



QHU 0 054 3414

Alain Charoy

CEM

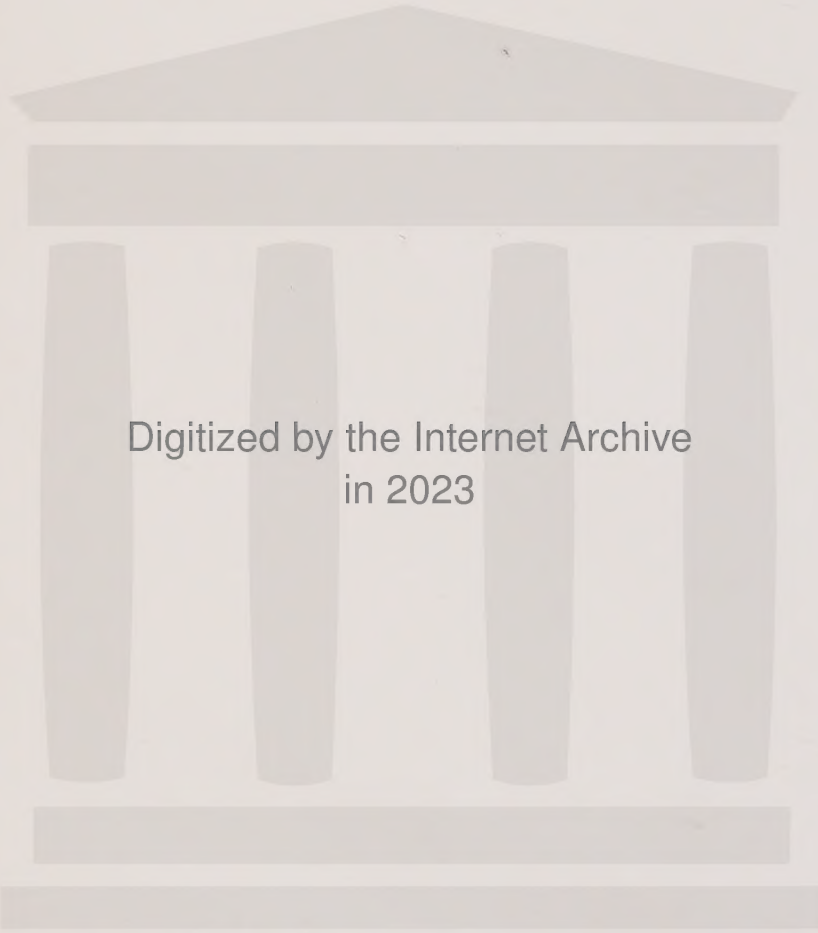
**Parasites et perturbations
des électroniques**

Tome 2

terres, masses, câblages

2^e édition

DUNOD



Digitized by the Internet Archive
in 2023

CEM

Parasites et perturbations des électroniques

Terres,

masses, câblages

liées aux modes d'installation

Consultez nos catalogues sur le Web



Éditions
ETSF
InterÉditions
Microsoft Press

Recherche

Accueil | Contacts
 Sciences et Techniques | Informatique | Gestion et Management | Sciences Humaines

Interviews

 **Comme nous avons changé ! La saga inédite de 50 ans de bouleversements socioculturels**
Alain de Vulpien

 **Mars, planète de mythes, planète d'espoirs**
Francis Rocard

[toutes les interviews](#)

Événements

Saint-Valentin : j'aime mon couple... et je le soigne ! Interview exclusive de H. Jaoui

En librairie ce mois-ci

Spécial Révisions scientifiques ! Pour réussir vos examens, **jouez** avec DUNOD et EDISCIENCE et gagnez des chèques-lire de 15€ !

M. Burgin

Nouveautés - Nouveautés - Nouveautés

 **Image numérique couleur**
De l'acquisition au traitement
Alain Trémeau, Christine Fernandez-Maloigne, Pierre Bonton

 **Risque Pays 2004**
Coface, Le Moci

 **Détection et prévention des intrusions IDS**
Thierry Evangelista

 **De quelle vin voulez-vous, Aïre le héros ?**
Tout profit du passé pour réorganiser
de
Pierre-Jean De Jonghe

LES BIBLIOTHÈQUES DES MÉTIERS



- Gestion Industrielle
- Métiers du vin
- Directeur d'établissement social et médico-social
- Toutes les bibliothèques

LES NEWSLETTERS



- Action sociale
- Entreprise
- Informatique et NTIC
- Documentation pour l'industrie
- Toutes les newsletters

[bibliothèque des métiers](#)
[newsletters](#)
[science.net](#)
[expert-sup.com](#)

Notice légale

www.dunod.com

Alain Charoy
AEMC

CEM

Parasites et perturbations des électroniques

Tome 2 **terres, masses, câblages**

Règles et conseils d'installation

2^e édition

DUNOD

RETRÉ DE LA
COLLECTION - UQO

Université du Québec
en Outaouais

0 5 DEC. 2006

Bibliothèque

CEM (Parasites et perturbations des électroniques)

Tome 1 : Sources, couplages, effets

Tome 2 : Terres, masses, câblages

Tome 3 : Blindage, filtres et câbles blindés

Tome 4 : Alimentation, foudre et remèdes

TK
7867
.5
C43
2006
T.2

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2006

© Dunod, Paris, 1992 pour l'ancienne édition

ISBN 2 10 050154 2

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

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

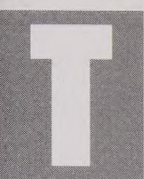


TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	1
CHAPITRE 1 - LES TERRES	3
1 Rôles d'une terre	3
Terre de protection	4
Courants de fuite et de défaut des équipements	5
Référence de potentiel statique	6
Courants de mode commun des câbles externes	8
Courant direct de foudre	11
Les ouvrages à haute tension	12
Câbles à effet réducteur	14
Contrepoids d'une antenne fouet	15
Terre « crypto »	16
Terres fonctionnelles	17
En conclusion des rôles des terres	18
2 Mesure de la résistance d'une terre	19
Techniques de mesure de la résistance d'une terre	20
Résistivité du sol	24
Alors qu'est-ce qui importe ?	26
3 Conception d'un réseau de terre	27
Réalisation d'un réseau de terre	27
Vieillessement d'un réseau de terre	31
Vitrification du sol	32
Corrosion d'un réseau de terre	32
Interconnexion de terres différentes	33
4 En résumé...	35

CHAPITRE 2 - LES MASSES	37
1 Définitions et rappels de la loi...	39
2 Réseau de masse	42
Boucles de masse et boucles entre masses	42
Unicité du réseau de masse	46
<i>La mise à la terre en étoile</i>	46
<i>Le raccordement au conducteur PE le plus proche</i>	49
<i>La liaison au plus court à la masse la plus proche</i>	50
Réalisation du réseau maillé de masse	51
<i>Conducteurs de protection</i>	51
<i>Maillage des masses</i>	52
<i>La transient suppression plate</i>	59
En conclusion provisoire...	60
3 Masses des signaux	61
Alimentation secteur	61
Alimentations continues	62
<i>Cartes numériques</i>	63
<i>Cartes mixtes analogiques/numériques</i>	64
<i>Cartes analogiques</i>	65
4 Conclusion du maillage des masses...	68
CHAPITRE 3 - EFFETS RÉDUCTEURS	71
1 Pose avec effet réducteur	76
Goulottes conductrices	77
Autres effets réducteurs	83
2 Routage des câbles	85
Câbles externes	85
Câbles internes	88
Dix règles de câblage des liaisons internes	88
Conseils pratiques de câblage	94
3 Protection répartie	96
Maillage par îlots	97
Plaque collectrice	98
Coordination des protections	100
4 En conclusion....	102

CHAPITRE 4 - CONSEILS PRATIQUES	105
1 Que faire de la terre ?	107
2 Comment améliorer l'équipotentialité ?	109
Coordination des masses mécaniques	109
Coordination des masses électriques	111
Maillage pratique des masses	112
3 Quels effets réducteurs utiliser ?	115
Effets réducteurs déjà à notre disposition	115
Effets réducteurs à ajouter	117
Combien coûtent maillages et effets réducteurs ?	119
4 Florilège des idées reçues sur les terres et les masses	120
LEXIQUE	127
INDEX	135



VERTISSEMENT

Ce manuel s'adresse principalement aux techniciens et aux installateurs concernés par la mise en œuvre, le dépannage ou la maintenance de systèmes électroniques. Nous l'avons voulu facile à utiliser, avec des règles et des conseils sûrs, clairs et pratiques. Il est conçu comme un outil, chaque chapitre y est, dans la mesure du possible, indépendant des autres.

Ce deuxième tome définit les rôles des terres, montre l'importance de l'équipotentialité des masses et propose des règles de raccordement simples pour limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les électroniques.

À la fin de chaque chapitre, un court paragraphe en résume l'essentiel. Pour éviter toute ambiguïté, les limites de validité des recommandations, quand il y en a, sont précisées.

Nous avons cherché à éviter les aspects trop théoriques ou abstraits. Autant que possible, le vocabulaire de tous les jours est utilisé, sans débattre du fondement des notions physiques ardues.

Le respect des quelques lois fondamentales de la physique élémentaire est nécessaire à une bonne CEM. Si, après lecture de ce guide, le lecteur évitait quelques erreurs de câblage et respectait les règles simples et efficaces de la physique, nous serions satisfaits. Une erreur, même lorsqu'elle est fréquente au point de devenir institutionnelle (une terre séparée par exemple), reste une erreur. Nous avons voulu permettre la compréhension claire des phénomènes. C'est selon nous la première clé pour entrer en CEM.

Lorsque c'est utile, nous donnerons les ordres de grandeur sur lesquels nous pouvons tabler. Des exemples illustrent les risques des points importants; leurs valeurs chiffrées sont réalistes car elles sont tirées de l'expérience. La maîtrise des ordres de grandeur est pour nous la deuxième clé de l'efficacité en CEM.

Lorsque les phénomènes électromagnétiques sont bien compris, il est utile d'être pédagogue. L'exposition convaincante des mécanismes méconnus et la diffusion des bonnes solutions constituent la troisième clé du succès.

L'aspect économique des modifications a été pris en compte. Le lecteur constatera que, dans tous les cas, le coût global des corrections à apporter à une installation (amélioration de l'équipotentialité des masses et recherche d'effets réducteurs) est faible. Quant à la terre, nous suggérons de ne rien changer si elle est unique. Comment être plus économe ? Le coût des corrections reste en tout cas sans commune mesure avec celui des effets, directs et induits, des perturbations électromagnétiques.

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

Nous espérons que la densité des informations données dans ce petit livre ne nuira pas à son efficacité. Nous avons porté sur les phénomènes un éclairage qui permette à la fois au néophyte de comprendre sans difficulté, et au spécialiste de trouver des arguments pour convaincre.

Le plus important en CEM est d'abandonner les mauvaises habitudes. Le reste n'est qu'un problème technique. C'est avec les mains que l'on finit par comprendre puis par faire fonctionner ce qui ne marche pas. La technique est moins difficile à maîtriser qu'il n'y paraît...

Nous souhaitons avoir donné à ce guide un style assez plaisant pour inciter le lecteur à le parcourir en totalité. En effet, ce n'est que lorsque les plus graves erreurs d'installation sont corrigées que le fonctionnement d'un système électronique peut devenir sûr. L'installation des terres, des masses et le câblage des liaisons d'interconnexion sont trois points essentiels à une bonne CEM.



LES TERRES

Dans ce manuel, nous utiliserons les expressions *prise de terre*, *réseau de terre* ou, pour simplifier, *terre* tout court pour désigner les parties conductrices enterrées en contact électrique direct avec le sol. Nous emploierons le mot de *masse* (conducteur, réseau, grille ou structure de masse) pour désigner les parties conductrices interconnectées hors du sol qui contribuent à l'équipotentialité du site, que ces parties métalliques appartiennent ou non aux matériels électriques. Nous faisons la différence entre la terre (éloignée des équipements) et la masse (proche des circuits électroniques), même quand la terre et les masses sont correctement interconnectées.

1 Rôles d'une terre

À quoi sert une terre ? Des mauvaises réponses à cette bonne question viennent de nombreux mythes... Et le propre d'un mythe, c'est de durer.

La réponse est pourtant simple : le seul rôle d'une terre est d'écouler dans le sol les courants qui entrent (ou sortent) en mode commun de (ou vers) l'extérieur du site. Un réseau de terre est donc essentiellement une poubelle, et pratiquement rien d'autre.

Une terre peut avoir plusieurs rôles, plus ou moins réels. La plupart des fonctions sont soit purement imaginaires, soit pratiquement indifférentes à la valeur de la résistance de la prise de terre. Étudions donc, une à une, les diverses fonctions d'une terre : le rôle de terre de protection, d'évacuation des courants de fuite des équipements, de référence de potentiel statique, d'écoulement des courants de mode commun des câbles externes et du courant direct de foudre, de référence de potentiel des ouvrages à haute tension, de circuit de retour des câbles à effet réducteur, de contreponds d'une antenne fouet, de terre dite « *crypto* », et enfin le rôle de terre fonctionnelle.

■ Terre de protection

Le premier rôle d'une prise de terre est celui de la protection des personnes contre les risques d'électrocution. Le risque d'un choc électrique est fonction de l'intensité du courant électrique qui traverse le corps, de la partie du corps humain traversée, et de la durée. Un courant entre deux doigts d'une main est moins grave qu'entre les deux mains, ou entre une main et un pied.

La résistance du corps humain n'est pas linéaire. Si l'on mesure la résistance entre nos deux mains sèches avec un ohmmètre alimenté par une pile de 1,5 V, on lit une valeur de l'ordre de 1 M Ω , sous une tension de 48 V on mesure environ 50 k Ω , et on sent à peine le courant, sous 230 V (très brièvement !) on subirait une forte secousse : un courant de quelques dizaines de milliampères correspond à une résistance de quelques kiloohms. Un courant de 1 mA est tout juste perceptible par les mains, 10 mA génèrent une forte secousse, et 30 mA peuvent suffire à tétaniser les muscles et déclencher la fibrillation cardiaque (le risque sanitaire majeur).

Les règles de protection contre les chocs électriques ne peuvent pas prendre en compte le courant qui dépend de la résistance variable du corps humain. Elles limitent donc la tension de contact à une valeur conventionnelle de sécurité afin que le pire choc ne soit pas léthal.

Le concept de terre de sécurité n'est pas normalisé malgré l'usage courant de ce qualificatif. Il est essentiel de comprendre que ce n'est pas la terre qui rend une installation sûre mais la bonne équipotentialité des masses simultanément accessibles. Cette notion est soigneusement normalisée par la définition du *volume d'accessibilité au toucher* (défini au paragraphe 235.1 de la norme NF C 15-100).

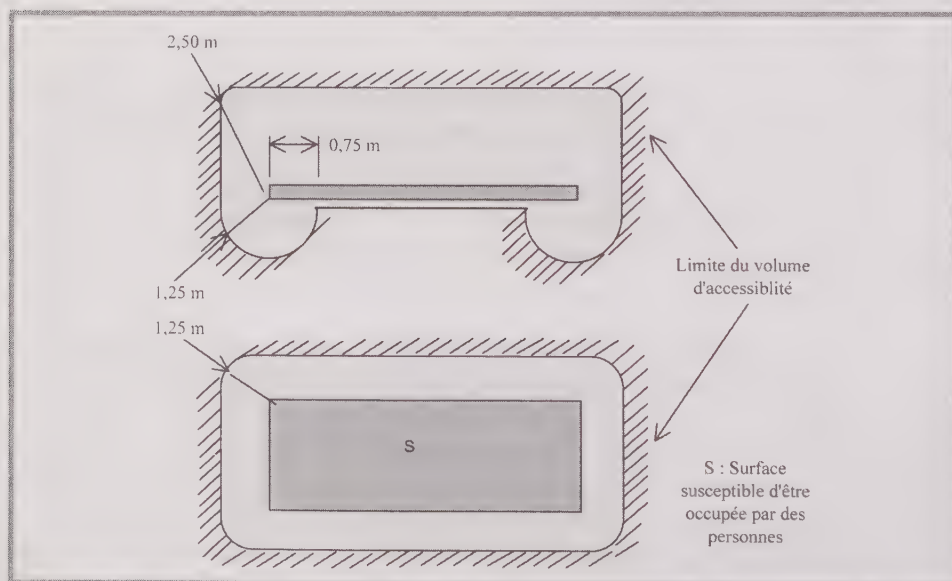


Figure 1.1 – Définition légale du volume d'accessibilité.

Même en distribution publique basse tension, ce n'est pas le potentiel par rapport à la terre lointaine qui importe, mais l'équipotentialité des masses accessibles. Ainsi une ceinture de terre autour d'un pavillon est meilleure qu'un simple piquet, quelle que soit sa résistance. La terre de l'abonné est si peu « de sécurité » que les tondeuses à gazon électriques et autres outils de jardin sont obligatoirement en **double isolation** (sans conducteur de terre). C'est heureux car aucune prise de terre ne permet de garantir la **tension limite de sécurité** (U_L , aussi appelée **tension limite conventionnelle de contact**) par rapport au sol du jardin.

■ Courants de fuite et de défaut des équipements

Les courants de fuite et de défaut des équipements s'écoulent par les conducteurs de terre. Un conducteur de protection, noté PE, est repéré conventionnellement par la coloration vert et jaune; c'est un conducteur de terre particulier. Il raccorde les masses d'équipements à la prise de terre. Ce qui est moins connu est que, pour la plupart des **schémas de neutre**, ce courant ne s'écoule pas dans la terre !

Hormis en schéma TT (c'est justement son problème), les courants de fuite « à la terre » se referment par la liaison du neutre à la terre, et non **dans** la terre. Il importe de comprendre (chapitre Schémas de neutre, tome 4) qu'un courant de fuite sur le conducteur de terre ne passe dans la terre pour aucun des schémas rencontrés dans l'industrie : TN-S, TN-C et IT. Hormis lorsqu'il y a deux terres, la mise à la terre est purement conventionnelle. Le rôle d'évacuation des courants de fuite dans une prise de terre peut sembler évident, mais n'est qu'une illusion !

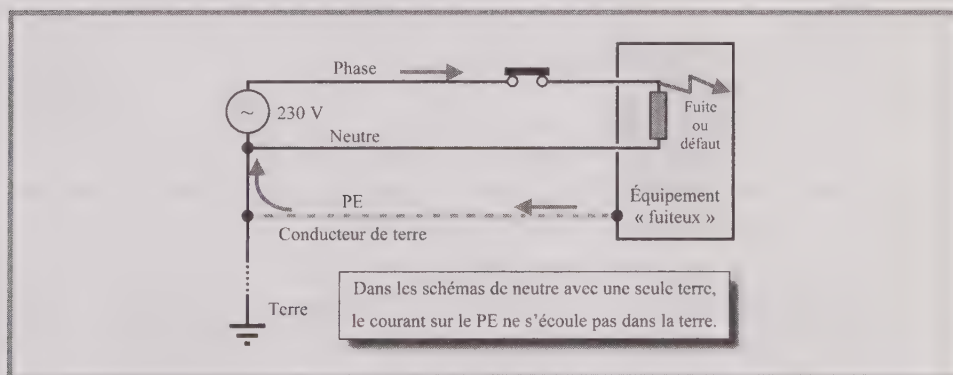


Figure 1.2 – Circulation du courant le long d'un PE.

Les inévitables courants de fuite d'un site reviennent par le conducteur de mise du neutre à la terre. Il s'agit tout d'abord des courants à travers les condensateurs d'antiparasitage installés entre phases et masse. Certains équipements ont des courants de fuite considérables, les règles de sécurité les limitant à la valeur libérale de 5 %

du courant nominal par phase (sous conditions). Nous tablons *a priori* sur 1 A de courant de fuite par MVA de puissance installée en électrotechnique classique, et 10 fois plus dans une salle informatique. Un courant de fuite d'une dizaine d'ampères pour une grande salle informatique n'est pas anormal.

Les alimentations à découpage génèrent des courants HF dans leur conducteur PE. Il ne faudrait pas protéger des équipements électroniques par des disjoncteurs différentiels sensibles aux courants de fréquence élevée car ils risquent de déclencher en marche normale. Enfin les courants de défaut d'isolement (dont les courts-circuits) circulent dans les conducteurs de protection.

Puisque les courants de fuite et de défaut sont des courants internes, ils ne passent pas dans la terre, donc la résistance de la terre est indifférente. En schéma TT avec deux terres (l'une pour le neutre, l'autre pour les masses), puisque le courant de fuite passe réellement dans la terre, il est normal qu'une valeur maximale de résistance de terre soit spécifiée.

■ Référence de potentiel statique

Certains mobiles isolés du sol (camions ou aéronefs) se chargent par rapport à la terre, par un vent poussiéreux par exemple. Des charges électriques transportées par les particules de l'air se déposent sur le mobile dont la tension par rapport au sol peut atteindre plusieurs dizaines de kilovolts. Il est clair que, lors du remplissage en carburant, une étincelle risquerait de mettre le feu aux vapeurs si le mobile n'était pas préalablement déchargé.

Le courant continu collecté par un mobile se compte au maximum en dizaines de microampères. La résistance de la terre peut donc atteindre 10 k Ω sans le moindre risque. Ainsi, même dans le plus résistif des sols secs, n'importe quelle tige enterrée sur 1 m réalise une parfaite prise de terre. Seule une prise servant à décharger un mobile peut être appelée *terre de sécurité* sans erreur de concept. Le manuel américain MIL-HDBK 274 (téléchargeable gratuitement sur Internet) détaille les exigences de mise à la terre des aéronefs.

Les hélicoptères, qui doivent respecter la même procédure, posent un problème supplémentaire lors de l'atterrissage. Le brassage d'un air poussiéreux, ou de grésil, par les pales du rotor principal peut charger l'hélicoptère par balloélectricité à une tension mortelle pour celui qui, au sol, toucherait un patin. L'utilisation d'un harpon relié à la terre (ou au pont du navire) est obligatoire.

Bien que sa résistance soit élevée, une languette « mise terre » fixée sous le châssis d'une automobile permet d'évacuer ses charges à la route, tant que la languette reste en contact avec le sol. Cette languette au rôle psychologique incontestable ne réduit pas le risque du désagrément d'une décharge électrostatique d'une personne chargée par rapport au véhicule.

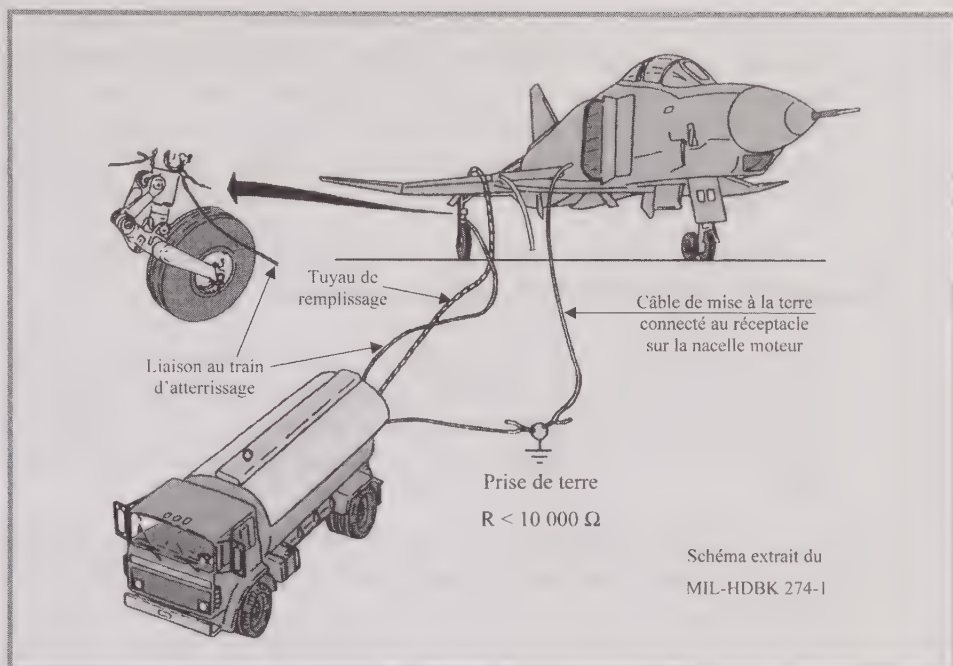


Figure 1.3 – Mises à la terre du camion-citerne et de l'aéronef avant remplissage.

On peut en effet se charger en marchant avant d'entrer dans une voiture, mais on peut surtout se charger quand on descend du véhicule, par le frottement des habits sur le siège. Il est étonnant que l'on se préoccupe du potentiel du véhicule par rapport à la terre (en champ électrique, l'effet de cage de Faraday est excellent) et jamais de la charge des occupants par rapport à la masse. Pourquoi ne pas remplacer les matières plastiques des garnitures de portes par des matières anti-statiques, ce qui permettrait aux passagers de se décharger sans étincelle ?

Pour éviter qu'une dame aille se poudrer le nez devant le miroir de courtoisie durant le remplissage d'essence dans une station self-service, avec un risque de se charger d'électricité puis de se décharger dans les vapeurs d'hydrocarbures, les crosses de pompe à essence n'ont plus de verrouillage mécanique. Cette précaution oblige les clients à rester immobiles. Quant aux téléphones portables, ils peuvent éventuellement perturber les modems des pompes à essence, mais ils ne risquent pas de mettre le feu à des vapeurs d'hydrocarbures.

Signalons le risque de faire le plein d'un camion dans un désert lorsque souffle un vent poussiéreux. Le phénomène de balloélectricité peut charger le camion à plus de 10 kV, avec risque de décharge électrostatique lors du contact entre la crosse de la pompe avec le réservoir métallique. Ici encore, le raccordement du mobile à une terre de résistance inférieure à 10 k Ω évite tout risque d'étincelle.

Enfin, dans les industries électroniques, la prise de terre pour les bracelets de mise à la terre et des tapis de table permet d'évacuer les charges électrostatiques à la terre; il est souhaitable que sa résistance ne soit pas supérieure à la valeur de la résistance insérée volontairement en série avec le fil (pour protéger l'opérateur des risques d'électrisation), soit $1\text{ M}\Omega$. Autant dire qu'une simple fiche de camping, enfoncée de quelques centimètres dans le plus résistif des sols, ferait l'affaire !

■ Courants de mode commun des câbles externes

Le rôle d'une terre est d'écouler dans le sol les courants qui entrent en mode commun dans le site. Les inévitables courants de mode commun qui pénètrent par les lignes d'énergie et de communications sont à écouler dans la terre. Nous appellerons ces lignes *câbles externes*, par opposition aux *câbles internes* qui restent dans le site.

Pour ne pas perturber les systèmes électroniques, il est souhaitable de dériver à la terre dès l'entrée dans le site les **courants externes** (courants en mode commun des câbles externes). Un isolement galvanique sans limiteurs de surtensions est insuffisant à la protection d'un câble externe. En cas d'orage, les surtensions de mode commun se comptent en effet en dizaines de kilovolts : sans parafoudre, les surtensions dépasseraient la rigidité diélectrique des équipements.

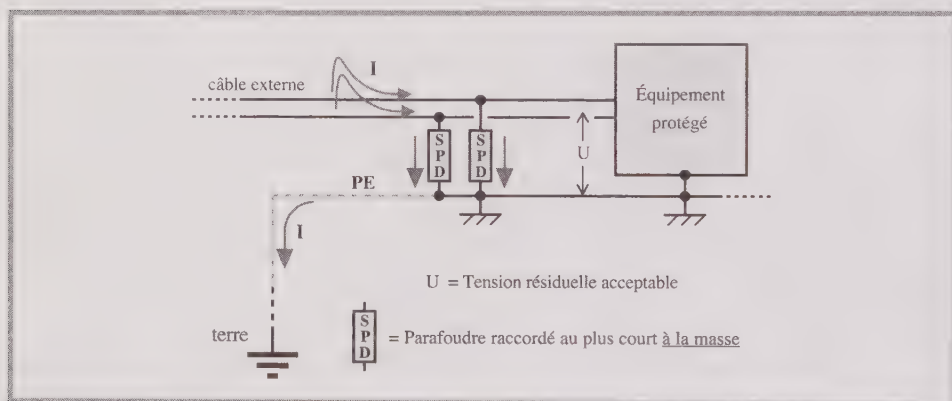


Figure 1.4 – Écoulement d'une surtension externe « à la terre ».

Il est théoriquement souhaitable d'installer les limiteurs de surtensions primaires (c'est-à-dire ceux en tête, à forte énergie, dits de classe I) entre chaque fil à protéger et la terre plutôt qu'entre fil et masse afin de limiter la circulation des courants externes à travers le réseau de masse. Mais en pratique, une telle recommandation n'a guère de sens.

Il convient alors d'installer des limiteurs de surtensions secondaires par rapport à la masse de l'équipement protégé. Pour qu'une protection parallèle (entre un fil

et la terre ou la masse) soit efficace, ce n'est pas l'impédance de la prise de terre qui importe mais celle, heureusement facile à maîtriser, entre le conducteur protégé et la masse de l'équipement.

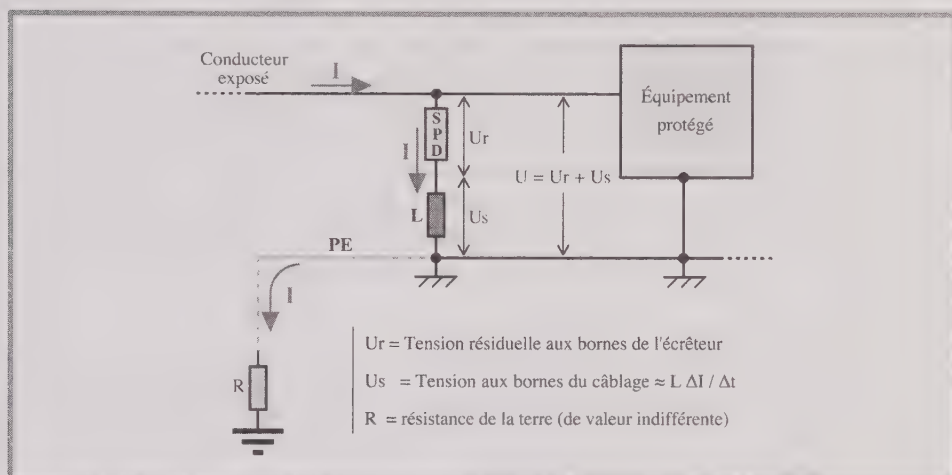


Figure 1.5 – Il importe de relier les parafoudres de façon courte à la masse.

Le montage d'une protection parallèle doit être réalisé avec le minimum d'impédance commune entre le circuit externe et le circuit protégé. La longueur de câblage en série avec le parafoudre doit être aussi courte que possible. La norme UTE 15-443 spécifie que la longueur totale du câblage doit rester inférieure à 0,5 m. Notons que la tension résiduelle dépend de l'impédance (essentiellement l'inductance) du câblage en série avec le parafoudre, mais qu'elle est indépendante de la résistance de la terre.

Même avec une « mauvaise » terre, il est possible de protéger un équipement contre les surtensions externes si le limiteur de surtensions est relié court à la masse du matériel. Les avions sont efficacement protégés des impacts de foudre grâce à des limiteurs de surtensions correctement dimensionnés et câblés au plus court (quelques centimètres) à la masse... Mais pas à la terre !

Application 1.1 : tension résiduelle d'un parafoudre

Évaluer la tension crête aux bornes d'un parafoudre composé d'un limiteur (tension résiduelle de 1 500 V crête) en série avec un câble long de 1 m quand elle écoule un courant de foudre de 15 kA en 1 μ s.

Solution

$$U_r = 1\,500\text{ V}$$

U_s , tension de la connexion en série avec l'éclateur = $L \Delta I / \Delta t$.

1 m de câble présente une inductance $\approx 1 \mu\text{H}$ (voir tome 1).

$$U_s = 1 \times 10^{-6} \times 15\,000 / (1 \times 10^{-6}) = 15\,000 \text{ V !}$$

$$U = U_r + U_s = 16\,500 \text{ V !}$$

La tension due à un câblage de 1 m est, dans cet exemple, un peu sévère, 10 fois supérieure à la tension résiduelle théorique du parafoudre. Cette surtension, bien que courte, peut provoquer un claquage diélectrique dans l'équipement « protégé ». Inutile de préciser qu'une connexion en étoile à la barrette de terre (distante de plus de 10 m) serait une catastrophe ! Même un fabricant de parafoudres est gêné pour mesurer la tension crête de ses composants par l'inductance du câblage d'essai, et par la mutuelle inductance entre la boucle de câblage amont (supportant un fort $\Delta I / \Delta t$) et la surface de boucle aval (théoriquement protégée par le parafoudre).

Le guide UTE C 15-443 (août 2004), excellent complément de la NF C 15-100 propose quatre règles de câblage pour le bon montage des parafoudres dans un tableau électrique. Nous ne pouvons pas mieux faire que de reproduire ici ces conseils réalistes et de bon sens.

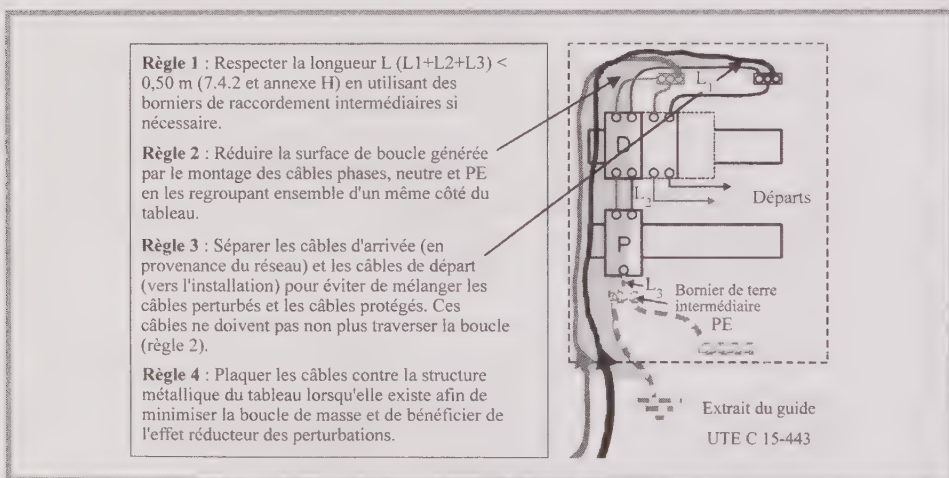


Figure 1.6 – Les règles de câblage des parafoudres dans un tableau électrique.

Toute canalisation conductrice externe peut supporter des courants de mode commun. Citons les tuyaux d'eaux (de ville, industrielle, pure, déminéralisée, usée, tiède, chaude, froide), de fuel, de gaz divers, d'air comprimé, de vide, les canalisations d'évacuation, etc. N'oublions pas (c'est une obligation légale) de connecter toutes ces canalisations externes au réseau de terre. Le mieux est de les relier à la barrette de terre la plus proche, à l'entrée de chaque bâtiment.

Si les courants de mode commun ne sont pas écoulés dans le réseau de terre, ils s'écoulent par les autres canalisations externes. Cela n'est pas dangereux pour les gros câbles, mais peut poser des problèmes aux fils de faible diamètre, aux fils téléphoniques en particulier. Ainsi, les paires téléphoniques de 0,4 mm sont plus vulnérables que celles de 0,6 mm. Aucun parafoudre, même un robuste type 1, ne protège les fils fins de la surchauffe. C'est aussi pourquoi aucune protection contre la foudre n'est parfaitement sûre lors d'un coup au but (pour choisir le meilleur parafoudre en fonction de la ligne à protéger, se reporter au tome 3).

Même avec une « excellente » terre, il est impératif de protéger des surtensions tous les câbles externes : les câbles de télécommunications, les contrôles d'accès, les alarmes extérieures, et les signalisations informatives et les systèmes de sécurité. Contrairement aux lignes d'alimentation, les câbles blindés internes, et les câbles blindés externes assez courts, disons de moins de 100 m, accompagnés d'une câblette de terre ou posés de bout en bout dans un chemin de câbles métallique n'ont pas besoin de parafoudres. Tel est le cas de caméras vidéo, des jauges de contrainte d'un pont-bascule, ou du câble de mesure d'un pH-mètre par exemple.

■ Courant direct de foudre

Un dernier type de courant à évacuer est le courant de foudre direct, aussi appelé *coup au but*. Un gros choc positif peut dépasser 200 kA. La difficulté par rapport au cas précédent est que le point d'impact (point d'entrée) n'est pas défini de façon sûre, même s'il y a un paratonnerre ! Il importe d'écouler le courant de foudre dans la terre en conservant des tensions acceptables entre les équipements interconnectés du site, c'est-à-dire en limitant la circulation du courant de foudre dans les câbles internes (le tome 4 traite en détail de la coordination des protections foudre).

Même quand la résistance de terre est élevée, le courant de foudre finit son parcours dans le sol ; l'élévation du potentiel du site par rapport à une terre lointaine est simplement supérieure à ce qu'elle serait si la terre était « bonne ». Une faible résistance de terre limite sans doute le courant évacué par les câbles externes, mais elle ne dispense pas de leur protection. Démontrons cette nécessité.

Application 1.2 : montée en potentiel d'un site foudroyé

Quelle est la montée en potentiel d'un site doté d'une excellente terre de $1\ \Omega$ par rapport à une terre lointaine lorsqu'il se fait foudroyer par un choc de foudre médian, c'est-à-dire dépassé une fois sur deux, soit 25 kA ?

Solution

Si nous négligeons les inductances en série avec la résistance de terre, nous pouvons écrire : $U = RI$.

$$U = 1 \times 25\ 000 = 25\ \text{kV}$$

Aucun connecteur électronique habituel, aucun optocoupleur, aucun relais classique, ni un aucun transformateur de signal ne résiste à une telle surtension. Par ailleurs, pour se protéger dans 98 % des cas, il faudrait retenir une menace de 200 kA ! Et nous avons négligé l'inductance des câblages !

La protection par limiteurs de surtensions (parafoudres) de tous les câbles externes est impérative. CQFD.

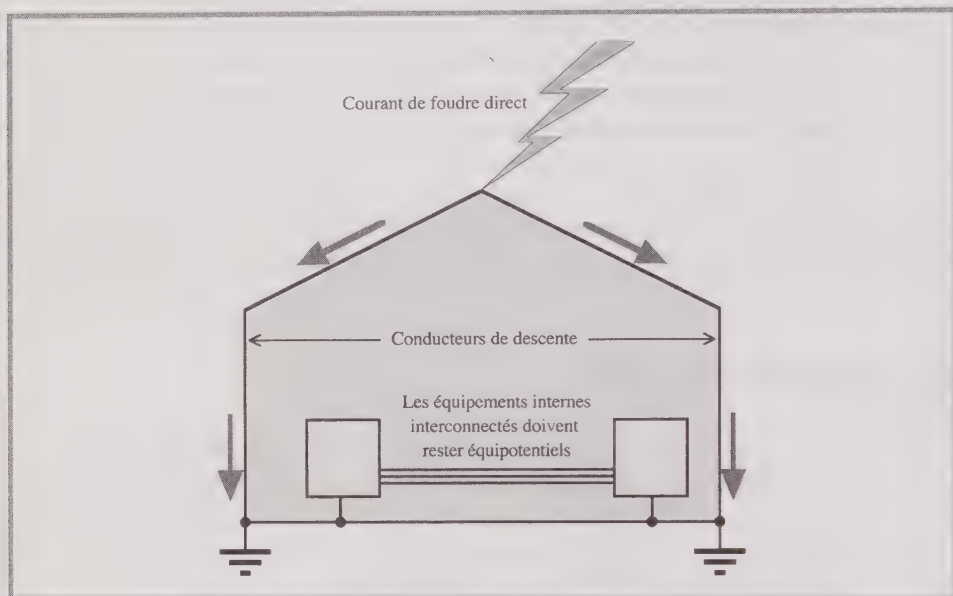


Figure 1.7 – Écoulement du courant de foudre direct à la terre.

■ Les ouvrages à haute tension

Un courant de défaut entre deux phases d'une ligne à haute tension ne passe pas par la terre. Mais la plupart des amorçages sont des défauts simples, c'est-à-dire un amorçage entre une phase et la terre. Ce courant de défaut se referme par la terre entre le défaut et le poste source. En moyenne tension (en 20 kV que l'on devrait désormais appeler *HTA*, mais on se comprend), le courant de défaut simple est limité à quelques centaines d'ampères, et encore moins si l'on remplace la résistance de mise du neutre à la terre par une bobine de Petersen (voir tome 4).

Ces courants sont assez faibles pour limiter les risques liés à la montée en potentiel du poste. Par ailleurs même avec la plus mauvaise des terres, la montée de potentiel permanente d'un poste ne peut pas excéder la tension simple, soit 11,5 kV par rapport à la terre lointaine. Les risques au voisinage d'ouvrages en 20 kV sont donc faibles, du moins en France où le réseau HTA est en schéma IT.

La montée en potentiel d'un poste THT par rapport à une terre éloignée, si sa résistance de terre était élevée, peut atteindre une centaine de kilovolts. Ce n'aurait guère d'importance si aucun câble basse tension n'était enterré à proximité du poste. Un câble BT enfoui au voisinage, un câble téléphonique par exemple, risque d'être perforé par un claquage diélectrique et de servir d'électrode de terre !

De manière analogue, une habitation proche d'un poste THT risquerait d'avoir sa terre des masses monter en potentiel de façon excessive par rapport à la terre du neutre (encore un problème du schéma TT). Quand il n'est pas possible de s'éloigner des habitations, ou de protéger les victimes par des limiteurs de surtensions, il faut abaisser la résistance de la terre du poste THT. Le manuel HN 115 publié par EDF est désormais appliqué sans problème par les spécialistes de RTE.

La résistance de la terre d'un poste THT est calculée de manière à limiter en cas de défaut simple la tension appliquée aux matériels du poste, et les risques pour les câbles BT ou signaux souterrains du voisinage. L'augmentation de la surface maillée étale le dôme de potentiel, ce qui réduit le gradient de potentiel au sol, donc réduit les risques d'électrocution. La résistance de la prise de terre d'un poste THT est calculée de manière à ce que la tension de pas, c'est-à-dire conventionnellement la tension entre deux points accessibles au public distants de 1 m dans le sens du gradient maximal (donc le long d'une ligne de courant) ne dépasse pas 200 V (valeur maximale acceptable durant 0,5 s).

Une variante inattendue de terre de protection est celle d'un abreuvoir installé sous une ligne à haute tension. Par influence capacitive, un abreuvoir qui ne serait pas mis à la terre se chargerait à quelques centaines de volts. Le courant de décharge, de l'ordre de 1 mA n'est pas dangereux en soi, mais les vaches y sont plus sensibles que les humains. Elles se retiennent de boire, donnent moins de lait et finissent par développer des mammites. Relier l'abreuvoir à la terre résout ce problème.

Il en est de même des clôtures métalliques (en fils de fer) qui, de longueur suffisante sous une ligne à haute tension, peuvent devenir dangereuses. En effet, sous une ligne THT, le champ électrique peut atteindre quelques kilovolts par mètre. Un fil parallèle à la ligne, à 1 m au-dessus du sol, s'électrise par influence à une tension de quelques kilovolts. L'impédance de cette source est celle d'une capacité d'environ 10 pF/m. Ainsi, un tel fil de 300 m dans un tel champ peut délivrer un courant de quelques milliampères. Il faut également prendre en compte le couplage inductif lié au champ magnétique rayonné par le courant de ligne. Cet effet est le seul à prendre en compte pour un câble téléphonique enterré, donc à l'abri du champ E .

La solution est identique pour les deux couplages (capacitif ou inductif) : une mise à la terre de la clôture tous les 100 m environ. Le mieux est d'utiliser des piquets métalliques. Lorsque le sol est impropre à réaliser des prises de terre, des isolateurs doivent interrompre régulièrement la continuité électrique de la clôture.

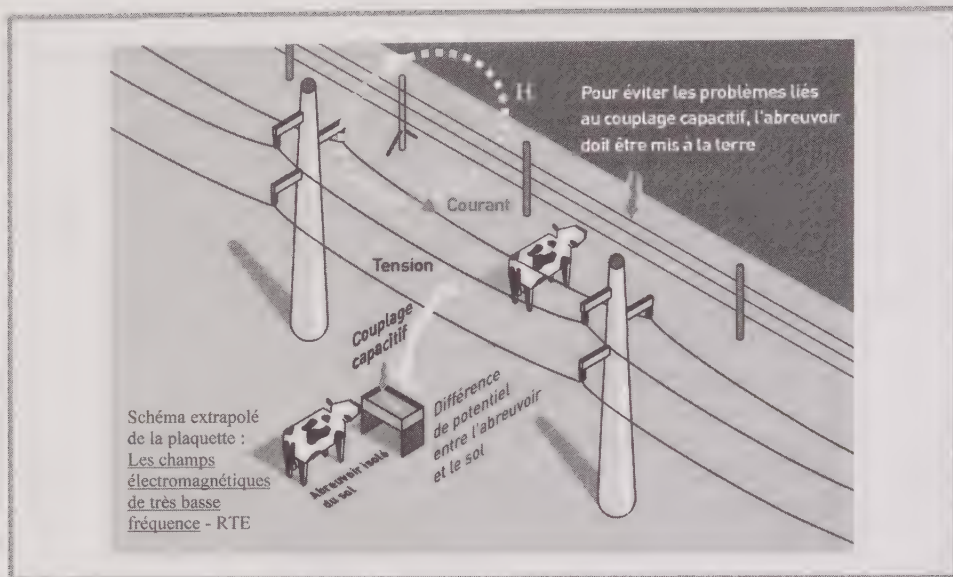


Figure 1.8 – Le problème des abreuvoirs et clôtures métalliques sous une ligne HT.

Quant aux câbles téléphoniques, il est souhaitable qu'ils ne soient pas enterrés sur plusieurs kilomètres au-dessous d'une ligne électrique. Le problème est moins la tension permanente de mode commun que la surtension induite en cas de court-circuit sur la ligne THT : elle peut provoquer un claquage de l'isolant du câble.

■ Câbles à effet réducteur

En cas de proximité d'un câble téléphone avec une ligne aérienne perturbatrice (ligne TGV de 300 A nominaux à 50 Hz par exemple), l'induction de la caténaire peut induire une tension de mode commun importante dans la boucle de masse entre le câble victime et le sol. Un courant de mode commun est ainsi lancé sur le câble victime.

L'idéal serait de blinder le câble victime de bout en bout par un écran efficace, c'est-à-dire bon conducteur et avec une structure fermée, de laisser cet écran au contact de la terre de bout en bout et de le connecter aux masses à chaque extrémité. Peu importerait alors la résistance des terres des sites aux extrémités, l'effet réducteur serait significatif. Inutile de préciser qu'un tel câble coûterait cher.

Quand, pour des raisons d'économie, on ne veut pas éloigner la ligne victime, on ne blinde que le tronçon le plus exposé. On doit alors réaliser deux terres (une à chaque extrémité du tronçon protégé) pour y connecter l'écran. La somme des résistances des deux terres plus celle de l'écran doit être inférieure à l'impédance

inductive (la réactance) de l'écran pour apporter un effet réducteur. Inutile de préciser qu'à 50 Hz, même avec des terres parfaites, l'effet réducteur n'est pas vertigineux : il faudrait des écrans avec une résistance linéique très inférieure à $300 \mu\Omega/\text{m}$. Néanmoins les deux terres pour un câble à effet réducteur sont l'un des rares cas où la résistance d'une terre n'est pas totalement indifférente.

La SNCF a trouvé une astuce pour limiter le rayonnement des caténaires. Une ligne de compensation est ajoutée en parallèle et à la même hauteur que la caténaire. Des autotransformateurs sont installés de proche en proche (tous les quelques kilomètres) entre la caténaire et la ligne de compensation, avec un point milieu au rail. Les pertes cuivre sont ainsi divisées par deux, et surtout les deux boucles caténaire/rail d'une part et ligne de compensation/rail d'autre part sont de surfaces égales et de flux opposés. La compensation du champ est bonne dans la bande téléphonique. Vivent les astuces, et bravo à celui qui en a l'idée !

■ Contrepoids d'une antenne fouet

Un dernier cas où la résistance d'une terre importe est la prise de terre servant de contrepoids à une antenne hectométrique verticale. Une antenne se comporte du point de vue électrique comme un dipôle composé d'une résistance de rayonnement, d'une réactance et d'une résistance de perte.

Si la réactance peut être compensée par un circuit d'accord (par la mise en série de la réactance conjuguée), la résistance de perte dégrade l'efficacité de l'antenne, la chaleur dissipée dans le sol est issue de la puissance de l'émetteur, et la puissance rayonnée en est réduite.

Une antenne « fouet » (en pratique un pylône métallique), ou une antenne « long fil », utilise le sol comme contrepoids. Entre 500 kHz et 5 MHz (soit pour des hauteurs de pylônes comprises entre 15 m et 150 m environ), la résistance de perte est principalement localisée dans le sol. Au-delà de 5 MHz, on préfère utiliser d'autres types d'antennes qui n'utilisent pas de terre en contrepoids.

Ce n'est pas la résistance de la prise de terre par rapport à une terre lointaine, mais les pertes dans le sol au voisinage du pylône qui importent. Quelques conducteurs de cuivre (une dizaine par exemple) de longueur comparable à la hauteur du fouet, enterrés « en rayon de roue de charrette » améliorent le gain de l'antenne. Ainsi, le toit métallique d'une voiture (ou une tôle fine ajoutée dans le toit de la cabine d'un camion) est un excellent contrepoids malgré une résistance de terre infinie.

La mesure de la résistance de perte d'une antenne n'est pas commode. C'est néanmoins la seule méthode physique pour définir de façon scientifiquement correcte la résistance d'une prise de terre en hautes fréquences. Par sa définition même,

une tension perd son sens entre deux points distants. La notion de potentiel scalaire perd son sens au-delà d'un dixième de longueur d'onde : seule la notion de champ garde un sens à toutes fréquences.

Pour ceux qui n'utilisent pas leur terre comme le contrepoids d'une antenne fouet, l'impédance de la prise de terre n'est pas mesurable en HF. Que cela ne nous donne pas d'insomnies : ce qui ne peut pas se mesurer n'a probablement aucun intérêt : il n'est de physique que de mesurable.

Nous sommes tentés de prétendre (d'un point de vue intellectuel, juste pour sourire) qu'une mauvaise terre, disons de $100\ \Omega$ à $200\ \Omega$, amortit mieux (plus efficacement) les résonances des câbles de terre qu'une excellente terre de l'ordre de quelques ohms. En immunité HF, une « mauvaise » terre est favorable !

■ Terre « crypto »

Une étrange malédiction plane sur la CEM. Elle rend les évidences confuses, le bon sens suspect, les contresens crédibles, les phénomènes obscurs, l'erreur plausible, la physique incompréhensible et les mythes durables. Des personnes compétentes et raisonnables commettent parfois des méprises qu'un bachelier devrait éviter. Une illustration nous est donnée par le mythe de la terre « crypto ».

Tout équipement électrique de traitement de l'information (visuel, imprimante, carte à processeur) génère en fonctionnant des perturbations électromagnétiques mesurables qui, après analyse, peuvent permettre de restituer l'information traitée en clair. Une telle émission est insupportable pour des informations confidentielles (transmissions militaires, de sécurité de l'État, projets confidentiels...). La surveillance, la mesure normalisée et la réduction des émissions compromettantes s'appellent l'*anticompromission* ou *SÉCOM* en français, et *TEMPEST* en anglais.

Il est vrai que le conducteur de terre d'un appareil électrique peut supporter des courants compromettants BF, en particulier pour des terminaux à bas débits (des imprimantes à impact par exemple). Des règles d'installation ont été établies selon lesquelles il faudrait utiliser un câble de terre et une terre séparés du reste de l'installation pour limiter le risque de compromission. C'est faux !

Une terre séparée, dite *terre « crypto »*, serait d'une efficacité illusoire. Tout courant BF injecté dans la terre se referme selon la loi de Kirchhoff par au moins un autre conducteur (par la ligne d'alimentation par exemple), où il peut être mesuré. Cette loi reste vraie même si une partie du circuit (le câble et la terre « crypto ») est physiquement inaccessible. La seule façon sûre de résoudre le problème est qu'aucun courant compromettant ne sorte du local protégé (zone « rouge »). Le problème n'est ni le câble de terre ni la terre, mais l'installation et ses lignes.

Un transformateur d'isolement avec un écran (bien câblé) peut être installé sur chaque câble externe du local pour l'isoler en mode commun. Pour l'alimentation,

la meilleure solution est un groupe tournant (Siepel par exemple) qui fournit à la fois l'isolement galvanique, la protection contre les creux de tension, les surtensions et le filtrage à toutes fréquences. Quant aux signaux, la meilleure méthode pour les transmettre est la fibre optique, éventuellement sous tube sous pression. Un signal crypté n'est sûr que si aucun signal compromettant (« rouge ») ne s'y superpose.

Les Américains et l'OTAN ont partiellement déclassifié des manuels de TEMPEST. Le lecteur pourra télécharger sur Internet d'intéressants documents : NACSIM 5000, NACSEM 5122 (partiellement), EP 1110-3-2 (douze chapitres), MIL-HDBK 232A, DoD 8510.1-M, DoD Directive 5200.28, etc. Malheureusement la norme fondamentale NACSIM 5100A, équivalente à l'AMSG 720b, reste classifiée.

■ Terres fonctionnelles

Terre fonctionnelle, que de crimes on commet en ton nom ! Une terre fonctionnelle est une prise de terre faisant partie d'un circuit électrique actif, la Terre (notre planète) servant de conducteur de retour. Cela signifie que si l'on déconnecte une terre fonctionnelle, un équipement ne fonctionne plus. Nous avons longuement recherché quelles sont les terres fonctionnelles encore utilisées de nos jours. Les terres fonctionnelles ressemblent aux dinosaures : tout le monde les connaît même si personne n'en a vu hors des musées !

Les terres fonctionnelles sont nées avec le télégraphe. Au XIX^e siècle, pour économiser un fil, on utilisait la Terre comme retour. De là sont nées des exigences qui avaient un sens pour la réalisation des « terres télégraphiques ». Pour que la résistance totale de boucle reste inférieure à 600 Ω , on demandait à chacune des deux électrodes de terre une résistance inférieure à 100 Ω . De proche en proche, des exigences comparables, ou durcies, ont été reprises pour des terres qui n'ont plus rien de fonctionnel. Dans de nombreux documents, mêmes récents, la résistance maximale de terre est spécifiée à 10 Ω , voire moins, sans la moindre justification.

Durant la Grande Guerre, la terre a été utilisée comme support de transmission sans fil : Le parleur TM 2 bis à lame vibrante, réglable de 300 à 800 « cycles » excitait deux piquets de terre éloignés de plusieurs mètres. La réception était assurée par deux autres piquets, de l'ampli « 3 ter » muni d'un écouteur téléphonique. La portée pouvait atteindre 3 km. C'étaient des terres fonctionnelles, ça, Monsieur !

En cherchant, on finit par découvrir quelques terres fonctionnelles encore utilisées. Par exemple, on ne tire qu'un câble sous-marin unifilaire à haute tension à partir de la centrale, et on installe deux « plaques de mer » servant d'électrodes de retour du courant. L'île d'Auckland en Nouvelle-Zélande est alimentée à partir de la centrale hydroélectrique enterrée de Manapouri (600 MW) distante d'un

millier de kilomètres par un seul câble HT en courant continu, avec retour du courant par la mer.

On a longtemps utilisé des téléscrip-teurs en courant continu (RON-TRON) avec retour du courant par le sol. Les équipements les plus fragiles durant notre service national dans l'arme des transmissions étaient les télex dont l'étage d'entrée était protégé par une diode Transzorb. Avant tout dépannage, nous remplaçons ce parafoudre; le plus souvent, c'était suffisant ! En France, ce type de télex n'existe plus depuis 1990 : c'est désormais une modulation à fréquences vocales en mode différentiel qui est utilisée. Il en est de même en téléphonie, où l'ancienne taxation en mode commun (avec retour du courant à 50 Hz par le sol) est désormais remplacée par des impulsions à 12 kHz en MD : c'est nettement plus ardu à truander.

Il y a au moins une différence entre les terres fonctionnelles et les dinosaures : chacun sait bien que ces derniers ont disparu !

■ En conclusion des rôles des terres

Une terre ne sert pas de protection, c'est l'équipotentialité des masses qui compte, pour la sécurité des personnes comme pour l'immunité des équipements. Elle n'évacue ni les courants de fuite ni ceux de défaut (sauf pour les postes HT ou en schéma TT à deux terres). Un vulgaire piquet de terre suffit à décharger tout mobile isolé. Les courants externes, courant de foudre compris, s'évacuent à la fois dans la terre et par les câbles externes. La résistance de terre importe peu pour la protection des câbles contre la foudre, bien qu'elle ne soit pas totalement indifférente dans ce cas. Dans un poste THT, le gradient de potentiel, donc le périmètre du réseau de terre, compte plus pour le voisinage que la valeur de la résistance de la terre. Quant aux câbles à effet réducteur, le contre-poids des antennes hectométriques et les terres fonctionnelles, nous pouvons les ignorer. Une terre ne sert à rien d'autre.

En CEM, ce n'est ni le potentiel absolu ni la résistance de la terre qui comptent, mais l'équipotentialité entre les masses simultanément accessibles pour la sécurité des personnes, et entre les masses des équipements interconnectés pour le bon fonctionnement des matériels. Si la mise à la terre était nécessaire à la protection des personnes, par principe de précaution, il faudrait interdire les avions !

En d'autres termes, une faible résistance « verticale » d'une terre par rapport à une terre lointaine nous importe beaucoup moins que l'équipotentialité « horizontale » du site. Un équipement sur un site ne peut pas connaître la valeur de la résistance de la terre à laquelle il est connecté. Et entre terres séparées, il apparaît inévitablement des kilovolts, même entre les meilleures terres de la Terre !

Un équipement au cœur d'un site ne voit que les tensions des équipements auxquels il est connecté. Pour réduire l'impédance entre deux points d'un site nous décrirons au chapitre suivant comment réaliser un réseau de masse équipotentiel.

Nous comprenons déjà que le rôle des masses est très important, bien plus que celui de la terre. Soyons convaincus que la seule vertu nécessaire au bon fonctionnement des équipements est l'équipotentialité du site. Par chance, contrairement à la réduction de la résistance d'une terre, c'est un objectif facile à atteindre.

2 Mesure de la résistance d'une terre

La qualité d'une prise de terre est quantifiée traditionnellement par sa résistance. C'est une habitude que nous acceptons, même si elle nous indiffère, ou presque.

La résistance d'une terre n'a de sens qu'en basse fréquence. Au-delà de quelques mégahertz, c'est-à-dire dans la gamme des fréquences pour laquelle les équipements électroniques deviennent les plus sensibles, l'impédance d'une prise de terre n'est non seulement plus mesurable, mais n'a physiquement plus de sens. En effet, même s'il est encore possible de définir en théorie sa résistance comme celle de perte d'une antenne fouet, nous savons qu'un câble de longueur supérieure à $\lambda/30$ a une impédance supérieure à 50Ω , donc ne contribue plus à l'équipotentialité du site. Ce câble peut en revanche collecter les champs et les transformer en courants perturbateurs par effet d'antenne.

Lorsque l'on injecte depuis un point très éloigné un courant I dans une prise de terre de résistance R , un dôme de potentiel apparaît. La tension maximale de ce dôme par rapport à une terre lointaine est égale au produit RI . La largeur du dôme dépend de la géométrie de la prise de terre et de la résistivité du sol. Meilleure est la résistivité du sol (plus elle est faible) et plus petit est le dôme de potentiel.

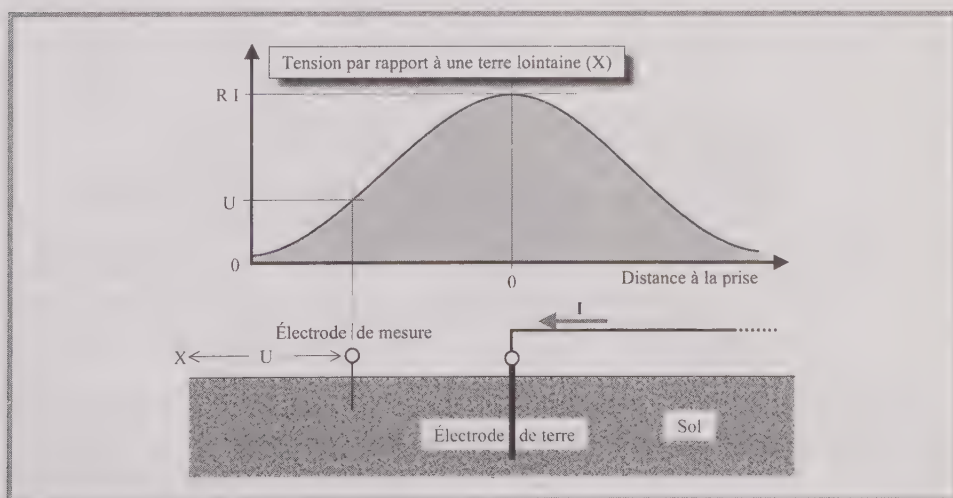


Figure 1.9 – Le « dôme de potentiel » d'une prise de terre.

Si l'on installe une seconde prise de terre dans le dôme d'une première terre, les deux prises de terre sont couplées, c'est-à-dire qu'un courant injecté dans l'une modifie la tension de l'autre. Le schéma équivalent nécessite trois résistances : r_1 et r_2 , appelées *résistances propres des deux prises*, et r_{12} appelée *résistance de couplage des terres*. La résistance R_1 de la terre n° 1 est égale à $r_1 + r_{12}$ (et $R_2 = r_2 + r_{12}$).

Plus les prises sont proches, plus r_{12} est grande. Pour que deux prises de terre soient indépendantes, il faut que r_{12} devienne négligeable. Il faut les éloigner, selon la dimension des électrodes et la résistivité du sol, de 100 m à 10 km.

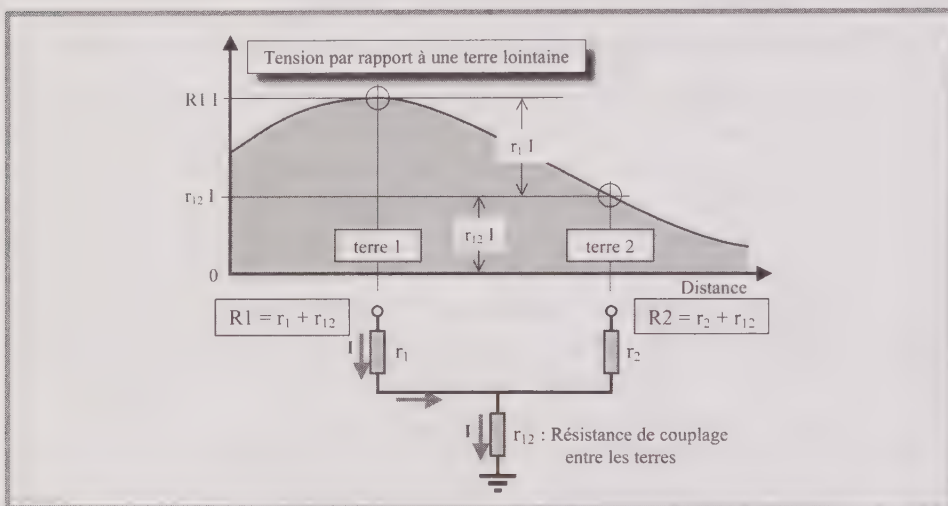


Figure 1.10 – Schéma équivalent de deux terres proches donc couplées.

Deux prises de terres voisines sont toujours couplées. Leur mise en parallèle donne une impédance supérieure à la mise en parallèle de leurs résistances. Si on relie deux prises de terre proches de $10\ \Omega$ chacune, on obtient par exemple une terre de $7\ \Omega$. Pour tendre vers $5\ \Omega$, il faut qu'elles soient indépendantes, c'est-à-dire très éloignées.

Le couplage des terres est favorable. En effet, leur équipotentialité est meilleure que si elles étaient indépendantes. Le problème est que ce couplage varie avec l'humidité du sol. Si on observe des dysfonctionnements croissants avec l'assèchement du sol, tout rentre dans l'ordre après une forte pluie. L'interconnexion de toutes les terres d'un même site est la seule solution, tant technique que légale, à ce problème.

■ Techniques de mesure de la résistance d'une terre

Une première idée pour mesurer la résistance d'une prise de terre est de planter deux piquets aussi loin que possible de la prise à mesurer et d'effectuer les mesures

des trois résistances entre les prises. Si les piquets sont assez éloignés pour que l'on puisse négliger leurs résistances de couplage, on mesure les résistances $(R_1 + R_2)$, $(R_2 + R_3)$ et $(R_3 + R_1)$. Avec trois mesures à trois inconnues, on détermine facilement la résistance souhaitée. Pour les amateurs de formules :

$$R_1 = 0,5[(R_1 + R_2) + (R_3 + R_1) - (R_2 + R_3)]$$

En fait, cette mesure est délicate : il faut être certain de pouvoir négliger les résistances de couplage ; il faudrait donc effectuer plusieurs mesures en éloignant les deux piquets de mesure jusqu'à ce que le résultat devienne constant.

Le plus ennuyeux est l'incertitude de la mesure, surtout quand la résistance de la prise à mesurer est bien meilleure que celle des deux piquets, ce qui est généralement le cas. Compte tenu des incertitudes des mesures, il arrive que l'on trouve une résistance de terre négative !

On préfère donc en pratique une méthode plus simple qui a au moins l'avantage de toujours donner un résultat positif. La résistance d'une (prise de) terre se mesure habituellement par la **méthode de la chute de potentiel**. La prise de terre à mesurer est notée électrode n° 1. Un piquet n° 2, appelé *électrode d'injection de courant* ou *collectrice*, est planté où l'on veut, mais aussi loin que possible de l'électrode n° 1 en figure 1.11. Les fils étant pénibles à enrouler (pour les dérouler, ça va !), l'éloignement dépasse rarement une centaine de mètres. Enfin un piquet n° 3, appelé *électrode de mesure*, est planté où l'on peut, un peu loin de l'électrode à mesurer que de l'électrode d'injection. Une répartition 60 %-40 % donne de bons résultats.

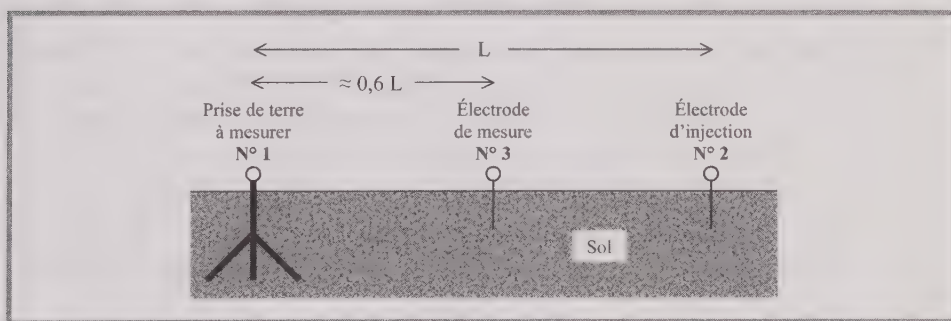


Figure 1.11 – Configuration géométrique de la méthode de la chute de potentiel.

À la campagne, il n'y a guère de difficulté pour planter correctement les piquets n° 2 et 3, mais en ville, on fait comme on peut. Un industriel dans une tour de La Défense s'inquiétait de sa résistance de terre. Nous avons pris le temps de lui expliquer l'inutilité de la chose plutôt que d'essayer de planter des piquets dans le béton, dans un pot de fleurs, dans un parking souterrain, ou entre les rails du RER !

Un générateur de courant I à une fréquence non multiple de celle du réseau est connecté entre l'électrode à mesurer et le piquet d'injection. Les telluromètres du commerce utilisent une fréquence basse, entre 85 Hz et 2 kHz typiquement. La tension U entre les piquets n° 1 et 2 est mesurée par un voltmètre sélectif ou par détection synchrone. Par convention, on appelle *résistance de terre* le rapport U/I .

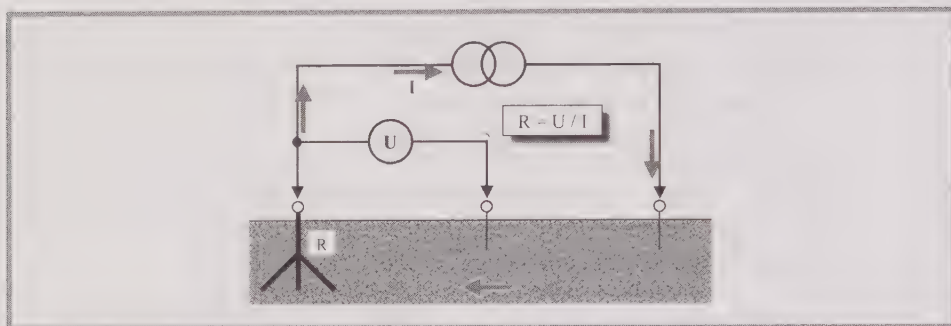


Figure 1.12 – Méthode de la chute de potentiel (en « 3 fils »).

La résistance d'une terre est proportionnelle à la **résistivité du sol**. Mais le sol réel n'ayant pas une résistivité homogène, le dôme de potentiel n'est pas symétrique autour de l'électrode. Au moins pour cette raison, les mesures dépendent des points où l'on plante les piquets. Un manipulateur averti ne fait jamais deux mesures le même jour de la même terre. La mesure peut varier de plus de 50 % en déplaçant les piquets, surtout si l'électrode à mesurer est de grande taille par rapport à l'éloignement des piquets, ou quand le sol contient des canalisations conductrices.

Ainsi, en ville, selon que l'on plante les piquets dans l'axe d'une rue ou orthogonalement, on mesure respectivement une résistance faible ou forte. On mesure en fait la proximité des tuyaux (d'eau, de gaz, de chauffage) enterrés sous les trottoirs. Heureusement que le résultat ne sert pratiquement à rien !

L'opérateur expérimenté évite de planter ses piquets trop profondément, et jamais à coups de masse. Seul celui qui n'a jamais sectionné un câble enterré ou crevé une canalisation d'eau en plastique enfonce encore joyeusement ses piquets...

Celui qui sait comment on mesure une résistance de terre a quelque peine à cacher un sourire quand l'opérateur annonce un résultat avec trois chiffres significatifs. Celui qui sait à quoi sert une terre a quelque peine à conserver son sérieux quand il entend discuter, toujours doctement, de la façon d'améliorer la prise. Et quand on sait ce que ça coûte et combien cela dure... Finalement, réjouissons-nous de ce que tout cela, sauf éventuellement en schéma TT, ne soit d'aucune importance !

Il existe malgré tout un intérêt psychologique à la mesure de la résistance d'une terre. Il n'est pas évident de comprendre un problème de perturbations électromagnétiques et de l'expliquer de façon claire. Il est alors rassurant et facile d'effectuer

une mesure de résistance de terre. Cela ne résout pas les difficultés, mais personne ne le sait ! On peut même rédiger un rapport à l'aspect scientifique qui fera sans doute bonne impression.

Sérieusement, la mesure de résistance d'un réseau de terre ne présente qu'un intérêt indirect : elle peut renseigner sur l'état de la prise de terre, sur la dégradation des conducteurs enfouis, la coupure d'un câble en particulier. En effet si la valeur absolue de la résistance d'une terre est indifférente, son évolution dans le temps est intéressante. Quand la résistance d'une terre, mesurée à la même saison, avec une humidité du sol comparable et avec les mêmes points de mesure, a augmenté de façon significative, disons de plus de 30 %, cela est le signe d'une dégradation des conducteurs enterrés. Une remise à niveau du réseau de terre peut alors être planifiée.

La résistance totale de la boucle de terre en schéma TT (le schéma de neutre de la distribution publique) doit rester inférieure à $460\ \Omega$ en 230 V pour un courant de déclenchement du **disjoncteur différentiel**, ou **DDR**, (en fait, un courant de mode commun) de 500 mA. Quand l'équipotentialité de toutes les masses accessibles est garantie, alors la valeur de la résistance de la terre est indifférente à la sécurité des personnes.

La norme NF C 15-100 (sur les installations électriques à basse tension) autorise la protection des personnes par des liaisons équipotentielles locales non reliées à la terre. Nous regrettons que cette norme n'attire pas plus l'attention du risque lié aux gradients de potentiel du sol, par exemple lors des défauts des réseaux de transports d'électricité.

On ne mesure chez l'abonné en schéma TT que la résistance de sa terre : la terre des masses. Ceci peut surprendre car, dans le circuit du courant de défaut, la terre du neutre est en série avec celle des masses. Par exemple si la terre du neutre était coupée, un premier défaut ne serait pas éliminé par la protection différentielle. Le problème du schéma TT est que, justement, il y a deux terres !

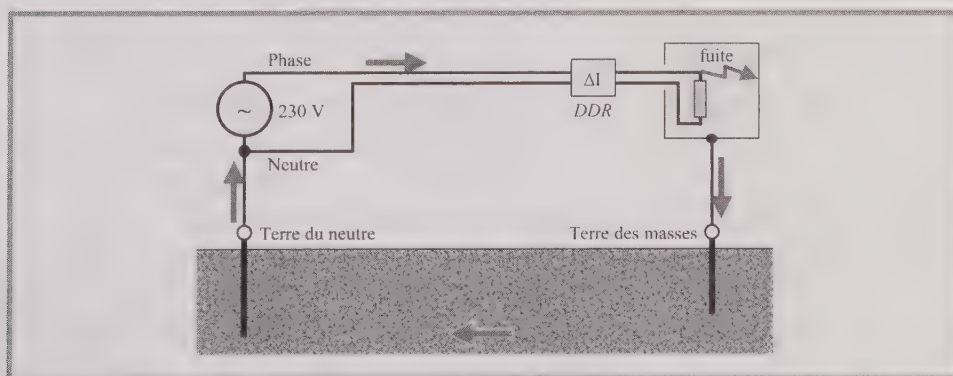


Figure 1.13 – En schéma TT, le courant de fuite se referme réellement par la terre.

Terminons par une anecdote révélatrice. On lisait dans certaines notes techniques que la valeur de la résistance de la terre d'un centre téléphonique importe puisque la batterie y est raccordée ! Lors d'un contrôle de la résistance de terre d'un centre téléphonique dans l'Est de la France la mesure donna... infinie ! Une recherche de l'anomalie révéla que le conducteur de terre avait été sectionné au ras du sol par un éclat d'obus de la dernière guerre. Durant un demi-siècle, personne ne s'était aperçu de quoi que ce soit : tout fonctionnait exactement comme avec une « bonne » terre.

Il est étonnant que l'on trouve des personnes qui, connaissant cet exemple, prétendent encore qu'une bonne terre est indispensable. Nous avons même entendu qu'il était urgent de corriger un problème aussi grave ! Les exigences sur la résistance de la terre des centraux se justifiaient : jusque dans les années 1950, les câbles téléphoniques étaient affectés de défauts d'isolation. Leur courant de fuite était significatif. Or ce courant diminue lorsque l'on décroche puisque la tension de ligne passe de 50 V à 20 V. Ainsi, ce courant de fuite est modulé par le nombre de lignes décrochées. Cela injectait des courants audibles dans les lignes. Une solution simple pour résoudre ce problème était de réduire la valeur de la résistance de terre du central.

Depuis que les câbles sont très bien isolés, ce défaut a disparu. En outre, les nouvelles transmissions numériques ne craignent plus du tout le bruit BF. Pourtant, par habitude, les valeurs maximales de la résistance de terre des centres ($1\ \Omega$, $3\ \Omega$ ou $10\ \Omega$ selon leur classe) sont restées dans les textes et dans les têtes.

■ Résistivité du sol

La **résistivité** du sol se mesure avec un telluromètre, par une mesure en 4 fils. Elle s'exprime en ohms-mètres (Ωm). Contrairement à la mesure de résistance, la distance entre les électrodes importe, donc doit être connue. La résistivité d'un sol est conventionnellement considérée comme bonne au-dessous de $500\ \Omega\text{m}$, et mauvaise au-dessus de $3\ 000\ \Omega\text{m}$. Si la résistance du réseau de terre importe peu, la résistivité du sol est en revanche une information utile à un triple titre :

- La résistivité des couches de terrain est fortement variable d'une couche à l'autre. Il est donc souhaitable d'enterrer les conducteurs du réseau de terre à une profondeur de faible résistivité. C'est aussi intéressant pour l'aptitude de la prise de terre à supporter un choc de foudre.
- Lorsque le terrain est à forte résistivité, un réseau de terre maillé doit avoir des mailles de plus faibles dimensions que lorsque le sol est bon conducteur (afin de conserver au site sa qualité essentielle : une bonne équipotentialité horizontale).
- Enfin, quand on connaît la valeur de la résistivité moyenne du sol et la géométrie des conducteurs enterrés, il est possible d'évaluer la résistance d'un réseau de terre. Ceci n'a d'importance que pour les ouvrages à haute tension. Psycho-

logiquement, évaluer une résistance de terre par calcul, puis valider cette estimation par une mesure peut rassurer un client ! La CEM n'est pas un domaine purement technique.

Nous utilisons deux relations pratiques pour calculer la résistance R d'une prise de terre (en Ω) à partir de la résistivité ρ (en Ωm) du sol :

- pour un piquet vertical de longueur L (en m) :

$$R \approx \rho/L;$$

- pour un réseau maillé, enterré à faible profondeur, de périmètre P (en m) :

$$R \approx 2\rho/P.$$

La résistivité du sol varie largement avec la température et l'humidité. Il est en outre possible de la réduire artificiellement (bien que temporairement) en salant le sol. Un salage accélère la corrosion et pollue le sol, mais améliore réellement la résistance de la terre.

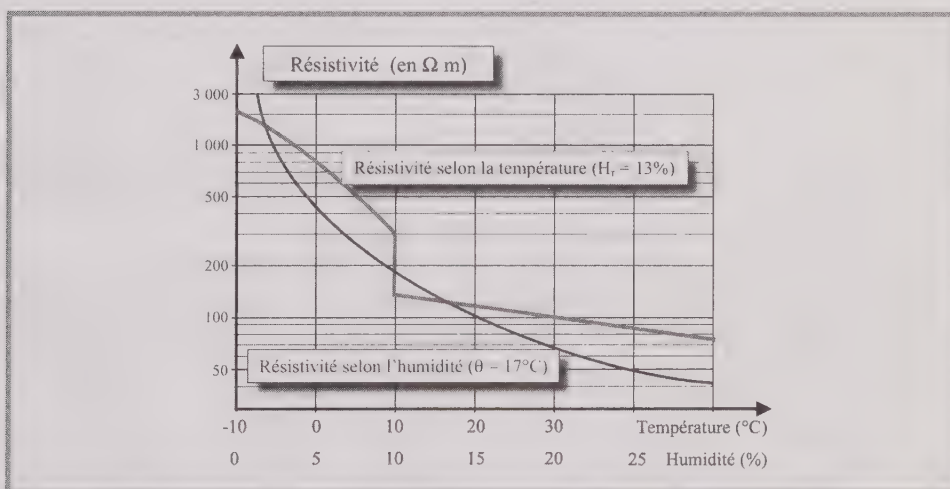


Figure 1.14 – Variations de résistivité d'un sol arable (mélange argile sable).

En pratique, la variation de la résistivité avec la température est marginale, car dès 60 cm de profondeur, le sol ne gèle plus, et à plus de 1,5 m, la température (de 13°C) ne varie presque plus. En revanche, la variation de l'humidité relative peut faire varier la résistivité d'une décade.

Une prise de terre a une résistance proportionnelle à la résistivité moyenne du sol. Ainsi, lorsqu'en 1990, la sécheresse a fait baisser en France le niveau de beaucoup de nappes phréatiques, la résistance des terres a augmenté. Certains abonnés en

schéma TT n'ont pas disjoncté malgré un défaut franc entre phase et terre. Ceci fut sans danger pour ceux qui avaient relié toutes les masses, dont les canalisations conductrices à leur terre.

Nous constatons en figure 1.15 que la résistivité des sols varie selon leur nature de plus d'un facteur 100. Même un excellent terrain ($16 \Omega\text{m}$) présente une résistivité un milliard de fois supérieure à celle du cuivre ! Cela signifie que sans cuivre, il sera difficile de garantir une équipotentialité horizontale satisfaisante du site. Inversement, en maillant les masses, on peut l'obtenir de façon sûre.

Nature du sol	ρ_{mini}	ρ_{moyen}	ρ_{maxi}
Tourbe humide	5	25	100
Limon	20	50	100
Marnes	40	150	200
Schistes	50	200	300
Sable argileux et calcaire tendre	50	250	500
Granits et grès altérés	100	500	1 500
Sable siliceux	200	1 000	3 000
Sol pierreux nu	1 500	2 000	3 000
Calcaires compacts	1 000	2 500	5 000
Granits et grès peu fissurés	1 500	5 000	10 000

Figure 1.15 – Résistivité de différents sols (valeurs en Ωm).

En bord de mer surtout lors des marées, en montagne surtout lors de changements de température, mais aussi partout ailleurs, des courants continus appelés *courants telluriques* circulent dans le sol. Ce sont eux qui génèrent le champ magnétique terrestre. Ces courants électriques continus ont la fâcheuse propriété d'accélérer la corrosion des conducteurs enterrés, surtout lorsque le sol est humide ou salé. Les sols à grande résistivité ont un avantage : ils sont chimiquement moins agressifs que les sols humides.

■ Alors qu'est-ce qui importe ?

La division de la résistance de terre par la surface de contact des conducteurs enterrés avec le sol est un paramètre intéressant. Ce facteur permet d'évaluer l'échauffement du terrain, donc le risque d'assèchement du sol par évaporation, voire de sa vitrification après un choc de foudre. Cette façon de voir les choses est physique, mais elle est imparfaite. En effet, les conducteurs à l'intérieur de la ceinture externe égalisent les potentiels (contribuent à l'équipotentialité) mais évacuent peu de courant, ce sont les conducteurs en périphérie qui assurent cette fonction.

Par ailleurs la granulométrie du terrain influe. Plus les grains sont fins, plus grande est la surface de contact entre les conducteurs et le sol. Des galets sont mauvais parce qu'ils ne sont en contact qu'en un point. Pour simplifier, on peut ne retenir que les conducteurs enterrés au pourtour du réseau. Il est autorisé de poser les conducteurs de terre dans un coffrage de béton ou dans le radier. La surface de contact entre les conducteurs enterrés et le sol est alors importante et durable. Si du béton très sec est médiocrement conducteur, le béton humide a une résistivité inférieure à $1 \text{ k}\Omega\text{m}$.

L'ajout de composés conducteurs chargés par des grains d'aluminium ou le salage du sol ne sont que des solutions temporaires, peu écologiques et coûteuses. Leur seule vertu est de donner durant quelques mois à un piquet l'illusion d'être une « bonne » terre. Rien n'est meilleur qu'un réseau maillé entourant le site à protéger.

Enfin la résistance d'une terre importe en schéma TT car les courants de fuite et de défaut se referment réellement par la terre. Nous verrons au tome 4 comment corriger les problèmes du régime TT. Pour que le disjoncteur différentiel puisse s'ouvrir en cas de défaut entre phase et masse, la somme des résistances de la terre de l'abonné (la terre des masses) et de celle du poste (la terre du neutre) ne doit pas être trop élevée. Rien d'autre n'importe.

3 Conception d'un réseau de terre

Il n'est jamais utile de forer le sol à grands frais. Et même si c'était bon marché, car cela n'améliore pas l'équipotentialité du site. Pour réaliser un bon réseau de terre, il suffit d'appliquer quelques règles de bon sens qui ont été validées par l'expérience.

■ Réalisation d'un réseau de terre

Un conducteur enterré peut être enfoncé verticalement (un piquet) ou enterré horizontalement (une ceinture ou des pattes d'oie). Un piquet se corrode plus lentement et présente une résistance environ deux fois plus faible que celle d'un conducteur horizontal de longueur égale. Nous préférons pourtant des conducteurs horizontaux car ils contribuent mieux à l'équipotentialité du site. Toutes les nouvelles normes internationales insistent sur l'importance des conducteurs horizontaux.

Les conducteurs enterrés doivent être espacés d'au moins 20 cm des autres canalisations métalliques pour limiter la vitesse de corrosion entre métaux différents. Bien que la section minimale de câblette de cuivre soit de 25 mm^2 selon la

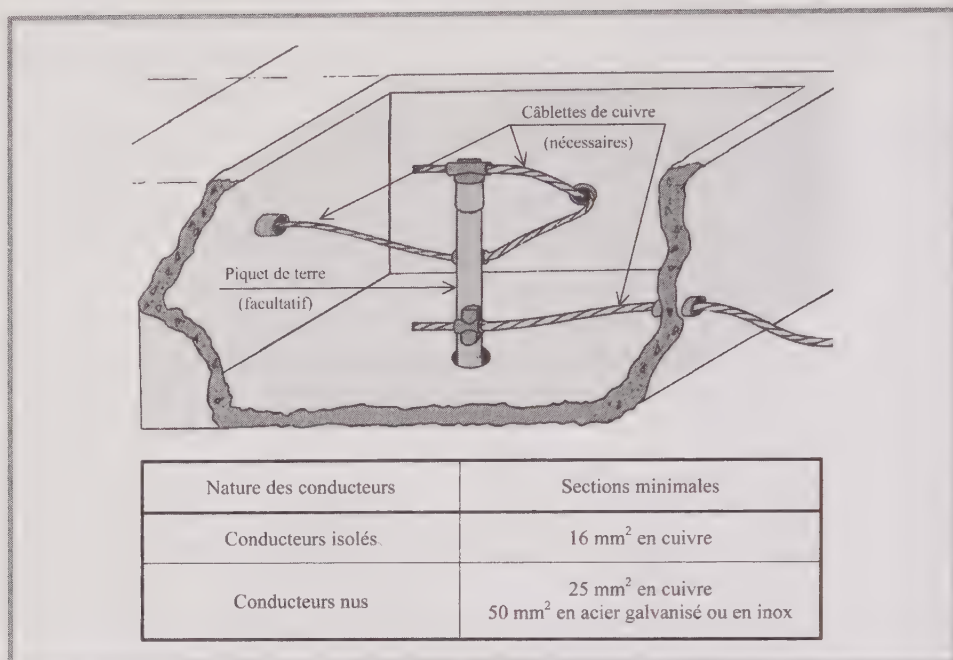


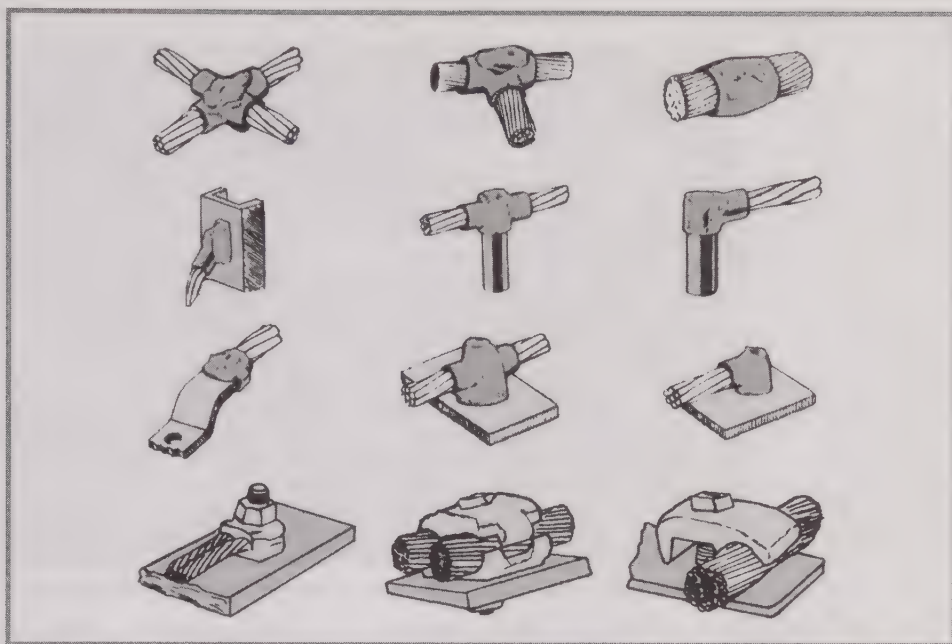
Figure 1.16 – Regard de terre et sections minimales des conducteurs.

NF C 15-100, nous recommandons d'utiliser 35 mm², voire 50 mm² si le sol est chimiquement agressif afin que le réseau de terre ne se corrode pas trop vite (pour une remise à niveau moins fréquente qu'une fois tous les 25 ans).

La gaine de plomb autour des câbles enterrés qui réduisait la vitesse de corrosion est désormais interdite. Du plat de cuivre d'une section de 30 mm × 2 mm est possible. Un conducteur plat est préférable à un conducteur rond car, à coût comparable, il présente une plus grande surface de contact avec le sol. Une section de cuivre de 35 mm² est suffisante pour ne pas fondre sur un choc de foudre direct.

Un câble dans la terre doit être enfoui à une profondeur suffisante pour que le sol ne soit jamais gelé. La profondeur d'enfouissement conseillée dans nos régions est de 1 m (60 cm suffisent en région parisienne). La tranchée en fond de fouille devrait être comblée par de la terre arable et non avec des débris de matériaux de construction qui sont trop gros pour assurer un contact intime avec la surface des conducteurs et risquent de les sectionner. Il est possible de couler le radier par-dessus.

Les raccords entre les barres ou les câbles enterrés devraient être soudés par procédé exothermique (éventuellement à l'arc; une brasure est vulnérable). Une connexion par borne vissée ne devrait jamais être enterrée (à moins d'être protégée par du goudron), car la corrosion augmente sa résistance dans le temps. La



**Figure 1.17 – Exemples de soudures (à enterrer)
et de griffes à serrage (hors du sol).**

technique de brasage par aluminothermie (procédé Cadweld d'Erico) est excellente : c'est ainsi que les rails de chemins de fer électrifiés étaient reliés.

Il n'est pas interdit d'utiliser la soudure exothermique à l'intérieur des bâtiments, mais la fumée dégagée par ce procédé est intense, les risques d'incendie sont à considérer, et les reprises de masse ultérieures sont impossibles.

Le raccordement du réseau de terre aux fers à béton et aux armatures des radiers est souhaitable. S'il est impossible de creuser une tranchée en périphérie de bâtiment pour y déposer la ceinture de terre, il est possible d'inclure le réseau de terre dans le radier en béton. La résistivité d'un mélange de 1 volume de ciment pour 3 de sable est voisine de $150 \Omega\text{m}$. Cette valeur se compare à la résistivité d'un très bon sol. Les ferrallages d'un radier en béton armé peuvent remplacer les câbles de cuivre si leur section est suffisante : au moins 50 mm^2 de fer lisse.

Afin d'améliorer l'équipotentialité du site, un réseau enterré gagne à être maillé. Lorsque le bâtiment est de faible surface, disons une dizaine de mètres au carré, une simple ceinture en fond de fouille suffit. Pour les bâtiments neufs de grande surface au sol nous recommandons le maillage des conducteurs enterrés selon une grille de 10 m à 15 m de côté.

La ceinture de terre doit être rendue électriquement accessible par de nombreuses barrettes de terre (aussi appelées *bornes* ou *plaques de terre*). Ces points de

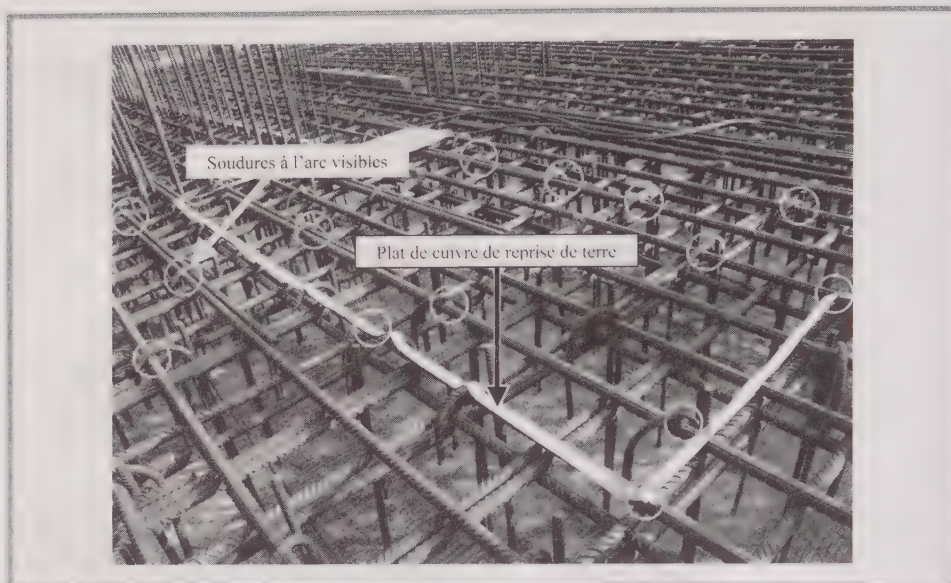


Figure 1.18 – Radier au ferrailage soudé utilisé comme prise de terre.

raccordement devraient être installés le long de la ceinture de terre enfouie en périphérie du bâtiment. La distance souhaitable entre les barrettes de terre ne devrait pas excéder une quinzaine de mètres. Une ceinture de masse, directement accessible et à l'abri de la corrosion, double avantageusement la ceinture enterrée en reliant les bornes de terre.

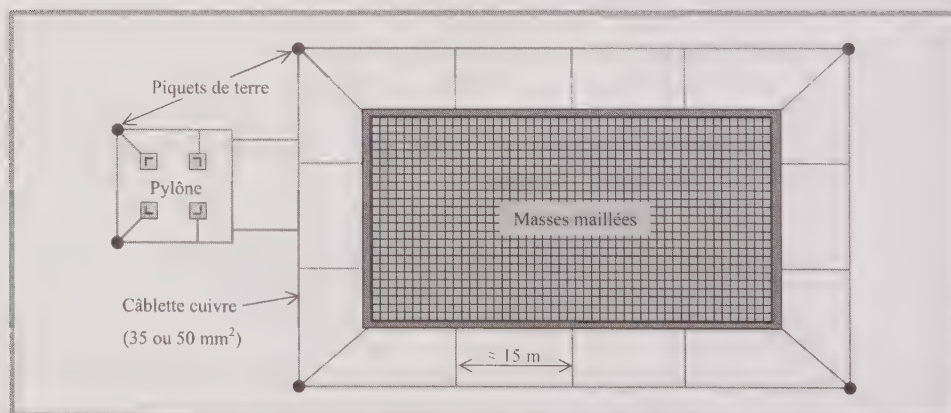


Figure 1.19 – Exemple de réseau de terre d'un grand bâtiment.

Disposer d'un grand nombre de barrettes de terre permet de raccorder au plus court et en de nombreux points le réseau de masse au réseau de terre. Il est souhaitable de raccorder régulièrement à la terre les structures conductrices (charpentes, huisseries

et gaines métalliques, tuyaux, rails, etc.) aux barrettes de terre, même si ces structures sont déjà reliées par ailleurs à la terre.

Si l'on souhaite augmenter la surface de contact d'un réseau de terre avec le sol, il est possible d'ajouter des conducteurs en « patte d'oie ». Le rôle de ces conducteurs rayonnants est d'évacuer les courants en les éloignant du site. Les positions optimales de ces conducteurs sont les angles du bâtiment et les points de raccordement entre les conducteurs de descente et la ceinture de terre. Lorsque la surface au sol est limitée, un piquet vertical peut remplacer une patte d'oie.

Il est inutile d'ajouter un conducteur dont l'angle avec son voisin soit inférieur à 60° . Ainsi, trois conducteurs dans un angle ou deux sur le côté d'un bâtiment suffisent. La longueur des brins est fonction de la résistivité du sol. Dans un sol de résistivité correcte ($\approx 500 \Omega\text{m}$), une longueur d'une dizaine de mètres par brin est convenable. Dans les mauvais sols ($> 3\,000 \Omega\text{m}$), il est possible d'augmenter leur longueur à une cinquantaine de mètres. Ces conducteurs peuvent être de même nature que ceux de la ceinture de terre. Pour les sites de grandes dimensions avec une ceinture de terre de grand périmètre, des conducteurs en pattes d'oie sont inutiles.

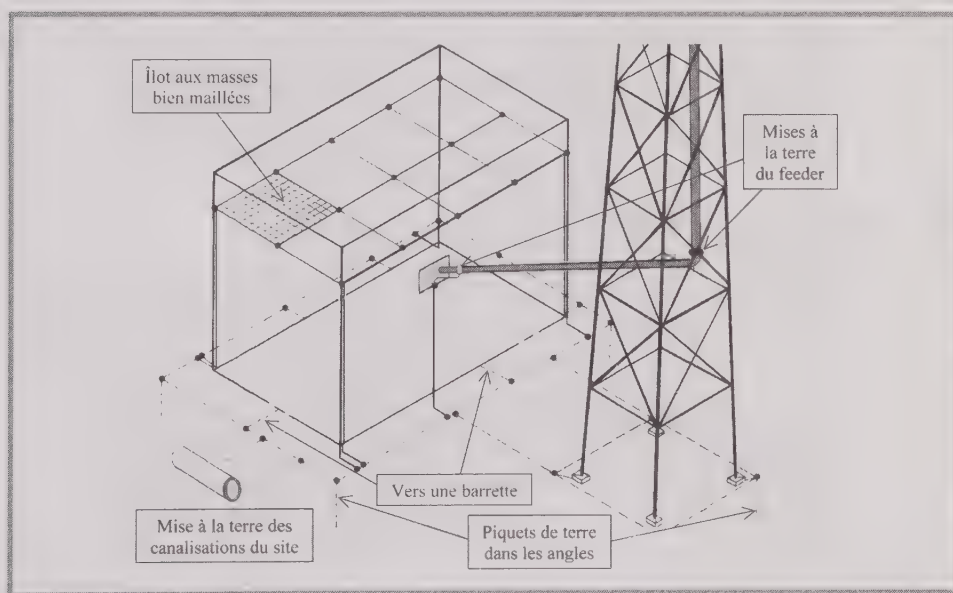


Figure 1.20 – Exemple d'unicité d'un réseau de terre.

■ Vieillesse d'un réseau de terre

Après un foudroiement direct, il y a toujours augmentation de la résistance de terre. Tout d'abord une augmentation temporaire de la résistance est due à l'évaporation

de l'eau au voisinage des conducteurs. Cet effet ne persiste que quelques heures. Ensuite, une augmentation permanente de la résistance est souvent constatée. Elle peut être multipliée par un facteur 2 : elle est provoquée par la vitrification du sol.

■ Vitrification du sol

Une augmentation permanente de la résistance d'une terre peut être provoquée par une modification physique du sol au voisinage des conducteurs. Sur une épaisseur de plusieurs centimètres autour des conducteurs enterrés, on constate souvent après foudroiement une vitrification du sol. Les roches fondues se sont solidifiées en un manchon compact et isolant.

Pour corriger ce phénomène irréversible, il suffit de scier les manchons totalement vitrifiés, de les remplacer par un tronçon de conducteur neuf, et de combler la tranchée par de la terre végétale ou du sable fin. Limiter ce risque exige d'augmenter la surface de contact des conducteurs enterrés avec le sol. Avec une résistance de terre divisée par la surface des conducteurs enterrés inférieure à $10 \Omega/\text{m}^2$, le risque de vitrification est faible, même après un choc de foudre positif. Il devient fort au-delà de $100 \Omega/\text{m}^2$. Pour ce calcul, on ne prend que la surface des conducteurs enterrés en ceinture, des piquets et des éventuelles pattes d'oie (mais pas ceux au cœur du radier).

■ Corrosion d'un réseau de terre

Un conducteur enterré s'oxyde à l'endroit où les courants sortent (où les électrons entrent). La protection cathodique d'un conducteur enterré consiste à le porter à un potentiel négatif par rapport à une électrode positive dont on accepte la corrosion. Cette électrode s'appelle alors une *anode consommable*; elle est souvent composée de rails de chemins de fer ou de gros ronds d'acier à béton.

Les excellents documents américains MIL-HDBK 1004/10 (datant de 1990) et EM 1110-2-2704 (de 2004), téléchargeables gratuitement sur Internet, traitent en détail de la protection cathodique des réseaux de terre et des canalisations enterrées. Il est possible de ne pas utiliser d'alimentation pour la protection cathodique si l'on utilise des électrodes consommables, en zinc par exemple. Il faut compter une consommation annuelle de 12 kg de zinc par ampère de courant échangé.

La densité de courant est le paramètre essentiel qui détermine la vitesse de corrosion. Ainsi, pour une durée donnée, un courant continu de 1 mA sur une surface de 1 cm^2 corrode 10 fois plus profondément qu'un courant de 1 A sur une surface de 1 m^2 . La corrosion d'un réseau de terre peut être fortement accélérée par des courants telluriques ou par divers courants continus, en particulier à proximité des

lignes de chemins de fer ou de tramway à courant continu. La corrosion en alternatif est lente car un courant alternatif a une valeur moyenne nulle.

Le seul inconvénient à mailler des prises de terre distinctes et éloignées est que la corrosion d'un réseau étendu est plus rapide que celle d'un réseau de faible surface. Un grand réseau de terre devrait être contrôlé périodiquement, par exemple une fois tous les 5 ans. Un réseau de terre de grandes dimensions dans un sol moyennement corrosif peut avoir besoin d'être remis à niveau en moyenne tous les 25 ans.

Si un conducteur enterré est coupé, il importe de le détecter et de rabouter le câble, surtout si deux côtés ne sont pas reliés par ailleurs. C'est le seul intérêt des contrôles périodiques de terre. Mesurer la résistance de la terre est peu intéressant en soi. Mesurons plutôt celle du réseau de masse (en dizaines de milliohms) entre deux points éloignés. Pour être précise, une telle mesure nécessite d'utiliser la méthode « 4 fils » (deux pour le courant, deux autres pour la mesure de tension). Avec une mesure en « 2 fils », même en soustrayant la résistance des fils, on ne peut guère mesurer de résistance inférieure à $100\text{ m}\Omega$ (au moins à cause de la résistance des contacts).

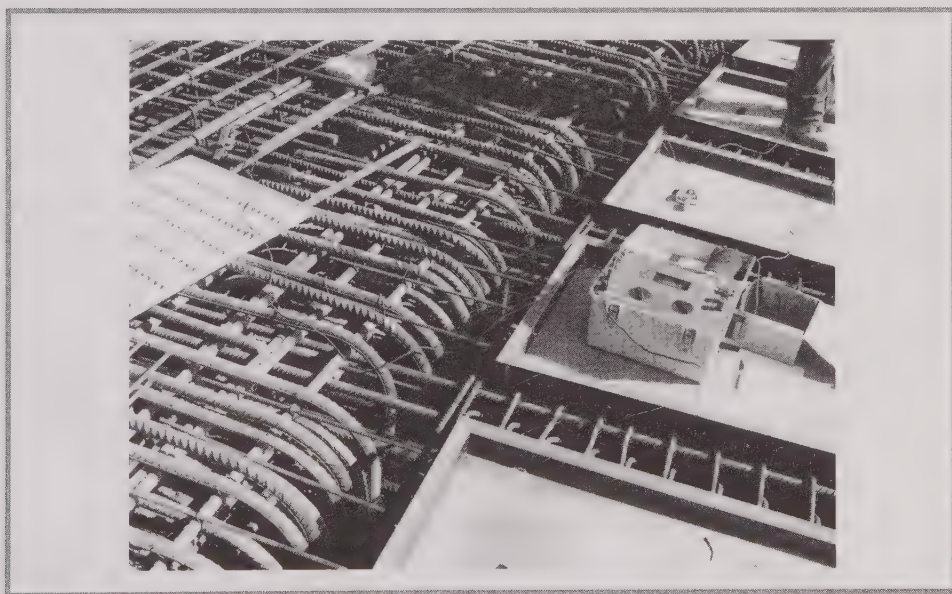


Figure 1.21 – Une mesure de résistance en « 2 fils » est limitée à $0,1\ \Omega$ environ.

■ Interconnexion de terres différentes

Des terres séparées sur un même site peuvent être présumées assez proches pour être couplées. Toutefois elles ne garantissent jamais une équipotentialité comparable

à celle obtenue par leur interconnexion volontaire. Les règles de sécurité électrique (la NF C 15-100 en France) ne disent rien d'autre.

Même s'il restait encore quelques terres fonctionnelles (écrivez-le nous à a.charoy@aemc.fr : nous ne sommes intéressés que par les cas marginaux), il faudrait les relier à la terre générale du site. Puisqu'un réseau de terre n'écoule que des courants externes transitoires, il n'y a aucun risque fonctionnel permanent à utiliser la prise de terre du site comme terre fonctionnelle. Inversement, les risques de destruction diélectrique augmentent si l'on utilise une terre séparée. Il est impératif d'utiliser en tout et pour tout un réseau de terre unique par site, réseau aussi équipotentiel donc maillé que possible.

Les barrettes de terres ont des appellations qui peuvent faire sourire : *terre mesure*, *énergie*, de « *référence* », de « *sécurité* », de « *protection* », « *sale* », « *propre* », *bas niveau*, *transmission*, *commutation*, *électronique*, *informatique*, *mécanique*...

Si deux terres sont séparées, elles sont dangereuses (même si elles sont inaccessibles aux personnes) car elles peuvent monter à des potentiels très différents. Si elles sont interconnectées, pourquoi leur donner des noms différents ? Il est défavorable de s'y raccorder en étoile (voir chapitre suivant).

La loi interdit heureusement l'accès à deux masses simultanément accessibles raccordées à des terres distinctes. La moindre des précautions est de respecter la légalité, n'est-ce pas ?

Hormis en schéma TT, il ne devrait exister aucune exception à la règle du réseau de terre unique. Ceci reste vrai même entre des bâtiments différents s'ils sont interconnectés par quelque câble de signal que ce soit, un câble de réseau local par exemple. Il serait illégal, stupide et dangereux de ne connecter les terres de deux bâtiments que par la tresse des câbles de signaux. Et pourtant...

Il est raisonnable de prévoir que deux bâtiments non interconnectés sur un même site échangeront un jour ou l'autre des signaux électriques : réseau local, liaison numérique entre unité centrale et console déportée, liaisons vidéo de surveillance, systèmes de sécurité divers (alerte, incendie, intrusion ou contrôle d'accès), centralisation d'informations, etc. Une équipotentialité raisonnable des terres est alors nécessaire, à moins d'utiliser systématiquement des liaisons par fibres optiques.

Un système composé de deux équipements calmes reliés à deux terres distinctes peut fonctionner tant que ces terres restent raisonnablement équipotentielles. Si l'on installe un élément perturbateur en mode commun (un convertisseur statique par exemple) à quelle terre peut-on le connecter ? À aucune des deux premières sinon cela perturberait le système existant, donc on crée une troisième terre... Et ainsi de suite; c'est alors la multiplication des terres !

Nous sommes intervenus dans un site doté de six terres, avec les conséquences que l'on imagine : destructions de matériels (de cartes d'interface en particulier) les jours d'orage; perturbations le reste du temps. Inversement, nous n'avons

jamais provoqué le moindre dysfonctionnement en reliant toutes les terres d'un même site.

Nous ne pourrions pas citer un seul cas où l'ajout d'une terre ait amélioré quoi que ce soit. Le plus étrange est que l'on trouve parfois un opérateur qui prétende le contraire, mais il ne peut jamais donner d'exemple personnellement vécu. Nous connaissons plusieurs cas où la simple interconnexion de terres séparées fut suffisante pour résoudre les problèmes (posés par un convertisseur de puissance par exemple).

Un dernier mot sur une expression courante : la « remontée de terre ». Après le dysfonctionnement d'un équipement électronique, on accuse volontiers la terre d'avoir « remonté ». Mais qu'est-ce qui remonte, et par rapport à quoi ?

En potentiel, toute prise de terre est évidemment équipotentielle par rapport à elle-même ! Si le site est correctement maillé, la terre reste équipotentielle avec les masses. Seule une terre séparée peut « remonter » en potentiel par rapport aux masses. Il est exact que les dysfonctionnements les plus fréquents ont comme origine une perturbation conduite en mode commun. Pour résoudre ce type de problème, il suffit d'améliorer l'équipotentialité des masses, et de prévoir la protection par parafoudres des câbles externes dès leur entrée sur le site.

En intensité, si un courant « remonte », par où revient-il ? S'il y a deux terres séparées, il est exact qu'un courant peut remonter d'une terre pour se refermer par l'autre. Mais si la terre est unique ?

Michel, un ami, a participé à une réunion technique où l'objectif était de définir la meilleure façon de réaliser deux terres galvaniquement isolées l'une par rapport à l'autre ! Après avoir tenté d'expliquer la physique, il a fini par proposer, en désespoir de cause, de planter une des terres dans un pot de fleurs en plastique. Le plus drôle est que c'est ce qui fut fait ! Heureusement, Joël, un autre ami, également excellent spécialiste de CEM parvint à corriger cette ânerie avant qu'elle n'entraîne des conséquences trop graves.

4 En résumé...

Il est nécessaire et suffisant de comprendre le rôle d'un réseau de terre pour abandonner les erreurs de conception qui conduisent à des catastrophes. Évitions au moins les trois erreurs les plus fréquentes sur les terres :

1. La nécessité d'une faible résistance de terre

Physiquement, seule importe l'équipotentialité du site, ou du moins celle des équipements interconnectés. Une faible résistance de terre est parfaitement inutile

au bon fonctionnement des systèmes électroniques : heureusement pour les avions ! Seules quelques terres exceptionnelles (terre de poste THT) peuvent réellement nécessiter une faible impédance. Ne dépensons pas un sou pour réduire la résistance d'une terre. Saler le sol n'est une solution ni sérieuse ni durable.

Abaissier la résistance d'une terre = des dépenses pour rien !

2. Les terres séparées

Elles violent évidemment le principe d'équipotentialité. L'unicité du réseau de terre est une nécessité légale (pour les masses accessibles) et fonctionnelle (pour les électroniques interconnectées). Plus deux terres sont séparées, plus elles sont dangereuses ! Si l'on accepte une première terre séparée, les terres vont se multiplier, et tout va de mal en pis ! La règle d'une terre unique par site ne souffre aucune exception.

Terres séparées = des résultats pires qu'une seule terre !

3. Le câblage en étoile des masses à la prise de terre

Nous allons constater (au chapitre suivant) que le câblage de la masse en étoile autour d'une borne de terre crée à la fois une vaste boucle de masse et une forte impédance commune entre équipements interconnectés. Le maillage des terres et des masses est la seule solution pour diviser les courants de masse et améliorer l'équipotentialité du site. Le maillage réduit en outre les risques d'oscillations HF en mode commun entre équipements voisins.

Masses en étoile = beaucoup de cuivre et d'heures de pose pour une moins bonne équipotentialité qu'un maillage des masses par des liaisons courtes !

Enfin n'oublions pas que les courants circulent en circuits fermés. Un courant qui entre dans la terre en ressort obligatoirement. Même le courant de la foudre se referme au nuage par la variation du champ électrique entre le nuage et le sol. La Terre n'est pas une poubelle sans fond, même pour les « mauvais » courants.



ES MASSES

Citons quelques exemples typiques de perturbations ayant pour origine un défaut d'équipotentialité des masses. Ces problèmes sont souvent aggravés par des équipements à la CEM défaillante et des maladresses de câblage :

- dans un hôpital : perturbations d'appareils de surveillance médicale, pertes de fichiers clients ou administratifs (historique, traitements, données médicales...);
- dans un central téléphonique ou une station de base radio : destruction de cartes, pertes de logiciel, coupure des communications les jours d'orages;
- dans une administration (banque, assurance, institution financière, supermarché) : pertes de codes et/ou de fichiers, problèmes de transfert de fonds, interruptions de fonctionnement, destruction de cartes d'interfaces, perturbations de réseaux locaux;
- dans un service public (police, pompiers, ambulances, contrôle aérien...) : pertes de liaisons avec les opérateurs sur le terrain, données numériques altérées, destruction de systèmes d'alarmes;
- dans l'industrie : arrêts de la production, dysfonctionnements d'automates et de robots, destructions de cartes d'acquisition ou de communications, arrêts d'urgence, instabilité de régulations, perturbations de réseaux locaux...

Nous savons (voir chapitre 1) que la terre n'évacue que des courants externes d'un site. Elle n'influe sur le fonctionnement des électroniques ni dans un sens ni dans l'autre. Les masses, c'est-à-dire l'ensemble des structures conductrices accessibles, ont en revanche un rôle important sur le bon fonctionnement des équipements. Pour que la masse puisse servir de référence de potentiel électronique, il suffit qu'entre les divers équipements interconnectés, son équipotentialité soit suffisante. Une masse n'est raccordée au réseau de terre que par raison de sécurité, raison conventionnelle puisque ce qui importe est l'équipotentialité des masses simultanément accessibles.

Seule une masse (et non la terre) est située assez près des circuits électroniques pour contribuer à leur équipotentialité et à leur blindage en HF. Une masse peut servir à la fois de référence de potentiel pour une électronique, et d'écran contre

les champs électromagnétiques. Ne confondons pas masse et terre même si elles sont reliées : leurs rôles sont très différents.

Il y a deux différences essentielles qu'il importe de comprendre entre un conducteur enterré et un conducteur de masse :

1. Un conducteur en contact avec le sol y dissipe ses courants de mode commun. Un conducteur enterré est une très mauvaise antenne et il n'oscille pas. C'est un avantage par rapport aux conducteurs de masse. Mais la prise de terre est trop éloignée des circuits pour influencer sur leur équipotentialité en HF. Seul un conducteur de masse de longueur plus faible que le trentième de la longueur d'onde peut écouler du courant. Rappelons que tout conducteur d'une longueur L supérieure à $\lambda/30$ (c'est-à-dire aux fréquences $F_{\text{(MHZ)}} > L_{\text{(m)}}/10$) présente une impédance supérieure à 50 Ω ; il est alors incapable d'améliorer significativement l'équipotentialité de l'installation.

2. Un conducteur de masse, c'est-à-dire hors du sol, propage les courants presque sans perte. Il peut résonner en HF, ce qui est défavorable. La masse présente toutefois deux vertus essentielles à l'immunité des électroniques : elle est proche des circuits et elle est accessible. L'équipotentialité des masses importe tant à la sécurité des personnes qu'au bon fonctionnement des systèmes interconnectés. L'équipotentialité est un objectif fonctionnel.

Rappel : ce que l'on appelle **conducteur de terre** est un conducteur raccordant une masse (ou sa borne de terre) à une prise de terre. Un conducteur de terre n'est pas enterré, c'est un conducteur de masse particulier. La confusion entre les notions de terre et de masse est fréquente, attention au vocabulaire (ne pas dire *mise à la terre* pour *mise à la masse*).

Nous pouvons distinguer quatre types de conducteurs de terre :

- les conducteurs de protection (PE);
- les conducteurs supplémentaires (dont les charpentes conductrices);
- les conducteurs de mise à la terre des canalisations conductrices et des parasurtenseurs. Ils devraient rester courts, près de l'entrée du bâtiment;
- les conducteurs de descente de paratonnerres.

Des courants parasites se propagent inévitablement dans les conducteurs de masse. Il est en effet impossible de supprimer toutes les sources de perturbations (internes et externes) d'un site. De plus, nous verrons que des boucles de masse sont inévitables et nombreuses puisqu'il y en a autant que de câbles. Lorsqu'un champ magnétique extérieur illumine le site, celui de la foudre par exemple, des tensions sont induites dans toutes les boucles de masse, donc des courants circulent dans les masses.

Tant que les courants circulent dans les masses et non dans les circuits électroniques, ils sont pratiquement inoffensifs. En revanche, quand les masses ne sont pas

équipotentiellles, quand elles sont raccordées à la terre en étoile par exemple, ou si les écrans des câbles blindés sont mal reliés aux masses, de forts courants parasites HF peuvent alors circuler sur les fils de signaux. Des équipements d'extrémités peuvent être perturbés, voire détruits.

Mailler les masses est le seul moyen économique de diviser les courants dans les masses afin de leur conserver une équipotentialité satisfaisante. Installer tous les équipements sensibles en « cage de Faraday » (chambre blindée) serait sans doute techniquement meilleur, mais aussi beaucoup plus coûteux. Une chambre blindée est inutile, à très peu d'exceptions près, en environnement industriel.

Une chambre blindée a pour fonction d'isoler la région intérieure de la région extérieure (en champs et en courants). Cette fonction reste assurée tant que l'enveloppe reste équipotentielle et qu'aucun courant perturbateur n'y pénètre; ceci est vrai quelle que soit la résistance de la terre. Aux fréquences élevées, un écran de bonne qualité se suffit à lui-même.

1 Définitions et rappels de la loi...

Nul n'est censé ignorer la loi ! Même si cette affirmation peut paraître insensée tant les lois sont devenues nombreuses et complexes, il nous a semblé important de rappeler les principaux éléments légaux concernant la sécurité des personnes.

Une masse est toute partie conductrice d'un matériel, accessible au toucher, qui n'est pas normalement sous tension, mais peut le devenir en cas de défaillance de l'isolation principale (de défaut d'isolation). C'est la définition officielle.

Deux masses simultanément accessibles doivent présenter une tension permanente de contact inférieure à la **tension limite conventionnelle de contact** (ou de sécurité, de symbole U_L). Cette valeur est la tension de contact maximale qu'il est admis de pouvoir maintenir indéfiniment dans des conditions spécifiées d'influences externes.

La tension limite conventionnelle de contact U_L est fixée à :

- 50 V efficaces ou 120 V continus lisses dans les locaux habituels;
- 25 V efficaces ou 60 V continus lisses en TBTS et sur les chantiers.

Une tension de contact dangereuse risque d'apparaître lors d'un défaut si le courant de défaut n'est pas limité à une valeur suffisamment faible compte tenu de l'impédance de mise à la masse. Des liaisons équipotentiellles supplémentaires entre les masses font disparaître ce risque.

Nous observons en figure 2.1 que la résistance de la prise de terre est indifférente. Corollaire : il est illégal d'avoir accès à deux masses, même appartenant à des

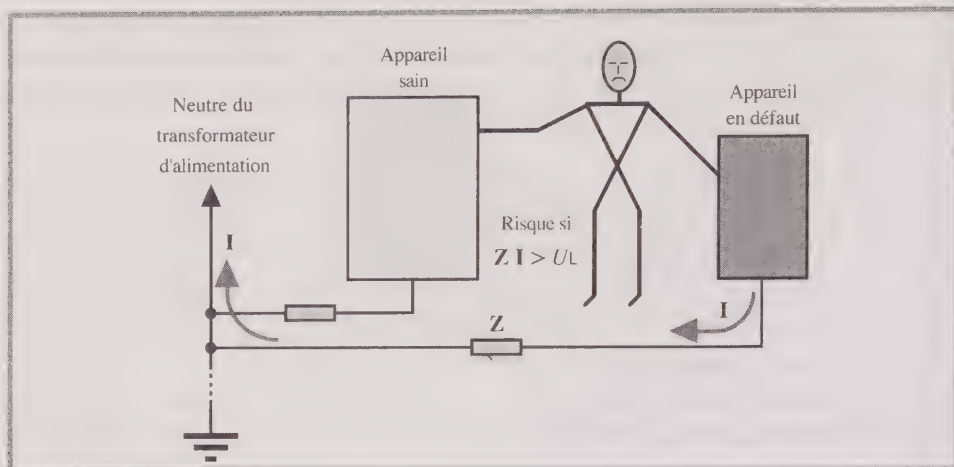


Figure 2.1 – Risque d'électrocution en cas de grande impédance de mise à la masse.

installations différentes, si elles sont raccordées à deux réseaux de terre non interconnectés. Il est en effet impossible de garantir l'équipotentialité de deux terres séparées. Le risque majeur apparaît lors d'une intervention sur une liaison filaire entre deux bâtiments si les terres ne sont pas interconnectées de façon sûre. Attention aux câbles vidéo, de réseau local, de liaison informatique, d'alarmes, de télésurveillance, de contrôles d'accès... Fondamentalement rien d'autre n'importe, en particulier les valeurs de résistance des deux terres sont indifférentes.

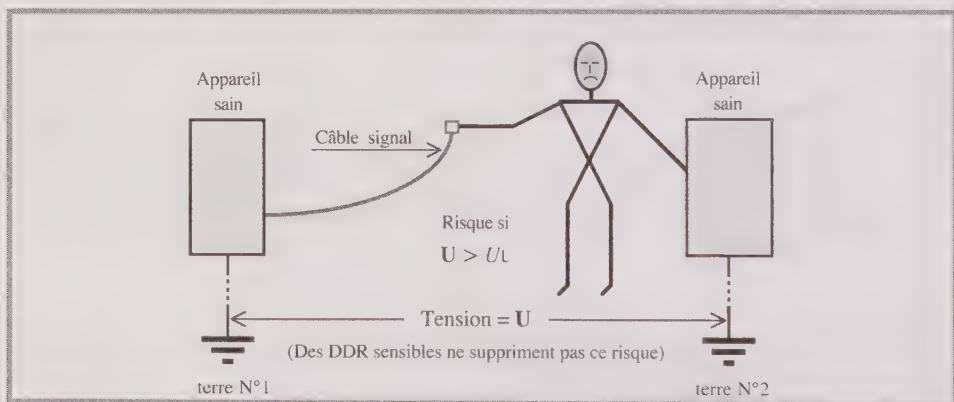


Figure 2.2 – Risque d'électrocution par accès simultané à deux terres séparées.

Rappelons quelques règles relatives à la sécurité des personnes :

- Tout bâti électrique ou électronique (baie, armoire, coffret...) doit être raccordé la terre et le conducteur de protection ne doit jamais se rompre.

- La liaison d'une masse au conducteur de terre peut être en dérivation mais pas en série. Il est interdit de chaîner les masses des unes aux autres. La raison est claire : si une liaison était coupée, plusieurs masses se trouveraient dangereuses.
- La section du conducteur de protection doit être suffisante pour évacuer le courant de défaut maximal. Nous considérons qu'utiliser dans l'industrie une section de conducteur de protection inférieure à 35 mm^2 de cuivre n'est pas une bonne économie, même si réglementairement 16 mm^2 suffisent dans la plupart des cas.
- Toute tension de contact permanente doit rester inférieure à la tension U_L , limite conventionnelle de sécurité. La norme NF C 15-100 autorise durant des temps courts des tensions de contact supérieures à U_L .

Dans la suite de ce manuel, nous appellerons *masse* toute partie conductrice (les structures métalliques du bâtiment par exemple) même si elles ne font pas partie du matériel, si elles sont inaccessibles au toucher ou si elles ne risquent pas d'être portées à un potentiel dangereux. Que le lecteur excuse ce petit abus de vocabulaire commis pour aligner notre propos sur l'acception générale du mot masse. L'important est de se comprendre, n'est-ce pas ?

Nous dirons ainsi qu'un faux plancher métallique, une huisserie métallique ou un conducteur de descente de paratonnerre sont des masses et font partie du réseau de masse alors que selon la définition officielle ce n'en sont pas puisque ne faisant pas partie d'un matériel électrique. Bien entendu, les chemins de câbles, les baies et les conducteurs PE sont aussi des masses.

La section des conducteurs PE doit être au moins égale à celle des conducteurs de phase jusqu'à 35 mm^2 et au moins égale à leur moitié au-delà de 70 mm^2 . Ils doivent être repérés par la double coloration vert et jaune et dans la mesure du possible être installés de bout en bout contre les conducteurs de phase. Ils devraient en outre passer dans les mêmes canalisations conductrices, en particulier dans les mêmes tubes d'acier.

Le respect des règles de sécurité est nécessaire (et même obligatoire !) mais insuffisant à la bonne CEM des installations. La raison en est simple : les personnes ne risquent l'électrocution que par une tension entre masses voisines, de forte amplitude et durable. Une électronique est sensible jusqu'aux très hautes fréquences, même à des impulsions brèves. Un parasite HF de forte amplitude est inoffensif pour les personnes, mais il se couple facilement aux circuits électroniques. Par exemple, une décharge électrostatique est tout juste désagréable pour son auteur alors qu'elle peut être catastrophique pour un équipement électronique.

Les mises à la terre habituelles, le raccordement en étoile par exemple, garantissent la sécurité des personnes mais rien de plus. Les **règles de l'art** des électriciens et les règles de protection des personnes sont insuffisantes pour garantir la CEM des équipements électroniques.

Par chance il n'y a que très peu de règles de sécurité qui vont à l'encontre des règles de CEM. Tout au plus pourrions-nous citer la règle de sécurité concernant le courant de fuite limité dans le conducteur de protection d'un équipement, et celle concernant les isollements galvaniques et les rigidités diélectriques qui sont nuisibles contre les perturbations HF quand elles interdisent l'emploi des connecteurs blindés standard. Dans tous les autres cas, et en particulier pour l'équipotentialité, la sécurité et la CEM sont en parfait accord.

Voyons en pratique la façon de conserver à un site une équipotentialité convenant à la compatibilité électromagnétique de tous les équipements...

2 Réseau de masse

Nous ne parlerons dans ce paragraphe que des **masses mécaniques**, aussi appelées *masses de protection*. Les raccordements des masses de signaux, aussi appelées *masses fonctionnelles* et que nous appellerons pour simplifier 0 V , seront abordés au paragraphe suivant.

De plus en plus d'équipements électroniques sont, ou seront un jour, connectés à d'autres équipements pour échanger des informations. La meilleure manière de garantir le bon fonctionnement de l'ensemble est de conserver au site tout entier une bonne équipotentialité. Cette vertu, surtout pour les équipements numériques et les convertisseurs à découpage, devrait s'étendre jusqu'à des fréquences élevées, disons jusqu'à une trentaine de mégahertz.

■ Boucles de masse et boucles entre masses

Avant d'en faire la chasse, définissons ce que l'on appelle une *boucle de masse*... et ce qu'est une *boucle entre masses* !

Une boucle de masse est la surface comprise entre un conducteur utile (un câble de mesure, de modulation, de contrôle-commande, d'alimentation, de réseau local...) et le conducteur de masse le plus proche. Il y a évidemment autant de boucles de masse que de câbles. Les boucles de masse sont donc inévitables. Elles existent, que les conducteurs soient isolés galvaniquement ou non.

Si un courant circule dans une boucle de masse, ce courant de mode commun risque de perturber soit les signaux utiles transmis (en mode différentiel, par dissymétrie), soit les circuits électroniques en extrémité, tant du côté émission que du côté réception. N'oublions pas que les étages électroniques de sortie sont au moins aussi vulnérables aux perturbations de mode commun que les étages d'entrée. Ils sont de surcroît moins commodes à filtrer.

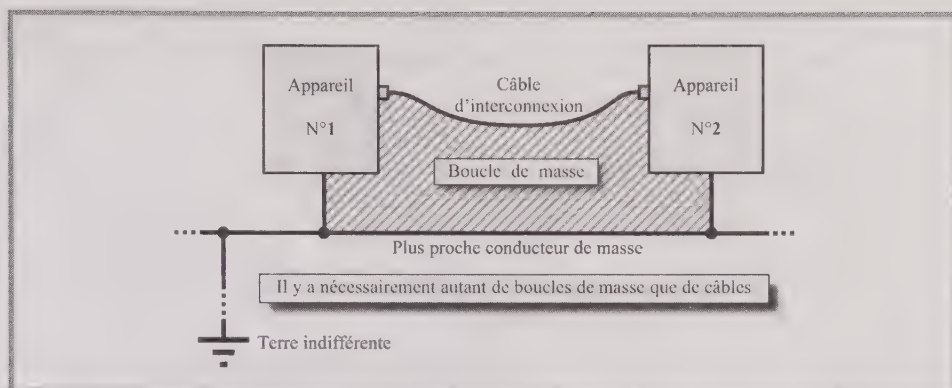


Figure 2.3 – Schéma d'une boucle de masse.

Un isolement galvanique réduit éventuellement la circulation des courants BF, mais il ne réduit pas la surface de la boucle de masse. La capacité des isollements galvaniques referme les courants de mode commun HF. Une boucle de masse peut résonner de façon sévère car elle n'est amortie que par de petites résistances. Les boucles de masse, surtout celles de grandes surfaces, constituent le principal problème CEM.

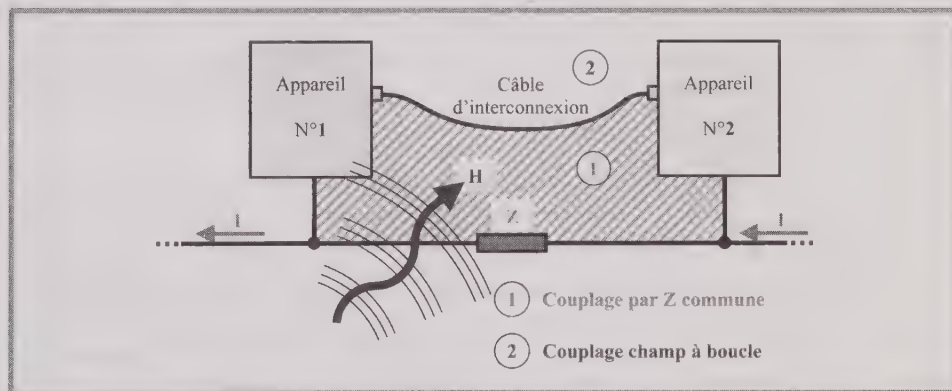


Figure 2.4 – Les deux couplages sur une boucle de masse.

La circulation d'un courant de mode commun dans une boucle de masse peut avoir deux causes : d'une part le couplage champ à boucle, d'autre part le couplage par impédance commune. Dans les deux cas, l'effet sur les équipements interconnectés est le même qu'une mauvaise équipotentialité des masses : la circulation de courants perturbateurs sur les câbles d'interconnexion.

Quand les masses sont maillées, les surfaces entre les conducteurs de masse ne doivent pas être confondues avec des boucles de masse. Il est préférable de laisser

les courants parasites se propager dans les masses plutôt que sur les câbles électriques. Nous appellerons les boucles entre conducteurs de masse des *boucles entre masses*.

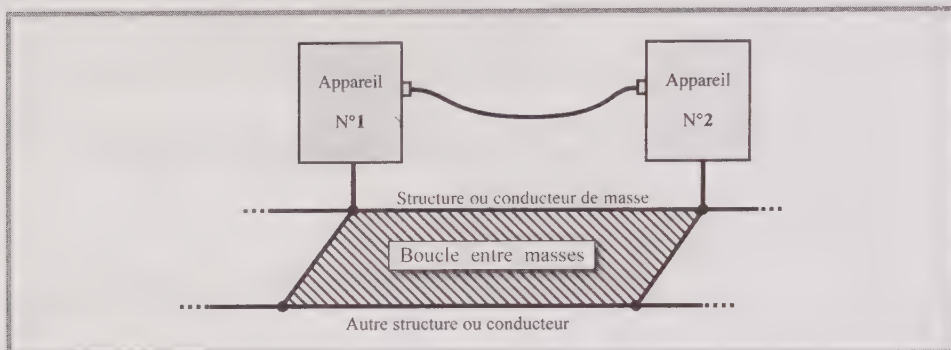


Figure 2.5 – Schéma d'une boucle entre masses.

Si deux masses voisines ne sont pas reliées, la tension entre elles peut devenir importante, en cas d'induction magnétique HF par exemple. Il est clair qu'un raccordement entre deux points améliore toujours leur équipotentialité. Il faudrait au moins relier entre elles les masses de tous les équipements qui communiquent. Le mieux est de mailler systématiquement toutes les masses. Les boucles entre masses sont presque aussi inévitables que celles de masse, du moins si l'on applique les recommandations de la NF C 15-500, en ajoutant des liaisons équipotentielles supplémentaires.

Il est toujours souhaitable de multiplier les boucles entre masses pour que les courants parasites puissent circuler librement. Plus les boucles entre masses sont nombreuses et de faibles dimensions, meilleure est l'équipotentialité du site. De plus, aux fréquences pas trop élevées, les champs électromagnétiques sont réduits par de nombreuses boucles entre masse grâce à un effet de « cage de Faraday ». Cet effet peut être significatif entre 10 kHz et 10 MHz. Ce spectre correspond à celui des tensions induites par la foudre (par son $\Delta H/\Delta t$).

Ne confondons pas boucle de masse et boucle entre masses. Une boucle de masse n'est pas favorable. Elle doit être de surface aussi petite que possible pour réduire l'effet des champs sur les câbles (couplage champ à câble). Cette réduction de surface ne réduit pas le problème des courants de mode commun dans les masses (couplage par impédance commune) : il faut multiplier les boucles entre masses.

Les boucles entre masses sont toujours favorables car elles améliorent l'équipotentialité des masses par la mise en parallèle de conducteurs, tant en BF qu'en HF. Elles réduisent le couplage par impédance commune. Les masses devraient toujours être maillées, quels que soient les équipements interconnectés. Un tel

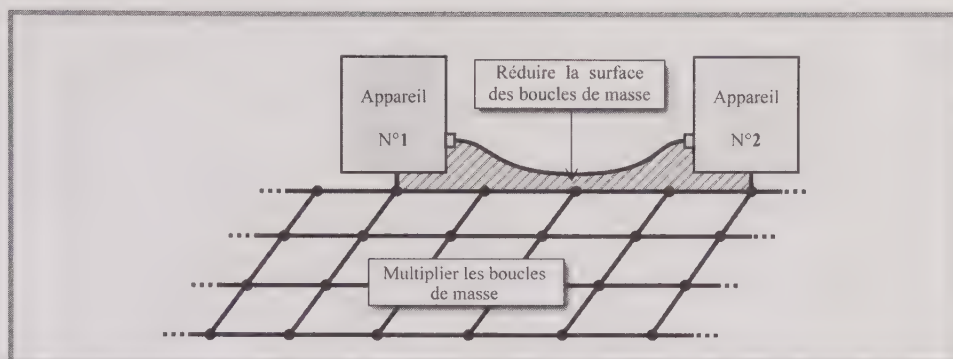


Figure 2.6 - Deux points importants, faciles à maîtriser.

maillage est favorable au bon fonctionnement des matériels numériques (sensibles), ainsi qu'à l'antiparasitage des convertisseurs à découpage (bruyants). Les hacheurs, variateurs de vitesse et autres générateurs de courants HF voient leur pouvoir perturbateur réduit par la multiplication des boucles entre masses.

Le maillage des masses contribue à l'équipotentialité des masses, mais il ne se substitue pas aux conducteurs de protection. Pour satisfaire les règles légales de protection des personnes, il faut conserver des conducteurs PE identifiés, d'une section suffisante, entre chaque équipement et la prise de terre. De plus, sauf éventuellement pour des bâtiments à structure métallique, de multiples conducteurs de descente des paratonnerres ou du réseau de protection foudre (voir tome 4) devraient être tirés jusqu'à la prise de terre.

La seule différence fondamentale entre un conducteur PE et un conducteur de descente est que le premier ramène des courants internes de mode commun vers le neutre du transformateur MT/BT alors que le second évacue des courants de mode commun externes (venant de l'extérieur du site) vers la terre. Les conducteurs de descente sont moins bien définis par les normes de protection contre la foudre que les conducteurs de protection des personnes par les normes de sécurité électrique.

Dans un site, seuls des courants internes peuvent être permanents. Les courants externes correspondent aux surtensions supportées par les câbles d'alimentation ou de télécommunication et aux coups de foudre directs. Les courants externes (de mode commun) sont impulsionnels ou HF. Pour qu'un courant externe soit permanent, il faudrait que le câble externe qui le supporte ne soit pas galvaniquement isolé, ce qui serait une grave erreur. Nous retrouvons la triste exception du schéma TT qui utilise la terre pour refermer les courants de fuite et de défaut vers le neutre : une terre peut dans ce cas (et seulement dans ce cas) supporter un courant permanent à 50 Hz.

Les isollements galvaniques manquent rarement, au contraire trop de 0 V flottent sans raison. En revanche, les limiteurs de surtensions restent souvent absents. Et

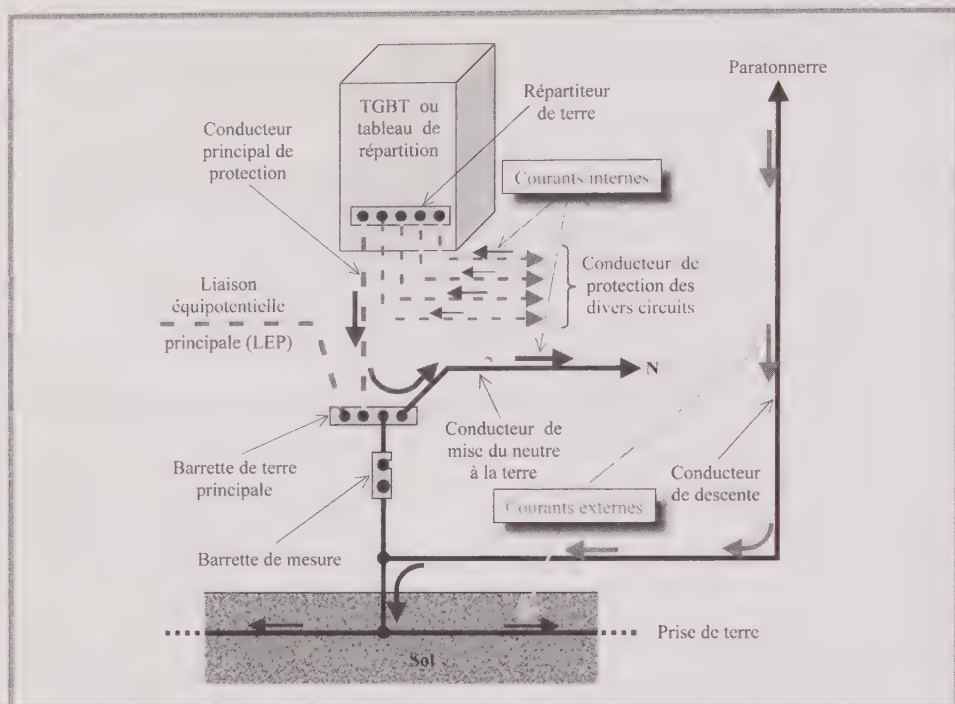


Figure 2.7 – Mises à la terre minimales pour la sécurité et circulation des courants.

lorsque des protections contre les surtensions sont installées, leur mise en œuvre est souvent défectueuse. La conséquence est que des équipements que l'on espérait protégés peuvent être perturbés ou détruits, par la foudre en particulier.

■ Unicité du réseau de masse

La masse, pour être équipotentielle, doit être unique, c'est évident. Trois méthodes de raccordement des masses respectent l'unicité.

□ La mise à la terre en étoile

L'idée est simple : chaque équipement est doté de son propre câble de terre, relié directement à une barrette de terre. La justification d'une telle philosophie est simpliste : lorsqu'un des équipements génère un courant de fuite, les autres sont censés rester en BF au même potentiel que le « potentiel propre » de la terre.

On entend souvent dire que la mise à la terre en étoile supprime le problème d'impédance commune. Entre équipements interconnectés, c'est strictement l'inverse ! La mise à la terre en étoile est le moyen légal d'obtenir l'impédance

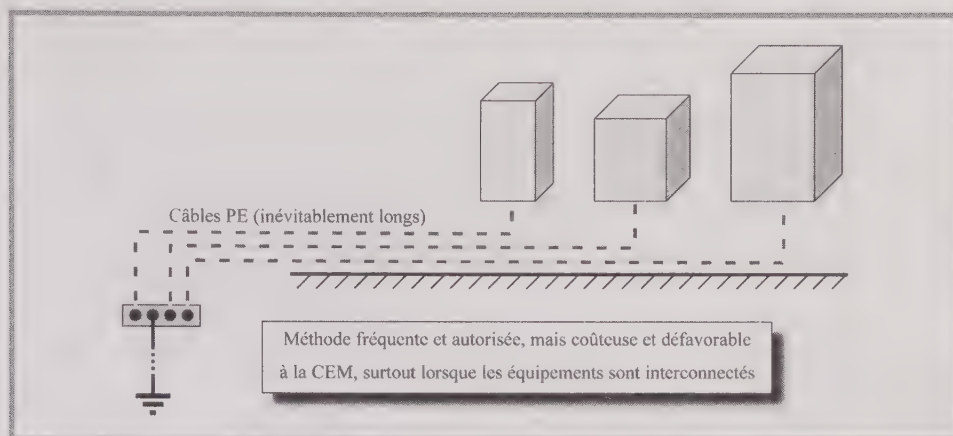


Figure 2.8 – Mise à la terre en étoile (aussi dite « à connexions parallèles »).

commune maximale entre équipements interconnectés ! Un matériel supportant un courant de mode commun, qu'il soit généré par l'équipement ou venant de l'extérieur, subit par rapport aux équipements voisins une tension supérieure à celle de toutes les autres méthodes de raccordement à la terre.

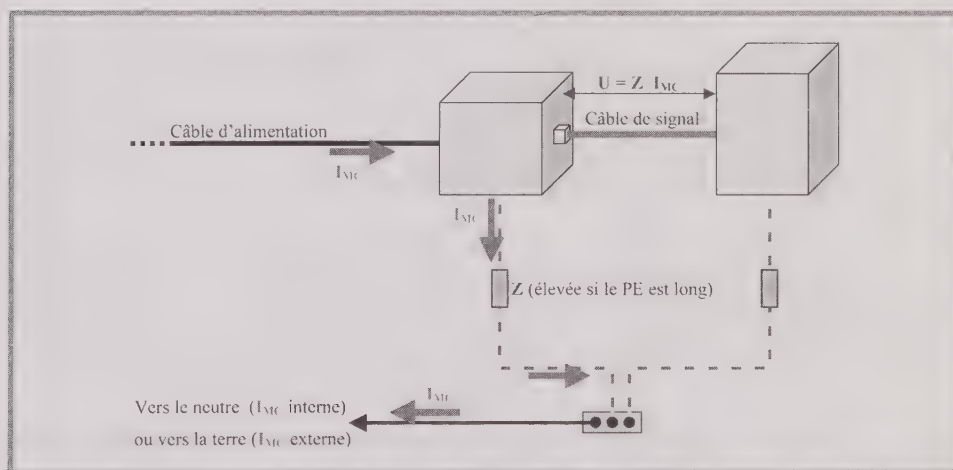


Figure 2.9 – Masses reliées en étoile = grande impédance commune...

On entend aussi que la mise à la terre en étoile supprime les boucles de masse. Entre deux équipements interconnectés, c'est strictement le contraire ! La mise à la terre en étoile est un moyen légal de créer une gigantesque boucle de masse ! Un champ magnétique rapidement variable, celui de la foudre par exemple, induit dans cette boucle des surtensions supérieures à celles des autres méthodes de mise à la terre.

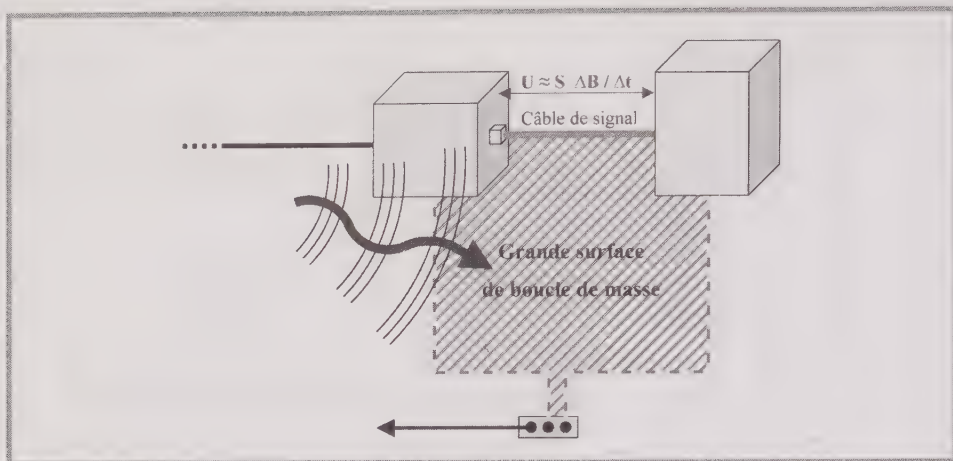


Figure 2.10 – Câblage en étoile = grande surface de boucle de masse...

La mise à la terre en étoile n'est possible, même si elle reste stupide (car coûteuse et sans intérêt), que pour un équipement isolé de tous les autres, ou lorsque la longueur des câbles jusqu'au centre de l'étoile est courte, disons inférieure à 2 m. Tel est le cas d'un système micro-informatique où tous les équipements sont reliés à la même « triplète secteur ».

L'ancienne méthode de mise à la terre en étoile ne peut éventuellement convenir que pour un équipement analogique avec ses capteurs isolés, quand son électronique est isolée des autres équipements et insensible au couplage carte à châssis. Même dans ce cas rare, la mise à la terre en étoile ne présente aucun avantage par rapport à un raccordement équipotentiel des masses.

Il est évident qu'avec la généralisation des transmissions d'informations à distance, des réseaux locaux, des périphériques partagés, et de manière générale les échanges de signaux entre équipements, la mise à la terre en étoile risque de dégrader la CEM. Le raccordement à la terre de chaque baie par un conducteur de terre dédié est aussi une méthode qui gaspille du cuivre et des heures de pose !

La seule utilisation raisonnable de la mise « à la terre » (il vaudrait mieux dire « à la masse ») en étoile est la liaison entre un équipement et son tableau électrique. Ainsi, en salle informatique, il est normal d'utiliser le conducteur vert et jaune des câbles d'alimentation jusqu'au tableau général situé dans la salle. De ce tableau, un seul conducteur de protection jusqu'à la terre peut suffire. Il est important est de connecter la barrette de terre du tableau aux masses locales, à la masse du faux plancher par exemple. Répétons-le, quel que soit le schéma de neutre, des liaisons équipotentielles supplémentaires sont nécessaires.

On pourrait penser *a priori* que lorsque l'on installe un gros perturbateur et du matériel sensible dans un même environnement, une mise à la terre en étoile

(des équipements sensibles et des équipements bruyants) pourrait être favorable. En pratique ce n'est pas le cas, surtout si des câbles interconnectent les divers équipements.

Les courants de fuite, et ceux induits par le champ magnétique de la foudre dans les boucles entre masses, peuvent se compter en centaines d'ampères (au voisinage d'alternateurs de forte puissance par exemple). Même dans ce cas, un raccordement aux masses locales est favorable. Nous n'avons jamais rencontré d'installation où un raccordement de la terre en étoile ait été meilleur que le maillage systématique des masses.

Ne câbler des masses de deux systèmes indépendants qu'en étoile, l'un composé de matériels « sales », l'autre d'équipements sensibles, serait illusoire. En effet, des liaisons involontaires entre masses sont en pratique inévitables : tuyaux, chemins de câbles, blindages, contacts involontaires, etc.

De plus les systèmes évoluent : on leur ajoute des capteurs, des alarmes, des régulations électroniques, des reports à distance, etc. Un câblage à la terre en étoile le jour de l'inauguration a toutes les chances d'être shunté par un ajout futur... Et alors plus rien ne fonctionne. Ne prenons donc pas le risque de nous contenter d'un câblage des masses en étoile.

☐ Le raccordement au conducteur PE le plus proche

Dans ce deuxième cas, un seul conducteur de protection sert à plusieurs équipements. Le coût de l'installation est donc plus faible que pour un raccordement en étoile.

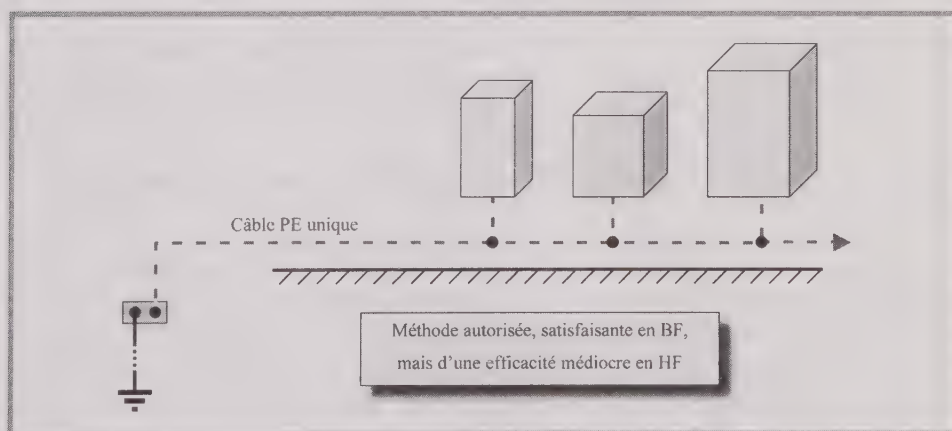


Figure 2.11 – Mise à la terre par un PE commun à divers équipements.

Les boucles de masse ont alors une assez faible surface, et l'impédance commune entre équipements interconnectés est plus basse qu'avec la mise à la terre en

étoile. Cette méthode économique est également recommandée pour des raisons de sécurité. Il est facile de prouver que la tension de contact entre deux masses raccordées au même PE ne peut pas excéder en permanence la tension U_L .

Le risque d'utiliser un conducteur PE commun pour mettre à la terre deux systèmes, l'un bruyant, l'autre sensible n'est pas nul. Le courant généré par un gros perturbateur aux fréquences basses ne pose que peu de problèmes. En effet, la faible impédance des conducteurs de protection en BF limite les risques. En revanche, les courants HF dans la masse générés par de gros pollueurs (convertisseurs de forte puissance mal filtrés en particulier) s'évacuent mal par un seul conducteur. Dans ce cas, le raccordement à un PE commun n'est acceptable que si les masses sont maillées par de multiples liaisons équipotentielles supplémentaires.

□ La liaison au plus court à la masse la plus proche

Le troisième mode de raccordement à la masse, au plus près, est le meilleur. Il correspond au maillage des masses. Les surfaces des boucles de masses sont faibles et l'équipotentialité des masses est meilleure que dans les deux autres méthodes.

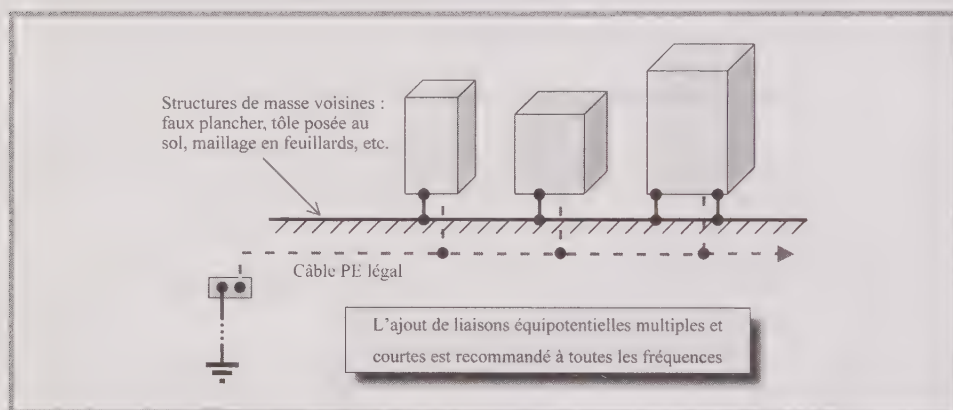


Figure 2.12 – La méthode des liaisons multipoints.

Le raccordement au plus près sans PE identifié pose un problème légal : comment démontrer que le courant de défaut maximal permanent ne risque pas de créer une tension de contact supérieure à U_L , et comment faire pour qu'un démontage mécanique ne rende pas un matériel dangereux ? La solution est de superposer les méthodes n° 2 (pour la sécurité des personnes) et à des liaisons supplémentaires multiples (pour une bonne CEM).

Une remarque de bon sens : ce n'est pas parce que les masses accessibles sont maillées que l'on doit supprimer les isollements galvaniques des lignes de signaux quand ils existent. Pour les signaux à très bas niveau, la symétrie des liaisons reste nécessaire. Bien faire ici ne devrait pas tenter de mal faire là.

Mailler les masses est encore plus important quand le système occupe une grande surface au sol, avec de longs câbles d'interconnexion, ou quand des équipements interconnectés sont répartis sur plusieurs étages. En résumé, le point commun de raccordement des conducteurs de protection de divers appareils interconnectés devrait être aussi proche que possible des équipements. De petits systèmes (sur une même table par exemple) peuvent se contenter d'un raccordement par leur seul PE. Même dans ce cas, des équipements de mesures à bas niveau gagnent à être posés sur une tôle, avec leurs masses reliées directement à cette tôle.

■ Réalisation du réseau maillé de masse

Le réseau de masse d'un bâtiment devrait comprendre les deux types de conducteurs :

- les conducteurs de protection PE, appelés *câbles de terre*, servant à la sécurité des personnes, et repérés par leur coloration normalisée vert et jaune;
- des liaisons supplémentaires pour garantir une bonne équipotentialité entre masses à toutes les fréquences.

□ Conducteurs de protection

Les conducteurs de protection suffisent à eux seuls à garantir la sécurité des personnes. En dessous d'une section de 35 mm^2 de cuivre, le coût du conducteur est inférieur à celui de sa pose. Certaines économies en CEM (de cuivre, de filtrage, de blindage) ne sont pas rentables.

Aucune barrette de terre ne devrait être réservée au raccordement des masses d'une catégorie d'équipements déterminée. La notion d'équipotentialité rend par nature chaque borne de terre équivalente à toutes les autres. Une même barrette de terre peut sans inconvénient protéger plusieurs fonctions, même appartenant à des installations ou des systèmes différents.

Lorsque l'on corrige l'équipotentialité d'un site, on peut rajouter des liaisons électriques, mais pas en supprimer ! Même si des masses d'équipements avant leur maillage sont câblées en étoile à la terre, il est souhaitable de laisser en place les conducteurs de protection existants. Déposer un câble est presque aussi coûteux que d'en ajouter un. Les câbles PE, même s'ils sont longs et sont court-circuités par une grille de masse, suffisent à garantir conventionnellement la sécurité des personnes. En bref, ne supprimons aucune liaison de masse ni aucun conducteur de protection, même s'ils deviennent inutiles après un maillage soigneux des masses.

La coloration des conducteurs n'est ni magique ni fonctionnelle ! Une liaison supplémentaire de masse, même de couleur vert et jaune, doit être aussi courte que possible et d'une section supérieure à $1,5 \text{ mm}^2$! Utiliser une section de cuivre supérieure à 50 mm^2 est inutile car même à une fréquence aussi basse que 50 Hz, leur réactance est supérieure à leur résistance. Si la section d'un conducteur de

masse supplémentaire compte peu (sauf en continu), il importe d'en limiter la longueur.

Les conducteurs de protection sont toujours trop longs pour améliorer l'équipotentialité entre équipements à des fréquences élevées. Par exemple un conducteur PE long de 100 m (valeur courante dans les bureaux comme en industrie) est incapable d'écouler du courant au-delà de 100 kHz. Souvenons-nous que les pires ennuis de CEM se situent souvent dans la gamme des fréquences supérieures à 30 MHz.

Les conducteurs de protection (qui suivent le même parcours que les conducteurs de phase) ne constituent physiquement que des conducteurs de masse parmi d'autres. Ils constituent des boucles entre masses et non des boucles de masse. Un conducteur PE ne doit pas être considéré comme un câble signal : malgré son qualificatif de conducteur de terre, il est un conducteur de masse.

De même qu'il ne doit y avoir qu'une seule terre par site, il ne devrait y avoir qu'une seule masse. Que signifierait sinon l'équipotentialité ? Les conducteurs de protection et de terre ne suffisent généralement pas à garantir à eux seuls la CEM des équipements. Ils sont trop longs pour garantir une bonne equipotentialité au-delà d'une centaine de kilohertz. D'autres conducteurs ou d'autres liaisons entre masses sont nécessaires; le plus économique est d'utiliser les structures métalliques existantes.

□ **Maillage des masses**

L'impédance linéique d'un conducteur rectiligne, quelle qu'en soit la section, est voisine de $1 \mu\text{H/m}$. La seule façon d'abaisser l'impédance entre deux points éloignés consiste à diviser les courants par un nombre de conducteurs aussi élevé, et de longueur aussi courte que possible. La topologie d'un réseau de masse equipotentiel est la même que celle d'un bon réseau de terre, c'est-à-dire une grille.

Contrairement à un conducteur enterré, un conducteur de masse propage les courants presque sans pertes. La dimension moyenne de la maille d'un réseau de masse doit donc être inférieure à celle d'un réseau de terre, disons typiquement 2 m à 3 m au lieu d'une dizaine. Une autre raison est que, le réseau de masse étant proche des équipements sensibles, son rôle est de préserver une bonne equipotentialité plus haut en fréquence que le réseau de terre éloigné.

Plus une masse est proche d'un équipement électronique, plus il importe qu'elle reste, aux fréquences des perturbations électromagnétiques, au même potentiel que celui de référence des circuits. Il est souhaitable que cette fonction de référence de potentiel s'étende au-delà de 10 MHz. La masse d'un équipement électronique peut, et doit, rester equipotentielle à des fréquences plus élevées que ne le peut le réseau de terre. La rôle de référence de potentiel (TRP) d'une baie sert à la fois de référence de potentiel aux 0 V internes, et de poubelle aux courants externes à l'électronique.

De plus, l'enveloppe conductrice d'un équipement peut blinder ses circuits contre les champs. Par rapport à l'équipotentialité des masses et des châssis, la difficulté des blindages est qu'il est difficile de les améliorer après coup.

Ajouter une liaison équipotentielle supplémentaire entre deux équipements, surtout s'ils communiquent, est toujours favorable. Une liaison courte, donc à faible impédance en HF, entre deux équipements interconnectés réduit leur couplage par impédance commune.

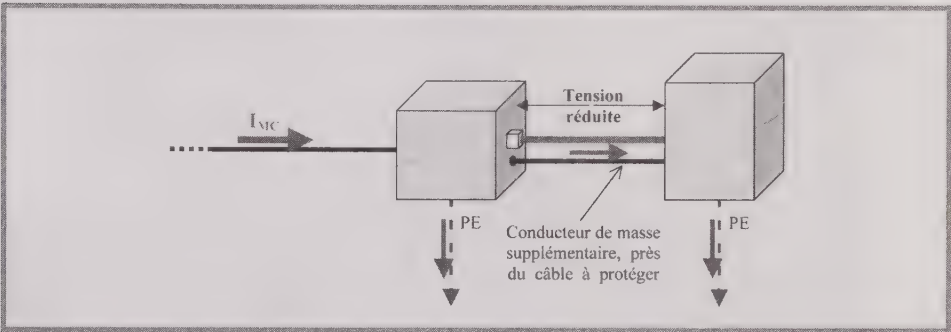


Figure 2.13 – Réduction de l'impédance commune par une liaison supplémentaire.

D'autre part, l'interconnexion des masses réduit l'effet des champs électromagnétiques sur les câbles. Il est possible de réduire la surface des boucles de masses en multipliant les liaisons de masse au voisinage des câbles. Des liaisons supplémentaires entre masses réduisent les différences de potentiel en mode commun entre baies (générées par courant ou par champ magnétique), donc protègent les équipements.

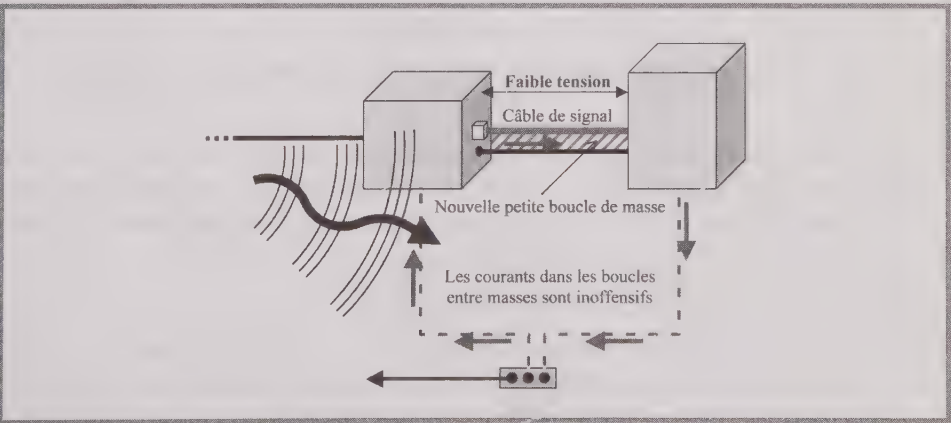


Figure 2.14 – Une liaison supplémentaire réduit la surface de boucle de masse.

En pratique, tout conducteur peut participer à l'équipotentialité du réseau de masse : conducteurs de terre, tubes et tuyaux métalliques, goulottes, chemins de câbles, gaines, charpentes, platelages, tablettes, rambardes, caillebotis, poutres, structures et huisseries métalliques, etc. Un tel maillage qui améliore beaucoup la CEM des systèmes est aussi favorable à la sécurité des personnes.

La nature des conducteurs a peu d'importance sur l'équipotentialité. Un conducteur d'acier présente sinon la même résistance, du moins la même impédance en HF, c'est-à-dire la même inductance, qu'un conducteur de cuivre de section et longueur égales. N'hésitons pas à raccorder tous les tuyaux, quelle que soit leur nature.



Figure 2.15 – Exemple de maillage des masses en trois dimensions.

Lorsque deux équipements qui échangent des signaux de quelque nature que ce soit sont placés côte à côte, il est souhaitable de relier leurs châssis directement par des vis, avec contact tôle sur tôle, sans oublier de gratter la peinture. Deux contacts en partie basse et deux en partie haute entre baies mitoyennes constituent, selon nous, un raccordement minimum.

Des tresses larges et courtes conviennent également. Tant que la longueur des liaisons supplémentaires reste inférieure à une cinquantaine de centimètres, leur ajout est intéressant jusqu'à des fréquences élevées, disons jusqu'à une trentaine de mégahertz. L'interconnexion des masses d'armoires voisines qui n'échangent pas de signaux, bien que moins importante, reste souhaitable.



Figure 2.16 – Exemples de liaisons équipotentielles entre équipements.

Il est plus simple et plus sûr de mailler systématiquement toutes les masses des équipements sans se préoccuper des câbles utiles que de chercher à interconnecter les masses des seuls équipements qui, le jour où l'on effectue le câblage, échantent des signaux.

Bien que le réseau de masses idéal soit une tôle ou un grillage à mailles fines, l'expérience montre que pour la majorité des perturbations électromagnétiques une dimension de maille d'environ 2 m au carré s'avère suffisante. On réalise ainsi ce que nous appelons une *grille de masse*.

Il est facile de vérifier l'équipotentialité d'un faux plancher en mesurant à l'analyseur de spectre les champs électromagnétiques au-dessus puis en dessous des dalles du plancher, par une petite antenne boucle par exemple. L'effet de blindage d'un faux plancher est, comme pour un coffret, directement lié à son équipotentialité. Elle est souvent remarquable (disons de l'ordre de 30 dB à 100 MHz).

Au cas où les contacts entre les dalles ne sont pas assurés (dalles avec joints de caoutchouc antistatique) et où les contacts par les cornières de support sont incertains (pollution, corrosion, ou pas de cornière du tout), on doit ajouter une grille de masse. Il suffit d'assurer entre les vérins métalliques (aussi appelés *chandelles*) des raccordements électriques sûrs. Des petites agrafes à ressort adaptées aux reprises de masse sur les vérins sont disponibles dans le commerce. Mailler chaque vérin est l'idéal, mais il suffit souvent de n'en mailler qu'un sur deux, voire

un sur trois dans chaque direction. Une dimension de grille de 1,80 m par maille convient à la majorité des cas. Nous recommandons dans ce cas une section de cuivre de 16 à 35 mm².

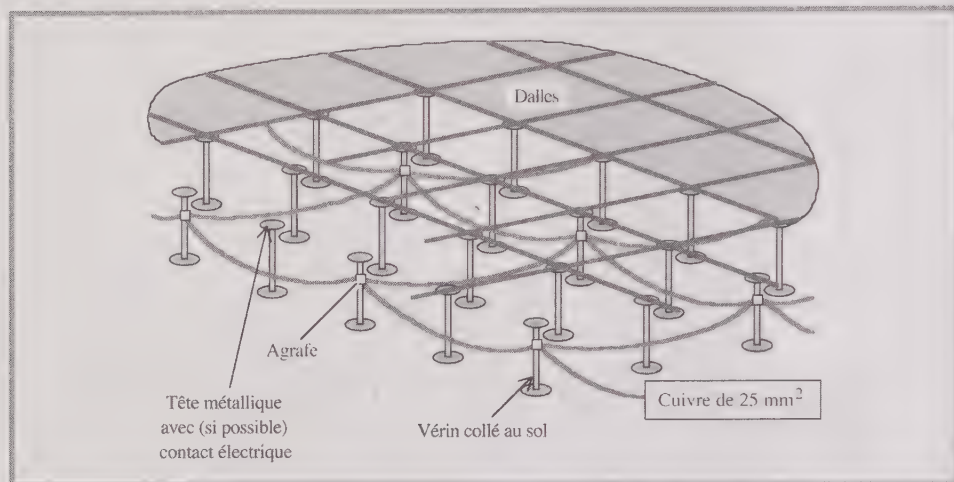


Figure 2.17 – Maillage d'un faux plancher.

On s'efforcera de se raccorder à la grille de masse au plus près d'un nœud pour diviser les courants HF en quatre, mais sans rallonger la connexion. La section des straps de masse est indifférente, mais leur longueur importe : elle doit rester aussi courte que possible. Quand la longueur de connexion entre un bâti et le réseau de masse ne peut pas être inférieure à 50 cm environ, nous conseillons d'ajouter une autre connexion en parallèle, en un point distant.

Le raccordement de la barre de terre du tableau électrique d'un îlot (figure 2.18) à la grille de masse devrait être assuré par une inductance inférieure à 1 µH environ (0,5 µH si possible). On peut par exemple utiliser un conducteur unique de 50 cm, ou deux conducteurs en parallèle (pas trop proches l'un de l'autre) de 1 m chacun...

Une alternative au maillage du faux plancher (lorsque des bâtis sont posés sur de la moquette par exemple) est une grille de masse mince directement posée sur la dalle de béton. Cette grille peut être réalisée en feuillard de cuivre brasé à l'étain. La largeur souhaitable du feuillard est de 20 cm à 30 cm, mais une largeur de 10 cm est déjà efficace. L'épaisseur est indifférente (0,3 mm ou 0,5 mm par exemple) et la dimension moyenne des mailles devrait avoisiner 2 m. Une grille à maille de 60 cm en feuillard de 10 cm de large est excellente puisqu'elle reste efficace, comme un faux plancher, jusqu'à plus de 100 MHz.

La reprise de masse entre les bâtis et la grille peut s'effectuer par tresses ou câbles souples avec cosses. Ces conducteurs sont à relier au plus court sur des « équerres »

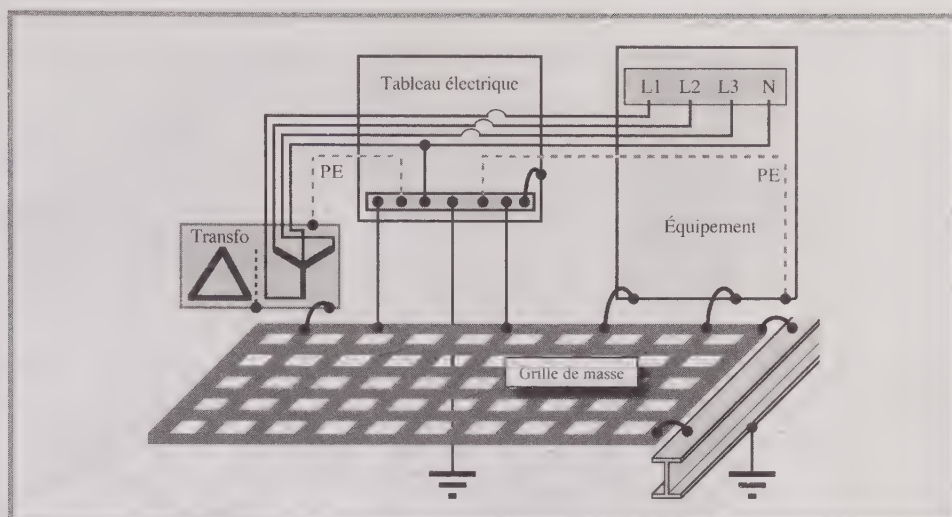


Figure 2.18 – Alimentation et masses d'un système électronique ou informatique.

soudées (également à l'étain) sur le feuillard. La moquette doit être incisée pour laisser passer les équerres. Nous recommandons de relier chaque grand bâti à la grille de masse une fois tous les mètres environ. Les variantes du principe de maillage sont innombrables : maillage par plat de cuivre, par chemins de câbles, par tresses, etc.

En environnement industriel, un réseau de masse devrait être connecté à toutes les structures conductrices accessibles : poutres et huisseries métalliques, tuyaux, caillebotis, goulottes métalliques, les platelages, tablettes, corbeaux, tubes et tuyaux métalliques, gaines de ventilation, etc. Il est rarement utile d'ajouter un conducteur, il suffit le plus souvent d'interconnecter, et en autant de points que possible, les structures existantes. Dans les zones à forte densité d'équipements, lorsque la dimension d'une maille de masse excède 4 m environ, nous conseillons d'ajouter un conducteur de masse supplémentaire. La section et la nature de ce conducteur sont pratiquement indifférentes.

Le raccordement des structures métalliques aux conducteurs de protection est non seulement autorisé mais souhaitable. Les goulottes en plastique (en PVC) gagneraient à être remplacées par des goulottes en tôle galvanisée. Les goulottes électrozinguées peuvent, si elles sont bien mises en œuvre, faire merveille par leur « effet réducteur ». Nous détaillerons cet effet au chapitre suivant.

Une liaison courte entre chaque équipement ou châssis et le réseau de masse est un minimum. Lorsque l'on ne sait pas distinguer les baies les unes des autres, dans le cas d'un bâti unique composant toute une travée par exemple, on devrait connecter ce bâti à la grille de masse aussi souvent que possible. Un point de

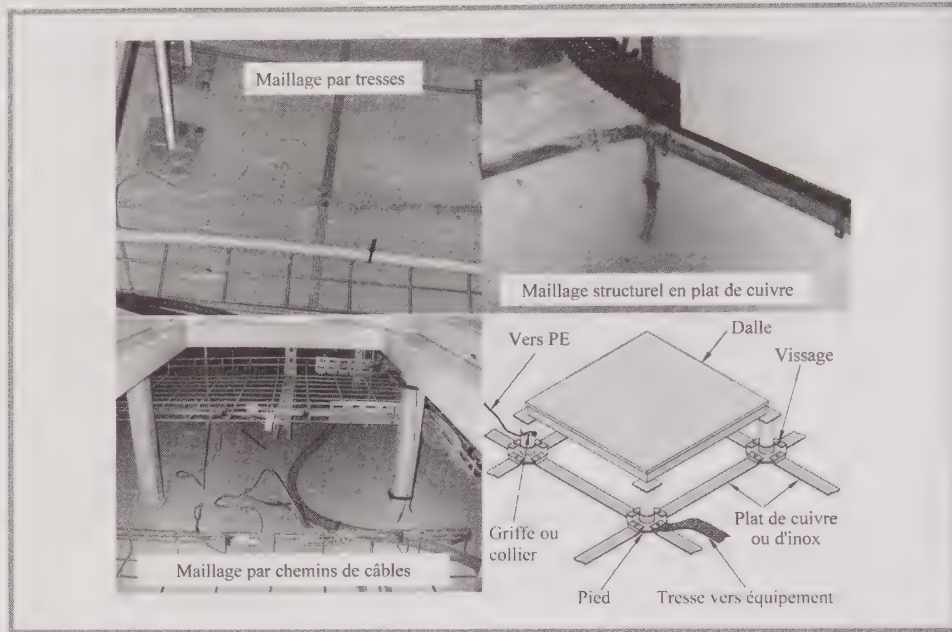


Figure 2.19 – Quelques variantes du maillage des masses.

raccordement tous les mètres est une bonne valeur. Plus la capacité qui couple une baie au sol est importante, meilleure est l'équipotentialité HF. Ainsi, une baie basse et large est toujours préférable à une baie étroite et haute.

Le maillage des masses devrait être réalisé dans les trois dimensions, surtout pour les immeubles à plusieurs étages avec de l'informatique en réseau. N'oublions pas qu'une des plus graves menaces est l'induction du champ magnétique de la foudre dans les boucles de masse. Le champ de la foudre est essentiellement horizontal, il induit les pires tensions parasites dans les boucles verticales. Or ce sont les boucles entre masses verticales, et non une grille de masse horizontale, qui réduisent la composante horizontale du champ perturbateur. Un site est malheureusement plus facile à mailler dans le plan horizontal que dans les plans verticaux...

Deux étages adjacents devraient ainsi être maillés par toutes les liaisons conductrices en traversée de plancher. Ces interconnexions peuvent être des conducteurs préexistants (chemins de câbles, tuyaux...) ou des câbles de terre ajoutées. La dimension souhaitable d'une maille verticale est de 3 m à 4 m environ, surtout dans les zones à forte densité d'équipements électroniques.

Ces recommandations ont été validées par de nombreuses réalisations et sont reprises par de nombreux documents. Citons par exemple la publication américaine FIPS PUB 94 (téléchargeable gratuitement sur Internet), l'excellente norme internationale CEI 61000-5-2 (payante), la notice technique sur la protection foudre du STBFT, et de nombreux documents de constructeurs de matériels. Le coût de

l'amélioration de l'équipotentialité d'un site est faible devant celui des effets (directs et induits) des perturbations électromagnétiques.

■ La *transient suppression plate*

En environnement isolant, sur une dalle de béton par exemple, il est possible d'obtenir un couplage capacitif HF (quelques nanofarads) avec la masse des fers à béton grâce à une tôle plaquée au sol. Cette tôle est appelée en anglais *transient plate* ou *transient suppression plate* (TSP).

Une feuille de tôle d'une surface de 1 m^2 posée à plat sur le sol présente par rapport aux fers à béton une capacité typique un peu supérieure à 1 nF . Elle peut servir de référence de potentiel HF, c'est-à-dire donner l'illusion au matériel de travailler en environnement équipotentiel, à une double condition :

- la surface au sol de la *transient plate* doit être sensiblement supérieure à celle de l'équipement lui-même;
- la masse de l'équipement doit être raccordée en plusieurs points à la *transient plate* par des liaisons de masse aussi larges et courtes que possible.

Nous conseillons une dimension de *transient plate* de l'ordre de 2 m au carré. Les liaisons de reprise de masse doivent être nombreuses, distantes d'une cinquantaine de centimètres par exemple. Leur longueur doit être aussi faible que possible, disons une dizaine de centimètres si possible. L'amélioration de l'immunité est alors sensible jusqu'à plus de 100 MHz .

Il est également possible d'améliorer l'immunité et de réduire l'émission rayonnée par les câbles d'une salle informatique dans un bâtiment à structures isolantes grâce à une *transient plate* posée au sol sous le tableau électrique. Il est enfin souhaitable de référencer les protections des câbles externes (éclateurs, parafoudres, filtres CEM ou reprise d'écran de câbles blindés) à une tôle fortement couplée aux fers à béton.

Même en environnement conducteur, si le maillage des masses n'est pas assez dense ou si un équipement est particulièrement sensible ou stratégique, il est possible d'ajouter une *transient plate* à sa base (baie de mesures, unité centrale, interface d'alimentation). Cette tôle gagne à être connectée aux masses voisines. Sa nature et son épaisseur sont indifférentes. Nous préconisons une feuille de laiton car elle résiste bien à l'oxydation et est facile à souder. Une épaisseur d'au moins $0,5 \text{ mm}$ garantit sa robustesse mécanique, et des bords ébavurés réduisent le risque de se couper.

Il est facile de valider l'installation d'une *transient plate*. Le test CEI 61000-4-4 (voir chapitre 4) est conseillé pour son aptitude à valider rapidement et pratiquement sans risque tout type d'installations. Ce test révélateur et peu coûteux révèle rapidement tous les défauts d'équipotentialité HF.

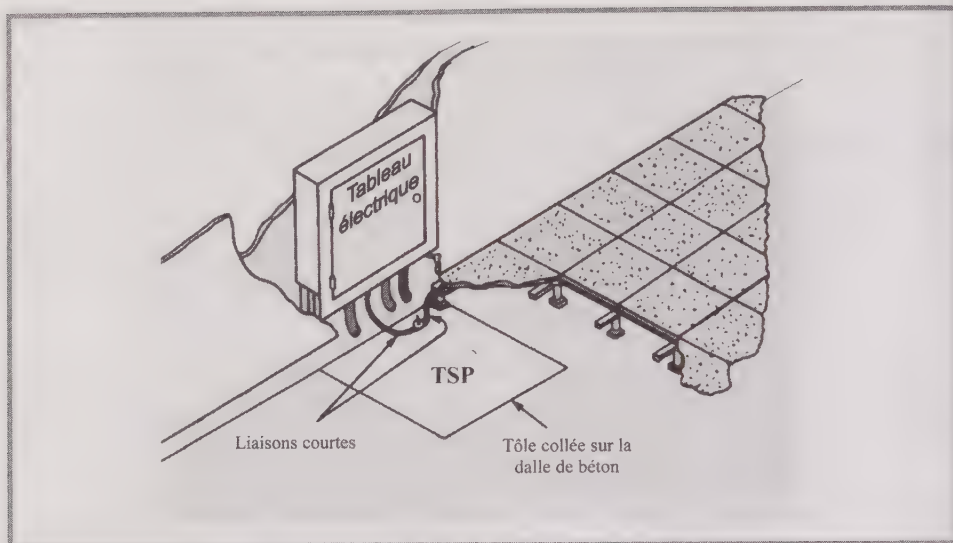


Figure 2.20 – Exemple de transient suppression plate.

■ En conclusion provisoire...

L'équipotentialité des masses est une condition essentielle du bon fonctionnement de tout système électronique, surtout des équipements numériques rapides ou perturbateurs (convertisseurs statiques en particulier). Que ce soit pour améliorer l'immunité contre les perturbations électromagnétiques (foudre, transitoires rapides, décharges électrostatiques, IEMN...) ou pour réduire les perturbations rayonnées (normes de protection du spectre radioélectrique), le maillage des masses est une solution simple, peu coûteuse et efficace jusqu'à des dizaines de mégahertz.

La conséquence essentielle de l'équipotentialité des masses est la fusion des diverses masses en un réseau unique, aussi équipotentiel que possible. Il faut abandonner l'espoir d'évacuer un courant HF par un conducteur destiné à cet effet : ce n'est possible qu'en BF. En HF, les couplages par champ et par diaphonie sont sévères et inévitables, surtout en environnement isolant. Diviser les inévitables courants de mode commun HF en de multiples chemins par les nombreux conducteurs de la grille de masse est une solution de protection efficace des câbles signaux. Il faut tendre vers le concept de « cage de Faraday », c'est-à-dire un environnement équipotentiel en trois dimensions.

Que le lecteur inexpérimenté se rassure : le maillage des masses ne dégrade pas l'immunité des équipements aux fréquences basses. L'expérience montre que lorsqu'un système fonctionne correctement en absence de perturbation HF, quelle que soit la philosophie de câblage de ses masses, le maillage systématique des structures ne dégrade pas son bon fonctionnement, au contraire. En revanche,

lorsqu'un problème est dû à une boucle de masse, ce qui est assez rare en BF mais fréquent en HF, le maillage des masses résout la difficulté presque à coup sûr.

Hormis une véritable enceinte faradisée, seul le maillage des masses permet de garantir l'équipotentialité contre les perturbations industrielles. Le coût d'une chambre blindée, même si elle est installée avant les équipements, est environ 100 fois supérieur à celui du maillage des masses pour une surface équivalente, même s'il est réalisé après coup. Intéressant, n'est-ce pas ?

3 Masses des signaux

L'objet de ce guide n'est pas de traiter de la conception des équipements. Toutefois à l'installation des systèmes, il est fréquent d'avoir à câbler des fonctions de diverses natures à partir de la même alimentation. Se pose alors la question du raccordement de ces alimentations à la masse.

La **masse fonctionnelle**, c'est-à-dire la référence de potentiel des signaux électroniques, sera simplement appelée *masse électronique* ou 0 V. Une masse électronique craint à la fois les courants parasites qui la traversent et les $\Delta U/\Delta t$ par rapport à leur environnement, c'est-à-dire la masse mécanique proche.

■ Alimentation secteur

Les détails sur les régimes de neutre et la protection des alimentations sont donnés au paragraphe du tome 4 sur la protection et schéma de neutre. En cas d'ajout d'un transformateur d'isolement, que ce soit pour changer de régime de neutre (passer en TN-S) ou pour réduire les courants de fuite à la terre (dans le réseau de masse devrions-nous dire), il est souhaitable de fixer un point du secondaire à la masse.

Il est autorisé de relier à la masse l'une des phases, mais le mieux est d'y raccorder le point de symétrie (le neutre en triphasé) afin de limiter la circulation dans les masses des courants capacitifs des filtres CEM. On crée de la sorte un schéma TN en aval du transformateur. Il serait illégal de laisser flotter le neutre d'une alimentation distribuée sans en surveiller son potentiel par un **contrôleur permanent d'isolement** ou CPI.

Pour l'alimentation d'une salle informatique le transformateur d'isolement gagne à être installé au plus près de la salle, voire dans la salle elle-même (voir figure 2.18). Le neutre ne devrait être raccordé à la masse donc à la terre qu'en un seul point. Le conducteur neutre et les conducteurs de masse n'ont pas le même rôle, sauf en schéma TN-C (d'où des problèmes).

Ne confondons pas la distribution d'énergie électrique en mode différentiel qui doit être effectuée si possible en étoile à partir du tableau général basse tension pour minimiser l'impédance commune entre circuits, et la distribution du PE qui doit être maillé en mode commun aux masses mécaniques. En mode différentiel, une distribution d'alimentation gagne à être câblée en étoile, car cette méthode minimise l'impédance commune (de la source et des câbles) entre des équipements bruyants et des matériels sensibles.

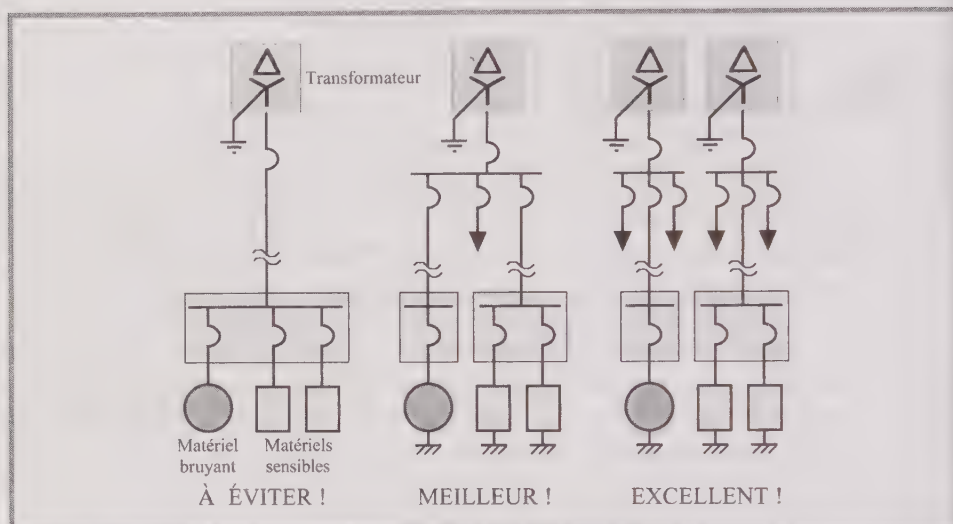


Figure 2.21 – Une alimentation secteur en étoile est favorable !

■ Alimentations continues

La règle générale est de référencer systématiquement les alimentations continues principales à la masse du châssis, au plus près de la borne de sortie du bloc d'alimentation. Ainsi, le 0 V numérique, le 0 V analogique et les autres alimentations principales (le 48 V du relaying interne par exemple) gagnent à être connectés à la masse mécanique par des liaisons aussi courtes que possible.

Cette règle a deux buts :

- imposer aux cartes le même potentiel que celui du châssis afin de supprimer le couplage capacitif carte à châssis;
- évacuer à la masse mécanique les courants HF résiduels ayant traversé l'isolement galvanique de l'alimentation (la capacité du transformateur). Les courants HF générés par une alimentation à découpage ont moins d'effets néfastes s'ils s'écoulent à la masse mécanique qu'à travers les circuits électroniques.

Seules les alimentations auxiliaires de circuits d'interfaces galvaniquement isolés, les petits convertisseurs continu-continu sur les cartes d'interface par exemple, ne doivent pas rester flottantes (c'est-à-dire ne pas être reliées directement à la masse du coffret). Même dans ce cas, un condensateur de quelques nanofarads entre un 0 V flottant et la masse du châssis peut être favorable.

□ Cartes numériques

Toute carte numérique devrait avoir un plan de masse (son 0 V, plus en numérique son plan d'alimentation principale) non fendu(s). Une grille de 0 V à petites mailles en numérique est un minimum. Le raccordement du 0 V numérique à la masse du châssis est souhaitable en autant de points que possible.

Les plastrons (bandeaux conducteurs en face avant) devraient être mis au contact direct de la masse des racks. Il est souvent nécessaire de gratter la pellicule isolante recouvrant le métal : peinture ou anodisation. Les racks préfabriqués sont souvent mauvais, et les racks CEM coûtent fort cher. Même en continu, beaucoup de coffrets ne garantissent pas les contacts entre leurs différentes parties. Un lamage est alors nécessaire pour garantir le contact électrique par la tête de vis.

Le raccordement du plan de masse numérique au châssis est nécessaire au moins à proximité immédiate (disons à 1 cm ou 2 cm) de chaque connecteur externe. Les connecteurs des câbles externes sont des points d'entrée privilégiés pour les courants HF collectés en mode commun par les câbles. Il convient d'écouler ces courants au châssis par la plus faible impédance possible.

Un fond de panier devrait également bénéficier d'un plan de masse non fendu. Un fond de panier est toujours critique, surtout quand il supporte un bus rapide. Il devrait être électriquement raccordé au châssis équipotentiel par au moins quatre contacts de faible longueur. Les vis de fixation et des entretoises courtes, ou mieux des bossages de la tôle, font l'affaire.

Les liaisons entre carte mère et cartes filles ou entre cartes et fond de panier doivent conserver une bonne équipotentialité des 0 V. Les broches de 0 V devraient être nombreuses et régulièrement réparties sur toute la hauteur des connecteurs et non pas regroupées à ses extrémités. De nombreux bus standard (VME, VXI...) sont décevants sur ce point. Les nouveaux standards informatiques (PCI par exemple) sont meilleurs : ils imposent beaucoup de broches de 0 V et les signaux critiques sont transmis en différentiel.

La tension V_{CC} ou V_{DD} d'alimentation numérique (souvent 3,3 V ou 5 V) devrait aussi être distribuée par un plan de cuivre. Comme pour le 0 V, le minimum acceptable est une grille. Il n'y a pas beaucoup de différence en numérique entre le 0 V et le V_{DD} , hormis le fait que l'on ne peut pas connecter les deux à la masse !

Chaque carte numérique devrait avoir son alimentation filtrée en mode différentiel (le 0 par rapport au V_{DD}) par un condensateur chimique de forte capacité (nous

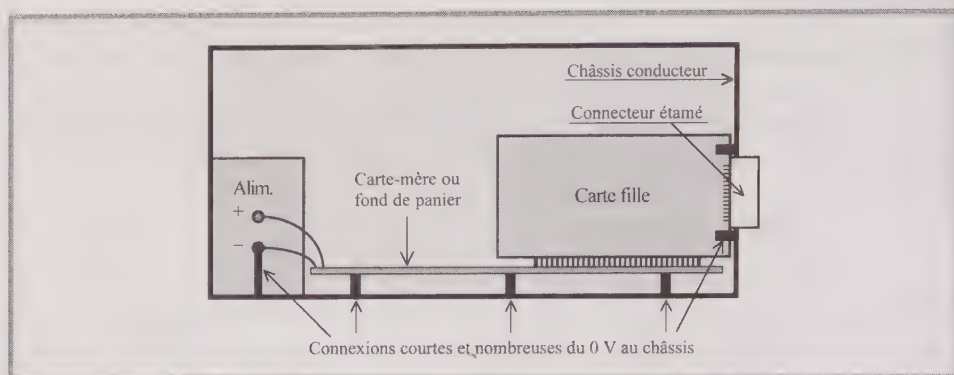


Figure 2.22 – Raccordements multiples de la masse numérique au châssis.

recommandons 100 μF par ampère de courant moyen consommé) et plusieurs condensateurs HF de faible valeur répartis sur toute la surface de la carte, un à proximité de chaque boîtier.

Aucun boîtier ne devrait se trouver implanté à plus de 3 cm du condensateur de découplage le plus proche. Des spécialistes recommandent de ne jamais dépasser un vingtième de la longueur d'onde de la fréquence équivalente la plus élevée (soit 350 MHz pour des transitions de 1 ns, soit $\lambda = 85$ cm).

Ces condensateurs HF (dont la technologie est indifférente) devraient court-circuiter directement les plans de masse et d'alimentation, c'est-à-dire sans ajouter la moindre longueur de piste en série. De même les pattes d'alimentation des boîtiers devraient plonger (directement par trous métallisés) dans les plans de masse et d'alimentation. Mais nous abordons déjà la conception des équipements, or ce manuel vise surtout leur bonne mise en œuvre.

□ Cartes mixtes analogiques/numériques

Pour les cartes mixtes analogiques/numériques, il est impératif de séparer clairement les zones analogique et numérique. Les étages analogiques à bas niveau sont faciles à perturber. Il importe de ne router aucune piste numérique dans la zone analogique à cause des risques de diaphonie.

L'alimentation de la partie analogique doit être apportée de l'extérieur *via* la partie numérique. Elle doit être découplée dans la zone commune aux parties analogique et numérique (en général un convertisseur A/N ou N/A). Cette précaution évite que les courants numériques puissent circuler dans la partie sensible. Le mot d'ordre est simple : « alimenter le propre par le sale ! »

Nous déconseillons de mailler le 0 V analogique en plusieurs points au châssis, surtout si les signaux traités sont de faible amplitude ou si une source de champ magnétique intense (une inductance de puissance par exemple) est proche. En

maillant le 0 V au châssis, on réaliserait des boucles susceptibles de collecter de l'induction magnétique. Quelques millivolts sont inoffensifs en numérique, mais inacceptables pour un circuit analogique sensible.

Nous conseillons de découpler les différentes tensions analogiques au voisinage du convertisseur analogique/numérique (ou N/A) par rapport à la masse de ce dernier et de chaîner à partir de là les alimentations des diverses chaînes analogiques. Le conducteur de 0 V peut être raccordé à la masse du châssis en plusieurs points entre l'alimentation et les circuits analogiques (sauf pour une interface galvaniquement isolée), mais aucune connexion entre le 0 V et le châssis ne devrait être réalisée dans la partie analogique proprement dite.

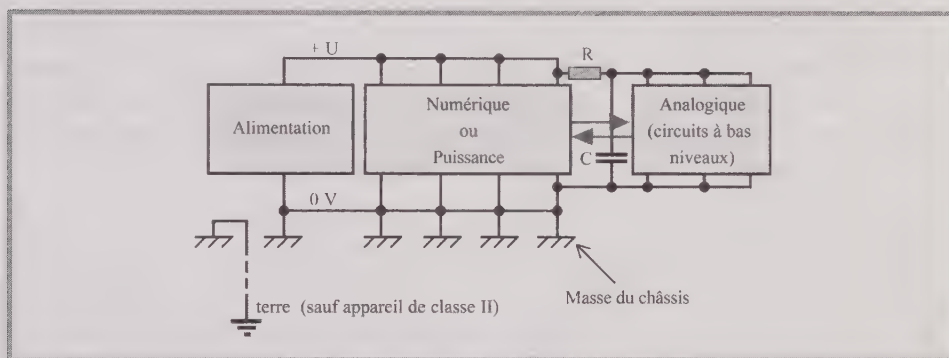


Figure 2.23 – Coordination des 0 V analogique et numérique.

En résumé, il convient à la fois de raccorder le 0 V analogique à la masse numérique (parce que des signaux sont échangés entre ces zones) et à la masse du châssis (contre le couplage capacitif carte à châssis). Ces raccordements au châssis en plusieurs points ne devraient pas être effectués dans la zone analogique à bas niveau au risque d'une remontée possible du bruit de fond.

Toutefois, si le châssis est de bonne qualité (un bloc d'aluminium fraisé dans la masse par exemple), il n'y a aucun risque à y relier en autant de points que possible les 0 V, y compris analogiques à très bas niveau. Tel est le cas des analyseurs de spectre par exemple.

□ Cartes analogiques

Les cartes purement analogiques deviennent rares tant les traitements numériques se généralisent, y compris en audio, vidéo et en instrumentation. Même dans ce cas, il est souhaitable qu'une carte purement analogique bénéficie aussi d'un plan de 0 V. Chaque chaîne d'amplification ou de traitement devrait toujours être alimentée à partir de l'étage le plus bruyant. L'étage le plus bruyant est en général l'amplificateur de sortie, le convertisseur A/N ou N/A, ou un composant mixte analogique/numérique. Toute ligne d'alimentation analogique

devrait ainsi être chaînée de l'étage bruyant jusqu'à l'étage le plus sensible, c'est-à-dire l'étage d'entrée.

L'alimentation des étages à bas niveau devrait être découplée en mode différentiel par un circuit passe-bas de type RC, ou éventuellement LC si sa consommation est importante. La valeur de la résistance est choisie en fonction de la chute de tension tolérable, une petite centaine de millivolts par exemple (environ 1 % de la tension d'alimentation). Son rôle est de limiter les courants injectés dans la ligne de 0 V à la fréquence des ondulations résiduelles de la tension d'alimentation générés par les étages bruyants. Elle filtre en outre le bruit des étages dont la réjection des tensions d'alimentation est mauvaise, les étages à-transistors en classe A par exemple.

Les amplificateurs opérationnels rejettent généralement bien le bruit sur les rails d'alimentation et ne nécessitent pas une fréquence de coupure basse des RC d'alimentation. On peut même se passer de la résistance en ne conservant qu'un condensateur (surtout si la carte dispose d'un plan de 0 V). En analogique, on choisit en analogique une capacité d'environ 1 μF par milliampère de courant moyen consommé.

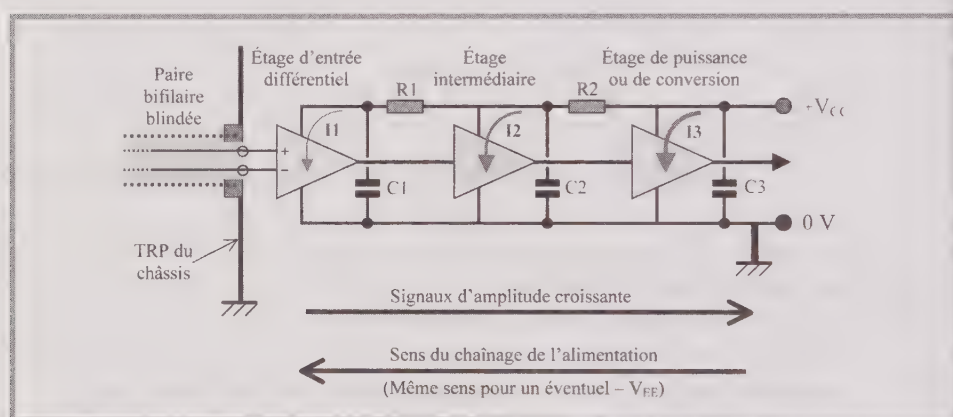


Figure 2.24 – Chaînage d'alimentation et mise à la masse d'une chaîne analogique.

Lorsque la tension d'alimentation est symétrique, $\pm 12\text{ V}$ par exemple, le filtrage de la ligne négative doit être effectué comme pour la ligne positive. Ceci est d'autant plus important que beaucoup d'amplificateurs ont une moins bonne réjection du bruit d'alimentation sur le rail négatif que celui sur le rail positif.

Ce serait une maladresse que de consommer du courant entre une ligne d'alimentation et le 0 V : la résistance de la piste de 0 V traversée par un courant continu risque de décaler des signaux continus. En d'autres termes, lorsque l'on traite des signaux de très faibles amplitudes, il est souhaitable d'alimenter les étages à bas niveau en symétrique, avec une consommation égale sur les rails $+$ et $-$ de l'alimentation afin

de faire circuler le minimum de courant dans le 0 V. Ceci reste vrai même dans le cas d'une carte avec un plan de 0 V (donc de très faible résistance).

Les liaisons de signaux analogiques à grande dynamique, disons avec une résolution meilleure que 0,1 % (ou 10 bits), aussi bien entre cartes que vers l'extérieur, devraient être effectuées en paires différentielles. Les convertisseurs analogiques numériques performants travaillent en différentiel (aussi bien pour les signaux que pour les tops de conversion). Pour les entrées de l'extérieur, les amplificateurs d'instrumentation, grâce à leur forte réjection du mode commun (CMRR) permettent pratiquement de s'affranchir de tous les problèmes de mode commun BF.

Les amplificateurs différentiels remplacent avantageusement les isolements galvaniques tant que l'on peut garantir une tension de mode commun maximale inférieure à quelques volts. Un amplificateur d'instrumentation avec une réjection du mode commun de 120 dB est plus petit, plus fiable et moins coûteux qu'un amplificateur d'isolement. Lorsque les masses sont bien maillées, un isolement galvanique est inutile, un amplificateur différentiel à haute impédance d'entrée et à haute réjection du mode commun suffit, même pour des thermocouples.

Les cartes avec plans de masses ne devraient pas être fendues, surtout si une piste d'une autre couche coupe la fente. Des « fentes cachées » sont fréquentes sous les boîtiers DIL lorsque la précision de la gravure est insuffisante pour laisser une fine languette de cuivre entre deux traversées voisines. Ce n'est pas la quantité de cuivre déposé qui importe, mais la longueur de la plus grande fente. Cet aspect est traité dans le manuel sur les circuits imprimés de Philippe Dunand (chez Dunod éditeur).

Pour conclure sur le problème des masses, illustrons une erreur fréquente par un exemple : cherchons les erreurs du schéma 707.545.2.1 de l'ancienne norme française NF C 15-100 datée de mars 1990. Heureusement, la version de décembre 2002 a été corrigée. Le progrès a du bon, mais les idées reçues ont la vie dure...

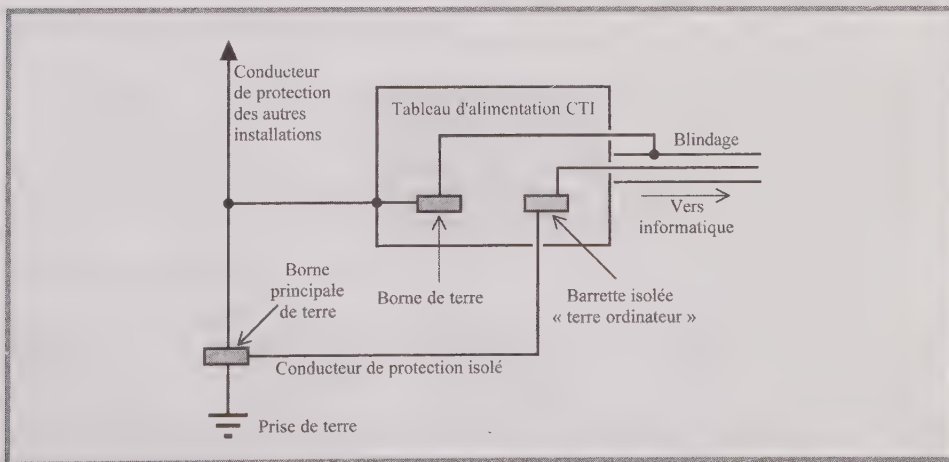


Figure 2.25 – Trouverez-vous toutes les erreurs de ce schéma ?

Le bon raccordement est à la fois bien plus simple et beaucoup moins coûteux. Il évite le stupide câble de terre blindé (on en rencontre encore !). Il évite aussi deux réseaux de terre reliés en étoile autour de la barrette principale de terre. Les malheureux industriels qui ont adopté ce schéma légal mais catastrophique en CEM ont dû revenir à un schéma plus simple et plus sûr. Seul un maillage des masses garantit, par de multiples liaisons supplémentaires, une bonne équipotentialité. Le bon schéma minimal est donné en figure 2.26.

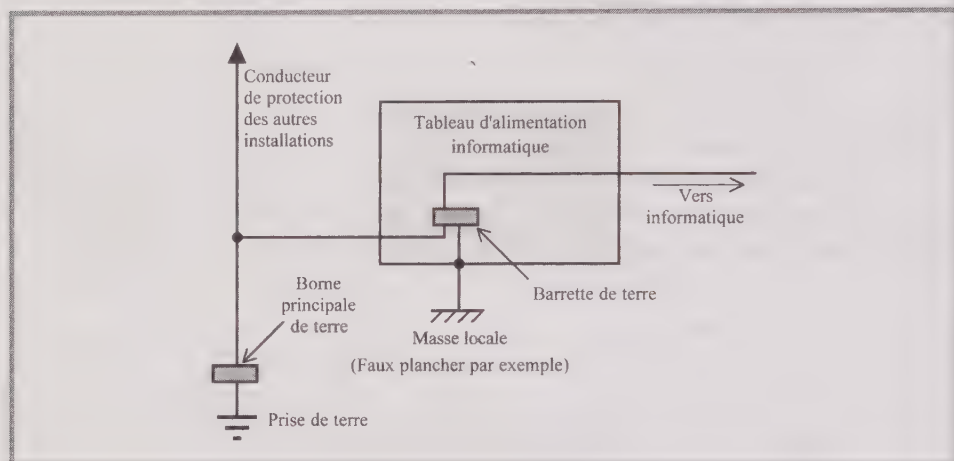


Figure 2.26 – Le meilleur schéma de raccordement à la terre.

4 Conclusion du maillage des masses...

La notion d'équipotentialité est d'autant plus locale que la fréquence est plus élevée. L'équipotentialité n'est obtenue en HF que par la libre circulation des courants de mode commun dans toutes les directions, c'est-à-dire par leur division. Relions systématiquement toutes les structures conductrices entre elles, au plus court, par des contacts directs, si possible en trois dimensions. C'est le moyen le plus économique d'améliorer l'équipotentialité d'un site ou d'un *îlot* (voir chapitre suivant) à toutes les fréquences malgré les inévitables courants dans les masses.

Ne confondons pas boucles **de** masse et boucles **entre** masses. Une boucle entre un câble et la masse est une antenne en mode commun, alors que les boucles entre masses réduisent les différences de potentiel entre les équipements, et dans une certaine mesure les champs électromagnétiques externes.

Longtemps, des installateurs se sont efforcés d'interdire la circulation des courants là où il ne fallait pas, par des raccordements en étoile en particulier. C'est acceptable quand on peut négliger les phénomènes physiques HF : les capacités parasites, les

inductances mutuelles, l'effet d'antenne des câbles, etc. Cela ne correspond plus aux électroniques modernes.

La mise à la masse en étoile ne pouvait avoir un intérêt, et uniquement en basses fréquences, que pour des équipements isolés de tous les autres. Si l'alimentation secteur gagne à être réalisée en étoile, c'est justement parce que les alimentations sont et doivent rester galvaniquement isolées. Comprenons que ce qui est bon pour les conducteurs de phases ne l'est pas pour les masses. Si les conducteurs PE restent nécessaires, ils ne sont plus suffisants.

Il en est de même des masses internes aux baies. Seul un élément relié à aucun autre peut être câblé en étoile. Le seul composant gagnant à être alimenté en étoile à l'alimentation d'un coffret est son ventilateur ! Cette plaisanterie d'un ami résume bien la philosophie de l'équipotentialité : deux circuits qui échangent un signal doivent être référencés au même potentiel. Le 0 V analogique et le 0 V numérique doivent être reliés sur chaque carte mixte, au moins au niveau du convertisseur A/N ou N/A. La règle est simple : alimentons toujours le « propre » (circuits analogiques à bas niveau) *via* le « sale » (circuits numériques ou de puissance).

Seuls les équipements de table, les terminaux de type micro-informatique par exemple, n'ont pas besoin d'être connectés au réseau de masse. Ils doivent en contrepartie être soigneusement blindés. Première conclusion à conserver en mémoire : relier deux masses en étoile, c'est réaliser une impédance commune non négligeable entre elles.

Tout conducteur doit rester aussi proche que possible de son conducteur de retour. Cette règle universelle s'applique quelle que soit la nature des signaux transmis (alimentation, mesure, numérique, tout-ou-rien...). Elle interdit à elle seule le raccordement des 0 V en étoile : entre les branches de l'étoile, la surface de la boucle est importante. Seconde conclusion : relier des masses en étoile, c'est réaliser une grande boucle de masse si les fonctions sont interconnectées.

Aucun point « froid », « de référence » ou « propre » ne devrait servir de référence de potentiel à quelque fonction éloignée que ce soit. En bref, les 0 V numériques doivent être maillés, les 0 V analogiques doivent être chaînés depuis l'étage de sortie jusqu'à l'étage d'entrée à bas niveau. Ceci n'exclut pas un plan de masse pour une carte analogique, même si un plan d'alimentation ne se justifie que sous la partie numérique.

Nous souhaitons montrer nettement la cohérence et l'universalité de la notion d'équipotentialité. Un composant électronique rapide doit être connecté au plus court au plan de masse de sa carte. Cette carte doit être raccordée par de nombreuses broches de 0 V espacées au fond de panier, lui-même doté d'un plan de masse. Le 0 V de ce fond de panier devrait être connecté en plusieurs points à la masse mécanique de son rack. La masse de ce rack devrait être vissée en

plusieurs points à celle de la baie. Cette baie devrait être raccordée, si possible en plusieurs points, à la grille de son îlot. Chaque îlot devrait être relié par des goulottes et d'autres conducteurs aux autres îlots, aux structures métalliques du bâtiment et par des conducteurs de protection à la terre. Les structures métalliques du bâtiment devraient être interconnectées entre elles et reliées à la terre en plusieurs points. Ce réseau de terre du bâtiment devrait être unique et maillé. Le réseau de terre de ce bâtiment devrait être raccordé à celui de tous les autres bâtiments du site. Ouf !

Vive l'équipotentialité !

EFFETS RÉDUCTEURS

Ce chapitre est sans doute le plus important de ce petit manuel. Les effets réducteurs sont une des meilleures clés de la CEM : ils sont efficaces, fiables et peu coûteux. Pour échanger des signaux dans de bonnes conditions, c'est-à-dire en limitant les perturbations collectées par les câbles, il importe de réduire tous les couplages en mode commun.

Outre le couplage par impédance commune qui est réduit à toutes fréquences par le maillage des masses, deux autres couplages sont sévères en mode commun HF : le couplage champ à câble et la diaphonie entre câbles. Réduire ces couplages peut être obtenu grâce aux effets réducteurs. Le routage maîtrisé des câbles devrait faire partie des préoccupations des installateurs.

Une goulotte conductrice, aussi appelée *chemin de câbles* ou *tablette*, et de manière générale toute structure conductrice longitudinale voisine des câbles de bout en bout, peut offrir deux effets favorables :

1. Un meilleur maillage des masses, exposé au chapitre précédent. S'il est coûteux de tirer des conducteurs supplémentaires, il est aisé d'utiliser les goulottes existantes pour mailler les masses. Ce maillage qui joue dès le continu n'est pas un effet réducteur car il n'agit que par réduction de l'impédance entre masses et non comme un blindage. L'effet galvanique du maillage est indépendant de la proximité des câbles victimes avec la masse : il ne fonctionne que par division des courants.
2. Un effet réducteur proprement dit. Cet effet de proximité se cumule avec le précédent. Il s'obtient par la connexion à la masse des équipements interconnectés des structures conductrices supportant les câbles (ou proches de ces câbles). On bénéficie ainsi d'un effet de « surblindage » efficace et pratiquement gratuit. Un effet réducteur opère par mutuelle inductance, et il n'a aucun effet en continu.

L'effet réducteur apporté par une structure de masse se définit par l'amplitude de la perturbation en mode commun supportée par un câble installé loin des masses par rapport à l'amplitude de la perturbation sur le même câble quand il est installé contre la structure conductrice (toutes choses égales par ailleurs).

Par exemple supposons qu'un câble qui supportait une tension de mode commun de 10 V sans effet réducteur ne supporte plus, toutes choses égales par ailleurs, que 2 V quand il est routé près d'un câble de masse; l'effet réducteur de cette masse est alors d'un facteur 5.

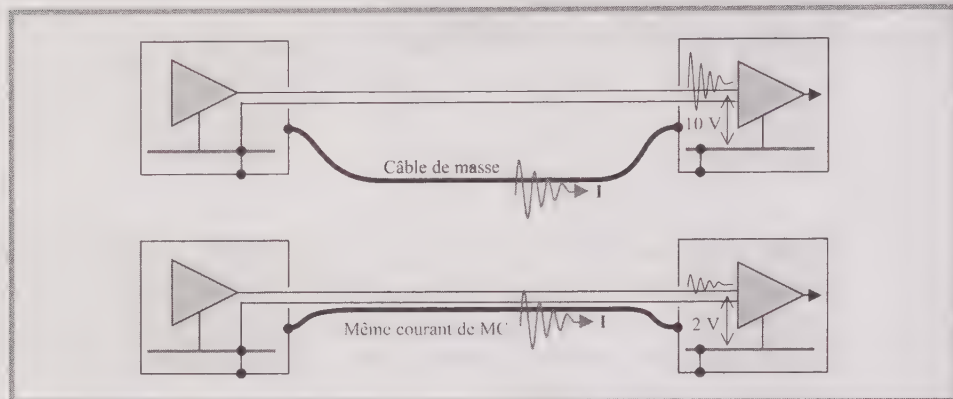


Figure 3.1 – Exemple d'effet réducteur d'un facteur 5.

Gardons à l'esprit que tout câble est une antenne efficace et à large bande, surtout dans la gamme des ondes métriques. Pour réduire l'efficacité de cette antenne, il est simple, efficace et peu coûteux de plaquer le câble sur toute sa longueur contre une structure de masse : câblette de masse, goulotte, tôle... Plaquer un câble contre une structure conductrice ne réduit pas le courant qui y circule, mais la perturbation collectée par ce câble diminue « par effet d'ombre ».

L'effet réducteur s'explique par aisément par l'électromagnétisme. Une perturbation électromagnétique lance un courant dans la masse. Selon la loi de Lenz, ce courant produit un champ magnétique qui tend à s'opposer au phénomène qui lui donne naissance. Un câble victime installé près de la masse est soumis à la fois à la perturbation électromagnétique originelle et au champ réactif en opposition du courant dans la masse. La somme des deux est une perturbation résiduelle plus faible que la perturbation originelle. Un câble plaqué de bout en bout contre une masse est moins exposé aux perturbations de mode commun. Réciproquement, l'effet réducteur est identique en émission : un câble contre une masse rayonne peu.

Cet effet est facile à mettre en équation par l'inductance mutuelle M entre le câble victime et le conducteur de masse. Seules la résistance de la masse R_m (en continu) et l'inductance de fuite L_m (non couplée au câble protégé) en série avec le conducteur de masse composent une impédance commune et limitent l'effet réducteur. R_m et L_m transforment le courant de masse en tension non compensée par la mutuelle. Seule cette tension $(R_m + j2\pi FL_m)I$ est subie en mode commun par le câble victime. Pour obtenir un grand effet réducteur, la mutuelle M doit avoir une impédance $j2\pi FM$ très supérieure à l'impédance commune $R_m + j2\pi FL_m$ (figure 3.2).

L'effet de M est d'induire dans le câble protégé une tension en opposition avec la tension globale de mode commun. Une structure de masse longitudinale agit comme un transformateur de rapport voisin de 1 : 1 dans le sens de la longueur. Comme un transformateur, son effet est nul en continu. Comme pour un transformateur, le rapport de transformation est d'autant plus proche de 1 : 1 que l'inductance de fuite L_m est faible devant l'inductance magnétisante M (l'inductance mutuelle).

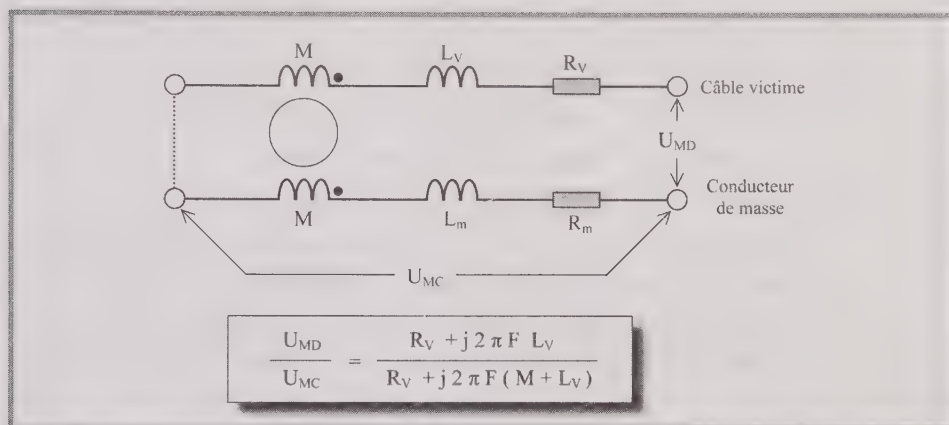


Figure 3.2 – Schéma équivalent et équation de l'effet réducteur.

Application 3.1 : effet réducteur d'un câble de masse

On installe un câble de signal (victime) contre une câblette en cuivre d'une section de 35 mm². Sachant que la mutuelle inductance entre les câbles est $M = 0,8 \mu\text{H/m}$ et que l'inductance de fuite du câble de masse est $L_m = 0,2 \mu\text{H/m}$, tracer l'effet réducteur en tension (U_{MC}/U_V) en fonction de la fréquence.

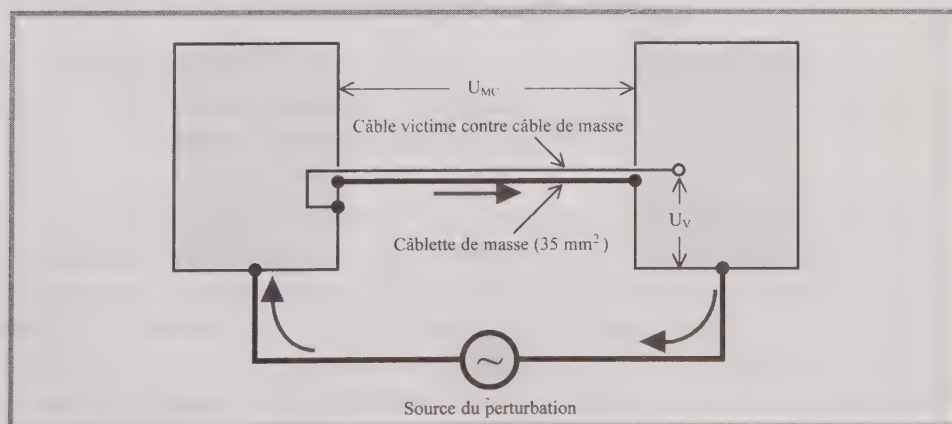


Figure 3.3 – Exemple de configuration d'effet réducteur.

Solution

La résistance linéique (de 1 m) vaut :

$$R_m = 17 \times 10^{-3} / S = 0,5 \cdot 10^{-3} \Omega / m$$

Par ailleurs :

$$L_m = 0,2 \times 10^{-6} \text{ H/m et } M = 0,8 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$U_{MC} / U_V = [R_m + j2\pi F(L_m + M)] / [R + j2\pi F L_m]$$

$$U_{MC} / U_V = [500 + j2\pi F(0,2 + 0,8) \times 10^{-6}] / [500 + j2\pi F \times 0,2 \times 10^{-6}]$$

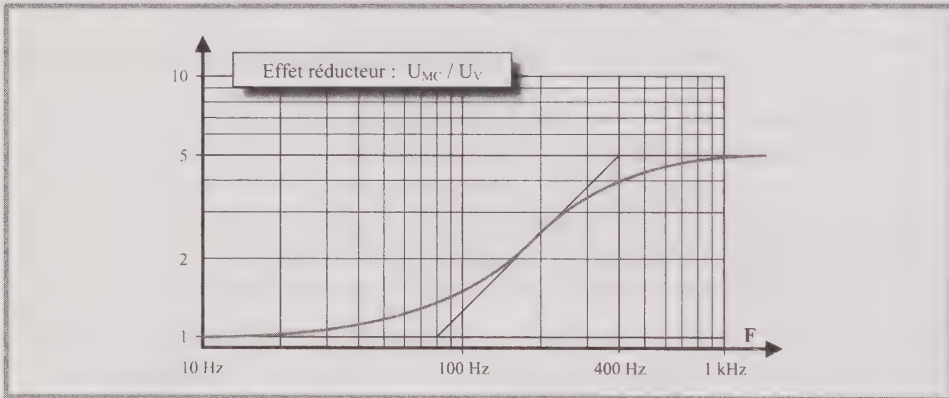
La fréquence de coupure du numérateur F_N vaut :

$$F_N = R_m / 2\pi(L_m + M) = 80 \text{ Hz}$$

La fréquence de coupure du dénominateur F_D vaut :

$$F_D = R_m / 2\pi L_m = 400 \text{ Hz}$$

Le tracé de l'effet réducteur est alors simple : il vaut 1 du continu jusqu'à 80 Hz, puis s'améliore comme la fréquence jusqu'à 400 Hz, fréquence à partir de laquelle il devient indépendant de la fréquence, égal à 5. Nous constatons qu'un effet réducteur significatif peut apparaître bien avant le domaine des hautes fréquences.



**Figure 3.4 – Effet réducteur
d'une câblette de terre de 35 mm².**

L'effet réducteur ne prend pas en compte l'amélioration de l'équipotentialité en continu : il se contente de chiffrer l'effet de blindage par proximité. Notons que l'effet réducteur est indépendant de la résistance R_V du câble victime et de son inductance propre L_V ; il dépend en revanche de la proximité entre le câble victime et le conducteur de masse (plus ils sont proches, plus L_m est petite).

Puisque le numérateur et le dénominateur sont proportionnels à la longueur des câbles, l'effet réducteur est indépendant des longueurs. Par linéarité, l'effet réducteur est indépendant de l'amplitude du courant de mode commun. Bien entendu, pour un

courant perturbateur donné, plus les câbles seront longs, plus forte sera la tension de mode commun U_{MC} , et aussi plus forte sera la tension U_V .

En HF, le maillage des masses peut devenir insuffisant. Les effets réducteurs interviennent alors à propos pour réduire les perturbations électromagnétiques. Pour une paire bifilaire, l'effet réducteur en HF vaut aussi un facteur 4 ou 5 mais la résistance des fils étant supérieure à celle du câble de l'exemple ci-dessus, la fréquence à partir de laquelle l'effet réducteur devient maximal est plus élevée : vers 20 kHz pour une section de 1 mm².

Pour améliorer l'effet réducteur en haute fréquence, on peut jouer sur deux paramètres :

- augmenter la mutuelle inductance entre le câble victime et le conducteur de masse;
- réduire l'inductance de fuite du conducteur de masse.

L'augmentation de la mutuelle inductance s'obtient par exemple par l'ajout de ferrite autour de tous les conducteurs du câble victime (y compris le conducteur de masse qui fournit l'effet réducteur). Une inductance de mode commun, contrairement aux filtres fil par fil, n'altère pas les signaux transmis. Les tores de ferrite ajoutés sur des câbles informatiques réduisent classiquement le rayonnement de ces câbles de l'ordre de 5 dB dans la bande VHF (de 30 MHz à 300 MHz).

Une inductance mutuelle est défavorable entre deux câbles signaux voisins car elle provoque de la diaphonie inductive. Mais elle peut aussi être bénéfique quand elle permet des effets réducteurs. En d'autres termes, l'inductance mutuelle entre deux câbles signaux est défavorable, mais celle qui existe entre un câble et la masse proche est très favorable. La réduction des perturbations de mode commun par mutuelle inductance est le principe de l'efficacité des câbles blindés.

La réduction de l'inductance de fuite s'obtient par le choix d'une structure de masse plus proche ou plus enveloppante. Ainsi, un câble posé dans une goulotte ou, encore mieux, un câble blindé avec son écran enveloppant permettent d'atteindre des effets réducteurs considérables en HF.

Inversement, il est facile de ruiner un effet réducteur : il suffit d'augmenter l'inductance de fuite, par exemple par des connexions inductives (sans mutuelle) de masse. Une inductance de fuite en série avec le conducteur enveloppant ruine son effet réducteur en HF. Cette dégradation n'est sensible qu'aux fréquences élevées. Elle limite les performances une goulotte au-delà de quelques dizaines de mégahertz. Ainsi, un câble blindé ordinaire d'une longueur de 10 m a son effet réducteur divisé d'un facteur 2 au-delà de 3 MHz par un fil de reprise de 3 cm de long à l'une des extrémités.

La pose de câbles éloignés de structures conductrices longitudinales de masse n'apporte aucun effet réducteur. Les câbles sont alors totalement exposés aux champs électromagnétiques, aux tensions longitudinales dues à l'imparfaite équipotentialité du site, et à la diaphonie de mode commun avec des câbles voisins. Évitions autant que faire se peut les modes de pose sans effet réducteur.

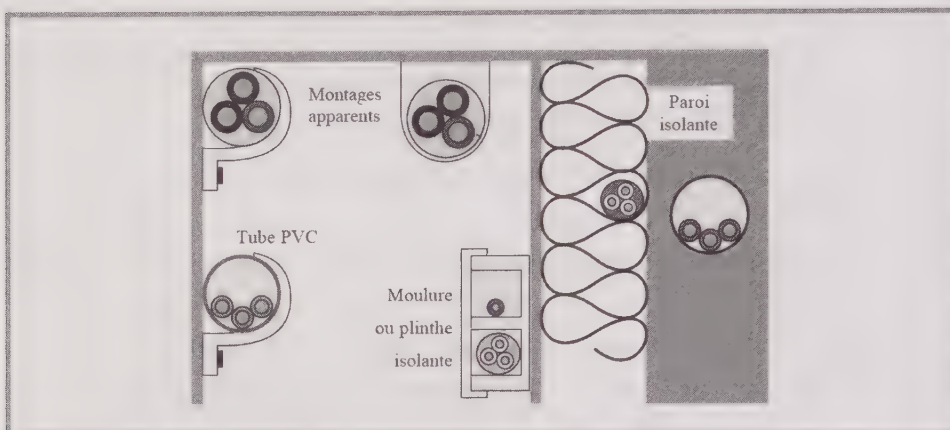


Figure 3.5 – Mode de pose sans effet réducteur (à éviter).

Même si la terre n'est pas un conducteur parfait, c'est le moins que l'on puisse dire, l'effet réducteur apporté par le sol est réel. Il faudrait éviter de tirer des lignes aériennes, surtout pour transmettre de faibles signaux. Un câble enterré ou immergé est mieux protégé contre les perturbations HF. Nous expliquerons cet effet intéressant à la fin du paragraphe suivant.

1 Pose avec effet réducteur

Une fois réalisé le réseau de masse maillé (donc aussi équipotentiel que possible) et y avoir raccordé les châssis métalliques de toutes les armoires et baies, il faut alimenter et interconnecter les équipements. Ce sont les courants de mode commun sur les câbles qui provoquent les principaux dysfonctionnements. Il serait sans doute difficile et coûteux de blinder toutes les liaisons d'un site, mais il est souvent facile de router la plupart des câbles longs avec effet réducteur.

Pour bénéficier d'un effet réducteur, il suffit de plaquer les câbles à protéger de bout en bout contre une structure longitudinale de masse. Le plus sûr est de poser les câbles sur supports métalliques. Ces supports doivent être soigneusement raccordés électriquement entre eux et aux châssis des baies. Le mieux est un contact direct, tôle sur tôle, en évitant les reprises uniquement par câblette de cuivre ou par tresse.

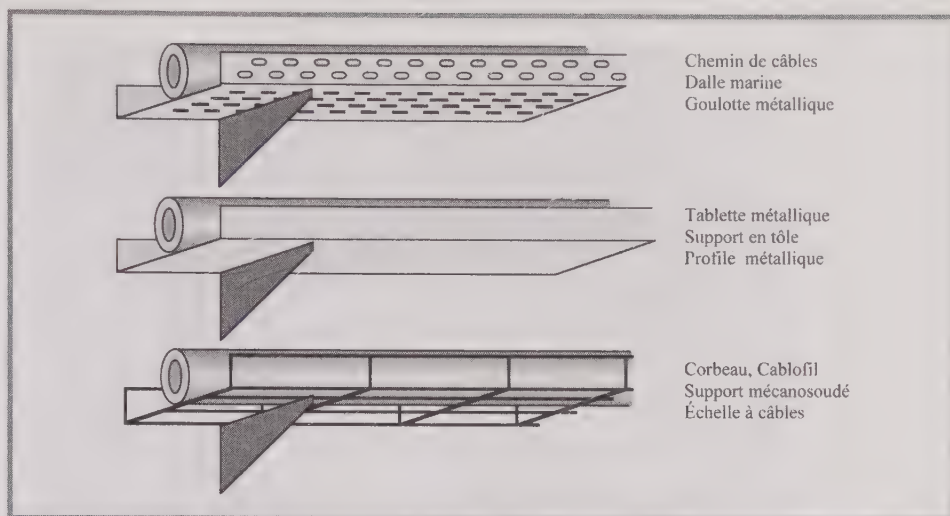


Figure 3.6 – Modes de pose avec effet réducteur (à préférer).

■ Goulottes conductrices

Les goulottes conductrices, les tablettes en acier galvanisé, les chemins de câbles en échelle, les corbeaux et autres supports conducteurs longitudinaux peuvent constituer un blindage efficace vis-à-vis des perturbations électromagnétiques pour les câbles qu'ils contiennent.

Les contacts électriques des tronçons de chemins de câbles doivent être assurés de bout en bout : les courants de masse doivent circuler librement, parallèlement aux câbles. Une seule interruption dans la continuité électrique et l'effet réducteur disparaît ! Cette règle reste valable pour les dérivations en Y entre tronçons. Il faudrait éviter les reprises de masse par un câble « vert et jaune » (ou même en plat) à la jonction entre deux goulottes.

L'importance du respect, surtout au-delà de 10 MHz, de la recommandation de la figure 3.8 est si peu intuitive que nous avons toujours les plus grandes peines à la faire respecter par les installateurs.

Pour raccorder les chemins de câbles bout à bout et à la masse des bâtis, nous recommandons un contact direct tôle sur tôle par vis ou par soudure. Ce sont deux moyens pour garantir la qualité du contact électrique dans le temps, avec une inductance de fuite minimale.

Répetons-le, une continuité électrique de bout en bout et la mise à la masse correcte aux extrémités entre la goulotte et la masse de l'armoire permettent l'effet réducteur. Nous conseillons aussi de raccorder périodiquement les chemins

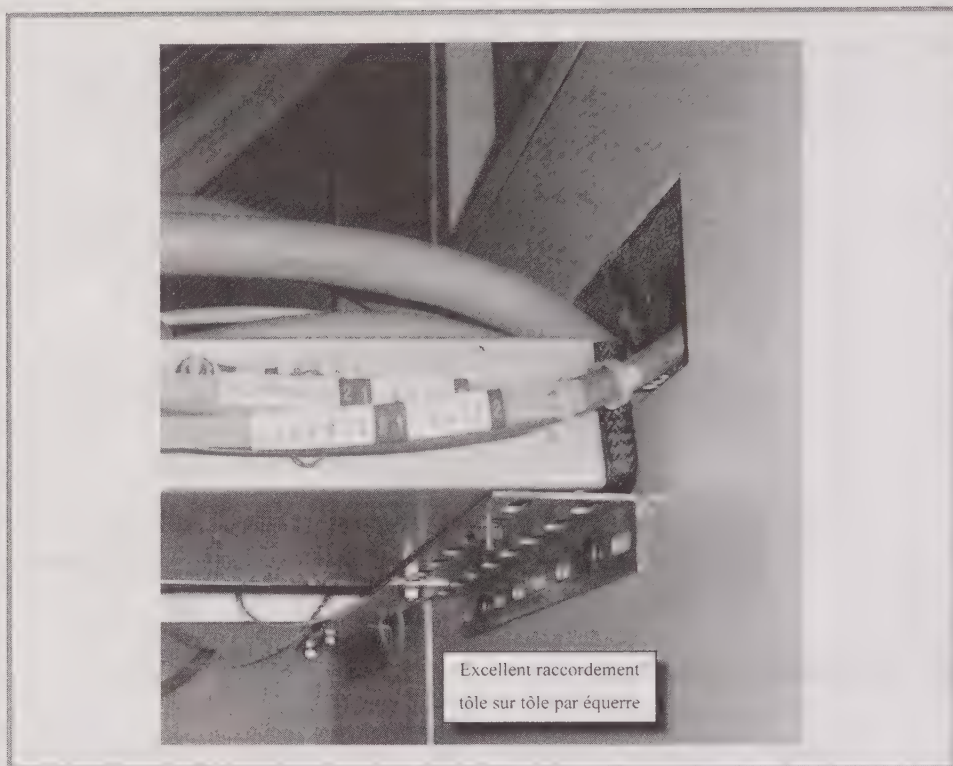


Figure 3.7 – Connexions enveloppantes de bout en bout.

de câbles aux structures conductrices du bâtiment. L'effet réducteur n'est pas diminué par la multiplication des contacts entre masses (l'inductance de fuite n'augmente pas) et le maillage des masses en BF en est amélioré.

Dans la gamme 100 kHz à 100 MHz, une goulotte type marine (avec trous oblongs), peut apporter un effet réducteur meilleur qu'un facteur 30 si sa mise en œuvre est rigoureuse, c'est-à-dire avec contact tôle sur tôle de bout en bout. Entre 1 et 30 MHz, l'effet réducteur peut même avoisiner un facteur 100. Si la connexion en extrémité entre la goulotte est réalisée par une tresse de 10 cm, l'effet réducteur chute à un facteur 10 environ. Cet effet reste suffisant pour corriger la plupart des problèmes de mode commun, mais nous sentons la sensibilité de l'effet réducteur à l'impédance de ses connexions (c'est-à-dire à leur inductance de fuite). Enfin si la connexion de la goulotte à la masse utilise un câble de 1 m, l'effet réducteur disparaît complètement.

Il faudrait éviter de mélanger dans la même goulotte des câbles sales en mode commun et des câbles sensibles. S'il est possible de parler de « *goulottes propres* » et de « *goulottes sales* », ces qualificatifs ne s'appliquent que pour l'intérieur des goulottes. De l'extérieur, elles sont toutes à considérer comme des structures de

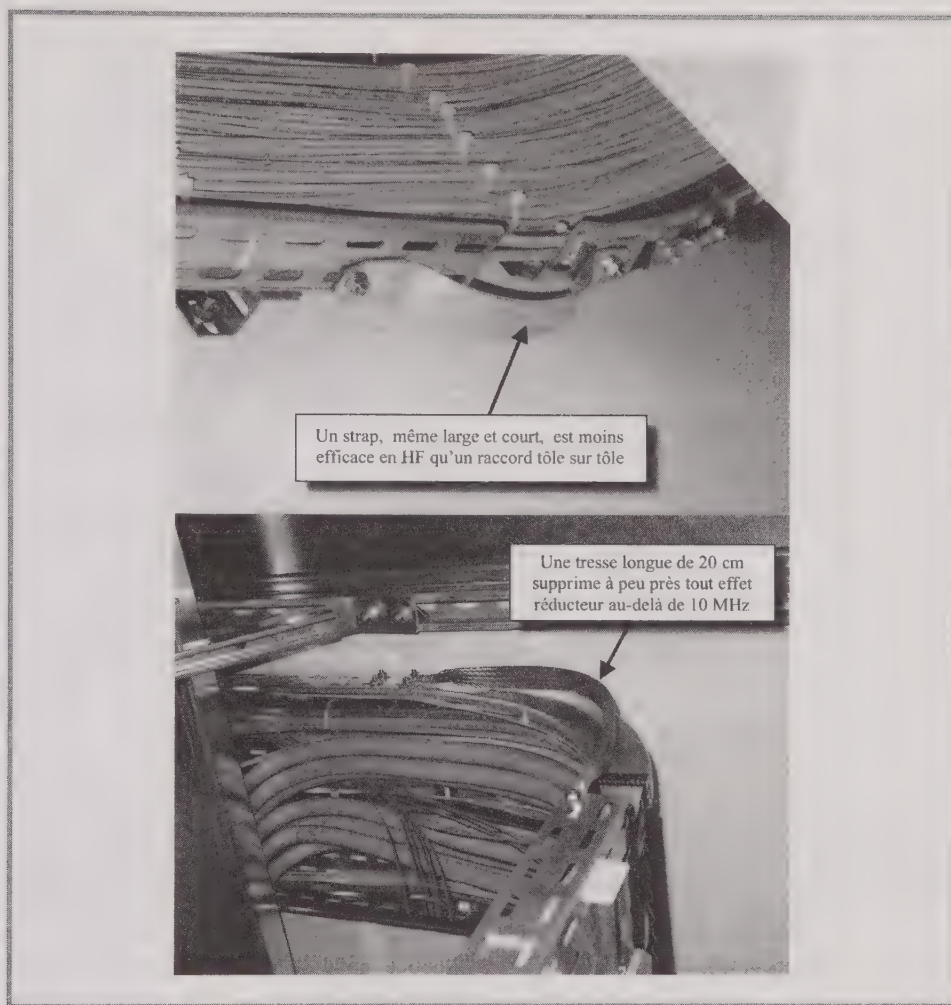


Figure 3.8 – Une liaison par conducteur longiligne réduit l'effet réducteur en HF.

masse comme les autres. Ainsi il est toujours bon de mailler les chemins de câbles entre eux, quelle que soit la nature des câbles protégés. De même, il est possible d'installer sans risque une goulotte au contact d'un équipement perturbateur à condition que cette goulotte soit correctement mise en œuvre.

Retenons que l'important, plus que le type de goulotte, est le contact des chemins de câbles entre eux de bout en bout (tôle sur tôle, figure 3.10) et à la masse des baies. Nous constatons que les goulottes utilisées dans l'industrie n'apportent souvent aucun effet réducteur à cause de leur mauvaise continuité en HF. Inutile de préciser que les goulottes isolantes n'améliorent pas l'équipotentialité en continu et n'apportent aucun effet réducteur.

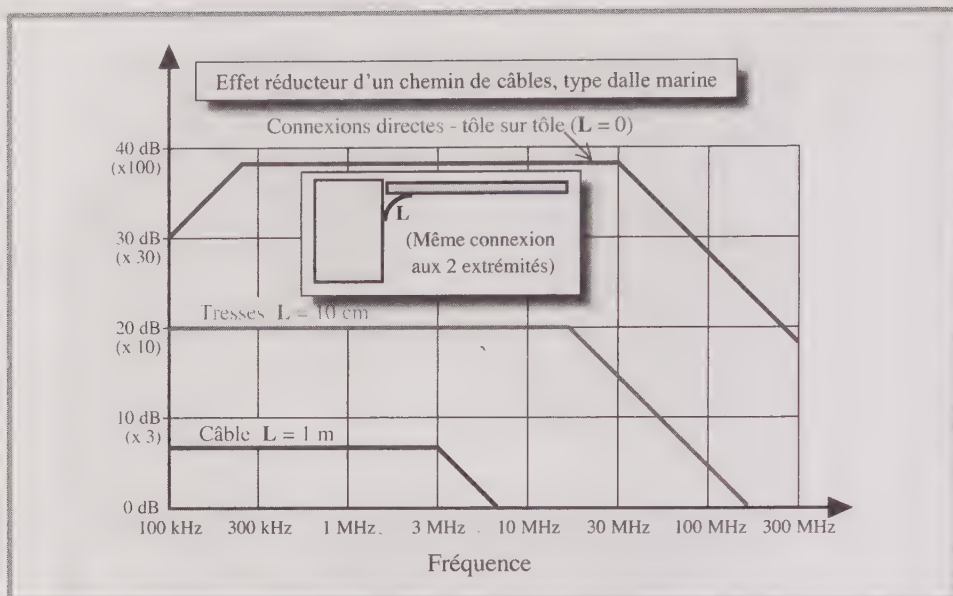


Figure 3.9 – Effet réducteur d'une goulotte typique selon la longueur des connexions.

Il est souhaitable de fermer une goulotte par son capot (couvercle conducteur). Plutôt que de visser les capots, ce qui est malcommode, les poser sur les goulottes en quinconce sur les raccords est suffisant. L'effet réducteur supplémentaire obtenu par l'ajout d'un couvercle contre les perturbations extérieures, sans être extraordinaire, n'est pas négligeable. Il est de l'ordre d'un facteur 2 si les connexions aux extrémités sont correctes : on peut ainsi obtenir un effet réducteur d'un facteur 100 jusqu'à 100 MHz. Si les goulottes ne sont pas boulonnées les unes aux autres, ajouter un couvercle n'apporte rien.

Attention, si un câble « sale » (supportant un courant de mode commun HF) est installé dans une goulotte, l'ajout d'un capot empire la diaphonie avec les câbles voisins. Le phénomène est simple à comprendre : la diaphonie dans une goulotte est principalement inductive, c'est-à-dire provoquée par le champ magnétique HF tangentiel à la tôle. Ce champ H est égal au courant qui le crée divisé par la longueur de la ligne de champ. Pour un courant perturbateur donné, un couvercle réduit la longueur de la ligne de champ magnétique, donc augmente le champ magnétique. La diaphonie inductive peut ainsi être augmentée d'un facteur 2 environ.

Deux points faibles récurrents des chemins de câbles sont les changements de direction et les traversées de cloison. Trop souvent, les chemins de câbles sont interrompus ou repris par des tresses au lieu de contacts tôle sur tôle. La norme EN 50174-4, sans doute sévère pour le Cablofil (qui offre un effet réducteur non négligeable) donne d'excellents conseils de mise en œuvre.

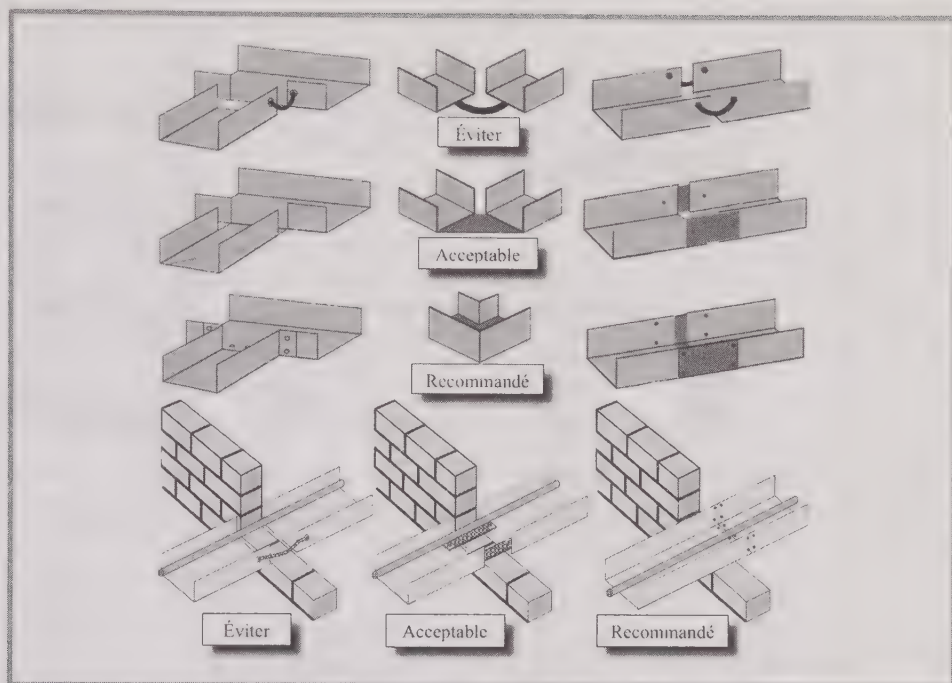


Figure 3.10 – Goulottes : changements de direction et traversées de cloisons.

Il n'est pas toujours possible d'utiliser deux chemins de câbles différents pour des câbles incompatibles (un pour câbles « sales » et l'autre pour les sensibles). Dans ce cas, la répartition maîtrisée des câbles dans la goulotte est nécessaire.

Dans une même goulotte, afin de limiter les problèmes de diaphonie, on devrait éviter de tirer côte à côte des câbles de petits signaux et des câbles de puissance, surtout ceux des convertisseurs statiques (des variateurs de vitesse en particulier). L'idéal serait en environnement industriel de disposer de trois types de goulottes nettement différenciées : celles pour les mesures, celles pour le contrôle-commande et celles pour les câbles de puissance.

Les recommandations sur la séparation des câbles ne sont simples à respecter que si elles sont respectées dès la pose du premier câble : il est long, donc coûteux, de déplacer. En outre, un tel déplacement, contrairement au maillage des masses ou à l'amélioration des effets réducteurs, ne peut pas être effectué en service.

Pour la même raison, on devrait s'efforcer de plaquer les câbles les plus sensibles directement contre la tôle. Évitions de les empiler de façon aléatoire sur d'autres câbles, ou le bon fonctionnement sera également aléatoire. Résoudre un problème de CEM tient souvent à peu de chose. C'est ainsi que les spécialistes peuvent passer pour des magiciens, sinon des sorciers !

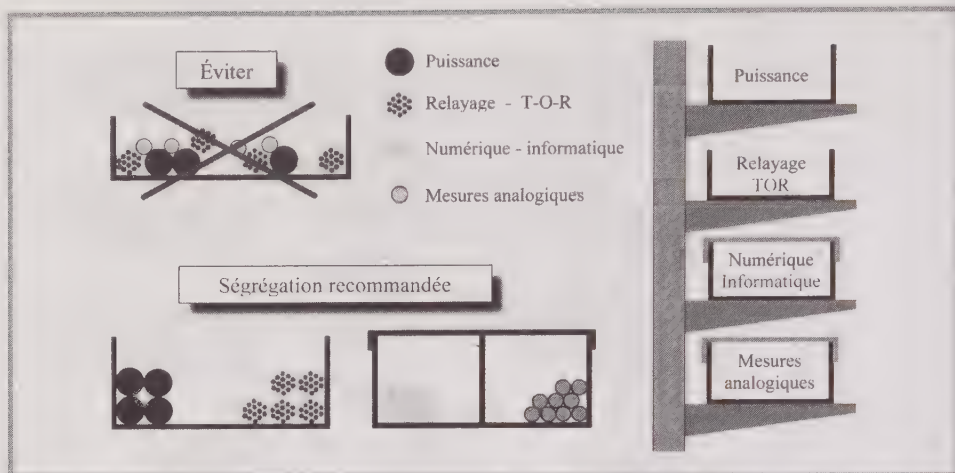


Figure 3.11 – Maîtrise de la répartition des câbles.

Des règles d'installation TEMPEST de l'US Air Force, avec ségrégation des chemins de câbles « rouges » et « noirs », dont l'instruction 33-105 de 2003, sont disponibles gratuitement à l'adresse : www.e-publishing.af.mil. Ce document renvoie à d'autres normes du domaine public.

Une structure conductrice concave enveloppante assure un meilleur effet réducteur qu'une structure convexe ou la proximité d'une arête saillante. Lorsqu'il n'est pas possible de réserver des goulottes différentes pour les câbles sales et les câbles sensibles, nous conseillons au moins d'éloigner ces deux types de câbles en les fixant par des colliers rilsan dans les coins opposés de la goulotte.

Quand il est impossible d'utiliser des chemins de câbles différents pour deux câbles incompatibles, il est nécessaire de les poser dans les angles opposés. Deux câbles éloignés, à plat contre la tôle et dans l'ombre électromagnétique d'angles opposés se couplent peu en mode commun (comme dans la goulotte du bas à gauche de la figure 3.11). Il en est de même pour les câbles posés le long d'une poutre métallique (U, I ou cornières).

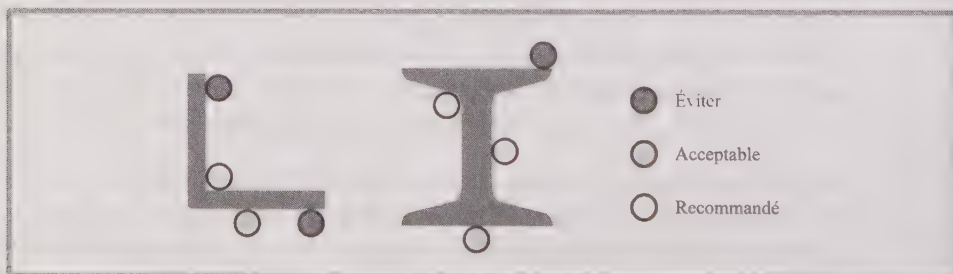


Figure 3.12 – La position du câble influe sur l'effet réducteur d'une structure.

■ Autres effets réducteurs

Toute structure conductrice très proche d'un câble et raccordée aux masses aux extrémités (au moins) apporte un effet réducteur.

Nous avons vu dans l'application ci-dessus qu'un conducteur de masse (un fil de cuivre de 35 mm² dans notre exemple) apporte un effet réducteur voisin de 5 s'il reste de bout en bout contre le câble protégé. Il est ainsi souhaitable de tirer entre bâtiments les câbles signaux dans la même galerie ou dans le même tube que le câble d'interconnexion des terres. Ceci reste vrai même si les terres sont interconnectées par ailleurs. Il est toujours possible de doubler un câble sensible par un câble de masse appelé *câble d'accompagnement*.

Un plan de masse large et homogène, une tôle par exemple, présente un effet réducteur meilleur qu'un simple câble d'accompagnement. L'impédance d'un plan métallique étant très faible, seul l'effet des champs et non l'impédance commune reste à craindre. Contre les champs, l'effet réducteur R (sans dimension) d'un plan de masse est d'autant meilleur que le câble à protéger est proche.

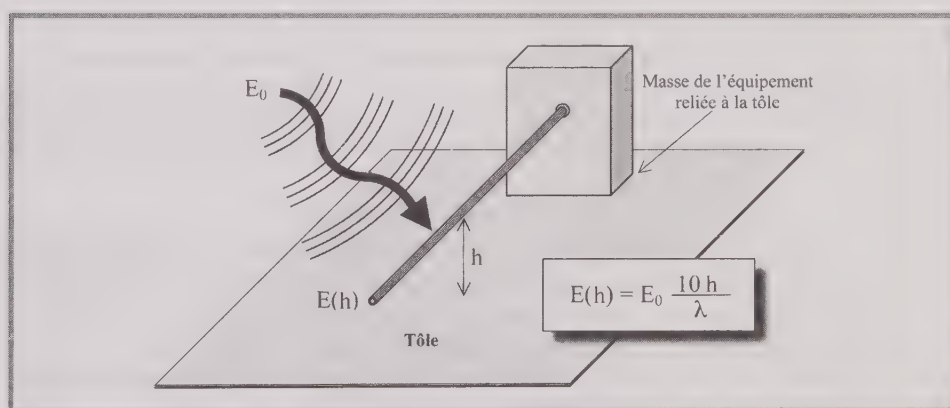


Figure 3.13 – Effet réducteur d'un plan de masse.

Cet effet atteint en HF la valeur :

$$R \approx \frac{\lambda}{10 h}$$

Avec :

λ : longueur d'onde du champ perturbateur, en mètres (m),

h : hauteur du centre du câble par rapport à la tôle, en mètres (m).

Ainsi, un câble de 2 cm de rayon posé tout contre une tôle de masse bénéficie à 100 MHz ($\lambda = 3$ m) d'un effet réducteur de $3/10 \times 0,02$, soit un facteur 15.

Si la hauteur par rapport au conducteur de masse dépasse un dixième de la longueur d'onde, l'effet réducteur disparaît; il peut même y avoir addition en amplitude et en phase du champ incident et du champ réfléchi. En éloignant un câble de la masse, l'addition de la réflexion au champ incident peut ainsi doubler l'agression.

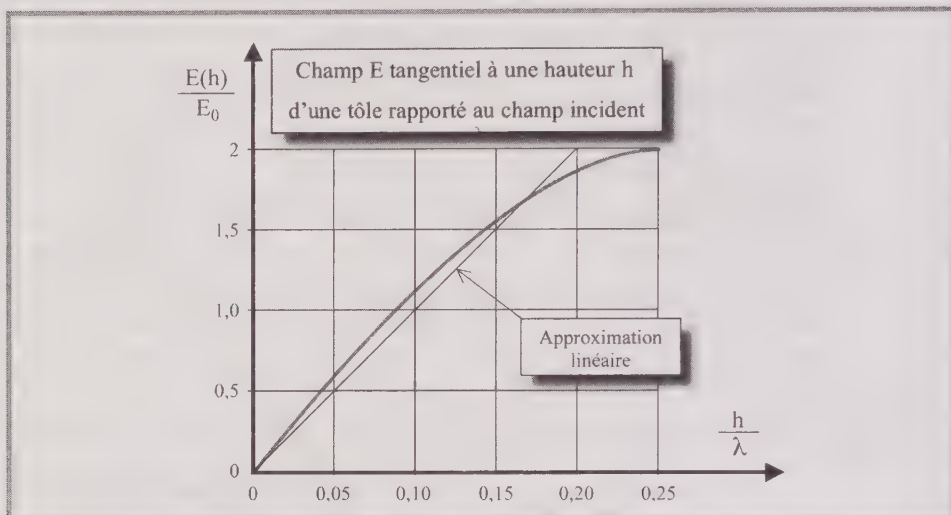


Figure 3.14 – Effet réducteur d'une tôle selon la hauteur h du câble.

Les effets réducteurs sont faciles à obtenir aux fréquences basses, mais à partir d'une centaine de mégahertz, ils deviennent délicats à garantir. Seul du soin dans l'installation peut permettre d'espérer des effets réducteurs jusqu'à 300 MHz. Par chance, au-delà de 300 MHz, le couplage des champs sur les câbles diminue, ce qui compense assez bien la disparition des effets réducteurs.

Un câble enterré supportant un courant de mode commun alternatif rayonne dans la terre un champ magnétique. Celui-ci fait circuler dans le sol des courants induits : des courants de (Léon) Foucault qui y déposent de la chaleur. Ainsi, les courants HF de mode commun sont assez rapidement amortis. Cet effet ne fonctionne pas exactement comme l'effet réducteur classique (c'est-à-dire comme un transformateur en court-circuit) mais par amortissement (comme un transformateur chargé au secondaire par une résistance). Même un câble simplement posé sur le sol (non enterré) est amorti.

L'amortissement d'un câble enterré ou immergé a l'avantage de ne pas résonner et, contrairement à la proximité d'une masse, cet effet s'améliore avec la fréquence. La dégradation en chaleur des courants de mode commun n'est sensible aux fréquences basses, disons en dessous de 100 kHz, que pour de grandes longueurs enterrées. Cet effet réducteur est pratiquement négligeable aux fréquences industrielles, quelles que soient la nature du sol et la longueur des câbles.

L'effet d'un enfouissement est négligeable à toutes fréquences, pour les signaux utiles (en MD).

Les câbles blindés ont un effet réducteur considérable en HF à condition que leurs écrans soient repris directement à la masse à chaque extrémité. La connexion de l'écran à la tôle de référence de potentiel (TRP) doit s'effectuer sans inductance en série, c'est-à-dire sans fil de reprise, souvent appelé *queue-de-cochon*. Le fil de reprise d'un écran de câble devrait être remplacé, ou du moins shunté, par un contact aussi périphérique que possible.

2 Routage des câbles

De manière générale, les liaisons de signaux entre équipements sont plus vulnérables aux perturbations de mode commun que les lignes d'alimentation. Elles sont aussi moins commodes à filtrer. Une bonne équipotentialité des masses améliore beaucoup l'immunité des liaisons filaires. De multiples boucles entre masses découplent les signaux des courants inévitables qui circulent dans la masse. Inversement, sans effet réducteur, les câbles se comportent comme des antennes de réception involontaires et convertissent les perturbations HF (champs électromagnétiques ou diaphonies avec un câble bruyant) en courants de mode commun.

■ Câbles externes

Aux fréquences élevées, les câbles qui relient un bâtiment à l'extérieur ne sont guère différents des câbles internes au site. Les différences entre câbles internes et externes ne sont sensibles que par l'énergie des perturbations, c'est-à-dire en BF. La durée d'une impulsion d'un câble externe peut atteindre une milliseconde. En HF ce sont surtout les derniers mètres exposés des câbles qui collectent les perturbations.

À la fréquence secteur, les câbles externes sont soumis à des tensions de mode commun qui peuvent atteindre en BF quelques centaines de volts. Leur isolement galvanique est donc nécessaire, à un bout au moins. En cas de foudre, des surtensions de plusieurs dizaines de kilovolts sont probables; des parafoudres sont donc nécessaires. Une alternative qui résout tous les problèmes de surtensions est de remplacer les câbles de signaux externes par des fibres optiques.

Entre bâtiments séparés, même avec des réseaux de terre interconnectés, une différence de potentiel de plusieurs dizaines de volts est possible, en particulier durant le temps d'élimination d'un défaut d'isolement franc. Si les terres sont séparées, c'est bien pire. Toutes les liaisons électriques externes à un bâtiment

devraient être galvaniquement isolées et protégées par des parafoudres; c'est nécessaire pour les câbles très longs d'énergie et de télécommunications.

Rappelons que, pour raison évidente de sécurité, toute canalisation conductrice doit être raccordée à la terre en entrée de bâtiment. Les gaines des câbles blindés externes, ou leurs armures, sont considérées comme des masses; elles aussi doivent être reliées à la barrette de terre la plus proche de leur point d'entrée.

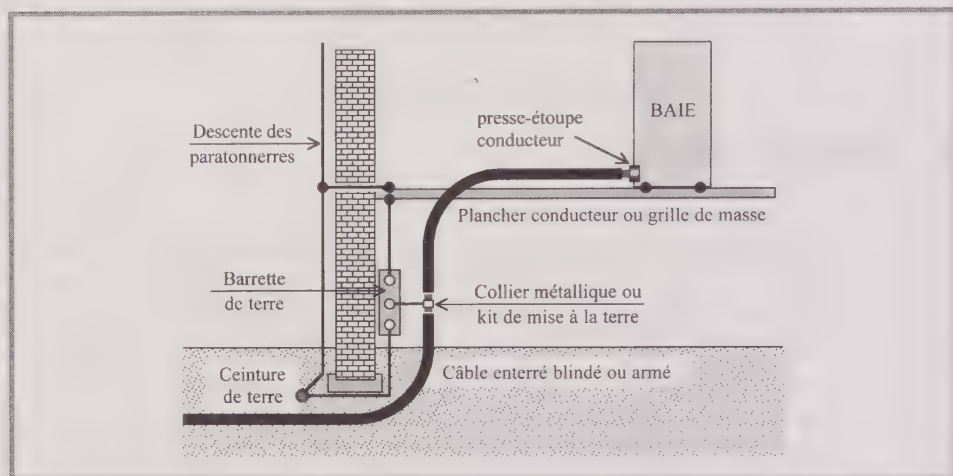


Figure 3.15 – Pénétration d'un câble blindé dans un bâtiment.

La mise à la terre d'un câble externe en entrée du bâtiment est une précaution minimale. Des limiteurs de surtensions (des parafoudres) doivent être ajoutés pour protéger les équipements (voir tome 3).

Un point d'entrée privilégié du courant de foudre est le « feeder » d'une antenne. Par nature une antenne doit être haute et dégagée. Elle peut jouer le rôle de paratonnerre, à une différence près : un câble d'antenne entre directement sur une baie, au cœur des électroniques. Il convient de dériver le maximum de courant de foudre supporté par un câble d'antenne à la terre. En mode différentiel, un *coax-stop* (éclateur entre l'âme et la masse du feeder) installé à quelques mètres de la baie protège ses circuits.

La gaine de cuivre des feeders d'antenne devrait être connectée, au minimum, au réseau de masse au voisinage de la traversée du mur extérieur, au point d'entrée dans le pylône et au voisinage du connecteur de l'antenne. Bien entendu, le pylône doit lui-même être relié à la même terre que celle du bâtiment. Le chemin de câbles métallique supportant le feeder devrait être mis à la masse aux mêmes points que le feeder lui-même et, si possible, en des points intermédiaires. Si ces conseils sont suivis, un simple *coax-stop* suffit à durcir le système radio contre un choc de foudre direct.

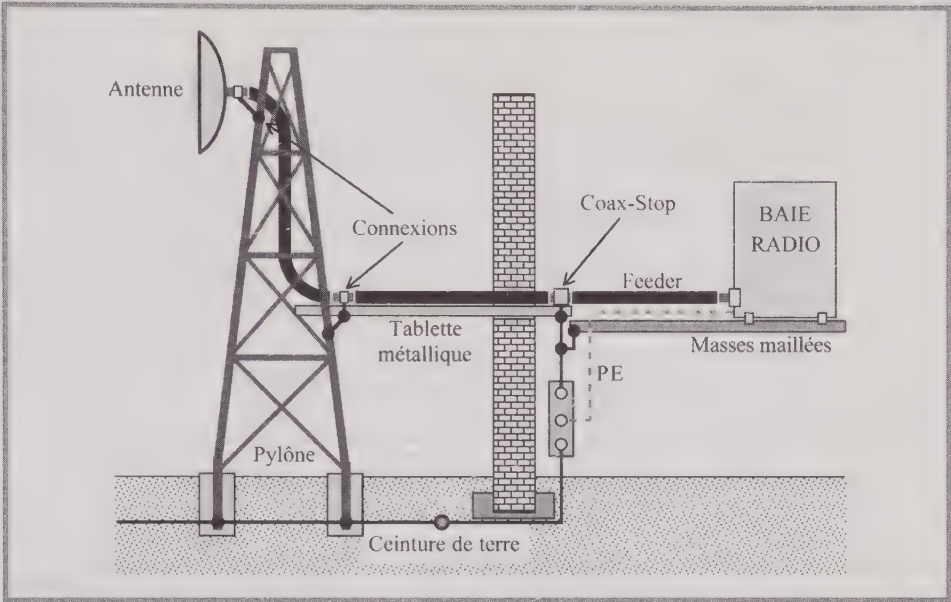


Figure 3.16 – Protection d’un feeder d’antenne.

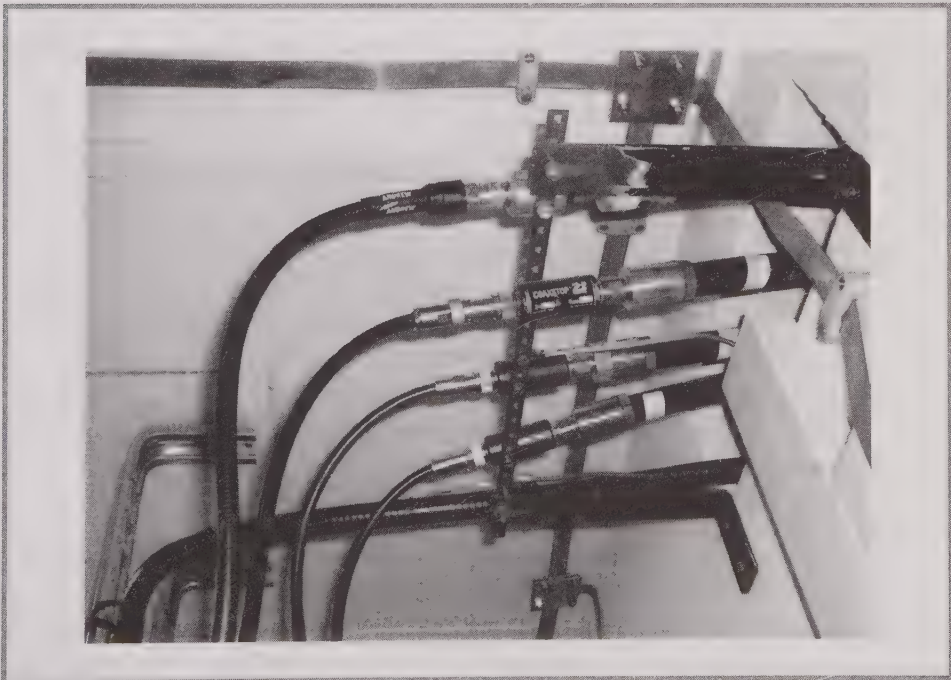


Figure 3.17 – Coax-stops correctement montés en entrée de cabine radio.

■ Câbles internes

Par câble interne il convient d'entendre toute interconnexion filaire entre des équipements et routée de bout en bout à l'intérieur du site. Les câbles d'interconnexion entre cartes dans les armoires sont des câbles internes particuliers.

Nous distinguerons quatre familles de liaisons internes :

- **Famille n° 1** : Circuits de mesure (signaux analogiques à bas niveau) et lignes d'alimentation des capteurs analogiques. Cette famille est sensible.
- **Famille n° 2** : Circuits numériques. Cette famille aussi est sensible (surtout aux impulsions) mais elle peut perturber la famille n° 1.
- **Famille n° 3** : Circuits de contrôle-commande et de relayage en tout-ou-rien (TOR). Cette famille est perturbatrice pour les familles n° 1 et 2.
- **Famille n° 4** : Lignes d'alimentation secteur, circuits de puissance commutés ou régulés par des convertisseurs à découpage. Ce dernier type est assimilable en HF aux conducteurs externes, c'est-à-dire qu'il est perturbateur en mode commun pour les familles n° 1, 2 et 3.

Il est facile de vérifier le respect des dix règles ci-après lorsque chacune de ces familles est identifiable par une couleur d'isolant spécifique.

■ Dix règles de câblage des liaisons internes

Il est simple et le plus souvent suffisant de respecter les 10 règles et conseils d'installation suivants :

1. Les conducteurs aller et retour devraient toujours être voisins. Cette règle générale s'applique aussi aux conducteurs d'alimentation. En conséquence, il ne faut pas câbler en étoile autour d'une alimentation commune deux circuits non isolés qui échangent un signal. Il faudrait, même pour des signaux TOR avec un commun, accompagner les conducteurs actifs par au moins un fil commun par câble ou par faisceau. Pour les signaux analogiques ou numériques, travailler en paire est un minimum. Une paire garantit que le fil de retour reste de bout en bout tout près du fil aller.

En wrapping il est souhaitable de torsader un fil numérique de plus de 20 cm avec un retour connecté au 0 V des deux côtés. C'est ce que l'on appelle une « *fausse paire* ». Une liaison en « *tri-lead* » (câble plat avec chaque signal entre deux fils de masse) est excellente : c'est presque aussi bon qu'un câble blindé. Dans une nappe comme dans un connecteur, il est excellent (pour limiter la diaphonie, réduire l'émission rayonnée et améliorer l'immunité) de réserver un fil sur deux au 0 V.

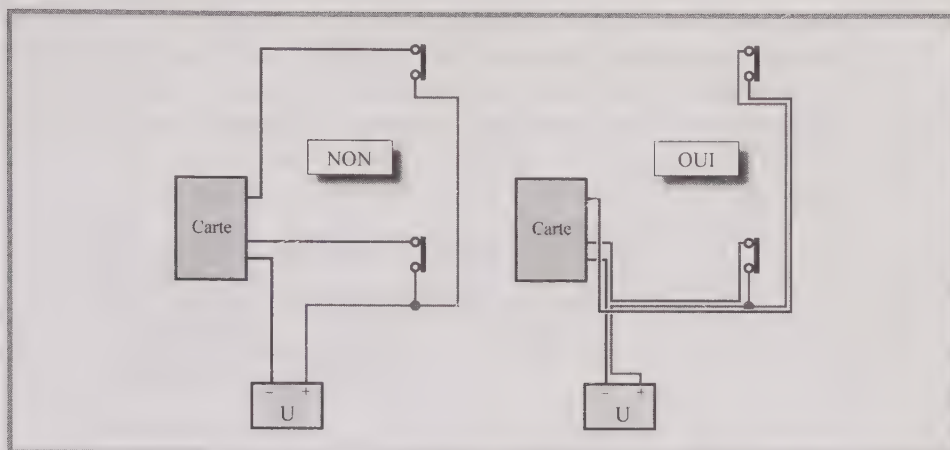


Figure 3.18 – Router tous les fils aller contre les fils de retour.

2. Plaquer toute liaison interne (câble, nappe, faisceau) de bout en bout contre les structures équipotentielles de masse (tôles, masse des coffrets, conducteur d'accompagnement, tablettes...). On bénéficie ainsi d'un effet réducteur important, sûr et gratuit. Éviter de laisser des fils, des câbles ou des faisceaux libres de se déplacer dans un équipement. Ceci risquerait d'entraîner des dysfonctionnements et des variations d'immunité difficiles à identifier donc à corriger. En HF, tout changement géométrique provoque, peu ou prou, des changements de réponse CEM.

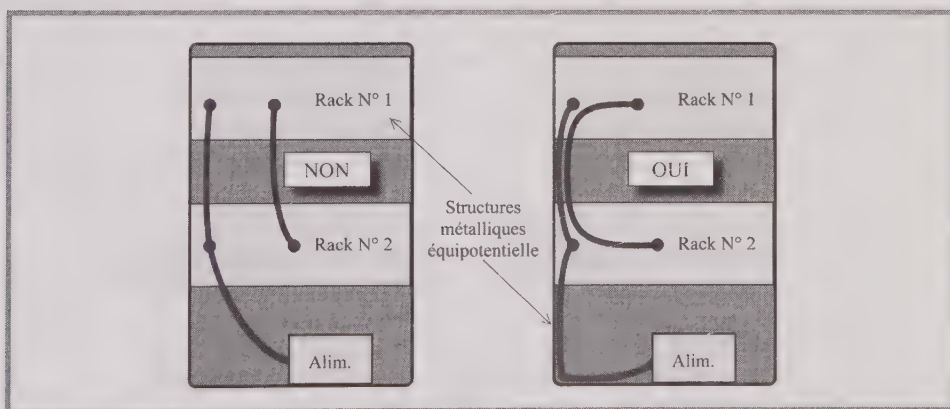


Figure 3.19 – Plaquer les câbles et les nappes contre les structures équipotentielles.

3. Il est souhaitable de surblinder les câbles bruyants et les câbles sensibles. Un surblindage sert de protection HF s'il est relié aux masses aux deux bouts. Il est possible de rapprocher deux câbles de familles différentes si au moins l'un des deux

(ou mieux les deux) est surblindé par une tresse raccordée de façon périphérique à la masse mécanique à chaque extrémité. L'idéal serait de tirer les câbles sensibles ou bruyants dans un tube métallique raccordé aux masses aux deux bouts. Néanmoins, le coût d'un tel ajout reste élevé : environ 50 €/m, pose comprise.

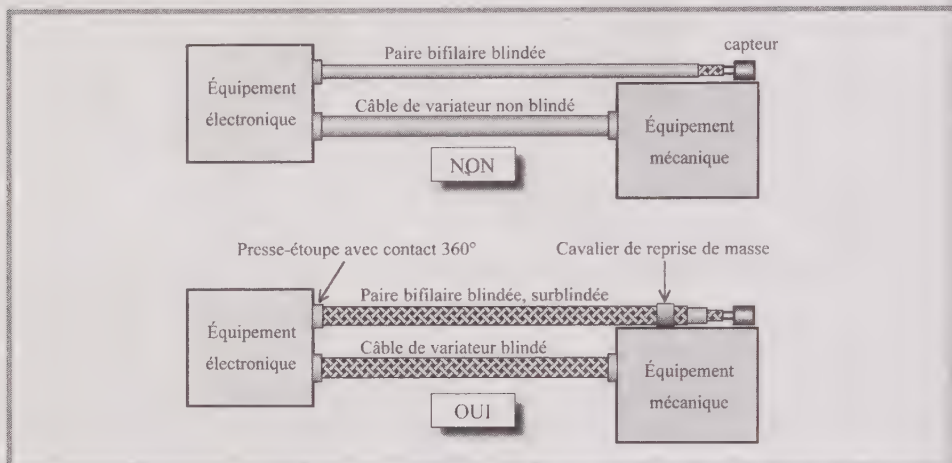


Figure 3.20 – Blinder ou surblinder les câbles bruyants ou sensibles.

4. Seules des paires d'une même famille peuvent être serrées l'une contre l'autre dans un même faisceau ou tirées dans un même câble de regroupement avec des paires non blindées. De plus, il faudrait que chaque fil soit accompagné et torsadé avec son retour. Pour les câbles en nappe, il importe de séparer les fils analogiques des fils numériques par au moins deux fils de masse raccordés au 0 V de chaque carte. Rappelons que réserver un fil sur deux d'un câble plat au 0 V divise par 8 à 10, et à toutes fréquences, la diaphonie entre les lignes.

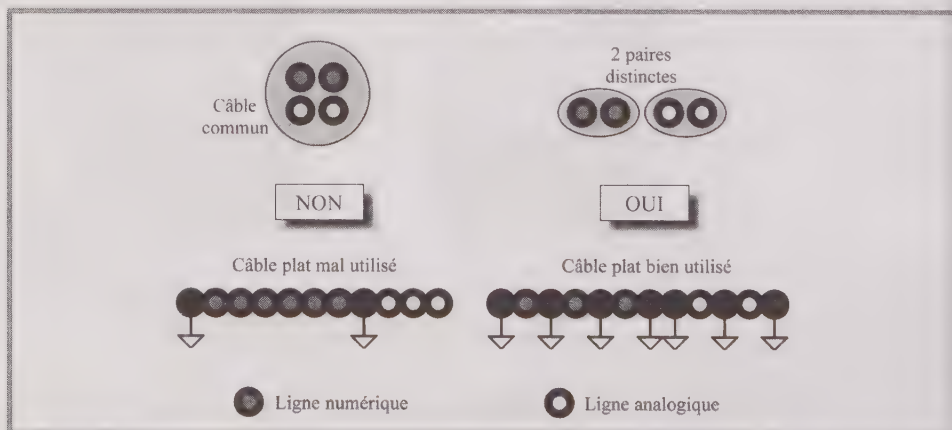


Figure 3.21 – Veiller à réduire la diaphonie entre les signaux.

Une bonne méthode pour réduire les couplages électromagnétiques est de travailler en paires différentielles, bien que cette excellente option à la conception sorte du cadre de l'installation d'un système. Lorsque, comme en Hi-Fi haut de gamme, le choix est donné entre une liaison asymétrique (*single ended* en anglais) ou une liaison symétrique (*balanced line* ou *differential link* en anglais), c'est cette dernière option qu'il convient de retenir.

5. Il est déconseillé d'utiliser un même connecteur pour des liaisons de familles différentes sauf éventuellement entre les familles n° 3 et 4 (pour lesquelles ce n'est pourtant pas conseillé). Si un connecteur commun est utilisé pour des signaux analogiques et numériques, il est nécessaire d'isoler les deux familles par au moins une rangée de contacts au 0 V.

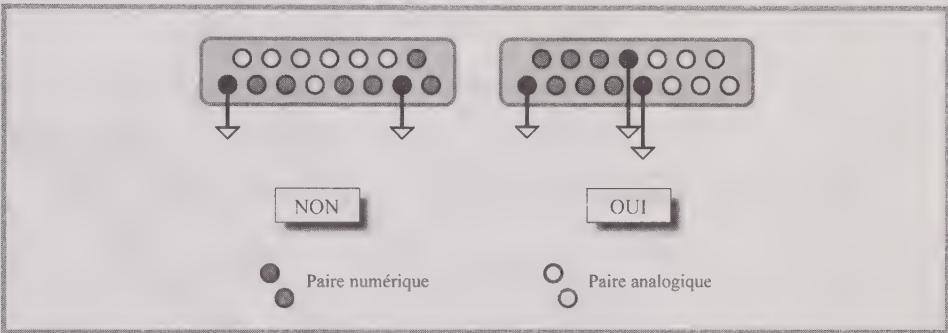


Figure 3.22 – Veiller à limiter la diaphonie dans les connecteurs communs.

6. Tout conducteur libre (excédentaire) d'un câble des familles n° 2, 3 ou 4 devrait être relié à la masse des châssis aux deux extrémités. On peut ainsi bénéficier d'un effet réducteur non négligeable, supérieur à un facteur 2 au-delà de 10 kHz. Ces raccordements à la masse devraient être démontables pour libérer des fils au cas où des liaisons supplémentaires seraient nécessaires. Il est pratique d'utiliser une (ou des) borne(s) de terre de type « Entrelec » montée(s) sur rail DIN.

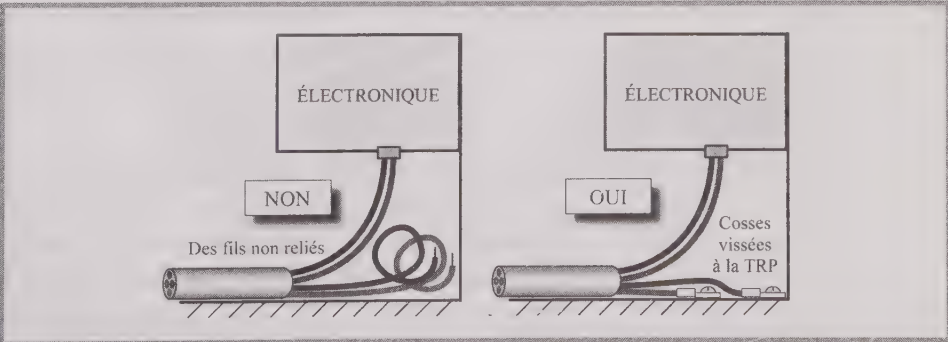


Figure 3.23 – Relier les fils libres à la masse à chaque extrémité.

Pour la famille n° 1, ce raccordement est déconseillé pour les lignes à très bas niveau de tension, à basses fréquences, en présence de tensions entre masses en BF. On risquerait par induction magnétique (par mutuelle inductance entre les fils signaux et les fils reliés à la masse) de générer une petite « ronflette » à la fréquence du réseau.

7. Les câbles blindés ne craignent pas la diaphonie. De telles règles sont sympathiques ! Des câbles blindés, avec écrans bien raccordés, peuvent cohabiter dans la même goulotte sans problème de diaphonie, même s'ils appartiennent à des familles différentes. Tout câble blindé des familles n° 2, 3 ou 4 devrait avoir son écran raccordé à la masse du châssis des deux côtés (à la TRP des équipements). La connexion devrait être réalisée au moins par un cavalier (c'est-à-dire sans « queue-de-cochon », le mieux étant une reprise de masse sur 360° par un presse-étoupe ou par un connecteur pour câble blindé).

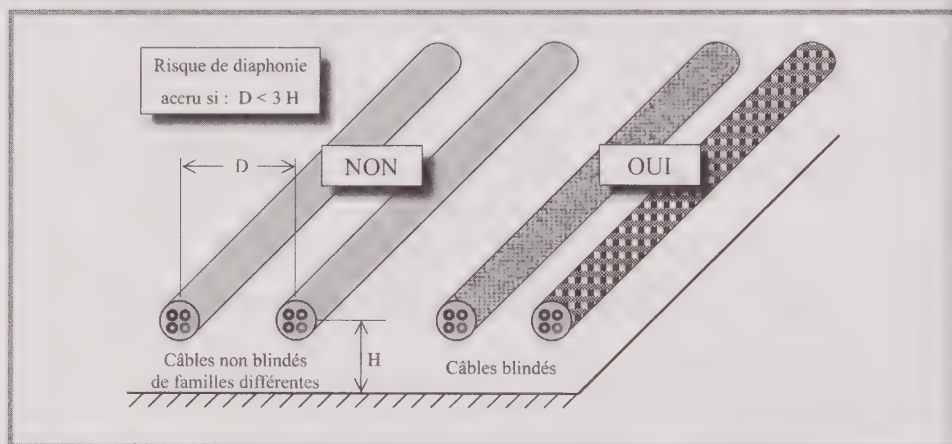


Figure 3.24 – Les écrans des câbles suppriment le risque de diaphonie.

Les câbles en nappe ronds sur noyau élastomère et blindés sont excellents : la diaphonie interne est aussi facile à maîtriser qu'avec un câble en nappe plat, et l'écran externe, plus facile à relier qu'un écran plat, protège des perturbations HF extérieures.

8. Éloigner les câbles perturbateurs (familles n° 3 et 4) des câbles sensibles (familles n° 1 et 2). En pratique un éloignement entre câbles de 30 cm suffit le plus souvent, même en environnement isolant, c'est-à-dire sans effet réducteur défini. Nous préconisons toutefois, quand la grille de masse est lointaine, et lorsque les risques sont réels, un éloignement jusqu'à 1 m. Dans le pire des cas, deux câbles parallèles se couplent de moins de 10 % si on les éloigne d'au moins trois fois leur hauteur par rapport à la grille de masse (ou aux fers à béton).

Il faut éviter pour cette raison de tirer un câble perturbateur dans la même goulotte qu'un câble sensible, surtout si la goulotte est bien remplie, c'est-à-dire avec des câbles éloignés de la tôle. Croiser deux câbles à 90° permet de ne pas les coupler par diaphonie, même s'ils sont en contact en un point.

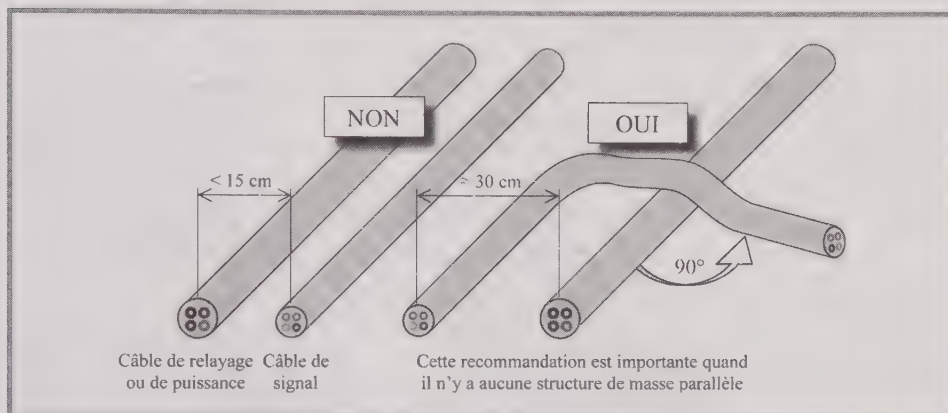


Figure 3.25 – Éloigner raisonnablement les câbles incompatibles.

9. Dans un même câble ne devraient jamais cohabiter des signaux d'une famille sensible (familles n° 1 et 2) et d'une famille perturbatrice (familles n° 3 et 4). Ceci reste vrai même si le câble contient des écrans internes en feuillard aluminisé. En effet, la seule manière de réduire la diaphonie inductive en mode différentiel en BF est de torsader les paires coupable et victime avec des pas différents ou, mieux, dans des sens différents (torsades S-Z).

Lorsqu'il est nécessaire de router dans le même câble des signaux des familles n° 1 et 2 ou 3 et 4 (pour un système d'armes, un équipement filoguidé ou un appareil médical), des écrans internes sont nécessaires pour limiter la diaphonie. Ces écrans (si possible des tresses) sont à raccorder à la masse aux deux bouts pour les familles n° 2, 3 et 4.

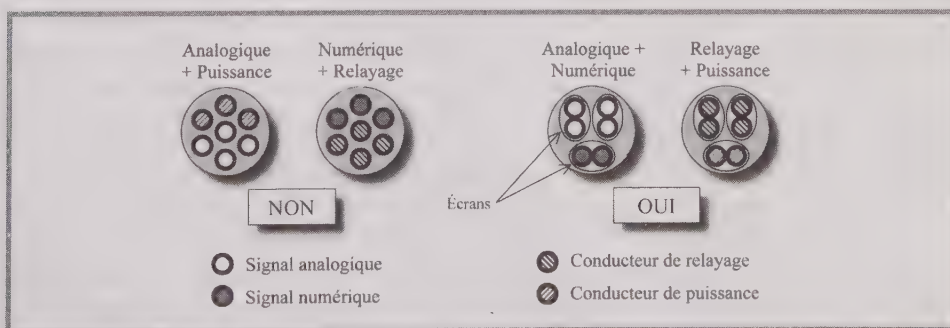


Figure 3.26 – Router les signaux incompatibles dans des câbles différents.

10. Les câbles de la famille n° 4 (alimentations et régulateurs) n'ont pas besoin d'être blindés s'ils sont efficacement filtrés. Il est nécessaire de filtrer chaque câble d'alimentation en entrée d'équipement ou de baie. Il est difficile (sinon impossible) de filtrer les câbles de puissance des variateurs de vitesse et même des commandes de moteurs pas à pas. Il est alors souhaitable de les blinder par une tresse ou par une goulotte métallique, avec raccordement à la masse des deux côtés.

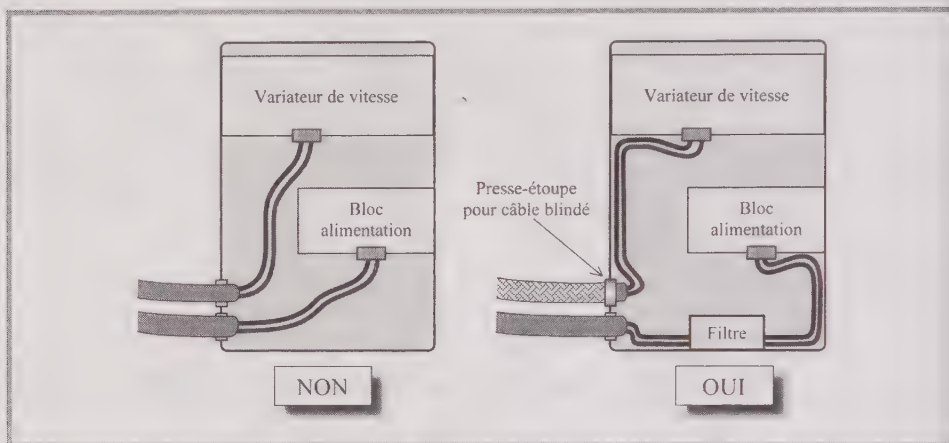


Figure 3.27 – Un câble filtré n'a pas besoin d'être blindé.

Le respect de ces dix règles de câblage (et de bon sens) suffit presque toujours à résoudre les problèmes de câblage entre sous-ensembles ou entre équipements. Inversement, la violation de ces règles de bon sens entraîne souvent des dysfonctionnements. La CEM n'est pas si compliquée !

■ Conseils pratiques de câblage

Les relais, contacteurs et autres organes de coupure avec contacts secs génèrent de sévères surtensions HF (réamorçages) à l'ouverture de circuits inductifs. Il convient de prendre des précautions de mise en œuvre, en particulier pour les relais internes aux coffrets électroniques : limitation des surtensions des charges inductives, éloignement des cartes et des circuits sensibles et routage maîtrisé des conducteurs.

Blinder un relais est difficile, parfois peu efficace, et doit être réalisé avec liaison au châssis au plus court (par une faible impédance HF). Un tel écran ne se justifie que pour protéger un circuit sensible proche contre le rayonnement direct des contacts : il ne réduit pas les perturbations conduites. Les contacts d'un petit relais implanté sur une carte devraient éviter les amorçages par un circuit passif placé en parallèle avec la bobine commandée (voir tome 3 pour choisir la protection la mieux adaptée).

Les relais de puissance et les contacteurs BT devraient être éloignés d'au moins 30 cm des cartes électroniques analogiques et numériques. Seuls des cartes d'interface TOR et des convertisseurs de puissance sont tolérables à proximité des contacteurs. Il n'est possible de rapprocher les contacteurs de cartes électroniques que si l'on interpose entre les relais et les cartes une tôle connectée en plusieurs points à la masse du châssis. Un relais statique ne génère pas d'impulsions HF, tout au plus une petite impulsion à chaque commutation.

Les liaisons analogiques (famille n° 1) n'ont besoin d'être blindées à l'intérieur des coffrets que si elles sont à très bas niveau. Il ne devrait y avoir aucun point commun à deux circuits analogiques hormis sur la carte d'acquisition. Il est souhaitable d'ouvrir les boucles de masse des entrées à bas niveau, par exemple par un amplificateur différentiel en réception.

Pour la même raison, nous préconisons d'éviter en analogique les broches de connecteurs communes à divers capteurs (pas de retour commun, sauf éventuellement en entrée de carte). Un commun isolé des masses devrait être dédié à chaque liaison à bas niveau. Quand il est impossible de respecter cette recommandation, il faut torsader les signaux avec le retour commun afin de limiter la surface des boucles, et appliquer cette précaution aux signaux tout-ou-rien.

Rappelons que les liaisons numériques transmises sur câble plat devraient avoir un conducteur sur deux en retour : un 0 V ou, encore mieux, le signal complété. Nous recommandons l'usage de nappes composées de paires torsadées. Elles limitent la diaphonie et poussent à bien faire, contrairement aux câbles en nappe standard qui poussent à de mauvaises économies de bouts de fils !

Il est habituellement inutile de choisir des nappes ou des câbles blindés pour les liaisons internes. Lorsque des fils indépendants sont utilisés (en wrapping par exemple), il est utile de travailler en « fausse paire », c'est-à-dire de torsader chaque fil avec un fil de retour relié au 0 V aux deux bouts. Une fausse paire apporte un effet réducteur de 3 à 5 en HF (de 10 dB à 15 dB).

Les liaisons tout-ou-rien peuvent, en cas de nécessité, comporter un conducteur commun à plusieurs circuits indépendants. On s'efforcera alors de router un retour par fil de commande. Travailler en paires torsadées est un bon moyen de garantir la proximité des fils aller avec ceux de retour.

Les circuits d'alimentation et de puissance, variateurs à triacs, thyristors, GTO, transistors ou IGBT devraient être éloignés des liaisons signaux à plus de 10 cm dans une armoire conductrice, et à plus de 30 cm entre équipements.

Terminons par un ultime conseil peut-être un peu délicat à saisir. Il est souhaitable de rapprocher les câbles d'interconnexion des structures de masse d'accompagnement, mais il est souhaitable de les éloigner des câbles de terre. Terres et masses étant maillées, que signifie cette recommandation ?

Un câble d'accompagnement ou une masse d'accompagnement est un conducteur de masse raccordé au minimum à la masse aux extrémités d'un câble d'interconnexion qu'il protège. S'il est très proche du câble protégé, il apporte un effet réducteur. Un câble d'accompagnement peut être considéré comme un blindage modeste mais réel.

Un conducteur de terre, en revanche, risque de supporter des courants externes (paratonnerres, limiteurs de surtensions, etc.). Ses courants n'ont rien à voir avec les câbles d'interconnexion et risquent de s'y coupler. Un conducteur de terre doit donc être considéré comme un câble de la famille n° 4.

Inversement, un câble de masse d'accompagnement peut être raccordé à tous les conducteurs de terre, mais il devrait les croiser à 90° pour limiter la diaphonie sur le câble qu'il protège par effet réducteur (en l'accompagnant de bout en bout).

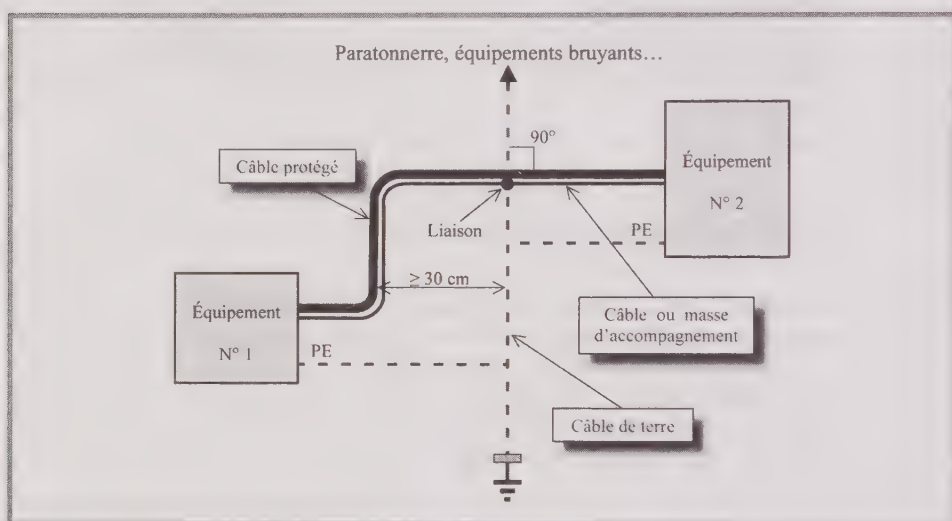


Figure 3.28 – Éloigner les câbles signaux des câbles de terre, mais les rapprocher des câbles ou des masses qui les accompagnent.

3 Protection répartie

Le site idéal pour installer un système électronique serait sans doute une cabine blindée. Les bâtiments en béton armé peuvent constituer une cage convenable, il suffit de souder à l'arc les fers à béton. Cette faradisation n'est bien sûr possible qu'à la construction du bâtiment. Si l'on opte pour cette excellente solution, il est souhaitable de rendre les ferrailages électriquement accessibles de proche en

proche afin de pouvoir y raccorder les châssis des équipements. Lorsque le bâtiment est achevé, la seule solution pour rendre les équipements équipotentiels est de réaliser le maillage des masses accessibles.

■ Maillage par îlots

Il serait coûteux de mailler un bâtiment de grande dimension qui ne contiendrait que quelques équipements électroniques. Les zones sans équipements, les aires de stockage par exemple, peuvent n'être que sommairement maillées, disons avec une dimension de maille d'une dizaine de mètres de côté. Il est en revanche important de bien mailler les masses des zones à forte concentration d'équipements. Nous appellerons ces zones des *îlots*. Un îlot est souvent un local regroupant divers équipements électroniques : une salle informatique, une salle de contrôle, une salle blanche, un laboratoire, une plate-forme d'essais, une salle faradisée, etc.

Tous les câbles d'interconnexion entre les divers îlots d'un même site doivent être routés avec effet réducteur *via* leurs **plaques collectrices**. C'est cette combinaison de maillages locaux et d'interconnexions entre îlots avec effets réducteurs que l'on appelle *maillage par îlots* du site.

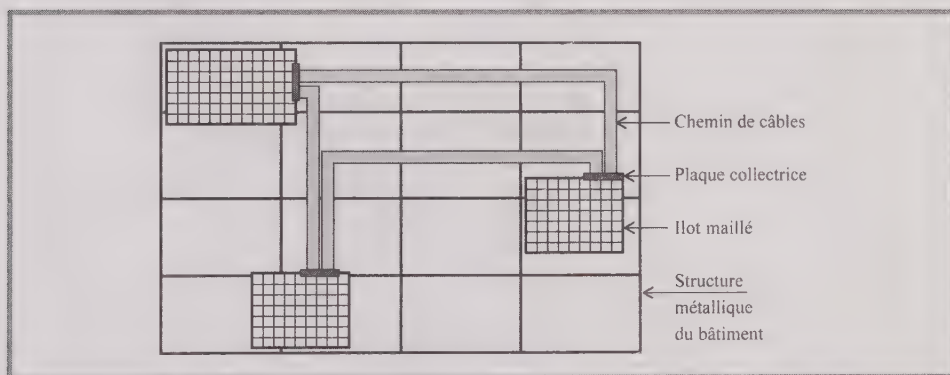


Figure 3.29 – Exemple de plan d'un bâtiment maillé par îlots.

Le maillage par îlots, grâce aux effets réducteurs entre les îlots, est presque aussi efficace que le maillage du site entier. Il est en outre économique puisque seules les zones sensibles sont maillées. Quant à l'effet réducteur apporté par les goulottes conductrices, il est gratuit.

En fait, le maillage intégral d'un site n'a d'intérêt que si le bâtiment est de petite taille avec des équipements sensibles répartis sur toute la surface, ou pouvant être installés n'importe où. Le plus souvent une salle informatique, une plate-forme de contrôle, une salle blanche ou un hall d'essais mérite d'être maillé sur toute sa surface.

■ Plaque collectrice

Il est souhaitable de regrouper l'ensemble des conducteurs électriques (câbles d'énergie, télécommunications, signaux) entre chaque îlot et l'extérieur sur une tôle servant de référence de potentiel. Cette tôle, une par îlot, est appelée *plaque collectrice*. L'intérêt de regrouper les câbles sur une plaque collectrice est de garantir la bonne équipotentialité des conducteurs externes de l'îlot, ce qui serait impossible en HF si les câbles entraient dans l'îlot par divers points éloignés.

Chaque canalisation conductrice longue qui entre dans un îlot devrait aussi être raccordée à la plaque collectrice par soudage, brasage ou vissage. À la conception d'un site, il est souhaitable de prévoir l'entrée des canalisations mécaniques (tuyaux, gaines de ventilation, etc.) à proximité immédiate des conducteurs électriques. Les limiteurs de surtensions secondaires installés sur les câbles d'énergie ou de télécommunication devraient être reliés au plus court à la plaque collectrice. Les câbles blindés devraient toujours avoir leur blindage externe (ou leur surblindage) connecté en traversée à la plaque collectrice.

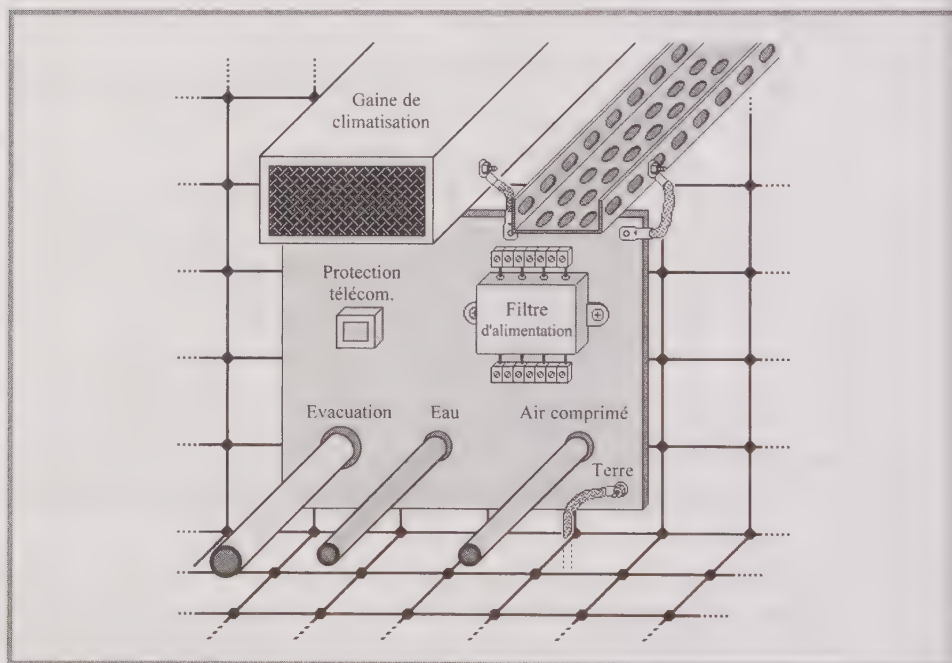


Figure 3.30 – Exemple de plaque collectrice en entrée d'îlot.

Pour un équipement installé en environnement isolant, comment se rapprocher du concept de plaque collectrice ? Une tôle de surface suffisante pour se coupler par capacité au sol peut servir de référence de potentiel HF. Nous recommandons

une surface de tôle d'au moins 2 m^2 même si l'expérience montre qu'une tôle de 1 m^2 se couple déjà efficacement aux fers à béton en HF. Nous retrouvons l'idée de la *transient suppression plate*, utilisée cette fois comme une plaque collectrice. Il est possible de camoufler une telle tôle sous une moquette.

Les électrons n'étant pas sensibles à la gravitation, une plaque collectrice peut être horizontale, en traversée de dalle en béton armé par exemple. Inversement, une *transient plate* peut ne pas être collée au sol, mais vissée verticalement contre un mur porteur par exemple.

Un type d'équipement est plus délicat à protéger que des bâtis posés au sol : il s'agit des matériels posés sur table imparfaitement filtrés ou blindés. Une *transient plate* plaquée au sol fait merveille pour filtrer l'alimentation de ces équipements de table sensibles. Il suffit d'ajouter au cordon secteur un filtre fixé directement sur la plaque en son centre, les câbles amont et aval tirés à 180° . Cette solution est efficace pour antiparasiter les appareils scientifiques ou médicaux contre les perturbations en vrai mode commun.

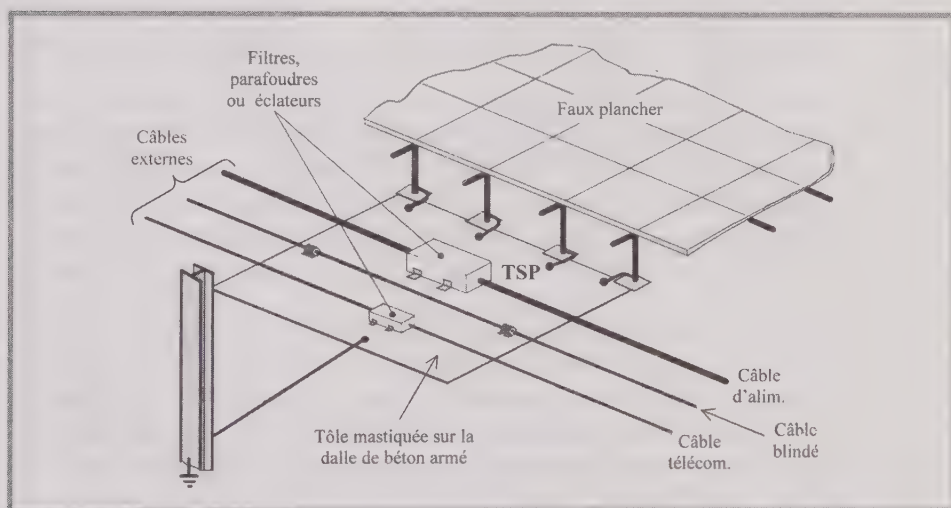


Figure 3.31 – Exemple d'utilisation efficace de *transient plate*.

Si plusieurs lignes externes aboutissent à l'équipement protégé par une *transient plate* (cordon d'alimentation électrique, ligne téléphonique, câbles blindés numériques, etc.), toutes les protections doivent être montées directement sur la même tôle : filtre secteur, éclateurs de ligne téléphonique, parafoudres secteur, cavaliers pour reprise de masse de l'écran des câbles blindés.

■ Coordination des protections

La solution de limiter les surtensions collectées par les câbles externes en entrée de chaque îlot n'est pas la plus économique quand le nombre d'îlots d'un site est important. Les protections de forte énergie sont coûteuses. Il est préférable d'étagérer les protections, en particulier celles des lignes d'énergie, pour en limiter le nombre. Donnons un exemple économique de coordination des protections contre les surtensions du réseau d'alimentation électrique.

L'arrivée en 20 kV devrait être protégée en amont du transformateur MT/BT par trois parafoudres à varistances (au carbure de silicium ou, mieux, à l'oxyde de zinc) installés entre chaque phase et la terre du poste. Le transformateur MT/BT réduit l'énergie résiduelle à dissiper côté BT.

Dans le tableau général basse tension (TGBT), une protection parallèle de forte énergie (parafoudre de type 1) entre phases et masse devrait protéger le départ vers les îlots. Les départs vers les machines électrotechniques de forte puissance (gros moteurs, résistances de chauffage) n'ont pas besoin d'être mieux protégés. À partir du TGBT, les câbles d'énergie devraient être installés dans des goulottes conductrices boulonnées de bout en bout pour offrir un effet réducteur.

En entrée de chaque îlot, si l'installation générale est en schéma IT, un transformateur d'isolement peut être installé pour alimenter l'îlot en schéma TN. Un transformateur est impératif à l'extérieur des cabines blindées pour limiter leur courant de fuite « à la terre » (en fait dans le PE et retour au neutre). Au secondaire de ce transformateur, des varistances à oxyde de zinc (parafoudres de type 2) d'une énergie de quelques centaines de joules peuvent être installées entre phases.

Un thermofusible en série avec chaque varistance, collé contre son corps, peut l'isoler avant qu'elle n'explose. Les parafoudres (de types 1 à 3) conformes à la norme NF EN 61643-11 sont testés pour ne pas exploser. Un contact pour reporter à distance la fusion du fusible est possible. En cas de génération de courants harmoniques importants dans un îlot, un filtre anti-harmonique (un circuit LC série accordé) peut être installé au voisinage de son tableau.

L'alimentation de chaque baie électronique devrait être protégée par un filtre soigneusement installé (voir tome 3). Enfin en aval de ce filtre, des MOV d'une centaine de joules (protégées par l'impédance série du filtre) peuvent être installées entre phases. Elles servent à limiter les surtensions résiduelles en mode différentiel à une valeur acceptable par les alimentations. La sécurité obtenue par une telle coordination des protections est excellente.

Le coût global des protections coordonnées est plus faible que celui qui consisterait à installer une protection totale en entrée de chaque équipement (et même de chaque îlot). Pour des départs ne dépassant pas quelques dizaines d'ampères, un coffret de protection appelé *absorbeur d'onde* peut suffire sans protection

primaire. Il s'agit d'une combinaison d'inductances couplées en mode commun et de parafoudres.

Un site entièrement maillé serait encore meilleur qu'avec un maillage par îlots. Il ne faut pas penser que le raccordement de l'îlot à la terre par un câble de terre unique, surtout s'il est isolé entre la prise de terre et la plaque collectrice soit une bonne solution. Le raccordement des îlots aux structures conductrices voisines devrait être systématique. Des liaisons supplémentaires augmentent la surface maillée de l'îlot; elles ne doivent pas être considérées comme des pénétrations de courants perturbateurs par des points éloignés de la plaque collectrice.

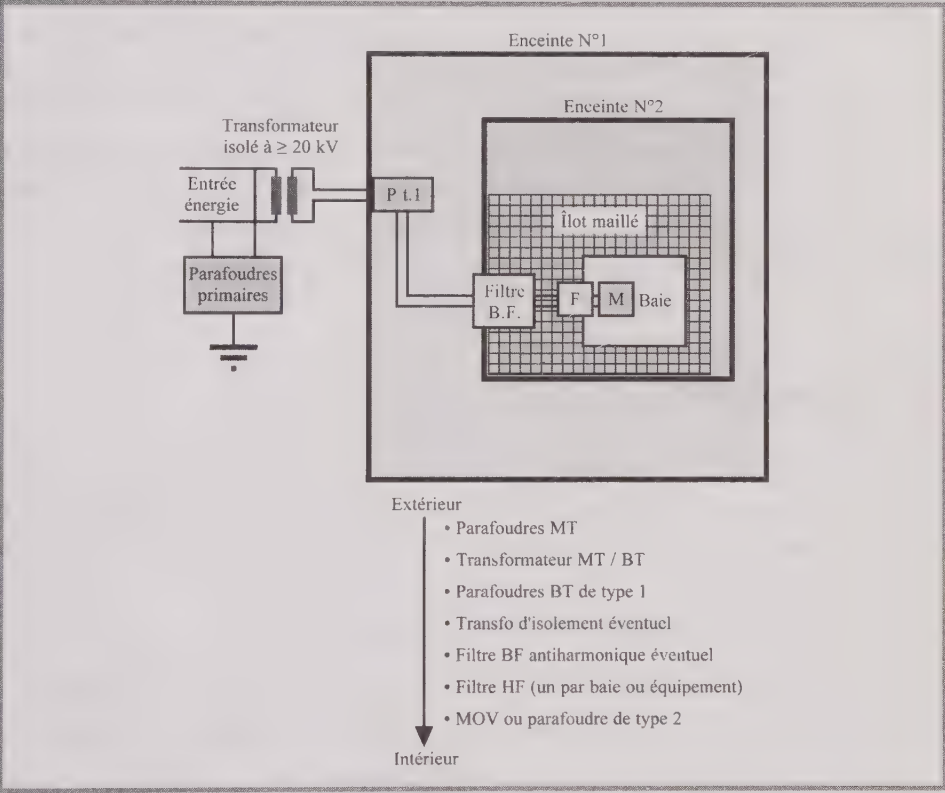


Figure 3.32 – Exemple d'une coordination de protections étagées.

Il serait illusoire de penser que l'on peut éviter toutes les boucles entre masses autres que *via* la plaque collectrice. Si un tuyau pénètre dans un îlot en un point éloigné de la plaque collectrice, ce n'est pas une catastrophe. Il suffit de le relier à la masse de l'îlot dès que possible. Il est bon de mailler chaque îlot à son environnement, même si ce dernier est imparfaitement équipotentiel. On tend ainsi vers un site maillé.

En résumé, un câble externe qui entre dans un îlot sans connexion à la plaque collectrice (blindage ou filtrage) est défavorable. Le maillage de l'îlot aux masses voisines par des liaisons supplémentaires et nombreuses est en revanche favorable. Deux masses proches gagnent toujours à être reliées. Pour clarifier notre exposé, distinguons deux types de conducteurs de masse d'un îlot :

- Les liaisons de l'îlot aux masses voisines. Ces conducteurs devraient être aussi nombreux et courts que possibles. Si des câbles « sales » (conducteurs de descente ou de terre) sont raccordés à la masse loin de la plaque collectrice, on veillera à resserrer le maillage autour de ces points pour diluer leurs éventuels courants.
- Les canalisations conductrices longues externes à l'îlot. Elles doivent de préférence pénétrer dans l'îlot *via* la plaque collectrice. C'est encore plus important pour les câbles d'interconnexions vers d'autres îlots qui doivent, autant que possible, rester de bout en bout dans des chemins de câbles métalliques.

En d'autres termes, une plaque collectrice compense une imparfaite équipotentialité de l'îlot. On corrige l'imperfection du maillage par une bonne mise en équipotentialité des conducteurs externes, particulièrement ceux des électroniques sensibles.

4 En conclusion...

Réduire les perturbations en mode commun sur les câbles est simple et peu coûteux. Il suffit de permettre aux courants de masse (inévitables) de circuler librement et parallèlement aux câbles, mais pas dans les câbles ! C'est simple, n'est-ce pas ?

Une liaison supplémentaire entre masses, c'est bien.

Une liaison supplémentaire entre baies interconnectées, c'est mieux.

Une liaison supplémentaire de masse proche des câbles, c'est encore mieux.

Un surblindage, de bout en bout autour des câbles, c'est presque parfait !

Le maillage de toutes les masses d'un site par de petites mailles, voire sa faradisation complète, sont des concepts séduisants, efficaces mais coûteux et souvent inutiles, puisque seuls les équipements électroniques et leurs câbles sont vulnérables.

Par expérience, le maillage par îlots est la meilleure solution car elle est peu coûteuse et permet de résoudre la majorité des problèmes de dysfonctionnement de CEM. Le maillage par îlots permet en effet de résoudre les trois difficultés majeures :

- Limiter entre équipements voisins interconnectés les tensions entre leurs masses à des valeurs acceptables. C'est le rôle du maillage des masses d'un îlot.

- Protéger les liaisons internes au bâtiment contre les perturbations de mode commun grâce aux effets réducteurs (câbles blindés et chemins de câbles).
- Permettre l'écoulement à la masse des surtensions résiduelles des câbles externes grâce à la référence de potentiel qu'est la plaque collectrice de l'îlot. Ce dernier point peut aussi être pris en compte baie par baie, mais à un coût souvent supérieur.

Il est souvent facile d'ajouter des effets réducteurs après installation. Les goulottes métalliques, quand elles sont bien raccordées aux masses, et surtout à elles-mêmes (tôle sur tôle, sans tresse) font merveille.

Les câbles blindés aussi peuvent offrir un excellent effet réducteur en HF (pour maîtriser leur mise en œuvre, se reporter au tome 3).

ONSEILS PRATIQUES

Ce chapitre s'adresse aux installateurs qui veulent bien faire du premier coup. Nous y donnons des conseils pratiques tirés de l'expérience. Nous verrons aussi comment résoudre les problèmes pratiques d'équipotentialité d'un site existant, nous tenterons de clarifier quelques confusions trop fréquentes et nous aborderons la question du dépannage en CEM.

En CEM, il importe avant tout de simplifier les problèmes. Nous conseillons de travailler avec méthode, pas à pas, en ne modifiant qu'un seul point à la fois et en vérifiant après chaque correction l'amélioration obtenue.

Nous conseillons aussi d'être pugnace, de ne pas se décourager et d'additionner les remèdes les uns aux autres sans revenir en arrière, même si une correction ne fournit pas l'effet espéré. Ce n'est souvent qu'après avoir corrigé les deux ou trois erreurs majeures que le fonctionnement du système peut devenir satisfaisant. À la fin, lorsque tout marche bien, il est possible de supprimer les remèdes inutiles. On constate souvent que des corrections qui semblaient inutiles (tant qu'elles étaient masquées par d'autres erreurs) sont finalement nécessaires à la bonne CEM de l'ensemble.

N'effectuons pas de mesures pour le plaisir d'en effectuer, pour exposer du matériel coûteux, ou pour montrer comme on est compétent ! Concentrons-nous plutôt sur les erreurs d'installation, elles sont sans doute assez nombreuses et généralement ni trop difficiles ni trop longues à corriger.

Par exemple plutôt que d'essayer de mesurer les courants perturbateurs HF de mode commun sur les câbles dont on connaît d'ailleurs les ordres de grandeur (plusieurs centaines de volts et plusieurs ampères en impulsions), il est plus efficace de vérifier l'immunité de l'installation par un test normalisé.

Nous recommandons l'excellent test CEI 61000-4-4. Le générateur simule des impulsions transitoires électriques rapides en salves (TER/S) générées par des contacts secs à l'ouverture de circuits inductifs. L'injection est effectuée par couplage capacitif en vrai mode commun, c'est-à-dire par rapport à la masse de l'environnement.

Les caractéristiques du générateur CEI 61000-4-4 sont la grande amplitude des impulsions (jusqu'à 4 kV dans chaque polarité), leur faible énergie, leur fréquence de répétition élevée, et une durée de salves brève. En outre, une bonne confiance statistique est obtenue rapidement, contrairement aux tests effectués avec un faible nombre d'impulsions, tel le test de décharges électrostatiques.

Pour les spécialistes, selon la version de 2004 de la norme, les caractéristiques électriques nominales du générateur sont les suivantes :

- Impédance de sortie : 50 Ω .
- Temps de montée d'une impulsion : 5 ns.
- Temps de durée à mi-hauteur de chaque impulsion : 50 ns.
- Fréquence de répétition des impulsions dans la salve : 5 kHz ou 100 kHz.
- Nombre d'impulsions dans une salve : 75 impulsions.
- Période de répétition de la salve : 300 ms.

L'injection s'effectue par un fil par rapport à la masse du générateur, elle-même reliée à une *transient plate* posée au sol. On commence par injecter les impulsions sur le châssis des équipements, puis sur chaque phase de l'alimentation, puis enfin sur chaque câble, un par un. La pince de couplage normalisée est avantageusement remplacée sur site par une largeur de papier aluminium enroulée autour du câble testé. La durée d'un essai peut être réduite sur site à une quinzaine de secondes par câble et par polarité. On commence par le niveau 1 puis on inverse la polarité avant de passer, si tout fonctionne bien, au niveau supérieur.

Il est généralement suffisant de résister au niveau 3 de la norme, c'est-à-dire 2 kV (à vide, et 40 A en court-circuit) sur les fils d'alimentation et 1 kV (à vide, soit 20 A en court-circuit) sur les câbles d'entrées/sorties. Il est généralement suffisant de tenir le niveau 2. Certains équipements mal conçus sont perturbés dès le niveau 1 ; il est alors illusoire d'attendre un fonctionnement sûr : des dysfonctionnements plus ou moins aléatoires sont prévisibles.

Ce test est rapide puisqu'une baie avec une dizaine de câbles est évaluée en un quart d'heure environ. Il est simple à effectuer, bien reproductible, d'un coût accessible à un petit laboratoire (un bon générateur coûte environ 10 k€), peu dangereux pour le matériel (il est rare de casser avant de perturber) et surtout bien corrélé avec les dysfonctionnements aléatoires observés sur site.

Les tests d'immunité en impulsions à fronts raides (décharges électrostatiques ou transitoires électriques rapides en salves) sont révélateurs des problèmes de conception comme ceux d'installation. Pour un équipement numérique mal blindé, les impulsions négatives peuvent être plus perturbatrices que les impulsions positives. Cet effet est habituel lorsque des circuits numériques bipolaires sont utilisés. Il s'explique par le couplage capacitif entre la carte et son environnement. Des courants extraits d'une sortie bipolaire (à l'état haut) sont plus sévères que des

courants injectés (à l'état bas) à cause de la dissymétrie des étages de sortie à structure « *totem pole* ». Dans ce cas, c'est en polarité positive que le test par influence (DES indirecte) est le plus sévère (le sens du champ E s'inverse par rapport à une DES directe).

Pour d'autres électroniques, celles utilisant des transistors discrets de type NPN par exemple, ce sont les impulsions positives qui sont les plus perturbatrices. Pour un transistor PNP, ce sont naturellement les impulsions négatives les plus sévères, puisque c'est un courant négatif sur sa base qui le fait conduire. Une impulsion qui tend à le bloquer est généralement moins perturbatrice.

Le test CEI 61000-4-4 est le seul que nous effectuons systématiquement sur site, tant il est efficace et puissant. En fait les seules perturbations qui lui échappent sont les problèmes BF (terres séparées et surtensions longues par exemple). Bravo et merci à la CEI pour cette norme !

1 Que faire de la terre ?

La terre reste pour beaucoup l'origine de tous les maux ! La question « comment améliorer la terre ? » est souvent la première qui nous est posée. Notre réponse est simple : Si le réseau de terre est unique, n'y changeons rien !

À la conception du site, il est simple de mailler les conducteurs enterrés avec une dimension de maille d'autant plus faible que la densité de courant risque d'être forte. Il est ainsi souhaitable d'avoir une dimension de maille inférieure à 10 m au voisinage de la terre de protection d'un poste MT/BT, aux pieds des pylônes ou des lampadaires de grande hauteur qui peuvent recevoir directement la foudre, au pied des conducteurs de descente, de la liaison aux parafoudres primaires, etc.

De nombreux sites sont dotés de plusieurs terres aux qualificatifs exotiques qui se veulent rassurants. Il faut toujours, avant toute autre chose, et sans exception, interconnecter toutes ces terres. La pédagogie et la diplomatie sont des qualités utiles quand il faut faire comprendre à un usager ou à son installateur qu'il a dépensé beaucoup d'argent pour mal faire !

Forer des trous dans le sol (parfois jusqu'à 70 m de profondeur) ne résout pas les problèmes des électroniques en surface ! Ne salons pas la terre, et ne complétons pas tous les 6 mois les manques autour des électrodes de terre par une poudre de Perlimpinpin. Ceci réduirait peut-être quelque temps la résistance de la prise de terre, mais ne réduirait pas les risques de dysfonctionnement. N'accusons pas la terre de tous les problèmes du monde.

Nous avons déjà vu des câbles de terre blindés tirés en étoile à partir d'une barrette de terre « isolée » ! L'âme était raccordée à la « terre sans bruit » du site et

l'écran à la « terre des masses ». Sur un autre site, l'écran n'était raccordé qu'à une seule extrémité. Dans ces deux cas, les terres étaient reliées (ce qui ennuyait beaucoup notre client !), mais par un long câble (donc par une forte inductance). Dans un tel cas, court-circuitons au plus court toutes les terres, et maillons côté équipement les masses de façon équipotentielle.

Lorsqu'il y a contradiction entre les exigences d'un constructeur de matériel et les règles de sécurité, ce sont toujours ces dernières qui priment. Le système doit être sûr avec un fonctionnement fiable, sans compromis. En cas de conflit, le fournisseur de matériel doit corriger ses règles d'installation afin de les rendre conformes aux règles de sécurité. Par chance, la notion d'équipotentialité est favorable tant à la sécurité des personnes qu'à la CEM des équipements.

Une difficulté apparaissait lors de l'utilisation d'Ethernet en coaxial entre deux bâtiments. La protection des personnes impose de relier toutes les canalisations, donc la tresse accessible des câbles, à la terre en entrée de chaque bâtiment. Or la tresse d'Ethernet ne devrait être reliée qu'en un point à la masse, il faut alors changer de support (passer en paire différentielle ou en fibre optique) ou de matériel. Siemens proposait un réseau Ethernet en triaxial (surblindé, voir tome 3), assez coûteux mais à la fois sûr pour les personnes et magnifiquement immunisé aux perturbations. Les réseaux numériques rapides en paires symétriques bien blindées ont résolu la question.

Quand on installe une liaison entre deux bâtiments (entre un bâtiment administratif et un atelier par exemple), il est nécessaire d'interconnecter leurs terres. Même quand on est certain que les prises de terre des bâtiments sont reliées, nous conseillons d'ajouter un conducteur supplémentaire de terre (35 mm^2 de cuivre) en parallèle dans la même tranchée ou le même tube que le câble de signal. Outre la sécurité des personnes qui est ainsi garantie, on bénéficie d'un effet réducteur supplémentaire.

Même quand les règles de sécurité le permettent, nous déconseillons de tirer un câble numérique en aérien entre deux bâtiments. La surface de boucle est trop grande pour ne pas poser des problèmes les jours d'orages. De plus, la plupart des câbles blindés informatiques ne supportent pas mécaniquement une pose en aérien (vent, neige collante ou givre). Enfin n'oublions pas que les câbles habituels à isolant alvéolaire (mousse de polyéthylène) ne supportent pas les températures supérieures à 60°C .

Les inspecteurs de sécurité devraient veiller à interdire (sinon à corriger) les règles d'installation baroques que l'on rencontre encore trop souvent. Plusieurs opérateurs se sont électrocutés en France dans les années 1980 et 1990 en intervenant sur du matériel mal installé, l'un d'entre eux en débranchant un connecteur blindé (les matériels d'extrémité étaient reliés à des terres non reliées).

2 Comment améliorer l'équipotentialité ?

L'expérience montre que les problèmes d'équipotentialité sont fréquents : ils sont à l'origine de la majorité des dysfonctionnements. Quand ceci est connu et compris, il devient simple de corriger une installation défaillante.

■ Coordination des masses mécaniques

Rappelons l'organisation souhaitable des masses mécaniques d'un bâtiment, de bas en haut. Laissons le réseau de terre tel qu'il est. Il devrait comporter une ceinture autour du bâtiment et de nombreuses bornes de terre, si possible reliées à un nœud du réseau enterré. Dans le cas contraire, le maillage des masses corrigera ce défaut.

Toutes les structures conductrices (charpentes métalliques) du bâtiment devraient être mises à la terre. Les contacts électriques entre différentes poutres rivetées, même s'ils ne sont pas garantis, conviennent en pratique. Les soudures à l'arc ou par aluminothermie constituent d'excellentes liaisons équipotentielle. Les structures métalliques sont toujours favorables à l'équipotentialité du site, donc à sa CEM.

Toutes les canalisations conductrices doivent être mises à la masse à proximité de leur point d'entrée dans le bâtiment. Tous les câbles externes (énergie, télécommunications) devraient, surtout en site exposé ou sensible, bénéficier d'une protection primaire à forte énergie référencée à la terre en entrée de bâtiment. La protection secondaire sera installée sur la plaque collectrice de l'îlot ou sur la tôle de référence de potentiel de l'équipement final.

Les conducteurs de protection sont des câbles de terre faisant partie de la distribution électrique, nous en parlerons un peu plus bas. Des câbles de terre supplémentaires n'ayant pas la fonction de protection des personnes, donc sans la coloration vert et jaune, devraient mailler en vertical les grands bâtiments.

Rappelons qu'une grille de masse (*Common Bonding Network*, ou CBN, en anglais) compose chaque îlot du site. Chaque baie et châssis, surtout ceux des grandes machines, devrait être relié, si possible en plusieurs points, à la grille de masse locale, sans pour autant se substituer au conducteur de protection. Chaque îlot gagne à être doté d'un point d'entrée unique des câbles externes à l'îlot. Cette tôle, appelée *plaque collectrice*, peut être celle du tableau électrique de l'îlot, ou sa TSP. Un îlot devrait aussi être raccordé à toutes les masses voisines (ceinture de masse, charpentes et huisseries métalliques, gaines métalliques de climatisation, tubes et tuyaux, etc.).

Une ceinture de masse peut améliorer l'équipotentialité de chaque étage, surtout si un îlot y est installé. Cette ceinture devrait être reliée aux conducteurs de

protection et aux câbles de descente des paratonnerres : elle permet de diviser le courant de foudre. La ceinture de masse d'un étage peut être installée à l'intérieur, dans la plinthe, le long des gaines de ventilation ou des tuyaux de chauffage par exemple. Il est bon que les huisseries métalliques soient reliées à la masse de chaque étage.

Enfin d'éventuels paratonnerres peuvent protéger le bâtiment. En fait, une ceinture de masse le long des arêtes de la toiture constitue une protection au moins aussi efficace qu'un paratonnerre, ionisant ou non, disposé ici ou là. Le plus important pour une protection foudre est son aptitude à écouler sans dégâts le courant de foudre à la terre. Les bâtiments à structures métalliques ou en béton armé avec son ferrailage relié au radier ne nécessitent aucun paratonnerre.

Pour les recommandations sur la protection contre la foudre directe, se rapporter au tome 4. La norme EN 50310 définit les liaisons équipotentielles et la mise à la terre des locaux contenant des systèmes de traitement de l'information. Nous pourrions résumer cet exposé en une phrase : dès que deux masses sont proches, on gagne à les relier.

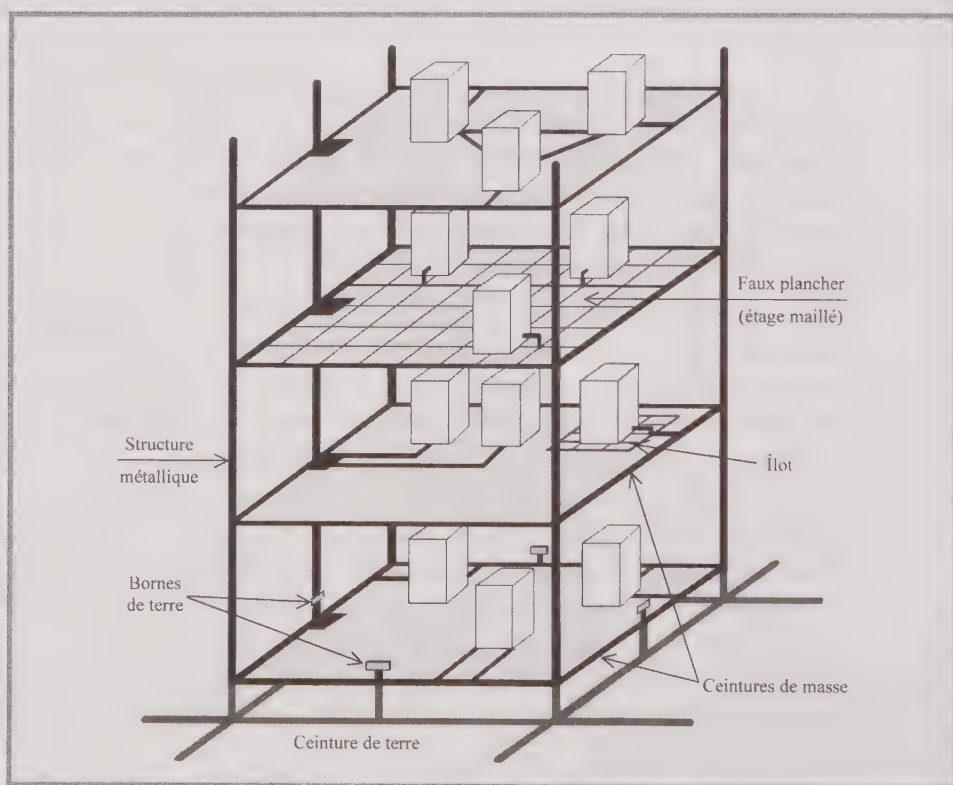


Figure 4.1 – Exemple de bâtiment aux masses maillées.

■ Coordination des masses électriques

Les conducteurs de protections gagnent à rester proche des conducteurs de phase. Ils devraient être maillés à toutes les masses voisines. Rappelons que les PE sont des conducteurs de masse comme d'autres, à ceci près qu'ils sont installés par des électriciens. Ils sont obligatoires et suffisent à garantir la sécurité des personnes. Un bon réflexe est de relier sans hésiter toutes les barrettes de terre de tous les tableaux électriques à la masse locale.

Le même conducteur de protection peut sans risque protéger tous les équipements alimentés par la même ligne d'énergie. La section du PE est normalisée en fonction de la section des phases (35 mm² convient jusqu'à 70 mm² de section de phase, soit plus de 100 kVA en 400 V triphasé).

L'alimentation secteur devrait toujours être filtrée en entrée de baie, sur sa rôle de référence de potentiel. S'il est simple de prévoir de regrouper tous les conducteurs d'un îlot sur une même plaque collectrice à la conception d'un site, câbler avec un point d'entrée unique par îlot est pratiquement impossible en correction. Si un îlot ne dispose pas d'une plaque collectrice, il est important de bien filtrer les baies et de les relier de façon équipotentielle à la grille de masse de leur îlot.

Tout équipement devrait isoler galvaniquement ses conducteurs d'alimentation des masses. C'est obligatoire pour le secteur mais souhaitable en continu. En continu, attention aux grandes distances, si les tensions entre masses risquent de faire sortir les régulateurs de leurs plages nominales de fonctionnement. Attention aussi à la sommation des courants dans les masses qui peuvent se traduire par des surchauffes.

Les batteries 48 V de télécommunications devraient être mises à la terre. Pour des raisons de corrosion, on préfère (en téléphonie) mettre leur + à la terre mais mettre leur - est également possible. Faire flotter les batteries pour permettre un premier défaut n'est acceptable qu'à la double condition d'installer un limiteur de surtensions par rapport à la masse et un contrôleur d'isolement pour signaler un premier défaut (qui devra être rapidement corrigé). Les batteries chargées par un pont de Grätz sans transformateur ne peuvent pas être reliées directement à la terre.

Les entrées/sorties n'ont généralement besoin d'être galvaniquement isolées que pour les câbles susceptibles de supporter de fortes surtensions en mode commun, c'est-à-dire pour les câbles externes. Il est en revanche souhaitable de travailler en différentiel comme les excellentes normes de réseaux locaux numériques (Token Ring, FIP, Ethernet 10 Base T ou 100 Base TX, Giga Ethernet, etc.).

Rappelons que les 0 V numériques devraient être raccordés à la masse de leur châssis en autant de points que possible.

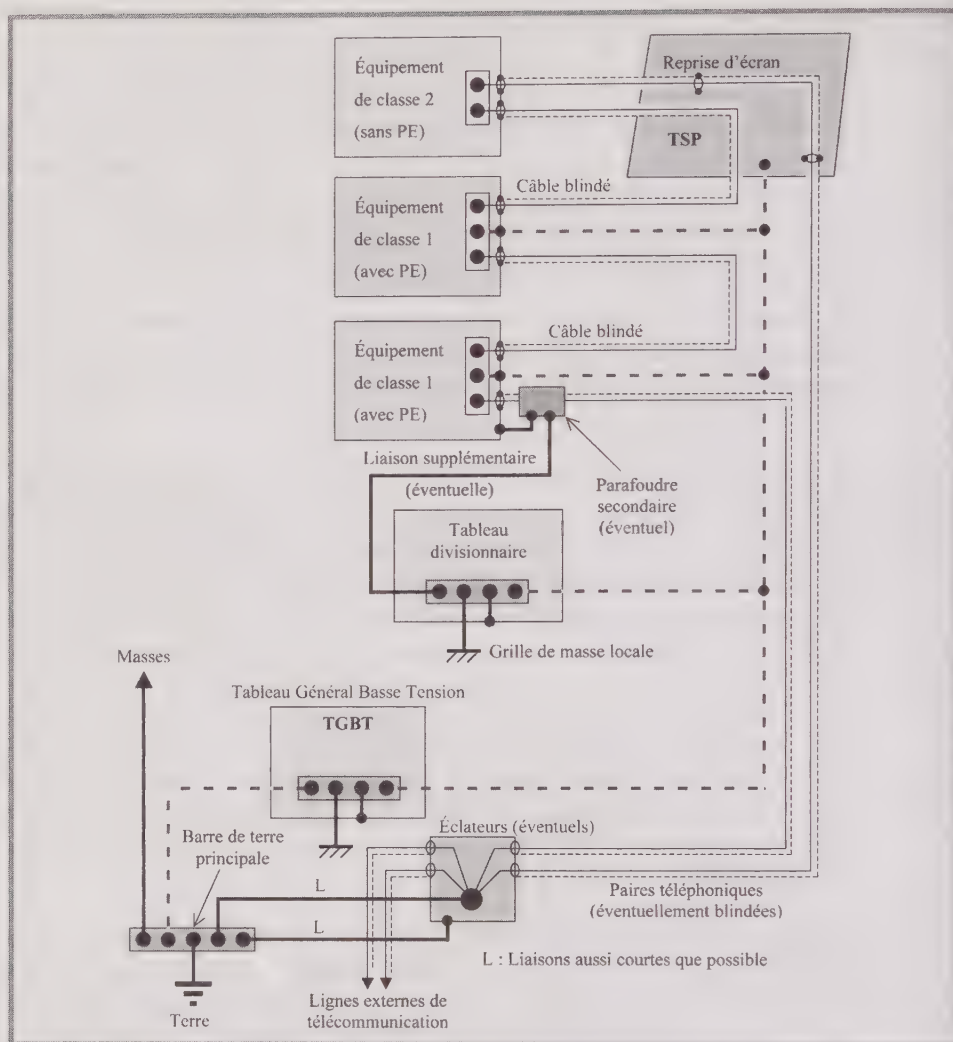


Figure 4.2 – Distribution des conducteurs de terre.

■ Maillage pratique des masses

De manière générale, la façon de mailler les masses importe peu : serrage, vissage, soudage, brasage... Tout contact est bon tant que sa résistance est faible, et qu'elle n'augmente pas dans le temps. Bien qu'un contact électrique soit moins durable en atmosphère chimiquement agressive à cause de la corrosion par un serrage mécanique que par un soudage ou un brasage, des contacts par vis hors du sol suffisent pour que l'équipotentialité reste assurée durant des dizaines d'années.

Les contacts vissés tôle sur tôle sont durables si l'on protège après serrage la peinture décapée (poncée ou grattée) par une reprise de peinture ou de la graisse neutre. De

manière générale, la corrosion n'est pas à craindre si l'on interdit la pénétration entre les surfaces en contact de liquides (eau) pouvant jouer le rôle d'électrolyte. Des rondelles spéciales assurant le contact électrique (éventail, « contact » ou Belleville) sont acceptables.

Les chimistes expliquent que la pression d'un serrage, contrairement à un simple appui, crée une « soudure à froid » qui garantit une faible dérive de la résistance du contact dans le temps. Des griffes spéciales à enfoncer en force sur les poutres métalliques (IPN ou UPN) permettent également des reprises de masse électriques durables.

Un défaut d'une griffe est que sa robustesse mécanique, suffisante à la suspension d'une structure légère (éclairage, petite dalle marine ou câble de terre), ne convient pas à celle des goulottes pleines. Un autre défaut, lors d'un choc de foudre sévère, est qu'une griffe de fixation d'un câble de descente de paratonnerre peut être éjectée (près d'un coude) par la force de répulsion électrodynamique.

Pour des fixations mécaniques robustes garantissant des reprises de masse sur poutre métallique, les rivets « spit » sont acceptables, ainsi que les trous taraudés sans frein-filet. Pour ne pas fragiliser les poutres, la meilleure solution, à la fois électrique et mécanique, est de souder à l'arc des « goujons Nelson ». L'expérience montre que même des poutres peintes sont en contact électrique après leur montage.

Attention aux habitudes mécaniques. Le simple ajout de frein-filet suffit à empêcher un contact entre une vis et un trou taraudé. N'utiliser de « Loctite » que sous forme de frein de tête. Certaines vis ont un revêtement bleu pâle parfaitement isolant et extrêmement résistant. Un ami, excellent spécialiste de CEM, déclare ne plus compter que sur le contact par les têtes de vis et non plus par leur filet. Contrairement à leur apparence, les vis noires sulfatées, type « BTR » (à six pans creux) permettent des contacts durables.

La plupart des ateliers industriels disposent de structures conductrices accessibles. Il suffit d'ajouter de courtes liaisons pour les interconnecter à la masse des îlots. Ce maillage peut presque toujours être effectué sans interrompre le fonctionnement. Les installateurs savent réaliser des maillages de qualité quand on le leur spécifie.

Pour une salle blanche, il est possible d'utiliser le sous-sol technique comme grille de masse. Les tubes, tuyaux et autres canalisations conductrices ne manquent pas. On peut utiliser des colliers (genre « Serflex ») en acier inoxydable pour les liaisons de masse entre tubes voisins. Un fil de 10 mm² suffit dans ce cas. Nous conseillons d'effectuer un maillage vu de haut d'environ 3 m de côté. Quand une maille atteint 4 m de longueur, nous préconisons de la diviser en deux par un conducteur de masse supplémentaire, par exemple un câble de cuivre nu de 16 mm² à 35 mm². Les trappons dans la dalle peuvent servir au passage des conducteurs de liaison entre la masse de chaque machine et la grille de masse.

En salle informatique, en plate-forme et de manière générale dans les salles avec faux plancher, le maillage des masses est simple, efficace et peu coûteux. Un faux plancher peut constituer sur toute la surface de la salle une grille de masse à petites mailles de 60 cm de côté. Un faux plancher avec des dalles dotées en partie inférieure d'une tôle zinguée se comporte généralement comme un plan de masse d'excellente qualité en HF. Dans des sites industriels, le même effet de grille de masse peut être obtenu par les caillebotis.

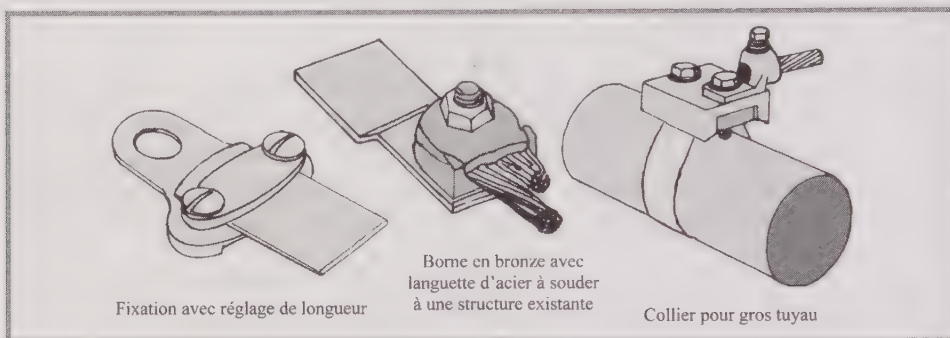


Figure 4.3 – Accessoires de raccordement des masses (hors sol).

Lorsqu'un faux plancher n'offre pas une équipotentialité suffisante, il faut ajouter une grille en câbles de cuivre de 16 mm^2 à 35 mm^2 . Ces câbles peuvent être clipsés par des agrafes spéciales sur les vérins, mais peuvent aussi être vissés (par cosses, Serflex ou boulon fendu) ou brasés. Nous recommandons de mailler chaque trois dalles (soit un nœud pour neuf dalles) donc par une maille de 1,8 m de côté.

Les industries chimiques contiennent tant de tuyaux que leur équipotentialité générale est excellente. C'est ce qui explique leur relative robustesse aux chocs de foudre malgré des installations parfois mal câblées, voire des terres séparées. Les problèmes de foudre sont les plus à craindre dans les bâtiments sans charpentes métalliques, les locaux préfabriqués par exemple.

Concluons en rappelant que le maillage par îlots est un concept minimal, économique, suffisant et sûr. Il nécessite trois types de précautions :

- rendre chaque îlot aussi équipotentiel que possible par un maillage local à petites mailles, lui-même relié à toutes les masses voisines;
- router les câbles entre îlots avec effet réducteur. Les goulottes métalliques vissées de bout en bout apportent un excellent effet réducteur, presque aussi bon que celui d'un surblindage;
- raccorder dans la mesure du possible les câbles et canalisations conductrices des équipements à une plaque collectrice ou une *transient suppression plate* (la TSP de la figure 4.2). Cette tôle peut aussi servir de plaque collectrice si elle est située au point d'entrée de tous les câbles externes à l'îlot.

En pratique, il y a peu de difficulté pour décomposer un site en îlots. Certains îlots seront réduits à une baie contenant tous les équipements, d'autres couvriront toute la surface d'une salle. Dans l'industrie, les îlots sont souvent des groupes d'équipements de contrôle-commande et des machines-outils associées.

S'il est souvent possible de regrouper tous les câbles externes d'un îlot sur une plaque collectrice, il est peu probable qu'il en soit de même pour toutes les canalisations : des points d'entrée éloignés sont inévitables. Ceci n'est pas grave si l'on veille à densifier le maillage des masses au voisinage des points d'entrée, dont les connexions aux conducteurs de descente des paratonnerres, habituellement installés contre la face externe du bâtiment.

Les câbles de descente du système de protection foudre devraient être connectés aux masses internes du bâtiment à chaque étage, au faux plancher d'une salle informatique en particulier. S'il n'y a pas d'hubriserie métallique pour ces liaisons, il faut forer le mur (vers le bas afin que les eaux de ruissellement ne pénètrent pas) et installer une liaison courte entre le câble de descente et les masses internes.

3 Quels effets réducteurs utiliser ?

À cette question, notre réponse est simple : utilisons tous les effets réducteurs gratuits à notre disposition. Et pour ce qui coûte, n'ajoutons que ce qui est nécessaire, où c'est nécessaire. Les points à améliorer sont faciles et rapides à mettre en évidence par le test de transitoires rapides en salves (CEI 61000-4-4).

Une règle que nous avons hésité à proposer parmi nos dix règles de base est celle de permettre aux courants de mode commun de circuler librement en parallèle avec chaque câble, à son voisinage immédiat. Si une telle règle est assez simple à respecter en environnement informatique ou industriel, elle ne l'est pas en bureau-tique : il est impossible de blinder les câbles d'alimentation et d'assurer une reprise de masse correcte au niveau des prises secteur.

■ Effets réducteurs déjà à notre disposition

En industrie, des goulottes conductrices existent déjà. En micro-informatique, tous les composants d'un système personnel (composé d'un micro-ordinateur, un écran, une imprimante et de divers périphériques) devraient être alimentés par la même prise de courant. Ceci limite la surface des boucles de masse entre équipements, avec retour par le conducteur PE.

Pour les équipements en réseaux, une erreur fréquente est d'éloigner le câble du réseau local des câbles d'alimentation. Nous conseillons au contraire de tirer les câbles de réseaux locaux et d'énergie dans les mêmes plinthes ou moulures, au voisinage des fils secteur : cela réduit les surfaces des boucles de masse. Les problèmes de

diaphonie en mode commun ne sont pas à craindre grâce aux écrans des câbles blindés informatiques.

Une erreur classique est d'installer les câbles de puissance sous le faux plancher et les liaisons de signaux (numériques ou à bas niveau) dans le faux plafond. On crée de la sorte de très grandes boucles de masse. Tous les câbles (de toutes familles) devraient être posés sous le faux plancher.

Les effets réducteurs dans le câblage interne aux machines sont possibles. Il s'agit tout d'abord de câbler en paires et non en conducteur unifilaire. Ensuite, il est simple de plaquer les faisceaux contre les structures conductrices de la machine. À la transition entre deux structures métalliques, un contact électrique (une tresse d'accompagnement par exemple) doit permettre aux courants longitudinaux de circuler librement dans la masse près du câble. Attention en particulier aux fentes dans les masses, orthogonales aux câbles, qui violent le principe du retour des courants de mode commun tout près des câbles protégés.

Pour obtenir un effet réducteur en environnement industriel, il suffit la plupart du temps d'ajouter quelques vis, après avoir gratté la peinture. Il convient, sur un équipement numérique à problèmes, de raccourcir toutes les « queues-de-cochon » (fils de reprise) en série avec les écrans des câbles. Le mieux est encore de laisser en place le fil de reprise et de serrer grâce à un cavalier la tresse sur une tôle dès l'entrée d'équipement. Attention à l'éventuelle feuille transparente (type cellophane) qui entoure l'écran et risque de l'isoler du cavalier et de la tôle.

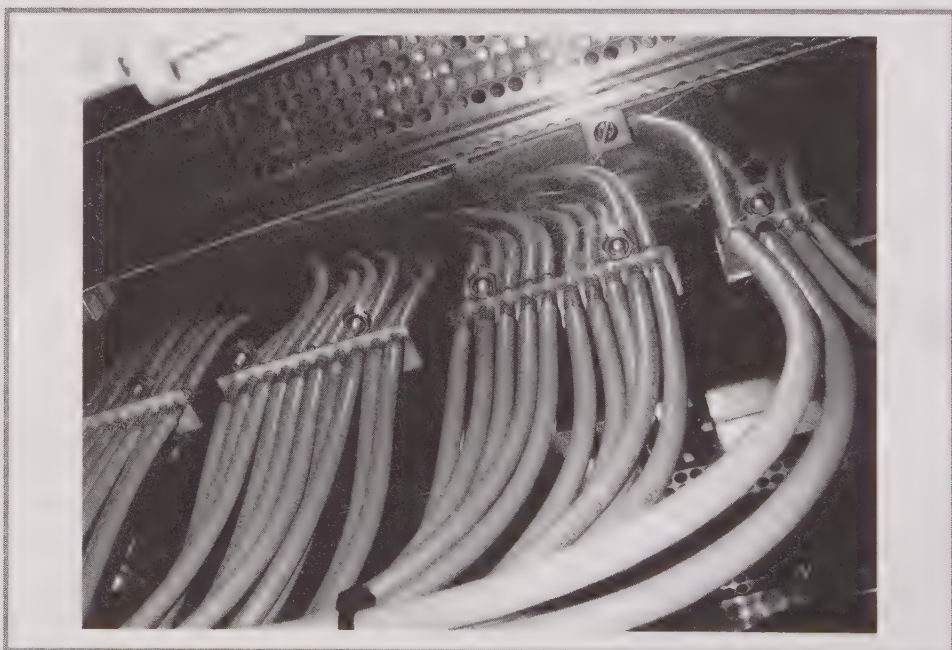


Figure 4.4 – Exemple de reprise d'écran de câbles blindés en entrée de baie.

Une bonne façon de connecter l'écran d'un câble à la masse est d'utiliser un connecteur avec reprise périphérique (un sub-D étamé avec des doigts de contacts périphériques est excellent). Lorsque le câble blindé n'a pas besoin d'être amovible, un presse-étoupe avec reprise de masse sur 360° fait merveille (voir tome 3).

Lorsque l'on utilise un câble commun et long pour distribuer deux paires dont l'amplitude des signaux nominaux est très différente (une paire d'alimentation alternative en 230 V et une paire de commande d'un petit relais par exemple), il est astucieux de câbler en « quarte étoile » pour limiter la diaphonie différentielle. Si l'on peut disposer d'un câble spécifique, il est possible d'utiliser deux paires torsadées « S-Z » (avec des sens de torsades opposés).

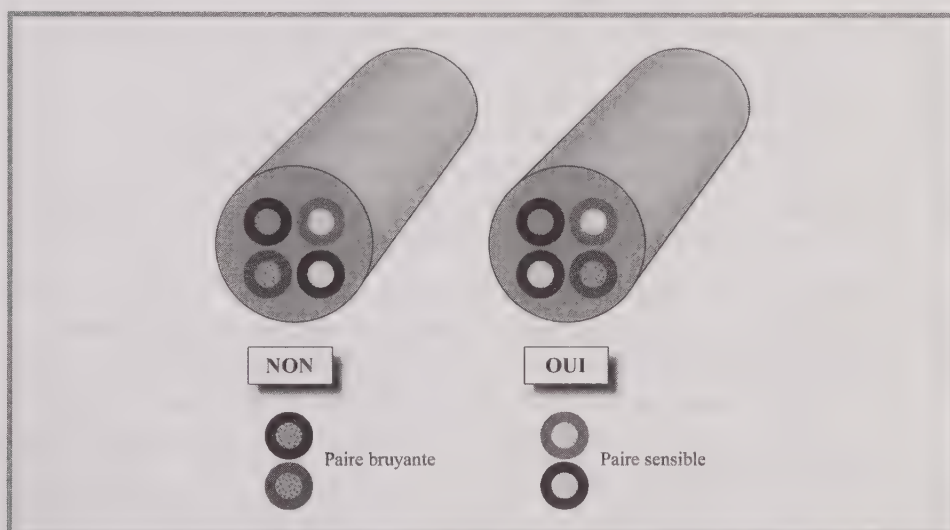


Figure 4.5 – La géométrie de la « quarte étoile » annule la diaphonie en MD.

■ Effets réducteurs à ajouter

En bureautique, une *transient plate* peut fournir la référence de potentiel à l'ensemble des équipements installés sur un bureau ou dans son voisinage immédiat. Un faux plancher conducteur limite la surface apparente des boucles de masse par son effet réducteur en champ.

Quand une plaque collectrice sert de référence de potentiel commun à tous les câbles externes à un îlot, il est astucieux de l'installer au voisinage du tableau électrique de l'îlot. Ce tableau ne devrait pas être trop éloigné des équipements, disons qu'il devrait être installé dans le même local. Il est clair qu'en aval de la plaque collectrice, il convient d'éviter de former des boucles de masse de grande surface.

Un autre problème apparaît pour un périphérique déporté. Il est difficile de garantir une faible surface de boucles entre les câbles secteur et signaux. Le mieux serait d'alimenter le périphérique déporté par un câble secteur tiré près du câble de signal; mais cela bouscule nos habitudes et coûte plus cher que de l'alimenter à partir de la prise la plus proche.

Lorsque cela est impossible, il existe une autre technique de réduction : les ferrites et les inductances de mode commun. Un ferrite (ferrite est du genre masculin) sur un câble réduit les courants de mode commun HF qui y circulent. Des ferrites sont composés de 2 demi-tores dans une coquille de maintien en plastique; ils sont faciles à ajouter après coup autour d'un câble. Diverses dimensions sont disponibles (chez Fair-Rite, Kitagawa, Stewart ou Würth).

L'effet réducteur d'un ferrite avec un seul passage atteint à peine un petit facteur 2 au-delà de 10 MHz. Il est possible d'atteindre un facteur 5, voire un peu mieux, en effectuant plusieurs passages dans le même tore. Ajouter des tores comme des grains de chapelet est excellent aux hyperfréquences, mais pour atteindre typiquement un facteur 5, il est nécessaire d'enfiler une dizaine de tores. Un câble protégé par du ferrite gagne en HF à être plaqué contre un plan de masse, au moins sur 50 cm de part et d'autre du tore de ferrite.

L'ajout de tores de ferrite sur les câbles est pratiquement la seule solution pour durcir des petits équipements sensibles en boîtier plastique, c'est-à-dire ne disposant pas de tôle de référence de potentiel. Si l'on ne souhaite effectuer qu'un seul passage dans un tore (un câble blindé est trop gros et surtout trop raide pour faire plusieurs tours), il faut choisir un tore avec un diamètre interne juste adapté à celui du câble.

L'utilisation d'effets réducteurs est particulièrement efficace pour le câblage des machines utilisant des hautes tensions (disons au-delà de 10 kV, donc avec risques d'amorçages). Il peut alors devenir nécessaire de surblinder les câbles tant internes qu'externes à l'équipement.

Surblinder un câble ou un faisceau est moins difficile qu'il ne semble. Des tubes tressés de blindage avec écrous sertis à chaque extrémité, ou avec presse-étoupe conducteurs, sont disponibles chez Radialex et chez Erico. Ces tuyaux souples sont utiles pour de faibles longueurs de surblindage, jusqu'à 3 m.

Pour des longueurs jusqu'à 3 m ou 4 m, des gaines pouvant se refermer autour d'un faisceau de câbles sont assez commodess bien que coûteuses et pas très faciles à relier à la masse sans « queue-de-cochon ». D'origine américaine sous la marque Zippertubing, des gaines similaires sont disponibles chez Jacques Dubois : la fermeture à glissière y est remplacée par du velcro.

Enfin du tricot de fil conducteur (du monel) est utilisable pour « momifier » un câble. Il se présente sous formes de rouleaux de 10 m ou plus. Il convient de bien

tendre le tricot afin d'assurer une bonne continuité électrique longitudinale. Si la tension du tricot est insuffisante, l'effet de blindage disparaît.

■ Combien coûtent maillages et effets réducteurs ?

Pour évaluer le coût du maillage d'un îlot, nous tablons par expérience sur une durée moyenne de 20 min de main-d'œuvre par connexion ajoutée. Par *connexion*, nous entendons le percement de deux trous dans des tôles voisines, le grattage de la peinture (sauf si la tôle est électrozinguée), la préparation de la tresse, le serrage des vis et la protection finale contre la corrosion. Au coût de la main-d'œuvre, il convient d'ajouter celui, plus faible mais non négligeable, des tresses et des cosses.

Pour fixer les idées, en 2005, le coût global du maillage des masses d'un petit central téléphonique de classe 4 (centre rural pour quelques milliers d'abonnés, sur un seul étage, d'une surface d'environ 50 m²) par du personnel moyennement qualifié mais bien entraîné était de l'ordre de 6 k€. Le coût du maillage d'une salle blanche de 1 000 m² était de l'ordre de 15 k€. Celui d'une salle informatique de 300 m² de 8 k€. Le coût du maillage d'un robot industriel et de son système ne dépassa pas 2 k€. Les coûts annoncés sont globaux, matière et main-d'œuvre.

Dans un cas représentatif des problèmes industriels, si le maillage est effectué lors de l'installation, nous estimons que le maillage coûte environ 10 fois moins cher. Le coût du maillage et de l'installation de connecteurs pour câbles blindés (ou de cavaliers) est tout à fait négligeable devant le coût du matériel.

Pour raisonner sans biais, ce n'est pas le coût du système qu'il faut prendre en compte, mais celui des dysfonctionnements. Nous connaissons de nombreux exemples pour lesquels les coûts des perturbations électromagnétiques ont excédé celui des matériels défaillants. Par exemple, si le dysfonctionnement d'un automate mal conçu et mal installé risque de faire perdre le contenu d'un réservoir de 100 m³ d'un liquide à 2 €/l, ce serait une erreur de comparer le coût des corrections à celui de l'automate.

Dans tous les cas ci-dessus, le maillage des masses et l'utilisation d'effets réducteurs ont suffi à résoudre les problèmes de perturbations (souvent aléatoires) qui ont déclenché les corrections. Pas un centime pour la modification du réseau de terre ne fut gaspillé. Le coût du maillage des masses fut amorti en quelques mois : mailler les masses est rentable.

Le temps de retour du maillage par îlots d'un système est en moyenne de l'ordre d'un an. Il suffit en effet que la foudre tombe à proximité d'un système mal câblé pour détruire des cartes d'interface. Le coût des pertes, directes et induites, correspond souvent à plus de 10 fois celui du maillage des masses. Cela signifie qu'il suffit que la foudre tombe près du site une fois tous les dix ans pour amortir le maillage en moyenne sur un an. Portons cette information à la connaissance des décideurs.

4 Florilège des idées reçues sur les terres et les masses

Nous avons tenté de recenser les confusions et les erreurs les plus fréquentes en CEM sur les terres et les masses. Un corrigé est proposé après chaque affirmation erronée. Les affirmations erronées sont introduites par la lettre A, elles sont suivies de leur correction précédée de la lettre C.

A Une terre est importante en milieu industriel car elle évacue les courants de fuite des équipements.

C Non ! Les industries sont alimentées en schéma IT ou en TN. Les courants de fuite (dont ceux des filtres antiparasites) passent dans les PE, mais ne s'évacuent pas dans la terre : ils se referment au neutre. Un courant de fuite ne passe dans la terre qu'en schéma TT, quand la terre du neutre n'est pas reliée à celle des masses.

A Plus une terre évacue du courant, plus sa résistance doit être faible.

C Une terre n'évacue que les courants externes, dont le courant de foudre direct. Mieux vaut une résistance de $10\ \Omega$ avec une surface de contact de $10\ \text{m}^2$ qu'une résistance de $2\ \Omega$ avec une surface de contact de $0,1\ \text{m}^2$. Si un courant important devait être évacué, le premier réseau résisterait, le second risquerait de vitrifier le sol.

A Un courant évacué dans le sol y est dissipé.

C Les courants ne se dissipent pas : ils suivent la loi de Kirchhoff. Un courant qui entre quelque part en ressort obligatoirement. Tout courant évacué dans la terre se propage obligatoirement dans un circuit le long duquel il peut agir et être mesuré.

A Une terre indépendante réduit les risques de dysfonctionnement.

C C'est le contraire ! Des terres séparées sur un site sont nuisibles et dangereuses. Par chance deux terres voisines sont couplées, c'est-à-dire pas tout à fait indépendantes, mais leur couplage dépend de l'humidité du sol. Toutes les masses accessibles doivent être reliées à la même terre, c'est heureusement la loi.

A Une terre propre est nécessaire aux électroniques.

C Une terre propre n'existe pas ! Une terre qui n'évacuerait jamais de courant mériterait d'être supprimée. En outre, plus une terre est séparée, plus son potentiel peut être différent de celui des masses, donc plus elle est sale !

A Si la terre est bonne, il faut y raccorder les masses en étoile.

C Non ! Quelle que soit la résistance de terre, il est nécessaire de mailler les masses pour garantir une bonne équipotentialité entre équipements interconnectés.

- A Il faut raccorder la masse de chaque équipement à la terre par un conducteur dédié, isolé des masses, raccordé en étoile sur la borne de terre.**
- C Non !** Le câblage en étoile est mauvais pour les équipements interconnectés car il crée entre eux une grande boucle de masse et une grande impédance commune.
- A Si la terre est trop impédante, l'électronique risque d'être perturbée.**
- C** Les équipements ne sont jamais perturbés par une forte résistance de terre. Heureusement pour les avions ! Mais l'équipotentialité est essentielle.
- A Il ne faut pas raccorder la terre informatique à la masse du bâtiment.**
- C** Au contraire ! Pour garantir l'équipotentialité, il importe de raccorder la terre informatique à la masse du bâtiment ainsi qu'aux masses (faux plancher de la salle informatique). Chaque baie devrait être connectée au plus court à la grille de masse.
- A Pour qu'il fonctionne, il faut connecter un écran à la terre.**
- C** Pour qu'il fonctionne en HF, il faut connecter un écran au plus court à la masse de l'équipement ; mais pas à la terre, trop éloignée. Attention au vocabulaire !
- A Si la terre n'est pas bonne, les limiteurs de surtensions fonctionneront mal.**
- C** Les limiteurs de surtensions connectés au plus court au potentiel des masses fonctionneront même si la terre est « mauvaise ». Ce n'est que si la masse n'est pas assez équipotentielle que les parafoudres protègent mal des surtensions.
- A On ne peut pas raccorder les éclateurs des lignes de télécommunication à la terre de l'utilisateur si l'alimentation EDF est protégée par la même terre.**
- C** Il faut bien sûr raccorder les éclateurs des lignes de télécommunication au même potentiel que les protections des lignes d'énergie. Chez le particulier, le meilleur potentiel commun est celui de la barrette de terre du tableau électrique.
- A Si les normes de sécurité ne l'interdisaient pas, il serait bon de réaliser des terres indépendantes, isolées entre elles.**
- C** Curieux, des terres galvaniquement isolées ! Même s'il était possible de les réaliser, l'équipotentialité serait évidemment moins bonne qu'avec une seule terre.
- A Une bonne terre doit faire moins de 10 Ω (ou 50 Ω , ou 25 Ω , ou 20 Ω , ou 15 Ω , ou 8 Ω , ou 5 Ω , ou 3 Ω , ou 2 Ω , ou 1 Ω , ou n'importe quelle autre valeur).**
- C** Une bonne terre doit garantir au site une bonne équipotentialité, c'est tout, et ce n'est pas si facile, surtout si les masses ne sont pas maillées. Il n'y a qu'en TT, lorsque les terres du neutre et des masses ne sont pas reliées (le plus mauvais des schémas), qu'une valeur maximale peut se justifier de façon théorique.

A Quand le sol n'est pas bon, on peut réaliser une prise de terre à une certaine distance (!).

C Tout conducteur est inductif (environ $1 \mu\text{H/m}$), ainsi plus la prise de terre est éloignée, moins elle contribue à l'équipotentialité, et moins elle est utile.

A Quand le sol n'est pas bon, on peut le saler.

C C'est vrai ! On abaisserait localement la résistivité du sol, donc la résistance de la prise de terre, mais à quoi bon ? Le sel accélère la corrosion, pollue le sol et disparaît avec le temps. Restons donc au régime sans sel !

A Les paratonnerres doivent avoir une terre indépendante.

C Pour limiter les risques d'amorçage entre les conducteurs de descente et la masse, les paratonnerres doivent être reliés à l'unique terre du site. Relions toutes les terres du site; c'est une obligation pour des masses simultanément accessibles.

A En CEM le problème le plus fréquent est la « remontée de terre »

C Par rapport à quoi la terre remonterait-elle, si elle est unique ? Un potentiel absolu n'existe pas; seules existent des différences de potentiel (d.d.p.). La CEM nécessite avant tout une bonne équipotentialité.

A Une bonne cage de Faraday doit avoir une bonne terre.

C Un blindage isole l'intérieur de l'extérieur en champs et en courants, quel que soit le potentiel extérieur de son enveloppe. Raccorder les chambres blindées aux masses voisines évite de s'électrocuter en y entrant, c'est tout. Il existe d'ailleurs des cages de Faraday dans des avions !

A Une terre doit être bonne jusqu'à au moins 100 MHz.

C Une résistance de terre n'a physiquement de sens qu'en dessous de quelques mégahertz (la notion de d.d.p. perd son sens à plus d'un dixième de longueur d'onde). Même au sens du contrepois d'une antenne fouet, sa mesure par rapport à une terre lointaine nous indiffère : seules les pertes locales importent.

A Il faut relier les masses à la terre par des connexions à basse impédance en hautes fréquences.

C Nous n'aurions rien contre, si c'était possible ! Il est déjà difficile de conserver une bonne équipotentialité HF aux masses des îlots. Tout conducteur longiligne devient inutile en HF, quand sa longueur dépasse $\lambda/30$.

A Il ne faut pas raccorder la référence propre des circuits électroniques (le « 0 V ») à la masse sale.

C Une masse est sale si elle n'est pas équipotentielle. Il est souhaitable que les cartes soient référencées au potentiel du châssis, au moins à cause du couplage capacitif carte à châssis. Rappelons (voir tome 1) qu'une carte électronique supporte mal les forts $\Delta U/\Delta t$ par rapport à son environnement.

- A** Si à la conception un équipement fonctionne mieux avec son 0 V raccordé au châssis, c'est parce la masse du laboratoire est propre.
- C** Dans tout environnement, un équipement fonctionne partout mieux avec son 0 V relié au châssis. Il faut convenir d'assurer des points de reprise de masse près des points d'entrée des courants HF.
- A** Quand la masse est sale, il faut faire flotter tous les 0 V.
- C** Seules les interfaces longues (des dizaines de mètres) gagnent éventuellement à être galvaniquement isolées. Le 0 V principal des équipements numériques devrait être relié à la masse du châssis en autant de points que possible.
- A** Un raccordement des masses en étoile supprime les boucles de masse.
- C** C'est l'inverse ! Pour des fonctions ou des équipements interconnectés, relier les masses en étoile réalise de grandes boucles de masse, ce qui est mauvais.
- A** Il faut raccorder les masses comme les lignes d'alimentation, c'est-à-dire en étoile autour du transformateur (ou du TGBT).
- C** Cette confusion est fréquente ! Si la distribution des phases en étoile à partir du TGBT réduit l'impédance en mode différentiel entre des circuits différents, câbler les masses d'équipements interconnectés par leurs seuls PE augmente les tensions de mode commun (par rapport au raccordement direct au réseau de masse maillé).
- A** Il faut relier les 0 V analogique et numérique en étoile autour de l'alimentation pour minimiser l'impédance commune.
- C** C'est l'inverse ! Relier les 0 V analogique et numérique en étoile autour de l'alimentation réalise une grande impédance commune : cela permet aux courants numériques de se refermer *via* l'analogique ! Il faut relier les 0 V analogique et numérique au plus court, c'est-à-dire au niveau de l'étage de conversion.
- A** Il faut relier les 0 V analogique et numérique en étoile autour de l'alimentation pour éviter la boucle de masse.
- C** Pour réduire la surface de boucle de masse, il faut alimenter le 0 V analogique à partir du 0 V numérique, mais pas le câbler en étoile depuis l'alimentation.
- A** Il faut raccorder le 0 V à la terre propre et pas à la masse sale.
- C** Aucun potentiel n'est « propre » en soi. La terre est plus éloignée des circuits que le réseau de masse, donc elle est moins équipotentielle que lui, donc plus sale !
- A** Si on maille les masses, comment garantir la sécurité des personnes ?
- C** Quand la sécurité est assurée par les PE, et il le faut, elle l'est encore mieux avec des conducteurs d'interconnexions supplémentaires entre masses.

A Il faut raccorder les masses à la terre uniquement par le conducteur de protection pour ne pas faire de boucle de masse.

C En maillant les masses on réalise des boucles entre masses, ce qui est favorable. Il faut raccorder les masses entre elles aussi souvent que possible.

A Un câble de terre unique empêche les boucles de masse.

C Faux ! Qu'on le veuille ou non, il y a autant de boucles de masse que de câbles.

A Un gros fil vert et jaune suffit bien.

C Pour la sécurité à 50 Hz, oui. Pour éviter les dysfonctionnements, non !

A Si on connecte une goulotte aux deux bouts, on fait une boucle de masse.

C Non ! On crée ainsi une boucle entre des masses, ce qui est favorable. De plus, les câbles bénéficient d'un effet réducteur en HF pouvant dépasser un facteur 30.

A Il faut éloigner le plus possible les câbles numériques des câbles d'énergie.

C C'est une erreur fréquente en bureautique, avec l'alimentation dans la plinthe et le câble du réseau local dans le plafond. La boucle de masse par rapport au vert et jaune est alors monumentale (attention au champ de la foudre). Au contraire, des câbles bien blindés peuvent côtoyer les fils secteur sans problème.

A Il ne faut pas relier les goulottes propres aux goulottes sales.

C Une goulotte n'est propre ou sale qu'à l'intérieur. La diaphonie entre goulottes est négligeable, même si elles sont proches et reliées. On devrait mailler de façon systématique les masses des goulottes entre elles ainsi qu'aux masses voisines.

A Il ne faut pas rapprocher une goulotte propre d'une machine sale.

C Heureusement qu'on le peut, sinon comment ferait-on ? Il n'y a aucun risque à relier la masse d'une machine « sale » à une goulotte « propre ».

A La plaque collectrice d'un îlot représente le centre d'une étoile, donc si une plaque collectrice est favorable, une distribution en étoile est favorable.

C Il n'y a que sur une plaque (collectrice) que l'on sait rendre plusieurs conducteurs bien équipotentiels entre eux. Les câbles « nettoyés » entre la plaque collectrice et les équipements doivent rester proches de la masse. L'îlot doit aussi rester bien équipotentiel, donc maillé; un tel maillage n'est pas une étoile.

A Les inductances mutuelles entre câbles sont défavorables.

C C'est vrai entre deux câbles; mais c'est faux entre un câble et un conducteur de masse. La mutuelle inductance est même à la base de l'effet réducteur.

A Si on maille les masses on ne sait pas où vont passer les courants.

C Si, dans les masses ! Inversement, si l'on ne maille pas les masses, on sait bien où passeront les courants de mode commun HF : dans les câbles utiles !

A Les règles de sécurité des personnes vont à l'encontre de la CEM.

C Non, à quelques rares exceptions près (le courant de fuite maximal des filtres des équipements par exemple). Les normes de sécurité vont globalement dans le même sens que la CEM : l'équipotentialité ! Les règles de sécurité sont insuffisantes puisqu'elles ne garantissent l'équipotentialité qu'aux fréquences basses.

A Nous connaissons les règles de l'art, alors le maillage des masses...

C Certes, les « règles de l'art » des installateurs conviennent aux équipements électrotechniques et à la rigueur à certains équipements analogiques, mais sûrement pas aux équipements numériques ou à découpage. Les bonnes normes de CEM, dont la CEI 61000-5-2, ne disent rien d'autre.

A Nous pourrions trouver au moins cent personnes pour prétendre le contraire de ce que vous affirmez dans ce bouquin.

C Pour le prétendre, sans doute !... Pour le prouver, il suffirait d'un seul cas, et d'une seule personne. Même si la CEM n'exige pas la perfection, le respect des conseils de ce manuel permet d'obtenir un bon fonctionnement de tous les systèmes, même si leur CEM a été mal conçue l'origine.





EXIQUE

Barrette (borne ou plaque) de terre : Borne permettant de relier, hors du sol, les conducteurs de terre (de masse, de protection, de parafoudres...) à la prise de terre.

Basses fréquences (BF) : Dans ce manuel, nous qualifions de BF la gamme des fréquences inférieures à 1 MHz environ.

Blindage (ou écran électromagnétique) : Enveloppe conductrice isolant l'une de l'autre deux régions (l'intérieur de l'extérieur) contre les champs. Il sert aussi et surtout de référence de potentiel aux filtres d'entrées/sorties et aux câbles blindés.

Boucle de masse : Surface entre un câble et la masse la plus proche. Les boucles de masse sont inévitables parce qu'il y en a autant que de câbles. Ce sont des antennes involontaires dont il est favorable de réduire la surface.

Boucle entre masses : Surface entre des conducteurs de masse le long desquels des courants électriques peuvent circuler librement. Les boucles entre masses sont favorables, surtout si elles sont nombreuses (si les masses sont bien maillées).

Câble externe : Nous appelons *câble externe* tout câble électrique reliant un équipement à l'extérieur du bâtiment (câble d'énergie ou de télécommunication en général). Un câble externe peut supporter des courants externes en mode commun.

Câble interne : Un câble interne est un câble installé à l'intérieur d'un même bâtiment. Un câble interne est beaucoup moins exposé aux surtensions énergétiques (aux perturbations longues) qu'un câble externe.

Canalisation enterrée : Canalisations enfouies sous la surface du sol dont l'enveloppe extérieure est en contact avec la terre.

Champ électrique : Vecteur, noté E , lié à la tension entre deux conducteurs. Il s'exprime en volts par mètre (V/m). L'effet principal d'un champ E variable est d'induire un courant dans les conducteurs exposés à ce champ.

Champ magnétique : Vecteur, noté H , rayonné par la circulation d'un courant. Il s'exprime en ampères par mètre (A/m). L'effet principal d'un champ H variable

est d'induire une tension (une « force électromotrice ») dans les boucles de câblage.

Chute de potentiel (méthode de la...) : Méthode de mesure de la résistance d'une prise de terre. Elle est simple et plutôt meilleure que les autres.

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.

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 d'équipotentialité : Conducteur de protection assurant une liaison équipotentielle. Des liaisons équipotentielles locales peuvent, même si ce n'est pas souhaitable, ne pas être reliées à la terre.

Conducteur de protection (symbole PE) : Conducteur de coloration vert et jaune destiné à relier les masses afin de garantir la sécurité des personnes contre les chocs électriques.

Conducteur (ou 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 ou la terre, nous préférons parler de *masse électronique* ou, pour simplifier, de *0 V*.

Conducteur de terre : Conducteur de faible résistance entre une borne de terre et une prise de terre. Un conducteur de terre n'est donc pas enterré. Les conducteurs de protection et de descente sont des conducteurs de terre particuliers.

Contrôleur permanent d'isolement (ou CPI) : Appareil chargé de signaler, en schéma IT, un premier défaut d'isolement entre une partie active et la « terre » (la masse).

Coordination des protections : Mise en œuvre de plusieurs dispositifs, en série ou en parallèle, de manière à compenser les défauts des uns par les qualités des autres.

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 : par impédance commune, par couplage capacitif, par diaphonie inductive, par diaphonie capacitive, par champ magnétique à boucle et par champ électrique à fil. Des couplages élémentaires peuvent agir simultanément, en série ou en parallèle.

Courant externe : Courant électrique qui entre (ou sort) en mode commun dans un site. Les courants externes sont ceux de mode commun sur des câbles externes, d'un coup de foudre direct, et ceux induits sur des conducteurs par un champ électrique externe. Seuls les courants externes d'un site s'écoulent dans la terre.

Courant tellurique : Courant électrique continu de faible valeur qui circule naturellement dans le sol, principalement dans le sens ouest-est. Ce courant circule aussi le long des conducteurs enterrés, surtout ceux de grandes longueurs, dont il peut accélérer la corrosion.

Défaut : Dysfonctionnement provoqué par une perturbation électromagnétique. En CEM, ce mot n'est pas synonyme de défaut d'isolation.

Effet réducteur : Réduction des perturbations HF par la proximité du conducteur exposé 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 l'amplitude collectée par le même câble blindé ou installé contre un conducteur de masse.

Grille de masse : Zone où des conducteurs de masse sont maillés afin d'améliorer l'équipotentialité des équipements qui y sont raccordés.

Hautes fréquences (HF) : Par commodité nous qualifierons de HF un signal dont les fréquences significatives s'étendent au-delà de 1 MHz environ.

Îlot : Zone à forte densité d'équipements dont les masses sont soigneusement maillées. Un îlot devrait être équipotentiel et être doté d'une plaque collectrice.

Immunité : Aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner sans dégradation en présence d'une perturbation électromagnétique.

Impédance (électrique) : Rapport de l'amplitude d'une tension à celle d'un courant. Elle se compte en ohms (Ω). L'impédance d'un conducteur en BF est une résistance en série avec une réactance selfique; en HF des résonances apparaissent.

Inductance (ou self-inductance, ou self) : Une inductance génère entre ses bornes une tension égale au produit de son inductance par la variation (en ampères par seconde) du courant qui la traverse : $U = L\Delta I/\Delta t$. Notée L , une inductance se mesure en henrys (H).

Induction (ou densité de flux magnétique) : C'est le produit du champ magnétique H par la perméabilité magnétique μ du milieu. Notée B , elle s'exprime en teslas (T).

Installation de protection foudre (IPF) : Ensemble des dispositifs intérieurs et extérieurs utilisés pour la protection d'une installation contre la foudre. Il se compose généralement de paratonnerres, des conducteurs de descente, du réseau de terre, du réseau de masse et de limiteurs de surtensions.

Liaison asymétrique (*single ended* en anglais) : Liaison composée d'un conducteur de signal et de son retour relié directement au 0 V. Une liaison asymétrique rejette moins bien les perturbations de mode commun qu'une liaison symétrique.

Liaison symétrique (*balanced line* ou *differential link* en anglais) : Transmission bifilaire terminée par un récepteur à forte réjection du mode commun. Elle peut être galvaniquement isolée ou non.

Longueur d'onde : Distance, notée λ , au bout de laquelle un signal périodique à une vitesse v se trouve déphasé d'une période T ($\lambda = vT$). Une longueur d'onde dans l'air se calcule par la relation (en mètres) : $\lambda = 300/F$, où F est exprimée en mégahertz (MHz).

Maillage par îlots : Installation des équipements électroniques dans des îlots et routage des câbles entre ces îlots avec effet réducteur. Le maillage par îlots est un moyen de protection économique et sûr, en particulier pour les grands sites.

Masse : Partie conductrice d'un matériel électrique susceptible d'être touchée et qui peut être mise « 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.

Masse d'accompagnement : Conducteur ou structure de masse qui accompagne, de bout en bout, un câble qui est alors protégé par effet réducteur.

Masse fonctionnelle : Voir *Conducteur de référence*.

Masse mécanique : Ensemble des parties conductrices des équipements, c'est-à-dire proches des circuits électroniques (coffret, châssis, etc.).

Masse de protection : Masse mécanique accessible au toucher; donc reliée à la terre.

Masse de sécurité : Masse mécanique accessible des équipements, par opposition à la masse fonctionnelle. On dit aussi *masse mécanique*.

Mise à la masse : Raccordement équipotentiel de deux masses entre elles.

Mise à la terre : Raccordement d'un conducteur de terre au réseau de terre pour y évacuer un courant externe (dans le cas contraire, mieux vaudrait mailler les masses).

Mode commun (MC) : Un courant de mode commun circule dans le même sens sur tous les conducteurs d'un câble. La tension 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*, *mode parallèle* ou *mode asymétrique*.

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 pas dans les masses. Une tension de MD se mesure entre le conducteur signal et son retour. Le mode différentiel est aussi appelé *mode normal*, *mode symétrique* ou *mode série*.

Mode dissymétrique (ou non symétrique) : Perturbation qui n'affecte qu'un seul fil d'une paire. Le mode dissymétrique est composé pour moitié de MD, et pour moitié de MC. Attention à ne pas confondre mode dissymétrique et mode asymétrique.

Mutuelle inductance : Inductance de couplage, notée M , entre deux circuits. Si I est le courant dans le circuit primaire, la tension induite dans le circuit secondaire vaut : $U = M \Delta I / \Delta t$. M s'exprime, comme une inductance, en henrys (H).

Parafoudre (SPD pour *Surge Protective Device*) : Limiteur de surtensions apte à écouler une forte surintensité. Il peut être constitué d'une combinaison de varistances, éclateurs ou diodes Zener. Un parafoudre de type 1 est testé en onde de courant 10/350 μ s; un type 2 en onde 8/20 μ s.

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.

Perturbation en conduction : Perturbation qui se propage le long de conducteurs électriques. Elle est définie par son courant et par sa tension.

Perturbation en rayonnement : Perturbation qui se propage dans l'air, sans support matériel. Elle est définie par ses champs électrique et magnétique.

Perturbation permanente : Perturbation entretenue ayant par convention une durée supérieure à 0,4 s. Une perturbation permanente peut être composée d'impulsions brèves et répétitives.

Perturbation transitoire : Perturbation impulsionnelle unique ou répétitive, mais avec une période de répétition longue de plusieurs secondes.

Plaque collectrice : Tôle servant de référence de potentiel à une cabine blindée ou à un îlot à laquelle tous les câbles externes devraient être filtrés, écrêtés ou blindés. Seule une plaque de tôle a une impédance assez faible en HF pour jouer un rôle de référence de potentiel.

Prise (ou réseau) de terre : Ensemble des conducteurs en contact intime avec le sol (ou un matériau conducteur tel béton ou coke) et assurant une liaison électrique avec celui-ci. Une prise de terre a pour rôle d'écouler dans la Terre les courants externes du site. Tout réseau de terre d'un site devrait être équipotentiel, donc unique et maillé.

Prises de terre indépendantes : Prises de terre assez éloignées pour que le courant maximal évacué par l'une d'elles ne modifie pas sensiblement le potentiel des autres. Deux prises de terre indépendantes doivent être très éloignées; en cas de foudre elles subiront de fortes surtensions l'une par rapport à l'autre. Il serait stupide de raccorder des équipements interconnectés à des terres indépendantes, même si c'était légal.

Protection cathodique : Pour limiter la corrosion des conducteurs enterrés par les courants telluriques et les courants vagabonds, on leur applique un potentiel négatif par rapport à une anode dont on accepte la corrosion. C'est la protection cathodique des conducteurs enterrés. Sans tension extérieure, on peut utiliser une anode sacrificielle en zinc qui protège les conducteurs enterrés qui y sont reliés.

Queue-de-cochon : Fil de reprise entre l'écran d'un câble et la masse. C'est à éviter, surtout en HF, même si le fil est court et n'est pas tire-bouchonné.

Raccordement équipotentiel : Contact électrique à faible impédance entre conducteurs voisins destiné à réduire leur tension. Toute mise à la masse (avec ou sans mise à la terre) devrait être effectuée par raccordement équipotentiel.

Règles de l'art : Règles non écrites, sensées donner de bons résultats, et qu'un professionnel a la responsabilité d'appliquer. Le problème est qu'en CEM nombre de règles de l'art sont erronées...

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 canalisations et de structures métalliques.

Résistance de terre : Résistance entre la terre et un « point de référence suffisamment éloigné ». Exprimée en ohms (Ω), sa valeur dépend de la géométrie des conducteurs enterrés et de la résistivité du sol. Contrairement au maillage des masses, la résistance de terre n'a pas d'influence sur l'équipotentialité des équipements.

Résistivité du sol : Résistance d'un cylindre long de 1 m et d'une section de 1 m². Notée ρ , la résistivité s'exprime en ohms-mètres (Ωm). La résistivité du sol dépend de divers paramètres, certains constants (nature, granulométrie) et d'autres variables (humidité, température, salinité).

Schéma de neutre (ou « régime de neutre ») : Situations du neutre et des masses par rapport à la terre. Il y a trois schémas de base, symbolisés par leur acronyme : TT, TN ou IT.

Source de perturbation : Émetteur de perturbations électromagnétiques, d'origine humaine ou naturelle, intentionnelle ou non.

Susceptibilité électromagnétique : Incapacité d'un dispositif, appareil ou système à fonctionner sans dégradation en présence d'un niveau de perturbation électromagnétique. Les civils préfèrent parler d'*immunité* (niveau garanti).

Très basse tension (TBT) : Les différentes TBT sont désignées par les abréviations suivantes : TBTS : très basse tension de sécurité; TBTP : très basse tension de sécurité ayant un point du circuit secondaire relié à la terre et conforme au 414.4 de la NF C 15-100; TBTF : très basse tension fonctionnelle, ne répondant aux règles ni de la TBTS ni de la TBTP. Les circuits à TBTS et TBTP peuvent être de la classe III.

Telluromètre : Appareil permettant la mesure de la résistance d'une terre (mesure en 3 fils) et de la résistivité moyenne du sol (mesure en 4 fils).

TEMPEST : Acronyme que les Américains traduisent, au choix, par *Transient ElectroMagnetic Pulse Emanation Standard* (la norme), ou par *Transient ElectroMagnetic PulsE Surveillance Technology* (l'attaque), ou par *Transient ElectroMagnetic Pulse and Emission Suppression Testing* (la défense). Ces trois volets se traduisent par le mot d'anticompromission, ou SÉCOM.

Tension : Mot signifiant *différence de potentiel*, ou *d.d.p.* Il importe donc de définir sans ambiguïté quelle est la référence de potentiel choisie. Un potentiel n'a aucun sens absolu. Ainsi, la phrase « au voisinage d'une prise de terre, le potentiel peut ne pas être nul » est vide de sens tant que l'on ne spécifie pas quelle est la référence de potentiel (terre lointaine, masse mécanique, électronique...).

Tension limite conventionnelle de contact (symbole U_L) : Valeur maximale de la tension de contact présumée qu'il est admis de pouvoir maintenir indéfiniment dans des conditions d'influences externes spécifiées. Dans certains textes réglementaires, cette tension est dénommée *tension limite de sécurité*. Dans les locaux habituels, U_L vaut 50 V alternatifs efficaces, ou 120 V en « courant » (!) continu lisse.

Terre (« la », avec un T majuscule) : Masse conductrice (plus ou moins) de notre planète dont le potentiel électrique en chaque point est pris, par convention, égal à zéro... Mais la physique ignore les conventions intellectuelles ! On peut garantir que des terres séparées ne resteront pas au même potentiel.

Terre (« une », avec un t minuscule) : Raccourci pour prise de terre.

Terre fonctionnelle : C'était la terre pour des équipements qui utilisaient, à grands risques, la Terre comme conducteur de retour. Si une terre fonctionnelle était distincte de la terre des masses, elle devrait être rendue inaccessible aux personnes. Une terre informatique ou électronique n'est pas une terre fonctionnelle.

Terre de protection : Réseau de terre ayant pour but de protéger les personnes et les équipements contre les tensions dangereuses. Quelle que soit sa résistance, la terre des masses est une terre de protection. Toutes les terres de protection d'un même site doivent être interconnectées.

Terre des masses : Terre de protection à laquelle devraient être reliées toutes les masses accessibles d'un site.

Terre du neutre : Terre à laquelle est raccordé le neutre d'un réseau électrique. Il est souhaitable que la terre du neutre soit reliée à celle des masses.

Terre sans bruit : Aucune définition n'est possible : toute terre « sans bruit » est inévitablement bruyée en tension par rapport à n'importe quelle autre terre ! Et si une terre n'évacuait jamais le moindre courant, on aurait dû économiser du cuivre ! La définition de la CEI mérite un large sourire : « terre spécialement conçue pour ne pas provoquer un fonctionnement défectueux de l'équipement », par opposition sans doute aux terres spécialement conçues pour provoquer des dysfonctionnements !...

Terre de sécurité : Ce qualificatif, pourtant usuel, n'a aucune justification puisque c'est l'équipotentialité entre les masses qui garantit la sécurité des personnes et le bon fonctionnement des matériels. L'appellation *terre de protection* suffit amplement.

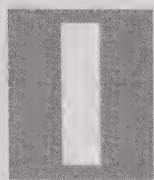
Tôle de référence de potentiel (ou TRP) : Masse d'un coffret conducteur à laquelle tous les filtres et les écrans de câbles devraient être raccordés en traversée. Une TRP devrait être homogène, non fendue et bien conductrice. Une et une seule TRP devrait être utilisée par coffret. La TRP pour un équipement s'apparente à la « plaque collectrice » pour les cabines blindées et les îlots.

Transient (suppression) plate (ou TSP) : Tôle métallique de surface suffisante qui fournit en environnement isolant une référence de potentiel HF.

Vert et jaune : Double coloration normalisée repérant un conducteur de protection assurant une fonction de sécurité.

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.

Volume d'accessibilité au toucher (ou **volume d'accessibilité**) : Zone s'étendant entre tout point de la surface où les personnes se tiennent et circulent habituellement, et la limite qu'une personne peut atteindre avec la main, dans toutes les directions, sans moyen auxiliaire (235.1 de la NF C 15-100).



INDEX

0 V, 42, 61, 122, 123, 128

- analogique, 65, 69, 123
- numérique, 69, 123

A

- abreuvoir, 13
- absorbeur d'onde, 100
- accessoire de raccordement, 114
- aéronef, 7
- ajout de ferrite, 75
- alimentation
 - auxiliaire, 63
 - continue, 62
 - secteur, 61
 - en étoile, 62
- aluminothermie, 109
- améliorer
 - l'équipotentialité, 59, 109
 - la terre, 107
- amortissement, 84
- amplificateur
 - différentiel, 67
 - opérationnel, 66
- anode
 - consommable, 32
 - sacrificielle, 131
- anodisation, 63
- antenne hectométrique, 15
- anticompromission, 16, 132
- armure, 86
- assèchement du sol, 20

B

- balanced line*, 91, 129
- balloélectricité, 6
- barrette de terre, 29, 34, 51, 107, 121, 127
- basse fréquence, 19, 127
- bâtiment
 - maillé, 97
 - séparé, 85
- batterie, 111
- BF, 127
- blindage, 127
- bobine de Petersen, 12
- boîtier plastique, 118
- bon schéma, 68
- bonne terre, 121
- borne, 29
 - de terre, 109, 127
- boucle
 - de masse, 36, 38, 42, 52, 117, 123, 124, 127
 - entre masses, 42, 44, 52, 127
- bracelet de mise à la terre, 8
- brasage par aluminothermie, 29
- brasure, 28

C

- câblage
 - du parafoudre, 10
 - en étoile, 36, 48

câble

- blindé, 11, 75, 85, 86, 92, 103, 117
 - externe, 86
- d'accompagnement, 83, 96
- d'interconnexion, 51, 96
- de descente, 115
- de terre, 51, 96
 - blindé, 68
- enterré, 76, 84
- externe, 8, 85, 86, 109, 127
- filtré, 94
- incompatible, 93
- interne, 8, 88, 127
- numérique, 124
- sous-marin, 17
- téléphonique, 14
- câbler en paire, 116
- cablofil, 77
- cage de Faraday, 39, 122
- caillebotis, 57, 114
- canalisation
 - conductrice, 38, 86, 109, 114
 - externe, 10
 - enterrée, 127
 - métallique, 27
- carte
 - analogique, 65
 - fille, 63
 - mère, 63
 - mixte analogique/numérique, 64
 - numérique, 63
- caténaire, 14
- cavalier, 116
- CBN, 109
- CEI 61000-4-4, 105
- ceinture
 - de masse, 109
 - de terre, 5, 29
 - externe, 26
- CEM, 128
 - des équipements, 108
- chaînage d'alimentation, 66
- chaîne analogique, 66
- chaîner la masse, 41
- chambre blindée, 39, 122
- champ
 - électrique, 127

- électromagnétique, 38

- magnétique, 127

- changement de direction, 81

- charge

- électrique, 6

- électrostatique, 8

- charpente, 30

- métallique, 109

- chemin de câbles, 71, 77

- choc

- de foudre, 26

- électrique, 4

- circuit

- de contrôle-commande, 88

- de mesure, 88

- de puissance, 88

- fermé, 36

- imprimé, 67

- numérique, 88

- claquage diélectrique, 13

- clôture métallique, 13

- CMRR, 67

- coax-stop, 86, 87

- collier, 113

- coloration vert et jaune, 5, 41

- Common Bonding Network*, 109

- compatibilité électromagnétique, 128

- condensateur chimique, 63

- conducteur

- aller et retour, 88

- d'équipotentialité, 128

- de descente, 45, 107, 128

- de protection, 5, 6, 38, 41, 45, 51, 52, 111, 128

- de référence, 128, 130

- de retour, 69

- de terre, 38, 96, 112, 128

- externe, 102

- libre, 91

- PE, 115

- plat, 28

- supplémentaire, 38, 108

- vert et jaune, 48

- connecteur

- commun, 91

- externe, 63

- connexion

- en étoile, 10

- enveloppante, 78
- parallèle, 47
- conseil pratique, 94, 105
- contact
 - direct tôle sur tôle, 77
 - électrique, 63
 - vissé, 112
- contrepoids d'une antenne, 15
- contrôleur
 - d'isolement, 111
 - permanent d'isolement, 61, 128
- convertisseur
 - à découpage, 88
 - A/N ou N/A, 65
- coordination
 - de la masse électrique, 111
 - de la masse mécanique, 109
 - de la protection, 100, 128
 - du 0 V, 65
- corbeau, 77
- corrosion, 26, 28
 - d'un réseau de terre, 32
- couleur d'isolant, 88
- coup au but, 11
- couplage, 128
 - champ à boucle, 43
 - en mode commun, 71
 - par impédance commune, 43
- coupure d'un câble, 23
- courant
 - continu, 32
 - de défaut, 50
 - de foudre, 11
 - de fuite, 5, 6, 42, 49, 61, 120
 - externe, 8, 45
 - induit, 84
 - interne, 45
 - tellurique, 26, 32, 129, 131
 - vagabond, 131
- court-circuit, 6
- coût
 - des pertes, 119
 - du maillage, 119
- couvercle conducteur, 80
- CPI, 61, 128
- croiser deux câbles, 93

D

- d.d.p., 133
- dalle marine, 77
- DDR, 23
- décharge électrostatique, 6, 41, 106
- défaut, 129
 - d'isolation, 24, 39
 - d'isolement, 6
 - simple, 12
- densité de flux magnétique, 129
- dérivation, 77
- descente de paratonnerre, 38
- diaphonie, 90, 92
 - différentielle, 117
- différence de potentiel, 122, 133
- differential link*, 91, 129
- dimension de maille, 55
- disjoncteur différentiel, 6, 23
- dôme de potentiel, 13, 19, 22
- double isolation, 5
- dysfonctionnement aléatoire, 106

E

- échelle à câbles, 77
- écoulement du courant de foudre, 12
- écran
 - électromagnétique, 127
 - interne, 93
- effet
 - du champ électromagnétique, 53
 - réducteur, 14, 71, 72, 73, 78, 89, 103, 114, 115, 117, 129, 130
 - d'une câblette, 74
 - d'une structure, 82
- électrocution, 41
- électrode
 - consommable, 32
 - d'injection, 21
 - de mesure, 21
 - positive, 32
- électrolyte, 113
- élévation du potentiel, 11

EM 1110-2-2704, 32
 EN 50174-4, 80
 EN 50310, 110
 enfouissement, 85
 entrée
 – d'îlot, 98
 – de baie, 116
 entrée/sortie, 111
 environnement
 – conducteur, 59
 – industriel, 116
 – isolant, 92
 EP 1110-3-2, 17
 équipement interconnecté, 18, 120
 équipotentialité, 3, 18, 42, 51, 60, 68, 69, 85, 105, 108
 – de la masse, 4, 37, 53
 – du site, 35
 – raisonnable, 34
 erreur, 67

F

famille de liaisons, 88
 faradisation, 102
 fausse paire, 88, 95
 faux
 – plafond, 116
 – plancher, 48, 55, 56, 114, 116, 117
 feeder, 86
 – d'antenne, 87
 ferrailage soudé, 30
 ferrite, 118
 fibre optique, 17, 85
 fil
 – de reprise, 85
 – de signal, 39
 – vert et jaune, 124
 filtre, 100
 flotter tous les 0 V, 123
 fonctionnement de l'équipement, 37
 fond de panier, 63
 force
 – de répulsion, 113
 – électromotrice, 128

frein
 – de tête, 113
 – filet, 113
 front raide, 106

G

gain de l'antenne, 15
 gaine
 – de plomb, 28
 – de ventilation, 57
 – métallique, 31
 goujon Nelson, 113
 goulotte, 81
 – conductrice, 71, 77
 – métallique, 77, 103
 – propre, 78, 124
 – sale, 78, 124
 gradient de potentiel, 13
 graisse neutre, 112
 grande dynamique, 67
 granulométrie, 27
 gratter la peinture, 54
 griffe, 113
 grille
 – de 0 V, 63
 – de masse, 55, 60, 109, 129
 groupe tournant, 17

H

haute fréquence, 122, 129
 hélicoptère, 6
 HF, 68, 122, 129
 huisserie métallique, 57, 110
 humidité, 25

I

idées reçues, 120
 îlot, 68, 97, 101, 109, 114, 129
 immunité, 129
 – de l'équipement, 18

impédance, 129
 – commune, 36
 impulsion
 – négative, 106
 – positive, 106
 inductance, 129
 – de fuite, 72, 75
 – de mode commun, 118
 – mutuelle, 72, 75
 induction, 129
 influence capacitive, 13
 information confidentielle, 16
 installation de protection foudre, 129
 interconnexion, 20
 – de terres, 33, 35
 intérêt psychologique, 22
 IPE, 129
 isolateur, 13
 isolation principale, 39
 isolement galvanique, 8, 43, 62, 85
 IT, 5

L

languette « mise terre », 6
 lexique, 127
 liaison
 – asymétrique, 91, 129
 – au plus court à la masse, 50
 – équipotentielle, 55
 • supplémentaire, 44, 48, 50, 53
 – numérique, 95
 – supplémentaire, 51, 53, 102
 – symétrique, 129
 – tout-ou-rien, 95
 ligne
 – d'alimentation, 88
 – de compensation, 15
 – de télécommunication, 121
 – externe, 99
 – HT, 14
 limiteur de surtensions, 8, 9, 12, 121
 loi de Kirchhoff, 120
 longueur
 – d'onde, 38, 130
 – de la connexion, 80

M

maillage
 – des masses, 39, 51, 52, 54, 58, 68, 97, 109, 112, 120
 – du faux plancher, 56
 – par îlot, 97, 102, 130
 main-d'œuvre, 119
 masse, 3, 37, 39, 41, 96, 130
 – d'accompagnement, 95, 130
 – de l'équipement, 9
 – de protection, 42, 130
 – de référence, 128
 – de sécurité, 130
 – du signal, 61
 – en étoile, 47, 120
 – fonctionnelle, 42, 61, 130
 – maillée, 110
 – mécanique, 62, 130
 – sale, 122
 – simultanément accessible, 39
 matériel électrique, 41
 matière antistatique, 7
 mauvaise terre, 16
 mesure
 – de la résistance
 • d'une terre, 19, 20
 – en 2 fils, 33
 – en 4 fils, 24
 méthode, 105
 – de la chute de potentiel, 21, 128
 – de mise à la terre, 48
 – en 3 fils, 22
 MIL-HDBK 274, 6
 mise
 – à la masse, 130
 • en étoile, 69
 – à la terre, 18, 46, 130
 • en étoile, 46, 48
 – du neutre à la terre, 5
 mode
 – asymétrique, 130
 – commun, 130
 – différentiel, 130
 – dissymétrique, 130
 – longitudinal, 130
 – non symétrique, 130
 – normal, 130

- parallèle, 130
- série, 130
- symétrique, 130
- montée en potentiel, 11, 12
- mutuelle inductance, 71, 75, 130

N

- nappe phréatique, 25
- nature du sol, 26
- NF C 15-100, 23, 28, 41, 132, 134
- NF EN 61643-11, 100
- norme de sécurité, 121

O

- ouvrage à haute tension, 12

P

- paire
 - différentielle, 91
 - symétrique, 108
 - téléphonique, 11
- parafoudre, 8, 9, 11, 12, 85, 131
- à varistance, 100
- de type 1, 100
- de type 2, 100
- parasurtenseur, 38
- paratonnerre, 11, 110, 122
- patte d'oie, 27, 31
- PE, 5, 38, 45, 111, 128
 - commun, 49
- périphérique déporté, 118
- perturbation
 - électromagnétique, 52, 59, 131
 - en conduction, 131
 - en rayonnement, 131
 - permanente, 131
 - résiduelle, 72
 - transitoire, 131
- pince de couplage, 106
- piquet, 27

plan

- de 0 V, 65
- de masse, 64, 83

plaque

- collectrice, 97, 98, 101, 109, 111, 114, 131

- de terre, 29, 127

plastron, 63

plate-forme d'essais, 97

platelage, 57

point

- commun, 95
- d'entrée, 109, 123

pose

- avec effet réducteur, 76
- en aérien, 108
- sans effet réducteur, 76

position du câble, 82

poste THT, 13

poubelle, 3

poutre, 57

presse-étoupe, 92

prise de terre, 3, 21, 131

- couplée, 20

- en haute fréquence, 15

- indépendante, 131

profilé métallique, 77

protection

- cathodique, 32, 131
- coordonnée, 100
- de forte énergie, 100
- des personnes, 4
- du câble externe, 59

- étagée, 101

- parallèle, 100

- primaire, 109

- répartie, 96

- secondaire, 109

puissance rayonnée, 15

pylône, 86, 107

Q

quarte étoile, 117

queue-de-cochon, 85, 92, 131

R

raccordement
 – à la terre, 68
 – du 0 V, 123
 – en étoile, 41
 – équipotentiel, 132
 radier en béton, 29
 rappel de la loi, 39
 rayonnement direct, 94
 réalisation d'un réseau de terre, 27
 réduire la perturbation, 75
 référence
 – de potentiel, 6, 37, 133
 – du circuit, 52
 régime de neutre, 132
 règle
 – de câblage, 88
 – de l'art, 132
 – de sécurité, 5, 41, 42
 réjection du mode commun, 67
 relais, 94
 – statique, 95
 relayage en tout-ou-rien, 88
 relier des masses en étoile, 69
 remontée de terre, 35, 122
 répartition des câbles, 82
 reprise
 – d'écran, 116
 – de peinture, 112
 – périphérique, 117
 réseau
 – de masse, 30, 42, 46, 51, 52, 54, 132
 – de terre, 3, 30, 40, 131
 – HTA, 12
 – local, 111
 – maillé, 51
 résistance
 – d'une terre, 19, 23
 – de perte, 15
 – de rayonnement, 15
 – de terre, 23, 35, 132
 • du central, 24
 – du corps humain, 4
 résistivité, 24, 26
 – du sol, 22, 24, 132
 retour commun, 95

rigidité diélectrique, 8
 risque d'électrocution, 4, 13, 40
 rôle d'une terre, 3
 ronflette, 92
 routage des câbles, 85

S

salage, 25
 – du sol, 27
 salle
 – blanche, 97, 113
 – de contrôle, 97
 – informatique, 97
 salve, 106
 schéma
 – de neutre, 5, 132
 – équivalent, 73
 – IT, 120
 – TN, 61
 – TT, 5, 27, 45
 SÉCOM, 16
 section minimale, 28
 sécurité, 46
 – des personnes, 18, 38, 39, 40, 51, 108, 123
 self, 129
 – inductance, 129
 serrage, 29
 signal
 – crypté, 17
 – incompatible, 93
single ended, 91, 129
 site maillé, 101
 sol, 107, 122
 soudure, 29
 – à froid, 113
 – à l'arc, 109
 – exothermique, 29
 source de perturbation, 132
 SPD, 131
 structure
 – conductrice, 109
 – de masse, 72, 75
 – équipotentielle, 89

support
 – en tôle, 77
 – mécanosoudé, 77
 surblindage, 71, 89, 102, 114, 118
 surface de contact, 32
Surge Protective Device, 131
 surtension, 8, 100
 – de mode commun, 8
 – HF, 94
 – résiduelle, 103
 susceptibilité électromagnétique, 132
 système électronique, 36, 57

T

tableau électrique, 10, 59, 121
 tablette, 71
 – métallique, 77
 TBT, 132
 TBTS, 132
 télégraphe, 17
 téléscripteur, 18
 telluromètre, 22, 24, 132
 température, 25
 TEMPEST, 16, 82, 132
 temps de retour, 119
 tension, 133
 – de contact, 4
 – de pas, 13
 – limite
 • conventionnelle de contact, 5, 39, 133
 • de sécurité, 5, 133
 – résiduelle, 9
 TER/S, 105
 Terre, 133
 terre, 3, 133
 – « crypto », 16
 – de protection, 4, 133
 – de sécurité, 6, 133
 – des masses, 133
 – distincte, 34
 – du neutre, 133
 – du poste, 13
 – fonctionnelle, 17, 133
 – galvaniquement isolée, 35, 121
 – indépendante, 120, 122

– informatique, 121
 – proche, 20
 – propre, 120
 – sans bruit, 107, 133
 – séparée, 33, 36, 40, 120
 – télégraphique, 17
 – unique, 34
 test par influence, 107
 TGBT, 123
 TN, 120
 TN-C, 5
 TN-S, 5
 tôle, 83
 – de référence de potentiel, 52, 85, 111, 134
 TOR, 88
 tore de ferrite, 118
 torsade S-Z, 93
 torsader les paires, 93
 transformateur d'isolement, 16
transient suppression plate, 59, 60, 99, 114, 117, 134
 traversée de cloison, 80
 très basse tension, 132
 – de sécurité, 132
 triaxial, 108
 tricot, 118
 TRP, 52, 85, 134
 TSP, 59, 109, 114, 134

U

U_L , 5, 39, 41, 50, 133
 unicité d'un réseau de terre, 31, 36
 UTE 15-443, 9
 UTE C 15-443, 10

V

variation de résistivité, 25
 V_{CC} , 63
 V_{DD} , 63
 vert et jaune, 134
 victime, 134

vieillissement d'un réseau de terre, 31
vitrification, 26
– du sol, 32
volume d'accessibilité, 134
– au toucher, 4, 134
vrai mode commun, 99

W

wrapping, 88

Z

Zippertubing, 118
zone
– « rouge », 16
– analogique et numérique, 64

DATE DE RETOUR L.-Brault

[illegible]

Bibliofiche 297B

Achévé d'imprimer sur les presses de
SNEL Grafics sa
Z.I. des Hauts-Sarts - Zone 3
Rue Fond des Fourches 21 – B-4041 Vottem (Herstal)
Tél +32 (0)4 344 65 60 - Fax +32 (0)4 286 99 61
juillet 2006 – 38514

Dépôt légal : août 2006
Imprimé en Belgique

Alain Charoy

2^e édition

CEM

Parasites et perturbations des électroniques Tome 2 : terres, masses, câblages

Les parasites perturbent trop souvent les électroniques. Leurs effets sont coûteux et peuvent être dangereux. Les remèdes apportés par tâtonnements sont rarement satisfaisants. Pour résoudre un problème de parasites, à tous les coups et en maîtrisant les marges de sécurité, il importe de comprendre les phénomènes et d'en connaître les ordres de grandeur.

Certes, les phénomènes électromagnétiques sont peu intuitifs et encore trop peu enseignés. De plus, les électroniques modernes remettent en cause bien des « règles de l'art ». En fait, il n'y a pas de mystère : les parasites sont de simples signaux électriques. Résoudre un problème est souvent plus facile, plus rapide et moins coûteux qu'on ne l'imagine à priori. Un peu de bon sens et un niveau bac suffisent pour comprendre les informations de ce petit manuel et pour mettre en œuvre ses recommandations pratiques.

ALAIN CHAROY

Après six années dans des grands groupes industriels (Thomson puis Merlin-Gérin), l'auteur a créé en 1984 une société d'assistance en CEM et de formation (AEMC), puis une filiale (AEMC Mesures à Paris, Lyon et Rennes) et a repris un laboratoire (AEMC Lab à Grenoble). Il a formé des milliers d'ingénieurs et de techniciens et a corrigé de nombreux équipements et installations, en France comme à l'étranger. Il est l'auteur d'articles et d'ouvrages sur la CEM, enseigne dans plusieurs écoles et participe à des colloques et à des journées d'études.

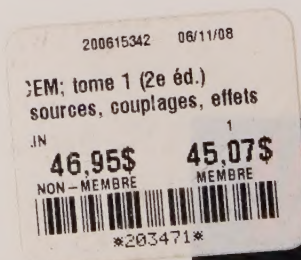
Ce deuxième tome a pour objectif d'expliquer les rôles des terres, la nécessité de l'équipotentialité des masses et les façons d'installer les câbles pour réduire les effets des parasites. Bien des mythes tenaces sont clairement remis en cause. Les installateurs y trouveront des règles et des recommandations de câblages simples et efficaces.



9 782100 501540

ISBN 2 10 050154 2

www.dunod.com



DUNOD

* 04-BV-624 *