S. Un intérêt de cette solution est que l'énergie des parafoudres à installer entre les phases et le neutre est alors réduite. Le risque de disjonction de la protection différentielle disparaît.

Les inconvénients de l'ajout d'un transformateur d'isolement sont évidents : son coût et celui de ses pertes ne sont pas négligeables. Sa self de fuite augmente l'impédance de la distribution d'où les inconvénients qui



en découlent : variations de tension et flicker accrus lors d'à-coups de courant. Une plus forte distorsion en tension par les courants harmoniques est également à craindre.

Une solution à peu près idéale serait de connecter, comme dans la plupart des pays, le neutre à la terre des masses, en amont du disjoncteur différentiel. La longueur de conducteur à rajouter est souvent de l'ordre du mètre. En effet, si le compteur est souvent à l'extérieur, le disjoncteur est toujours installé chez l'abonné, à proximité d'une barre de terre. La terre du neutre étant alors connectée à la terre des masses, on se retrouve de fait en schéma TN-C entre le poste et l'abonné. Chez l'utilisateur, à partir de la liaison du neutre à la terre, le schéma devient l'excellent TN-S.

Pourquoi ce raccordement est-il si rare ? Tout d'abord il est illégal en France puisque le régime TT y est théoriquement obligatoire en distribution publique BT. La plupart des Agences de distribution EDF acceptent de tirer un câble de terre (TN-S depuis le poste), mais en correction l'abonné est invité à en payer la pose. Sur le plan technique, utiliser le neutre peut poser un problème lorsque la section de neutre est réduite (ce cas est devenu très rare). D'autre part, la corrosion d'un réseau de terre étendu est plus rapide que celle de piquets indépendants. L'usage d'électrodes dites "consommables", en zinc par exemple, pour le poste MT/BT et un contrôle périodique deviennent alors souhaitable. Hormis cette petite contrainte, l'interconnexion des terres est un excellent principe.

Si le lecteur habite en zone exposée et que l'interconnexion de sa terre au conducteur neutre lui soit refusée ou qu'il l'estime trop coûteuse, il existe une solution efficace et sans effets secondaires. Il suffit de relier en amont du différentiel le neutre à la terre des masses par un petit éclateur BT (450 volts par exemple). En cas de surtension, cet éclateur amorce avant les matériels fragiles. Il évite en outre les deux inconvénients signalés. Aucune corrosion par courant tellurique n'est à craindre car le circuit entre les deux terres est normalement ouvert. Pour la même raison, il n'y a pas de problème particulier de section du conducteur neutre. Depuis que l'auteur s'est protégé de cette façon, son disjoncteur n'ouvre plus de façon intempestive, même lors d'orages, et aucun matériel n'a été détruit. Signalons toutefois qu'il est illégal de déplomber les bornes amont de son disjoncteur principal, même si c'est pour la bonne cause et sans piquage pour consommer plus de puissance que le permet le contrat.

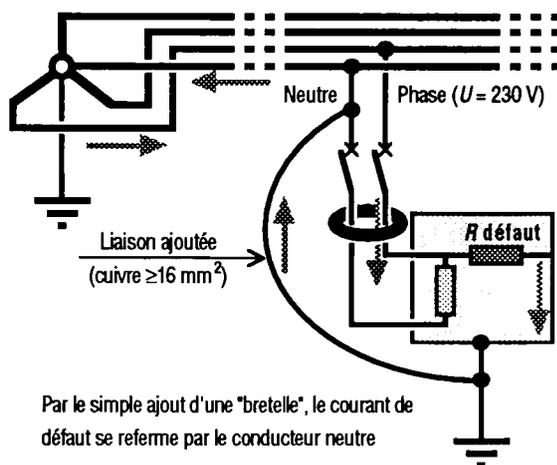


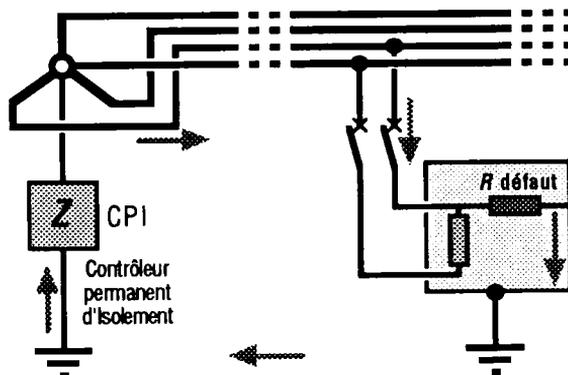
Figure 1-30 : Transformation simple du schéma TT en TN

Schéma IT

L'idée de base du schéma IT est très astucieuse sur le papier puisqu'un premier défaut simple permet de conserver l'alimentation comme si tout allait bien. En fait, ce schéma présente un sérieux hiatus entre la théorie et la pratique.

La théorie du schéma IT

Le schéma IT est très répandu dans l'industrie française et dans les pays latins. Le neutre y est raccordé à la terre du poste de transformation par une impédance élevée. En cas de défaut entre une phase et la masse, tout le réseau peut ainsi "flotter". Les masses sont évidemment raccordées à la terre par un conducteur de protection. Sur défaut phase - terre, le courant est limité par l'impédance placée entre neutre et terre. Le défaut n'est pas éliminé et la tension en mode différentiel reste maintenue. Un contrôleur permanent d'isolement, ou CPI doit signaler le premier défaut. De plus, un service d'entretien électrique doit être présent sur le site (sous-entendu pour qu'un dépanneur bondisse pour corriger le défaut... Ouais !).



Le courant de défaut est limité par Z à une faible valeur.

Le défaut est signalé par le PCI mais il n'est pas éliminé.

Figure 1-31 : Le principe du schéma IT (avec 1 ou 2 terres)

Les interfaces, telles les petites alimentations ininterrompues ou les transformateurs d'isolement, qui distribuent un secteur isolé sans CPI sont illégales : il est obligatoire de relier le neutre ou en monophasé l'une des deux phases à la terre (nous y reviendrons). En IT, en cas de second défaut sur une autre phase, le réseau reste protégé comme les autres schémas, c'est-à-dire par les protections classiques contre les surintensités : disjoncteur magnétothermique ou fusible.

Tant que le réseau ne comporte que quelques matériels à faibles courants de fuite (transformateurs, moteurs, matériels médicaux...) que le neutre n'est pas distribué, qu'un service d'entretien électrique bien formé et diligent est présent sur le site et enfin que l'étendue des installations est limitée pour que le courant de défaut reste faible, nous considérons que le schéma IT est acceptable. Il est même excellent pour les réseaux MT où il améliore de façon incontestable la qualité et la continuité de service.

En basse-tension, pour des installations de type informatique, nous y sommes au contraire tout à fait opposés. Voici pourquoi...

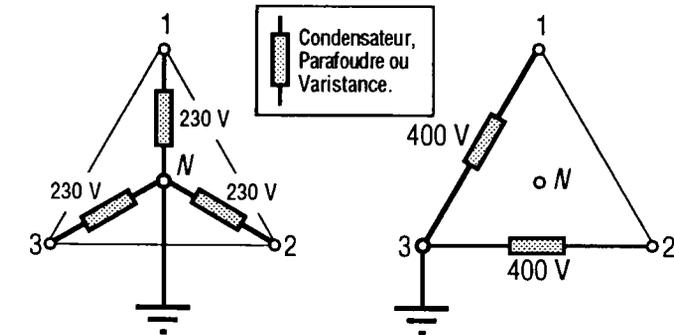
La pratique du schéma IT

Si le schéma de neutre impédant est à priori séduisant, il convient d'en évaluer les sévères contraintes et les nombreux risques. Tout d'abord l'étendue du réseau et le nombre d'utilisateurs qui le partagent doivent

être limités. En augmentant le nombre d'équipements alimentés, surtout si ce sont des équipements électroniques filtrés avec de fortes capacités entre phases et masse, on augmente les courants de fuite qui finiront par être détectés par le CPI comme un défaut. De plus, ces capacités lanceront un fort courant dans les masses après un premier défaut.

Ensuite des limiteurs de surtensions doivent être installés entre neutre et masse. Puisque le neutre est flottant, la mise d'une phase à un potentiel élevé, par claquage dans un équipement utilisant une haute tension par exemple, pourrait détruire beaucoup de matériels. Faire flotter le neutre n'est pas la meilleure méthode de réduire les perturbations de *mode commun filaire*.

De plus, les protections installées entre phases et masse doivent supporter en IT une tension au moins égale à la tension composée. Sinon, au premier défaut, ils brûlent ou explosent ! Un défaut simple porte les deux autres phases la tension composée. En schéma IT, les condensateurs et varistances entre phases et châssis doivent supporter en permanence au moins 450 volts...



En réseau avec neutre à la terre, les protections entre une phase et la masse (terre) ne sont soumises qu'à la tension simple, soit 230 V car la tension neutre-terre = 0 V.

Sur un défaut en schéma IT (ici sur la phase 3), deux des trois protections entre les phases et la masse sont soumises à la tension composée, soit 400 V.

Figure 1-32 : Attention, en IT, aux protections par rapport à la masse



La norme NF C 15-100 précise avec sagesse (au 314.4) que “dans le schéma IT, il est toujours recommandé de ne pas distribuer le conducteur neutre”. Est-il possible d’être plus clair ? Si le conducteur neutre était malgré tout distribué, il serait impératif de le couper avec les phases, donc d’utiliser des disjoncteurs tétrapolaires. De plus, un service d’entretien électrique doit être en permanence présent sur le site pour limiter le risque d’apparition d’un second défaut. En pratique, dans l’industrie, il n’est pas rare d’attendre l’arrêt de l’installation au mois d’août pour corriger les équipements en défaut.

En cas de second défaut sur une autre phase, la disjonction de tout le réseau est à craindre car habituellement la sélectivité n’est pas assurée en IT. Vive la continuité de service, donc évitons le schéma IT pour alimenter des électroniques.

La détection de l’équipement en défaut est difficile puisque le courant de défaut est négligeable. Si le défaut est permanent, l’injection d’un courant à très basse fréquence au niveau du CPI et sa mesure par un filtre sélectif permet de localiser le problème. Une méthode assez efficace consiste à mettre chaque sous-ensemble tour à tour hors-service le temps nécessaire pour constater (ou non) la disparition du défaut. Si le défaut disparaît, le coupable était lié à l’équipement coupé, mais il n’est pas forcément l’équipement lui-même. Par exemple si un automate commande un moteur en défaut, l’arrêt de l’automate sain fait disparaître le défaut. Et les défauts ne sont pas tous francs et permanents...

Supposons que l’on n’intervienne pas rapidement et qu’un second défaut apparaisse sur la même phase qu’un premier. Ils deviennent alors à peu près impossibles à localiser. Le mieux est de tout couper puis de réalimenter chaque équipement un par un. Vive la continuité de service ! Même en coupant tout, l’identification peut rester difficile, pour localiser une fuite liée à la température d’un isolant par exemple (pas de défaut à froid, fuite importante à chaud).

Ignorons la difficulté de localiser un défaut fugitif pour exposer un risque réel, parfois mortel, du schéma IT. Le même réseau IT peut alimenter deux bâtiments avec des terres séparées, c’est malsain mais légal puisque les masses raccordées aux deux terres ne sont pas simultanément accessibles. Le courant qui s’échange entre les deux terres dépasse couramment 1 ampère et la d.d.p. entre les terres peut dépasser une centaine de volts. Il est même possible d’atteindre 400 volts en permanence si deux phases différentes sont en défaut franc, chacune à sa terre. Le CPI dé-

recte le premier défaut mais rien ne disjoncte. Imaginons alors qu'un installateur tire un câble entre les deux bâtiments... Il va être mis au courant au sens électrique de l'expression ! Toutes les terres d'un même site devraient être reliées. Elles le sont de façon sûre entre les divers bâtiments avec le même poste de transformation en schéma TN.

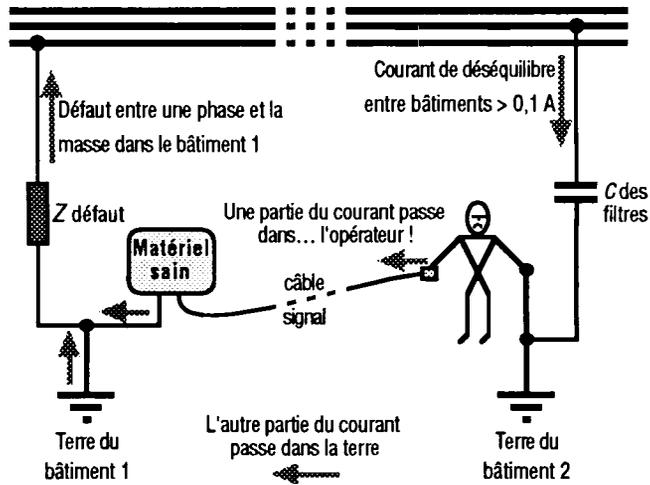


Figure 1-33 : Un des dangers – mortels ! – du schéma IT

En schéma IT, il ne peut circuler qu'un faible courant dans le CPI mais des courants de masse importants et permanents peuvent s'échanger entre équipements sains. Ces courants dans les masses sont liés au déséquilibre du neutre par rapport aux masses. Ils ne sont pas provoqués par un défaut de l'équipement filtré qui supporte un fort courant de fuite.

Ce courant de fuite normal correspond principalement à celui dans les condensateurs installés entre phases et masse des équipements électroniques. Il est faible en triphasé tant que le potentiel du conducteur neutre reste voisin de celui de la terre mais il devient important en IT dès le premier défaut. Le courant de fuite à la masse, égal à $\sqrt{3}$ fois le courant nominal dans chacun des condensateurs, dépasse parfois 100 mA par équipement. Supposons qu'un opérateur intervienne sur un équipement sain et déconnecte sa liaison de terre sans couper les phases (ce qui peut arriver lors d'un démontage mécanique) ; la masse est alors

porté à 230 V par rapport à la terre. Le risque d'électrocution est réel. Un autre risque non mortel mais ruinant le concept de continuité de service est qu'une protection différentielle isole un équipement sain dès le premier défaut.

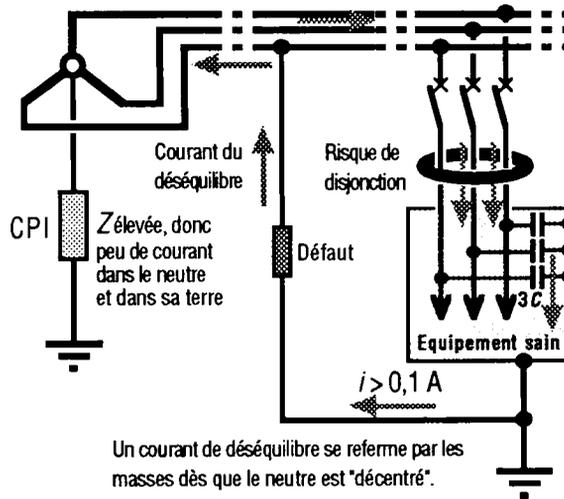


Figure 1-34 : En IT, attention au fort courant dans les masses

Soyons clair : le schéma IT est à la fois dangereux et incompatible avec l'installation de protections différentielles sensibles. Après tout cela, dans quel cas peut-on raisonnablement conseiller le choix du schéma IT en BT ? Ce schéma n'est favorable que dans le cas d'un local de surface limitée, où sont utilisés des équipements à faibles courants de fuite dont la continuité de service est critique, dont la durée d'utilisation ne dépasse pas quelques heures et où la correction d'un défaut est assurée dès la fin d'utilisation par un service d'entretien. C'est le cas d'une salle d'opération dans un hôpital. L'ensemble de ces conditions sont très rarement satisfaites en environnement industriel ou tertiaire.

Notons enfin que si le conducteur neutre est distribué en schéma IT, il peut être porté en permanence à un potentiel dangereux. Il doit donc être coupé en même temps que les phases par un disjoncteur ou un

porte-fusible tétrapolaire. Cet aspect légal augmente le risque de discontinuité du conducteur neutre dont la continuité est nécessaire pour ne pas détruire des équipements monophasés.

Schémas TN

Le schéma TN est le plus répandu en Europe, tant en industrie qu'en distribution terminale. Le neutre est raccordé directement à la terre du poste. Les masses sont reliées à la même terre : en TN, il n'y a qu'un seul réseau de terre par poste. A priori tout est pour le mieux. Dans tous les cas, un défaut entre phase et masse est vu comme un défaut entre phase et neutre. Il est éliminé par une protection normale contre les surintensités, éventuellement par sélectivité.

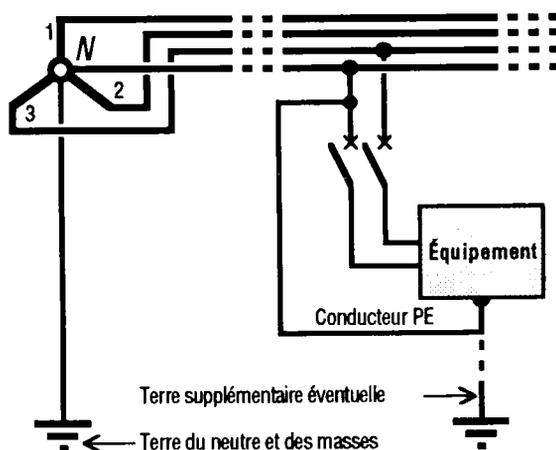


Figure 1-35 : Le principe du schéma TN

Puisque le poste MT/BT peut être distant des équipements, des d.d.p. dangereuses entre masses pourraient apparaître si des liaisons équipotentielle de masses supplémentaires n'étaient pas ajoutées. Cette exigence est d'ailleurs commune à tous les schémas : la NF C 15 100 précise sagement (en note 131.3) que "du point de vue de la protection contre les contacts indirects, l'utilisation de liaisons équipotentielles constitue un principe fondamental de sécurité". Le maillage des masses est une saine habitude qui devrait être généralisée.

Il existe deux variantes du schéma TN selon que les masses sont mises à la terre par le conducteur neutre ou par un conducteur de protection séparé.

Schéma TN-C

En schéma TN-C (Terre et Neutre Confondus) le conducteur neutre sert aussi de conducteur de protection. Il est alors noté PEN. Un conducteur de protection ne doit jamais être interrompu, seules les phases doivent être coupées. Le schéma TN-C est pour cette raison interdit en canalisations mobiles ("rallonges"). Les disjoncteurs tétrapolaires et les fusibles dans le neutre sont interdits en TN-C. L'impédance totale du conducteur PEN doit être telle que le courant maximal permanent par phase génère entre ses extrémités une d.d.p. inférieure à la tension limite conventionnelle de sécurité (50 V dans les bâtiments). Cette contrainte est généralement facile à satisfaire.

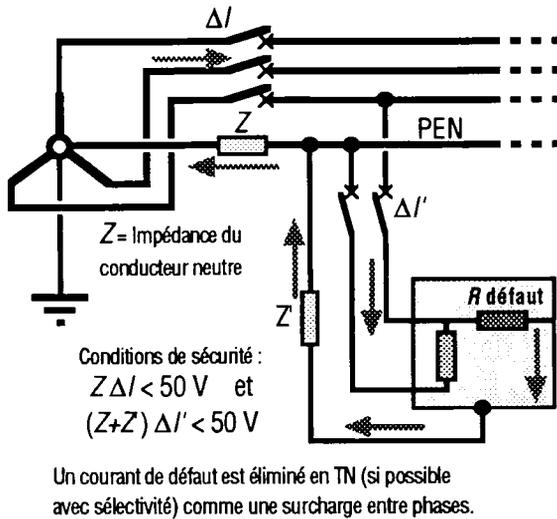


Figure 1-36 : Le schéma TN-C (terre et neutre confondus)



L'inconvénient du schéma TN-C est assez évident : les courants homopolaires, l'harmonique 3 en particulier, se referment par le conducteur neutre qui sert aussi de conducteur de protection : le PEN est relié aux masses. Des courants homopolaires importants peuvent ainsi circuler dans les masses. Ces courants parcourent de grandes boucles de masses, le champ magnétique suffit souvent à perturber des tubes cathodiques, à partir de 1 A/m environ. Le TN-C n'est pas le meilleur schéma pour garantir l'équipotentialité des masses.

L'intérêt du schéma TN-C par rapport au TN-S est qu'il économise un conducteur. Pratiquement, il convient d'en limiter l'emploi à l'interconnexion entre un poste MT/BT éloigné et le TGBT, à condition qu'aucun autre matériel interconnecté ne soit alimenté à partir du même poste. Pour plus de sûreté, nous préconisons dans tous les cas d'opter pour le schéma TN-S de bout en bout.

Schéma TN-S

En schéma TN-S (Terre et Neutres Séparés), le conducteur neutre, noté N, est doublé par un conducteur de protection, noté PE. Il est autorisé, bien que nous le déconseillons, d'utiliser des protections sur le neutre en TN-S : disjoncteurs tétrapolaires ou encore pire, des fusibles. Il est possible d'installer un schéma TN-S en aval d'un schéma TN-C mais bien entendu pas l'inverse puisqu'alors le conducteur de protection risquerait d'être interrompu.

L'impédance totale du conducteur PE, comme en TN-C, doit être telle qu'en tout point le courant maximal par phase y génère une d.d.p. inférieure à la tension limite de sécurité. Les courants permanents écoulés par le conducteur PE (et par les masses maillées) ne sont que les courants de fuite des équipements. L'équipotentialité des masses est meilleure en TN-S qu'en TN-C.

Si l'on souhaite conserver au réseau de masse une excellente équipotentialité à proximité d'équipements ayant de forts courants de fuite à la masse, il est souhaitable d'alimenter ces équipements à travers un transformateur d'isolement. Ceci reste d'ailleurs vrai pour tous les schémas de neutre.

Le meilleur schéma de neutre est indiscutablement le TN-S. C'est lui qui assure la meilleure équipotentialité à la fois entre les équipements (une seule terre) et entre les masses (peu de courant dans le PE). Nous sommes convaincus qu'à l'avenir la plupart des installations industrielles françaises s'aligneront sur ce standard international.

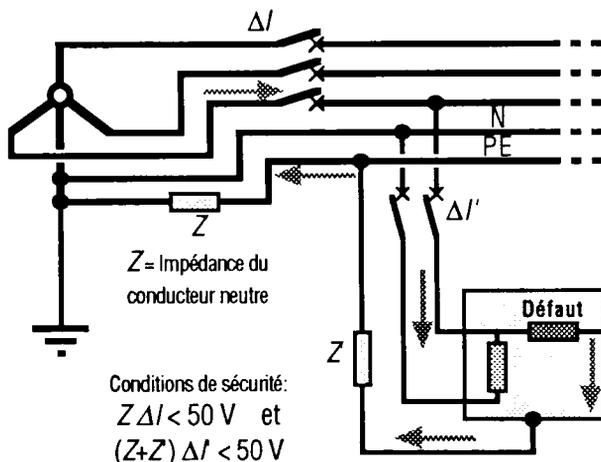


Figure 1-37 : Le schéma TN-S (terre et neutre séparés)

Raccordement d'un point à la masse

Rappelons qu'hormis en très basse tension de sécurité (TBTS) et pour les prises secteur installées dans un volume de protection, il n'est légal de distribuer une alimentation dont aucun point n'est mis "à la terre" (entendons à la masse) que si un CPI signale un premier défaut. Ceci est vrai pour les interfaces d'alimentation statiques (transformateurs d'isolement, onduleurs, etc.) comme pour les alternateurs (groupes tournants à inertie, groupes électrogènes, etc.). Un point de la sortie doit être relié en permanence à la "terre" (à la masse).

Hormis en laboratoire où tout est toléré, ne sont dégagées de cette obligation que les alimentations utilisées exclusivement à l'intérieur d'un équipement, c'est-à-dire pour les tensions internes qui ne sont distribuées à aucun autre appareil. Le choix du point à raccorder à la masse en sortie du transformateur ou du générateur est laissé à l'appréciation de l'installateur. Pour un transformateur d'isolement monophasé sans point milieu, on choisira une des phases.

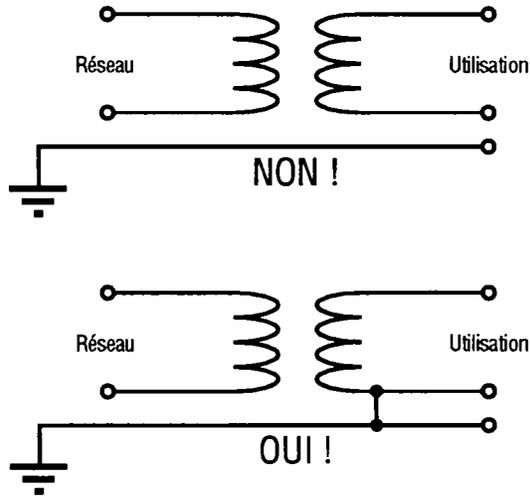


Figure 1-38 : Distribuer une alimentation flottante est illégal

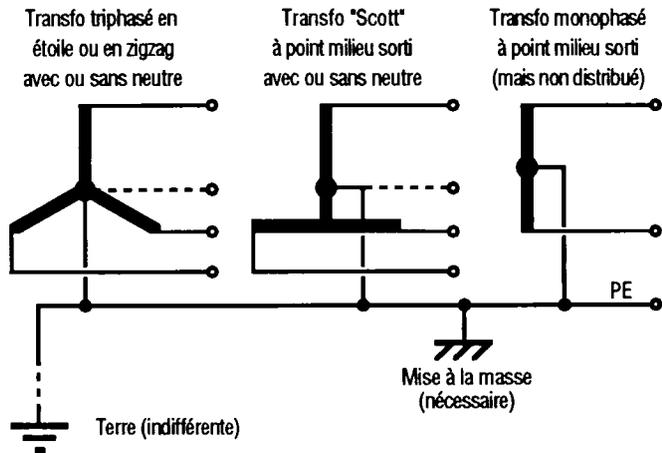


Figure 1-39 : Relions le point de symétrie à la masse



En triphasé, le nombre de configurations possibles est vaste : sortie en triangle, étoile, zigzag, Scott, etc. Il convient de relier à la masse le point de symétrie en tension du réseau (quand il est disponible, évidemment). Ceci limite la tension permanente supportée par les condensateurs de filtrage et les écrêteurs installés entre phases et masse. D'autre part, et c'est au moins aussi important, puisque les capacités entre chaque phase et la masse sont normalement à peu près égales, cela limite le courant de fuite dans le conducteur de protection. Si le neutre est distribué, il ne devrait être relié à la masse qu'en ce seul point.

Conclusion des schémas de neutre

Le choix du régime de neutre est important mais il n'est pas essentiel au bon fonctionnement des électroniques... ou en tous cas ne devrait pas l'être. Seule l'utilisation d'un disjoncteur différentiel sensible (≤ 30 mA) peut protéger une personne en cas de contact entre phase et masse. Cette protection est inadaptée aux équipements informatiques et aux matériels de forte puissance. Rien ne peut protéger une personne contre un contact direct entre phases.

La différence entre les divers schémas de neutre n'apparaît qu'en mode commun. En mode différentiel, tous les schémas présentent une impédance entre phase équivalente (à puissance de court-circuit de la source et à longueurs de câbles égales, bien entendu). La différence en mode commun n'apparaît qu'en BF. Compte tenu des longueurs de câbles, tous les schémas sont équivalents en HF, c'est-à-dire qu'ils sont mauvais. Il importe en conséquence de mailler les masses entre elles conformément à la règle d'équipotentialité (et conformément au bon sens sommes nous tentés d'ajouter).

Il est toujours possible de changer de schéma de neutre en ajoutant simplement un transformateur d'isolement. Nous conseillons ce changement pour alimenter des électroniques sensibles, particulièrement lorsque le régime de neutre de l'installation est un des schémas qui présente des risques de surtensions en mode commun : TT ou IT.

Il est ainsi possible et à relativement faible coût, de passer localement en TN-S. Ce schéma est le meilleur. Il devient excellent lorsque c'est le point milieu des tensions de sortie qui est référencé à la masse.

Alimentation de secours

Une interface d'alimentation est utile en cas de perturbations de tension entre phases (coupure brève, creux de tension, etc). Les performances principales d'une interface d'alimentation sont l'aptitude à compenser les fluctuations de tension, à supporter les surtensions, à ne pas émettre de perturbations, à garantir une autonomie suffisante, à supporter les courants harmoniques sans trop en générer elle-même et enfin à pouvoir éliminer les surintensités.

Il est fréquent que les courants harmoniques, rapportés à la puissance consommée, soient supérieurs pour la partie protégée que pour le reste du site. Il convient de conserver à l'esprit que des sources de perturbations peuvent être situées de part et d'autre d'une interface d'alimentation.

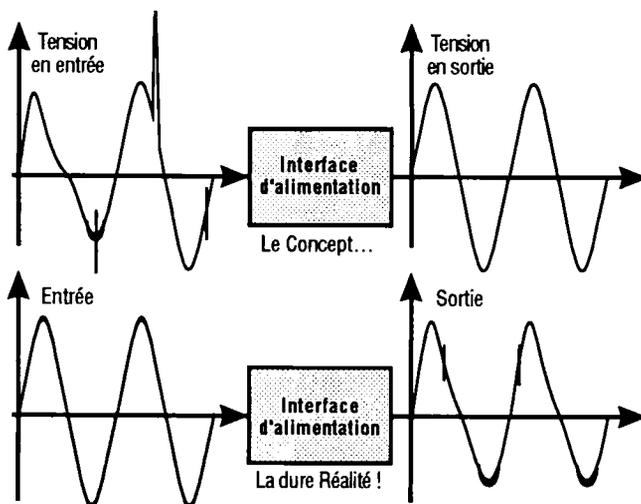


Figure 1-40 : La réalité des interfaces d'alimentation...

Pour décider de l'ajout d'une interface d'alimentation, il faudrait connaître statistiquement la qualité du réseau d'alimentation, l'immunité aux creux de tension et aux surtensions du matériel à secourir, et enfin définir le risque acceptable de perturber le système. Nous avons

souvent constaté qu'en réseau urbain enterré, la fréquence des problèmes d'un petit système informatique est supérieure s'il est alimenté par un petit onduleur que s'il est alimenté par le réseau.

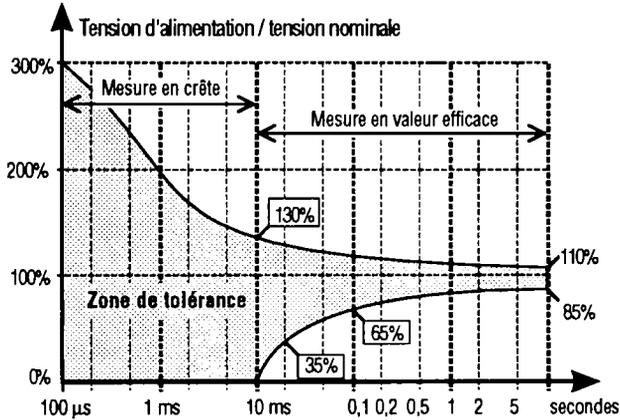


Figure 1-41 : Susceptibilité typique d'un équipement scientifique, informatique ou médical

Pour choisir une interface d'alimentation, il faut définir sa puissance nominale, son facteur de puissance (kW/kVA), la puissance crête à fournir, les durées des surcharges, le courant crête durant une demi-période, le spectre et l'amplitude des courants harmoniques prévisibles et enfin les fluctuations de tension acceptables du côté secouru. Par défaut, nous conseillons de retenir un facteur de puissance de 0,8 soit une puissance apparente 1,25 fois supérieure à la puissance "wattée" (active) consommée. Il convient en outre de retenir une marge supplémentaire pour de futures modifications. Un coefficient de sécurité de 125 % (puissance de source / puissance apparente totale installée) est convenable. Appliquons les mêmes marges pour le dimensionnement des conducteurs.

Transformateur d'isolement

Ajouter un transformateur d'isolement BT, c'est-à-dire de rapport voisin de 1/1 (des prises permettent éventuellement d'ajuster finement la tension) ne sert qu'à changer de schéma de neutre, à s'isoler de surtensions lentes en mode commun et à limiter les courants de fuite dans la masse.

Gamme de puissance : 100 VA à plus de 100 kVA (1 MVA possible)

Courant de court-circuit : $\approx 20 I_n$ et bon comportement aux surcharges

Distorsion de la tension : Sensiblement celle du réseau amont

Autonomie : Aucune

Entretien : Aucun

Avantages : Excellente fiabilité, très peu de pertes (< 2%)

Bonne rigidité diélectrique amont/aval

Ne génère aucune perturbation conduite

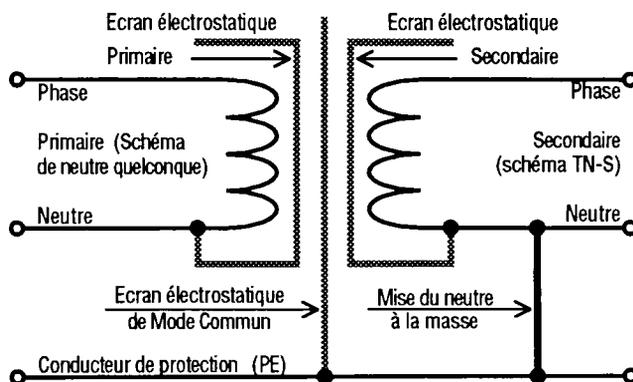
Inconvénients : Aucune autonomie

Pas d'effet de filtrage en mode différentiel

Pas de régulation dynamique de la tension

Transmet les courants harmoniques (sauf H3)

Un transformateur d'isolement transmet les impulsions longues et n'améliore pas l'immunité des équipements contre les baisses de tension. En triphasé, il court-circuite l'harmonique 3 (sur sortie en triangle, avec circuit magnétique "cuirassé" à 5 colonnes). Un transformateur "d'ultra-isolation" est un transformateur d'isolement à plusieurs écrans. Il peut servir à limiter les perturbations de mode commun filaires mais pas celles en vrai mode commun : le conducteur de protection est le même en amont et en aval. Tout courant supporté par le conducteur PE continue "tout droit" sans atténuation. Compte tenu du coût dissuasif de cet appareil, il nous semble bien peu intéressant. Les protections en conduction : les filtres d'alimentation, les écrêteurs et leurs montages sont détaillés au tome 3.



Excellent en mode commun filaire grâce à ses écrans électrostatiques, un tel transformateur est inefficace en vrai mode commun (via le PE)

Figure 1-42 : Schéma d'un transformateur "d'ultra-isolation"

Conditionneur de réseau

Un conditionneur de réseau est un transformateur d'isolement à prises multiples commutées de façon automatique. Il sert à maintenir la tension fournie à peu près constante lors de variations lentes de la tension du réseau.

Gamme de puissance : 300 VA à quelques dizaines de kVA

Courant de court-circuit : $\approx 15 I_n$ et bon comportement aux surcharges

Distorsion de la tension : Sensiblement celle du réseau amont

Autonomie : Aucune

Entretien : Aucun

Avantages : Régule typiquement de + 10 - 20% vers $\pm 3\%$
Bonne rigidité diélectrique amont/aval
Peu de pertes (3 % environ)

Inconvénients : Aucune autonomie
Transmet les courants harmoniques
Génération de transitoires sous faible charge

La plupart des conditionneurs de réseau disposent également d'un filtre et d'un écrêteur (au moins pour protéger leurs triacs). Le petit saut d'amplitude lors de la commutation des plots pose peu de problème. Toutefois les nouvelles électroniques alimentées par des convertisseurs à découpage ont toujours de si grandes dynamiques qu'une pré-régulation est inutile. Pour l'abonné "normal", les efforts d'EDF pour maintenir la tension réseau dans la fourchette -10 % à + 6 % de la tension nominale réduisent l'intérêt des conditionneurs de réseau.

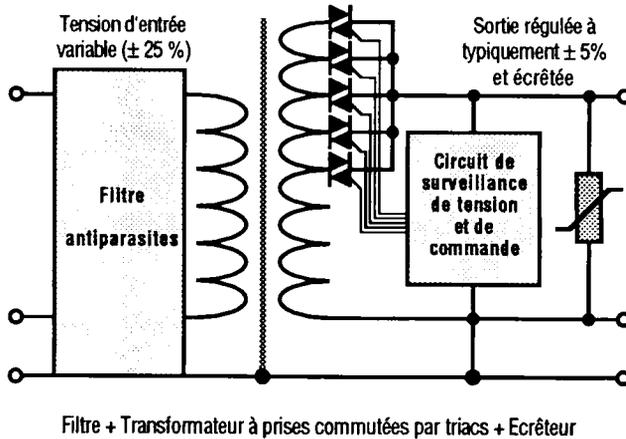


Figure 1-43 : Schéma d'un conditionneur de réseau

Une réponse lente peut être un atout pour un régulateur primaire. En effet, il n'est possible d'installer en cascade deux régulateurs de tension alternative que si leurs constantes de temps de régulation sont très différentes ou si la puissance du régulateur en aval est très inférieure (>10 fois) de celui en amont. Dans le cas contraire, une instabilité (un "pompage") de la tension est à redouter.

Variac motorisé

Un variac est un autotransformateur réglable en continu. Puisque le rapport de transformation est voisin de 1/1, son volume est beaucoup plus faible que celui d'un transformateur de puissance équivalente.

Gamme de puissance : 1 kVA à > 100 kVA en régulateur à induction

Courant de court-circuit : > 20 In, excellent comportement aux surcharges

Distorsion de la tension : Sensiblement celle du réseau amont

Autonomie : Aucune

Entretien : Contrôle des frotteurs

Avantages : Bonne fiabilité, très peu de pertes

Très basse impédance de sortie

Ne génère pas de perturbations

Inconvénients :

Aucune autonomie

Régulation de la tension lente (≈ 1 s)

Transmet les courants harmoniques

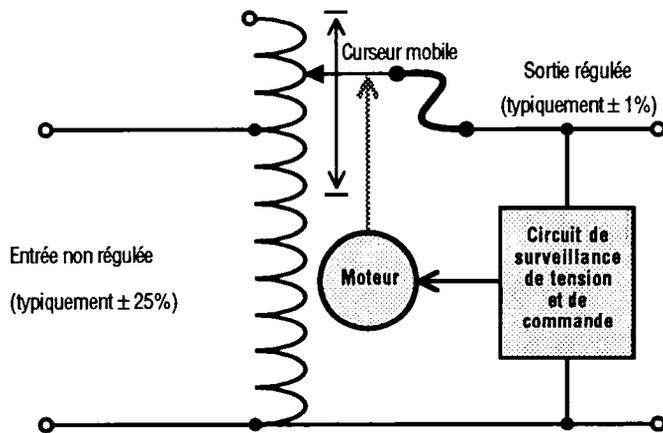


Figure 1-44 : Schéma d'un variac monophasé motorisé

La fonction principale d'un variac motorisé est de compenser les variations de tension lentes pour les abonnés en extrémité de ligne longue. Contrairement à un transformateur, la sortie n'est pas isolée par rapport à l'entrée et le schéma de neutre ne peut pas être modifié. Des variacs triphasés motorisés existent. Ils sont composés d'un empilage de trois variacs monophasés avec leurs curseurs commandés par le même axe. Des forts courants sont difficiles à transmettre par des frotteurs et une maintenance devient nécessaire, on préfère dans ce cas un "régulateur à induction".

Un régulateur à induction est composé comme un moteur asynchrone mais avec un rotor triphasé bobiné bloqué. Ce rotor, calé en angle par une vis sans fin motorisée, ajoute ou retranche sa tension induite à celle du réseau. On obtient ainsi un autotransformateur continûment variable sans balai.

Régulateur à ferro-résonance

Un régulateur à ferro-résonance est un transformateur qui travaille en saturation au primaire et avec un bobinage calé à la résonance au secondaire. Des régulateurs à ferro-résonance étaient souvent utilisés jusqu'aux années 1970 pour alimenter les téléviseurs.

Gamme de puissance :	100 VA à plus de 10 kVA
Courant de court-circuit :	$< 2 I_n$, mauvais comportement aux surcharges
Distorsion de la tension :	Accepte bien les courants harmoniques
Autonomie :	Pas plus de 20 ms
Entretien :	Aucun
Avantages :	Tous les avantages du transformateur Bonne régulation de 0 à I_n Efficace contre les surtensions
Inconvénients :	Pertes à vide importantes Courant de court-circuit limité à $1,5 I_n$ environ Surtension à la mise sous tension Accepte mal les charges capacitives ou les ΔF Rayonne du champ H et souvent bruyant

Le principal inconvénient d'une alimentation à ferro-résonance est qu'elle n'accepte pas les surcharges. En cas de démarrage d'un moteur asynchrone par exemple, la d.d.p. de sortie peut tomber au voisinage de zéro et y rester définitivement ! Il est pratiquement impossible d'éliminer un défaut par un fusible.

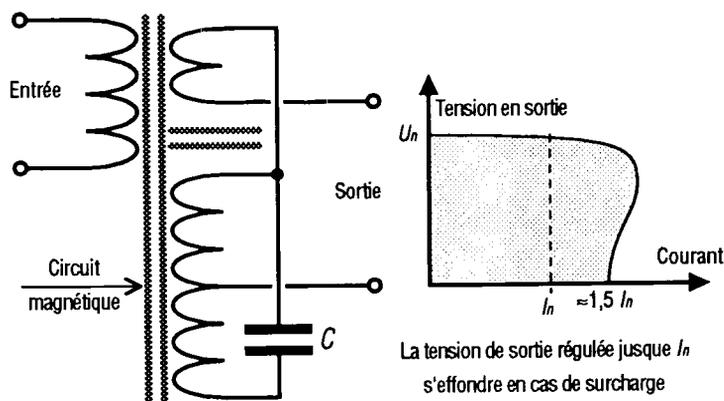


Figure 1-45 : Régulateur à ferro-résonance

Un régulateur à ferro-résonance limite les surtensions du primaire mais peut en générer une sévère à la mise sous tension, quand son circuit n'est pas encore magnétisé. Sur variation brutale de la charge, l'amplitude et la phase de la tension varient. Le transformateur à ferro-résonance d'une alimentation triphasée doit être bobiné en zigzag pour rester stable en cas de déséquilibre.



Groupes tournants à inertie

Les “groupes tournants” sont composés d’un moteur d’entraînement et d’un alternateur alignés sur le même axe. Un volant d’inertie assure une autonomie suffisante contre tous les creux de tension et les coupures très brèves.

Gamme de puissance : 1 kVA à plus de 1 MVA

Courant de court-circuit : 5 à 15 In, donc sélectivité à soigner

Distorsion de la tension : Accepte souvent mal les courants harmoniques

Autonomie : De 0,5 à quelques secondes

Entretien : Pratiquement limité au graissage des paliers

Avantages :

- Protection totale contre les surtensions
- Protection contre creux et baisses de tension
- Très bonne fiabilité et faible entretien
- Excellent isolement galvanique
- Permet de changer de fréquence d’alimentation

Inconvénients : Puissance de court-circuit souvent faible

Autonomie limitée à 2 secondes environ

Glissement de fréquence en autonomie ≈ 1 Hz/s

Jusqu’à 100 kVA, un groupe tournant est généralement entraîné par un moteur asynchrone. La fréquence de sortie est alors légèrement inférieure à celle du réseau. Elle est typiquement comprise entre 49,5 et 49,8 Hz.

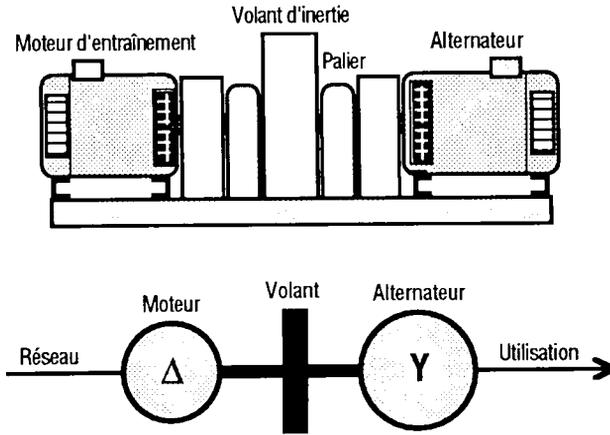


Figure 1-46 : Schéma d'un groupe tournant à inertie

Certains groupes tournants (Société Siepel) assurent un isolement galvanique parfait : l'alternateur est entraîné à travers un écran électromagnétique par une courroie isolante. C'est la meilleure solution pour alimenter en énergie très propre une cage de Faraday. Un groupe de forte puissance gagne à être entraîné par un moteur synchrone. Un tel moteur peut même, par surexcitation (prévue à la conception), compenser la puissance réactive du site sans les risques des condensateurs : surtension à l'enclenchement et résonance.

Le moteur d'entraînement ne fournit que la puissance wattée (active) consommée par l'utilisation plus les faibles pertes de l'alternateur. L'alternateur doit, lui, fournir la puissance active, la puissance réactive et la puissance déformante consommées par l'utilisation (les courants harmoniques). Il est raisonnable que l'alternateur soit de puissance double voire triple de celle du moteur.

L'autonomie d'un groupe tournant à inertie est limitée à quelques secondes, ce qui ne permet de clôturer la cession de travail que par un processus automatique (la mise en repli des automates), mais pas des opérations manuelles. L'inconvénient majeur des groupes tournants est celui de l'impédance instantanée de leur alternateur, appelée *impédance subtransitoire*. Elle est élevée : I_{cc} est souvent inférieur à $10 I_n$. Comme avec un transformateur à fort flux de fuite, des courants harmoniques créent une forte distorsion de la tension et une charge capacitive aug-



mente la tension délivrée. Un objectif raisonnable est que le courant de court-circuit atteigne 10 à 15 In, soit une tension de court-circuit de l'ordre de 7%. Nous conseillons, pour alimenter une charge très déformante (informatique, pont de Grætz...), au moins de doubler la puissance de l'alternateur par rapport à celle du moteur. Surtout si le surdimensionnement de l'alternateur est faible, il convient de surdimensionner ses amortisseurs pour qu'il supporte sans surchauffe les courants harmoniques.

Le moteur et son automatisme de contrôle doivent être conçus pour reprendre la charge sans problème après une chute de tension. Lorsque la fréquence du groupe tombe vers 49 Hz, un ordre peut être envoyé au système secouru pour qu'il se mette en position de repli. L'utilisation est déconnectée quelques instants plus tard, lorsque la fréquence tombe sous 48 Hz par exemple.

Malgré leur allure un peu archaïque, les groupes tournants à inertie résolvent tous les problèmes liés aux coupures très brèves, aux surtensions, aux fluctuations de tension et aux schémas de neutre. La majorité des possesseurs de groupes à inertie considèrent qu'une source de secours avec une autonomie supérieure ne serait pas justifiée. C'est une bonne solution contre la majorité des problèmes d'alimentation, d'autant que leur fiabilité est excellente et que leur entretien n'est qu'une formalité. Cette maintenance peut être réalisée par du personnel peu qualifié.

Groupe électrogène

Un groupe électrogène (GE) est un alternateur entraîné par un moteur thermique, souvent un moteur Diesel. Avec un démarrage automatique, l'absence de tension ne dure que quelques secondes.

Gamme de puissance : 1 kVA à plus de 10 MVA

Courant de court-circuit : 5 à 15 I_n selon l'alternateur

Distorsion de la tension : Accepte souvent mal les courants harmoniques

Autonomie : Pratiquement illimitée

Entretien : Celui du moteur thermique

Avantages : Les mêmes qu'un groupe à inertie
Possibilité de suppléer à une défaillance longue

Inconvénients : Puissance de court-circuit souvent faible

Instabilité de la phase

Basculement avec un creux de tension (> 1 s)

Un moteur diesel a la réputation de démarrer sans problèmes... sauf quand on en a réellement besoin ! Les diesels de secours des centrales nucléaires sont maintenus préchauffés pour démarrer rapidement et à coup sûr. Par ailleurs un démarrage de contrôle par semaine correspond à une usure comparable à celle d'une marche à temps plein. Le coût horaire du kilowatt produit par un GE est très supérieur à celui de EDF et tourner à vide glace ses cylindres. Certains contrats de fourniture d'électricité tel celui avec effacement des jours de pointe peuvent rendre un GE intéressant, voire justifier son investissement.

Le surdimensionnement et les problèmes de l'alternateur sont ceux d'un groupe tournant à inertie. Le problème majeur d'un groupe électrogène est l'absence d'énergie électrique durant la phase de démarrage, soit en pratique de quelques secondes à une minute environ. Il convient aussi de surveiller l'amplitude des harmoniques. Des distorsions supérieures à 15 % ont été mesurées entre phase et neutre par H3. Un bobinage zigzag au pas 2/3 de l'alternateur abaisse son impédance 150 Hz et améliore son comportement à la puissance déformante.



Alimentation statique ininterrompible

Une alimentation statique ininterrompible (A.S.I.) est souvent appelée “onduleur”. En fait elle se compose d’un chargeur, d’une batterie en tampon maintenue en charge et de l’onduleur proprement dit.

Gamme de puissance : 200 VA à 800 kVA, mises en parallèle possibles

Courant de court-circuit : $\approx 1,5 I_n$ si CS absent ou secteur 2 hors phase

Distorsion de la tension : Souvent forte sur courants harmoniques

Autonomie : Guère plus de 15 minutes sur batteries

Entretien : Complexe et par du personnel spécialisé

Avantages : Silencieux

Aucune perturbation sur creux de tension

Inconvénients : Coût et vieillissement des batteries

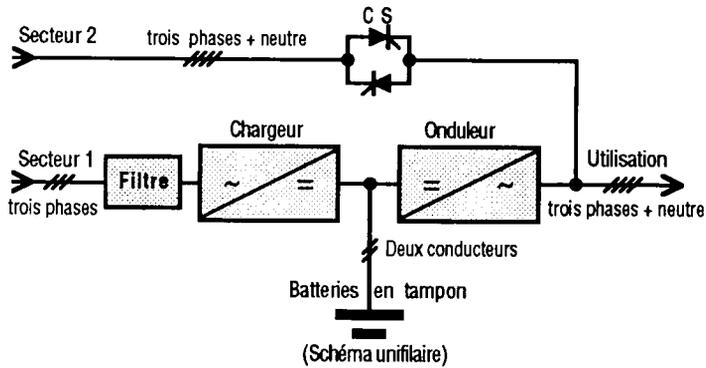
Faible puissance de court-circuit

Rendement global $\approx 0,9$

Génération de perturbations électromagnétiques

Local dédié spécial pour les batteries ouvertes

Un petit onduleur “off line” ne démarre qu’en cas de besoin. Il ne se révèle en panne que lorsqu’il est sollicité. Si l’onduleur fonctionne en permanence, il est dit “on line”. Tout gros A.S.I. fonctionne sur ce principe. Un contacteur statique, le “CS”, permet à l’onduleur qui ne dispose pas de puissance de court-circuit d’éliminer une surcharge. Il suffit que le “secteur 2” soit présent et en phase avec l’onduleur pour que le CS se ferme et élimine la surcharge.



Le CS ne coupe pas le neutre (l'utilisation a le même schéma de neutre que le secteur 2). Secteurs 1 et 2 sont souvent confondus.

Figure 1-47 : Alimentation statique ininterrompue

Les A.S.I. présentent par rapport aux groupes tournants à inertie deux avantages significatifs : ils disposent d'une autonomie de plusieurs minutes contre quelques secondes (environ 10% des creux de tension sont en fait des coupures de plusieurs secondes) et ils ne posent aucun problème de raccrochage de phase lors du retour secteur. La fréquence délivrée est en outre précise et stable.

Les problèmes des A.S.I. sont malheureusement nombreux. Le chargeur génère souvent des harmoniques et/ou des perturbations HF. Par principe, un onduleur fonctionne par découpage. Il peut donc polluer à la fois le secteur et l'utilisation en mode commun HF. Seul un filtrage efficace et adapté de tous les câbles, y compris ceux de la batterie, peut prévenir les problèmes de vrai mode commun. De plus, les charges déformantes provoquent souvent une forte distorsion de la tension fournie, particulièrement lorsque la fréquence de découpage est basse.

En mode commun un onduleur ne doit pas être considéré comme un filtre : il est transparent via le CS et ne permet pas de modifier le schéma de neutre. Pour cela il faut ajouter un transformateur d'isolement. Le CS ne présente pas une forte rigidité diélectrique. Une surtension importante entre les phases du "secteur 2" peut être transmise à l'utilisation.



Enfin le rendement global d'une A.S.I. est voisin de 0,9. En quelques années, son coût (pour les fortes puissances) est dépassé par celui de l'énergie électrique de ses propres pertes.

Un petit onduleur pour micro-informatique d'une puissance inférieure à 1 kVA ne dispose pas de contacteur statique. Ils ne se justifie guère qu'en zone rurale. Lorsque le secteur 2 est un groupe électrogène, son instabilité de phase interdit généralement au CS de se fermer pour éliminer les surcharges.

Le prix des onduleurs croît moins vite que leur puissance. Il est ainsi plus économique d'utiliser un unique onduleur puissant que plusieurs petits. La surveillance et l'entretien des batteries en est aussi simplifié. Le MTBF des gros A.S.I. dépasse les 10 000 heures. Ceci correspond tout de même en moyenne à quelques défaillance pendant sa durée de vie.

Le problème majeur et insoluble des A.S.I. est celui du stockage de l'électricité. Le coût des batteries est proportionnel à la puissance installée et leur durée de vie ne dépasse guère 5 ans à partir de leur fabrication. L'autonomie minimale est de 10 minutes : une batterie déchargée aussi vite agonise ! Jusqu'à une puissance de 100 kVA, des batteries de type plomb étanche peuvent être installées en salle informatique, mais elles vieillissent quand elles travaillent. Les batteries ouvertes nécessitent un local ventilé et un entretien (cyclages et pesée d'acide). Les batteries au plomb/calcium durent 10 ans mais coûtent deux fois plus cher.



Alimentation dynamique ininterrompible

Une alimentation dynamique ininterrompible ou A.D.I. est un groupe électrogène dont l'alternateur tourne en permanence et dont le moteur Diesel, au démarrage rapide, est lancé par l'inertie du rotor grâce à un embrayage électrique.

Gamme de puissance : 30 à 1000 kVA, mises en parallèle possibles

Courant de court-circuit : 10 à 20 In

Distorsion de la tension : Faible distorsion sur courants harmoniques

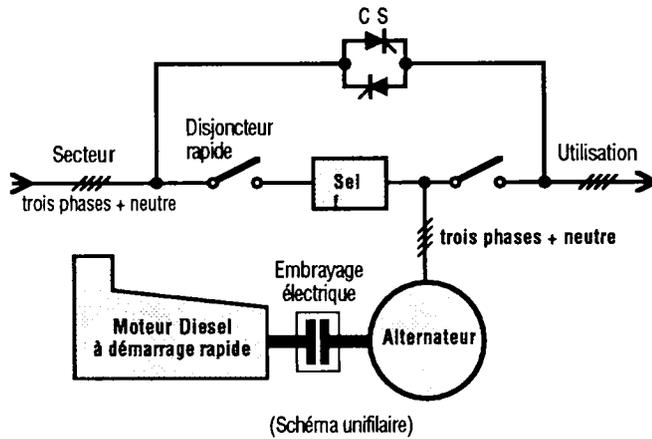
Autonomie : Pratiquement illimitée

Entretien : Maintenance simple (2 fois une heure par an)

Avantages : Faible distorsion, élimine les défauts
Utilisable en groupe production (contrat EJP)
Très faible perturbation sur creux de tension
Bonne fiabilité, supporte températures élevées
Faible encombrement, en local non spécialisé
Utilisable en compensateur synchrone

Inconvénients : Niveau sonore élevé (80 dB A)
Plus coûteux qu'un simple groupe à inertie

En marche normale, l'alternateur tourne en parallèle sur le réseau. Il peut alors jouer le rôle de compensateur statique. En cas de disparition de la tension, le contacteur statique isole rapidement l'alternateur du réseau. Une seconde plus tard environ un embrayage électrique lance par inertie le moteur diesel. Après environ 5 secondes, le moteur a pris la charge. Sous la puissance nominale, la baisse de la fréquence ne dépasse pas 1 Hz.



Comme pour l'ASI, un by-pass (non représenté) permet la maintenance

Figure 1-48 : Alimentation Dynamique Ininterrompue

Une self en série avec le réseau limite le creux de tension avant que le contacteur rapide n'isole l'utilisation. La faible impédance de l'alternateur souvent largement surdimensionné peut rendre la distorsion sur l'utilisation inférieure à celle du réseau. Les usagers des A.D.I. en sont généralement très satisfaits.

Autres solutions

D'autres solutions sont possibles pour secourir l'alimentation électrique. Diverses combinaisons de groupes tournants sont commercialisées : avec ou sans batteries en tampon, avec moteur électrique alimenté en continu ou en alternatif, avec ou sans diesel en secours.

Ensuite la généralisation des convertisseurs à découpage rend souvent possible l'alimentation des équipements électroniques en tension continue. Ce nouveau concept se contente d'une batterie en tampon pour assurer la continuité de service. La difficulté technique est d'utiliser des disjoncteurs ou des fusibles limiteurs capables d'éliminer un défaut sous une tension continue de l'ordre de 400 volts. Cette solution est certainement promise à un bel avenir.



Dans beaucoup d'applications industrielles, la temporisation des relais rapides permet de désensibiliser l'installation contre les coupures brèves. Une alimentation par deux postes source permet de basculer de l'un sur l'autre en cas de défaut sur l'un des réseaux MT.

Contre les défauts dans l'installation BT, une arborescence maîtrisée et la sélectivité des protections améliore grandement la continuité de service. Un dialogue entre l'installateur, le distributeur d'énergie et l'utilisateur est souvent profitable. Des dysfonctionnements peuvent avoir leurs conséquences rendues supportables par des modifications simples de l'installation, sans investissement important.

La seule certitude commune à toute installation est qu'elle tombera en panne. La seule incertitude est la date ! Lorsque l'on recherche une haute fiabilité de la fonction alimentation, des sources d'alimentation redondantes sont nécessaires.

Le seul concept universel pour limiter les effets d'une panne est la redondance. Son efficacité est reconnue et elle est mathématiquement facile à formaliser. Encore convient-il de veiller à ce que cette redondance soit réellement effective, sans trop augmenter les risques de défaillance ni ruiner l'indisponibilité. Le "secret" de la redondance (pour un réseau électrique comme pour tout autre type de matériel) est dans une architecture à tolérance de pannes.

Une alimentation secourue fiable se justifie pour les applications dont la continuité de service doit être absolument assurée pour la sauvegarde des personnes ou des biens. Elles se justifient aussi quand la qualité de l'alimentation est insuffisante pour les applications dont le coût d'arrêt du fonctionnement est jugé inacceptable. Enfin elles peuvent se justifier pour les applications critiques pour l'entreprise (comptabilité, gestion, travail à fichiers ouverts...) lorsque la qualité de l'alimentation est très insuffisante. Pour la plupart des autres applications (bureautique, calculs scientifiques élémentaires...), une sauvegarde périodique des données procède d'une excellente hygiène et s'avère le plus souvent suffisant.

La redondance matérielle et logicielle par "mirroring" (stockage en temps réel) grâce à un second disque dur avec éventuellement une cartouche amovible sur le port SCSI des micro-ordinateurs est une technique de protection sûre et désormais économique. Elle ne se substitue pas aux sauvegardes périodiques.



Les automates programmables industriels bénéficient depuis plus de 10 ans d'un mode de repli. De plus en plus d'alimentations informatiques fournissent une information "power fail" environ 10 millisecondes avant la disparition de la tension fournie. Grâce à cette information et à un utilitaire, les systèmes d'exploitation récents (DOS, UNIX...) permettent d'assurer rapidement et de façon prioritaire la fermeture "propre" des applications et de leurs fichiers. Des batteries dédiées à l'unité centrale permettent des sauvegardes rapides sur disque interne. Des cartes "add-in" pour les principales machines du marché permettent la même fonction.

En bureautique, si une distribution d'alimentation secourue de faible puissance (les "prises rouges" pour alimenter les micro-ordinateurs) côtoie une distribution d'alimentation standard pour les gros consommateurs d'énergie (les "prises blanches" pour alimenter les imprimantes laser par exemple), il est impératif de relier les broches de terre des deux types de prises au plus court dans la plinthe et pas en étoile autour d'une borne de terre distante... et encore moins à des terres distinctes !

En conclusion

La qualité de l'électricité fournie par le distributeur ne pourra jamais être parfaite. Des protections contre les surtensions sont nécessaires, elles sont souvent moins maîtrisées que celles contre les surintensités. Les protections différentielles sensibles font mauvais ménage avec les équipements électroniques filtrés.

Le schéma de neutre n'importe qu'en BF et en mode commun. En HF ou en mode différentiel, ils sont tous équivalents. Le meilleur schéma de neutre est le TN-S. Le schéma TN-C injecte les courants homopolaires dans les masses. Il peut bruyé des liaisons non symétriques (vidéo par exemple) et faire rayonner les masses en champ H. Il est possible de passer en TN-S par l'ajout d'un transformateur d'isolement, en reliant le point milieu du secondaire à la masse.

Le schéma IT, favorable pour les réseaux MT, est déconseillé pour alimenter des équipements sensibles, distants, nombreux, ou filtrés par des condensateurs de forte capacité par rapport à la masse. Attention aux risques d'électrocution lors d'interventions humaines. Enfin il est illégal de distribuer une alimentation secteur flottante non surveillée par un CPI. Attention aux conditionneurs !

Le dangereux schéma TT avec ses deux terres ne garantit pas mieux l'équipotentialité entre phases et masse que le schéma IT. Des écrêteurs sont souhaitables. Il faudrait les installer en amont des protections différentielles.

L'alimentation des gros perturbateurs par des câbles de distribution séparés est une bonne solution pour réduire la distorsion en tension. Ne confondons pas cette recommandation en mode différentiel avec le raccordement des masses en étoile autour d'une référence de potentiel "propre"... Rappelons qu'une alimentation en étoile n'est intéressante qu'en BF et entre fonctions isolées. Dans tous les cas il faudrait n'avoir qu'un seul réseau de terre par site.

Une interface d'alimentation ne se justifie que si le coût des défauts du réseau non conditionné est supérieur à la somme des coûts de l'interface, de son entretien, de sa maintenance et de ses propres défaillances. Un réseau d'alimentation rarement défaillant rend l'ajout d'une interface d'alimentation néfaste.



LA PROTECTION Foudre

Nous tenons à remercier chaleureusement l'équipe Foudre du CEA de Grenoble pour sa précieuse et cordiale collaboration. La foudre est un phénomène fréquent et encore ancré dans l'esprit de beaucoup comme une malédiction plus ou moins divine (Zeus, Jupiter...) et dont les conséquences seraient fatales. En fait, si la foudre est encore à ce jour inévitable, nous savons en limiter les effets avec une bonne efficacité et à un coût acceptable. Les seules méthodes de protection efficaces sont celles de la CEM classique. Elles vont nous permettre de réviser les notions abordées aux tomes 2 et 3 : l'équipotentialité des équipements, le maillage des masses, la réduction des surfaces des boucles de masse et la protection des pénétrations conductrices.

Le phénomène foudre

Le phénomène foudre est sérieusement étudié depuis un peu plus d'un siècle. Il est désormais statistiquement bien connu. Il s'agit d'une spectaculaire décharge électrostatique disruptive entre un nuage et le sol. Ce n'est que de l'électricité dans l'air ! C'est le français Dalibard (en fait son menuisier Coiffier et le curé Raullet) qui, le 10 mai 1752 à Marly-le-Roi, démontra la nature électrique des éclairs. L'histoire ne retint que l'expérience de Benjamin Franklin qui eut lieu en septembre de la même année à Philadelphie, peut-être parce que ce dernier avait antérieurement posé le même genre d'essai.

Notre connaissance de la foudre est désormais satisfaisante. En France, la station de Saint-Privat d'Allier analyse des éclairs déclenchés artificiellement. Lorsque le champ électrique statique au sol est jugé suffisant, une petite fusée paragrêle déroulant un fil fin de cuivre est tirée verticalement. Sa vitesse ascensionnelle, plus de 200 m/s, conditionne la probabilité de déclenchement. Un éclair est souvent consécutif au lancement. Les essais déclenchés ont un premier arc en retour assez peu fidèle à la réalité : les vapeurs de cuivre modifient le phénomène aux premiers instants. Un déclenchement artificiel a un courant crête moins élevé qu'un coup naturel. Les relevés qu'on obtient sont néanmoins riches d'enseignements, avec des mesures précises et à grande dynamique.

Le *niveau kéraunique* est le nombre moyen de jours annuels durant lesquels le tonnerre est... entendu ! Ce comptage fût longtemps le seul moyen d'évaluer l'occurrence de la foudre. Ce niveau varie en France, selon les régions, entre 5 et 40. Le niveau kéraunique maximum est celui du sud du Massif Central et du nord des Alpes. Celui de l'île de Java dépasse 200 !

Le tonnerre n'est que le bruit acoustique du canal ionisé que la température du canal ionisé de l'éclair dilate brutalement. Le tonnerre n'a jamais tué personne. La lumière se propageant environ un million de fois plus vite que le son, si l'on entend le tonnerre on peut être rassuré : on n'est pas foudroyé !

Des moyens de détection radioélectriques permettent de localiser les chocs de foudre. Le dispositif américain LLP utilisé en France par la société Météorage travaille dans la gamme des ondes kilométriques. Le système français SAFIR plus récent (1990) travaille par interférométrie en VHF. Hormis une meilleure précision, surtout en région montagneuse,

ce procédé permet de détecter les prédécharges dans un nuage de 10 à 20 minutes avant le premier coup au sol. Il constitue un système d'alerte précis et sûr.

L'éclair entre nuages est appelé "intranuage", celui entre un nuage et le sol est dit "coup au sol". Sous nos latitudes, entre 30 et 60°, il y a entre deux et trois fois plus d'éclairs intranuages qu'au sol. Des mesures radio indiquent que le nombre de prédécharges dans les nuages seraient bien plus nombreuses que les coups au sol, mais leurs amplitudes restent modestes. Les coups au sol ont évidemment des effets plus sévères sur les matériels que les décharges intranuage.

Des relations empiriques estiment le nombre moyen de chocs annuels au sol par kilomètre carré. Malgré quelques variations selon les méthodes de comptage, les estimations sur le territoire métropolitain avoisinent 1,6 millions de chocs annuels, soit en moyenne trois chocs par kilomètre carré. Des dispersions considérables sont observables à l'échelle locale. Elles sont provoquées par des instabilités atmosphériques dues au relief, à de grands rideaux d'arbres en plaine, au gradient de température du sol, à de grandes agglomérations ou des industries lourdes, etc.

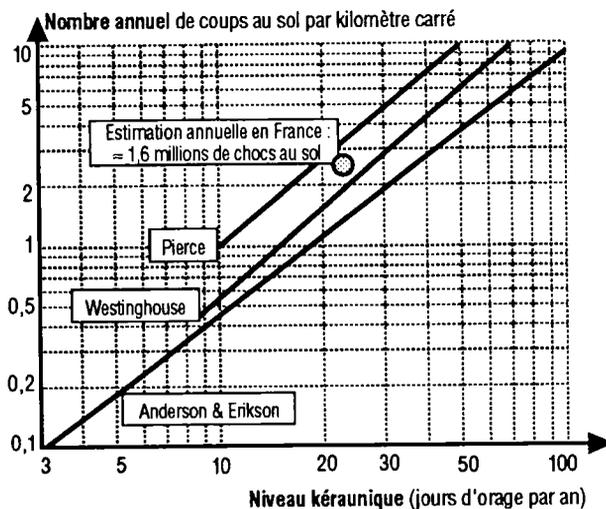


Figure 2-1 : Relations niveau kéraunique - densité de chocs

Le cumulo-nimbus

Le nuage de la foudre est le cumulo-nimbus. Il est facile à reconnaître quand il est isolé : de loin il a une forme d'enclume ; de dessous il est tout noir ! Il est provoqué par l'ascension d'un air humide et instable. Si le déclenchement des ascendances est provoqué par le relief ou toute autre cause locale, l'orage est dit "de convection". S'il est provoqué par la rencontre d'un front chaud et d'un front froid, l'orage alors très étendu est dit "de front". Au cœur du nuage, de furieuses ascendances, plusieurs dizaines de mètres par seconde, propulsent des particules en suspension appelées "hydrométéores" de tailles variables (eau, glace, etc.) jusqu'à une altitude de 10 à 15 kilomètres.

Le cumulo-nimbus se comporte comme une énorme machine électrostatique dont la partie basse, jusqu'à une altitude de 5 km environ, se charge des particules lourdes négatives et la partie haute des particules positives plus légères. La charge électrique totale dissociée est de l'ordre d'une centaine de coulombs.

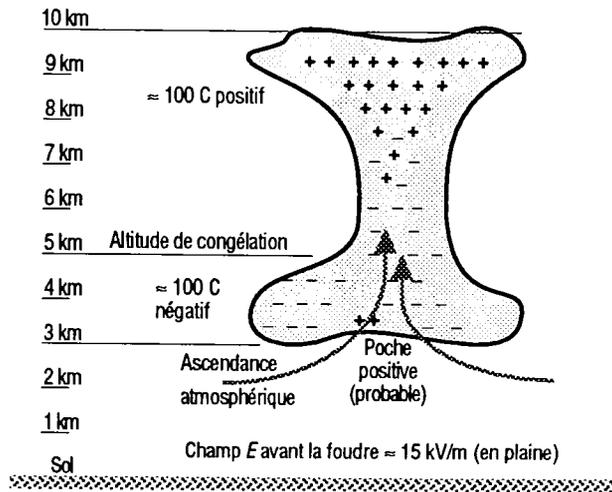


Figure 2-2 : Le nuage de la foudre, le cumulo-nimbus



Sur terre, le champ électrique par beau temps entre le sol et l'ionosphère (couche conductrice à une altitude de 50 à 60 km) est de l'ordre de 200 V/m, la terre étant négative. Le courant continu total terrestre qui fuit à travers cet énorme condensateur est d'environ 2 kA. La foudre, par ses 300 éclairs par seconde, est le phénomène qui permet aux charges négatives qui s'élèvent lentement par beau temps de revenir sur terre.

Le champ électrostatique en plaine, juste avant une décharge, est compris entre 10 et 20 kV/m. Il est très supérieur en montagne à cause du renforcement du champ électrique par effet de pointe. Ce champ n'a aucun effet sur les systèmes. Il est même délicat à mesurer par des moyens électromécaniques appelés moulins à champ. Les effluves au bout de pointes conductrices nommées *Feux de Saint-Elme* sont la conséquence visible d'un champ électrique intense. La hauteur d'un éclair étant d'environ 5 km, la d.d.p. entre le nuage et le sol est de l'ordre de 100 MV. Face à de telles valeurs, les d.d.p. que l'on peut insérer en série resteront négligeables. La foudre est un générateur de courant parfait.

La décharge

Lorsque la charge dissociée atteint une valeur suffisante, des charges contraires se recombinent brutalement, c'est l'éclair. La plupart des décharges dans nos régions sont négatives, c'est-à-dire que la partie du nuage qui se décharge est négative par rapport au sol. Les décharges positives sont rares : environ 10% des éclairs sont positifs ou contiennent une impulsion positive. Ils ont un courant crête supérieur, écoulent plus de charges et sont bien plus énergétiques que les décharges négatives.

La décharge habituelle se propage dans le sens nuage-sol. Elle débute par un précurseur descendant peu lumineux car transportant un faible courant électrique. Il progresse du nuage par bonds de quelques dizaines de mètres (sauf si l'air est très sec, ce qui est rare) en créant un canal ionisé faiblement lumineux. Quand ce précurseur s'approche à quelques dizaines de mètres du sol, le champ électrique local augmente et crée des effluves ionisées. Un premier *arc en retour* ascendant jaillit, établit le contact avec le précurseur descendant, écoule brutalement au sol les charges électriques du canal ionisé... et ça fait boum !

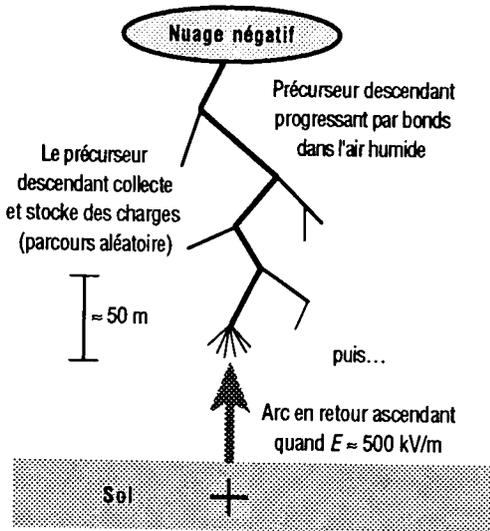


Figure 2-3 : Le précurseur descendant suivi de l'ascendant

La foudre en valeurs numériques

Pour un choc négatif, après une première décharge qui dure en moyenne $50 \mu\text{s}$ à mi-hauteur, le courant chute selon les cas soit à 0, soit une centaine d'ampères. Ce courant "persistant" transfère plus de charges que le courant des impulsions bruyantes et lumineuses. Quelques dizaines de millisecondes plus tard une nouvelle impulsion apparaît. Elle est appelée arc en retour subséquent. Les courants des arcs en retour subséquents sont généralement d'amplitudes inférieures à celle du premier arc en retour. Cette succession d'une dizaine d'arcs en retour et d'extinctions (complètes ou à une centaine d'ampères selon les cas) dure au total de quelques dixièmes de seconde à une seconde environ. Elle confère à l'éclair négatif un aspect papillotant facile à identifier.

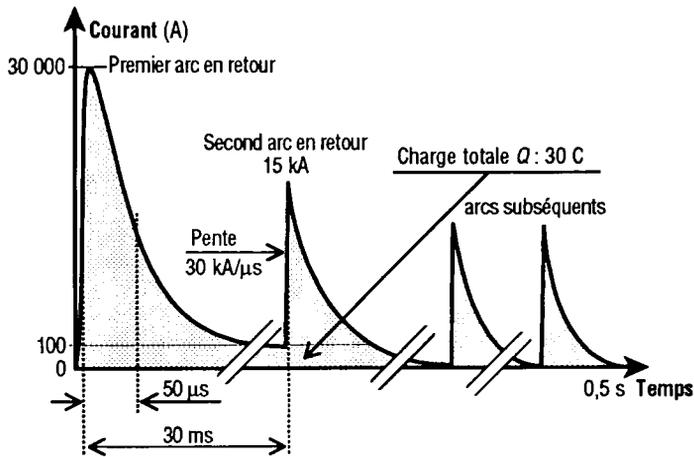


Figure 2-4 : Courant nuage-sol négatif : valeurs typiques

Dans nos régions tempérées, une décharge médiane, c'est-à-dire dépassée une fois sur deux, est de type nuage/sol négatif, haute de 4 km, elle dure 0,3 s, contient 5 impulsions, transfère au total 25 C, a un courant de crête de 25 kA et un di/dt de 40 kA/μs pour la plus rapide des impulsions subséquentes. Les arcs positifs ne sont pas suivis d'arcs subséquents.

Des chocs "anormaux" sont possibles. Ils peuvent se propager du sol vers le nuage. Ce cas n'est pas rare en montagne ou à partir d'un point haut. Pour certains chocs, l'amplitude crête n'est pas celle du premier arc en retour. Ceci s'explique par une autre poche de charges dans le nuage qui s'écoule par le même canal ionisé. Pour la même raison, il arrive qu'une impulsion positive, souvent avec une forte charge écoulée, se glisse au milieu des impulsions négatives. Enfin un choc de foudre peut apparaître (souvent en polarité positive) par ciel bleu à cause des charges d'espace laissées par un orage lointain ou passé.

La distribution de toutes les grandeurs de la foudre (amplitude crête, di/dt, charge transférée, etc.) suit sensiblement une loi log-normale, c'est-à-dire que le logarithme des grandeurs a une répartition gaussienne. Nous conseillons de choisir pour le courant crête l'estimation de la CIGRE (CONFÉRENCE INTERNATIONALE DES GRANDS RÉSEAUX ELECTRIQUES). Cette répartition, qui n'est pas la plus sévère, est bien centrée parmi les données proposées par les sources les plus sérieuses.

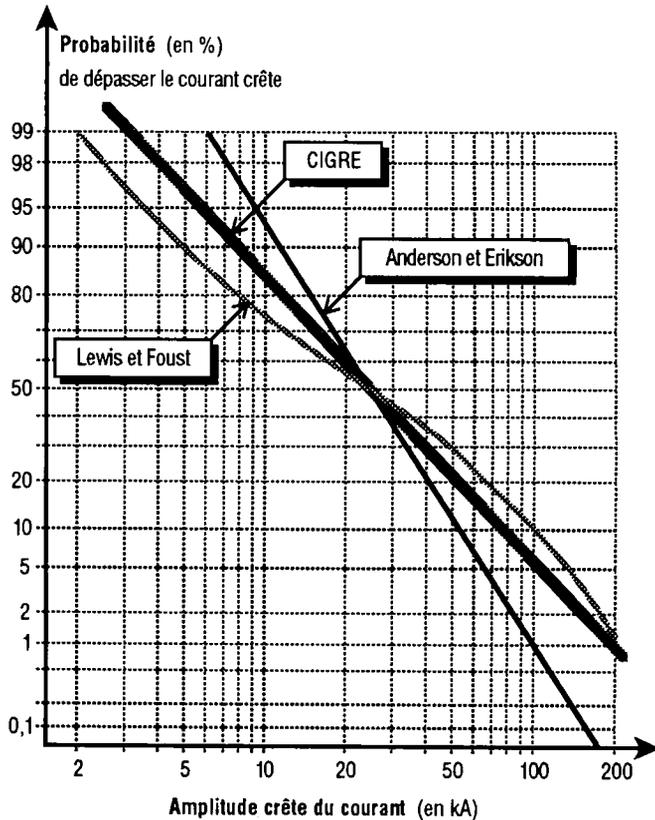


Figure 2-5 : La loi de répartition du courant de crête

La donnée essentielle pour évaluer la sévérité d'un *choc indirect*, c'est-à-dire qui ne perturbe les équipements que par son seul champ magnétique et non par son courant, est la vitesse de montée du courant. Cette pente s'exprime en $\text{kA}/\mu\text{s}$. Contrairement au courant crête qui est souvent celui du premier arc en retour, la pente maximale est presque toujours celle d'un arc subséquent. Il est fréquent de mesurer des temps de montée (de 10 à 90%) d'arcs subséquents de l'ordre de $0,1 \mu\text{s}$. Une équipe française enregistra en 1987 sur le site de la Nasa un choc subséquent de 60 kA dont la pente dépassa $400 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Des mesures précises récentes donnent des di/dt supérieurs à ce que l'on croyait jusqu'aux années 1980.

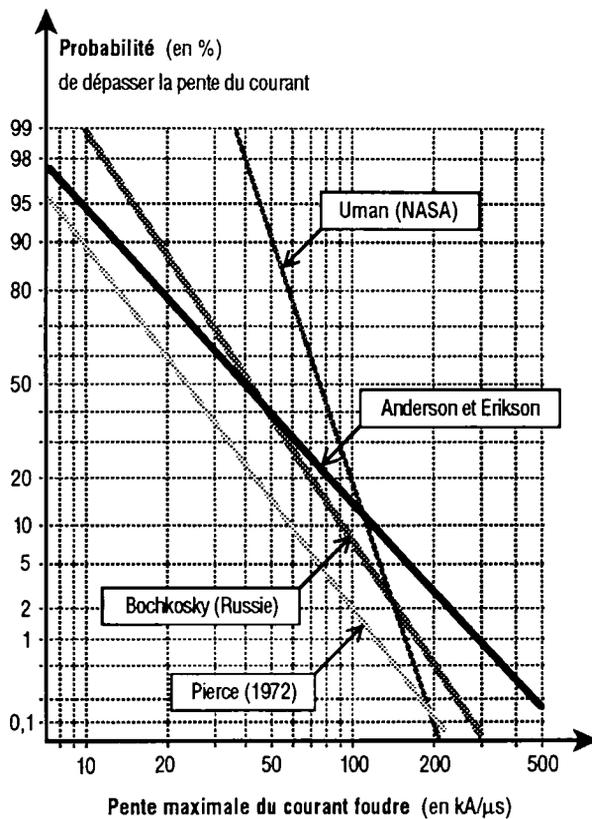


Figure 2-6 : La loi de répartition de la pente du courant

Lorsque l'on protège un site, il importe de définir avec quelle probabilité la protection remplira son office. Il serait ridicule de chercher à se protéger avec une confiance inférieure à 50 %. Nous avons regroupé dans le tableau ci-dessous les valeurs des paramètres clés d'un choc de foudre selon la probabilité que ces valeurs soient dépassées. De légères variations pourront être constatées selon les sources et leur âge mais ces ordres de grandeur sont réalistes.

Probabilité du dépassement	50%	10%	3%	1%
Courant crête (kA)	25	80	140	200
Pente maximale (kA/ μ s)	40	120	200	300
Charge totale choc négatif (C)	7,5	28	55	80
Charge totale choc positif (C)	80	250	450	650
Intégrale i^2t négatif ($10^5 A^2s$)	0,6	4	9	16
Intégrale i^2t positif ($10^5 A^2s$)	6	80	300	700

Dans nos régions, nous pouvons tabler à priori sur une moyenne de 10 % de chocs positifs : 20 % en hiver et guère plus de 5 % en été. La proportion de chocs positifs est supérieure en montagne à cause du “cisaillement des nuages”, c’est-à-dire le décalage de la partie haute du nuage par rapport à sa partie basse causé par le vent ou par le relief. En Aquitaine, région de plaine souvent foudroyée, il y aurait une proportion de chocs positifs inférieure à la moyenne.

Les aéronefs, les missiles et les fusées sont très exposés au foudroiement. Le risque est d’autant plus important que les gaz ionisés propulsés vers l’arrière (appelés “plume”) allongent la longueur conductrice. Un avion moyen courrier est foudroyé en moyenne une fois par an. Un foudroiement d’aéronef est un choc déclenché d’amplitude moyenne plus faible qu’un choc au sol. Le courant crête est environ deux fois moindre car le canal ionisé avant le premier arc en retour stocke moins de charges que pour une décharge naturelle. Il en est de même des points hauts qui reçoivent (assez fréquemment) des chocs dont l’amplitude moyenne est un peu plus faible qu’au sol.

La question du i^2t

Pour calculer l’échauffement des conducteurs foudroyés, le “ $I^2.t$ ” est la donnée essentielle. En effet, un choc de foudre est si bref que les conducteurs subissent un échauffement adiabatique. En retenant la menace d’un $I^2.t$ de $10^6 A^2.s$, on se protège avec une confiance de 97 % contre les chocs négatifs mais à peine plus d’une fois sur deux contre un choc positif. Pour se protéger avec une confiance de 99% contre les chocs positifs (soit 99,9% contre tous), il faut prendre $7.10^7 A^2.s$. En fait, seul un gros choc positif pourrait endommager un conducteur de descente de paratonnerre ou un fil de garde de ligne THT.



Application : Échauffement d'un conducteur foudroyé

Un gros choc de foudre de $10^7 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ de $i^2 \cdot t$ s'écoule par un conducteur de cuivre plat de 35 mm^2 de section. Sachant que l'échauffement adiabatique du cuivre est de $0,008^\circ\text{C}/(\text{A}/\text{mm}^2)^2 \cdot \text{s}$ (formule pratique un peu pessimiste en faible échauffement), calculer l'élévation de température du conducteur.

Solution :

$I = i^2 \cdot t$ sur une surface S correspond à une intégrale $K = I / S^2$

L'élévation de température du cuivre en degrés Celsius vaut alors $0,008 \text{ K}$.

$$K = 10^7 / 35^2 = 25\,000 \text{ A}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-4}$$

L'échauffement est de $0,008 \times 8200 = 65^\circ\text{C}$.

Un telle augmentation de température est faible. Il y a moins de 0,5% des chocs qui échaufferont un conducteur de 35 mm^2 de cuivre de plus de 200°C . Hormis au point d'impact, la foudre ne peut faire fondre que des fils fins. La foudre coûte en France annuellement plus de 100 millions de francs en réparation de lignes téléphoniques. Les fils téléphoniques étant de faible section (jamais plus de $0,5 \text{ mm}^2$), nous ne savons pas proposer de solution efficace pour réduire notablement ce coût. Pour les lignes THT aériennes, le "courant de suite" entretenu par le réseau après le contournement d'une chaîne d'isolateurs est bien plus énergétique que celui de la foudre. Le seul effet gênant de la foudre pour une ligne électrique est d'amorcer un arc entre une phase et une structure à la terre.

Énergie et puissance moyenne de la foudre

Nous disposons des données nécessaires pour nous amuser à évaluer l'énergie et la puissance instantanée d'un choc de foudre et la puissance moyenne de l'ensemble des chocs sur le territoire national.



Application : Énergie d'un choc de foudre

Calculons l'énergie totale dissipée par un éclair si l'altitude de l'arc est $h = 5 \text{ km}$, le champ électrique statique moyen avant la décharge est $E = 10 \text{ kV/m}$ et si la charge totale écoulée par l'arc vaut $Q = 50 \text{ coulombs}$.

Solution :

Un cumulo-nimbus se comporte comme un condensateur chargé par rapport à la terre. La d.d.p. entre le nuage et le sol est égale au produit du champ électrique E par la hauteur h de l'arc : $U = E.h$

$$U = 10\,000 \times 5\,000 = 50 \text{ MV}$$

Le condensateur qui se décharge a une capacité équivalente :

$$C = Q/U$$

$$C = 50 / 50\,000\,000 = 1 \mu\text{F}$$

L'énergie stockée dans un condensateur vaut : $W = 0,5.C.U^2$

$$W = 1,25.10^9 \text{ joules}$$

Retenons pour simplifier $W \approx 1$ milliard de joules. Cette énergie est principalement rayonnée sous forme de champs électromagnétiques sur une large gamme de fréquences. Elle peut sembler a priori considérable. En fait, par rapport à notre consommation moyenne d'énergie, elle est faible.



Application : Puissance moyenne de tous les chocs de foudre en France

Sachant que le sol français se fait foudroyer environ 1,5 millions de fois par an, la puissance moyenne dissipée par la foudre pourrait-elle devenir une source d'énergie de substitution ?

Solution :

Il y a dans une année $\pi.10^7$ secondes (valeur approchée facile à retenir). La foudre tombe donc au sol en moyenne une fois toutes les 20 secondes.

La puissance moyenne dissipée par la foudre sur la France vaut

$$P = W/T$$

En prenant $W = 1$ milliard de joules et $T = 20$ secondes :

$$P = 1 \times 10^9 / 20 = 50 \text{ MW}$$



Même si l'on savait récupérer la totalité de cette puissance avec un rendement de 100% (entre nous, ce n'est pas après-demain l'avant-veille), on obtiendrait moins du dixième de la puissance d'une tranche de centrale électrique. La foudre n'est pas une énergie d'avenir. Dans la foudre, il n'y a une énorme puissance instantanée, de l'ordre du million de MW, mais sa puissance moyenne est ridiculement faible par rapport à notre consommation électrique.

Une autre façon de raisonner est d'évaluer le prix de l'énergie d'un choc de foudre. $W \approx 1\,000\text{ MJ}$, soit environ 300 kWh. Même en surévaluant le kilowatt-heure à 1 F, l'énergie totale d'un choc de foudre ne vaudrait que 300 francs. D'autre part 1,5 millions de chocs à partager entre 60 millions d'âmes permettrait à chacun de ne "bénéficier" que de deux coups dans sa vie.

Annuellement, la foudre électrocute encore une cinquantaine de français. Ils étaient une centaine au début du siècle. Le problème de la foudre est qu'elle coûte globalement à la France plusieurs milliards de francs par an. Il est raisonnable de s'en protéger. Nous verrons que non seulement c'est possible mais nous prétendons même que c'est facile et relativement peu coûteux. Une condition nécessaire pour se protéger efficacement est de bien comprendre les effets d'un choc de foudre. Ces effets sont bien sûr conduits par l'ensemble des conducteurs longs mais aussi rayonnés.

La foudre en boule

La foudre en boule est un phénomène naturel rare mais dont il est difficile de nier la réalité : plus de 0,1 % de la population en aurait été directement témoin et des milliers de témoignages écrits sont accessibles. Au 4^{ème} siècle avant J-C, Aristote décrivit une foudre à lente vitesse de déplacement. En 1838, Arago fut le premier scientifique à décrire de façon rationnelle les caractéristiques de la foudre en boule. Les photographies du phénomène sont rares mais les témoignages et l'analyse des traces laissées par son passage permettent de se faire une idée de ce phénomène étrange et paradoxal. Compte tenu de la dispersion des témoignages, certains spécialistes distinguent plusieurs types de foudre en boule.

Tout d'abord, il convient de citer les phénomènes qui ne sont pas apparentés à la foudre en boule. La tombée d'un météorite est un phénomène lumineux mais rapide et rectiligne. Après un choc de foudre poche, divers phénomènes lumineux persistants ont pu être assimilés à la foudre

en boule. L'auteur voyageait en avion au dessus d'un désert américain lorsque la foudre frappa le sol. La tache du point d'impact passa lentement, en plusieurs secondes, du blanc brillant au rouge sombre avant de s'éteindre. Ce n'était que des roches en fusion.

Les témoignages sur la foudre en boule concordent souvent : une sphère lumineuse, vaporeuse, de la taille d'un pamplemousse à un ballon de basket, de couleur variant selon les témoignages, se déplace lentement au gré des courants d'air. La durée de l'apparition dure plusieurs secondes, parfois quelques dizaines, ce qui invalide à priori l'hypothèse d'une boule de gaz en combustion. Elle entre et sort habituellement des locaux par une ouverture, souvent fenêtre ou cheminée. De petits crépitements sont souvent entendus. L'odeur soufrée des témoignages anciens doit sans doute être comprise comme une odeur d'ozone.

Elle apparaît parfois dans une pièce fermée, sans le moindre dommage pour les murs. Les conducteurs proches, même de petite taille (bagues, bijoux, décors métalliques...) chauffent, des fils électriques fins et des tuyaux sont endommagés, des fusibles fondent. Les conducteurs reliés à la terre sont particulièrement exposés. Du bois humide touché par la boule peut exploser en petits morceaux, comme des allumettes. Les personnes et les animaux touchés sont profondément brûlés.

95 % des boules apparaissent d'avril à septembre. Il est certain qu'un climat orageux est nécessaire à son apparition mais 50% des observations ne sont ni précédées ni suivies d'un choc de foudre. Malheureusement, malgré des efforts, jamais une foudre en boule ne fut produite par un éclair déclenché.

Environ une fois sur deux, la boule s'échappe de la vue sans laisser de traces. Dans le cas contraire elle finit en une bruyante explosion. Une illusion d'optique n'explose pas ! L'explosion ne laisse aucune trace de radioactivité et généralement aucun dommage pour les témoins qui conservent tout de même un sentiment d'effroi. Des témoignages la décrivent aussi en déplacement lent le long d'un fil de ligne THT. Si la boule explose, le fil siffle comme s'il fouettait l'air.

Ce phénomène pourrait être un plasma non linéaire, avec un seuil de formation en énergie et en charge électrique. Mais un plasma ne peut pas se confiner tout seul. Une émission continue de charges électriques expliquerait les décollements de papiers peints, les décrochements de tableaux, les claquements de portes, la répulsion des isolants et les feux de Saint-Elme dans les prises secteur.



Un second paradoxe est que des boules sont apparues en environnements métalliques donc faradisés, ce qui semble violer la loi de conservation des charges statiques. La quantité de charges dans la boule est estimée à plusieurs coulombs. Elle ne pourrait être stockée sans décharge disruptive que dans une sphère d'un diamètre de plusieurs centaines de mètres (1 coulomb amorce dans l'air à 70 mètres).

L'énergie moyenne d'une foudre en boule est évaluée aux alentours de 1000 J, sans limite maximale (elle pourrait dépasser 10^8 J). Les modèles physiques avec source d'énergie interne sont réfutés par les formations spontanées. Ceux avec source externe expliquent mal les dommages subis par les matériaux isolants et les générations en cages de Faraday. Des essais de production de plasmas en labo par des faisceaux hyperfréquences sont séduisants mais rien ne permet de penser à ce jour que la foudre en boule naturelle puisse avoir une telle origine.

La foudre en boule reste une troublante énigme scientifique. L'auteur est intéressé par tous les témoignages, vous pouvez lui écrire.

La montée de potentiel du sol

La menace électromagnétique d'un choc de foudre classique est de deux ordres. D'une part une agression en conduction : le point d'impact monte fortement en potentiel par rapport à un point éloigné. D'autre part une seconde menace, trop souvent négligée, guette : celle du champ magnétique rayonné. Voyons tout d'abord l'aspect conduit, c'est-à-dire le problème du courant d'un "coup au but".

Montée en potentiel d'un bâtiment

Le premier problème posé par la foudre est celui de l'élévation de potentiel au voisinage du point d'impact. Supposons qu'un bâtiment se fasse foudroyer. Critiquons par un exemple l'intérêt d'une "bonne terre", c'est-à-dire avec une faible résistance par rapport aux terres lointaines.



Application : Montée en potentiel d'un bâtiment

Un bâtiment dispose d'une excellente terre : $R = 2 \Omega$ non inductive. On souhaite protéger ce bâtiment contre la foudre avec un risque ne dépassant pas 3 %. Est-on obligé d'installer des écrêteurs sur les lignes énergie et télécommunication ?

Solution :

La CIGRE (figure 2.5) indique que pour 3% des chocs : $I > 140 \text{ kA}$.

La bonne vieille loi de Georg Simon Ohm s'écrit : $U = R \cdot I$

$U = 2 \times 140\,000 = 280 \text{ kV} \dots$

Les lignes d'énergie et de télécommunication sans écrêteur seraient soumises à cette d.d.p. en mode commun. Hormis les fibres optiques, aucun isolement galvanique ne peut résister à une telle tension, pas même un transformateur isolé à l'huile. L'installation d'un écrêteur entre chaque conducteur externe et la masse est donc impérative. De plus, la vérité serait supérieure à cette valeur car tout conducteur est inductif. Répétons-le : les limiteurs de surtensions sont nécessaires mais une "bonne terre" au sens commun du terme, c'est-à-dire de faible résistance, est indifférente. Elle est toujours insuffisante à elle seule.

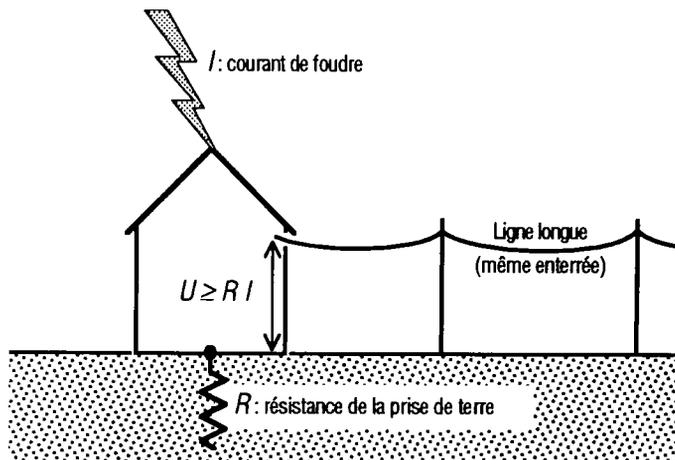


Figure 2-7 : Montée en potentiel d'un site foudroyé

Risques d'électrocution

La terre, malgré les conventions intellectuelles, n'est pas équipotentielle. La d.d.p. entre le voisinage d'un impact de foudre et un point éloigné est considérable. Une hémisphère conductrice de rayon r dans un sol de résistivité ρ a une résistance $R = \rho / 2\pi.r$ par rapport à l'infini. Si l'on néglige l'effet pelliculaire, les lignes de courant d'un choc de foudre se diluent dans un sol de résistivité homogène selon les rayons d'une hémisphère. Avec ces hypothèses quelque peu optimistes, la montée en potentiel du sol par rapport à l'infini suit une loi hyperbolique.

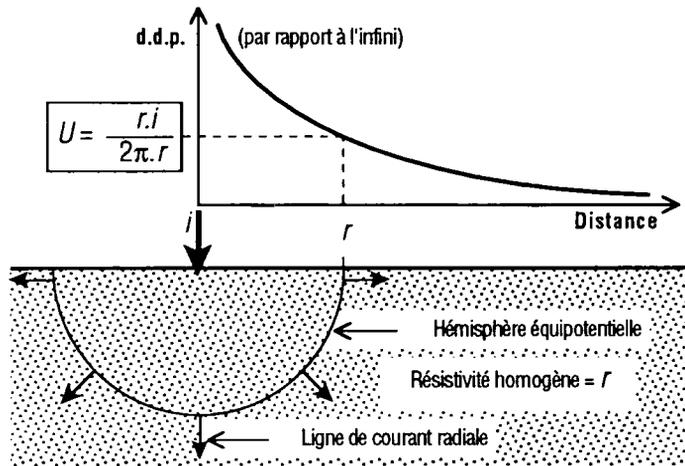


Figure 2-8 : Loi de décroissance du potentiel du sol

La différence de potentiel par rapport à l'infini d'un point au voisinage de l'impact d'un choc de foudre vaut (relation pratique légèrement "arrondie"):

$$U \approx 0,2 I \rho / r$$

avec :

U : d.d.p. entre le point mesuré et l'infini, en volts

I : courant de foudre, en ampères

ρ : résistivité moyenne du sol, en ohms-mètres

r : distance entre l'impact et le point mesuré, en mètres



Application : Risque d'électrocution

Quelle est la différence de potentiel entre les pattes d'un mouton qui broute à 100 m du point d'impact d'un choc de foudre de 25 kA si la résistivité du sol est d'environ 1000 $\Omega.m$?

Solution :

Ce n'est pas le potentiel "absolu" de la bête qui compte mais, heureusement, la d.d.p. entre les pattes avant et arrière... Il manque donc une donnée : la distance entre les pattes de l'animal. Supposons qu'elle soit d'environ 1 m.

Les pattes distantes de 100 mètres "montent" à un potentiel de :

$$U_{100} = 0,2 \times 25\,000 \times 1\,000 / 100 = 50\,000 \text{ volts}$$

Les pattes distantes de 101 mètres montent à un potentiel de :

$$U_{101} = 0,2 \times 25\,000 \times 1\,000 / 101 = 49\,500 \text{ volts}$$

Le mouton va ainsi subir une d.d.p. : $U = U_{100} - U_{101}$ entre les pattes avant et arrière, soit 500 volts seulement (si l'on peut dire). Si la bête s'en remet, on comprend que les coups de tonnerres suivants la rende nerveuse.

Le foudroiement direct d'un humain est rarissime : même un paratonnerre ne reçoit qu'exceptionnellement la foudre alors qu'il est à priori conçu et installé pour cela. Les électrocutions par gradient de potentiel ont toujours été à peu près les seules causes d'électrocution. Depuis que les campagnards sont rares, ce sont les sportifs et les montagnards qui sont le plus exposés aux foudroiements. La foudre reste un moyen très incertain pour se suicider. Donnons quelques conseils pour la protection des personnes contre les risques de foudroiement.

Un piéton qui souhaite se protéger contre la foudre devrait garder les pieds serrés. Evitons de nous abriter en dessous du seul grand arbre de toute la plaine. Un "arc latéral" pourrait jaillir du tronc ou d'une branche basse.

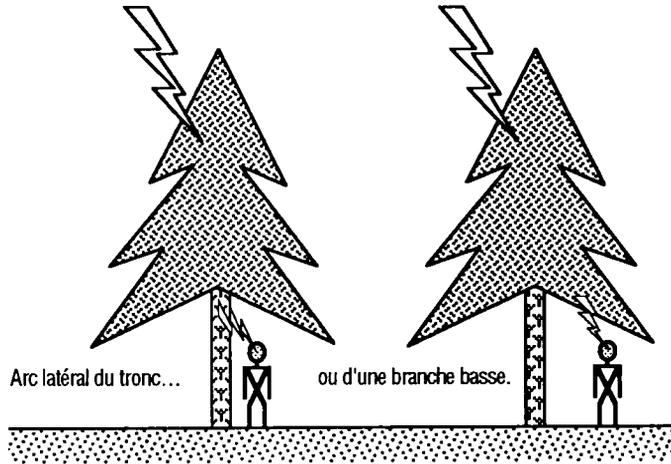


Figure 2-9 : Risque de foudroiement par arc latéral

Les nageurs, même en piscine, ne sont pas à l'abri. Sauf en baignoire où il n'y a aucun risque, évitons les baignades sous l'orage. Le courant qui traverserait le corps pourrait déclencher une fibrillation cardiaque. Pour la même raison, le conseil de s'allonger à même le sol en cas d'orage "pour ne pas faire paratonnerre" est ridicule : c'est au contraire le moyen de jouer au bovin foudroyé ! Si l'on est surpris sous un orage, le mieux est de s'asseoir sur son sac à dos, les pieds serrés, et d'attendre que ça passe. Si l'on se trouve dans une automobile ou un avion foudroyé, hormis une belle frousse, un choc nerveux et acoustique, on ne risque rien. Tout véhicule métallique fait office de cage de Faraday. Tout au plus la tôle risque-t-elle d'être localement perforée. En montagne, le sol est toujours résistif et les orages fréquents. Évitions les contacts simultanés aux parois d'une anfractuosités ou d'une fissure : de fortes d.d.p. sont à craindre.

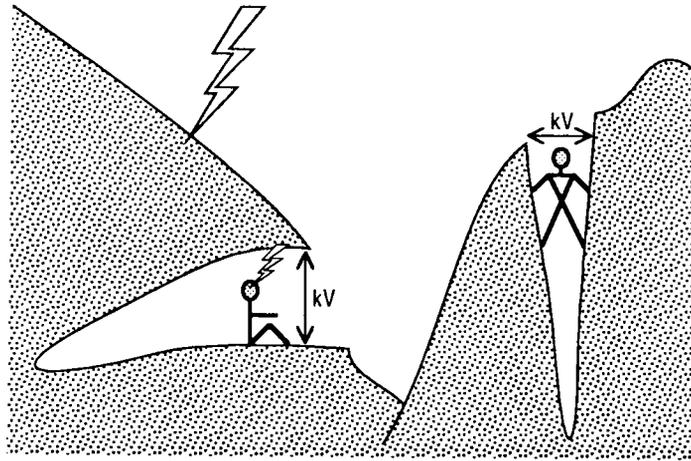


Figure 2-10 : Risques des anfractuosités

Evitons de téléphoner lorsque l'orage gronde, ou alors utilisons un poste sans cordon. Si les prises secteur ne sont pas munies de parafoudres, il est sage de débrancher les appareils sensibles, le coaxial de la télévision entre autres. Les prises secteur font office de parafoudre : elles amorcent typiquement entre 5 et 15 kV. Il serait illusoire de chercher à s'isoler en ouvrant son disjoncteur : sa rigidité diélectrique est très insuffisante. En cas de foudroiement, un arc jaillirait entre amont et aval. Une protection foudre doit garantir l'équipotentialité, c'est-à-dire laisser passer le courant dans de faibles impédances, et non un isolement. Rappelons que la foudre est un générateur de courant parfait. Ce serait un contresens de lutter contre un courant direct par de grandes impédances.

Les d.d.p. entre masses

La montée en mode commun par rapport à l'infini n'est pas la seule menace que la foudre fait peser sur les systèmes : deux autres effets peuvent se produire : des amorçages internes entre masses peu ou mal maillées, et des d.d.p. induites par rayonnement dans les boucles de masse. Voyons d'abord le premier problème.



Application : risque d'amorçage à travers un mur

Un paratonnerre est raccordé à la terre par un conducteur de descente fixé au mur et isolé des masses. Quelle est la d.d.p. entre ce câble de descente et les masses voisines situées à 10 mètres de la barrette de terre où le câble de descente et les masses sont réunis en étoile ?

Solution :

Il nous faut choisir un $\Delta i / \Delta t$. Nous prendrons simplement la pente qui est dépassée une fois sur deux, soit 40 kA/ μ s.

Tout câble, même plat, présente une inductance linéique d'environ 1 μ H/m. Le câble de descente de 10 m a une inductance $L \approx 10 \mu$ H.

La d.d.p. entre conducteur de descente et masse vaut : $U = L \Delta i / \Delta t$.

$$U = 10 \times 10^{-6} \times 40\,000 / 10^{-6} = 400 \text{ kV}$$

Est-il utile de préciser qu'un amorçage à travers le mur est probable ?

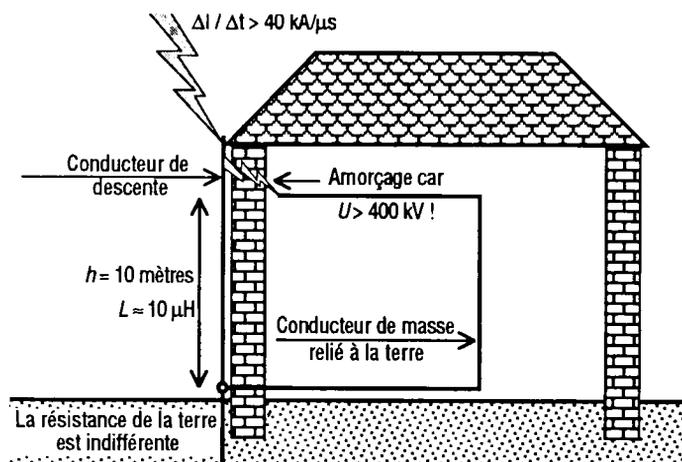


Figure 2-11 : ddp entre conducteur de descente et masse



Nous venons de prouver qu'il est impossible d'écouler au sol un courant de foudre direct par un conducteur unique plaqué contre une paroi, sauf si aucune masse n'est proche, une cheminée d'usine par exemple. La bonne solution est de diviser le courant sur plusieurs conducteurs de descente et de les relier en traversée de mur aux masses internes. Il y a deux risques à un arc à travers un mur. Tout d'abord l'arc peut sévèrement fracturer la paroi et/ou enflammer un isolant. Ensuite, le courant de l'arc a un temps de montée plus court que celui de la foudre, donc son effet perturbateur est encore supérieur.

Il est souhaitable de diviser le courant de foudre par de nombreux conducteurs. Ces dilutions successives n'affectent pas le temps de montée des courants dans les masses mais elles en réduisent rapidement l'amplitude. Après cinq divisions du courant par deux, il ne reste que 3 % du courant initial. Un courant impulsif dans une masse avec un $\Delta i/\Delta t$ inférieur à 1 kA/ μ s est peu perturbateur pour les électroniques. Une décharge électrostatique a une pente de l'ordre de 10 kA/ μ s et pourtant elle est bien supportée par les équipements bien conçus.

Un conducteur de descente doit rester aussi rectiligne que possible. Il serait dangereux de contourner une moulure ou un acrotère : un amorçage direct à travers la paroi serait à craindre. Du rond de cuivre de diamètre 8 mm ou du plat de 30 x 2 mm suffisent. Les structures métalliques verticales (poutres, IPN...) mises à la terre conviennent parfaitement. Les règles de sécurité admettent de tirer les conducteurs de terre en colonne sèche, au cœur du bâtiment. Nous préférons, pour diviser le courant et pour réduire le champ H dans le bâtiment, plusieurs conducteurs de descente installés symétriquement contre la paroi extérieure du bâtiment. La fixation des câbles de descente se fait traditionnellement sur la base de trois fixations par mètre. Chaque câble de descente est à protéger des chocs mécaniques par un fourreau sur une hauteur de 2 m à partir du sol.

Les liaisons électriques entre conducteurs de descente et masses internes peuvent être effectuées par sertissage, soudure ou brasure. Éviter les rivets qui fragilisent les rubans. Un conducteur de descente devrait toujours être relié au plus court au réseau de terre. Pour éviter les amorçages secondaires, il devrait aussi être relié systématiquement à toutes les structures conductrices proches.

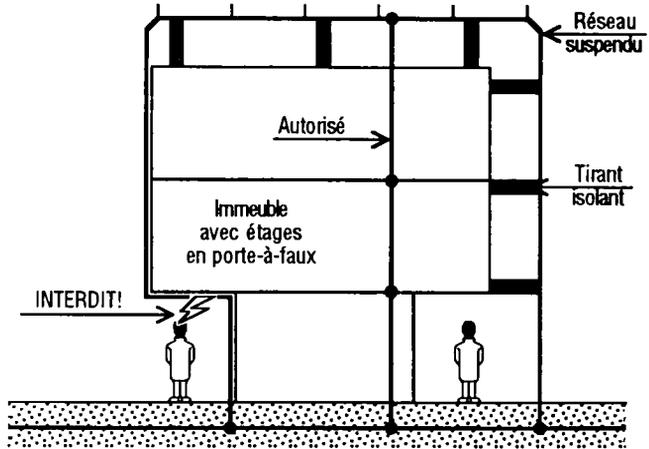


Figure 2-12 : Conducteurs de descente



Les protections en conduction

La protection foudre d'un bâtiment peut se décomposer en cinq parties :

- La structure de collecte, aussi appelée "dispositifs de capture".
- Les conducteurs de descente pour écouler le courant de foudre au sol.
- Le réseau de terre pour dissiper le courant de foudre dans la terre.
- La protection des conducteurs externes (câbles et les tuyaux métalliques).
- La réduction des surfaces des boucles de masse (contre le rayonnement).

Structure de collecte de la foudre

Dès que l'on parle de dispositif de capture de foudre, on pense au paratonnerre. Les paratonnerres n'empêchent pas le tonnerre, mais ils sont réputés protéger des effets de la foudre. Voyons ce que l'on peut en penser.

Choix du paratonnerre

Depuis Benjamin Franklin, les paratonnerres ont surtout évolué par leurs arguments commerciaux. De la pointe en platine iridiée à la piézo-électricité en passant par la radioactivité et autres principes plus ou moins écologiques, on constate que le paratonnerre suit la mode scientifique du moment. Le lecteur est invité à découvrir la couverture du livre "COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE" de MM. Degauque et Hamelin, chez Dunod.

Les arguments de la plupart des vendeurs de paratonnerres méritent le détour. L'argument classique est que l'objet miraculeux (20 kF, pose comprise) est si efficace qu'un seul en remplace plusieurs normaux... bref, il est économique ! Par chance les paratonnerres radioactifs ont été interdits de vente en Europe dès 1986. A leur sortie, leurs sources radioactives (sels de radium) étaient sensées "attirer la foudre" : l'ionisation "préparait le chemin" et "déclenchait l'arc en retour". Un beau jour, leur fonctionnement s'inversa du tout au tout. Les mêmes dispositifs se mirent à "repousser la foudre" parce que l'ionisation réduisait l'effet de pointe et même déchargeait les nuages à partir de la pointe ! Dans cette affaire, une observation est incontestable : sur nos toits, des pastilles radioactives resteront dangereuses durant quelques millénaires.

Il est inutile d'investir dans un paratonnerre "ionisant" (à sources radioactives, piézo-électriques ou autres...). En effet, avant que la foudre ne tombe, le champ statique au sol dépasse toujours 10 kV/m, même en



plaine. Ce champ suffit à ioniser par effet de pointe tout conducteur installé à plusieurs mètres de hauteur et mis au potentiel de la terre. Les feux de Saint-Elme bien connus des marins et des montagnards prouvent cette ionisation. Le type de pointe n'est pas critique : des tiges en rond de diamètre de 18 mm en cuivre étamé ou en acier inox conviennent. Les essais d'éclairs déclenchés mais non guidés jusqu'au sol prouvent que l'efficacité des paratonnerre est pour le moins douteux.

Des conducteurs de ceinture en partie haute et de descente déclencheront probablement l'arc en retour si leur maillage est suffisamment serré. Une alternative plus discrète que les vilains paratonnerres est la "planche de fakir" composée de nombreuses petites pointes de 20 à 50 cm de hauteur réparties à quelques mètres les unes des autres le long d'une grille conductrice en partie haute (de 10 mètres de côté par exemple). Un bâtiment "protégé" ne reçoit ni plus ni moins fréquemment la foudre qu'un autre, c'est-à-dire rarement.

Le modèle électrogéométrique

Le *modèle électrogéométrique* est une loi empirique qui prédit la zone exposée à la foudre. Ce modèle a le mérite de montrer que la foudre peut tomber à peu près partout, y compris pour un petit coup entre les pieds de la tour Eiffel. Il définit pour un choc négatif une "distance d'amorçage" indépendante de nature des roches du sous-sol, de la qualité de la prise de terre, de la hauteur du bâtiment, de la nature et de la hauteur des pointes installés et de tous les autres paramètres plus ou moins paranormaux, paradoxaux ou paradisiaques des paratonnerres !

La distance d'amorçage correspond à la longueur présumée de l'arc en retour. Elle ne dépend que de la charge électrique stockée dans le canal ionisé, donc du courant crête du premier choc. Cette distance, pour un courant crête I , vaut sensiblement 9,4 fois I exprimé en kA élevé à la puissance deux tiers. Cette distance a été obtenue par l'analyse statistique de nombreux chocs mais elle reste affectée d'une incertitude. Des relations un peu différentes ont aussi été proposées.

Ce rayon d'amorçage définit une sphère virtuelle que l'on roule contre les obstacles. La zone protégée est celle sous la sphère, tout point pouvant venir au contact de la sphère étant exposé à un foudroiement direct.

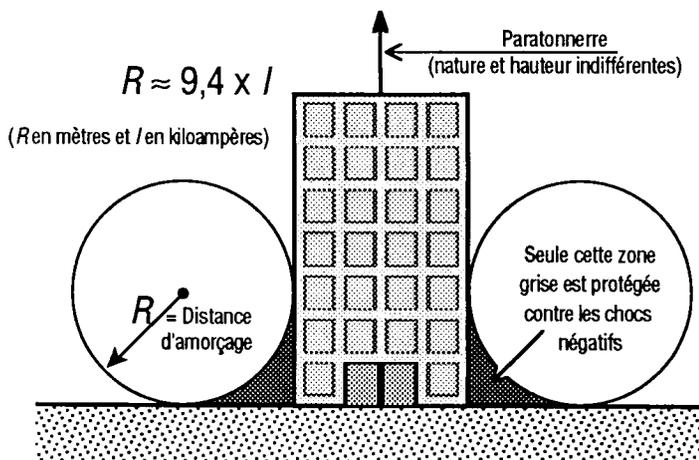


Figure 2-13 : Le modèle électrogéométrique

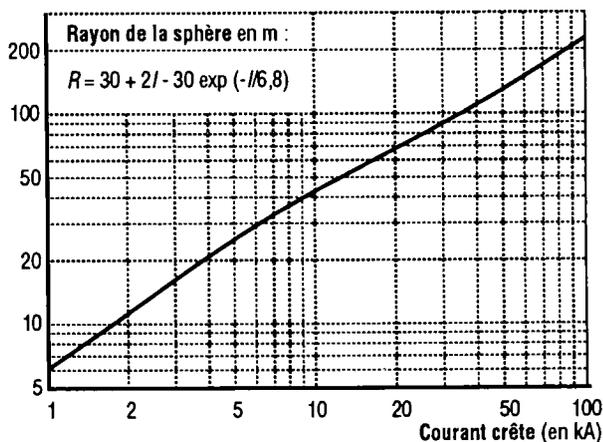


Figure 2-14 : Distance d'amorçage selon le modèle électrogéométrique

Grâce au modèle électrogéométrique on peut s'amuser pendant des heures sur des maquettes en coinçant une bulle d'autant plus grosse que le courant de foudre choisi par hypothèse est plus élevé. Ce modèle a au moins le mérite de réfuter l'idée reçue selon laquelle un paratonnerre protégerait le volume sous un cône de demi-angle au sommet de 60° (parfois plus modestement de 45°). Il indique en outre qu'il est inutile de surélever un paratonnerre.

Le modèle électro géométrique est à ce jour le seul modèle sérieux reconnu par la communauté scientifique. Que peut-on lui reprocher sur le plan scientifique ? Tout d'abord il n'est valide que pour les chocs négatifs. Ensuite, lorsqu'un premier choc en retour jaillit, les réamorçages subséquents empruntent le même canal. Or nous savons qu'un premier arc en retour de faible amplitude, donc à faible distance d'amorçage, peut être suivi par un arc subséquent d'intensité supérieure. Même si statistiquement ce modèle était majorant, une distance de protection pour un courant donné ne pourrait pas être totalement garantie.

En pratique que constate-t-on ? Le précurseur (leader) descendant n'est ni attiré ni repoussé par les paratonnerres. Il suit le parcours aléatoire des charges d'espace. Les chocs positifs quant à eux ont la fâcheuse tendance à tomber n'importe où, y compris dans les zones protégées par le modèle électro géométrique.

Conducteurs de descente

Si la nature des paratonnerres est indifférente, l'écoulement du courant jusqu'à la terre est essentiel, critique même devrions-nous dire. Les conducteurs de descente des paratonnerres devraient être raccordés directement, au plus court et par soudure à une ceinture de terre. Le courant foudre, une fois l'arc en retour déclenché, cherche et trouve un chemin direct vers la terre. Un conducteur de descente supporte en cas de foudroiement de forts di/dt .

Division et symétrie du courant foudre

Pour un bâtiment sensible, il est nécessaire d'utiliser plusieurs conducteurs de descente à la terre. Multiplier ces conducteurs présente trois intérêts :

- ❶ Améliorer "l'équipotentialité verticale" du bâtiment par la mise en parallèle d'inductances. Ceci réduit les risques d'amorçage à la masse. Nous considérons que quatre conducteurs de descente constituent un minimum raisonnable.
- ❷ Améliorer "l'équipotentialité horizontale" du bâtiment par l'écoulement symétrique du courant de foudre à la terre. Des descentes périphériques et symétriques sont impératives pour la protection des bâtiments qui abritent des animaux : étables, bergeries, haras, etc. C'est en effet le gradient de potentiel horizontal qui électrocute les animaux. Les personnes aussi, mais des souliers secs limitent les risques.

- ③ Réduire le champ magnétique, donc son induction, au cœur du bâtiment par la combinaison vectorielle des champs H rayonnés par chaque conducteur de descente. A mi-chemin entre deux conducteurs rectilignes parallèles parcourus par des courants égaux et de même sens, il n'y a aucun champ magnétique. Cet effet est miraculeux quand on connaît la difficulté de blinder ce champ.

Pour un bâtiment d'un seul niveau, disons de moins de 10 mètres de haut, avec au moins 4 conducteurs de descente, il est souvent possible de garantir la rigidité diélectrique entre conducteurs de descente et masses internes. L'élévation de potentiel de la partie haute reste assez faible pour limiter le risque d'amorçage à travers un mur. Dans ce cas, on peut ne raccorder les conducteurs de descente externes qu'à la ceinture de terre, sans liaison aux masses internes.

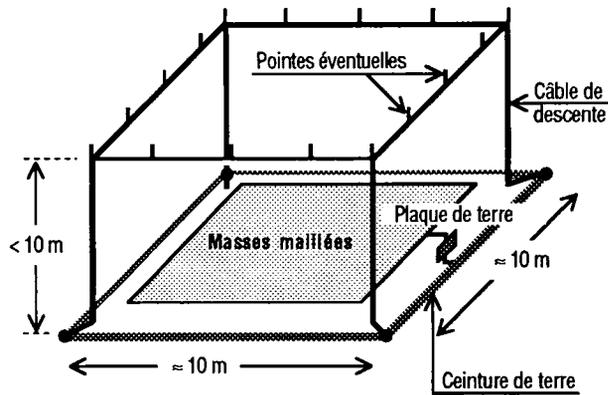


Figure 2-15 : Conducteurs de descente d'un petit bâtiment

Liaisons des conducteurs de descente à la masse

Dès que la hauteur du bâtiment excède 10 mètres, il devient à peu près impossible d'éviter un amorçage entre un conducteur de descente contre un mur et un fer à béton ou une masse interne. Il convient alors de relier chaque conducteur des descente à la masse la plus proche de chaque étage par une liaison électrique courte en traversée de mur.

Il serait en outre souhaitable de relier les conducteurs de descente entre eux par une ceinture horizontale à chaque étage. Si cette précaution est jugée trop contraignante ou trop coûteuse, il faudrait assurer au moins une interconnexion horizontale tous les 10 m de haut environ.

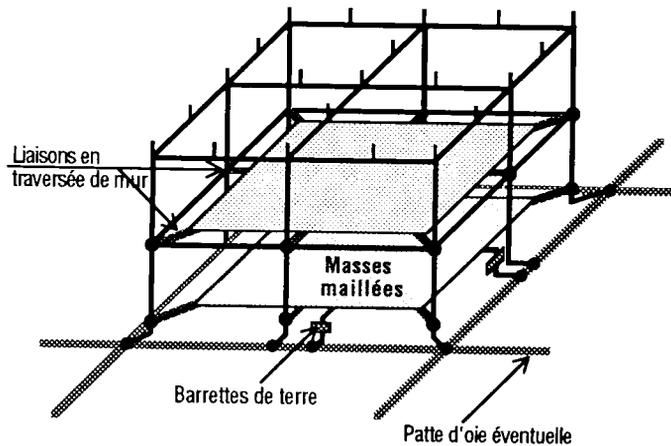


Figure 2-16 : Conducteurs de descente de grands bâtiments

Une connexion en traversée de mur extérieur gagne à être tirée dans un trou incliné en bas vers l'extérieur pour éviter la pénétration d'eau par ruissellement. Bien entendu, aucun trou ne doit être percé dans la zone étanche d'un cuvelage. Les huisseries métalliques des fenêtres permettent des raccordements électriques entre des câbles de descente externes et des masses internes sans forer le mur.

Si les étages sont de hauteur normale, de 3 à 5 m, on peut se contenter de ne mailler les conducteurs de descente à la masse que d'un étage sur deux. Cette solution est toutefois moins efficace contre les effets indirects de la foudre. Pour les immeubles sensibles, les bâtiments informatiques en particulier, l'effet de "cage de Faraday" est sensiblement meilleur si l'on assure un raccordement de chaque câble de descente à la masse de chaque étage.

Réseaux suspendus

Il existe une autre méthode pour limiter les risques d'amorçage entre les conducteurs de descente et les structures de masse voisines. Elle consiste à tendre des fils au dessus de l'ouvrage à protéger et à éloigner les conducteurs de descente à une distance suffisante des murs. C'est le principe des "fils de garde" tendus au-dessus des lignes THT qui protègent les conducteurs de phase.

Les fusées à Kourou comme à Cap Kennedy sont protégées sur leur pas de tir par un réseau de fils tendus. Au dessus d'une navette américaine, un mat isolant haut de 25 mètres supporte deux conducteurs de descente. Malgré cela, le 29 août 1983, un choc de foudre frappa le pas de tir dans la partie soi-disant protégée par le cône de 60° de demi-angle au sommet. Un magnifique cliché photo fut pris. Une fois de plus, le modèle électrogéométrique prouva sa supériorité sur les idées reçues. Le tir eut lieu sans encombre quelques heures plus tard.



Application : Distance entre un réseau suspendu et le bâtiment

On veut protéger un bâtiment de hauteur h par un réseau suspendu. Sachant qu'il y a 4 conducteurs de descente et qu'il faut environ 10 kV/cm pour amorcer dans l'air, à quelle distance faut-il surélever du bâtiment le réseau de fils ?

Solution :

Pour notre estimation, nous retiendrons un di/dt important, 400 kA/ μ s par exemple. En supposant que le courant est divisé en parts égales par chacune des quatre descentes, chaque câble supporte alors un di/dt de 100 kA/ μ s. L'inductance d'un câble de descente vaut 1 μ H/m. La d.d.p. U entre les fils suspendu distants d'une hauteur h par rapport au bâtiment est égale à :

$$U = 10^{-6} \times h \times 100\,000 / 10^{-6}$$

$$U = 100 \text{ kV par mètre de hauteur}$$

Or l'air peut amorcer en champ inhomogène à partir de 10 kV/cm.

Pour ne pas risquer d'amorcer il faut éloigner le réseau suspendu du bâtiment d'au moins 10 centimètres par mètre de hauteur.

La solution des fils suspendus se justifie pour les bâtiments à hauts risques (stockage d'explosifs, produits dangereux...). Les bâtiments métalliques ainsi que la plupart des industries chimiques sont efficacement protégés par l'ensemble de leurs structures conductrices préexistantes : poutres, charpentes, tuyaux, rails, chemins de câbles, rambardes, etc.

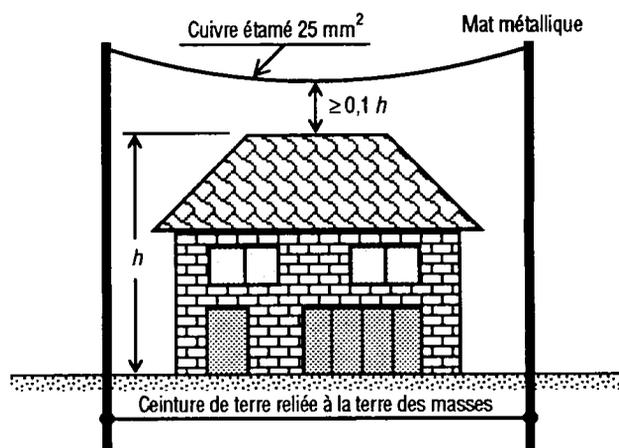


Figure 2-17 : Protection foudre par un réseau suspendu

Une fusée tirée d'une région tropicale est évidemment exposée à la foudre. Le 26 mars 1987, une fusée Atlas Centaur de l'US Air Force fut foudroyée 73 secondes après son décollage. Le champ électrique au sol était raisonnablement faible mais un orage récent avait laissé des charges d'espace en altitude. Le calculateur de vol se planta et la destruction de la fusée dût être télécommandée. Depuis, on ne tire plus de fusée par temps orageux et on se préoccupe de la carte tridimensionnelle du champ électrique. En science, le malheur des uns profite aux autres.

Conducteurs de masse et conducteurs de terre

Un *conducteur de terre* n'est pas enterré : c'est un conducteur qui relie quoi que ce soit à une barrette de terre. Rappelons (tome 2) deux souhaits apparemment contradictoires : il est favorable de rapprocher autant que possible et de bout en bout un câble signal d'un conducteur de masse qui l'accompagne mais il est souhaitable d'éloigner les câbles des conducteurs de terre.

Un conducteur de masse, une goulotte métallique par exemple, peut servir de blindage s'il est raccordé aux masses des châssis au moins à chaque bout. Il apporte un effet réducteur vis à vis des perturbations électromagnétiques, effet d'autant meilleur que la structure de masse est proche du câble et enveloppante.

Un conducteur de terre au contraire peut écouler des courants extérieurs au système, tel celui de la foudre. Il serait maladroit de tirer un conducteur de terre au milieu d'une goulotte : la diaphonie pourrait perturber la

transmission des signaux. Eloignons les câbles à bas-niveau d'une trentaine de centimètres des conducteurs de terre et fixons ceux-ci à l'extérieur des chemins de câbles.

Si ces deux structures de masse sont proches, quelle qu'elles soient, il serait maladroit de ne pas les relier. Cet oubli réduirait l'équipotentialité des masses. Ainsi, les conducteurs de terre "verticaux" devraient être systématiquement connectés à tous les conducteurs d'accompagnement "horizontaux". Un maillage devrait être tridimensionnel. Les électrons sont insensibles à la gravitation.

Réseau de terre

Le rôle d'un réseau de terre est d'écouler dans le sol les courants qui pénètrent en mode commun dans le site. Un risque, en cas de foudroielement, est la vitrification d'un manchon de sol autour d'un tronçon des câble enterré. Cette vitrification élève de façon irréversible la résistance de la prise de terre mais elle ne remet pas en cause l'équipotentialité du site, du moins tant que le conducteur enterré n'est pas sectionné. Nous conseillons de corriger une telle dégradation car la partie vitrifiée est probablement devenue moins robuste. Le métal risquerait de fondre en cas de nouvelle surintensité.

Tout réseau de terre, pour conserver au bâtiment une équipotentialité "horizontale" convenable, devrait comporter au moins une ceinture périphérique. De nombreuses barrettes de terre permettent de relier en plusieurs points les masses internes à la terre. Une barrette de terre installée sur un conducteur de ceinture en épingle à cheveu permet d'éviter de braser une jonction enterrée.

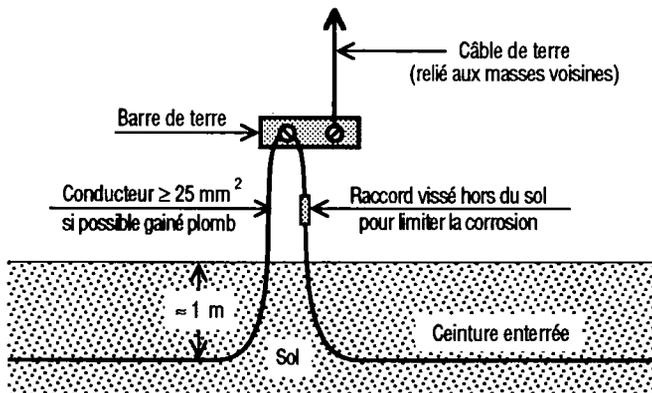


Figure 2-18 : Raccordement conseillé au réseau de terre

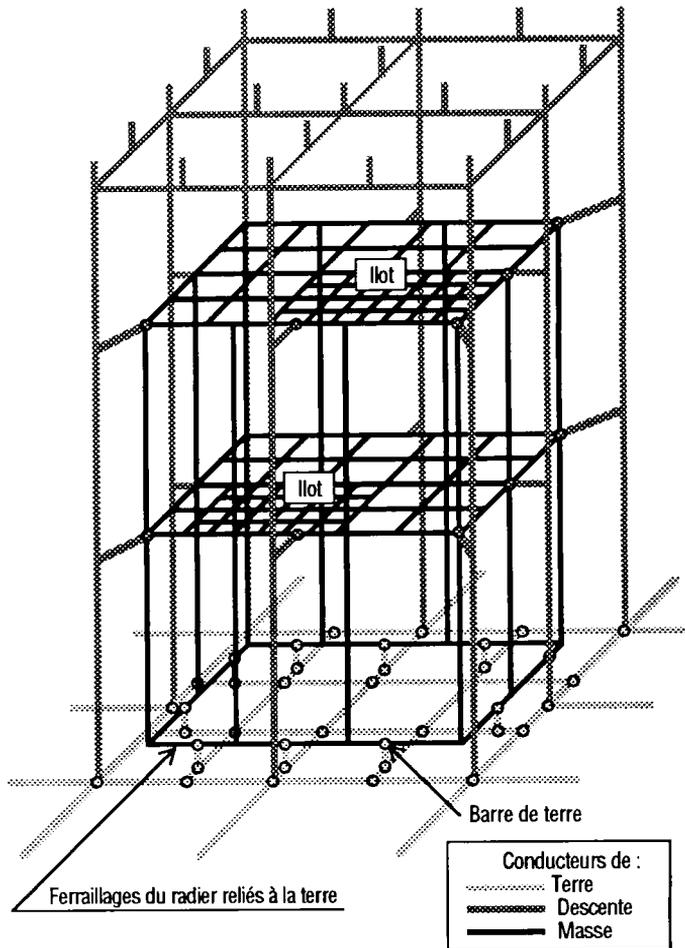


Figure 2-19 : Exemple de maillage des conducteurs de descente des masses et du réseau de terre

L'équipotentialité du site implique le maillage systématique des conducteurs de masse, des conducteurs de descente (si possible à chaque étage) et du réseau de terre. On obtient de la sorte une "cage de Faraday" à grandes mailles. Tous les conducteurs accessibles, tels les structures métalliques du bâtiment et les huisseries métalliques, devraient aussi contribuer à ce maillage électrique.

Protection des conducteurs externes

Une fois l'équipotentialité des structures de masse assurée, il importe de limiter les surtensions entre les conducteurs externes et la masse. La position idéale d'une protection primaire contre les surtensions est le voisinage d'une masse, si possible à proximité d'une barrette de terre. Un écrêteur primaire installé en entrée du bâtiment permet de dériver les courants externes à la terre en limitant leur circulation dans les masses. L'impédance de liaison, donc la distance, entre un écrêteur secondaire et la masse des équipements protégés, est critique.

Montage des écrêteurs

Chiffrons par un exemple réaliste l'effet de la longueur d'une liaison de masse.



Application : Résiduelle d'un écrêteur selon sa longueur de câblage

Un parafoudre doit écouler une impulsion foudre de 10 kA en 1 μ s. La d.d.p. résiduelle aux bornes du composant est annoncée inférieure à 2 kV. Que devient-elle si le composant est câblé en série avec un câble long de 1 m ?

Solution :

La d.d.p. aux bornes d'un conducteur de 1 m est voisine de celle aux bornes d'une inductance de 1 μ H : $U = L \Delta i / \Delta t$

$$U = 10^{-6} \times 10\,000 / 10^{-6} = 10 \text{ kV}$$

La tension résiduelle totale est de $2 + 10 = 12$ kV. Un écrêteur complémentaire installé au voisinage de l'équipement à protéger est nécessaire. Bien que la foudre ne puisse pas être considérée comme un phénomène à très hautes fréquences, les inductances parasites sont gênantes.

Dans ce cas sévère, si le conducteur de mise à la masse dépassait 2 m, la d.d.p. résiduelle dépasserait 20 kV. Sans protection secondaire, on subirait à coup sûr un contournement de bornier, un amorçage dans



un connecteur ou pire une destruction électronique (claquage d'un optocoupleur, transformateur ou relais, perforation de jonction...). Limiter la longueur du câblage entre un écrêteur et la masse de l'équipement n'est pas un souhait, c'est une nécessité.

Pénétrations de canalisations conductrices

Toutes les canalisations conductrices venant de l'extérieur du bâtiment (dont les tubes isolants contenant un fluide conducteur et les écrans des câbles blindés) doivent légalement être raccordées à la terre pour raison de sécurité. Attention en particulier au câble d'un réseau local entre bâtiments dont l'écran est souvent oublié. Ce raccordement à la masse devrait être effectué au plus court en entrée de bâtiment. Le mieux est de regrouper l'entrée de toutes les canalisations externes dans une même zone. Dans le cas contraire, le minimum est d'installer une barrette de terre au voisinage de chaque point d'entrée.

Les guides d'onde et les feeders d'antennes qui traversent le mur en hauteur devraient aussi être reliés à la terre. Ils doivent en outre être connectés à la masse de leur baie. Il est favorable de ceinturer les locaux techniques d'une ceinture de masse. Elle permet d'y raccorder les câbles, goulottes et autres canalisations externes. Rappelons (tome 2) qu'il est souhaitable de mailler les îlots à forte densité d'équipements électroniques. Un réseau de terre peu maillé est moins pénalisant contre la foudre que des masses internes mal maillées. Plus on se rapproche des circuits électroniques, plus l'équipotentialité importe.

Les protections en rayonnement

Le champ rayonné par la foudre est perturbateur car il est de forte amplitude, assez rapidement variable et à prédominance magnétique. La fréquence équivalente du champ de foudre est relativement basse, dans la gamme des ondes longues. Un tel champ est difficile à blinder efficacement. Les récepteurs radio à antenne de ferrite reçoivent les “grandes ondes” même dans un immeuble en béton armé. L’atténuation des bâtiments au champ de la foudre est faible.

Hormis les vraies chambres blindées, seuls les vastes immeubles à ossatures métalliques maillées y compris au niveau du sol (certains ateliers industriels par exemple) présentent une atténuation significative au champ de la foudre. Elle est parfois supérieure à un facteur 10.

L’antenne qui rayonne le champ de la foudre est le canal ionisé. On peut assimiler l’arc à un conducteur rectiligne sensiblement vertical et de grande longueur. Le champ H, en ampères par mètre, suit ainsi le théorème d’Ampère :

$$H = I / 2\pi R$$

Ce champ est essentiellement horizontal. La tension induite dans une boucle de masse verticale par ce champ magnétique (supposé homogène et orthogonal à la boucle) suit la loi de Lenz :

$$U = S \mu_0 \Delta H / \Delta t$$

En combinant ces deux équations, on en obtient une troisième tout aussi simple :

$$U = 200 S \Delta i / R \cdot \Delta t$$

avec :

U : Tension crête induite dans la boucle, en volts

S : Surface de la boucle, en mètres carrés

$\Delta i / \Delta t$: Pente maximale du courant de foudre, en kiloampères par microseconde

R : Distance entre l’éclair et la boucle victime, en mètres

d.d.p. induite dans les boucles

Plutôt que de longs discours, effectuons un petit exercice.



Application : Tension induite par la foudre dans une boucle de masse

La foudre tombe à 100 mètres d'un système micro-informatique. Sachant que la boucle entre le cordon secteur du micro-ordinateur, le câble de données vers l'imprimante et le cordon secteur de cette dernière présente au champ une surface de 1 m^2 , quelle est la d.d.p. induite dans cette boucle ?

Solution :

Nous choisirons une menace moyenne : $\Delta i / \Delta t = 40 \text{ kA} / \mu\text{s}$.

$$U = 200 \text{ S } \Delta i / R \Delta t$$

$$U = 200 \times 1 \times 40 / 100 = 80 \text{ volts}$$

Si nous avons retenu la pente dépassée une fois sur 10, nous aurions obtenu une tension induite de 240 volts par mètre carré. Enfin si nous avons supposé que le courant de foudre s'écoulait par un seul conducteur vertical distant de 10 mètres, la tension aurait atteint 2400 V/m^2 . Retenons qu'un choc de foudre assez proche induit une centaine de volts par mètre carré de boucle.

Dans l'exemple précédent, si le câble de liaison signal est blindé par une tresse, avec un raccordement bilatéral à la masse, son effet réducteur (au moins un facteur 100) permettrait d'assurer le bon fonctionnement. Si la liaison n'était ni blindée ni protégée par des écrêteurs, non seulement le bon fonctionnement pourrait être altéré mais des composants d'interface risqueraient d'être détruits.

L'expérience montre que si les masses sont mal maillées, avec des câbles d'interconnexions tirés sans effet réducteur, des cartes sont détruites par l'induction d'un choc de foudre distant de plusieurs centaines de mètres. En revanche, si les masses sont raisonnablement interconnectées, avec des goulottes conductrices vissées au châssis des baies, un choc de foudre même direct perturbe peu. En 1991, l'un des plus gros éclairs déclenché par la station de Saint-Privat d'Allier, 53 kA crête, frappa directement un central téléphonique maillé de façon raisonnable. Rien ne fut détruit ni même perturbé de façon grave.

L'induction de la foudre est une sérieuse menace pour des équipements reliés, même s'ils sont hors tension lors du choc de foudre. L'expérience montre que le rayonnement foudre a des conséquences bien plus fré-

quentes sur les électroniques que les coups directs. En environnement mal maillé, seuls les équipements dont tous les câbles sont déconnectés ou bien blindés ne risquent rien.



Application : Induction entre deux baies raccordées en étoile à la terre

Un câble de réseau local galvaniquement isolé relie deux baies. Elles sont raccordées chacune à la terre par un conducteur relié en étoile à une prise de terre. La surface de la boucle de masse entre les conducteurs de protection et le câble signal est de 300 m^2 . Quelle est la d.d.p. en MC sur la liaison signal, induite par un choc de foudre de $\Delta i/\Delta t = 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$ tombant à 400 m ?

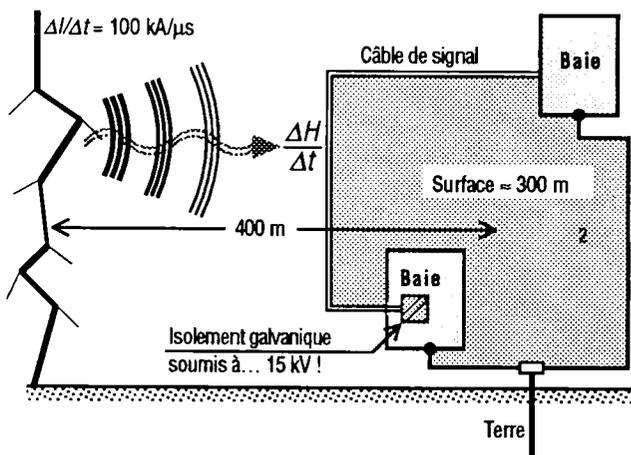


Figure 2-20 : Un problème des réseaux locaux

Solution :

$$U = 200 \times 300 \times 100 / 400 = 15 \text{ kV}$$

La rigidité diélectrique de l'isolement galvanique ne peut certainement pas supporter une telle d.d.p. et des circuits seront probablement détruits.

Un utilisateur peu averti, constatant l'effet, pourrait conclure qu'il y a eu une "remontée de terre" donc qu'il est urgent de réaliser une "meilleure terre". Il risque de décider de forer le sol de notre vieille planète. Une décision à grands frais et bien entendu en pure perte : la planète n'y est

pour rien. Les spécialistes savent que les plantages et destructions de matériels les jours d'orages sont plus souvent imputables au rayonnement de la foudre qu'à son courant direct.



Application : Courant induit dans une boucle de masse

Dans la configuration de l'exemple ci-dessus, la boucle de masse de 300 m² a un périmètre d'environ 100 m. Calculer le courant induit dans cette boucle par un choc de foudre de 100 kA tombant à 400 m. Le câble signal, long de 50 m, possède un blindage d'une résistance linéique de 20 mΩ/m. Il est heureusement mis à la masse aux deux bouts. Quelle est la d.d.p. en mode commun résiduelle sur les conducteurs signaux ?

Solution :

Raisonnons de façon littérale tout d'abord. Appelons S la surface et L l'inductance totale de la boucle de masse, I le courant foudre et i le courant induit dans la boucle. La loi de Lenz (appliquée à un choc de foudre, en ampères par seconde) et la tension aux bornes d'une inductance (supposée pure) donnent les équations :

$$U = 0,2 \times 10^{-6} S \Delta I / R \Delta t \quad \text{et} \quad U = L \Delta i / \Delta t$$

Nous en déduisons une troisième équation très simple :

$$i = 0,2 \times 10^{-6} S I / R L$$

Le courant induit dans une boucle de masse est ainsi l'image exacte du courant de la foudre, avec en particulier le même temps de montée et la même durée, du moins tant que l'on peut négliger la résistance des câbles devant leur self (c'est-à-dire typiquement au dessus de 3 kHz). On peut considérer que l'arc de la foudre est le circuit primaire d'un transformateur à fortes fuites dont la boucle de masse est un secondaire en court-circuit.

Nous en déduisons le rapport : $i / I = 0,2 \times 10^{-6} S / R L$

ici $L \approx 100 \mu\text{H}$ (un câble a une inductance linéique $\approx 1 \mu\text{H/m}$), d'où :

$$i / I = 0,2 \times 10^{-6} \times 300 / 400 \times 100 \times 10^{-6} = 0,0015, \text{ soit } 0,15 \%$$

i vaut ainsi $100\,000 \times 0,0015 = 150$ ampères crête

La tension induite en mode commun u sur les conducteurs d'un câble blindé dont l'écran de résistance r supporte un courant i, en dessous de quelques mégahertz, vaut $u = r.i$ (voir chapitre 3 du tome 3).

$$\text{Ici, } r = 20 \times 10^{-3} \times 50 = 1 \Omega$$

$$u = 1 \times 150 = 150 \text{ V}$$

Cette surtension interne à l'écran a la même forme, et en particulier a la même durée, que l'impulsion du courant de foudre, soit une centaine de microsecondes. Elle est d'amplitude trop faible pour contour-



ner un isolement galvanique mais elle peut suffire à détruire ou à fragiliser un composant, un circuit d'interface en particulier.

Les solutions peuvent être de réduire la surface de la boucle de masse, de doubler le câble par un conducteur de masse de résistance inférieure à $20\text{ m}\Omega/\text{m}$ (un chemin de câbles par exemple) ou de protéger les entrées/sorties électroniques par un écrêteur (Transzorb par exemple) entre chaque fil et la masse. Retenons que le courant induit par champ dans une boucle de masse a la même forme que celui de la foudre. Il peut atteindre plus de 100 A sur une grande boucle.

Réduction des tensions induites

La d.d.p. induite par le champ rayonné par la foudre dans une boucle de masse peut être forte, surtout entre équipements distants. Réduire cette d.d.p. tient en trois méthodes : réduire la surface des boucles de masse, réduire globalement le champ en multipliant les boucles entre les masses et utiliser localement des effets réducteurs. La superposition de ces trois méthodes est bien sûr souhaitable.

Rappels sur les effets réducteurs

Plaquer un câble contre un câble de masse relié au moins aux châssis à chaque extrémité réduit typiquement les perturbations foudre d'un facteur 3 ou 4. Un chemin de câble métallique boulonné de bout en bout apporte un effet réducteur de 30. La tresse d'un câble blindé raccordée à la masse des deux côtés sans queue de cochon réduit la tension collectée d'un facteur 100 environ (et même d'un facteur 300 en hautes fréquences, au-delà du mégahertz).

Considérations sur le maillage des descentes

Le maillage des masses, c'est-à-dire la multiplication des boucles entre les masses réduit le champ résiduel au cœur du maillage : les courants induits dans les boucles entre masses s'opposent au champ qui leur donne naissance. Si le maillage est souvent bon en horizontal, il est souvent moins dense en vertical. C'est une raison supplémentaire pour mailler systématiquement tous les conducteurs de descente aux masses de chaque étage.



Il est souhaitable d'éloigner les équipements sensibles et leurs câbles d'interconnexion des murs externes du bâtiment. Une baie installée en périphérie est plus agressée par un champ externe que si elle était installée au cœur du bâtiment.

Nous avons mesuré dans des atelier à charpentes métalliques des atténuations en champ magnétique de l'ordre d'un facteur 10 au centre par rapport à la périphérie dans la bande des ondes longues. L'éloignement des murs extérieurs réduit l'exposition des équipements au champ de la foudre par l'effet de blindage des boucles entre masses verticales. Cet éloignement réduit aussi l'agression d'un coup au but par la symétrie du courant de descente.



La foudre en conclusion...

La foudre est un phénomène fréquent que l'on ne sait pas éviter. On sait néanmoins garantir l'immunité des systèmes électroniques à un foudroissement. Les effets chimiques, acoustiques, thermiques et mécaniques de la foudre sur les électroniques sont négligeables devant les effets électromagnétiques. Ses principaux ordres de grandeur sont désormais statistiquement bien connus. La sévérité d'un choc de foudre est définie par le courant crête et le di/dt crête.

Le fort champ électrique statique qui précède l'éclair indique l'imminence d'un choc mais il n'a aucun effet sur les électroniques. L'éclair génère un champ magnétique variable bien plus perturbateur que la variation du champ électrique. Les effets du champ magnétique sont sévères car il pénètre au cœur des immeubles où il agit par l'induction de surtensions. Les boucles de masse sont de plus en plus nombreuses dans les sites industriels, médicaux et tertiaires : boucles des réseaux locaux, de systèmes de contrôle-commande, d'alarme, etc. Des pannes latentes, avec une constante de temps de l'ordre du mois, ont été souvent observées après le foudroissement d'un site mal maillé. Les problèmes d'induction sont de plus en plus fréquents et coûteux.

La foudre peut aussi perturber ou détruire des équipements par des impulsions directement propagées par les câbles externes. Ces perturbations conduites peuvent être une partie du courant de la foudre (couplage galvanique) ou être collectées par effet d'antenne (couplage champ à boucle). Quelle que soit la résistance de la prise de terre, toute canalisation conductrice qui pénètre dans un bâtiment devrait y être raccordée. De même, tout conducteur électrique externe devrait être protégé par un écrêteur câblé aussi court que possible à la masse.

Les coups directs sont rares, d'où le confort de la vente des paratonnerres. Des paratonnerres ne sont pas indispensables. Des conducteurs posés le long des arêtes saillantes du bâtiment sont préférables. Les réseaux à fils tendus sont intéressants quand la sûreté de la protection prime sur l'esthétique. Dans tous les cas, les conducteurs de descentes à la terre doivent être multiples et si possible reliés aux masses internes. Un tel maillage est efficace contre les chocs directs par division du courant et contre les effets induits par "cage de Faraday".



Pour se protéger d'un foudroiement, les moyens à mettre en œuvre sont ceux d'une installation maîtrisée en CEM. Durcir un site existant contre la foudre est possible, simple et peu coûteux par rapport aux risques. Il suffit pratiquement de mailler soigneusement les masses internes et de veiller au bon montage des écrêteurs installés sur chacun des câbles externes.

Des *raccordements équipotentiels* entre masses peuvent être ajoutées en service, sans modifier les matériels, leurs logiciels, leurs câblages ou leurs connectiques. La correction d'une quinzaine de centres téléphoniques par France Télécom en 1990 prouva de la façon éclatante que le simple maillage des masses et le bon montage des parafoudres (sans paratonnerres) suffit à assurer une protection remarquable. En ne prenant en compte que le coût des cartes détruites, c'est-à-dire en négligeant celui des pertes d'exploitation, le coût du maillage de ces centres fut amorti en moins d'un an. Tout décideur devrait être sensible à de tels arguments.

Admirons la richesse, la diversité et l'astuce des arguments de vendeurs de paratonnerres lorsqu'ils prétendent sans rire que leur gri-gri à catalyse breveté SGDG peut décharger le nuage à partir du sol, ou repousser la foudre chez le voisin, ou l'attirer à coup sûr, ou l'empêcher de tomber, ou évacuer le courant dans une terre séparée, ou supprimer à lui seul les effets néfastes de la foudre.

Protégeons-nous de façon aussi sérieuse que les électroniques embarquées à bord des avions. Respectons les règles simples conformes à la physique de base. Alors tout ira bien, la preuve n'est plus à faire.



REMEDES EN C.E.M.

Si l'installation d'un système électronique s'éloigne trop des lois physiques, des dysfonctionnements seront probables. Un dépanneur doit alors intervenir pour corriger les erreurs les plus graves et apporter des remèdes adaptés. L'objet de ce chapitre est de proposer des clefs pour ce travail de dépannage.

Les réflexes en dépannage CEM

Les débuts dans un nouveau domaine sont difficiles, la CEM ne fait pas exception à la règle. Nous nous souvenons de nos hésitations devant un problème que nous observions pour la première fois. Faute de savoir quoi faire, nous tachions d'effectuer de bonnes mesures... que nous ne savions pas ensuite exploiter.

C'est en se concentrant sur les problèmes et non sur la méthode que l'on comprend les phénomènes et que l'on devient efficace. En CEM, la méthode de travail (approche, tests, validation, explications...) gagne à devenir aussi automatique que possible.



Des réflexes sont indispensables. Ils permettent d'obtenir le maximum de rendement avec le minimum de fatigue. Regardons un enfant qui apprend à écrire. Il se concentre pour dessiner des O bien ronds et des I bien droits. C'est inévitable, même Shakespeare commença ainsi. Lorsque l'automatisme de l'écriture sera acquis, il pourra se concentrer sur la chose importante : le sens des mots.

Les premiers automatismes que l'on acquiert en CEM sont techniques. Ils sont nécessaires mais, pour un dépanneur, ils sont insuffisants. D'autres automatismes, non techniques, limitent les risques de ne pas comprendre les problèmes, de s'égarer et finalement de ne pas satisfaire le plaignant.

Trop souvent, des actions simples et nécessaires sont négligées en dépannage. Les sept automatismes que nous proposons s'appliquent à tous les problèmes de CEM. Ils simplifient l'ingrat travail du dépanneur, libèrent son esprit et augmentent ses chances de succès. Analysons ces réflexes dans l'ordre chronologique dans lequel ils devraient normalement être appliqués.

Connaître l'historique

Une erreur fréquente d'un débutant confronté à un problème de CEM est de commencer par ouvrir sa caisse à outils. C'est une façon sûre de mécontenter tout le monde ! Le premier réflexe est de s'informer. Il est toujours souhaitable de connaître le contexte et l'historique de l'affaire. Savoir depuis quand les problèmes sont apparus permet souvent de circonscrire la sphère d'investigation. Se renseigner sur les matériels, les logiciels et le process mais aussi sur les enjeux, les personnes, leurs responsabilités et leurs principales préoccupations permet d'éviter bien des maladresses.

Un intervenant, même s'il est extérieur et qu'il bénéficie d'un à priori favorable, avance souvent sur un terrain mouvant. Les tenants et les aboutissants d'un problème CEM peuvent être complexes. Des luttes de frontières, des conflits d'intérêts, des rejets de responsabilités ou des conflits de personnes empoisonnent parfois l'affaire. Un dysfonctionnement de CEM peut n'être que la partie émergée de l'iceberg. On gagne toujours à être informé du contexte.

Les difficultés que l'on rencontre lors de la recherche de solutions varient d'un cas à l'autre. Pour effectuer des mesures ou des tests en fonctionnement, les contraintes sont inévitables. Des essais d'immunité ne



peuvent être effectués que durant les heures creuses, la nuit ou le week-end, voire durant un arrêt programmé plusieurs mois à l'avance. Mieux vaut connaître ces impératifs avant de se présenter. Il est inutile de déplacer un volumineux et coûteux matériel dont l'utilisation sera impossible.

Il convient de préparer avec soin chaque intervention. Le choix du matériel de mesure est un sujet sur lequel nous reviendrons. Il est souhaitable de demander à l'avance aux correspondants sur place de mettre à disposition les ressources nécessaires en moyens matériels, humains et administratifs. Des autorisations d'accès doivent quelquefois être demandées plusieurs semaines avant d'intervenir. Dans tous les cas, l'accord et le soutien de la hiérarchie, même si elle n'est que tacite, simplifie les choses. Il peut être nécessaire avant de commencer de faire comprendre qu'il ne sera possible de corriger les problèmes que s'il n'est pas impossible de modifier quoi que ce soit !

Faire parler les intéressés

Le second réflexe est de faire parler à la fois les responsables et les personnes directement impliquées. Les phénomènes électriques sont souvent mal compris, surtout en HF. On peut donc s'attendre à ce qu'une demande d'intervention de CEM soit imprécise, mal formulée voire incomplète. C'est normal.

Une plainte ou une interrogation a été formulée, un problème de CEM n'est donc jamais purement technique. La psychologie est un élément essentiel de toute intervention. Ce sont rarement les meilleurs techniciens qui sont les meilleurs avocats. Parfois, contrairement à la demande formulée, le but de l'intervention n'est pas de résoudre le problème de CEM mais au contraire de démontrer que tout remède serait si contraignant que la meilleure solution est de repenser le système. Sortir prématurément ses outils ne pourrait alors faire que des mécontents, surtout si l'on aboutit à une amélioration insuffisante. Seul un dialogue franc et approfondi permet de placer le problème en perspective et de comprendre l'enjeu réel.

En cas de dysfonctionnement il est habituel que des erreurs aient été commises. Il faudra les identifier et les corriger. La répartition des responsabilités en CEM est l'un des casse-tête les plus difficiles à résoudre. Avec un peu d'expérience, l'aspect technique devient la partie la plus simple d'une intervention.



Après deux accidents chez un industriel, l'assureur nous demanda d'expertiser les causes et de répartir la responsabilité entre le distributeur d'électricité, l'importateur du système, l'installateur, le service d'entretien et l'exploitant. C'est par le dialogue que nous avons compris la vraie question : "pour continuer d'assurer ce client, pouvez-vous me prouver que d'autres accidents sont improbables ?" La réponse à cette question, simple car technique, satisfait tout le monde bien que nous n'ayons pas répondu officiellement à la question initiale.

Les responsables doivent être écoutés, au moins par courtoisie. Leur vision des choses est intéressante à connaître, au moins pour acquérir leur vocabulaire et se mettre à leur portée lors de l'explication finale. De plus, une personne que l'on a écouté nous écouterait plus volontiers à son tour en fin d'intervention.

En CEM comme dans d'autres domaines, la première impression est souvent déterminante. Il faudrait toujours commencer par se faire connaître puis, après avoir écouté les demandeurs, exposer ses hypothèses et définir sa méthode de travail. Il est souhaitable que la majorité des personnes qui participent à la mise en place et au contrôle des remèdes se sentent impliquées. Il est difficile d'imposer des solutions, même élégantes, à des personnes qui refusent à priori tout changement. En revanche, il est simple de faire accepter quelques contraintes à des personnes raisonnables, de bonne volonté, informées et motivées.

Un point essentiel doit absolument être établi avant toute intervention technique, et en tous cas avant d'apporter un premier remède. Il s'agit de définir l'objectif à atteindre. Le critère, on dit aussi la "sanction", doit être aussi clair et facile à mesurer que possible. Si ceci était négligé, même une correction satisfaisante risquerait d'être jugée insuffisante.

En CEM, le risque de ne pas aboutir à la perfection existe. Il est décevant, après avoir obtenu à grand peine des résultats probants, de s'entendre dire que si le fonctionnement est devenu acceptable, il reste encore quelques troubles visibles ici ou là... surtout lorsque ces dysfonctionnements résiduels sont indépendants des erreurs corrigées !

L'objectif à atteindre doit être commun à tous. Sinon des conflits d'intérêts pourraient rendre la situation inextricable. Un consensus sur la sanction est toujours plus simple à obtenir avant d'agir qu'après. C'est particulièrement important lorsque les critères de bon fonctionnement sont subjectifs. Si les mesures d'une dérive d'une consigne, d'un rapport signal sur bruit ou d'un taux d'erreur sont souvent simples à quantifier,



d'autres effets comme le tremblement d'une image cathodique sont difficiles à mesurer. Même lorsqu'un dysfonctionnement ne peut être évalué que par la bonne foi de chacun, un accord préalable sur le seuil de perturbation acceptable est souhaitable.

Attention à l'aspect subjectif du critère de bon fonctionnement. Un échographe à ultrasons qui semblait perturbé de façon inacceptable par l'équipe du matin était tout à fait utilisable par celle de l'après-midi. Pour nous l'image ressemblait à une chose indescriptible, voisine d'une nuit brumeuse sous la neige.

Se renseigner et observer

Une fois que l'on connaît l'historique des problèmes et le cadre dans lequel se déroulera l'intervention, les objectifs à atteindre doivent être clairement définis et être admis par tous. Gardons à l'esprit que le succès d'une intervention ne peut être évalué que par les plaignants, non par le dépanneur. Parfois ce n'est pas une bruyante alerte intempestive qui gêne le plus l'utilisateur mais la légère instabilité de l'image d'un moniteur. Un troisième réflexe, avant d'ouvrir sa boîte à outils, est d'obtenir auprès des opérateurs des informations techniques précises sur les problèmes.

L'intérêt principal de l'enquête technique auprès de l'exploitant est que nul mieux que lui ne connaît son système, ses faiblesses, ses aléas de fonctionnement et tous les symptômes d'une défaillance. Ces informations ne peuvent être obtenues que sur le terrain. Elles sont souvent fructueuses pour l'analyse CEM.

Une solution apte à satisfaire tout le monde est parfois connue avant l'intervention du dépanneur. Il suffit alors de la valider puis de la proposer de façon officielle. D'éventuelles contraintes (de coût, d'ergonomie, d'esthétique...) sont alors déjà connues et tolérées. Une personne étrangère a plus de facilités qu'un autochtone pour proposer des remèdes. Nul n'est prophète en son pays !

Dans le cas de perturbations aléatoires dont la cause n'est pas reproductible (la foudre par exemple) ou n'est pas identifiée, le dialogue avec les opérateurs permet de circonscrire le problème et d'envisager des explications plausibles. Un chauffagiste à qui nous demandions son avis sur une perturbation aléatoire qui affectait une salle informatique nous révéla



malicieusement qu'il était possible que l'allumage de son brûleur puisse perturber le système à l'étage supérieur. Sans cette révélation inattendue, la source aurait pu rester mystérieuse.

Il convient aussi de discerner les faux problèmes de CEM. Il n'y a pas que les parasites qui perturbent les systèmes électroniques : des problèmes de logiciel ou d'environnement (climatique, vibration, connectique...) peuvent être pris pour des effets de parasites. De tels cas se présentent surtout quand une difficulté antérieure en CEM a laissé des cicatrices.

Pour identifier une source inconnue de perturbation, des questions à priori hors de propos pour le néophyte peuvent réduire le champ d'investigation. Ainsi les questions "en quelle saison, à quelles heures les problèmes sont-ils les plus fréquents" sont raisonnables. Si les dysfonctionnements se produisent l'hiver, des décharges électrostatiques sont peut-être en cause. Si c'est l'été, la foudre peut être suspectée. Si les problèmes n'apparaissent qu'aux heures ouvrées, un perturbateur lié à l'activité humaine est sans doute le coupable. Si aucune corrélation ne peut être établie, d'autres causes que de CEM ne sont pas à exclure.

Un puissant outil de recherche est l'observation. Un simple contrôle visuel permet, sans risque et sans interrompre le fonctionnement du système, de repérer rapidement la plupart des erreurs d'installation. Les difficultés de CEM sont souvent cernées avant d'avoir effectué quelque mesure ou test que ce soit.

Par chance, les erreurs les plus graves sont souvent les plus simples à corriger. Relier les terres séparées, mailler les masses, raccourcir les fils de reprise des câbles blindés, relier les chemins de câbles aux châssis sont des corrections prioritaires et efficaces. En outre ces corrections élémentaires peuvent être apportées en fonctionnement. A l'inverse, remplacer un filtre par un modèle plus efficace ou un câble blindé par un plus performant est long, coûteux, nécessite d'interrompre le fonctionnement... et le résultat est aléatoire.

Nous suggérons de réclamer les plans et documents d'installation. Même si ces documents ne servent pas directement (ils sont souvent incomplets et rarement à jour), ils permettent de calmer la vindicte du plaignant, surtout si ce dernier ne peut pas les fournir ! Il est toujours souhaitable d'impliquer directement le maximum de personnes dans la résolution des difficultés.



Attention comme en toute chose aux abus. Un client qui se plaint d'un problème identifié risque de mal admettre que "l'expert", plusieurs heures après son arrivée, discute encore de tout et de rien autour du matériel perturbé. La compétence technique et l'efficacité du spécialiste restent ses meilleurs atouts et sa raison d'être. Un dépanneur est en position forte. Il lui suffit d'avoir compris les difficultés pour bénéficier d'un avantage qui s'apparente au prestige. Ce type de séduction peut sembler puéril mais il est utile aux actions correctives.

Analyser le défaut

Le quatrième réflexe, avant d'apporter la moindre modification, est d'analyser le défaut. Cette partie est la seule qui soit véritablement technique, pour laquelle l'expérience soit utile et les compétences nécessaires. La CEM n'a rien de commun avec les arts divinatoires.

Dans la tourmente d'une intervention difficile, les évidences peuvent échapper. Il importe, pour analyser un problème CEM, de conserver la meilleure concentration possible et de travailler avec méthode, sans se dissiper. Pour diagnostiquer le mal, le plus simple et le plus efficace est de reproduire le dysfonctionnement. Nous consacrons plus loin un paragraphe sur la mise en évidence des défauts (mesure, reproduction ou simulation) et sur l'analyse des couplages. En pratique, trois principaux cas peuvent se présenter.

Si la source du problème est identifiée et que la perturbation est entretenue ou du moins peut être reproduite à volonté, tout va bien. Il suffit alors d'identifier les couplages (par où passent les parasites) et les effets sur les circuits victimes. L'analyse du problème selon le type de perturbation (tome 1) : BF ou HF, transitoire ou permanente, en conduction sur un câble ou en rayonnement dans l'air est alors simple. Des mesures (d'amplitude, de durée, de pente maximale, etc.) peuvent éventuellement être entreprises pour définir l'efficacité minimale des remèdes à installer : filtrages, écrans, écrêteurs, effets réducteurs, etc.

Si la source de perturbation est identifiée mais n'est pas reproductible à volonté, la foudre par exemple, on utilisera un générateur de perturbations normalisé pour simuler une agression comparable à celle du phénomène réel. Un générateur de décharges électrostatique peut être utile, le générateur de transitoires électriques rapides en salves de la norme CEI 1000-4-4 est indispensable.



Enfin le troisième cas, difficile, est celui où la source de perturbation est inconnue. Il convient alors d'effectuer des essais d'immunité raisonnables. Le générateur de la norme CEI 1000-4-4 est le seul que nous emportions systématiquement en intervention sur site. Il est aussi possible, s'il n'y a pas d'urgence, de laisser sur place, pour la durée nécessaire, un enregistreur de perturbations.

Dans tous les cas de dysfonctionnements, il est nécessaire d'en analyser les causes. La méthode "on essaie n'importe quoi et on verra bien" ne marche que pour de petits matériels où le nombre de paramètres à modifier est très limité. Ce n'est que dans ce cas que l'on peut installer des remèdes efficaces par tâtonnement, sans avoir préalablement compris la cause des problèmes. Pour un système complexe, avec de nombreux câbles, capteurs et actionneurs, avec diverses unités de mesure et de traitement, l'approche par tâtonnements est stérile.

Il est toujours utile de savoir évaluer les ordres de grandeur. Des règles plus ou moins empiriques, même si elles sont de précision médiocre, font la différence entre le spécialiste et le néophyte. Par exemple, le signal HF collecté par diaphonie ne dépasse guère la moitié de l'amplitude coupable (en tension comme en courant), un amorçage dans l'air est une dizaine de fois plus lent que dans le vide ou le SF₆, le courant crête d'un amorçage est voisin de la tension divisée par 200, 1 A en mode commun sur un câble rayonne 0,16 A/m à 1 m, etc.

Il importe dans tous les cas de négliger le faible devant le fort puis d'apporter les premiers soins aux points les plus faibles. Il suffit souvent d'identifier les points d'entrée des parasites dans l'équipement perturbé puis de traiter chacun de ces points, un par un. En un mot, il faut s'efforcer de simplifier les choses.

Commençons toujours par effectuer les mesures ou les tests qui n'exigent pas de modification de l'installation. La mesure du courant en mode commun sur les câbles et celle du champ magnétique correspondent à ce critère.

Continuons par effectuer des tests qui n'exigent que des modifications mineures, faciles à apporter en fonctionnement et sans risque pour le système : pivoter un terminal cathodique, éloigner un périphérique, ajouter une tresse de masse, surblinder une liaison, etc.



Ce n'est que si aucun essai simple ne donne d'évidence sur les phénomènes que l'on doit entreprendre des tests qui modifient les conditions d'installations. Par exemple : déconnecter un terminal inutile pour le test, alimenter tous les équipements par le même réseau électrique, remplacer des câbles non blindés ou avec une mauvaise connectique par de meilleurs, gratter la peinture, etc.

Proposer des solutions

Une fois le problème cerné, quand les mécanismes des dysfonctionnements sont analysés, des solutions possibles tombent d'elles-mêmes. Un cinquième réflexe est alors de proposer un premier remède. Des considérations liées au système ou à son exploitation peuvent limiter les possibilités de correction. Des raisons de coût, de rapidité d'intervention, de disponibilité et diverses contraintes d'installation ou d'environnement peuvent interdire des solutions à priori efficaces.

La procédure générale de correction est simple. On propose un remède en avertissant le plaignant de ses limites et contraintes éventuelles. N'hésitons pas à simplifier les explications. Sur site, il ne serait pas raisonnable de donner un cours d'optimisation des remèdes. L'essentiel est d'aboutir rapidement, de façon sûre, à une solution satisfaisante et durable.

Seul le client peut accepter ou refuser une correction. Nous sommes intervenus sur des matériels où la ferrite autour des câbles était refusée pour des raisons de poids et de fragilité mécanique. Ailleurs, ce sont les condensateurs entre phases et masse qui sont interdits à cause du courant de fuite dans le conducteur de protection.

Un remède accepté avant son installation est rarement refusé s'il résout les problèmes, même s'il entraîne quelques contraintes d'exploitation. Par expérience, quand un problème ne se mesure que de façon subjective, un remède accepté avant son installation semble toujours donner de meilleurs résultats que le même remède installé sans l'assentiment des intéressés. Il serait maladroit d'installer un remède à l'insu des utilisateurs, surtout s'il risque de présenter quelque effet secondaire : il serait probable rejeté. Après l'accord, installer le remède et vérifier le bon fonctionnement, c'est-à-dire la marge d'immunité.

Les mythes ont la vie dure : l'interconnexion des terres et des masses pose souvent un problème psychologique. Il est alors bon de connaître les textes légaux sur la sécurité des personnes pour s'en servir en CEM.



On est souvent amené à expliquer des évidences. Par exemple que plus une terre séparée est “propre”, plus son potentiel est différent de celui des masses, donc plus elle est sale !

Il est fréquent qu’une première correction soit insuffisante pour résoudre le problème. Ce n’est souvent que quand le dernier câble d’un coffret est filtré ou blindé que le fonctionnement de l’appareil devient sûr. Le dépanneur doit poursuivre son travail, sans se décourager, jusqu’à ce que l’objectif soit atteint.

Un dépanneur novice essaie les remèdes un par un, les ôte si le résultat est décevant et finalement n’aboutit à rien. Un dépanneur expérimenté essaie un remède qu’il laisse en place même s’il est insuffisant. Il en ajoute un autre et ainsi de suite jusqu’à satisfaction. On s’aperçoit alors que les premières corrections, bien qu’insuffisantes, étaient en fait nécessaires.

Ce n’est que si une correction présente des inconvénients sérieux que sa suppression peut être envisagée avant que l’objectif ne soit atteint. Même dans ce cas, il peut être souhaitable de la laisser en place. Par exemple un filtre HF sur une entrée symétrique risque de déséquilibrer la liaison en créant de la ronfle. Un conducteur de masse supplémentaire peut alors limiter le bruit BF à un niveau supportable. Le fonctionnement devient alors sûr à toutes fréquences : le filtre limite les parasites HF et maillage des masses assure l’équipotentialité BF.

Lorsque l’objectif est atteint, les modifications peu efficaces peuvent être supprimées. Après la correction d’un système, nous ne conseillons pas d’ôter les modifications inutiles. Le coût du temps passé pour cela excède souvent celui du matériel que l’on peut récupérer. L’optimisation est en revanche indispensable à la mise au point d’un équipement industrialisé en grandes quantités.

N’oublions jamais de mesurer (ou au moins d’estimer) la marge d’immunité que l’on obtient. Il convient de vérifier que l’objectif que l’on s’était fixé n’est pas atteint avec une marge de sécurité trop faible. Il est souvent difficile de garantir une marge dépassant un facteur trois en amplitude, mais une marge d’un facteur deux représente une valeur raisonnable et une marge inférieure à un facteur 1,4 est normalement insuffisante.



Les cas où une marge de sécurité d'environ 1,5 suffit sont ceux où la source, le couplage et la victime sont stables et connus. Tel est le cas de la diaphonie entre pistes de circuit imprimé pour une technologie figée (temps de transition connus).

Expliquer et conseiller

Dès qu'un novice trouve un remède suffisant, il est souvent si content qu'il plie bagages sans autre forme de procès. C'est une erreur. Une intervention CEM n'est pas terminée par la mise en place de corrections satisfaisantes. Le sixième réflexe, une fois le problème techniquement résolu, est d'expliquer les phénomènes qui causeraient les dysfonctionnements, les erreurs d'installations, le principe des remèdes apportés et leurs marges de sécurité.

Même en cas d'insuccès, un dépanneur doit prendre le temps d'expliquer la cause des ennuis et les raisons qui limitent l'efficacité des remèdes apportés. Il faudrait toujours terminer l'exposé en donnant quelques conseils pour que les difficultés ne réapparaissent pas. Cet exposé nécessite parfois un peu de tact. Il serait inutile et maladroit de charger la concurrence outre mesure !

Nous avons autrefois résolu un problème qui, par manque d'explications, réapparut rapidement. Nos corrections avaient été purement et simplement supprimées pour une question... d'esthétique ! Il nous fallut même prouver que de nouveaux dysfonctionnements étaient indépendants de notre première intervention. Depuis, nous prenons systématiquement la peine d'expliquer chaque correction apportée. Il est assez fréquent qu'une solution, selon nous à peine suffisante, soit jugée par le client comme un progrès tout à fait satisfaisant.

Pour les explications techniques, surveillons notre vocabulaire. Il importe d'employer des mots simples et justes, mais évitons autant que possible le terrible jargon CEM. Evitons par exemple de dire : "nous avons gagné 14 décibels en filtrant le mode commun HF par une capacité de 10 nanofarads dont la self de câblage a été maintenue inférieure à 20 nanohenrys", disons simplement : "un petit condensateur câblé court à la masse nous a fait gagner un facteur 5".

Les notions de mode commun, de champs, et d'inductance mutuelle sont souvent inconnues des exploitants. Ce n'est pas en montrant que l'on est un virtuose des décibels que l'on rend service à son interlocuteur. Au



contraire, des analogies, des images parlantes et des petits schémas seront appréciés. Une explication claire sur l'origine des ennuis réduit le risque de devoir revenir. Diffusons la notion d'équipotentialité.

Les bons spécialistes de CEM, malgré une étonnante diversité de caractère et de formation, ont tous en commun trois vertus remarquables: ils savent se faire comprendre de tous, ils maîtrisent les ordres de grandeur et ils sont humbles devant celui qui cherche à comprendre. Dans tous les cas, efforçons nous de simplifier en allant droit à l'essentiel, et tant pis pour le purisme.

En CEM, il est possible de noyer le poisson par des phrases creuses. Si le mot juste éclaire, le mot approximatif assombrit les évidences. Veillons par exemple à ne pas enfondre les mots "terre" et "masse". Evitons les expressions "terre locale" et "mise à la terre" mais disons "masse locale" et "mise à la masse". Evitons de parler de "panne de courant" mais disons plutôt de "manque de tension", etc.

Un second intérêt à l'explication en fin d'intervention est qu'en cas de nouvelle difficulté, la confiance dans "son dépanneur" peut arranger les choses. Si les compétences ne sont guère apparentes lorsqu'on travaille sur du matériel, elles deviennent évidentes pour tous lors d'un exposé technique.

Dans nos premières années en CEM, il nous est arrivé d'installer des corrections sans en maîtriser l'ensemble des conséquences, et pour tout dire sans saisir le fond du problème. C'est le troisième intérêt à l'exposé en fin d'intervention : il permet d'éclaircir les phénomènes, même pour le dépanneur ! Ce qui se conçoit bien s'explique clairement. La réciproque est souvent vraie.

Lorsque nous recevons un appel téléphonique d'un ancien stagiaire, nous l'écoutons exposer son problème. Ceci suffit environ une fois sur deux pour débloquer la situation, sans que nous ayons à exposer notre analyse ni même à proposer des scénarios. Il n'y a aucun mystère insondable en CEM. Il y a beaucoup de problèmes mal posés et de grands besoins de clarté.

Lors de l'exposé final, il est bon d'insister sur la notion d'équipotentialité par opposition au "potentiel absolu de la terre" qui n'a aucun sens, sur l'importance du raccordement des câbles blindés et de leur connectique.



Un petit couplet sur le maillage des masses est souvent souhaitable. Enfin si l'interlocuteur est intéressé on peut exposer, chiffres à l'appui, l'efficacité des effets réducteurs.

Conserver des traces

Un dernier automatisme, éventuellement différé, est de conserver une trace écrite de chaque intervention. Même quand un compte rendu n'est pas exigé, il importe de garder, au moins au brouillon, la date, le nom des personnes rencontrées, le matériel sur lequel on est intervenu, les symptômes constatés et les effets induits, le résultat des mesures effectuées avant et après correction, etc.

Nous conseillons d'établir des fiches d'intervention qui serviront à simplifier de futures analyses en proposant des solutions aux divers problèmes déjà rencontrés et à transmettre ses connaissances. Nous conseillons de rédiger trois types de fiches : des "fiches de perturbateur", une par type d'équipement perturbateur, des "fiches de perturbation", une par nature de perturbation électromagnétique et des "fiches de problème", une par symptôme. Le contenu et la façon d'exploiter ces fiches sont détaillés au chapitre suivant. Un quatrième jeu de fiches est intéressant. Il s'agit de "fiches de choix" qui serviront à diffuser, en interne (au service achat) et en externe (aux clients), les performances et conditions d'emploi des principaux composants spécifiques à la CEM.

Les dépanneurs oublient trop souvent de rédiger et de classer le résultat précis de leurs interventions. Les conséquences de cette négligence ne sont sensibles qu'à terme. Sans traces écrites, si de nouveaux problèmes surgissent, il sera plus difficile d'évaluer la part due au vieillissement des corrections, à celles de l'évolution du système et à celles des modifications de l'environnement.

Pour résumer la méthode générale à suivre pour toute intervention en CEM, on devrait analyser techniquement le problème après s'être informé de la situation et avoir dialogué avec le plaignant et le personnel d'exploitation. Après un contrôle visuel de l'installation, on propose des corrections que l'on applique et dont on contrôle l'effet. On poursuit jusqu'à atteindre l'objectif défini.

On devrait alors expliquer clairement l'origine des dysfonctionnements puis proposer quelques conseils de maintenance. Enfin, chez soi, on devrait consigner par écrit les points clés de l'intervention. Nous ne connaissons pas de problème de CEM qui résiste à cette méthode de travail.



Analyse des problèmes

Nous traiterons dans ce paragraphe de la partie technique de l'intervention. Il serait illusoire de proposer une méthode détaillée pas à pas pour résoudre à coup sûr une difficulté de CEM. Il y a une dizaine d'années nous avons eu l'idée de coucher sur le papier l'expérience acquise sous la forme d'un organigramme "si, alors, sinon". La page de format A4 se prolongea en format A3 puis en A2. Nous étions satisfait de ce travail et avons décidé, la fois suivante, de l'utiliser pour effectuer l'analyse. Ce fut un échec : le problème était différent de ceux déjà recensés. Même les logiciels d'intelligence artificielle de sociétés réputées, avec un puissant moteur d'inférence et une base de donnée établie sur l'expérience d'excellents spécialistes n'ont donné à ce jour que des résultats risibles.

En CEM, le bon sens restera irremplaçable longtemps encore. Cela signifie qu'il est nécessaire de travailler avec méthode, de simplifier les configurations, de déterminer par où les perturbations sortent et entrent, c'est-à-dire identifier les "points d'entrée", et enfin de déterminer comment elles se couplent.

Les équations de Maxwell sont antérieures à la découverte des ondes radio. Théoriquement elles marchent bien mais elles sont inutiles aux corrections. Rappelons que les parasites ne sont que de simples signaux électriques qui s'ajoutent aux signaux utiles. Ils se propagent en conduction sur les fils et en rayonnement dans l'air. Ils sont souvent bien reproductibles. Si leurs effets sont parfois surprenants, surtout en numérique, les parasites sont toujours stupides. Une impulsion électromagnétique que n'a pas la tessiture d'un coup de cymbale et un bruit de fond ne sera jamais un concerto pour clarinette !

L'analyse d'un problème de CEM tient en trois points. Elle consiste à identifier la source puis à déterminer le ou les couplages prépondérants et enfin à évaluer la résiduelle maximale que la victime peut supporter. Tout problème, quel qu'il soit, est alors virtuellement résolu.

Une source est assez simple à analyser lorsqu'elle est identifiée. Il suffit de procéder à la triple dichotomie: perturbation conduite ou rayonnée, entretenue ou impulsive et enfin BF ou HF. On peut éventuellement mesurer son amplitude.

Quelques essais simples à entreprendre

En CEM, il faut avant toute chose décomposer les problèmes. La simplification d'un système dépend de sa nature et de ses contraintes d'exploitation. Suggérons une liste de quelques opérations simples qui peuvent être effectuées pour guider l'analyse. Le résultat des essais restreignent les hypothèses, ce qui permet de tendre vers une solution adaptée. Par exemple :

- Vérifier que la terre est unique
- Vérifier la séparation raisonnable des câbles de natures incompatibles
- Vérifier la séparation des signaux incompatibles dans les connecteurs
- Vérifier le bon montage des filtres HF
- Vérifier le bon montage des limiteurs de surtensions
- Utiliser un logiciel de test adapté
- Mettre hors-service les fonctions secondaires
- Raccourcir les liaisons de masse
- Débrancher l'un après l'autre tous les câbles possibles
- Utiliser des câbles blindés aux connecteurs sûrs
- Ajouter des manchons de ferrite sur les câbles non déconnectables
- Modifier le cheminement des câbles suspects
- Éloigner les équipements à priori perturbateurs
- Améliorer localement (autour des problèmes) le maillage des masses
- Réduire les fuites de blindage (par du papier aluminium par exemple)
- Alimenter tout le système à partir du même réseau électrique
- Ajouter un transformateur d'isolement
- Alimenter un périphérique perturbé par un enrouleur peu déroulé
- Placer les périphériques perturbés en mode local (ou en auto-test)
- Doubler les câbles perturbés par un fil de masse relié aux deux bouts
- Filtrer ou blinder tous les câbles à la masse sur la même tôle
- Utiliser un "transient plate" plaqué au sol en référence de potentiel
- Ne pas modifier le réseau de terre (s'il est unique !)

Certains essais entrepris pour analyser un problème ressemblent à des remèdes. Sur site, il n'est pas rare d'intervenir selon une démarche différente de celle que l'on prévoyait à priori, sans en compromettre le succès. Pour réussir en CEM, il y a souvent plusieurs voies d'efficacité comparables.



Mesures de perturbations

Il y a deux types de mesures en CEM : les mesures d'émission et les tests d'immunité. Les deux sont utiles en dépannage. Attention, les mesures en HF sont souvent délicates, toujours entachées d'incertitudes et même parfois d'erreurs systématiques. Même des professionnels commettent des erreurs lors de mesures CEM. Intéressons nous tout d'abord aux mesures en émission.

Il est clair qu'une mesure que l'on ne sait pas exploiter n'a aucun intérêt, mieux vaudrait passer directement à l'analyse. Une mesure n'est qu'un outil, pas une fin en soi. Nous ne conseillons d'effectuer des mesures sur site que si l'opérateur est à la fois bien entraîné, doté d'un matériel adapté et bien maîtrisé, et si les conditions de mesure sont reproductibles. En émission, seules des mesures en conduction ou en champ magnétique répondent souvent à ces conditions.

Il vaut mieux conserver son calme et sa concentration pour effectuer des mesures qualitatives sur les couplages que de gaspiller son temps à des mesures quantitatives plus ou moins douteuses. En bref il faut abandonner l'idée que les mesures de CEM sur site sont indispensables. Elles constituent au mieux l'un des moyens d'analyse des problèmes. Enfin, gardons à l'esprit qu'une mesure relative de type "avant - après" est toujours plus précise qu'une mesure absolue.

Sur site il est pratiquement impossible de respecter les conditions de mesures de laboratoire : environnement bruyant, pas de réseau de stabilisation d'impédance de ligne, pas de référence de potentiel comparable à la tôle d'une cage de Faraday, etc. Il faut donc accepter de s'éloigner des conditions normalisées. A l'inverse, la précision des mesures sur site n'est pas critique. Pour évaluer l'amplitude des perturbations, des capteurs bricolés suffisent le plus souvent.

Une mesure d'émission est au moins composée d'un capteur, d'un câble et d'un mesureur (oscilloscope, analyseur de spectre...). La qualité d'une mesure ne peut pas être meilleure que le plus mauvais de ces trois éléments, sauf si une calibration réduit l'incertitude de la mesure. Un organe d'enregistrement ou d'impression peut compléter le dispositif. En CEM, les mesures nécessitant un traitement différé sont rares. Les résultats sont généralement disponibles de suite.

Capteurs de mesure

Les mesures des courants sont souvent plus intéressante que celles des tensions. Tout d'abord la notion de courant reste significative jusqu'au GHz alors que celle de d.d.p. perd son sens lorsque la distance entre les points de mesure excède le dixième de la longueur d'onde. De plus, une pince de courant conserve les isollements galvaniques et ne perturbe pratiquement pas les circuits mesurés.

Pour la mesure du courant BF sur les câbles, nous conseillons une simple pince ampèremétrique de type "Chauvin Arnoux" de rapport 1000/1 chargée par une résistance de $10\ \Omega$. Ainsi chargée, elle a une sensibilité de 10 mV/A . La bande passante de ce dispositif est étonnante : 20 Hz à 100 kHz sans problème (et même 1 MHz centrant bien la pince autour du conducteur). Pour la mesure de faibles courants, il est possible de remplacer la résistance de $10\ \Omega$ par une charge de $50\ \Omega$. La sensibilité passe à 50 mV/A sans autre inconvénient que l'augmentation de la fréquence de coupure basse à 50 Hz au lieu de 20 Hz environ.

Un problème posé par une pince ampèremétrique BF est que son impédance de sortie est très élevée. Ces pinces n'étant pas blindées, elles sont sensibles au champ électrique. Le bruit HF peut être limité par un filtre passe-bas. Si la sortie n'est pas protégée par diodes tête-bêche, il ne faut jamais ouvrir le circuit en mesure : une sévère surtension serait à craindre. Si elle est protégée par des diodes, la tension délivrée ne peut pas excéder $0,5\text{ volt}$ environ. Pour savoir si une pince BF est saturée par un courant continu, il suffit de vérifier qu'elle "colle". Sa fréquence de coupure basse peut alors passer à plus de 100 Hz .

Pour la mesure des courants HF, il faut utiliser une pince de courant blindée, c'est-à-dire prévue pour être chargée par un câble coaxial terminé par $50\ \Omega$. La sensibilité typique d'une telle pince est de l'ordre de 1 mV/mA avec une bande passante à peu près plate entre 1 et 100 MHz . Celui qui estime que son coût, voisin de 5 kF , est exagéré peut en réaliser une honorable à partir de deux demi tores de ferrite du commerce bobinés par 5 tours de fil. En chargeant cette pince par l'impédance d'entrée de $50\ \Omega$ du mesureur, on obtient une sensibilité de 10 mV/mA . Un entrefer limite les risques de saturation par les courants BF au prix d'une augmentation de la fréquence de coupure basse.

Les sondes de tension pour oscilloscopes devraient être utilisées avec circonspection. Elles peuvent modifier sensiblement le fonctionnement des circuits mesurés.

Trois problèmes peuvent apparaître :

- ❶ Un courant perturbateur de mode commun risque d'être collecté par la tresse du câble de sonde. Ce courant i peut perturber le circuit.
- ❷ L'impédance de la sonde n'est pas infinie : elle est de l'ordre de 15 pF. La forme des signaux rapides en est altérée.
- ❸ La mesure n'est pas coaxiale. Le fil de masse d'impédance Z embrassant un flux magnétique ϕ ajoute à la mesure la tension d'erreur : $Z \cdot i + d\phi/dt$.

La compensation en fréquence d'une sonde de tension doit être réajustée à chaque changement d'oscilloscope. Pour les utiliser, on doit souvent placer les cartes électroniques sur prolongateur... alors gare à l'immunité ! Une carte rapide qui fonctionne sans problème sur prolongateur est révélateur d'un fond de panier sain. Nous conseillons d'utiliser des prolongateurs de demi-longueur pour limiter les problèmes de désadaptation de ligne et d'impédance commune.

Pour mesurer le champ magnétique BF il est facile de se bricoler une sonde. Nous avons réalisé une bobine de 1200 spires et un ampli intégrateur dont la réponse est plate de 30 Hz à 30 kHz, avec une sensibilité de 0,1 V/A/m.

Pour mesurer le champ magnétique local HF, nous utilisons des petites boucles de Mœbius réalisées avec de vieux câbles coaxiaux en panne. Devant les clients nous utilisons les sondes de la petite valise Emco. Elles marchent exactement comme nos boucles bricolées mais ont un aspect plus professionnel !

Les mesures de champs HF devraient selon nous n'être effectuées que par des spécialistes dont la formation sort du cadre de ce petit guide. Les antennes dites à "large bande" n'ont une bande passante ni très plate ni très étendue : moins d'une décade pour une "biconique" ou une "log-périodique". Elles sont en outre volumineuses et coûteuses. Nous suggérons au spécialiste CEM de se bricoler un capteur à bande large avec un étage d'entrée à haute impédance (transistor 2N4416) et un fouet de 10 cm. Un tel capteur n'est pas très sensible mais, avec sa réponse plate de 100 kHz à plus de 100 MHz, il convient aux mesures de la plupart des champs forts jusqu'à 30 V/m.

De coûteux capteurs sont proposés dans le commerce, en particulier des capteurs de "rayonnement des câbles" (en fait de courant de mode commun) ou des "sondes de champ proche". Ces capteurs fournissent des si-



gnaux que personne, pas même un spécialiste, ne peut exploiter car leur corrélation avec les problèmes réels est trop douteuse. En effet, l'amplitude des champs varie avec l'éloignement selon une loi de décroissance comprise entre $1/d$ et $1/d^3$ selon la source. Evitons d'investir dans ce genre de miroir aux alouettes.

Phénomènes permanents

Les perturbations permanentes sont les plus simples à mesurer et leur source est facile à identifier. Sur site, nous préconisons l'emploi d'un oscilloscope classique, analogique, avec une bande passante d'au moins 100 MHz. Il est heureusement rare d'avoir à mesurer sur site des perturbations à fréquence supérieure à 300 MHz. Les oscilloscopes analogiques modernes restent simples à utiliser (pourvu que ça dure) et leur synchronisation ne pose plus de problème.

Méfions nous des oscilloscopes numériques. Ils devraient être réservés à l'enregistrement de phénomènes transitoires BF. Lorsque l'on mesure un phénomène permanent, leur algorithme de lissage donne une bonne illusion de la réalité à condition que l'énergie du signal au delà de la moitié de la fréquence d'échantillonnage soit négligeable. Dans le cas contraire, le phénomène bien connu de "repliement de spectre" déforme le signal. Si une sinusoïde à 99 MHz est échantillonnée à 100 MHz, elle est affichée comme une sinusoïde à 1 MHz.

Phénomènes non répétitifs

Les perturbations à faible fréquence de répétition sont délicates à mesurer, surtout si l'occurrence des phénomènes est aléatoire. Un oscilloscope numérique à échantillonnage est utilisable mais sa fréquence d'échantillonnage et la profondeur de sa mémoire sont souvent trop faibles pour nos besoins de CEM. Pour une bande passante impulsionnelle (en monocoup) comparable à celle d'un oscilloscope de 100 MHz, il faut échantillonner à une fréquence environ dix fois supérieure, soit à un rythme de 1 G échantillons par seconde. Un tel enregistreur est gros, lourd et cher. Un tel engin propose des quantités de fonctions inutiles en CEM et son ergonomie est souvent médiocre.

Les oscilloscopes à échantillonnage sont parfaits pour enregistrer des phénomènes à basses fréquences car ils sont alors précis et permettent de puissants traitements (FFT, calcul de l'énergie, filtrages numériques divers...). En HF, nous préférons utiliser un simple oscilloscope analogique en mode déclenché, avec un appareil photo à développement instantané



ouvert en pose T. Avec une pellicule de 1 000 ASA nécessaire à l'enregistrement des grandes vitesses de balayage, la durée de pose peut dépasser une heure si l'on prend soin de bien obstruer avec de l'adhésif opaque les entrées de lumière. Seule l'illumination brève du graticule demande un petit tour de main.

La première photo est souvent ratée : le seuil de déclenchement peut être réglé trop haut et aucun balayage n'est enregistré ou au contraire la tension plein écran est trop faible et des traces seront écrêtées, ce qui est rédhibitoire. Avec une vitesse de balayage rapide, on obtient à la fois le temps de montée et la crête des impulsions. Avec une vitesse de balayage plus lente, on obtient à la fois leur amplitude crête et leur durée à mi-hauteur.

Avec un oscilloscope numérique, compte tenu de la profondeur d'échantillonnage rarement supérieure à 64 k échantillons, deux enregistrements sont généralement nécessaires pour obtenir à la fois le temps de montée et la durée à mi-hauteur des impulsions. Ce n'est que lorsque l'on connaît assez bien le signal à enregistrer que l'on peut tirer parti d'une double vitesse d'échantillonnage.

L'avantage inégalable des enregistreurs numériques est qu'ils permettent de visualiser les signaux avant le déclenchement. Pour un oscilloscope classique, la prévisualisation est limitée à la durée de sa ligne à retard, soit typiquement une dizaine de nanosecondes. Une telle durée n'est convenable que pour des impulsions à front très raide : décharges électrostatiques ou amorçages par exemples.

Le risque majeur quand on enregistre un phénomène à faible fréquence de récurrence est de déclencher sur de faibles niveaux et de ne pas observer les impulsions réellement gênantes : celles rares et de forte amplitude. En effet, on risque de définir un faux problème et de ne pas aboutir. Il est souhaitable, quelle que soit la mesure de CEM, de connaître à priori les ordres de grandeur des phénomènes à mesurer.

En environnement standard, pour le courant de mode commun impulsionnel sur un câble, nous conseillons à priori de ne pas déclencher en dessous de 1 A et de ne pas saturer l'enregistreur en dessous de 10 A. Pour une tension de mode commun aux bornes d'un isolement galvanique, nous conseillons de ne pas déclencher en dessous de 100 V et de ne pas saturer jusqu'à 1000 V. Les premiers enregistrements effectués sur une durée suffisante permettront de retoucher ces seuils dans un sens ou dans l'autre.



Enfin méfions nous des algorithmes numériques de lissage des enregistreurs numériques (en $\sin x / x$ par exemple). Ces interpolations donnent l'illusion de pouvoir zoomer sans limite de résolution sur le front de montée. Ce que l'on observe est souvent plus proche du temps de montée mathématique de l'interpolation que de la réalité physique.

Matériels de mesure conseillés

Nous recommandons de n'utiliser que des matériels aux limites bien connues, même s'ils sont modestes ou anciens. Attention aux matériels ultramodernes, interfacés IEEE, avec des quantités de menus, traceurs couleurs mais... loués en urgence depuis la veille. Il est difficile de maîtriser rapidement sur site tout ce qui n'est pas directement accessible du bout des doigts en face avant. Il serait catastrophique d'apprendre le pilotage à tâtons devant le client ! Selon nous, l'ergonomie des vieux matériels avec quelques gros boutons valait bien celle des tableaux de bord modernes qui ressemblent à ceux des jets.

Tous les appareils de mesure modernes sont commandés par microprocesseur. Les problèmes de "firmware" (logiciel interne) de ces matériels sont nombreux, cachés et souvent trompeurs. La détection des "bogues" est longue, elle nécessite beaucoup d'attention et une bonne maîtrise des mesures. Une certitude est qu'il reste toujours au moins un problème caché de plus que ceux déjà identifiés !

Les analyseurs de spectre sont coûteux, délicats et fragiles. Ils nécessitent des précautions pour ne pas brûler leur atténuateur d'entrée ou leur mélangeur pour mesurer des perturbations entretenues. Ils sont inadaptés aux mesures impulsives. En dépannage, ils sont par chance rarement utiles.

Nous suggérons de ne voyager qu'avec les matériels de mesure nécessaires. Les voyages dit-on forment la jeunesse... pour les personnes c'est possible, mais ils vieillissent les matériels à coup sûr. Ce ne sont pas les matériels les plus coûteux qui voyagent le mieux. Nous sommes tentés de prétendre le contraire.

Le matériel de mesure minimum pour une intervention CEM classique est un oscilloscope d'au moins 100 MHz, un multimètre numérique à 20000 points, si possible efficace vrai et 100 kHz de bande passante, un capacimètre de 0,1 pF de résolution, une pince courant BF et une HF, une



sonde de tension par 10 et une par 100, une boucle de Moebius et toute la petite quincaillerie : câbles coaxiaux 50 Ω , charges de passage et atténuateurs 50 Ω , conversions BNC, pinces crocodile isolées, grippe fils...

Nous utilisons aussi le détecteur de courants transitoires HF type MC 20 et parfois le détecteur de décharges électrostatiques ES 52 (moins de 7 kF chacun, de la Société Delef à Sainte-Foy-les-Lyon). Enfin, deux antennes actives bricolées maison, une pour le champ magnétique BF et une pour le champ électrique HF, complètent souvent notre matériel de mesures.

Tests d'immunité sur site

Analyser un problème aléatoire mal reproductible ou de source inconnue n'est pas commode. Le plus simple est de reproduire un effet comparable en injectant des perturbations calibrées et si possible normalisées. Il est alors possible d'améliorer l'installation pas à pas jusqu'à la résolution du dysfonctionnement.

Les tests d'immunité sur site sont souvent risqués, ils sont parfois dangereux. Il importe d'informer le responsable du système des risques du test... avant de lui demander avec diplomatie de bien vouloir les accepter. Dans tous les cas, il importe de commencer par injecter des niveaux de faible amplitude pendant une durée suffisante, dans chaque polarité pour les impulsions. On vérifie le bon fonctionnement avant de monter progressivement le niveau. Dès qu'un dysfonctionnement apparaît, il est sage de ne pas poursuivre le test et de ne pas essayer un niveau de sévérité supérieur.

Les deux qualités essentielles d'un test d'immunité sur site sont d'être normalisé et reproductible. Un test non normalisé est facile à contester. S'il est mal reproductible, il est purement et simplement inutile. De nombreuses causes de dispersion rendent les tests d'immunité délicats à reproduire :

- L'immunité varie avec le nombre d'impulsions et la durée du test.
- L'immunité varie avec le mode de fonctionnement des équipements.
- L'immunité varie avec les logiciels de contrôle utilisés.
- La composition des systèmes, donc leur immunité, varie dans le temps.
- L'environnement des équipements, donc leur immunité, varie dans le temps.

- Les natures, les longueurs et les connectiques des câbles varient dans le temps.
- La géométrie des câblages; la diaphonie en particulier, varie dans le temps.
- La visibilité des défauts varie selon les conditions d'utilisation.
- L'évaluation des erreurs est souvent subjective.
- Un petit défaut (d'affichage par exemple) peut en cacher un gros.
- Deux défauts peuvent se compenser ou se masquer l'un l'autre.
- Les matériels les plus sensibles sont souvent des organes provisoires.
- Les générateurs, mêmes normalisés, n'ont pas tous la même sévérité.
- Il est impossible de reproduire sur site l'environnement normalisé.
- Sur site, on ne dispose pas des moyens performants des laboratoires CEM, etc.

A ces problèmes gênants de dispersions s'ajoutent des risques de défauts plus ou moins graves. On en découvre de nouveaux presque à chaque intervention. Sur site, on cherche à reproduire les dysfonctionnements constatés. On doit aussi s'attendre à détecter quelques autres dysfonctionnements. Parmi les effets, permanents ou non, des tests d'immunité, citons les plus fréquents :

- Dérives de mesures ou de commandes, dans un sens ou dans l'autre.
- Augmentation du taux d'erreur ou du bruit, perte de sensibilité.
- Comptages anormaux (incrémentation, afficheurs, codeurs...).
- Défauts de synchronisation, ralentissements ou accélérations.
- Pertes de liaison (numérique, radio, téléphone, reports à distance...).
- Bruits plus ou moins inquiétants (crépitements, ronflements, sifflements...).
- Blocages de claviers, extinction d'affichages, gel de curseurs...
- Plantages numériques divers (durables ou non, nécessitant ou non un reset).
- Fausses alertes, déclenchements intempestifs d'alarmes.
- Mises en repli, arrêt d'urgence (plus ou moins "propres").
- Mises en route intempestives, emballements divers, ouverture de vannes...
- Pertes de données, perte de programme, destruction de fichiers.
- Destruction d'un composant d'interface (I/O, driver, buffer...).
- Destruction totale d'un équipement (par excès de tension d'alimentation).
- Perturbations d'autres équipements installés au voisinage.



Ces dysfonctionnements peuvent varier avec la polarité des impulsions ou avec la fréquence des perturbations. Compte tenu des risques, des tests d'immunité CEM sur site ne se justifient que pour l'une des quatre raisons suivantes :

- ❶ Valider la bonne installation d'un système et de ses protections.
- ❷ Vérifier une performance contractuelle ou contrôler d'éventuelles dérives.
- ❸ Identifier les points faibles pour analyser les problèmes de CEM.
- ❹ Optimiser les remèdes et évaluer leur marge d'immunité.

Les tests d'immunité sur site sont proches des tests de validation CEM. Un test de validation consiste à appliquer de façon reproductible des perturbations électromagnétiques calibrées, généralement contractuelles, selon une procédure définie pour vérifier l'immunité du système et la pertinence de ses réactions. Un test sur site est souvent moins bien défini qu'un test de validation.

Équipement ou système ?

La première question à se poser avant un test d'immunité est "quel matériel teste-t-on" ? Doit-on en effet effectuer le test sur un équipement isolé ou sur le système complet ? La réponse ne va pas de soi. Les équipements de tests pour les essais de systèmes complets et leurs méthodes d'essais sont d'un coût et d'une mise en œuvre impressionnants. Certains systèmes de test doivent être transportés sur site par plusieurs camions, avec des containers à peine soulevés par le plus gros hélicoptère de Sikorski.

Les normes de CEM prévoient de ne tester que des équipements. Ce choix raisonnable pose la question cruciale : quels équipements périphériques doit-on choisir ? Deux équipements peuvent être testés conformes alors que leur interconnexion rend le tout non conforme. De plus, le nombre de combinaisons d'équipements pour composer un système opérationnel est souvent considérable. Le constructeur sérieux se contente de tester l'immunité de ses matériels avec les périphériques de la même catégorie les plus largement diffusés.

Sur site les tests d'immunité en conduction seront effectués câble par câble. L'expérience montre qu'une agression simultanée n'apporte généralement aucune information supplémentaire pour l'immunité aux perturbations industrielles. Au contraire, une agression simultanée (une



décharge électrostatique par exemple) rend un éventuel dysfonctionnement flou. En cas de problème, il est difficile d'identifier par quel point d'entrée le système a été perturbé.

Nous conseillons sur site de commencer par tester le système complet tel qu'il est installé, dans la configuration où les dysfonctionnements ont été constatés. En cas de problème, il est souhaitable de simplifier l'installation pour identifier plus finement les points d'entrée et analyser les sous-ensembles défaillants.

Le problème de l'installation

Pour tester des équipements nécessitant des périphériques spéciaux ou non disponibles, le problème de la susceptibilité des dispositifs simulant ces périphériques est délicat. En effet, les concepteurs utilisent souvent des périphériques "maison" pour en valider le bon fonctionnement. L'expérience montre que l'instrumentation bricolée est souvent le point le plus faible de l'équipement testé. Il est nécessaire de la protéger (blindage, filtrage...). Cette protection est parfois coûteuse et souvent délicate de mise en œuvre.

Le câblage de l'équipement sous test est une autre cause de dispersion, donc de mauvaise reproductibilité des tests d'immunité. Les courants de mode commun supportés par les câbles sont la cause la plus fréquente de dysfonctionnements. Des effets réducteurs, des écrans, la longueur des câbles influent fortement sur l'immunité du système. Les normes de CEM spécifient la hauteur des câbles au dessus du plan de masse. Sur site, on est évidemment obligé de tester le système tel qu'il se présente. Il serait anormal de retrouver exactement les résultats obtenus dans des conditions normalisées !

Les conditions de fonctionnement de l'équipement sous test, les logiciels en particulier, sont une cause supplémentaire de dispersion des résultats. Pour les équipements simples il est facile d'activer l'ensemble des fonctions pour couvrir de façon satisfaisante la totalité des cas. On devrait toujours chercher à tester l'équipement pour l'ensemble de ses conditions de fonctionnement.

Les câbles normalement déconnectés, ceux ne servant qu'à la programmation ou à la maintenance par exemple, peuvent être déconnectés lors des tests. Si le client insiste, après l'avoir prévenu des risques, on peut ne

tester ces liaisons qu'à un niveau de sévérité réduit. Le but d'un test d'immunité sur site est de mettre le doigt sur les problèmes réels, ce n'est jamais de montrer que l'on sait détruire le système !

Préparation du test

Les renseignements propres à l'équipement testé, à sa mise en œuvre et à la façon de vérifier son bon fonctionnement devraient être notés dans un programme d'essais rédigé avant de commencer les essais. Il faudrait définir au moins les liaisons d'entrées/sorties, la description du câblage physique (câbles, connecteurs, mises à la masse...), les modes de fonctionnement testés et le plus important : les critères de susceptibilité. La limite de bon fonctionnement d'un équipement (la sanction) ne peut pas être définie de façon précise par les normes.

Si le travail préparatoire est insuffisant, des litiges sur l'interprétation des erreurs peut dégénérer en conflits insolubles. Il faudrait classer à priori tous les types de défauts possibles, par exemple en les répartissant en trois catégories :

- ❶ **DÉFAUTS MINEURS.** Ce sont par exemple les défauts de confort, les blocages de commandes secondaires, les erreurs détectées et automatiquement corrigées, les dégradations mineures de performances.
- ❷ **DÉFAUTS MAJEURS.** Ce sont par exemple les blocages temporaires de fonctions principales, les défauts exigeant une intervention manuelle, les erreurs détectées mais non corrigées.
- ❸ **DÉFAUTS CRITIQUES.** Ce sont par exemple les blocages de fonctions essentielles, les effets dangereux pour les personnes ou pour la mission, la perte de fichiers, la destruction de composants, etc.

Notons que ces classes varient selon le type d'équipement et selon sa mission. Pour un organe de sécurité, une erreur non détectée peut être jugée plus grave que la destruction pure et simple de l'équipement.

Pour un essai bien préparé, le compte rendu d'essai ne devrait contenir que le curriculum de l'équipement sous test et les résultats d'essais en fonction des niveaux appliqués et des conditions de fonctionnement. Les valeurs nominales et les dérives des signaux analogiques sont souvent faciles à définir et à mesurer. Pour les signaux numériques, c'est plus délicat. Pour une ligne d'entrée/sortie, il est souvent possible de définir un



taux d'erreur mais pour les signaux internes, les contrôles ne peuvent être effectués par l'équipement lui-même. Un logiciel de test développé à cet usage est souhaitable.

La durée du test

La question de la durée des tests est importante compte tenu du coût des essais sur site et de la disponibilité du système. La distinction entre tests d'homologation et test de dépannage est nette. L'objectif d'un test de dépannage est de détecter rapidement les points sensibles de l'équipement. Une recherche "manuelle" des défauts, à des niveaux non normalisés ou non, suffit. Pour un test d'homologation, le respect de la norme et du plan de test contractuel est impérative.

Pour un test en perturbations sinusoïdales il convient de s'assurer que l'on balaye chaque résonance à une vitesse assez faible pour que le logiciel de test boucle au moins un cycle durant chaque résonance. Si ce critère est peu contraignant pour les équipements dont le temps de cycle se compte en millisecondes, il devient très pénalisant pour les équipements qui bouclent en plusieurs secondes. Ainsi pour un équipement dont le logiciel a un cycle dix secondes, couvrir la bande de 26 à 1000 MHz à la vitesse de balayage de 100 kHz par cycle imposerait une durée de test supérieure à 24 heures.

Pour un test de perturbations transitoires l'ignorance, ou du moins le manque de rigueur, concernant l'aspect statistique des tests est une des causes majeures de non reproductibilité de ce type d'essais.

Tests en impulsions

Pour la plupart des équipements analogiques, les tests sinusoïdaux sont plus sévères que les tests en impulsions. Pour les équipements numériques, ce sont surtout les transitoires rapides et les décharges électrostatiques qui constituent la principale menace. Deux impulsions rigoureusement égales ne produiront pas le même effet si elles ne seront pas générées de façon synchrone avec le fonctionnement des circuits.

Pour les tests d'immunité en impulsions, le problème se pose en termes statistiques. Il convient de formuler les résultats avec la rigueur nécessaire. Pour avoir une confiance convenable dans un test statistique, il faut effectuer un nombre suffisant d'essais à un niveau donné. En décharge électrostatique, nous préconisons au moins une cinquantaine de coups par polarité.

Même si l'immunité des équipements installés n'avait qu'une dispersion négligeable, la probabilité qu'un dysfonctionnement apparaisse est croissante avec l'amplitude de la perturbation. Ainsi avant tout test d'immunité transitoire, deux paramètres devraient être clairement définis :

- ❶ La probabilité de perturber le système pour un niveau d'agression donné.
- ❷ La confiance dans cette estimation qui augmente avec le nombre d'impulsions.

Le résultat d'essai de tout test en impulsions devrait être rédigé dans les termes suivants : "l'équipement testé n'est pas perturbé de façon égale ou plus grave que celle définie plus d'une fois par 30 impulsions. Ce résultat est annoncé avec une confiance de 90 %".

Tests d'immunité CEI

Durant des années, les normes militaires ont été plus complètes et plus proches des problèmes réels que les normes civiles. Désormais, cela s'inverse. Il n'est plus rare de rencontrer des matériels qui résistent aux tests militaires mais qui pourtant sont perturbés sur site. La cause est l'immunité aux courants impulsifs HF en mode commun sur les câbles. Ce phénomène n'est actuellement testé de façon réaliste que par l'excellente norme CEI 1000-4-4.

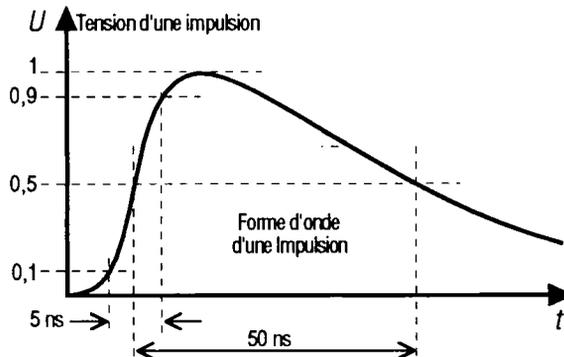
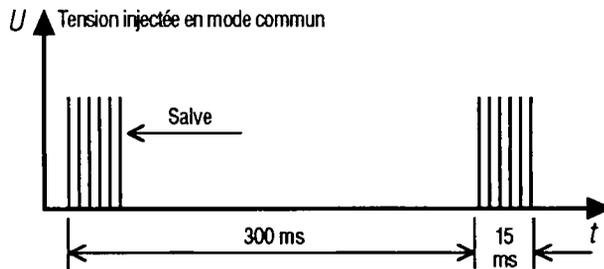
La CEI, la Commission électrotechnique internationale, a normalisé 4 types d'essais d'immunité pour tous les appareils, équipements et systèmes civils. Il s'agit des 4 normes suivantes :

- 1000-4-2 (ex CEI 801-2) : Immunité aux décharges électrostatiques
- 1000-4-3 (ex CEI 801-3) : Immunité aux champs électromagnétiques
- 1000-4-4 (ex CEI 801-4) : Immunité aux transitoires électriques rapides en salves
- 1000-4-5 (ex CEI 801-5) : Immunité aux transitoires énergétiques

Les perturbations sur site sont très nombreuses mais l'expérience montre que le seul test CEI 1000-4-4 permet de révéler la majorité, sinon la totalité, des problèmes de perturbations HF. Ce test de transitoires électriques rapides en salves (TER/S) simule la diaphonie en mode commun lors du réamorçage entre contacts secs à la coupure de courants inductifs (relais, contacteurs...).

Ce test est de mise en œuvre simple et rapide, il peut être effectué sur site par du personnel assez peu qualifié, ne nécessite pas d'investissement lourd (50 kF tout de même, mais en CEM, c'est peu de chose) et donne rapidement un résultat reproductible sur l'immunité HF globale de l'équipement testé.

Les éléments significatifs du test CEI 1000-4-4, aussi normalisé en France sous les références C 46023 et C 61115, sont la fréquence élevée de répétition des impulsions (salves de 5 kHz), la brièveté du temps de montée (5 ns) et la faible énergie des transitoires (durée de chaque impulsions de 50 ns à mi hauteur). L'impédance de sortie du générateur est de 50 Ω dans les deux polarités.



Tension de sortie définie à vide $\pm 10\%$

Impédance de sortie : 50 $\Omega \pm 20\%$ de 1 à 100 MHz

Fréquence de répétition : 5 kHz $\pm 20\%$ (2,5 kHz à 4 kHz)

Energie maximale : 4 mJ / pulse à 2 kV dans 50 Ω

Figure 3-1 : Les caractéristiques du test CEI 1000-4-4



Sur les châssis et les bornes d'alimentation, ce test prévoit une injection directe. Sur les câbles d'entrées/sorties, il prévoit une injection capacitive (manchon par 50 à 200 pF) en vrai mode commun. Le niveau de sévérité qui correspond à l'environnement industriel classique est le niveau trois, soit 2 kV sur les châssis et les bornes d'alimentation et 1000 V sur les lignes d'E/S. La sévérité correspondant à un environnement industriel sévère, au voisinage de gros contacteurs est le niveau 4, soit 4 kV sur les châssis et les bornes d'alimentation et 2 kV sur les lignes d'entrées/sorties.

Sur site, on simule le plan de masse normalisé en reliant court le générateur à une tôle (un "transient plate") d'au moins un mètre carré. Dans les lieux peu accessibles, on devra faire flotter le générateur. L'erreur sur la sévérité, environ 3 dB par défaut, permet malgré tout de mesurer l'efficacité des corrections. Attention, si le générateur est mal couplé en HF à l'environnement, il injecte des courants perturbateurs sur sa ligne d'alimentation. Habituellement, s'il est mené pas à pas, en montant progressivement le niveau, cet essai n'entraîne pas de dégradation permanente du matériel testé.

Sur site, le couplage capacitif sur les câbles s'effectue simplement en entourant chaque câble à tester par un manchon en feuille d'aluminium ménager : une largeur de 34 centimètres si le câble n'est pas blindé, la moitié s'il l'est. Injecter les impulsions sur l'aluminium avec un cordon long de 1 mètre au maximum. Pour un test rapide, une injection durant 30 secondes dans chaque polarité convient.

Lorsqu'un équipement ne supporte pas le niveau 1 (500 V sur l'alimentation et 250 V sur les câbles E/S), il serait illusoire d'espérer un fonctionnement sans problèmes. Si l'équipement résiste sans problème au niveau trois, il fonctionnera probablement sans soucis d'immunité HF, même en site mal maillé.

Commencer le test en injectant les perturbations sur la borne de terre lorsque celle-ci est accessible ou sur le châssis métallique dans le cas contraire. Le point d'injection a peu d'importance si la mécanique est raisonnablement équipotentielle. Tester ensuite l'immunité en injectant sur les bornes d'alimentation puis sur les câbles d'E/S. Ne pas oublier dans ce dernier cas de diviser la tension par deux, comme la norme le prévoit.



Le test CEI 1001-4-4 a des effets qui correspondent souvent parfaitement aux troubles constatés sur la majorité des équipements sensibles. C'est aussi un moyen de quantifier avec précision les améliorations obtenues après une correction. Un bon équipement bien installé devrait résister sans défaut grave au niveau quatre.

En pratique, il convient de veiller à quatre points délicats :

- Ce test risque de perturber un équipement sensible voisin de celui testé.
- Si le générateur doit être décollé du sol, pour tester des câbles en partie haute de baie par exemple, son plan de masse doit descendre jusqu'au sol pour s'y coupler par capacité. Du papier aluminium ou un feuillard métallique mince d'au moins 30 centimètres de largeur convient.
- Pour ne pas coucher le front des impulsions, il ne faut pas utiliser de fil d'injection de plus de 1 m ni injecter en un point distant de plus de 1 m de la baie.
- Comme pour tout test en impulsions, l'effet sur des circuits numériques est statistique. Toutefois, le grand nombre d'impulsions, 15 000 par minute, donne rapidement un résultat statistiquement fiable. En logique bipolaire, la polarité négative est normalement la plus sévère.

Les autres tests CEI ne doivent être effectués qu'en usine ou en laboratoire CEM. Ils sont mal adaptés aux tests sur site. Le test d'immunité décharges électrostatiques CEI 1000-4-2 risque de détruire le matériel, particulièrement lors d'essais sur des organes d'interface : clavier, interrupteur, potentiomètre, roue codeuse, LED... De plus, un essai indirect (décharge au voisinage) ne renseigne pas sur le point d'entrée des perturbations. Il peut même perturber à la fois en conduction et en rayonnement.

Le test d'immunité aux champs électromagnétiques CEI 1000-4-3 ne peut être effectué qu'en cage de Faraday, anéchoïque qui plus est. Il est illégal de brouiller la réception radio. En outre, il nécessite un matériel considérable : synthétiseur HF, amplificateurs puissants, robustes et à large gamme de fréquences, antennes supportant la puissance, etc.

Le test d'immunité aux surtensions énergétiques CEI 1000-4-5 risque de détruire des matériels mal protégés. De plus, il fatigue les varistances. Nous considérons que c'est un bon test pour un constructeur mais un mauvais sur site.



Problèmes les plus fréquents

Quels sont les problèmes les plus fréquemment rencontrés en site industriel ? Il est possible de dégager quelques constantes. Des perturbations énergétiques apparaissent essentiellement en conduction, principalement sur le réseau d'alimentation et sur les lignes externes au site. Les creux de tension peuvent être assez fréquents mais ils sont simples à détecter par la mise en place d'enregistreurs de perturbations. Compte tenu des liaisons différentielles et des nombreux isollements galvaniques en environnement industriel, les problèmes de boucles de masse en BF sont rares. Ils sont même de plus en plus rares.

Les perturbations rayonnées en BF sont peu fréquentes. Seul le champ magnétique est perturbateur. Il n'affecte guère, à plus de 0,3 A/m environ, que les tubes cathodiques, des têtes de lecture et les microscopes électroniques. La cause est la circulation de courants proches : courants dans les masses ou sur une ligne électrique aérienne. Une mesure de champ magnétique BF est facile et précise.

La majorité des problèmes de CEM sont HF. Les sources sont nombreuses, tant transitoires qu'entretenues. Les appareils ISM utilisant un générateur HF sont des sources faciles à identifier. L'amplitude des surtensions HF provoquées par les coupures de charges inductives surprennent souvent les installateurs. Nous comprenons qu'il soit étonnant de mesurer, plusieurs fois par jour, plusieurs ampères crête au milieu d'un fil électrique de quelques mètres, simplement posé sur le sol, raccordé à rien, ni à une extrémité ni à l'autre.

En impulsions, la foudre perturbe plus souvent un site par son rayonnement dans les grandes boucles de masse que par conduction sur les câbles externes.

Enfin n'oublions pas les décharges électrostatiques et tout ce qui y ressemble : amorçages de haute tension, contacteurs et disjoncteurs MT, etc. Dès qu'une tension dans un équipement dépasse 10 kV, des amorçages intempestifs sont à craindre. Dans le vide ou dans le SF₆, un arc a un temps de montée de l'ordre de 1 ns. Ces impulsions HF rayonnent et se couplent facilement aux circuits voisins, même ceux galvaniquement isolés. Encore une fois, le problème récurrent en CEM est celui des courants HF en mode commun sur les câbles.



Les problèmes signalés ci-dessus sont empirés par les “dix maux terribles” d’installation dont pourtant aucun n’est coûteux à éviter. Par chance, ces erreurs graves sont le plus souvent faciles et rapides à corriger :

- ❶ Les terres séparées et les variantes, telles les terres blindées...
- ❷ Les câblages en étoile autour du point décrété “potentiel propre”.
- ❸ Parasurtenseurs mal installés (reliés à la terre au lieu de la masse ou avec connexion longue).
- ❹ Goulottes conductrices non reliées aux baies ou vissées sur la peinture.
- ❺ Entassement de câbles sales en mode commun et de câbles de mesures.
- ❻ Câbles blindés numériques raccordés d’un seul côté... ou pas du tout.
- ❼ Connexion de l’écran externe des câbles par des “queues de cochon”.
- ❽ Filtres d’alimentation mal montés... voire oubliés !
- ❾ Câbles ni filtrés ni blindés ou pénétrant par plusieurs faces d’un mauvais blindage.
- ❿ Potentiel des cartes de traitement flottant.

Nous prétendons que si aucune de ces 10 erreurs n’était commise, plus de 90 % des dysfonctionnements CEM seraient évités. Sur site, la correction de ces erreurs courantes est à la base des interventions réussies.



Remèdes

La mise au point d'un système et son durcissement à un niveau standard devraient être effectués par et chez le fournisseur. Considérer que la "qualité par le service" permet de commercialiser des équipements de qualité douteuse signifie qu'on dupe doublement son client : une première fois en lui vendant un équipement de mauvaise qualité, une seconde en lui faisant payer son erreur ! Les services après-vente sont bénéficiaires, c'est connu. Une action corrective ne devrait être menée que dans des environnements particulièrement sévères.

Il ne serait pas sérieux de lister une série de recettes de cuisine à essayer l'une après l'autre. En CEM, travailler avec intelligence est nécessaire. Cela consiste à comprendre les problèmes puis à corriger, point après point, les défauts d'installation, en commençant par les plus graves. On poursuit jusqu'à obtenir le fonctionnement satisfaisant recherché, avec une marge de sécurité raisonnable. Le plus souvent les corrections des cas difficiles commencent par l'amélioration de l'équipotentialité locale, suivie par le filtrage de l'énergie, l'amélioration des reprises d'écrans des câbles, l'ajout de ferrites et, si cela ne suffisait pas, on termine par l'amélioration de l'équipotentialité des équipements.

Le circuit victime présente un avantage sur la source : il est toujours identifié. L'efficacité du remède à installer est égale à l'amplitude de la perturbation vue par la victime, divisée par son seuil d'immunité, multipliée par la marge de sécurité que l'on s'accorde, un facteur deux ou trois si possible. Il est rare d'avoir à réduire les perturbations vues par la victime de plus d'un facteur dix.

Dans une situation donnée, plusieurs remèdes sont à priori possibles. En CEM il n'y a pas de remède absolu. Il n'y a pour une configuration donnée que des remèdes satisfaisants et d'autres non. Il suffit d'appliquer les bons !

Réciproquement, lorsqu'un système fonctionne correctement, il n'est souvent pas très éloigné des ennuis. La marge d'immunité d'un système électronique est en général inférieure à un facteur 10, surtout aux perturbations HF de mode commun sur les câbles. Il est normal qu'une faible modification d'installation puisse entraîner de fortes différences de qualité de fonctionnement.



Le point d'action privilégié en dépannage est le couplage. Ce sont souvent des modifications géométriques et de petits ajouts, des contacts électriques supplémentaires par exemple, qui résolvent les grosses difficultés. Réduire un couplage suppose que l'on a déterminé lequel des six couplages élémentaires est le plus gênant. Rappelons ces six couplages : impédance commune, carte à châssis, diaphonie inductive, diaphonie capacitive, champ magnétique à boucle et champ électrique à fil. Parfois, quand tout va mal, deux ou trois couplages peuvent se superposer. Il ne faut rien imaginer d'autre... ou ce n'est plus de la CEM.

Équipotentialité locale

En dépannage, surtout contre des perturbations HF, on traite autant que faire se peut les problèmes appareil par appareil ou baie par baie. Le premier point est de définir sa *Tôle de Référence de Potentiel* (ou TRP) la frontière entre l'intérieur et l'extérieur, pour servir de référence de potentiel HF à tous les câbles. Lorsque tous les câbles sont blindés ou filtrés à une même tôle, la circulation de courants HF à travers les circuits de l'équipement est fortement réduite.

Une TRP par baie devrait être définie. C'est une tôle reliée électriquement en plusieurs points à la masse de la baie. Par défaut, une barre de masse large et courte peut convenir. Il convient ensuite de s'assurer que les câbles soient tous au même potentiel HF. Ceci est assuré soit par le filtrage de chaque conducteur à la TRP, soit par le raccordement avec contact périphérique des câbles sous écran. Attention à la peinture !

Pour améliorer le fonctionnement d'équipements qui échangent des informations, il est souvent possible d'utiliser les chemins de câbles existants. L'opération consiste généralement à gratter la peinture et à ajouter quelques vis. Le maillage par îlots permet localement de garantir une excellente équipotentialité entre matériels reliés. Un faux-plancher est souvent une référence bien équipotentielle. Il est possible en environnement isolant d'utiliser une tôle en "transient plate". Multiplions les tresses courtes entre masses.

Améliorer la mise en œuvre des circuits internes à un équipement est difficile et risqué. Le maillage avec du fil de wrapping d'un fond de panier ou d'une carte dont le plan de masse est fendu et leurs raccordements en plusieurs points au châssis peut durcir un appareil ou un rack.



Il est pratiquement impossible de faire mieux. Par exemple, multiplier le nombre de broches de 0 V entre une carte et le fond de panier est impossible sur site.

Pour l'alimentation d'une baie, un filtre d'alimentation est impératif. Un filtre secteur industriel convient, même avec un neutre en schéma IT ou avec une alimentation en 48 volts continus. Rappelons enfin que tout conducteur, quelle qu'en soit la nature, doit toujours rester proche de son retour. Ils doivent donc au minimum appartenir tous deux au même câble.

Filtres

Rappelons les trois conditions de bonne installation d'un filtre d'alimentation : assurer un contact par vissage direct sur la TRP, limiter la diaphonie entre l'amont et l'aval en éloignant les câbles à 180° et, à moins que le filtre ne soit monté en traversée de paroi, plaquer ces câbles contre la TRP pour limiter le rayonnement de l'amont sur l'aval.

Les filtres signaux posent deux problèmes fonctionnels. Contrairement aux ferrites de mode commun et aux câbles blindés, ils dégradent les signaux utiles. De plus, leur tenue diélectrique est médiocre. Au delà d'une centaine de volts ils deviennent coûteux et encombrants. Les connecteurs filtrants gigognes pour connecteurs sub-D sont faciles à ajouter sur site. Des connecteurs gigognes avec parasurtenseurs limitent le risque de destruction mais ils dégradent parfois l'immunité. Attention aussi à la différence des capacités parasites qui peuvent ruiner la symétrie d'une liaison différentielle à haute réjection du mode commun.

Le filtrage fil par fil à la TRP est de mise en place assez difficile, surtout sur site. Chaque conducteur devrait passer à travers un composant de filtrage directement fixé sur la TRP. Les traversées capacitives fonctionnent bien mais forer la TRP sur site puis souder chaque fil n'est pas commode. Il est très rare d'avoir à ajoute sur site des filtres de traversée de paroi.

Câbles sous écran

Rappelons les quelques points clés concernant les liaisons par câbles blindés.

- Pour être immunisée contre les perturbations BF, une liaison doit être soit galvaniquement isolée, soit symétrique avec un amplificateur à fort CMRR.
- Un câble blindé dont l'écran est relié à un seul bout ne protège que du champ électrique BF et de la diaphonie en mode différentiel.
- Un câble blindé dont l'écran est relié des deux côtés protège en plus des perturbations HF à la fois conduites et rayonnées.
- Relier l'écran des deux côtés lance un courant qui peut induire, si le câble n'est pas symétrique, une petite tension parasite BF en série avec les signaux.
- L'effet réducteur d'un câble blindé, considérable en HF, n'est pas meilleur que celui de sa connectique. Celle-ci devrait assurer un écoulement périphérique des courants de mode commun à la TRP.
- L'effet réducteur d'un écran en feuillard métallisé varie selon la constitution du câble, mais elle est toujours moins bonne que celui d'une tresse.
- Les câbles à haute immunité exigent une excellente connectique et de parfaites reprises de masse périphériques aux TRP. Ils sont un luxe souvent inutile.
- Les enveloppes conductrices (goulottes, tablettes, platelages...) en contact tôle sur tôle de bout en bout et vissées aux baies constituent une alternative au blindage des câbles vis à vis des perturbations extérieures. Attention toutefois à la diaphonie entre câbles.
- Dans le doute, relier les écrans de câble à la masse mécanique des deux côtés. C'est la bonne règle dans plus de 90% des cas. De plus, il est plus facile d'isoler un écran que d'ajouter une reprise de masse périphérique après coup.

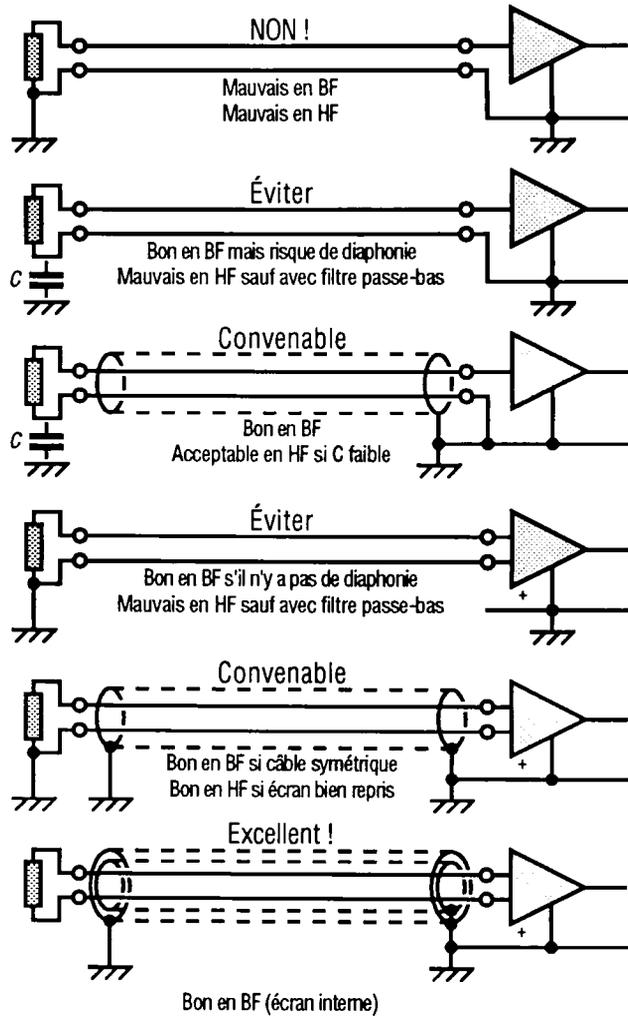


Figure 3-2 : Liaisons entre capteurs et électronique

En correction, il est possible d'utiliser sur site une gaine de surblindage de type "Zippertubing". Les reprises de masse devraient s'effectuer de façon périphérique et non par un fil de reprise. Une alternative est d'utiliser un rouleau de tricot (en monel par exemple) pour surblinder un faisceau de câbles. Il importe de bien tendre le tricot pour lui conférer une faible résistance longitudinale.

Plaquer les câbles contre une tôle large connectée aux diverses TRP apporte un effet réducteur supérieur à 10 jusqu'à 100 MHz. Pour améliorer l'efficacité d'une grille de masse, il suffit de réduire la dimension de la maille en dessous du trentième de la longueur d'onde.

Ferrites

L'ajout sur site de tores de ferrite autour d'un câble est une méthode commode de protection en mode commun HF. L'efficacité d'un tore est typiquement d'un facteur deux à cinq selon le nombre de tours, ce qui suffit assez souvent. C'est la seule méthode possible en absence de TRP, d'écran ou de filtre. Des ferrites autour d'un câble ne dégradent pas les signaux utiles (en mode différentiel).

Les ferrites sont économique : deux demi-tores formant un tore de 13 mm de diamètre intérieur plus leur coquille de maintien en plastique coûtent une dizaine de francs chez Fair-Rite ou Kitagawa. Des ferrites peuvent être ajoutées sur site, par du personnel non qualifié et sans interrompre la continuité de service. L'efficacité augmente rapidement si l'on en passe plusieurs fois le câble dans le même trou (comme le carré du nombre de passages en BF).

Pour obtenir une efficacité optimale, il convient d'abaisser autant que possible l'impédance du câble en mode commun. Une ferrite sur un câble qui ne serait chargé que par sa résistance de rayonnement serait bien moins efficace que si le même câble est plaqué contre la masse. Une longueur d'environ 50 cm contre la tôle de part et d'autre de la ferrite est souhaitable. Cette précaution réduit aussi le pontage de la ferrite par couplage capacitif HF entre l'amont et l'aval.

Pour définir une ferrite, il faudrait choisir le matériau apportant le maximum de pertes aux fréquences à amortir. Par défaut, nous préconisons de choisir des ferrites à fortes pertes, c'est-à-dire à fort μ'' , entre 10 et 100 MHz. Cette donnée n'est pas toujours disponible. Deux paramètres sont toujours fournis quel que soit le fournisseur : la résistivité et la perméabilité initiale de la ferrite. Nous conseillons de choisir un matériau à forte résistivité, supérieure à 10 k Ω .cm, surtout si le tore est gros, et avec un μ' initial compris entre 500 et 1000.

Si un tore est saturé par un fort courant, la perméabilité réelle (notée μ' , proportionnelle à sa self) s'effondre mais la perméabilité imaginaire (notée μ'' , proportionnelle aux pertes) se maintient bien. L'amortisse-



ment des perturbations HF est conservé. Attention, à froid, les pertes d'une ferrite diminuent. Ce qui est favorable pour un transformateur ne l'est pas contre les parasites.

Blindages

Jusqu'à une dizaine de mégahertz, les enveloppes habituelles (coffrets, baies...) constituent des enveloppes très efficaces en champ électrique. Par exemple, une baie contenant des batteries intercepte efficacement le champ électrique qui sinon s'accrocherait aux masses voisines en y injectant des courants de vrai mode commun. Pour profiter de cet excellent écran, il suffit de relier directement par vis (et non par un fil vert-et-jaune) cette armoire batterie à la baie électronique mitoyenne.

Améliorer l'efficacité de blindage d'une enveloppe au champ magnétique BF ou aux fréquences très élevées est difficile. L'installation de trois tresses courtes réparties sur la hauteur de la porte en tôle, du côté charnières, est à peu près la seule correction réalisable rapidement sur site. Elle peut suffire.

Les pires fuites ne sont souvent ni les fentes les plus longues ni celles les plus visibles. La densité du courant de surface coupé par la fente est la donnée essentielle. Attention aux "zones chaudes", surtout aux entrées de câbles (TRP).

Tant que le gain nécessaire sur l'efficacité de blindage n'excède pas un facteur trois environ, des méthodes simples à installer et ne nécessitant pas de modification profondes de la mécanique sont envisageables.

Sur les pièces mécaniques peintes sans épargne, utiliser une rondelle à picot de part et d'autre des pièces, avec vis et écrou H ou boulon à sertir. Sur les pièces épargnées, utiliser une rondelle contact de part et d'autre des pièces, avec vis et écrou H. Pour les grilles, les boulons à sertir de type HUCK, avec rondelles à picot, ou les boulons MONOBOLT (sans rondelle) conviennent.

Les barres de masse et les goulottes internes devraient être reliées à la masse par chaque fixation mécaniques et pas seulement par une tresse en bout. Les serrages avec rondelle contact sur protection par bichromatage (ZN8C) assurent un contact électrique, contrairement aux simples appuis. Les écrous sertis type RAPID permettent un contact sûr par le filet des vis zinguées. Un bon contact présente toujours une résistance inférieure à 1 mΩ.



Il est souhaitable de séparer les goulottes internes à une baie selon la nature des signaux : alimentations, tout-ou-rien, analogique, numérique. Leur repérage devrait être clair, surtout si l'architecture interne est appelée à être modifiée. Des isolants de couleurs différentes rendent les contrôles faciles, même pour des torons ou des faisceaux hors goulottes.

Du simple ruban adhésif aluminium (genre Tesa à colle non conductrice) appliqué à cheval au-dessus des fentes gênantes apporte, par effet de chicane, un tel effet réducteur. Au delà d'un facteur 5, la difficulté de corriger une baie est telle qu'il est plus sûr de remplacer la baie classique par une baie paradisée (Transrack, Schroff...). Elles sont heureusement rarement nécessaires.

Attention, les enveloppes équipotentielles ne sont pas magiques, elles ne valent pas mieux en HF que le plus mauvais filtrage du pire des câbles. On rencontre parfois des baies avec une porte à couteau, une ventilation par nids d'abeilles et une vitre de visualisation paradisée par un tissu conducteur, le tout vendu pour une atténuation de blindage supérieure à 100 dB en HF. Il suffit de faire pénétrer un seul câble externe par un presse-étoupe isolé pour que l'efficacité de blindage chute à moins de vingt décibels au-delà de 10 MHz !

Valise de composants

Il est nécessaire de disposer sur site, outre du matériel de mesure et des outils classiques, de composants spécifiques à la CEM en quantité suffisante. Selon le type de matériel sur lequel on intervient, le contenu de la valise peut varier. Nous suggérons d'emporter les composants consommables suivants :

- Un rouleau d'aluminium ménager, genre "Albal".
- Laine d'acier genre "tampons Jex" (pour décaper les tôles et boucher des ouvertures).
- Difficile de prétendre que la CEM n'est pas de la cuisine !
- Scotch cuivre avec colle conductrice (ça coupe les doigts, même quand on le décolle).
- Straps en feuillard de cuivre, si possible étamé.
- Kits de ferrites (Fair-Rite ou Kitagawa par exemple).
- Kits de parasurtenseurs (chez Radialex par exemple).

- 
- Gaines et câbles blindés (quelques mètres de types courants).
 - Rouleau de tricot conducteur (Jacques Dubois par exemple).
 - Condensateurs (de classes X et Y, et des polypropylène pour courants forts).
 - Filtres d'alimentation mono et triphasés pour divers courants nominaux (valises Schaffner, par exemple).
 - Quelques bandes de contacts ressorts et quelques mètres de joints conducteurs.
 - Quincaillerie : rondelles contact, vis autoformeuses, cosses à sertir, etc.
 - Graisse neutre (genre vaseline, pour éviter le corrosion).
 - Papier de verre ou toile émeri (pour gratter les revêtements isolants).
 - Bloc notes, papier millimétré, fond de courbe, fiches de composants, etc.

Le papier de verre est un des composants les plus utiles : quand on travaille en CEM, il faut souvent gratter. Il est heureusement rare d'avoir besoin de composants spéciaux et coûteux tels que des filtres coaxiaux, des vitres blindées, de la colle ou de la graisse chargée à l'argent, des nids d'abeilles, etc.

La loi bien connue de l'embêtement maximum s'applique aussi à la CEM. Pour ne pas manquer du composant nécessaire le jour où l'on en a le plus besoin, nous conseillons d'établir une liste du contenu normal de la valise et de vérifier avant de partir que rien d'important ne manque. En emportant cette liste dans la valise, elle ne se risquera pas de s'égarer et une copie pourra être laissée à un client intéressé. En fait, on n'a pas que des déboires en CEM, on a aussi souvent de la chance, surtout lorsque le flair ou l'instinct complète la réflexion.



Préparation psychologique

La CEM est encore souvent considérée par beaucoup comme un domaine proche de la magie noire, avec ses grands prêtres, ses adeptes convaincus, ses surprenants tours de mains et ses étranges amulettes appelées remèdes miracles. En fait, la CEM est désormais en Europe un objectif fonctionnel, avec des normes d'émission et d'immunité unifiées. Il importe de démythifier l'analyse des problèmes et d'optimiser sérieusement les solutions. Cette approche, certes essentiellement technique, exige une bonne compréhension des décideurs et un travail coordonné de chacun. Ce chapitre propose quelques réflexions tirées de l'expérience sur la manière d'aborder les problèmes pour éviter les erreurs et aboutir rapidement à des solutions adaptées.

Le management de la CEM

Aucun système et pratiquement aucun équipement n'est bon en CEM sans une difficile mise au point. Cette nouvelle est réconfortante : elle prouve que personne n'est maudit par le sort. Toutefois, nous ne sommes pas tous égaux devant la CEM. Ceux qui s'y prennent tôt et coordonnent leurs efforts avec méthode réussissent mieux, plus vite et pour moins cher que ceux qui s'y prennent tardivement, en confiant leur problème à un malheureux "spécialiste" malgré lui.

Que ceux qui interviennent en fin de développement pour mettre en conformité CEM un matériel pour lequel ils n'ont pas été consultés reçoivent ici nos plus chaleureuses, confraternelles et compatissantes amitiés. Les mots compatibilité et compatible sont encadrés dans le dictionnaire, par les mots compassion et compatir. Qui oserait nier le génie de la langue française ?

Une grave erreur de management est de considérer la CEM comme une affaire réservée à des spécialistes. Nous allons démontrer que beaucoup de métiers devraient être impliqués. Certes, sans un bon spécialiste et le minimum de moyens de mesures, il est difficile d'optimiser une solution technique. En France, les sociétés de conseils en CEM proposent des journées de consultation et de mesures dont les prix varient de 6 000 à 12 000 francs. Plusieurs journées sont généralement nécessaires pour mettre en conformité un équipement, même assez élémentaire.



Les erreurs de mesure en CEM sont aisées. Que l'opérateur qui n'a jamais commis d'erreur jette la première pierre. Les astuces pour tricher ou masquer les problèmes sont nombreuses, ce qui rend la tâche des vérificateurs désagréable. La tentation du camouflage est réelle si aucun mécanisme ne l'interdit. La pression "amicale" des responsables de développement ne peut être efficacement supportée par l'équipe CEM que si elle est rattachée hiérarchiquement à un responsable indépendant du développement, à l'assurance qualité par exemple.

Contrairement à la plupart des disciplines, la CEM ne se mesure qu'au niveau du système et non au niveau des sous-ensembles. Connecter bout à bout des sous-ensembles corrects en CEM ne suffit pas à obtenir à coup sûr un système correct. Certes le choix des composants importe mais l'implantation des cartes, leur tracé, les interconnexions, les alimentations, les blindages, le routage des câbles et la connectique influent de façon décisive sur le résultat final.

Le nombre de paramètres à maîtriser est tel qu'il reste à ce jour impossible, surtout en rayonnement, de garantir qu'un système sera conforme du premier coup. Pour maîtriser la CEM, il est nécessaire de coordonner de nombreux métiers : concepteurs, routeurs, mécaniciens, fabrication, intégrateurs, etc.

Cette coordination doit être entreprise avec une bonne vision technique de l'avenir. La CEM d'une gamme de produits peut être impitoyablement ruinée par un mauvais choix initial. En technique, la compétitivité des produits, leur durée de vie et finalement leur part de marché dépendent pour une large part des choix initiaux. La fonction technique est plus importante qu'il est coutume de le dire dans les salons. Certes, vu de loin, il ne semble y avoir guère de problème en technique. La preuve est que "ça finit toujours par marcher"... Oui, mais à quel prix ? Les erreurs techniques se paient sur le long terme, ce message devrait intéresser tout décideur. Ajoutons que les erreurs en technique ont souvent plus d'inertie et de rémanence que celles en management ou en commerce.

Les difficultés en CEM sont cormues. Pqur les systèmes numériques rapides, disons avec des horloges de 10 MHz et plus, les deux gros soucis sont l'émission rayonnée et l'immunité aux décharges électrostatiques. Pour les systèmes analogiques le principal problème est l'immunité aux champs HF.



Pour rendre un système compatible, l'idéal théorique est simple à définir. Il suffit de réaliser des cartes bien équipotentielles, alimentées par des tensions sans bruits, interconnectées avec effets réducteurs, reliées au monde extérieur par des connexions filaires blindées et filtrées, le tout mis en œuvre de façon équipotentielle, chaque sous-ensemble étant protégé dans un coffret sans fuites. Mais alors on serait loin de l'optimum économique.

L'objectif en CEM n'est pas de chercher la perfection mais de limiter le coût global de mise en conformité. La question clé est : "quelle est la solution CEM optimale pour ce système?". La réponse est rarement évidente. Elle dépend d'un grand nombre de paramètres techniques et commerciaux. En pratique, la planification CEM efficace d'un projet devrait comporter au moins les 10 étapes suivantes :

- Définition du projet : normes à respecter, contraintes d'environnement...
- Analyse CEM du projet : choix raisonné et à long terme des options CEM.
- Planification CEM : suivi daté du développement, avec étapes intermédiaires.
- Obtention des moyens : faire ou faire faire ? Gérer les glissements, etc.
- Collaboration CEM : participation active des spécialistes CEM au développement.
- Essai du prototype : mise au point des principales corrections CEM.
- Optimisation CEM : réduire les coûts et conserver des marges suffisantes.
- Homologation ou agrément : une formalité si l'on a respecté cette démarche.
- Suivi de production : maîtriser les inévitables et pernicieuses dérives.
- Transmission de l'information CEM : pour ne pas avoir à réinventer la poudre.

Une donnée clé est celle des quantités produites. En effet, le coût variable d'une solution CEM est d'autant plus bas que l'on investit plus de temps et de moyens pour sa mise au point et son optimisation. Avant d'industrialiser un minitel produit à un million d'unités par an, il est impératif d'économiser le dernier franc, quitte à dépenser des mois de mise au point en cage de Faraday. Pour un équipement fabriqué à l'unité il est



au contraire plus économique d'installer les circuits dans une armoire paradisée plutôt que risquer de dépenser une journée supplémentaire en mise au point. Il est donc normal que les bonnes solutions CEM se trouvent plus souvent dans des produits à large diffusion que dans les matériels industriels, scientifiques, médicaux ou militaires. Cette constatation est amplifiée lorsque les normes applicables sont devenues insuffisantes.

Ainsi présenté, tendre vers l'optimum CEM se présente comme un problème classique de gestion : jusqu'où dépenser aujourd'hui pour économiser demain ? La difficulté spécifique de la CEM est que même un excellent spécialiste est souvent incapable a priori, c'est-à-dire avant d'effectuer des mesures, de définir l'efficacité de telle ou telle solution avec une précision suffisante. Pour donner un exemple, la connaissance de la quantité à partir de laquelle une carte avec plan de masse devient globalement plus chère qu'une carte sans plan de masse est une donnée stratégique. C'est toujours plus de 1000 cuivres par an.

La solution globalement optimale n'est pas la simple mise bout à bout des solutions optimales définies fonction par fonction. Sinon les cartes sans plan de masse seraient toujours préférables, les coffrets seraient toujours en plastique, etc. Le choix des options est difficile. C'est une affaire d'expérience.

Seul un bon spécialiste en CEM peut prendre, ou du moins guider, le choix entre les diverses options techniques. Pour des systèmes complexes comportant des fonctions très différentes (analogique à très bas niveau, numérique rapide, conversion de puissance, radio...) il est même probable que l'appel à plusieurs spécialistes soit nécessaire. Trop souvent des options initiales sont prises à l'aveuglette, par des personnes techniquement mal informés. Marchons pas à pas en évitant de reporter de projet en projet les mêmes solutions dépassées ou au contraire d'opter pour un nouveau principe qui sera trop difficile à mettre au point.

Tant que la CEM pouvait être perçue comme un idéal vers lequel il était bon de tendre, tant que l'on pouvait apparenter la CEM aux qualités souhaitables telles que l'ergonomie ou l'esthétique, tant que l'on pouvait affirmer que la qualité serait fournie chez le client par le service, la CEM pouvait être considérée avec cohérence comme un domaine technique réservé à des experts. Une telle vision n'est plus possible.

La CEM en Europe est désormais un objectif normalisé, avec une commune mesure pour tous et une obligation légale de conformité. En un mot la CEM est devenue fonctionnelle. Cette évidence mérite d'être lar-

gement diffusée. Les principaux blocages en CEM sont d'ordre psychologique. Nous sommes trop peu nombreux à plaider la bonne parole mais l'évolution va dans le bon sens. De nouvelles règles d'installation et de câblage se substituent, lentement mais sûrement, aux vieilles recommandations dépassées.

Le coût de la CEM

Les décideurs, points de passage obligé pour obtenir les moyens nécessaires à la CEM, sont plus sensibles aux kF qu'aux dB. C'est un fait, adaptons-nous. Il est possible de chiffrer le coût de la CEM. Un équipement industrialisé qui respecte les niveaux d'émission et d'immunité des normes civiles coûte de 2 à 5 % de plus que le même équipement conçu sans précautions, c'est-à-dire hors normes, donc illégal. La CEM n'est pas gratuite. Ce coût supplémentaire peut atteindre 20 % du prix du matériel pour des normes particulièrement difficiles ou de faibles quantités, voire 50 % pour des normes difficiles et de faibles quantités.

Il importe de faire savoir que le coût des corrections apportées sur site est tel que ce choix est globalement presque toujours mauvais. Il convient d'ajouter aux coûts directs des remèdes tardifs les coûts des effets indirects qui sont difficiles à chiffrer mais bien réels. Citons la dégradation de l'image, les arguments offerts à la concurrence, la perte de confiance du réseau de distribution, etc. L'expérience a montré que ces effets pervers durent plus longtemps que les produits eux-mêmes. Les exemples que nous pourrions citer ne manquent pas.

Pour compléter ce sinistre tableau, est-il besoin de préciser que la CEM est peu intuitive ? L'expérience y est nécessaire et pas toujours suffisante, les meilleurs spécialistes ne sont pas toujours les plus savants, le bon sens et le "ressenti" des phénomènes physiques sont indispensables. Bien des habitudes, des idées reçues et des "règles de l'art" sont en désaccord avec la réalité des phénomènes physiques. Les programmes scolaires sont encore pratiquement muets sur l'équipotentialité et sur les phénomènes électroniques concrets de tous les jours : détection d'enveloppe, latch-up, impédance de sortie des amplis op, etc.

Ainsi, des notions ou des habitudes ancrées dans l'esprit des installateurs et des utilisateurs ont des résultats catastrophiques en HF. Citons la notion de terre "propre", les masses câblées en étoile, les raccordements à la masse des câbles blindés à une seule extrémité, les "queues de cochon",



les OV flottants... En intervention, nous devons encore convaincre la majorité des interlocuteurs que les anciennes règles de câblage doivent être corrigées. Nous revoilà dans le domaine de la psychologie...

Durcissement... du dépanneur

Parler de psychologie en CEM peut surprendre ou faire sourire. Pourtant, un dépanneur devrait être doublement armé. Il lui faut d'une part résister à la pression des plaignants, d'autre part savoir convaincre.

La préparation d'une intervention CEM ne peut pas s'improviser. Elle nécessite bien entendu la formation technique du dépanneur. Celui-ci doit appliquer ses connaissances jusqu'à obtenir une confiance suffisante dans ses actes. Rien n'est plus calamiteux qu'un dépanneur semblant sûr de lui mais qui se trouve rapidement dépassé par les événements. En CEM, il est impossible de faire illusion longtemps, même face à un client peu averti. Il importe de durcir le moral du dépanneur pour en stabiliser le comportement.

Avant toute intervention, il convient en outre de bien connaître les matériels et leurs principaux points faibles. Lorsque des symptômes sont équivalents, les causes sont généralement comparables. Des remèdes peuvent être préparés avant d'intervenir, c'est même conseillé. Si l'on pense connaître la solution, l'emploi d'un spécialiste en CEM n'est pas indispensable. En cas d'échec, pour une seconde intervention, l'économie des compétences n'est plus possible.

Durant une intervention CEM, le dépanneur doit conserver à l'esprit que plusieurs couplages peuvent s'additionner. Poursuivons nos efforts jusqu'au dernier point d'entrée. Tant qu'il en reste un, le défaut ne diminue guère. Il faut donc enseigner au dépanneur à ne jamais se décourager et surtout à ne jamais revenir en arrière. Nous devons avouer qu'au début il faut une bonne dose de pugnacité pour ne pas douter de soi, de Maxwell et de toute la clique.

Si l'expérience du dépanneur est un gage de rapidité et d'efficacité pour mettre en place un remède convenable, un débutant bien formé peut s'en sortir sans grandes difficultés. Il est plus simple de résoudre un problème de CEM que d'expliquer clairement ses causes, ses effets et ses remèdes. Sur site on ne recherche ni l'optimum économique ni l'industrialisation des remèdes. En pratique, on se contente d'une solution satisfaisante. Résistons à la tentation de la quête de la perfection, elle est illusoire en CEM.

Des arguments pour convaincre...

Le second aspect psychologique est encore plus délicat que le premier. Le dépanneur doit convaincre les installateurs de modifier leur comportement. Il serait stérile d'expliquer à un installateur qu'il n'a rien compris à l'électricité (même si c'est vrai !), qu'il a tort de croire qu'une bonne terre a besoin d'une faible résistance, que c'est une erreur de raccorder les masses en étoile, etc. On peut dire la même chose sans heurter de façon frontale son interlocuteur.

Une règle en diplomatie est la gradation maîtrisée des arguments. Nous avons mis au point une méthode en trois points pour convaincre un ignorant de modifier sa vision des phénomènes. Nous ne prétendons pas que cette méthode soit la seule, mais elle marche bien. Nous commençons par dire en préambule que l'on comprend l'interlocuteur... mais que les choses n'étant plus ce qu'elles étaient, certaines règles de l'art doivent être modifiées. Au fond ça veut dire la même chose que ce que l'on pense, mais ça passe mieux.

Vient alors l'inévitable question "qu'est-ce qui a changé ?" On peut plaisanter en disant que $U = R \cdot I$ reste vrai puis on répond en expliquant qu'il y a trois différences essentielles entre les années 1970 et 2000 : la nature des signaux, la topologie des systèmes et les moyens de lutte contre la ronflette. C'est cette approche que nous utilisons avec succès depuis des années.

1 - Les signaux sont désormais numériques

En 1970 les signaux rapides étaient rares. Seuls des signaux analogiques à bas-niveaux craignaient un peu quelque chose. Ce quelque chose avait un nom : la "ronflette". Elle était provoquée par la circulation de courants en mode commun à basses fréquences dans une boucle de masse mal isolée.

Le remède, bien connu, était simple. Pour être sûr, on faisait tout flotter, à la fois les capteurs et les quelques cartes électroniques. Les écrans des câbles de thermocouples ne devaient être raccordés que du côté électronique. C'est bien entendu mauvais en HF mais en 1970 on ne s'en apercevait pas. Pour parasiter un tube électronique ou un transistor à base épaisse, il fallait injecter un fort niveau de perturbations.

En 2000, tout est désormais numérique, même la hi-fi et les capteurs dits "intelligents". Les signaux numériques ne craignent plus du tout la ronflette. Ils ont en contrepartie horreur de tout ce qui ressemble à des im-

pulsions rapides. Seul le raccordement bilatéral soigné de l'écran externe d'un câble blindé protège des perturbations HF. La menace ayant changé, il est raisonnable de modifier nos règles d'installation. Chacun admet facilement cet argument.

2 - Les systèmes étaient isolés, ils sont maillés

En 1970 les électroniques étaient rares, grosses, chères et surtout elles étaient localisées dans des équipements indépendants les uns des autres. Les enregistreurs de température, les régulateurs PID (Proportionnel, Intégrale, Dérivée) à tube étaient isolés des masses. Les commandes étaient données par des contacts tout-ou-rien isolés et les sorties utilisaient des contacts de relais, eux aussi isolés. Tout flottait, on pouvait connecter la baie à une terre indépendante sans problème fonctionnel car toutes les boucles de masse étaient ouvertes en BF.

En 2000 on ne peut plus installer de micro-ordinateur sans le connecter à une imprimante, à un réseau local, à un disque dur externe, à un modem ou à une interface RNIS, sans oublier un écran couleur plus beau que Léonard de Vinci. Regardons où les 0 V sont reliés : à la fois à la masse du micro-ordinateur, à celle de l'imprimante, à celle du disque dur, à celle de l'écran. Regardons où sont connectées les masses de chacun de ces éléments : au fil vert-et-jaune de leur propre cordon secteur. Puisque tous les appareils sont interconnectés et alimentés, nous comptons au moins 4 boucles de masse, et même plus via le réseau local. Et nous n'avons décrit qu'un tout petit système de bureautique.

Les boucles de masse en 2000 sont plus nombreuses qu'en 1970 et elles ne sont plus galvaniquement isolées. Ce n'est pas grave si elles sont petites et blindées ou filtrées en HF. Si elles sont énormes, en cas de raccordement en étoile autour d'une barrette de terre par exemple, c'est catastrophique. Il faut bien sûr une seule et même terre pour tout le monde. Il faut surtout une seule masse, aussi équipotentielle que possible. Une interface numérique n'aime pas faire le grand écart : une liaison numérique ne supporte que quelques volts en mode commun. Pour la protéger en HF, il faut relier les écrans de câbles des deux côtés.

Si l'interlocuteur peut supporter une plaisanterie, on peut ajouter que c'est la même règle qu'en 1960 puisqu'on raccorde l'écran du côté électronique... la seule différence est que de l'électronique est désormais des

deux côtés ! Chacun peut comprendre que la topologie des installations n'étant plus une étoile (elle est désormais maillée en réseau), le raccordement des masses doit suivre la même évolution.

3 - On sait supprimer la ronflette sans isoler

On pourrait craindre qu'avec la nouvelle philosophie de maillage des masses, le bruit entre équipements augmente. C'est l'inverse : mailler les masses améliore globalement l'équipotentialité de l'installation. Ne confondons pas la boucle de masse inévitable entre chaque câble et la masse avec les boucles entre masses qui sont favorables. Exceptionnellement, localement, une augmentation du bruit pourrait apparaître si un gros perturbateur était connecté à la masse mal maillée tout près d'un équipement chatouilleux. Que faire dans un tel cas ?

Le problème de la ronflette ne se pose plus, même en absence d'isolement, grâce à de remarquables petits composants, fiables et peu coûteux. En analogique : amplificateurs différentiels ou d'instrumentation. En numérique : émetteurs/récepteurs de ligne ou opto-quelque-chose. En puissance : convertisseurs continu-continu. Attention, tous ces composants modernes sont magnifiques en mode commun BF mais ils supportent très mal les perturbations HF.

En 1970, pour symétriser une liaison, il fallait isoler galvaniquement la boucle de masse. En 2000 il suffit d'utiliser un des petits composants conçus pour cela. Les problèmes de BF étant virtuellement résolus par ces composants anti-mode commun BF, la seule préoccupation résiduelle en environnement maillé se situe en mode commun, au-delà de 1 MHz. Personne ne peut nier cette analyse.

"Me suis-je bien fait comprendre ?" A cette question, personne n'ose répondre par la négative. Lorsqu'on a fait admettre qu'il faut changer les habitudes, le mieux est d'en rester là. Si un interlocuteur insiste pour en savoir plus, on peut expliquer que la résistance d'une terre est indifférente... mais attention à ne pas chercher à trop en faire d'un coup. Ici encore, le mieux est l'ennemi du bien. Gardons à l'esprit que notre discours déstabilise bien des personnes qui croyaient aux règles de... lard !



Maintenance

La maintenance en CEM est-elle difficile ? Elle est souvent moins critique qu'en mécanique (lubrification, remplacements de pièces d'usure, contrôles métallurgiques...) mais elle ne doit pas être négligée. Une difficulté en CEM est que des composants vieillissent, des contacts électriques se dégradent, souvent sans symptôme visuel ou facilement mesurable. Un minimum de surveillance est souhaitable.

Des écrêteurs, les varistances en particulier, se dégradent quand ils conduisent. Il faudrait périodiquement vérifier leur état. C'est difficile car pour mesurer leur seuil de mise en conduction, il faut les démonter. Il est souhaitable de remplacer chaque année les varistances primaires non protégées par thermofusible. Tous les écrêteurs devraient être remplacés après un foudroiement direct.

Il serait déraisonnable de spécialiser tous les opérateurs en CEM mais il est utile de leur donner un minimum d'informations. Par exemple il est bon de sensibiliser les électriciens aux risques des décharges électrostatiques, au maillage des masses et aux effets réducteurs. Les mécaniciens devraient être sensibilisés aux problèmes de blindages, au démontage des écran (remettre toutes les vis, même celles semblant inutiles.) N'hésitez pas, petites manipulations à l'appui, à montrer à tous l'importance de la connectique et des reprises de câbles blindés.

Certains dysfonctionnements apparaissent progressivement. Les exploitants sont tentés d'ignorer la dégradation d'un rapport signal à bruit ou l'augmentation d'un taux d'erreurs tant que leur mission ne leur semble pas menacée. C'est ainsi qu'un process finit par défaillir alors qu'une simple correction anticipée aurait évité un problème grave. En CEM, ils sont parfois catastrophiques.

Un message à diffuser largement est de ne pas modifier l'installation sans en garder une trace. Il convient d'expliquer que le cheminement des câbles, leur connectique et les raccordements de masse sont fonctionnels. Il est surtout important de faire en sorte que dès qu'une dégradation apparaît, le spécialiste CEM en soit alerté. Les mesures de maintenance à effectuer sont peu nombreuses. Nous conseillons d'effectuer annuellement un contrôle de résistance entre masses, un test 1000-4-4 et la vérification des résistances d'isolement.

Mesure de la résistance entre masses

L'expérience montre que la dégradation d'une liaison de masse, suite à une rupture, un desserrage, une corrosion... s'accompagne toujours d'une augmentation de la valeur de la résistance entre masses mesurée en continu au voisinage de la liaison dégradée. Un test mettant en évidence l'augmentation de la résistance entre masses peut déclencher une action corrective.

On peut se bricoler un milliohmètre à peu de frais. Avec une alimentation continue régulée à 12 volts, on réalise un générateur de 1 ampère en insérant en série une résistance de 12 Ω et d'au moins 25 W. Travailler avec plus de 1 A risquerait de "souder" un mauvais contact qui serait alors jugé bon. Appliquer une d.d.p. de plus de 12 V risquerait de perforer la mince pellicule isolante d'un traitement de surface (cadmiage, bichromatage, alodyne...). Un tel décor ne semble conducteur sous faibles pressions que s'il est perforé.

Injecter le courant entre deux points de masse dont on notera les positions dans un journal de maintenance. Avec un voltmètre continu de 0,1 mV de résolution, relever la tension en mV, donc la résistance en m Ω , entre les masses au voisinage des points d'injection de courant. On trouve sur le marché des "sondes 4 fils" avec pinces crocodile spéciales parfaites pour cet usage. Il est souhaitable d'effectuer cette mesure entre :

- Les broches de masse des châssis voisins.
- Les différentes tôles vissées de chaque baie.
- Les raccords entre les chemins de câbles ou les tablettes et les baies.
- Les portes munies de ressorts de contact ou de joints conducteurs.

Inverser la polarité et noter dans le journal de maintenance la plus grande des deux valeurs. Cela constitue la mesure de référence. Une opération corrective devra être entreprise lorsque la valeur de la résistance a augmenté par exemple de plus de 1 m Ω . Un bon contact a une résistance inférieure à 3 m Ω . Il est normal que sur un îlot (ou un site) maillé de façon homogène, la résistance entre les masses n'augmente pas avec l'éloignement : plus les points sont éloignés, plus nombreux sont les conducteurs contribuant à l'équipotentialité. Une résistance entre points éloignés inférieure à 10 m Ω est normale et souhaitable.

Journal de maintenance

Il est souvent facile d'identifier les effets de perturbations électromagnétiques permanentes mais il est plus difficile de prouver à posteriori si une défaillance a eu ou non pour origine une impulsion électromagnétique. Les causes de défaillances sont diverses : erreurs de manipulation ou de logiciel, défaillances d'un composant électrique, électronique ou mécanique, problèmes thermiques, dérives, fluages, etc. Il est donc utile d'estimer la probabilité qu'un défaut ait été provoqué par un parasite. Comment faire ?

Si des défaillances de plusieurs équipements sont simultanées, une cause commune est probable. Pour identifier un tel cas, un suivi commun à toutes les machines est souhaitable. C'est possible grâce à un "journal de maintenance".

Un journal de maintenance permet de faciliter :

- L'accessibilité en temps réel des informations d'exploitation.
- Le recensement des difficultés constatées : heure, nature, durée...
- Leur archivage systématique et une consultation aisée.
- L'optimisation du suivi de tous les équipements du site.
- L'analyse des dysfonctionnements pour remonter d'un problème à sa cause.
- L'estimation de la disponibilité des machines.
- L'optimisation de la maintenance préventive.
- Une commune mesure pour tous (motivation, qualité, trucs à la mode, etc.).

Un tel journal doit être facile à tenir. S'il est alphanumérique, il gagne à être informatisé. Un suivi informatique est rapide à consulter de diverses consoles, simultanément et par diverses personnes. Les mesures CEM (continuité de masse, immunité CEI 1000-4-4...) devraient être y soigneusement reportées afin de corriger à temps, c'est-à-dire avant une catastrophe, les inévitables dégradations.

Les opérateurs devraient être sensibilisés à l'intérêt d'utiliser systématiquement cet outil puissant qu'est le journal de maintenance. Son maintien à jour est une habitude à prendre. Des modifications à priori aussi



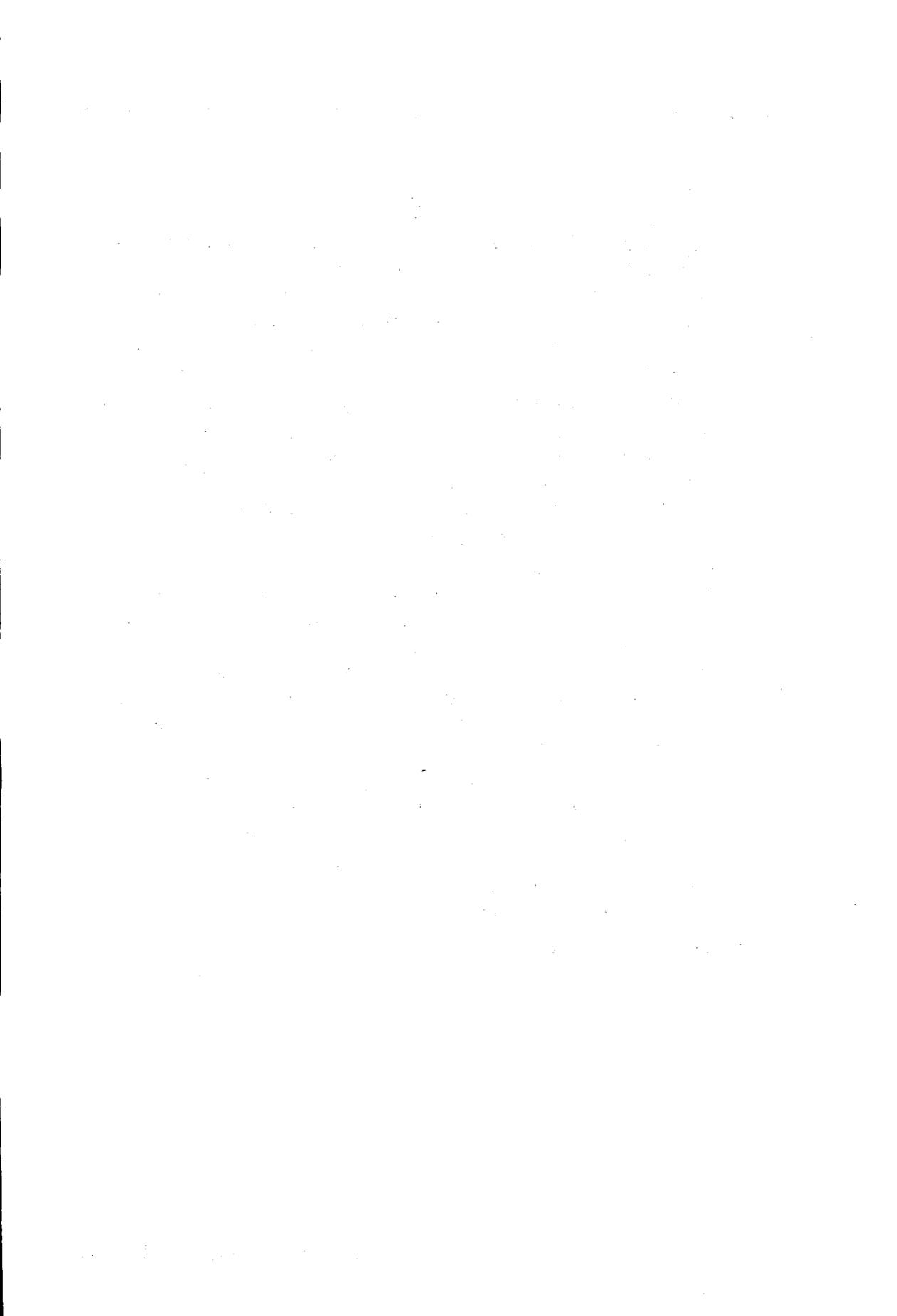
bénignes qu'un changement de câble, de périphérique ou de paramètres devraient être datées et enregistrées. La simplification de l'analyse d'éventuels problèmes de CEM est à ce prix.

“Nettoyage de printemps”

Un “nettoyage de printemps” est souhaitable pour tous les gros systèmes. En effet, l'entropie des installations (disons leur degré de désordre) a une tendance naturelle à croître. C'est une loi thermodynamique ! Le printemps est la bonne saison pour remettre de l'ordre car elle précède la saison des orages.

Les points que nous conseillons de vérifier annuellement sont assez simples :

- Mettre au propre les liaisons “provisaires” qui ont tendance à durer.
- Supprimer les câbles devenus inutiles.
- Contrôler les liaisons équipotentielles supplémentaires.
- Contrôler la connectique, visuellement ou mieux, par test 1000-4-4.
- Contrôler la séparation des câbles (attention au-dessous des faux-planchers...).
- Contrôler la reprise de l'écran des câbles aux TRP (sans fil de reprise).
- Réduire les grandes boucles de masse (attention aux réseaux locaux).
- Réduire éventuellement les longueurs de câbles excédentaires.
- Vérifier l'état des joints conducteurs et des ressorts de contact (corrosion).
- Vérifier l'état mécanique des blindages (déformations, chocs, vis oubliées...).
- Vérifier qu'il n'y a toujours qu'une seule terre (!).
- Contrôler la sélectivité des tableaux électriques.
- Vérifier que les diverses alimentations des systèmes complexes (EDF, secours, 48 V continu, 60 Hz, etc.) restent bien filtrées sur la même TRP.



CONSEILS PRATIQUES

Pour corriger les erreurs les plus grossières, il suffit en pratique d'avoir les idées claires sur les points clés de la compatibilité électromagnétique. Nous croyons que la lecture de ce petit manuel offre un bagage suffisant pour débiter avec efficacité dans le vaste et passionnant domaine de la CEM. Proposons quelques conseils supplémentaires pour faciliter les interventions.

Nous conseillons, au débutant comme à l'intervenant confirmé, de rédiger des fiches à compléter après chaque correction réussie. Nous proposons l'établissement de quatre sortes de fiches : des "fiches de perturbateur", des "fiches de perturbation", des "fiches de problème" et des "fiches de choix". Leur mise sur informatique est simple car elles ne contiennent ni courbes ni dessins.



Une “fiche de perturbateur” est dédiée à un type d'équipement perturbateur. Elle recense, pour chaque perturbation générée, sa gamme de fréquences, son origine physique, ses victimes habituelles, les effets les plus souvent constatés et, dans les grandes lignes, ses principaux remèdes. Cette fiche n'indique ni la référence exacte des équipements en cause ni le détail des solutions. Elles n'ont généralement pas besoin d'être mises à jour après une intervention : on ne découvre pas un nouveau type de perturbation à chaque fois... heureusement !

Un équipement perturbateur ne génère que quelques types de perturbations significatives. Par exemple, un terminal vidéo génère du champ magnétique proche et, s'il a une alimentation à découpage, des perturbations en mode commun. On peut éventuellement ajouter l'impulsion d'un éventuel amorçage en haute tension et la consommation d'harmoniques impairs. La fiche de perturbateur de ce matériel aura ainsi de deux à quatre paragraphes.

Les perturbations émises peuvent être un peu plus nombreuses. Un variateur de vitesse par exemple peut générer à la fois des harmoniques BF de courant sur le réseau, des courants en mode commun et en mode différentiel HF, un courant de fuite à la masse, des impulsions de mode HF commun sur les câbles de sortie et sur de commande et enfin du rayonnement magnétique à proximité. La fiche d'un tel perturbateur peut donc lister six types de perturbations.

Nature de la perturbation	Gamme de fréquences	Cause (origine)	Victimes typiques	Effets typiques	Solutions et remèdes
Déphasage entre U et I (tangente phi)	Fréquence Du réseau (50 Hz)	Angle d'amorçage des thyristors	EDF Groupes électrogènes	Taxation EDF Régulation Courant utile	Banc de capa. Compensateur synchrone
Distortion (encoches de commutation)	250Hz à 2000 Hz	Forme du courant consommé	Moteurs Transfos Triacs	Echauffements Résonance Allumages	Filtre(s) anti-harmonique(s) Câblage étoilé
Courants de mode commun filaire	quelques kHz à quelques MHz	Capacités internes au pont	Matériels sensibles Différentiels	Bruits Ronflements Disjonction	Filtrage antiparasites Ecrans internes
Courant en vrai mode commun	quelques kHz à quelques MHz	Capacités externes au pont	Electroniques sensibles et réception radio	Bruits Erreurs Ronflements	Filtrage antiparasites + blindage
Rayonnement magnétique proche	50 Hz à environ 200 kHz	Bobinages et boucles internes	Matériels sensibles au voisinage	Ronflements Erreurs Blocages	Eloignement Recâblage Blindages

Exemple de "fiche de perturbateur" pour un pont de Grætz

Les "fiches de perturbateurs" détaillent les diverses perturbations générées par un équipement, ce qui aide l'intervenant à décomposer les problèmes pour les analyser. Evitons les approches confuses, elles sont inefficaces. L'expérience se substitue rarement à l'analyse. Le pire en CEM est le manque de discernement. Réciproquement, un problème CEM bien analysé est pratiquement résolu.

Un second intérêt de ces fiches est de transmettre, avec le minimum de pertes, l'expérience acquise. L'auteur a regretté d'avoir quitté son emploi sans avoir pu transmettre toute son expérience à son successeur. Quelques fiches auraient sans doute pu simplifier la reprise de l'activité. Les fiches de perturbateurs facilitent l'analyse des perturbations causées par un type de matériel donné, même si l'intervenant est peu expérimenté.

Un deuxième jeu de fiches guide, lorsque la cause est analysée, le choix du remède. Quand une perturbation (un paragraphe d'une fiche de perturbateur) est identifiée, sa "fiche de perturbation" liste avec précision les dysfonctionnements constatés et les remèdes ayant donné de bons résultats. Nous conseillons d'y noter les références exactes des matériels concernés, les ordres de grandeur mesurés avant et après correction ainsi que les marges de sécurité obtenues. Le coût et les effets secondaires des remèdes peuvent éventuellement être notés.

Exemple d'une "fiche de perturbation"

Cause

Courant de vrai mode commun HF généré par les dU/dt une alimentation statique inintermittible sur le câble secteur et/ou le câble utilisation.

Dysfonctionnements

- Bruit sur une caméra rayons X d'un système d'iodographie type 2001
- Désensibilisation du système antivol d'un grand magasin à 2 MHz type Gonogo
- Comptage anormal d'un compte-globules type 007
- Bruit sur un système d'échographie à ultrasons à 5 MHz type Peasoup
- Brouillage de la réception radio en ondes longues en zone urbaine
- Points blancs sur divers terminaux de surveillance vidéo avec coaxial 75 Ω
- Perturbations de mesure de température à thermocouple par ampli Thernberck
- Perturbation d'un conditionneur pour jauge de contrainte type Beurre Device
- Brouillage de la station d'écoute des ondes courtes à Bierburg
- Perturbation d'une RS 232 entre concentrateur et terminal déporté type Bulle

Remèdes

- Filtrer Secteurs 1 et 2, Utilisation et Batterie par des condensateurs $Y \approx 100 \text{ nF}$
- Visser avec contact électrique l'armoire batterie à celle de l'onduleur
- Blinder le câble entre l'armoire batterie et l'onduleur avec cavaliers de masse
- Surblinder les câbles analogiques avec raccordement bilatéral
- Raccorder de façon périphérique l'écran des câbles numériques au capot métal des Sub-D étamées
- Eloigner les câbles sensibles à 30 centimètres des câbles bruyants
- Ajouter les vis pour mettre le chemin de câbles en contact direct avec la baie
- Ajouter un transformateur sur le câble rayonnant (pour $F < 1 \text{ MHz}$)
- Ajouter des tores de ferrites sur les câbles rayonnants (pour $F > 1 \text{ MHz}$)

- Ajouter un enrouleur peu déroulé pour alimenter l'équipement (pour $F > 1$ MHz)
- Enterrer les câbles bruyants sur quelques dizaines de mètres (pour $F > 1$ MHz)
- Ajouter un "transient plate" au sol ou au mur près de la victime et y filtrer le secteur

Une fiche de perturbation devrait être mise à jour après chaque nouveau cas corrigé. Son intérêt est de guider le choix des remèdes. Ces fiches sont directement appliquées, elles permettent même les dépannages par téléphone. Leur seule contrainte est de nécessiter l'analyse du problème.

Nous suggérons de réaliser un troisième jeu de fiches, appelées "fiches de problème". Lorsque la cause du dysfonctionnement n'est pas identifiée, ces fiches proposent une série de scénarios possibles et des actions correspondantes.

Exemple de "fiche de problème"

Symptôme

"Plantage" aléatoire et inexpliqué d'un équipement numérique.

Causes possibles (numéroter les causes)

- 1 Transitoires rapides, surtout au voisinage de relais ou de contacteurs.
- 2 Décharges électrostatiques, surtout en hiver.
- 3 Talkies-walkies au voisinage, surtout dans la gamme des 150 MHz.
- 4 Alimentation, surtout en réseau d'alimentation aérien.
- 5 Connectique, surtout en conditions climatiques sévères ou en cas de vibrations.
- 6 Logiciel, surtout après une modification ou une mise à jour.
- 7 Thermique, surtout en marche l'été (ou démarrage par grand froid).

Remèdes (les numéros correspondent aux causes possibles)

- 1 Vérifier la présence d'un R-C ou MOV ou Transorb sur chaque bobine
- 2 Limiter l'accès au process (exploitation, entretien, maintenance...)
- 2 Installer des humidificateurs d'air pour garantir $Hr \geq 50$ %
- 1/3 Ajouter des tores de ferrites sur les câbles sensibles
- 1/3 Relier l'écran des câbles blindés à la masse mécanique des deux côtés
- 1/3 Ajouter des effets réducteurs (chemins de câbles reliés aux masses)
- 1/4 Ajouter un (bon) filtre secteur ou vérifier son installation
- 3 Enquêter sur l'utilisation des talkies-walkies (et s'efforcer de les interdire)

- 
- 4 Ajouter un transformateur d'isolement
 - 4 Ajouter une alimentation ininterrompue à la partie électronique
 - 5 Rechercher par de petits tapotements les mauvais contacts
 - 5 Passer la gomme (pour crayon de papier) sur les contacts
 - 6 Installer un système et un logiciel d'application simples et sûrs
 - 6 Vérifier la compatibilité des modules logiciels
 - 7 Recherche des composants limites (sèche-cheveux / bombe à froid)

Une fiche de problème ne contient pas de détails très précis. Son rôle est d'être aussi général que possible pour s'adapter à la plupart des nouveaux cas. Leur mise à jour est effectuée de temps à autre par ajout d'une cause nouvellement rencontrée ou d'un nouveau remède. Leur intérêt est de faciliter l'analyse des perturbations inconnues en proposant des pistes d'investigation. Les fiches de problèmes résument une bonne part de l'expérience cumulée de son auteur.

Nous proposons enfin d'établir des "fiches de choix". Leur rôle est d'aider à choisir le meilleur type de composant selon la fonction à remplir. Une fiche de choix comporte au moins quatre colonnes : le type de composant, ses avantages, ses inconvénients et ses utilisations préférentielles.

Ces fiches, qu'il est bon d'emporter sur site, regroupent en une page l'essentiel des informations éparpillées dans des dizaines de brochures, spécifications ou notes d'application. Elles permettent de choisir rapidement le bon composant. Elles permettent aussi de vérifier que le composant dont on dispose sur site est bien apte à remplir la fonction souhaitée.

Les fiches de choix permettent aussi aux acheteurs de connaître les performances clés des produits qu'ils approvisionnent. Elles peuvent dans ce cas être un peu plus détaillées : une cinquième colonne peut indiquer les marques et les fournisseurs préférentiels et des appréciations (délais, sûreté, service, prix...).

Les composants mis en œuvre en CEM sont les mêmes pour tout le monde. Seule la bonne adaptation du produit au besoin fait la différence entre un bon remède et un médiocre. Nous proposons quatre fiches de choix sur les composants les plus utilisés en CEM : les condensateurs non polarisés, les condensateurs chimiques, les matériaux magnétiques doux et les écrêteurs.

Avec un peu d'expérience, on finit par connaître ses fiches par cœur ainsi que les références des meilleurs composants, c'est à dire les mieux adaptés. Offrir à un client une copie de ses fiches de choix est bien ap-

précié. Cela ne coûte rien, ne trahit aucun secret et prouve, sans esbroufe, sa maîtrise technologique. En outre ce genre d'attention permet souvent d'améliorer le climat d'une intervention.

Type	Avantages	Inconvénients	Usages
MKC Film polycarbonate	<ul style="list-style-type: none"> • Stable/Temp. • Meilleur / MKT • Pertes assez faibles 	<ul style="list-style-type: none"> • DA peu élevé • Diffusion limitée • Sources rares • Coût assez élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Intégrateurs • Filtres BF • Capa série (de liaison)
MKP Film polypropylène	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes faibles • Meilleur / MKC • I efficace élevé • DA faible 	<ul style="list-style-type: none"> • 100°C maximum • Encombrement • Stabilité moyenne • Coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> • Aide à la commutation • Résonance • Filtrage HF
MKS Film Polystyrol (Styroflex)	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes faibles • Autocicatrisant • I efficace élevé • DA très faible 	<ul style="list-style-type: none"> • 100°C maximum • Encombrement • $C \leq 470$ nF • Coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> • Instruments • Mesureurs • Audio • Z faible
MKT Film Polyester (Mylar)	<ul style="list-style-type: none"> • Volume réduit • Coût faible • Fort dU/dt si armatures > 5 µm 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortes pertes • Dérive / temp. • fuite assez élevé • DA élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtrage de classe X • Usage général
MKV papier métallisé + Polypropylène	<ul style="list-style-type: none"> • Autocicatrisant • dU/dt élevé • Avantage du papier + MKP 	<ul style="list-style-type: none"> • 100°C maximum • Dérive/temp. • Sources rares • Coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtres HF et secteur • Usages HT
MP Papier métallisé (RIFA)	<ul style="list-style-type: none"> • Autocicatrisant • dU/dt élevé • Inductance faible • Fiabilité élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Dérive/temp. • Encombrant • ± Monosource • Coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtrage secteur de classe Y ou classe X₁
Céramiques (formules très diverses)	<ul style="list-style-type: none"> • Bons > 1 MHz • Pertes faibles • Volume réduit • NPO stable 	<ul style="list-style-type: none"> • I de fuite élevé • Dérive/temp. • Pas autocicatrisant • Coûteux > 10 nF 	<ul style="list-style-type: none"> • Usages HF • Découplage • Alims à résonance

Fiche de choix d'un condensateur non polarisé

Type	Avantages	Inconvénients	Usages
Tous...	<ul style="list-style-type: none"> • Volume réduit • C élevée possible • Choix de tension • Coût / $\mu\text{F}\cdot\text{V}^2$ très favorable • Faible self en exécution radiale ! 	<ul style="list-style-type: none"> • I de fuite élevé • R série élevée • I efficace limité • Dérive/temp. • Forte DA • $U_{\text{max}} < 500\text{V}$ • Fiabilité médiocre • Polarisés ! 	<ul style="list-style-type: none"> • Lissage
Electrolytique Aluminium rugueux Aluminium lisse	<ul style="list-style-type: none"> • Volume réduit • Faible coût • Multisources • Tolérance \pm OK 	<ul style="list-style-type: none"> • R série élevée • I de fuite élevé • Déformation et vieillissement • DA > 3% • Dérive/temp. • Tolérances... • Fiabilité... 	<ul style="list-style-type: none"> • Lissage alimentation
Aluminium sec	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne fiabilité • Bonne stabilité • I de fuite faible • Utilisable en NP 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille supérieure au tantale sec • Peu de sources • Résine friable 	<ul style="list-style-type: none"> • Lissage BT • Intégrateurs • Découplage • Liaisons NP
Tantale liquide (type CTS 13)	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne précision • I de fuite faible • $\text{Tan } \delta$ assez faible • Fiabilité \pm OK 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de sources • Coûteux • Encombrement • Effet de diode 	<ul style="list-style-type: none"> • Lissage • Découplage • Filtrage BF analogique
Tantale sec (type goutte)	<ul style="list-style-type: none"> • Volume très réduit • Stabilité \pm OK • I de fuite faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Inférieur/alu sec • $I_{\text{max}} = 0,3 \text{ A}$ • R série élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Découplage avec 3Ω en série par volt
NP = non polarisé DA = Absorption diélectrique			

Fiche de choix d'un condensateur polarisé

Type	Avantages	Inconvénients	Usages
Acier silicium à cristaux orientés $\mu_r > 1000$	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation ± 2 T • Bobineurs très nombreux • Coût < 10 FF/kg 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet de peau • F max < 10 kHz • Tôle standard • Bruit acoustique 	<ul style="list-style-type: none"> • Transfos BF et secteur • Selfs BF avec entrefer
Alliages et amorphes μ_r de 10000 à 300000	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation > 1 T • Pertes BF faibles • μ imbattable • \pm inoxydable 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet de peau • Magnétostriction • Peu de sources • Coût très élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Blindages petit taille • Pincés amp. • TI (en BF)
Ferrite à fort μ $\mu_r > 3000$ (Mn-Zn)	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes BF faibles • Choix des formes • μ maxi élevé • Fort μ^* > 1 MHz 	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation < 0,4 T • Instable en temp. • Résistivité faible • $T_c < 200^\circ\text{C}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Selfs de MC • Transfos de signal BF • Pincés HF
Ferrite à μ moyen $\mu_r \pm 800$ (Ni-Zn)	<ul style="list-style-type: none"> • Fort μ^* > 50 MHz • Choix des formes • Résistivité élevée • Multisources 	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation < 0,4 T • μ' varie en temp. • μ^* varie en temp. • Effet "perminvar" 	<ul style="list-style-type: none"> • Tores anti MC en HF • Tranfos HF • Filtres HF
Ferrite à faible μ $\mu_r < 200$ (Ni-Zn)	<ul style="list-style-type: none"> • Résistivité élevée • μ^* faible en BF • Stable/temp. • $T_c > 300^\circ\text{C}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation < 0,5 T • μ connu $\pm 25\%$ • AL faible • Coût assez élevé 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtrage MD • Selfs lissage • Convertis • Self à fort Q
Poudre de fer Fer-Carbonyl $\mu_r < 100$ (typ. 5 à 20)	<ul style="list-style-type: none"> • Saturation ± 1 T • Stabilités élevées • Moulage facile • Faible coût 	<ul style="list-style-type: none"> • μ variable selon F • $F_{\text{max}} < 1$ MHz • Pertes en BF • AL faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtrage MD • Convertis • Filtre anti-harmonique
T_c = température de Curie		AL = Inductance spécifique	

Fiche de choix d'un matériau magnétique doux

Type	Avantages	Inconvénients	Usages
Eclateur à gaz à gaz	<ul style="list-style-type: none"> • Robustesse exceptionnelle • C faible (± 1 pF) • I de fuite ≈ 0 • Résiduelle faible • Existent en HT 	<ul style="list-style-type: none"> • Courant "de suite" (extinction < 50V) • Amorçage retardé • $U_{\text{mini}} \approx 90$ V • Mort incertaine • Coût (sauf à air) 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection primaire • Eclateur + Varistance = Parafoudre
Varistance ou varistor (MOV)	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide (± 1 ns) • I_{max} élevé (>25 kA) • Énergétique (> 100J possible) • Coût < 10 F 	<ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement • C élevée (± 1 nF) • I de fuite croissant • R série $\pm 0,1 \Omega$ • $U_{\text{mini}} \approx 20$ V • Mort très sale 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection secondaire • Limiteur pour faible énergie (relayage)
"TVS" (Transzorb ou Transil)	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide (± 1 ns) • U de coude franc • Ne vieillit pas • Mort propre (CC) • Vaste choix de U • Uni/bidirectionnel 	<ul style="list-style-type: none"> • Énergie très faible (± 1 J) • C élevée (> 1 nF) • I fuite non nul • Les modèles à C faible sont lents 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection signaux BF
"Thyristors" (Trisil, Tedd, Thysorb...)	<ul style="list-style-type: none"> • Résiduelle faible • C faible (< 50 pF) • Coût ± 2 F 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragiles (<1 J) • U de 60 à 250 V • Mort "incertaine" 	<ul style="list-style-type: none"> • Signaux BF • Téléphonie si CTP série
Diode Si en sens direct ("1N 4004")	<ul style="list-style-type: none"> • Résiduelle faible • C faible (< 10 pF) • Coût < 1 F 	<ul style="list-style-type: none"> • $U_{\text{signal}} < 0,3$ V • I fuite élevé (μA) • Mort "curieuse" 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection de signaux (faible bruit)
Diode Zener "du tiroir" 3,3 à 24 V	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide (≈ 1 ns) • U < 5 V possible • Coût < 1 F 	<ul style="list-style-type: none"> • Fragiles (<0,1 J) • R série > 1 Ω • I fuite élevé (μA) 	<ul style="list-style-type: none"> • Signaux si R source > 1 kΩ

Fiche de choix d'un écrêteur

Nous conseillons de rédiger des fiches d'expérience cumulée parce qu'en CEM rien ne remplace l'acquisition personnelle de compétences. Méfions-nous des idées reçues et de celles obtenues par la compilation insuffisamment réfléchie d'anciennes recommandations. Rares sont les textes qui donnent les limites de validité de leurs affirmations. Beaucoup de règles sur la terre et le câblage des masses datent de la télégraphie avec retour du signal par le sol. Il est regrettable et grave qu'elles restent en vigueur en informatique.



Dans le même ordre d'idées, les conseils d'installation des constructeurs sont encore souvent très mauvais. Les industriels qui proposent des règles d'installation raisonnables en CEM sont encore rares. Nous ne pouvons à peine en citer une demi douzaine fin 1992.

Nous constatons à regret que des normes officielles d'installation sont décevantes voire mauvaises en CEM, particulièrement en ce qui concerne les protections contre les surtensions, les terres, les câbles blindés et leur mise en œuvre. Ce n'est pas en optant pour la valeur moyenne de ce qui a été écrit depuis un siècle sur le câblage des équipements que l'on tendra vers l'équipotentialité nécessaire aux équipements interconnectés.

Analyse des perturbations secteur

Des perturbations se propagent fréquemment par les conducteurs d'alimentation ou les conducteurs de terre. Pour analyser les problèmes d'alimentation, il convient d'utiliser le matériel de mesures adapté.

Pour identifier un problème de distorsion BF, un oscilloscope muni d'une sonde de tension avec un rapport de division par 100 permet d'apprécier de visu la déformation de la tension simple par rapport à la masse. En schéma IT et dans une moindre mesure en TT, un petit transformateur travaillant à faible induction est nécessaire pour mesurer la distorsion entre phase et neutre.

Pour identifier un problème de mode commun HF, une pince ampèremétrique autour du câble permet d'évaluer l'amplitude et la fréquence de répétition des perturbations impulsives. Le déclenchement est parfois délicat et la luminosité peut être faible si la fréquence de répétition est basse.

Un enregistreur de perturbations secteur est un outil intéressant mais coûteux. Son résultat est parfois délicat à interpréter. Si un phénomène se produit, il sera probablement daté avec précision. Pour sa forme, c'est une autre histoire !

La plupart des enregistreurs de perturbations alertent lorsque l'onde de tension s'écarte suffisamment de l'onde de référence qui a été recopiée à la mise sous tension. Nous conseillons de ne pas de choisir un seuil de déclenchement trop bas pour ne pas sortir 10 centimètres de papier thermique à chaque allumage de tube fluorescent !



Le dépouillement d'un enregistreur de perturbations est long. Nous conseillons de caler l'horloge avec précision pour pouvoir vérifier si un dysfonctionnement éventuel a été simultané avec une perturbation détectée sur l'alimentation.

Les nouveaux appareils à stockage numérique sont séduisants. Ils donnent l'illusion de savoir enregistrer en détail les plus fines perturbations. En fait, quel que soit l'aspect du signal restitué, leurs algorithmes de compression et de lissage limitent la fidélité des enregistrements aux phénomènes à basses fréquences.

EDF a fait développer un enregistreur de perturbations nommé "Qualitest". Bien que nous n'ayons pas encore essayé ce matériel, il est prévu pour analyser tous les problèmes BF de tension d'alimentation : harmoniques, déséquilibre, creux de tension et flicker. Il pourra également mesurer la crête des surtensions et bien entendu les dater. Le prix de vente annoncé est très attractif. Ce matériel pourrait devenir une référence.

En plaçant deux enregistreurs de perturbations différents en parallèle (chose à éviter devant un client ordinaire), il est fréquent de constater de sérieuses divergences, surtout en cas d'impulsions HF. Comme d'habitude, une bonne connaissance du matériel et de ses défauts est une condition nécessaire à sa bonne utilisation.

Comment améliorer une protection foudre ?

Pour protéger un site contre la foudre, on doit d'abord choisir un niveau de protection adapté aux risques. Un bâtiment sur une crête de montagne est plus exposé qu'en ville. Les coûts des matériels installés et de leurs dysfonctionnements doivent aussi être pris en compte.

Quel que soit le cas, une amélioration de la prise de terre est pratiquement inutile. Ceci est heureux car ce sont justement les sites avec les pires terres, sur des pitons rocheux secs qui sont les plus exposés. En revanche, les terres séparées doivent être immédiatement reliées, et si possible en plusieurs points.

Les masses doivent être soigneusement interconnectées que possible... et c'est possible ! Le tome 2 explique pourquoi (équipotentialité et effets réducteurs) et comment (systématiquement !) mailler les masses internes aux bâtiments. Plus on est proche des équipements, plus le maillage doit être serré.



Tous les conducteurs externes doivent être protégés des surtensions. Certains câbles externes sont d'assez courte longueur, disons inférieure à 1 km : câble de mesure d'un pont bascule, report à distance d'une pompe à essence, interphone de portail, etc. Il est alors souhaitable de doubler ce câble par un conducteur proche (tiré dans la même gaine) qui servira à relier les masses aux deux bouts. Nous conseillons par défaut de choisir une section de 35 mm² de cuivre.

Pour le choix des parafoudres, nous avons confiance dans les modèles des bons constructeurs dont la varistance est dotée d'un thermofusible. La lecture du catalogue permet rapidement de se faire une idée du sérieux du constructeur. Les meilleurs fournisseurs de protection foudre proposent des règles d'installation en parfait accord avec nos petits bouquins.

On termine alors en identifiant les grandes boucles de masse internes dont on s'efforcera de réduire la surface. Il est le plus souvent inutile d'ajouter des paratonnerres. Ces pointes ne réduisent pas les risques pour les matériels, tout au plus protègent-elles les bâtiments contre les coups directs.

Insistons, enfin, sur la mise en œuvre des câbles blindés. La qualité des écrans est bien moins préoccupante que le mauvais usage qui en est fait. Rappelons que si on ne raccorde pas un écran à la masse des deux côtés, le courant qui en HF aurait pu y circuler sans problème se propagera... sur les conducteurs actifs !

Florilège des idées reçues sur les alimentations, la foudre et les remèdes CEM

Nous avons tenté de recenser les confusions et les erreurs les plus fréquentes sur les alimentations, la foudre, et les remèdes à apporter à une installation à problèmes. Un corrigé est proposé après chaque affirmation erronée. Pour éviter toute ambiguïté, les affirmations commencent par la lettre A, elles sont immédiatement suivies de leur correction précédée de la lettre C.

- A En schéma TT, avoir une terre à faible résistance est défavorable car elle attire chez soi les courants de défaut de tout le réseau BT**
- C Ce sont les surtensions du réseau et non les courants dans la terre qui perturbent les matériels. Si des écrêteurs sont correctement installés entre les phases et la masse, la résistance de la terre est indifférente.
- A En schéma TT, la sécurité des personnes n'est plus assurée si la résistance de la terre des masses dépasse une certaine valeur.**
- C Non ! Seule l'équipotentialité des masses importe. Même sans terre, une personne ne risque rien si les masses simultanément accessibles sont reliées.
- A Le meilleur schéma de neutre est le TT**
- C Pour un réseau de distribution aérien en MT, oui ! En BT, son seul intérêt est la continuité de service après le premier défaut simple, au prix d'une tension composée entre phase et masse, de disjonction des protections différentielles sensibles, de difficultés pour localiser le défaut... et de risques d'électrocution !
- A Le schéma TN-C est le moins cher, c'est donc le meilleur**
- C Certes, c'est le moins cher, mais il lance des courants homopolaires dans les masses, ce qui n'est pas souhaitable. Le meilleur schéma est le TN-S.

A La sélectivité est impossible à garantir, même en TN-S.

C On peut assurer la sélectivité quelque soit le schéma de neutre. Pour cela il convient de maîtriser l'arborescence des protections contre les surintensités, de temporiser et de ne pas cascader les protections différentielles, et enfin de surveiller les évolutions de l'installation.

A Les condensateurs de compensation génèrent de la distorsion.

C Un condensateur est linéaire, il ne produit pas de courant harmonique. Il faut qu'un courant soit généré (par un pont de Grætz par exemple) pour que la distorsion en tension du réseau soit amplifiée par sa résonance L - C parallèle.

A Les condensateurs de compensation de puissance réactive améliorent le rendement des moteurs asynchrones.

C Non, la compensation de puissance réactive limite les pertes du réseau électrique en amont de la compensation. Elle n'a pas d'effet sur les charges.

A EDF mesure le facteur de puissance.

C EDF ne mesure pas (encore) les courants harmoniques, elle mesure en fait la tangente φ . L'énergie réactive est facturée durant les heures pleines d'hiver si $\tan \varphi > 0,4$. L'équivalence est simple : $\cos \varphi = \sqrt{1/(1 + \tan^2 \varphi)}$.

A Un onduleur protège de tous les parasites conduits.

C Un onduleur fournit de l'énergie en cas de disparition de la tension réseau. S'il est doté d'un contacteur statique, il ne change pas le schéma de neutre et il laisse passer les perturbations de mode commun. Il génère des perturbations et la distorsion de sa tension utilisation est souvent supérieure à celle du réseau.

A Un fusible protège des risques de destruction.

C Un fusible protège des surintensités mais pas des surtensions. Il risque même d'en générer une énergétique lors de sa fusion, surtout s'il est à fil.

- A Un bâtiment isolant (briques, pierres...) n'attire pas la foudre.**
- C Il ne la repousse pas plus qu'un bâtiment métallique. Tout au plus peut-on dire que le précurseur descendant qui suit un parcours aléatoire déclenche de préférence un arc en retour à partir d'une structure conductrice.
- A Un immeuble à structures conductrice fait office de cage de Faraday, le champ à l'intérieur du volume protégé est faible donc il évite le développement de décharges qui en seraient issues.**
- C A l'intérieur du volume protégé, oui (du moins jusqu'au premier arc en retour) mais l'extérieur de l'immeuble reste évidemment exposé à la foudre.
- A Les seuls effets de la foudre à craindre sont les amorçages.**
- C N'oublions pas l'induction du champ magnétique dans les boucles de masse. Elle est sévère pour les équipements interconnectés.
- A Les paratonnerres à tiges jouent le rôle de cage.**
- C Seul un maillage en trois dimensions des conducteurs de descente ou des charpentes métalliques joue un rôle de cage, c'est à dire de blindage.
- A Un bon paratonnerre attire la foudre.**
- C Aucun paratonnerre n'est capable d'attirer la foudre : le canal ionisé est long de plusieurs kilomètres. Tout au plus déclenche-t-il parfois l'arc en retour si un précurseur s'approche dans un rayon inférieur à 100 mètres environ.
- A Un paratonnerre ionisant repousse la foudre.**
- C Cet argument est une escroquerie, pure et simple.
- A La foudre n'a jamais tué grand monde.**
- C En 1769, une église de St. Nazaire de Brescia en Lombardie fut foudroyée. Une centaine de tonnes de poudre à canon qui y était entreposé explosa, tuant 3000 personnes et rasant un sixième de la cité.

- A Un paratonnerre décharge les nuages à partir du sol.**
- C Cet argument proposé vers 1750 par Franklin est réfuté depuis longtemps.
- A Un paratonnerre ionisant protège une zone réputée plus étendue que celle d'une simple tige à la même hauteur.**
- C Cette réputation est à attribuer aux efforts des vendeurs de paratonnerres. En cas d'orage, le courant d'ionisation naturelle d'une pointe est bien supérieur à celui de l'ionisation artificielle... sans influencer sur sa "protection".
- A Un paratonnerre protège la zone sous un cône dont le sommet coïncide avec la pointe et dont le demi-angle au sommet est de 60°.**
- C Cette idée reçue est en parfaite contradiction avec le modèle électrogéométrique. Si elle était vraie, les immeubles de grande hauteur ne seraient jamais foudroyés à leur pied, ce qui a été maintes fois observé.
- A Lorsqu'une tige de paratonnerre est installée sur un mât, le demi-angle au sommet du cône de protection est limité à 45°.**
- C Une autre idée saugrenue, aussi fausse que la précédente.
- A Un bon paratonnerre est économique car il en remplace... plusieurs !**
- C Multiplier les conducteurs le long des arêtes saillantes du bâtiment est la meilleure garantie de ne pas déclencher l'arc en retour d'un autre point.
- A Un bon paratonnerre suffit à protéger tout un bâtiment.**
- C Le point critique est l'écoulement du courant de la foudre sans amorçages jusqu'à la terre. Plusieurs descentes symétriques sont nécessaires.
- A Les réseaux de fils tendus sont moins efficaces qu'un bon paratonnerre.**
- C Si les fils constituent une grille assez serrée (20 m de côté environ) au dessus du site et sont reliés à la terre par de nombreuses descentes, leur protection est plus sûre que celle des "meilleurs" paratonnerres.



- A La terre d'un paratonnerre doit être isolée de celle des masses.**
- C Hormis pour un réseau suspendu assez éloigné, la d.d.p. entre les conducteurs de descente et les masses rendrait un amorçage plus que probable.
- A En vertu de la séparation des fonctions, il faut isoler le câble de descente d'un paratonnerre de la masse du pylône sur lequel il est installé.**
- C Il est impossible d'éloigner le câble de descente d'un pylône de 1 m par 10 m de hauteur. La d.d.p. entre ces masses créerait à coup sur un arc secondaire. Il suffit en pratique d'utiliser le pylône comme conducteur de descente.
- A Il faut relier un câble de descente de paratonnerre en étoile à la terre.**
- C Sauf en cas d'éloignement suffisant, au moins 1 m par 10 m de hauteur, il est préférable de relier les câbles de descente à la masse de chaque étage.
- A Le modèle électrogéométrique est scientifiquement démontré.**
- C C'est un modèle empirique qui a été validé statistiquement pour les chocs négatifs. Il ne prend en compte ni les chocs positifs, ni ceux dont l'amplitude maximale n'est pas celle du premier arc en retour.
- A Il est impossible de se protéger contre la foudre.**
- C On ne sait pas éviter le phénomène mais on sait en limiter les effets : il suffit de mailler les masses, écrêter les câbles externes et limiter les surfaces des boucles de masse. La démonstration en a été faite maintes fois. On n'est démuné que pour protéger les fils fins et les tôles minces contre les coups directs.
- A En cas d'orage, il est dangereux de porter un outil métallique pointu.**
- C Une pointe de quelques mètres au-dessus du sol, comme tout paratonnerre, n'attire pas la foudre. Les parapluies mêmes mouillés ne portent pas malheur !

A Sous un orage, il faut s'allonger à plat sur le sol.

C Non ! Le gradient de potentiel du sol risquerait d'électrocuter l'inconscient. Attention aussi aux anfractuosités et aux fissures, surtout en montagne.

A Pour ne pas attirer la foudre, il faut fermer portes et fenêtres.

C Contre la foudre "normale", c'est indifférent. Contre la foudre en boule, il est concevable qu'un courant d'air augmente les risques d'intrusion de la foudre en boule. L'auteur ne sait pas (encore ?) prendre position.

A Le champ électrique de la foudre est très perturbateur

C Le champ électrique statique qui précède la foudre n'a pas d'effet. Au moment de la décharge, seule la composante magnétique pénètre efficacement dans les bâtiments. Elle y induit des surtensions dans les boucles. Équipotentialité et effets réducteurs pour les masses. Attention aux mots.

A Il n'y a aucun effort à faire en CEM ! Éventuellement, en cas de besoin, on fera de la qualité par le service.

C Ce comportement ressemble à celui qui laisse sa porte de réfrigérateur ouverte quand il fait trop chaud. Localement, temporairement, ça donne l'illusion de résoudre le malaise alors qu'en fait, globalement, il empire !

A De toutes façons, les remèdes en CEM s'installent à tâtons.

C Bon courage et bonne chance à celui qui procède ainsi ! Tous les remèdes CEM ne se calculent pas, mais tous devraient correspondre à une analyse.

INDEX ET LEXIQUE

Appareil : Produit fini ayant une fonction intrinsèque, destiné à un utilisateur final et destiné à être mis sur le marché en une seule entité commerciale.

Arc en retour : Ionisation du canal de foudre avec accroissement brutal du courant lorsqu'un précurseur descendant s'approche du sol. L'arc en retour est sensiblement rectiligne, il est long de quelques dizaines de mètres.

Barrette (borne ou plaque) de terre : Borne permettant de raccorder hors du sol les conducteurs de terre (de masse, de protection...) à la prise de terre.

Basses fréquences (BF) : Dans ce petit manuel, sans autres précisions, nous qualifions de BF la gamme des fréquences inférieures à 1 MHz environ.

Champ magnétique : Vecteur noté H lié à la circulation d'un courant dans un circuit électrique; il s'exprime en ampère par mètre. L'effet principal d'un champ H variable est d'induire des d.d.p. dans les boucles des circuits.



Choc indirect : Choc de foudre distant qui peut perturber les matériels non par son courant mais par son rayonnement magnétique dans les boucles.

Choc de manœuvre : Impulsion de forme sinusoïdale amortie, souvent entre 10 kHz et quelques MHz, conduite sur un réseau électrique et générée par la manœuvre d'un organe de commutation tel qu'un disjoncteur, un sectionneur...

Chute de tension : Variation de la tension d'un réseau inférieure à 10% et de longue durée, c'est à dire de plusieurs secondes à plusieurs heures.

Compatibilité électromagnétique (CEM) : Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique, et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement. La CEM recouvre donc la compatibilité électrique.

Compensateur statique : Onduleur réversible à stockage inductif servant à restituer au réseau de l'énergie au bon moment dans l'alternance pour limiter le déséquilibre et le flicker.

Compensateur synchrone : Moteur synchrone tournant à vide sur un réseau. La surexcitation du rotor compense la puissance réactive de façon précise sans les inconvénients des condensateurs : enclenchements, résonances...

Composante directe : Composante vectorielle d'un réseau triphasé formée de 3 vecteurs égaux, déphasés de 120° et tournant dans le sens direct.

Composante homopolaire : Composante d'un réseau triphasé déséquilibré formée de 3 vecteurs égaux et en phase tournant dans le sens direct. Un courant homopolaire, tel l'harmonique 3 équilibré, revient par le conducteur neutre.

Composante inverse : Composante d'un réseau triphasé déséquilibré formée de 3 vecteurs égaux, déphasés de 120° et tournant dans le sens inverse.

Conducteur de descente : Conducteur chargé d'écouler à la terre le courant d'un choc de foudre direct. Il devrait être maillé aux masses du bâtiment.

Conducteur de protection (symbole PE) : Conducteur destiné à relier les masses pour garantir la sécurité des personnes contre les chocs électriques.

Conducteur (masse) de référence : Système de conducteurs servant de référence de potentiel à d'autres conducteurs, en particulier à ceux des signaux. Pour éviter le risque de confusion avec la masse mécanique et/ou la terre, nous préférons parler de "masse électronique" ou pour simplifier de "0 V".

Conducteur de terre : Conducteur de faible résistance reliant un point quelconque à une prise de terre. Il n'est pas enterré. Les conducteurs de protection et ceux de descente sont des conducteurs de terre particuliers.

Couplage : Mode de transmission d'une perturbation électromagnétique de la source à un circuit victime. Il n'y a que six modes de couplages élémentaires : impédance commune, couplage capacitif, diaphonie inductive, diaphonie capacitive, champ magnétique à boucle et champ électrique à fil. Divers couplages peuvent agir simultanément en série et/ou en parallèle.

Coupure brève : Disparition totale de la tension, durant moins d'une minute, suite à la mise hors tension du réseau, souvent pour éliminer un défaut. Une disparition durant 10 ms à 1 seconde est appelée "coupure très brève".

Courant actif : Composante du courant apparent en phase avec la tension. Noté I_a , il transporte la puissance active ou "wattée". Le courant actif dans une résistance pure est égal au courant apparent.

Courant apparent : C'est le courant qui circule réellement dans les fils : la somme vectorielle des courants actif et réactif. Noté I_{app} , son module est la somme quadratique des amplitudes de I_a et I_r : $I_{app} = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$

Courant réactif : Composante du courant apparent en quadrature avec la tension. Noté I_r , il transporte la puissance réactive ou "dévattée". Il est déphasé de 90° en arrière de la tension pour une charge inductive (et déphasé de 90° avance pour une charge capacitive). I_r est aussi appelé courant "magnétisant".

Courant de suite : Courant d'un arc ou d'un éclateur maintenu par le réseau. Il oblige des protections contre les surintensités à intervenir.

Courant harmonique : Courant à une fréquence multiple de la fréquence du réseau consommé par une charge non linéaire. Les tubes fluorescents et les ponts de Grætz par exemple consomment des harmoniques impairs.



Creux de tension : Réduction de plus de 10% de la tension d'alimentation durant le temps d'élimination d'un défaut. Un creux de tension est souvent appelé, improprement, "microcoupure". Un creux de tension est défini par sa durée et son amplitude (de la tension composée la plus affectée). Un creux de tension à 100% de plus de 10 ms est appelé "coupure brève".

Décharge électrostatique (ou DES) : Décharge très rapide d'un conducteur électrisé dans un autre. Les DES sont un fléau des électroniques: elles perturbent leur fonctionnement et détruisent des composants ou des cartes manipulés.

Défaut : Dysfonctionnement en CEM provoqué par une perturbation électromagnétique. Dans le premier chapitre "alimentations" de ce manuel, le mot défaut est pris dans son sens électrotechnique de défaillance d'une isolation.

Défaut simple (ou monophasé) : Sur un réseau, court-circuit entre une phase et la terre, par opposition à un défaut entre phases.

Déséquilibre : Existence simultanée, en triphasé, de tensions ou de déphasages différents de plus de 10% d'une phase par rapport aux deux autres.

Distorsion de la tension : Déformation de l'onde de tension provoquée par des courants harmoniques dans l'impédance du réseau. C'est elle qui perturbe les équipements. La distorsion de la tension s'exprime en %.

Disjoncteur différentiel : Aussi appelé "dispositif de protection à courant différentiel-résiduel", ce disjoncteur déclenche (comme son nom ne l'indique pas) sur un courant de mode commun. Les courants de fuite des équipements filtrés font facilement disjoncter les protections différentielles sensibles.

Disjoncteur shunt : Disjoncteur MT d'un poste source en neutre impédant chargé d'éliminer un défaut simple par le court-circuit de l'arc en mettant la phase en défaut à la terre. Il ne modifie pratiquement pas les tensions composées, la distribution BT n'est donc pas altérée.

Effet réducteur : Réduction des perturbations HF par la proximité du conducteur victime avec la masse. L'effet réducteur est le rapport de l'amplitude la perturbation collectée par un câble non blindé ou loin des masses à celle collectée par le même câble blindé ou installé contre un conducteur de masse.

Harmoniques : Courants consommés par des charges non linéaires à des fréquences multiples de la fréquence du réseau d'alimentation. Ces courants déforment l'onde de tension, ce qui peut perturber certains matériels. On limite conventionnellement les harmoniques à l'ordre 40, soit à 2 kHz en 50 Hz.

Hautes fréquences (HF) : Par commodité nous qualifierons de HF un signal dont les fréquences significatives s'étendent au delà de 1 MHz environ.

Homopolaire : Composante du courant triphasé qui se referme par le neutre.

Impédance subtransitoire : Impédance instantanée (tant que sa régulation de tension n'agit pas) d'un alternateur. Elle est principalement inductive.

Inductance (ou self) : Une self génère entre ses bornes une d.d.p. égale au produit de son inductance par la variation (en ampères par seconde) du courant qui la traverse: $u = L \cdot \Delta i / \Delta t$. Notée L, une inductance se mesure en Henrys (H).

Installation : Plusieurs *appareils* ou *systèmes* associés, mis en place dans un lieu donné pour atteindre un objectif déterminé, et qui sont destinés à être mis sur le marché en une seule entité fonctionnelle.

Interharmoniques : Courants générés par des circuits actifs à des fréquences non multiples de la fréquence du réseau. On dit aussi "pseudo-harmoniques".

ISM : Appareil à usage Industriel, Scientifique ou Médical.

Masse : Partie conductrice d'un matériel électrique susceptible d'être touchée et qui peut devenir "sous tension" en cas de défaut d'isolement. La CEM étend la notion de masse à tout conducteur qui contribue à l'équipotentialité, même s'il est inaccessible ou s'il n'appartient pas à un matériel électrique.

Microcoupure : Disparition complète de la tension d'alimentation durant un temps court, inférieur à une demi-période secteur. Seule une alimentation BT (ligne aérienne en fils nus par exemple) risque de subir des microcoupures. Le plus souvent ce que l'on appelle microcoupure est en fait un creux de tension.

Mise à la masse : Raccordement équipotentiel de deux masses entre elles.



Mode commun (MC) : Un courant de mode commun circule dans le même sens sur tous les conducteurs d'un câble. La d.d.p. de MC d'un câble est celle entre le potentiel moyen de ses conducteurs et la masse. Le mode commun est aussi appelé mode longitudinal, parallèle ou asymétrique.

Mode commun filaire : Sur un câble d'alimentation, le courant de mode commun filaire circule sur les fils de phase et se referme par le conducteur de protection. Le mode commun filaire est facile à filtrer et n'exige pas d'écran.

Mode commun vrai : Sur un câble d'alimentation, le courant de vrai mode commun circule en phase sur tous les fils, y compris celui de protection. Il se referme à la masse par capacité ou par d'autres câbles. Il perturbe surtout les circuits flottants ou mal blindés. Vrai mode commun = vrai problème de CEM !

Mode différentiel (MD) : Un courant de mode différentiel circule en opposition de phase sur les deux fils d'une liaison filaire, il ne se referme donc pas dans les masses. Une d.d.p. de MD se mesure entre le conducteur signal et son retour. Le mode différentiel est aussi appelé mode normal, symétrique ou série.

Modèle électrogéométrique : Loi empirique ayant le mérite de montrer qu'un choc de foudre peut tomber au pied d'un paratonnerre !

Neutre impédant (ou IT) : Schéma où le neutre est relié à la terre par une impédance qui limite le courant du premier défaut simple. Ce schéma, excellent en MT, est dangereux en BT, surtout pour alimenter des électroniques.

Niveau Kéraunique : Nombre moyen de jours de l'année durant lesquels le tonnerre est entendu. En France, il va de 5 à 35, avec une moyenne de 25.

Paratonnerre : Conducteur extérieur relié à la terre sensé protéger le bâtiment contre les chocs de foudre directs en favorisant le déclenchement de l'arc en retour. Ils ne protègent en rien les câbles externes des surtensions ni les boucles internes de l'induction.

Perturbation électromagnétique : Phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte.

Puissance active : Puissance correspondant au transport du courant en phase avec la tension. C'est la puissance utile restituée, c'est elle qui est normalement facturée. Notée P , elle vaut $UI \cos \varphi$ en monophasé et $3VI \cos \varphi$ en triphasé.

Puissance apparente : Puissance correspondant au produit du courant par la tension. Elle est supérieure ou égale à la puissance active. Notée S , elle vaut UI en monophasé et $3VI$ en triphasé.

Puissance de court-circuit : Notée P_{cc} , c'est le produit du courant de court-circuit par la tension nominale : $U \cdot I_{cc}$ en monophasé, $3VI_{cc}$ en triphasé. $P_{cc}/P_n = U_n/U_{cc}$. Plus faible est l'impédance d'une source (transformateur ou alternateur), plus importante est sa puissance de court-circuit.

Puissance déformante : Puissance correspondant à la valeur efficace des courants harmoniques I_h . Elle provoque des pertes et la distorsion de la tension. Elle vaut $U \sqrt{\sum I_h^2}$ en monophasé et $3V \sqrt{\sum I_h^2}$ en triphasé.

Puissance réactive : Puissance correspondant au transport du courant réactif. Elle entraîne des pertes joule dans le réseau mais ne produit aucun travail. Notée Q , elle vaut $UI \sin \varphi$ en monophasé et $3VI \sin \varphi$ en triphasé.

Raccordement équipotentiel : Contact électrique à faible impédance entre conducteurs voisins destiné à réduire leur d.d.p. Toute mise à la masse, avec ou sans mise à la terre, devrait être effectuée par un raccordement équipotentiel.

Rang d'un harmonique : Rapport de la fréquence de l'harmonique à la fréquence fondamentale. C'est un nombre entier, le plus souvent impair.

Réseau de masse : Ensemble des conducteurs internes à un bâtiment reliés entre eux. Il se compose habituellement des conducteurs de protection, des bâtis, des chemins de câbles, de cartalisations et de structures métalliques.

Réseau de terre : Ensemble des conducteurs enterrés servant à écouler dans la terre les courants externes en mode commun. Un réseau de terre doit être unique et équipotentiel, donc si possible maillé. Toute canalisation conductrice doit être connectée au réseau de terre en entrée de bâtiment.



Résistance de terre : Résistance entre un réseau de terre et un “point de référence suffisamment éloigné”. Exprimée en ohms (Ω), elle n’a pas, contrairement au maillage des masses, d’influence directe sur l’équipotentialité du site.

Résiduelle : Perturbation électromagnétique qui, après un couplage, un filtrage ou un écrêtement est vue par un circuit victime.

Schéma de neutre : Souvent appelé “régime”, un schéma de neutre définit le raccordement du neutre et des masses à la terre. Les trois schémas de base sont le TT, le IT et le TN. Le meilleur est le TN-S avec sélectivité totale.

Sélectivité : Vertu d’un réseau électrique à isoler, en tout point, toute surintensité par la protection immédiatement en amont du défaut et par elle seule.

Surtension : Variation importante mais de faible durée (moins de 10 ms) de la tension. Les matériels électroniques supportent moins bien les surtensions que les matériels électrotechniques.

Système : Plusieurs *appareils* associés pour remplir un objectif déterminé et destinés à être mis sur le marché en une seule entité fonctionnelle.

Taux de distorsion : Pour un signal périodique, c’est le rapport de la valeur efficace des harmoniques de ce signal à l’amplitude du fondamental. Le taux de distorsion d’un courant peut être supérieur à 100%.

Télécommande centralisée : Impulsions courtes à 175 Hz superposées en mode différentiel à la tension du réseau dont l’espacement transmet des informations de gestion : tarif de nuit, jours de pointe, mises à l’heure...

Tension composée : D.D.P. entre deux phases, on dit aussi “tension entre phases”. En réseau triphasé équilibré, elle vaut $\sqrt{3}$ fois la tension simple. Nous la notons U dans ce lexique.

Tension crête à crête : Amplitude d’une tension alternative mesurée entre les crêtes positives et négatives de la tension. Pour une onde sinusoïdale, la tension crête à crête vaut 2 fois la tension crête et 2,83 fois la tension efficace.



Tension de court-circuit : Notée U_{cc} , c'est la fraction de la tension nominale que devrait délivrer un générateur ou un transformateur à vide pour qu'un court-circuit consomme le courant nominal. Par abus de langage, on exprime conventionnellement la tension de court-circuit en % (sous entendu de U_n).

Tension simple : Aussi appelée "tension étoilée" c'est la d.d.p. en triphasé entre une phase et le conducteur neutre. Nous la notons V dans ce lexique.

Tôle de référence de potentiel (TRP) : Masse d'un coffret conducteur à laquelle tous les câbles externes devraient être filtrés ou blindés. Une et une seule TRP, homogène et non fendue, devrait être utilisée par coffret.

Transient plate : Feuille métallique de surface suffisante qui fournit en environnement isolant une référence de potentiel HF à un équipement.

Victime : Élément (composant, être vivant, matière inerte, etc...) soumis à une perturbation électromagnétique. Une victime peut être perturbée de façon plus ou moins grave, de façon fugitive ou permanente, avec un défaut mesurable ou non, immédiat ou différé.

Victoire : Succès remporté dans une épreuve. Elle n'a pas grand chose à voir avec la CEM mais nous ne souhaitons pas achever chaque manuel par le mot victime.

BIBLIOGRAPHIE

Les perturbations électriques et électromagnétiques

Conception et amélioration des installations industrielles et tertiaires
Ouvrage réalisé par une équipe d'ingénieurs animée par Guy-Gérard
Champion

Collection Electra - DOPEE 85 - 38, avenue Franklin-Roosevelt
77210 AVON

Cet ouvrage récent, agréable et appliqué plaide clairement en faveur des
bonnes solutions CEM : équipotentialité, raccordement des câbles blindés,
terre, etc.

Compatibilité électromagnétique

Bruits et perturbations radioélectriques
Sous la direction de P. Degauque et J. Hamelin
Dunod.

Cet ouvrage sérieux et rigoureux contient les équations de base de la
CEM. Il donne en outre une abondante bibliographie.

Compatibilité électromagnétique

Textes rassemblés par M. Ianovici et J.J. Morf
Ecoles Polytechniques Fédérales de Lausanne et Zurich
Presses polytechniques romandes

Un vaste tour, facilement abordable et complet, du monde de la CEM.

Les cahiers de l'ingénierie

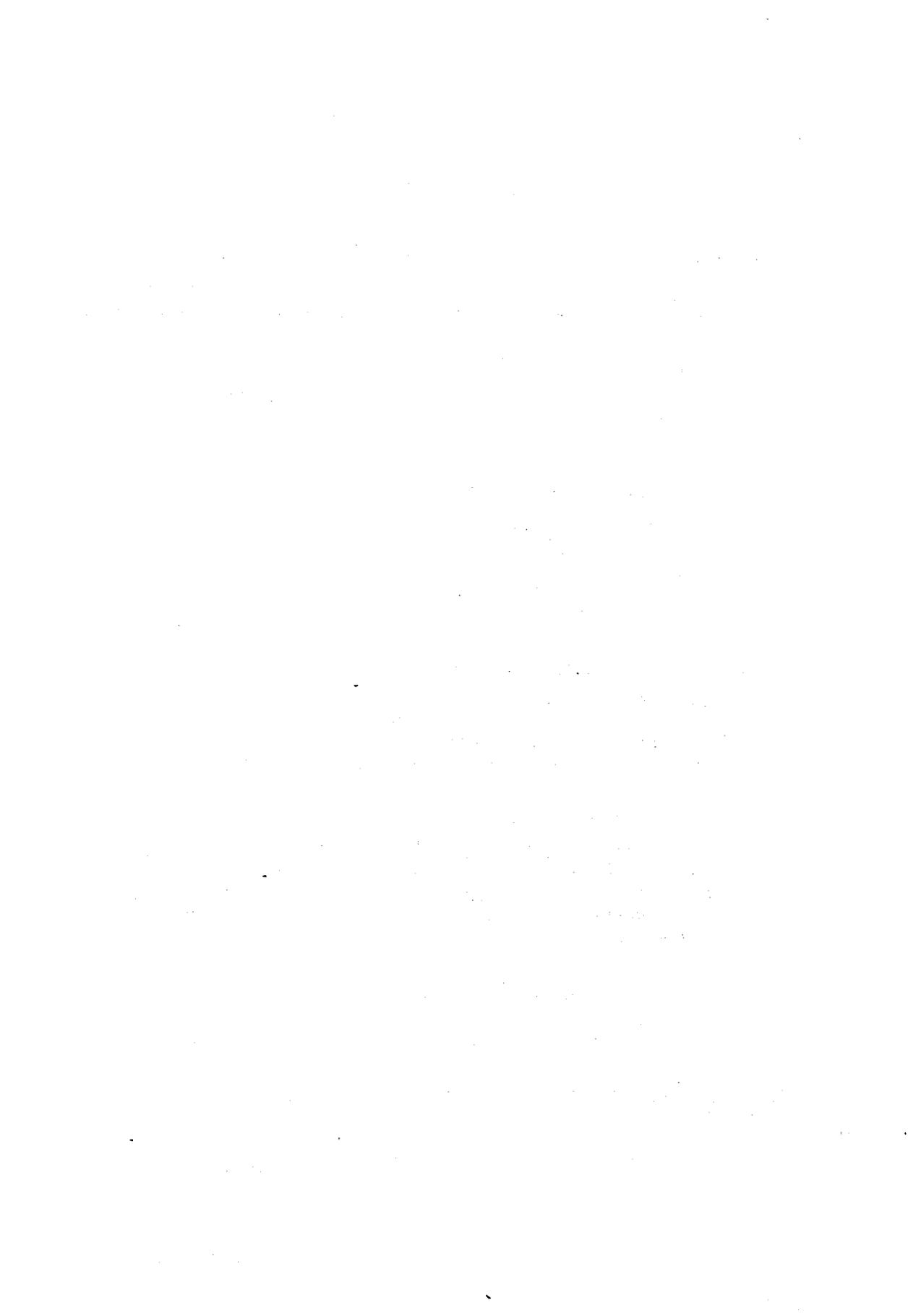
Guide de désensibilisation aux perturbations sur les réseaux publics et privés
Tome 1 : Principes généraux – Tome 2 : Etudes de cas
EDF - Dépt. qualité des applications de l'électricité - 75384 Paris Cedex 08
Une présentation claire des problèmes BF d'un réseau électrique et des
solutions adaptées.

Pour acheter les normes françaises

AFNOR - Tour Europe, Cedex 07 - 92049 Paris La Défense

Pour acheter les normes électriques et électroniques internationales

UTE - 4, place des Vosges - Immeuble Lavoisier
92400 Courbevoie





TABLES DES MATIÈRES

SOMMAIRE DU TOME 4 ALIMENTATION, Foudre ET REMÈDES

CHAPITRE I L'ALIMENTATION	13
PROTECTION DE L'ALIMENTATION MT	15
Les réseaux triphasés.....	15
Qualité de l'alimentation électrique	16
Le déséquilibre des tensions.....	16
Les fluctuations de tension	19
Les variations de fréquence.....	25
Les harmoniques	25
Les surtensions	33
Protection du poste MT/BT	35
PROTECTION DU RÉSEAU BT	39
Protection du réseau BT contre les surtensions	39
Impédance de l'alimentation électrique.....	40
Compensation de l'énergie réactive	42
Condensateurs de compensation	44

Protection contre les surcharges.....	49
Les fusibles	49
Les disjoncteurs.....	50
La sélectivité.....	51
SCHÉMA DE NEUTRE.....	53
Schéma TT.....	53
Schéma IT.....	58
La théorie du schéma IT.....	58
La pratique du schéma IT.....	59
Schémas TN.....	64
Schéma TN-C.....	65
Schéma TN-S.....	66
Raccordement d'un point à la masse.....	67
Conclusion des régimes de neutre.....	69
ALIMENTATION DE SECOURS.....	70
Transformateur d'isolement.....	72
Conditionneur de réseau.....	73
Variac motorisé.....	75
Régulateur à ferro-résonance.....	76
Groupe tournants à inertie.....	78
Groupe électrogènes.....	81
Alimentation statique ininteruptibles.....	82
Alimentations dynamiques ininteruptibles.....	85
Autres solutions.....	86
EN CONCLUSION... ..	89

CHAPITRE II LA PROTECTION Foudre.....	91
LE PHÉNOMÈNE Foudre.....	92
Le cumulo-nimbus	94
La décharge	95
La foudre en valeurs numériques	96
La question du $i^2.t$	100
Energie et puissance moyenne de la foudre	102
La foudre en boule	103
La montée de potentiel du sol	105
Montée en potentiel d'un bâtiment	105
Risques d'électrocution.....	107
Les d.d.p. entre masses	110
LES PROTECTIONS EN CONDUCTION	114
Structure de collecte de la foudre	114
Choix du paratonnerre	114
Le modèle électrogéométrique	115
Conducteurs de descente	117
Division et symétrie du courant foudre	117
Liaisons des conducteurs de descente à la masse	118
Réseaux suspendus	120
Conducteurs de masse et conducteurs de terre.....	121
Réseau de terre.....	122
Protection des conducteurs externes	124
Montage des écrêteurs	124
Pénétrations de canalisations conductrices.....	125
LES PROTECTIONS EN RAYONNEMENT	126
d.d.p. induite dans les boucles	127
Réduction des tensions induites	130

Rappels sur les effets réducteurs.....	130
Considérations sur le maillage des descentes	130
LA Foudre EN CONCLUSION... ..	132
CHAPITRE III REMEDES EN CEM.....	134
LES RÉFLEXES EN DÉPANNAGE CEM.....	134
Connaître l'historique	136
Faire parler les intéressés	137
Se renseigner et observer... ..	139
Analyser le défaut	141
Proposer des solutions.....	143
Expliquer et conseiller	145
Conserver une trace.....	147
ANALYSE DES PROBLEMES	148
Quelques essais simples à entreprendre	149
Mesures de perturbations	150
Capteurs de mesure	151
Phénomènes permanents.....	153
Phénomènes non répétitifs	153
Matériels de mesure conseillés.....	155
Tests d'immunité sur site	156
Équipement ou système ?.....	158
Le problème de l'installation	159
Préparation du test.....	160
La durée du test.....	161
Tests en impulsions	161
Tests d'immunité CEI	162
Problèmes les plus fréquents	166
REMEDES	168

Equipotentialité locale.....	169
Filtres	170
Câbles sous écran	171
Ferrites	173
Blindages.....	174
Valise de composants	175
PRÉPARATION PSYCHOLOGIQUE	177
Management de la CEM.....	177
Le coût de la CEM.....	181
Durcissement... du dépanneur	182
Des arguments pour convaincre... ..	183
1 - Les signaux sont désormais numériques”.....	183
2 - Les systèmes étaient isolés, ils sont maillés”.....	184
3 - On sait supprimer la ronflette sans isoler”	185
MAINTENANCE.....	186
Mesure de la résistance entre masses	187
Journal de maintenance.....	188
“Nettoyage de printemps”	189
CONCLUSION DES REMEDES... ..	191
CHAPITRE IV CONSEILS PRATIQUES.....	193
ANALYSE DES PERTURBATIONS SECTEUR	203
COMMENT AMÉLIORER UNE PROTECTION Foudre ?.....	204
FLORILEGE DES IDÉES REÇUES SUR LES ALIMENTATIONS, LA Foudre ET LES REMEDES CEM	206
CHAPITRE V INDEX ET LEXIQUE.....	213
BIBLIOGRAPHIE.....	223



SOMMAIRE DU TOME 1

SOURCES, COUPLAGES ET EFFETS

CHAPITRE I INTRODUCTION AUX COUPLAGES

LES SIX COUPLAGES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

MODE DIFFÉRENTIEL ET MODE COMMUN

COUPLAGE PAR IMPÉDANCE COMMUNE

COUPLAGE CAPACITIF CARTE À CHASSIS

COUPLAGE PAR DIAPHONIE INDUCTIVE

COUPLAGE PAR DIAPHONIE CAPACITIVE

COUPLAGE CHAMP À FIL

COUPLAGE CHAMP À BOUCLE

RETENONS QUE LES COUPLAGES...

CHAPITRE II LES SOURCES DE PERTURBATIONS

PERTURBATIONS À BASSES FRÉQUENCES

PERTURBATIONS À HAUTES FRÉQUENCES

EVALUATION DES ORDRES DE GRANDEUR

CONVERSIONS D'UNITÉ

CHAPITRE III EFFETS SUR LES VICTIMES

EFFETS DES PERTURBATIONS SUR LES CIRCUITS ANALOGIQUES

EFFETS DES PERTURBATIONS SUR LES RÉCEPTEURS OPTIQUES

EFFETS DES PERTURBATIONS SUR LES CIRCUITS NUMÉRIQUES

EFFETS DES PERTURBATIONS SUR LES TUBES CATHODIQUES

CHAPITRE IV CONSEILS PRATIQUES

ANALYSE DES PERTURBATIONS

ANALYSE DES COUPLAGES

FLORILEGE DES IDÉES REÇUES SUR LES PERTURBATIONS

CHAPITRE V INDEX ET LEXIQUE



SOMMAIRE DU TOME 2

TERRES, MASSES ET EFFETS REDUCTEURS

CHAPITRE I LES TERRES

ROLES D'UNE TERRE
MESURE DE LA RÉSISTANCE DE TERRE
CONCEPTION D'UN RÉSEAU DE TERRE
EN RÉSUMÉ...

CHAPITRE II LES MASSES

DÉFINITIONS ET RAPPELS DE LA LOI...
RÉSEAU DE MASSE
MASSES DES SIGNAUX
CONCLUSION DU MAILLAGE DES MASSES...

CHAPITRE III LES EFFETS REDUCTEURS

POSE AVEC EFFET RÉDUCTEUR
ROUTAGE DES CABLES
PROTECTION RÉPARTIE
EN CONCLUSION

CHAPITRE IV CONSEILS PRATIQUES

QUE FAIRE DE LA TERRE ?
COMMENT AMÉLIORER L'ÉQUIPOTENTIALITÉ ?
QUELS EFFETS RÉDUCTEURS UTILISER ?
FLORILEGE DES IDÉES REÇUES SUR LES TERRES ET LES MASSES

CHAPITRE V INDEX ET LEXIQUE



SOMMAIRE DU TOME 3

BLINDAGES, FILTRES ET CABLES BLINDÉS

CHAPITRE I BLINDAGES ELECTROMAGNETIQUES

NOTION D'ÉCRAN ÉLECTROMAGNÉTIQUE

CALCUL DES BLINDAGES

BLINDAGES EN HF

CORROSION

CONCLUSIONS SUR LES BLINDAGES

CHAPITRE II PROTECTIONS EN CONDUCTION

LES FILTRES

LES LIMITEURS DE SURTENSIONS

SYMÉTRISEURS ET RÉJECTION DU MODE COMMUN

CONCLUSIONS SUR LES PROTECTIONS EN CONDUCTION

CHAPITRE III CABLES BLINDÉS

DE QUEL COTÉ RACCORDER LES CABLES BLINDÉS?

CHOIX DU CABLE BLINDÉ

COMMENT RACCORDER LES CABLES BLINDÉS?

EN CONCLUSION...

CHAPITRE IV CONSEILS PRATIQUES

COMMENT AMÉLIORER UN BLINDAGE ?

AJOUTER ET VALIDER UNE PROTECTION EN CONDUCTION

QUELQUES CONSEILS PRATIQUES POUR CABLES BLINDÉS...

FLORILEGE DES IDÉES REÇUES SUR LES BLINDAGES, LES FILTRES ET LES CABLES BLINDÉS

CHAPITRE V INDEX ET LEXIQUE