



La CEM

Chapitre 1

Perturbations conduites et rayonnées

Compatibilité Électromagnétique

La CEM : c'est quoi ?

■ Une définition de la CEM :

- Discipline ayant pour objet l'étude des problèmes de cohabitation électromagnétique : sources et perturbations E et H
- Passage obligé pour la mesure, l'instrumentation, la HF et les radiofréquences, ...
- Effets biologiques des rayonnements ..

■ Objectif :

- Minimiser les perturbations électromagnétiques émises (« émissivité »)
- Rendre les systèmes moins sensibles aux perturbations (« immunité »)
- Et respecter la « Directive CE » (obligation)



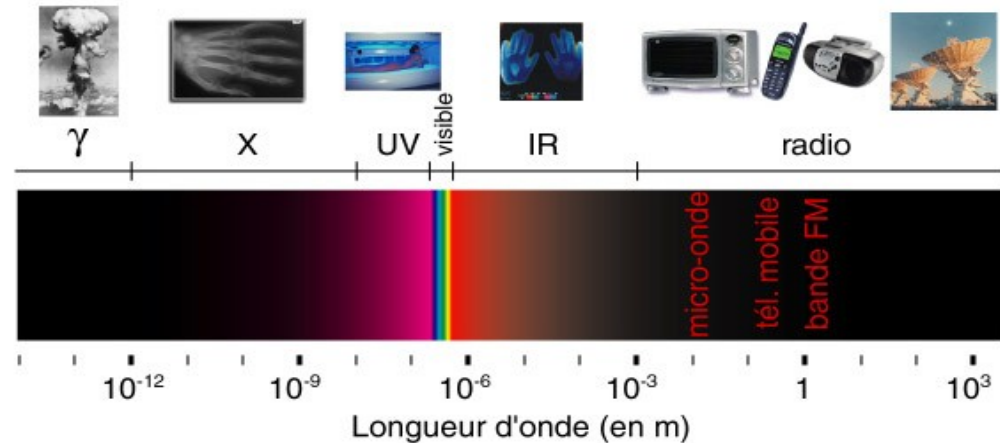
Sommaire du cours

- **Introduction**
- **Les perturbations**
- La réglementation
- La démarche
- Les normes
- Aspect physique
- La technologie
- Annexes
- Les liens

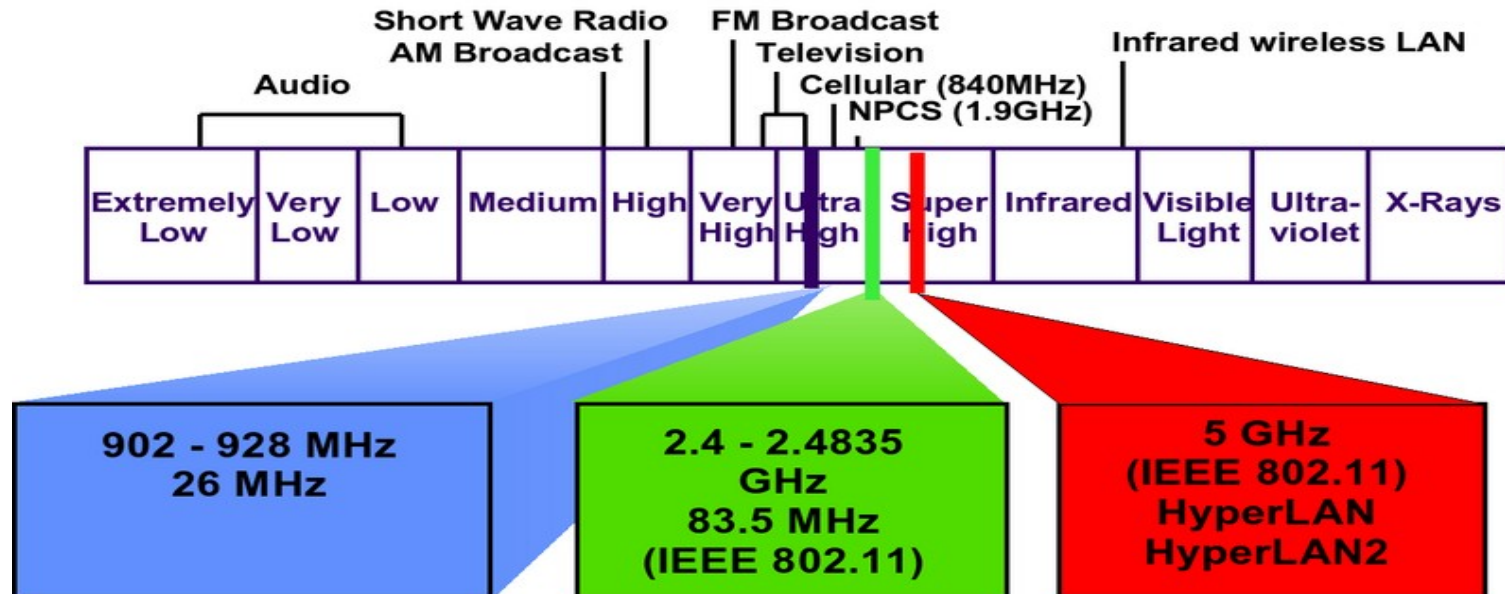
La CEM : Contexte & enjeux

- **Contexte : environnement de plus en plus bruyé** dû
 - Nombre d'appareils électroniques et « wireless »
 - Fréquences de fonctionnement de plus en plus élevées (CPU, RF, ...)
 - Tension d'alimentation de plus en plus faibles : plus de sensibilité aux rayonnements
 - Puissances mises en jeu
- **Les enjeux : Limiter ou éviter :**
 - Les dysfonctionnements bénins
 - Exemple : les brouillages radio
 - La destruction de composants
 - Exemple : les pertes de fonctionnalité
 - La destruction de systèmes
 - Attention à la sécurité, risque d'accidents mortels !!
 - Effets biologiques à ne pas négliger ... (principe de précaution)

Perturbations électromagnétiques (spectre)



et les fréquences radio (GSM, Wifi, Bluetooth, ...)



Perturbations électromagnétiques

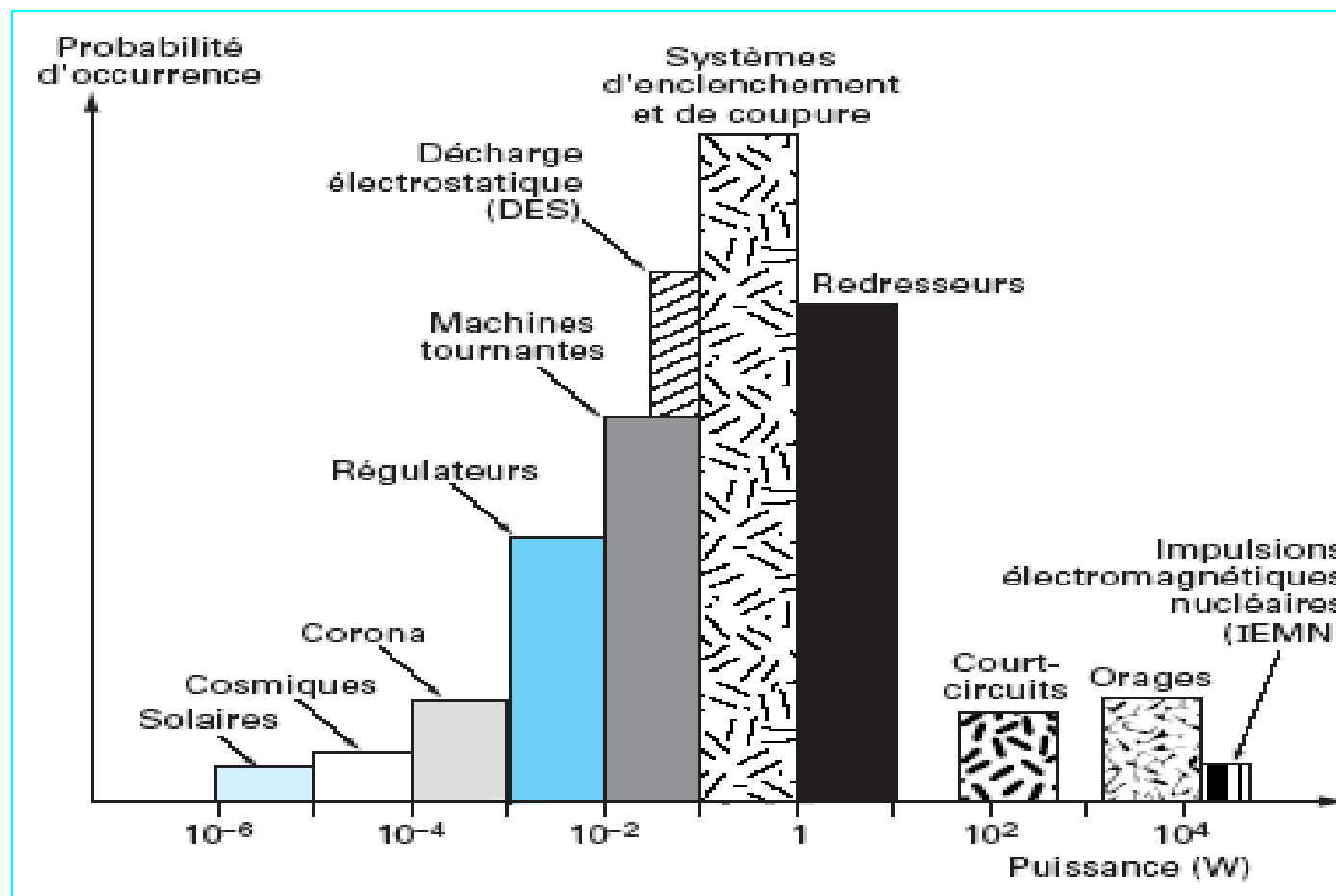


Figure 4 – Origine des perturbations électromagnétiques
(d'après AEMC [1])

Cas particuliers

- Automobile : réseaux et capteurs embarqués, lecteur CD / multimédia, GPS, ... : sensibilité aux émetteurs radio, blocage intempestif des portes, ...
- Avions, aéronautique : sécurité
- Armement, nucléaire : sécurité
- Trains : gros générateurs de perturbations
- Médical / hopitaux : détecteurs d'apnée, systèmes de monitoring sensibles, ...
- Jouets : sécurité ++

Ces cas particuliers donnent lieu à des **réglementations particulières** : sécurité des jouets, appareil médical, appareil radio, implants, ...

Terminologie : émmisivité et immunité

■ Emissivité :

- Ce terme est employé pour évaluer le **pouvoir perturbateur** d'un appareil
- But : limiter les perturbations générées par un appareil
 - Perturbations conduites (par les câbles, supports, ...)
 - Perturbations rayonnées (sous forme d'onde électromagnétique)

La CEM : Terminologie

■ Immunité :

- On parle d'immunité pour caractériser le **niveau de protection intrinsèque** d'un système vis-à-vis des perturbations externes
- But rendre le système peu sensible aux :
 - Perturbations conduites (idem câbles, terre, ...)
 - Perturbations rayonnées (E et H)
- On parle aussi de « susceptibilité » au lieu d'immunité

La CEM : Principes

- Conduction et rayonnement :
 - 2 types de propagation (conduites, rayonnées)
 - 2 types de perturbations (E,H)



La CEM : Principes

- Les **perturbations conduites** utilisent comme vecteur les matériaux conducteurs :
 - Lignes de données,
 - Câbles d'alimentation, câbles secteur,
 - Réseau de terre déficient.

La CEM : Principes

- Les **perturbations rayonnées** sont transmises par une onde électromagnétique et utilisent comme support les milieux diélectriques :
 - Le plastique
 - Le bois
 - L'air
 - etc...

La CEM : Les protagonistes

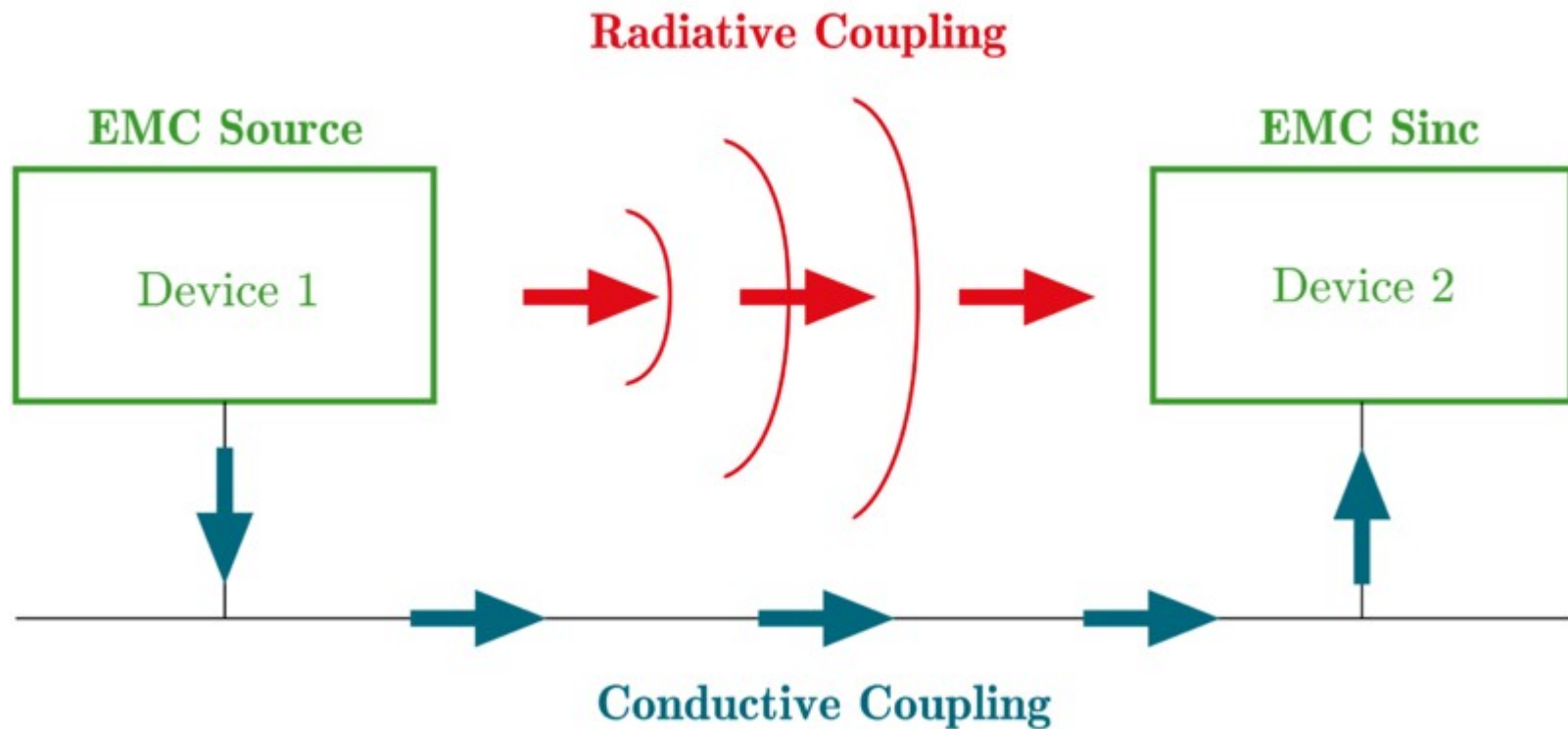
- Quelques sources de perturbations et leurs victimes

SOURCES

VICTIMES

Émetteurs radio-fréquence et Wifi, Bluetooth, « France Inter », FM, ...	Électronique analogique bas niveau Récepteur radio-fréquence
Lampes à arc	Électronique analogique et numérique
Soudage HF	Électronique analogique et numérique

Couplage : rayonné ou conduit



La CEM : Les protagonistes

■ Quelques sources (suite)

SOURCES

VICTIMES

Allumage automobile	Récepteurs radio- fréquences, toutes les électroniques
Relais, contacteurs	Toutes les électroniques
Électronique numérique, alim. à découpage,...	Électronique analogique

Circuits numériques

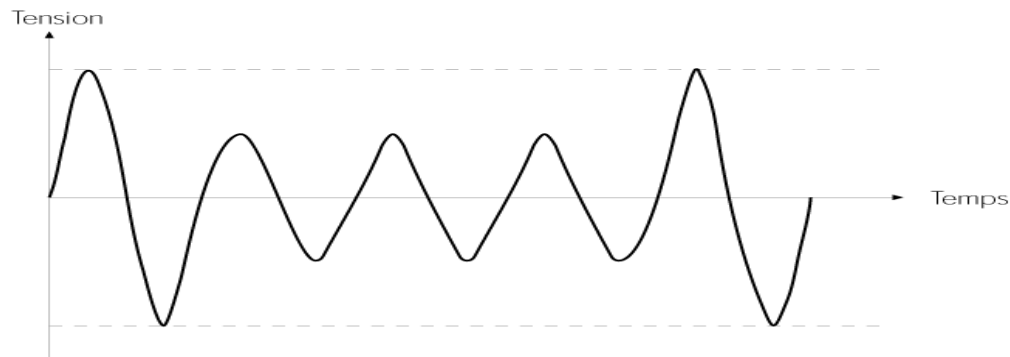
- Plus la vitesse de commutation (interne, externe : bus) est élevée, plus la bande passante est importante
- En HF les éléments parasites sont prédominants et les composants ne sont plus « idéaux », les fil et pistes deviennent inductifs
- Le routage (CAO) des cartes et le câblage sont primordiaux

La CEM : Les perturbations

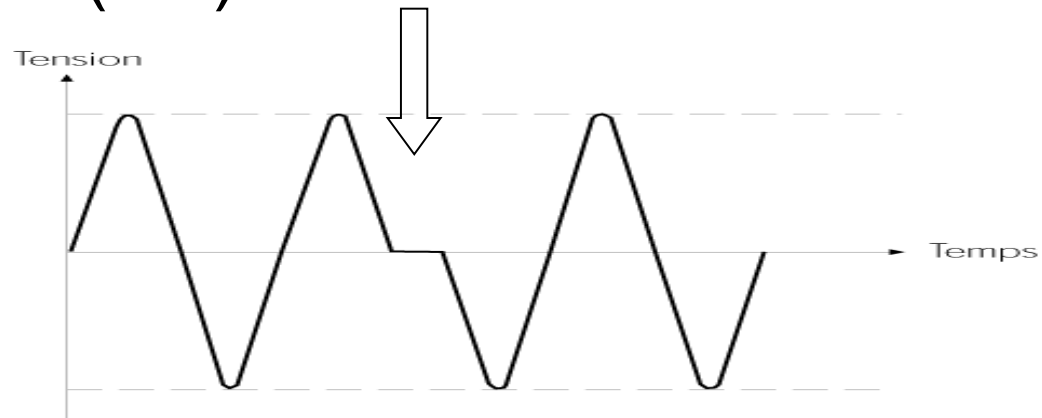


Perturbations conduites sur le secteur

- Creux de tension



- Microcoupure de tension (secteur) : utiliser onduleurs (PC)



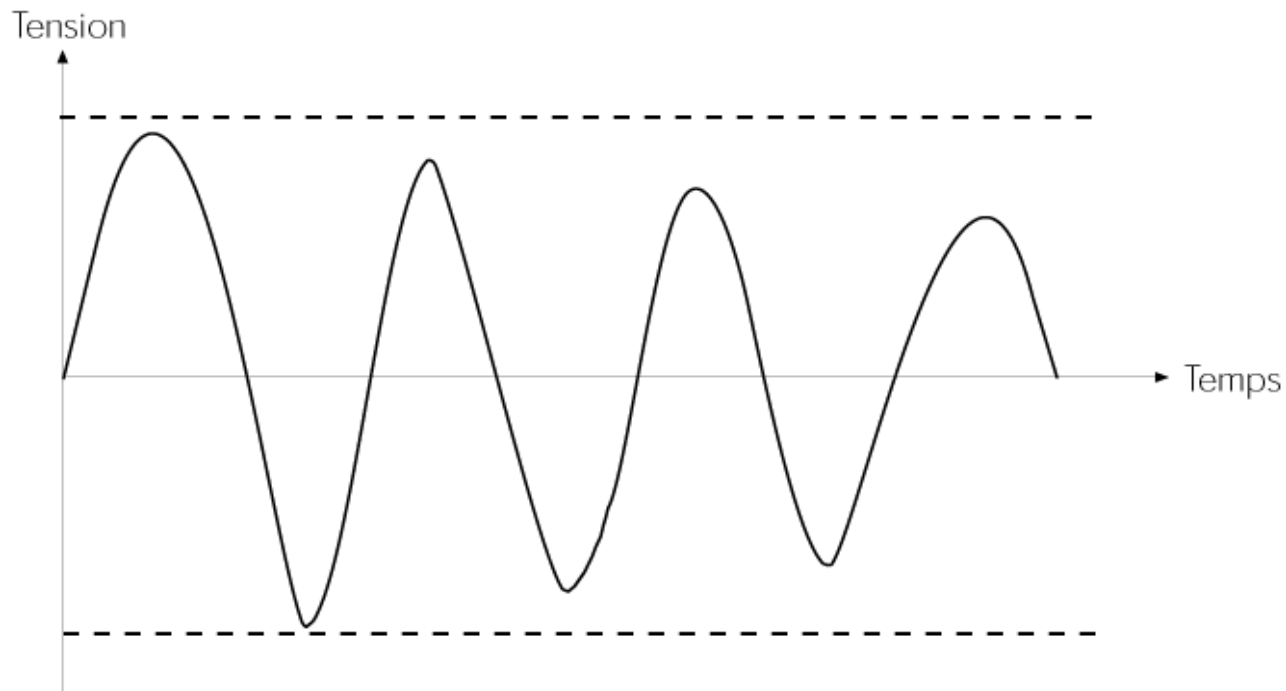
Perturbations conduites : Variations de tension rapides

- Fluctuations rapides de tension
 - Légères variations de la tension secteur
- Causes
 - Mise en route de gros consommateurs d'énergie
 - Exemple : Démarrage de moteurs électriques
- Conséquences
 - Exemple : Variations de luminosité des éclairages (« flicker »)

Perturbations conduites :

Variations de tension rapides

- Flicker : la tension secteur (220 V) peut varier de quelques %



Perturbations conduites : creux de tension

- Creux et microcoupures de tension : chutes de tension pouvant être complètes pendant une durée comprise entre quelques ms et 1 s
- Causes
 - Défaut sur les lignes d'alimentation
 - Orages, vent (contact entre fils)
- Conséquences
 - Surtout sensibles sur les petits équipements , remise à zéro (Reset intempestif) de systèmes numériques
- Remarque : utiliser des onduleurs pour les équipements informatiques, serveurs, ...



Perturbations conduites : Variations lentes de tension

□ Causes

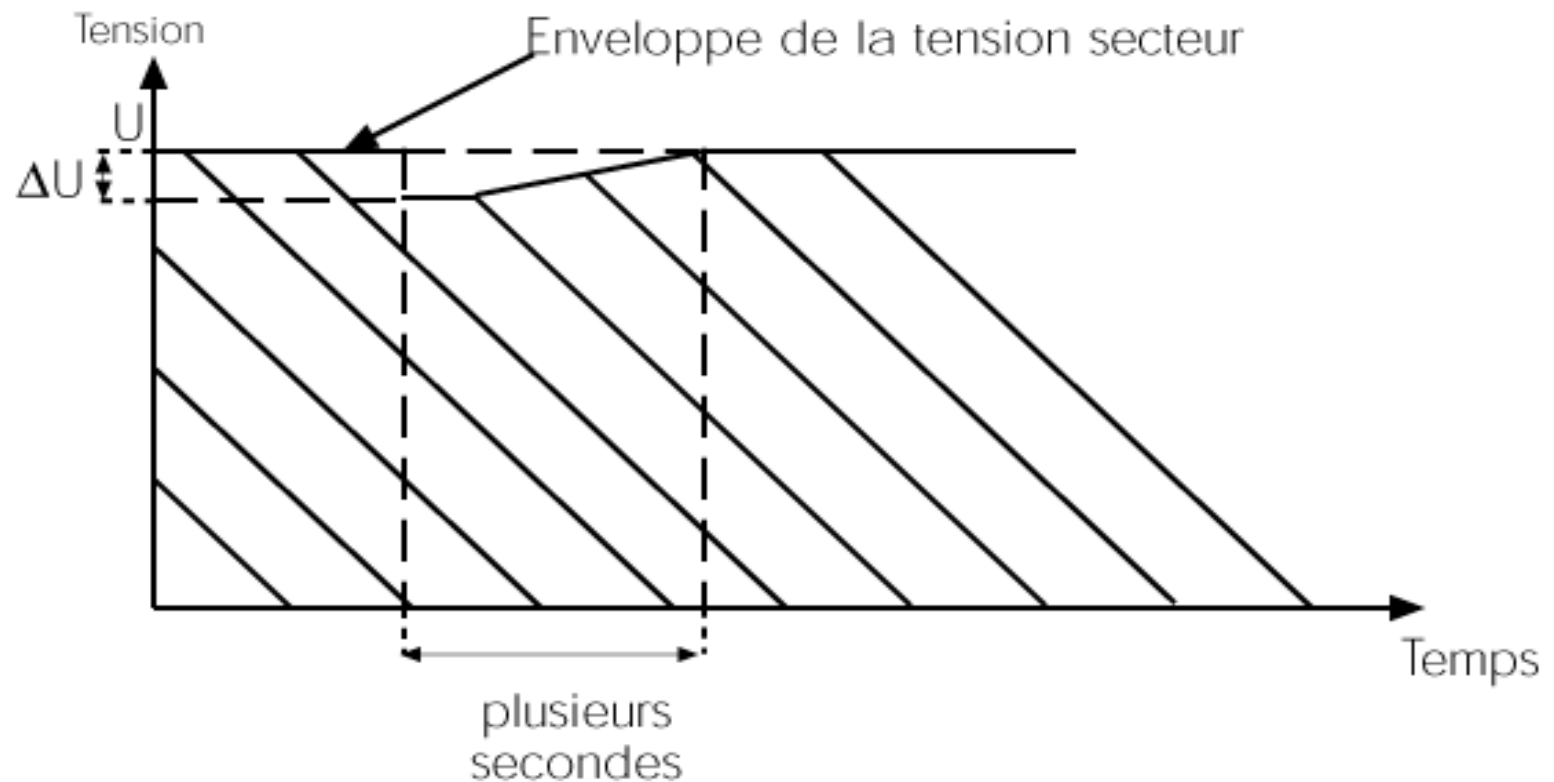
- Elles sont dues aux variations de charge sur le réseau de distribution.

□ Conséquences

- Chute de tension pour les abonnés situés près de gros consommateurs d'énergie
- Surintensité ou surconsommation à puissance constante

Perturbations conduites :

Variations lentes de tension

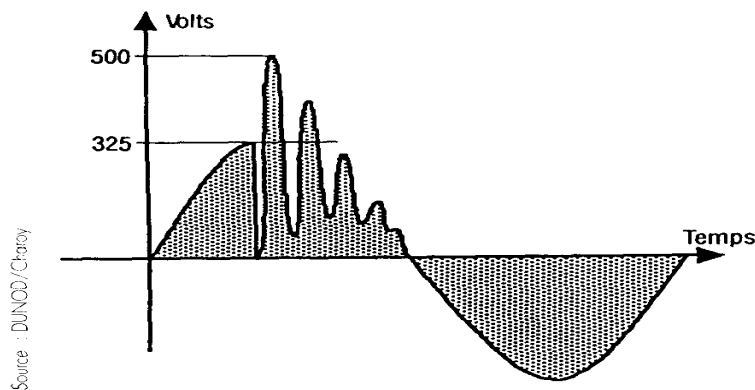


Perturbations conduites : Surtensions

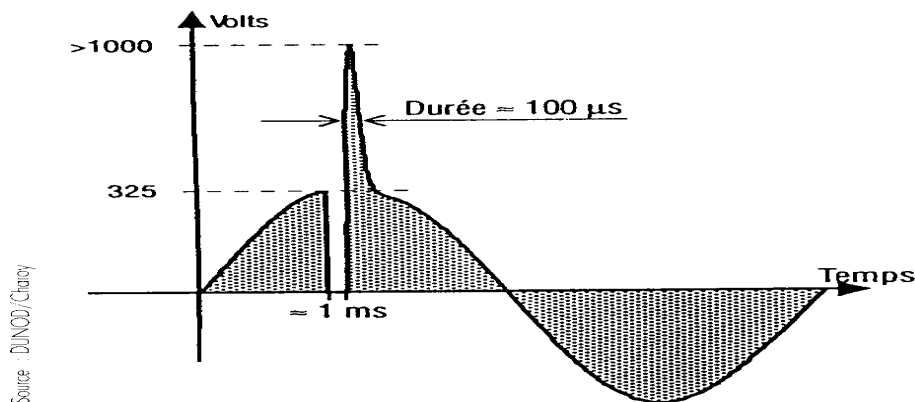
- Surtensions d'origine humaine
 - Elles sont créées localement et leur énergie peut se compter en centaines de joules
- Causes
 - Résonances de circuits inductifs et capacitifs
 - Délestage du réseau
 - Fonctionnement d'une protection (ouverture d'un disjoncteur, ...)
- Conséquences
 - La surtension provoque l'endommagement de circuits voisins

Perturbations conduites : Surtensions

■ Surtensions d'origine humaine



Surtension lors de l'enclenchement de gros condensateurs secteur



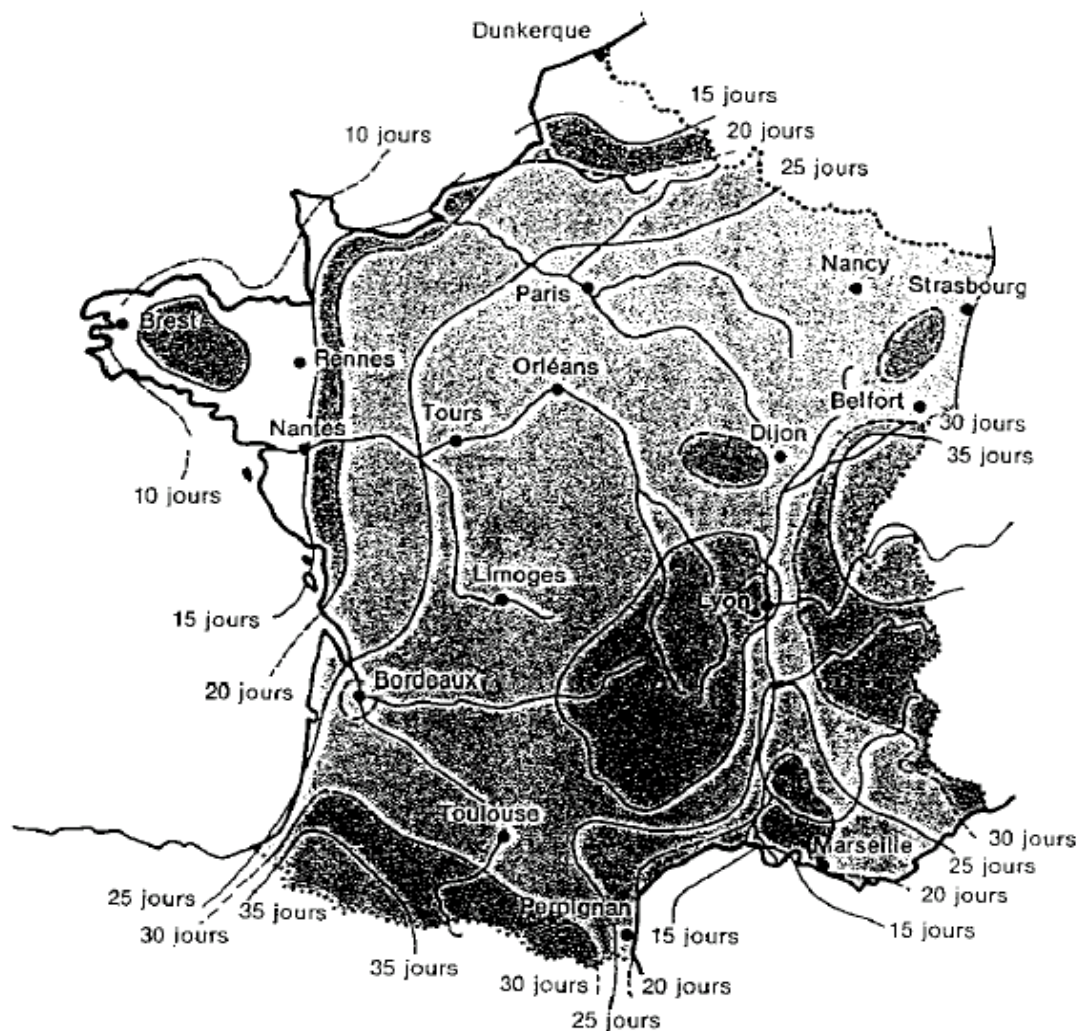
Surtension lors de la fusion d'un fusible à fil (Impulsion)

Perturbations conduites : Surtensions atmosphériques Foudre

- Surtensions d'origine atmosphérique
 - La foudre : 1 à 2 millions d'impacts en France par an
 - Certaines zones géographiques sont plus exposées
- 2 cas :
 - Coup de foudre direct ...
 - Surtension induite (à distance)
- Conséquences
 - Destruction totale des systèmes par coup de foudre direct
 - Destruction d'alimentation et de sous-ensembles par effet induit
 - Le bétail n'aime pas trop ...

Perturbations conduites : foudre

Nombre moyen de jours avec orage par an



Perturbations conduites : foudre

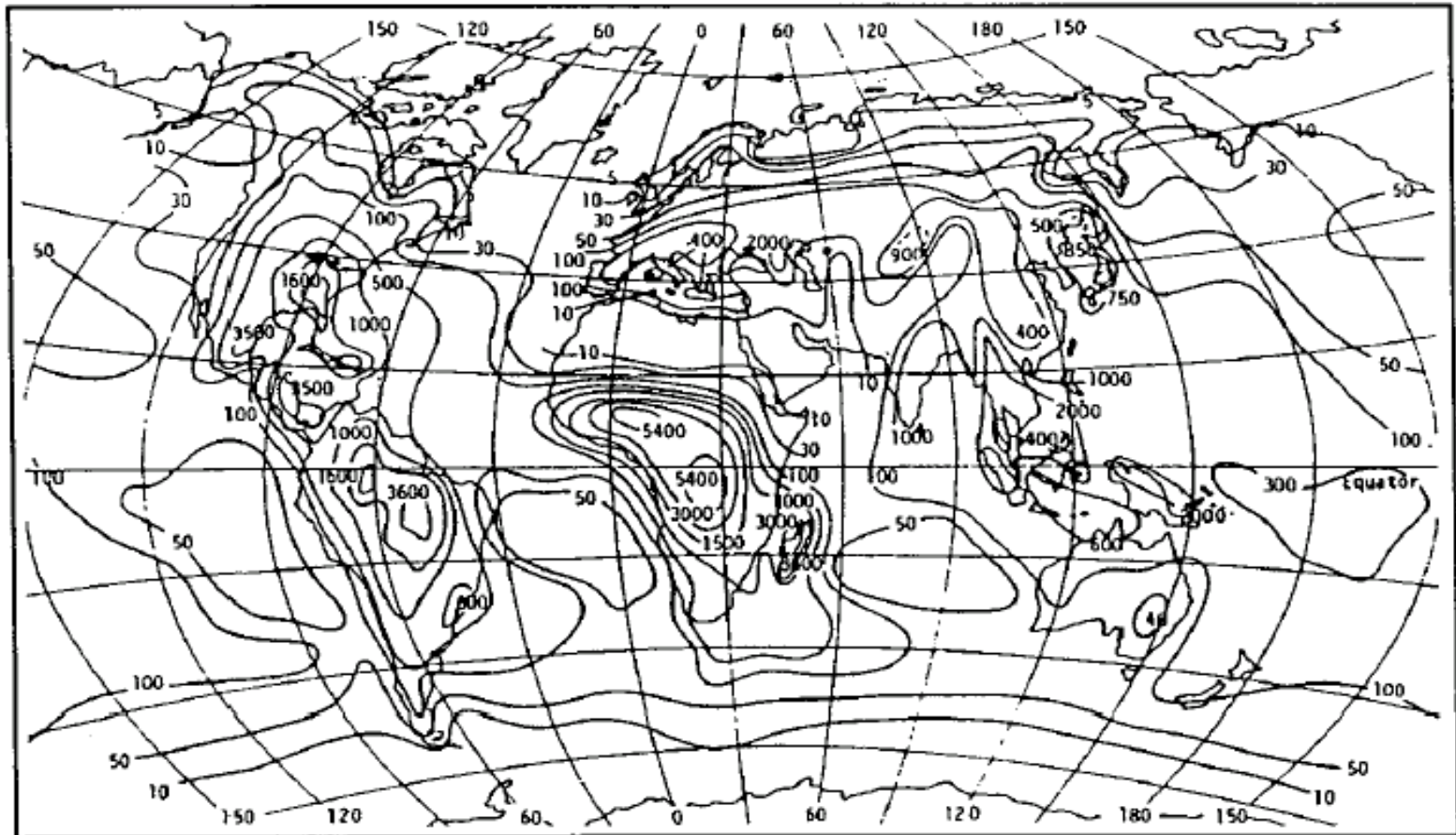
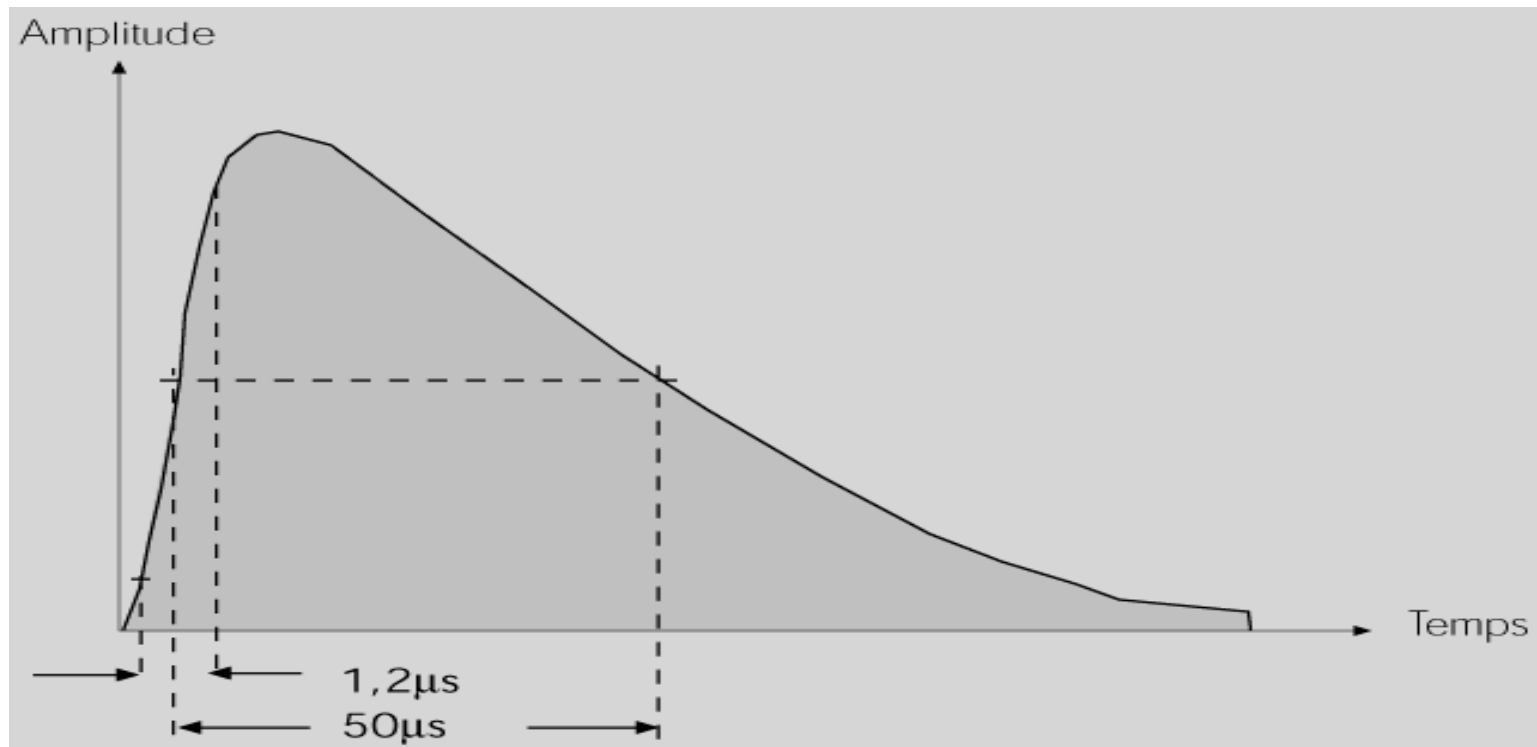


Figure 2 - Lightning Discharges Over the Surface of the Earth.

Perturbations conduites : Surtensions

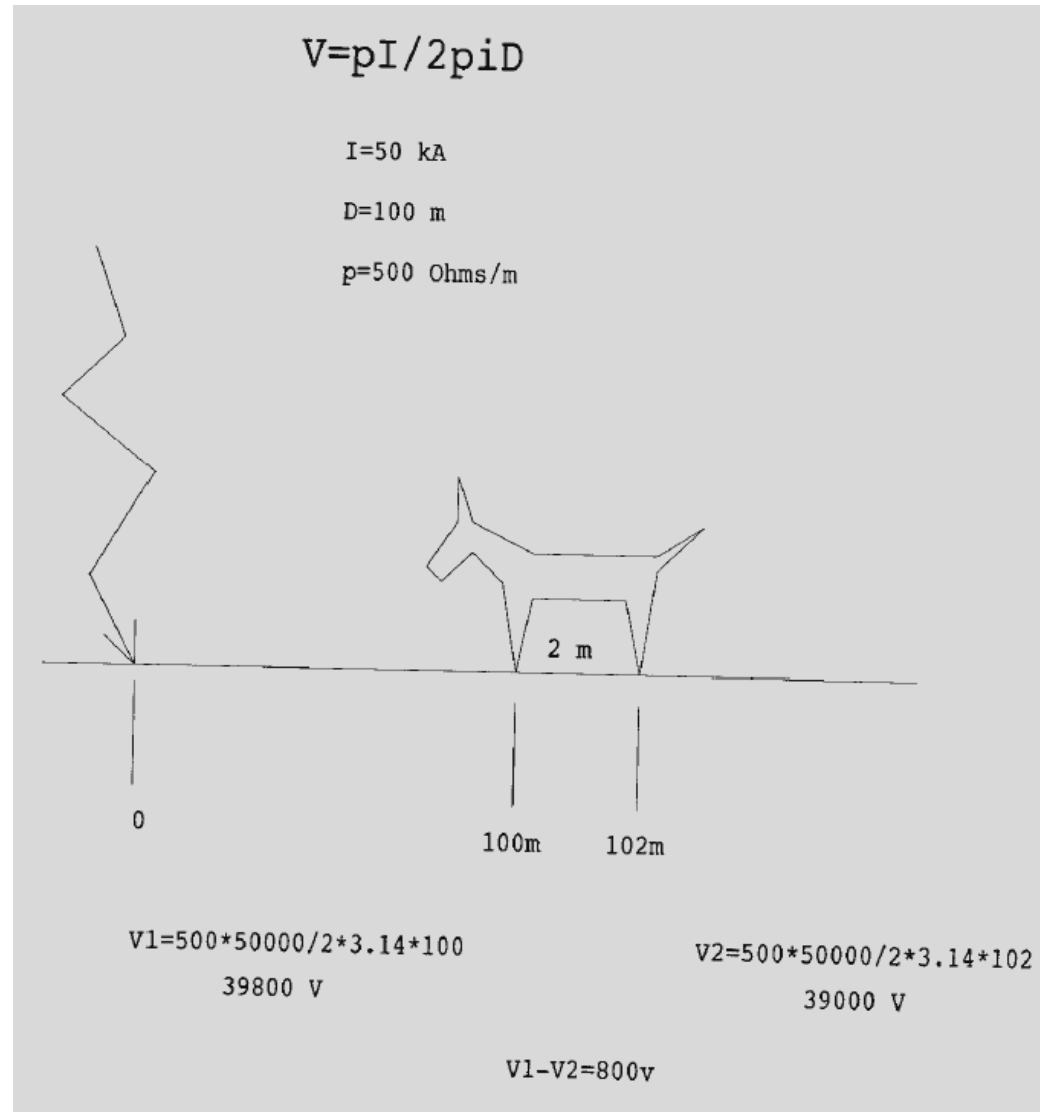
■ La foudre :

- surtension et induction induites à distance très importantes
- plusieurs dizaines de kA en quelques microsec.



Sur tension induite à distance par la foudre

- La foudre :
 - DDP importante entre 2 points au sol
 - Animaux ...
 - Attention aux prises de terre séparées



Sur tension induite par la foudre

■ Protections contre la foudre :

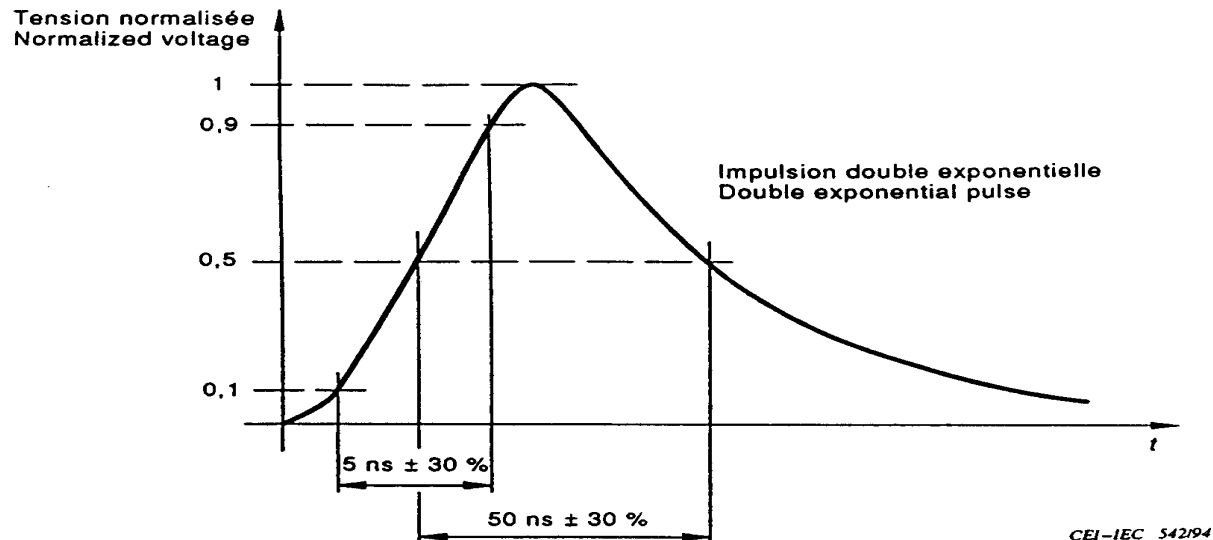
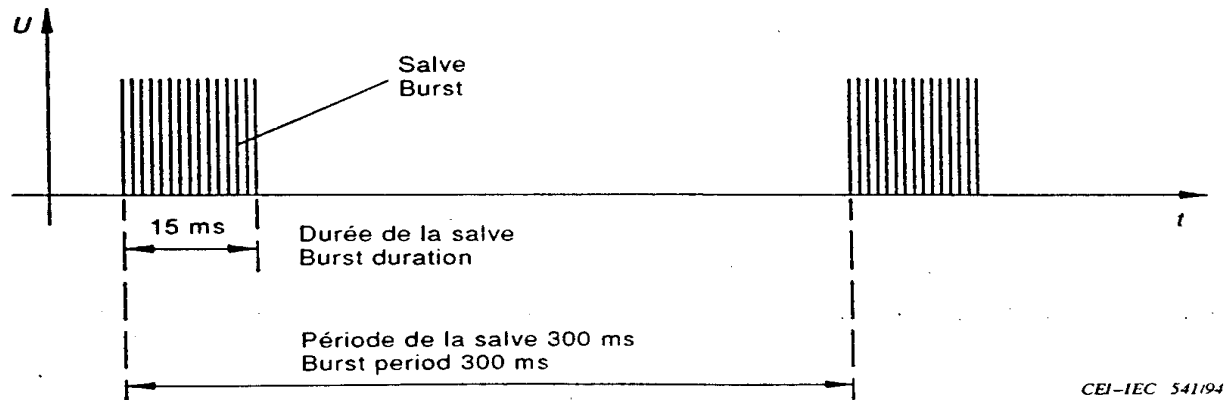
- Protections primaires :
Paratonnerre (invention de B. Franklin, « effet de pointe »),
cage de Faraday (instrumentation)
 - Écoulent l'énergie vers le sol
- Protections secondaires :
 - Attention aux câbles, capteurs distants
 - Attention aux amplis différentiels (High Z)
 - Protections : éclateurs à gaz, varistances (MOV),



Perturbations conduites : transitoires rapides

- Les transitoires rapides en salves
 - L'énergie à dissiper est faible, mais la largeur du spectre peut s'étendre au delà de 100 MHz.
- Causes
 - Générés par l'ouverture d'un relais ou d'un contacteur alimentant une charge inductive (rafale d'impulsions)
- Conséquences
 - Le pouvoir perturbateur est important.
 - En numérique, le parasite peut être interprété comme un signal, ou même induire un problème de « latch-up »

Perturbations conduites : Transitoires rapides



Perturbations conduites : Harmoniques secteur

□ Causes

- Elles sont générées par des équipements qui consomment un courant non sinusoïdal tels que l'éclairage fluorescent ou les alimentations à découpage (équipement à composants non linéaires diodes, thyristors, ...)

□ Conséquences

- Échauffement des câbles (fil du neutre en triphasé)
- Vieillessement prématuré des composants électroniques

□ Instrumentation : bruit



Perturbations conduites :

Autres types de perturbations

- Autres types de perturbations :
 - Les déséquilibres de tensions en triphasé
 - Les variations de fréquence du réseau
 - Les inter-harmoniques

Perturbations conduites et rayonnées : Décharges électrostatiques

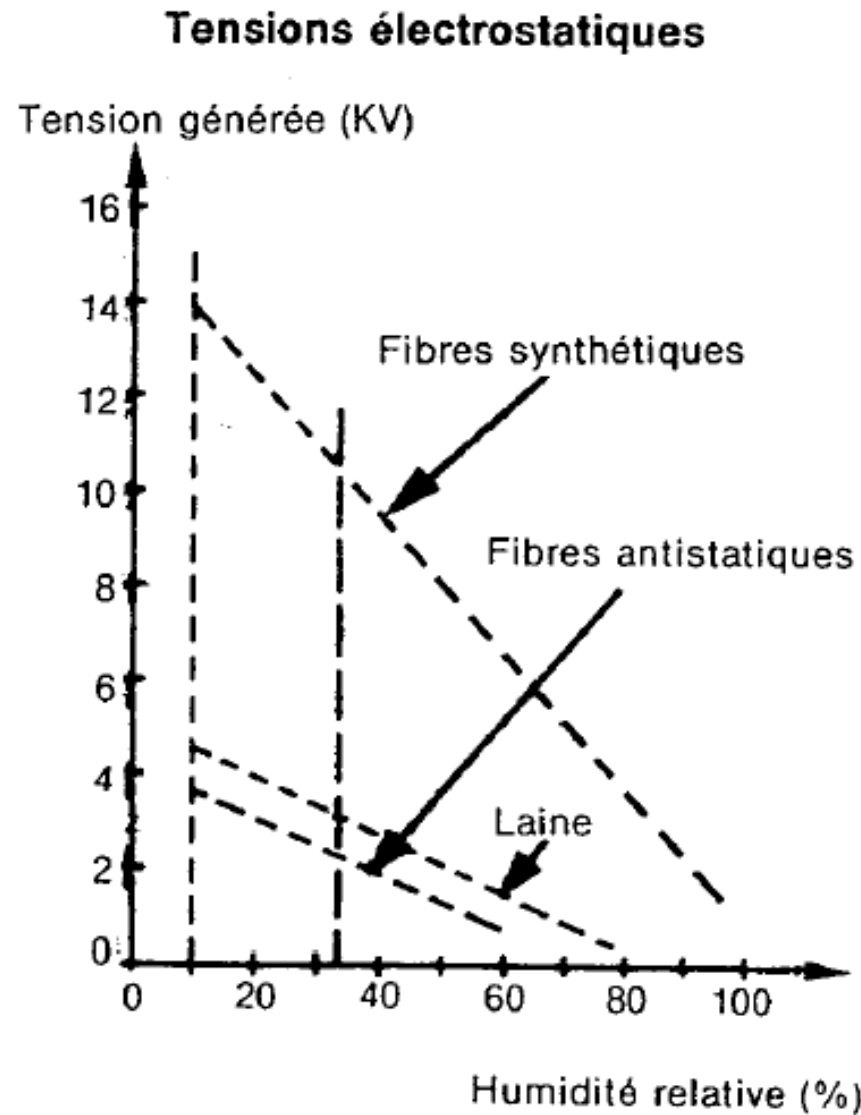
□ Causes

- Transfert de charges électriques entre un homme et le système (capacité avec le sol environ 200 pF)
- Tensions de quelques kV courantes

□ Conséquences

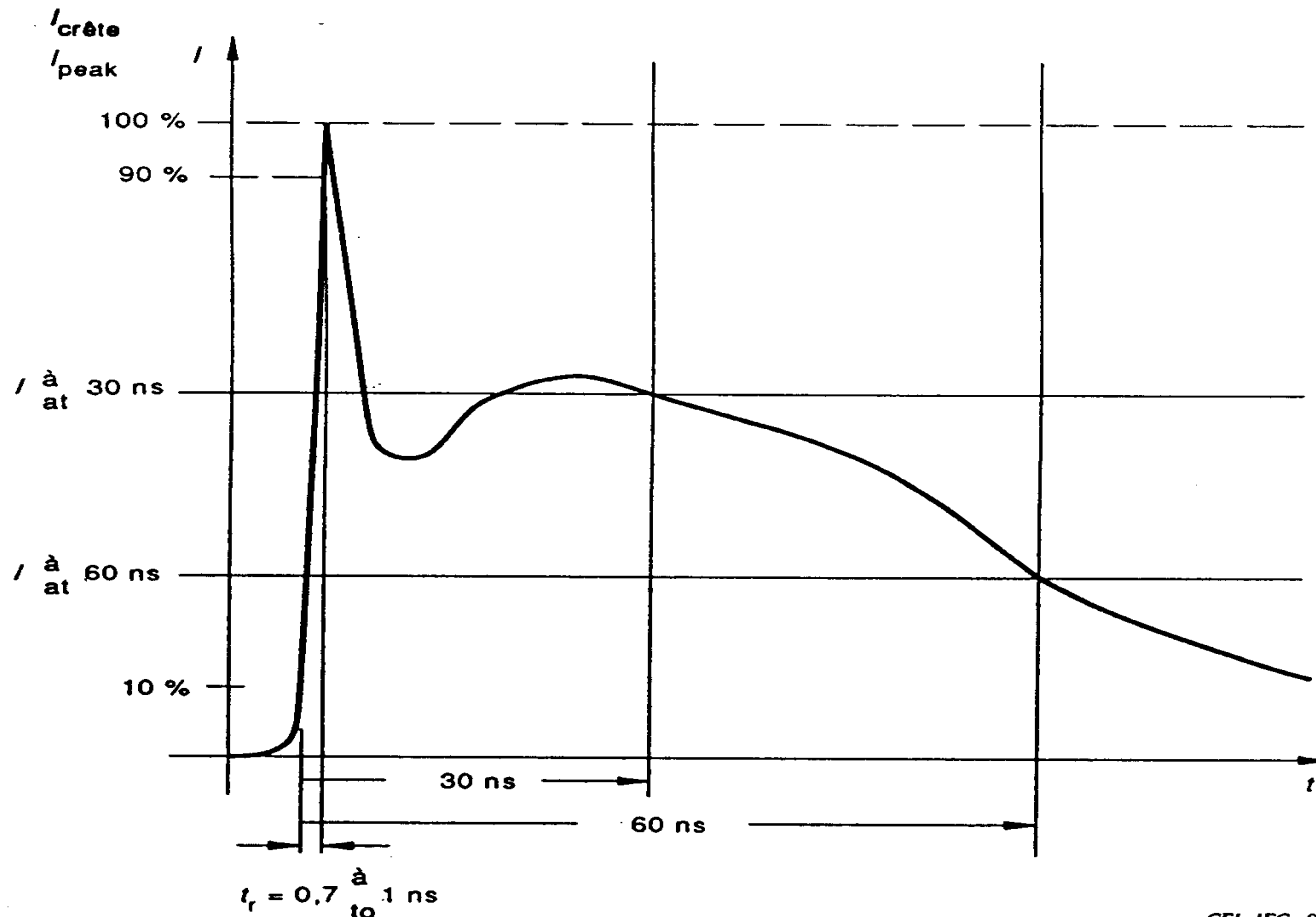
- Risques de destruction de composants
- Vieillessement prématuré des composants
- Arrêt ou remise à zéro des systèmes

Perturbations conduites et rayonnées : Décharges électrostatiques DES)



Perturbations conduites et rayonnées : Décharges électrostatiques (DES)

- Forme d'onde typique du courant



CEI-IEC 003195

Perturbations rayonnées : Champs électromagnétiques

- Les sources de perturbation et les victimes sont sans liaison galvanique, la perturbation est propagée par une onde électromagnétique composée ainsi :
 - d'un champ magnétique, noté H
 - d'un champ électrique, noté E
- En haute fréquence ces champs sont couplés

Perturbations rayonnées :

Champ magnétique (H en A/m)

- Origine
 - Généré par un courant électrique variable (di/dt)
- Conséquences
 - Déformation des images sur les tubes cathodiques
 - Bruitage des circuits électroniques analogiques bas niveau
 - Bruit dans les boucles de câblage
 - Perturbation de certains capteurs, par exemple des capteurs à effet Hall

Perturbations rayonnées : Champ électrique (E en V/m)

□ Origine

- Généré par les différences de potentiel variables (dV/dt)
- Exemples de source : Téléphones mobiles, antennes

□ Conséquences

- Surtout sensible aux fréquences élevées
- Perturbation des cartes électroniques analogiques

L'ITEMN

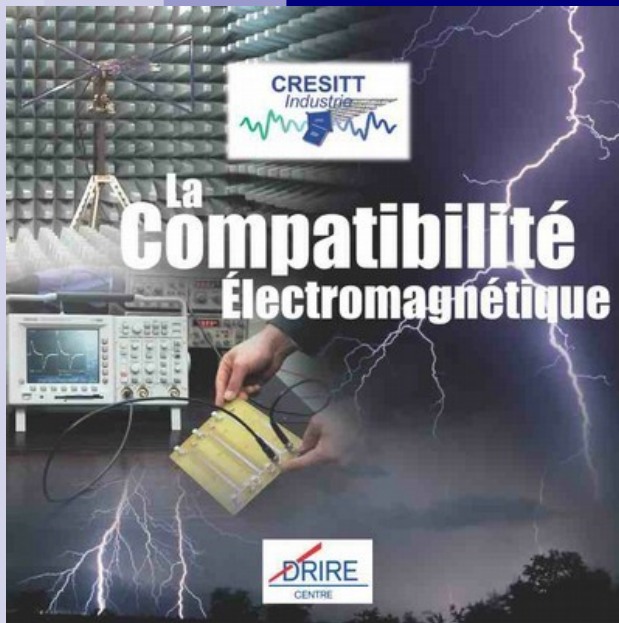
- Impulsion électromagnétique d'origine nucléaire ...
- 1000 fois plus rapide que la foudre !
- Protections, filtres, blindages spécifiques (contre champ électromagnétique et rayonnements)
- Nucléaire, militaire, spatial

La CEM

Chapitre 2

Directive CE : la démarche

Compatibilité Électromagnétique



Chapitre 2

■ La réglementation :

- ☐ La Directive CE
- ☐ Exigences essentielles (perturbations générées, immunité)
- ☐ Déclaration de conformité
- ☐ Marquage CE

■ La démarche

- ☐ Préqualification, qualification

■ Les normes

- ☐ Normes produits
- ☐ Normes génériques

La CEM : réglementation européenne « directive CE » applicable depuis 1996

3988

JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

15 mars 1995

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE, DES POSTES ET TÉLÉCOMMUNICATIONS ET DU COMMERCE EXTÉRIEUR

Décret n° 95-283 du 13 mars 1995 modifiant le décret n° 92-587 du 26 juin 1992 relatif à la compatibilité électromagnétique des appareils électriques et électroniques

NOR : IND09401298D

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre de l'économie, du ministre de l'industrie, des postes et télécommunications et du commerce extérieur et du ministre du budget,

Vu la directive 93/68/CEE du Conseil du 22 juillet 1993 modifiant la directive 89/336/CEE du Conseil du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des Etats membres relatives à la compatibilité électromagnétique ;

Vu le code pénal ;

Vu le code des douanes, notamment ses articles 23 bis et 38 ;

Vu le code des postes et télécommunications, notamment ses articles R. 20-1 et R. 20-3 ;

Vu le code de la consommation, notamment son article L. 214-1 ;

Vu le décret n° 92-116 du 4 février 1992 relatif à l'agrément des équipements terminaux de télécommunications, à leurs conditions de raccordement et à l'admission des installateurs ;

Vu le décret n° 92-587 du 26 juin 1992 relatif à la compatibilité électromagnétique des appareils électriques et électroniques ;

Le Conseil d'Etat (section des travaux publics) entendu,

Décète :

Art. 1^{er}. - L'article 1^{er} du décret du 26 juin 1992 susvisé est



« Les différents éléments de ce marquage doivent avoir sensiblement la même dimension verticale, laquelle ne peut être inférieure à 5 mm.

« Lorsqu'un appareil est soumis à d'autres réglementations transposant des directives prévoyant l'apposition du marquage "CE", cette apposition indique la conformité de l'appareil à l'ensemble de ces réglementations.

« Toutefois, lorsque certaines de ces réglementations prévoient une période pour que les fabricants se mettent en conformité avec les nouvelles dispositions réglementaires, le marquage CE indique la conformité aux seules réglementations appliquées par le fabricant ; les références des directives qui constituent la base légale de celles des réglementations dont il est fait application doivent alors être inscrites sur les documents d'accompagnement des appareils. »

Art. 4. - Dans l'ensemble du décret du 26 juin 1992 susvisé, les mots : « le fabricant ou son mandataire établi sur le territoire de l'un des Etats membres de la Communauté » sont remplacés par les mots : « le fabricant ou son mandataire établi sur le territoire d'un Etat membre de la Communauté européenne ou d'un autre Etat partie à l'accord instituant l'Espace économique européen ou, à défaut, par le responsable de la première mise sur le marché ».

Art. 5. - Le présent décret entre en vigueur le 1^{er} avril 1995. Toutefois, les fabricants, leurs mandataires ou, à défaut, tout

La CEM : réglementation

■ Les directives européennes :

- Ces directives imposent le respect d'exigences essentielles d'ordre technique aux états membres de l'Union Européenne d'une manière qualitative.
- Elles **imposent les contrôles à faire sur un produit, avant sa mise sur le marché**, sans préciser les modalités techniques relevant elles de normes.
- Elles doivent supprimer les entraves aux échanges à l'intérieur de l'Union Européenne.

La directive « CEM »

La directive CEM89./336/CEE

- Cette directive, transposée en droit français, (applicable depuis 1989) est **obligatoire depuis le 1er janvier 1996.**
- Son domaine d'application concerne tout équipement électrique ou électronique, même pour une fabrication unitaire. Il en est de même pour les matériels d'occasion reconfigurés.

La directive CEM : Exigences

- Les exigences essentielles de la directive CEM sont rédigées en terme d'objectifs qualitatifs :
 - Les **perturbations générées** doivent être limitées à un niveau permettant aux systèmes de radio et de télécommunication, ainsi qu'aux autres appareils, de fonctionner conformément à leur destination
 - **émissivité**
 - Les appareils doivent avoir un niveau adéquat d'**immunité intrinsèque** contre les perturbations électromagnétiques leur permettant de fonctionner conformément à leur destination
 - **immunité**

Vocabulaire spécifique à la directive CEM

- **Appareil** : c'est un produit fini contenant des composants électriques, destiné à être mis sur le marché et à destination de l'utilisateur final. L'appareil permet l'obtention d'une fonction directe. Chaque appareil doit être CE.
- **Système** : Ensemble d'appareils conçus et fabriqués pour être associés entre eux afin de remplir une tâche déterminée, et mis sur le marché comme une seule entité et à destination de l'utilisateur final.



Vocabulaire spécifique à la directive CEM

- Exemple de système : Un système informatique peut comprendre un écran, une unité centrale, un clavier, etc., chaque appareil ne pouvant être utilisé séparément.
- **Un système doit être testé en une seule entité.** Tous les éléments mis séparément sur le marché doivent être CE.

Vocabulaire spécifique à la directive CEM

- **Installation** : Association de plusieurs appareils ou systèmes mis en place dans un lieu donné, et pour un but donné, mais qui ne sont pas destinés à être mis sur le marché en une seule entité.
- Chaque élément constitutif d'une installation doit être CE.

Vocabulaire spécifique à la directive CEM

- **Composant** : Ce mot ne doit pas être pris au sens traditionnel de l'électronique, mais au sens de sous-ensemble ou de constituant.
 - Lorsque le composant est destiné à être intégré dans un appareil, le composant n'est pas soumis aux dispositions de la directive. Exemple : la carte alimentation d'un ordinateur destiné à un assembleur n'est pas soumise au marquage CE, c'est l'ordinateur complet qui doit être CE.
 - Si le composant délivre une fonction directe, il est assimilable à un appareil et doit donc se conformer aux prescriptions de la directive.

Directive CEM : Domaines d'exclusion

- Outre les composants élémentaires ou plus complexes, certains appareils **ne sont pas concernés** par la directive :
 - Les appareils destinés aux **radioamateurs** s'il ne sont pas dans le commerce. Ils sont toutefois directement concernés par les phénomènes électromagnétiques (occupation du spectre).
 - Les **produits concernés par une directive spécifique** d'application obligatoire lorsque celle-ci prend en compte une partie spécifique de la CEM (appareils médicaux par exemple), l'exclusion ne portant que sur celle-ci seulement.

Directive CEM : Domaines d'exclusion

- Autres exemples, **non concernés** :
 - Câbles, système de câblage et accessoires,
 - Matériel ne comportant que des charges résistives sans dispositif de coupure automatique tels que les thermostats ou les ventilateurs,
 - Piles et accumulateurs.

Directive CEM : la **déclaration de conformité**

Obligatoire pour la mise sur le marché européen

- Elle doit contenir les éléments suivants :
 - Description de l'appareil visé.
 - Références des directives concernées.
 - Références des normes harmonisées par rapport auxquelles la conformité a été évaluée.
 - Identification du signataire ayant reçu pouvoir pour engager le fabricant ou son mandataire.
 - Le cas échéant, les références de l'attestation CE de type ou du rapport technique délivré respectivement par l'organisme notifié ou compétent.

Directive CEM : la déclaration de conformité

■ Exemple de présentation

Déclaration de conformité

Nous.....
(Nom du demandeur)

.....
(Adresse)

déclarons que le produit

.....
(Nom, type ou modèle, numéro de lot, de série, si possible origine et nombre de pièces)

concerné par cette déclaration, est conforme aux normes suivantes ou aux documents normatifs.

.....
(Titre et/ou numéro, ainsi que date de publication des normes ou des autres documents normatifs)

(Au cas où cela est applicable)

Conformément aux conditions de la directive

.....
(Lieu et date de la délivrance)

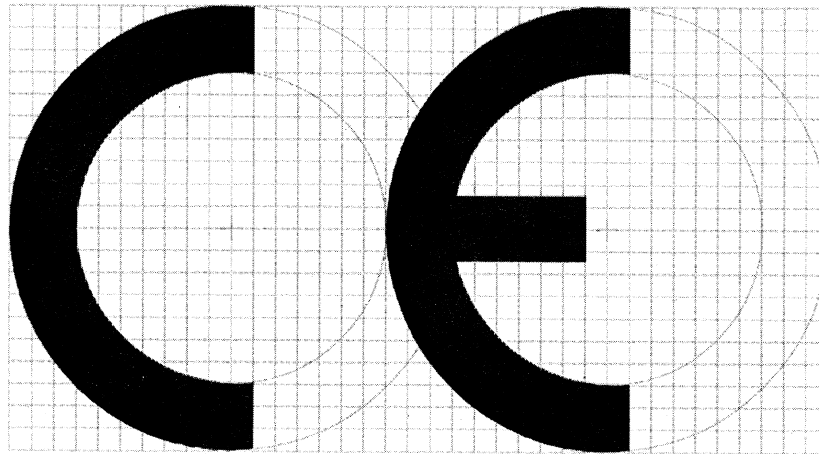
.....
(Nom et signature ou désignation équivalente de la personne autorisée)

Directive CEM : le « marquage CE »

- Il signifie **Conformité Européenne** et est le signe distinctif de la conformité du produit aux diverses directives qui lui sont applicables (directive CEM, basse tension BT, machine, ...)
- Le fabricant ou le mandataire a la responsabilité de la conformité de son produit aux directives. Il doit rédiger une Déclaration de Conformité.

Directive CEM : le marquage CE

- La grille de fond n'est pas un élément du graphisme.
- Ce graphe peut être reproduit à toute échelle proportionnelle, avec une taille minimale de 5 mm.

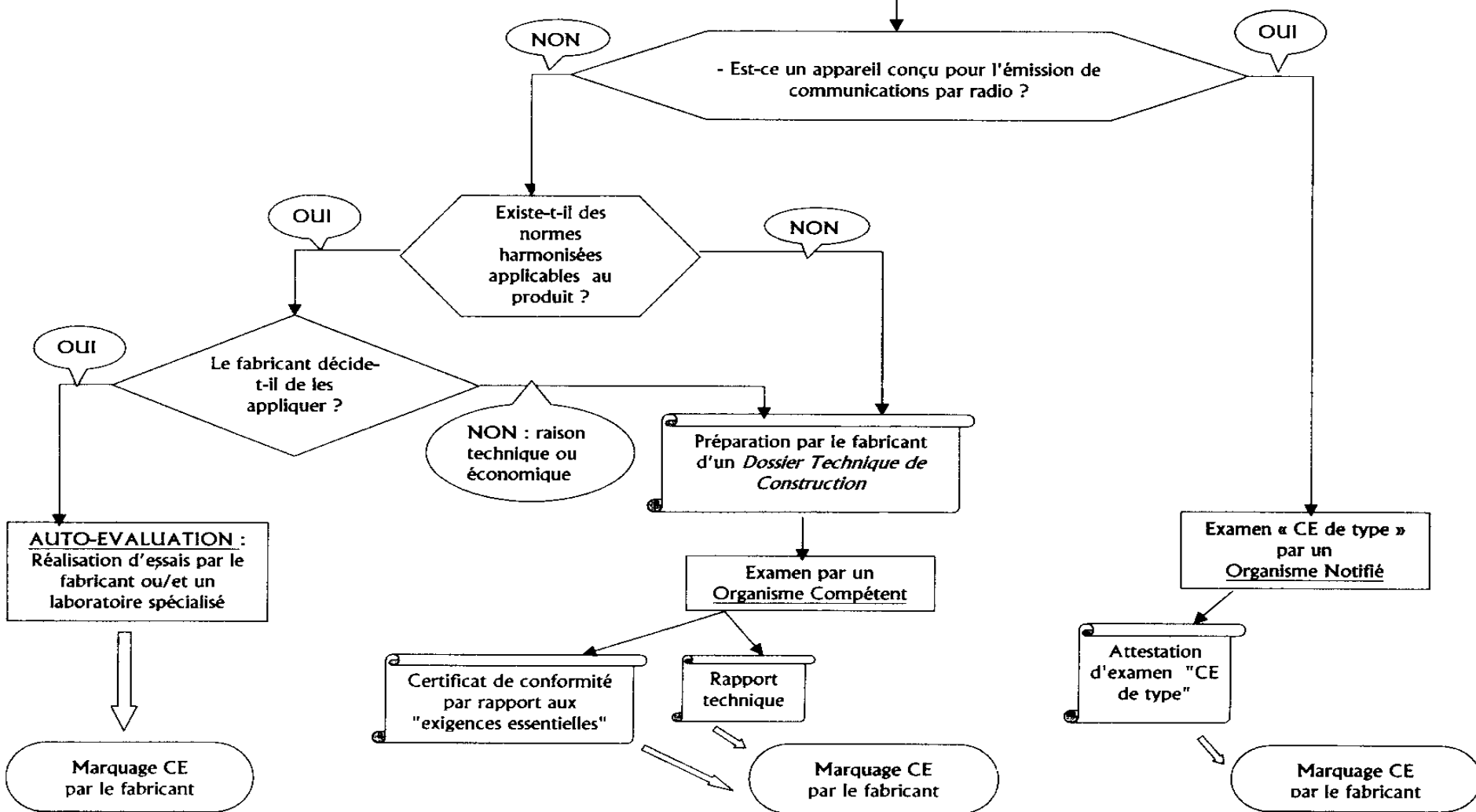


Directive CEM : les procédures d'évaluation de la conformité à la directive

- Conformité aux exigences essentielles
- Il existe 3 procédures possibles :
 - **L'auto-évaluation** selon l'article 10.1
 - **Le certificat de conformité** établi par un organisme compétent ou notifié selon l'article 10.2 (dossier technique de construction)
 - **L'examen CE de type** établi par un organisme notifié selon l'article 10.5.

Directive CEM : procédures d'évaluation de la conformité à la directive

PRODUIT à priori concerné par la Directive CEM



Directive CEM : l'auto-évaluation selon l'article 10.1.

- C'est le cas le plus courant et le plus simple qui convient lorsque le fabricant applique les normes harmonisées applicables au produit.
- Après identification de ou des normes applicables, le fabricant a deux options :
 - Procéder aux essais dans son entreprise s'il en dispose les moyens conformément aux normes.
 - Faire appel à un sous-traitant, laboratoire d'essais, un conseil spécialisé, etc., pour effectuer tout ou partie des essais.



Directive CEM : l'auto-évaluation selon l'article 10.1.

- Dans ces deux cas, **le fabricant devra engager sa responsabilité** sur la base des résultats fournis.
- Le passage par un laboratoire accrédité n'est pas obligatoire.
- C'est la procédure dont le coût est le plus faible.

La directive CEM : le certificat de conformité selon l'article 10.2

- Procédure du dossier technique de construction
- Ce certificat est délivré par un organisme dit compétent (pour la directive CEM).
- Ce recours s'impose lorsque le fabricant n'applique pas les normes harmonisées pour des raisons techniques, commerciales, ou autres.

La directive CEM : le certificat de conformité selon l'article 10.2

- Le fabricant doit constituer un dossier technique de construction et le soumettre à l'organisme compétent de son choix (18 en France en 2000).
- Celui-ci s'en servira pour définir une procédure adaptée à l'évaluation de la conformité du produit (essais à réaliser).
- Un certificat de conformité ou un rapport technique sera remis à l'issue de l'étude



La directive CEM : l'examen « CE de type » selon l'article 10.5

- Le fabricant a le choix de l'organisme notifié (4 en France en 2001).
- Le fabricant doit fournir à cet organisme un exemplaire représentatif du produit ainsi que la documentation (technique, fabrication, fonctionnement) nécessaire à l'évaluation du produit.

La directive CEM : l'examen CE de type selon l'article 10.5

- L'organisme notifié fait effectuer les essais nécessaires et délivre, si le produit est conforme à la directive, une **attestation CE de type**.
- Sur la base de cette attestation, le fabricant établit la déclaration de conformité certifiant que les produits fabriqués en série sont conformes au type décrit dans l'attestation. Un système d'assurance qualité est requis.

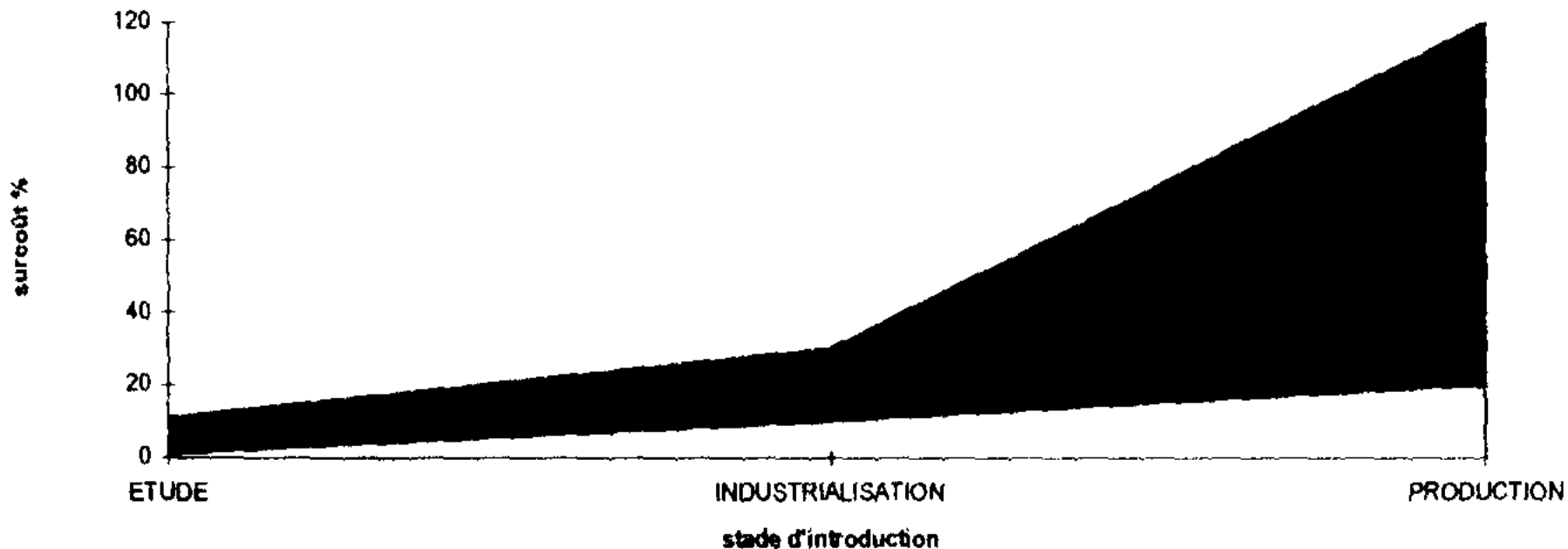
Le coût de la CEM

- Le coût de la certification
 - L'entreprise peut effectuer les essais par ses propres moyens techniques et compétences,
 - Si l'entreprise ne dispose pas de moyens suffisants, il est nécessaire alors de passer par un laboratoire,
 - Le coût des essais en laboratoire évolue entre 1200 et 2500 € la journée selon le type d'essai (constat année 2006),
 - Les essais durent de 1 à 3 jours,
 - **Prévoir la CEM à la conception du produit (prévoir le coût et le délai dans le projet)**

Le coût de la CEM

- Répercussion sur le prix de revient du produit : Ce diagramme montre à quel point il est important que la CEM soit prise en compte le plus tôt possible.

Prévision du coût de conformité



CEM : la démarche



CEM : la démarche pratique

■ Choix initiaux :

- ☐ Analyser les contraintes CEM tant pour combler les oublis que pour supprimer les excès.
- ☐ Préciser les niveaux de normes ainsi que les conditions de fonctionnement à respecter durant les essais.
- ☐ **Intégrer la CEM dès la conception du produit**

CEM : la démarche

■ Simulation ou mesures ?

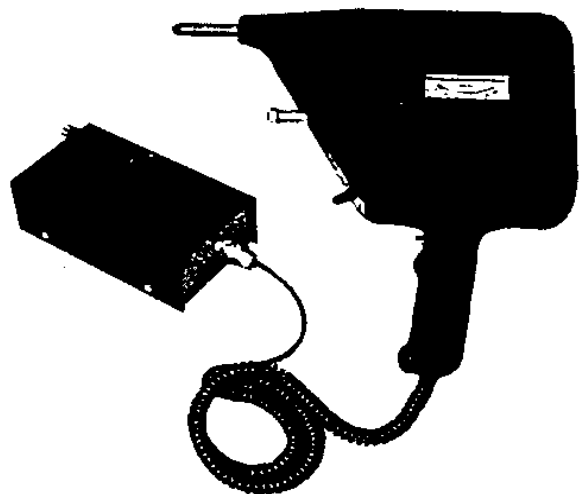
- ☐ Les mesures sont actuellement irremplaçables malgré les performances des outils numériques de simulation (routage, RF, antennes, ...).

■ Préqualification

- ☐ Essai à faible coût (souvent en interne) permettant de corriger les faiblesses de l'équipement sous test avant le passage à un essai normalisé.
- ☐ Equipements de coût raisonnable (analyseur RF et antennes bas coût, pistolet à décharge)

Pistolet à décharge (préqualification)

Simulateur pour décharges statiques NSG 430/NSG 431



Caractéristiques techniques

Temps de montée:	$5 \text{ ns} \pm 30\%$ à 2 kV
Tension de décharge:	$2 \div 16,5 \text{ kV} / 2 \div 21 \text{ kV}$
Polarité:	positive/negative
Condensateur de déchargé Co:	$150 \text{ pF}^* \pm 10\%$
Résistance de décharge Ro:	$150 \Omega^* \pm 5\%$
Mode de fonctionnement:	répétitif (20 Hz) ou coup par coup
Alimentation:	100/120/220/240 V AC $\pm 10\%$ 50/60 Hz
Gamme de température:	$5 \div 40 \text{ C}$
Degré de déparasitage:	N (VDE 0875)
Poids (sans alimentation):	$\approx 1,2 \text{ kg}$
©DM/00393 9.10.80	

CEM : la démarche

■ La préqualification

- Le test des transitoires rapides en salve réalisé selon la norme CEI 1000-4-4 ne nécessite que très peu de matériel et est bon marché. Il permet de mettre en évidence bon nombre de problèmes sur un équipement mal conçu.

Si un essai doit être fait dans l'entreprise c'est celui-ci !

CEM : la démarche

■ Qualification

- ☐ Essais exécutés selon les normes, nécessitent un lourd investissement matériel (essais quantitatifs) : banc de mesure RF, émission-réception, chambre anéchoïque, ...
- ☐ Personnel confirmé en CEM

■ La fabrication

- ☐ Contrôler les dérives en fabrication.
- ☐ Attention aux secondes sources des composants !

Le choix du prestataire CEM

■ Le conseil :

- Le coût d'un consultant est compris entre 1000 et 2000 € la journée. Il permet d'économiser des jours d'essais puisque la probabilité que le produit soit conforme au 1er essai est plus grande.

■ Le laboratoire d'essai :

- Le tarif journalier oscille entre 1000 et 3000 € la journée. Certains laboratoires proposent aux entreprises une aide technique à la mise en conformité du produit en plus des essais.

Non respect de la directive CEM : Risques et sanctions

■ Cas de matériel non conforme

- ☐ En cas de marquage abusif, ou d'absence de marquage, l'amende peut atteindre 40 000 € avec retrait du produit du marché.
- ☐ Peine de prison de 3 mois à 2 ans.
- ☐ Le responsable est le fabricant ou son mandataire.
- ☐ Coût commercial difficilement chiffrable mais bien réel (perte de confiance, mauvaise renommée)

Les normes CEM

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES ET DE L'INDUSTRIE

Avis relatif à l'application du décret n° 92-587 du 26 juin 1992 modifié relatif à la compatibilité électromagnétique des appareils électriques et électroniques

NOR: ECOI9700787V

(Directive 89/336/CEE du 3 mai 1989 modifiée du Conseil des Communautés européennes)

Le présent avis annule et remplace l'avis publié au *Journal officiel* du 11 mai 1996 (p. 7128). Il comporte en annexe une liste, mise à jour au 19 novembre 1997, des normes françaises homologuées transcrivant les normes européennes harmonisées dont les références ont été publiées au *Journal officiel des Communautés européennes* et qui peuvent être utilisées pour l'application du 1 de l'article 5 du décret n° 92-587 du 26 juin 1992 modifié.

Cet avis est susceptible d'une mise à jour.

ANNEXE

INDICE DE LA NORME	TITRE DE LA NORME
NF EN 50065-1 (avril 1991). A1 (mars 1993), A2 (décembre 1995) et A3 (novembre 1996). Indice de classement: C 90-201.	Transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz. - Partie 1: règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques.
NF EN 50081-1 (juin 1992). Indice de classement: C 91-081-1.	Compatibilité électromagnétique. - Norme générique émission. - Partie 1: résidentiel, commercial, industrie légère.
NF EN 50081-2 (décembre 1993). Indice de classement: C 91-081-2.	Compatibilité électromagnétique. - Norme générique émission. - Partie 2: environnement industriel.
NF EN 50082-1 (juin 1992). Indice de classement: C 91-082-1.	Compatibilité électromagnétique. - Norme générique immunité. - Partie 1: résidentiel, commercial et industrie légère.
NF EN 50082-2 (juin 1995). Indice de classement: C 91-082-2.	Compatibilité électromagnétique. - Norme générique immunité. - Partie 2: environnement industriel.
NF EN 50083-2 (mars 1996).	Systèmes de distribution par câble destinés aux signaux de radiodiffusion sonore et de télé-

Les normes CEM

■ Les normes produits

- Les normes produits ou familles de produits sont directement liées à un type d'appareil (médicaux « ISM », électro-domestiques, ...)

■ Les normes génériques

- Lorsqu'il n'existe pas de normes produits spécifiques, il convient d'utiliser les normes génériques. Elles sont élaborées à partir des normes fondamentales qui décrivent la typologie des essais.

Les normes produits

■ Exemples :

Perburbations émises et conduites

- **EN 55011** **Appareils industriels, scientifiques et médicaux**
- **EN 55013** **Appareils de radiodiffusion et assimilés**
- **EN 55014** **Appareils électrodomestiques**
- **EN 55015** **Appareils d'éclairage et luminaires**
- **EN 55022** **Appareils de traitement de l'information**

Immunité

- **EN55020** **Appareils de radiodiffusion et assimilés**

Les normes génériques

NORMES GENERIQUES

**RESIDENTIEL
et INDUSTRIE LEGERE**

INDUSTRIE

Perturbations émises EN 50081-1

EN50081-2

Immunité EN50082-1

EN50082-2

2 classes d'environnement : Résidentiel / industrie

Les normes fondamentales

Références CENELEC	Date	Titre (abrégé)	Référence CEI (en principe équivalente)
EN 61000-4-1	1995	Vue d'ensemble sur les essais d'immunité	CEI 1000-4-1
EN 61000-4-2	1995	Tests aux décharges électrostatiques de 2 à 15 kV	CEI 1000-4-2
EN 61000-4-3	1996	Immunité aux champs électromagnétiques 27 MHz à 1 GHz, niveau 1 à 10 V/m	CEI 1000-4-3 (non équivalence stricte)
EN 61000-4-4	1995	Immunité aux transitoires rapides en cours de révision sur les niveaux à appliquer sur les lignes jusqu'à 4 kV	CEI 1000-4-4
EN 61000-4-5	1995	Immunité aux impulsions à haute énergie sur le secteur : 1,2/50 μ s jusqu'à 4 kV	CEI 1000-4-5
EN 61000-4-6	1992	Immunité aux perturbations conduites induites par champs sur la ligne dans la gamme 9 kHz à 80 MHz sous 1 à 10 V	CEI 1000-4-6
EN 61000-4-8	1994	Immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau	CEI 1000-4-8
EN 61000-4-9	1994	Immunité au champ magnétique impulsionnel	CEI 1000-4-9
EN 61000-4-10	1994	Immunité au champ magnétique oscillatoire amorti	CEI 1000-4-10
EN 61000-4-11	1995	Immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension	CEI 1000-4-11



La CEM

Chapitre 3

Aspects physiques et technologie

Compatibilité Électromagnétique



Sommaire

- Introduction
- Les perturbations
- La réglementation
- La démarche
- Les normes
- **Aspect physique**
- **La technologie**
- **Annexes**
- **Les liens utiles**

Sommaire partie 3

■ Aspect physique :

- Essais : immunité, émissivité, transitoires rapides, DES
- Notions essentielles (modes de couplage, remèdes) : couplage par impédance commune, « effet de main », champ E et H

■ La technologie :

- R, L et C en HF ...
- Filtres, ferrites, blindages
- Parasurtenseurs
- Câbles, connecteurs, joints, ...

Les mesures CEM

- On considère en général que :
 - **Les perturbations conduites sont prédominantes en « BF » (150 kHz à 30 MHz)**
 - Essais : utilisation d'un réseau de couplage RSIL + analyseur de spectre
 - **Les perturbations rayonnées sont prédominantes en « HF » (> 30 MHz à 1GHz)**
 - Essais : utilisation d'antennes et d'un analyseur de spectre radiofréquence et générateur HF
 - Tests à 10 m (ou 3 m avec correction)
 - Immunité : antenne en émission
 - Emissivité : antenne en réception

Les essais CEM

- Chambre anéchoïque avec antenne de mesure (rayonné)



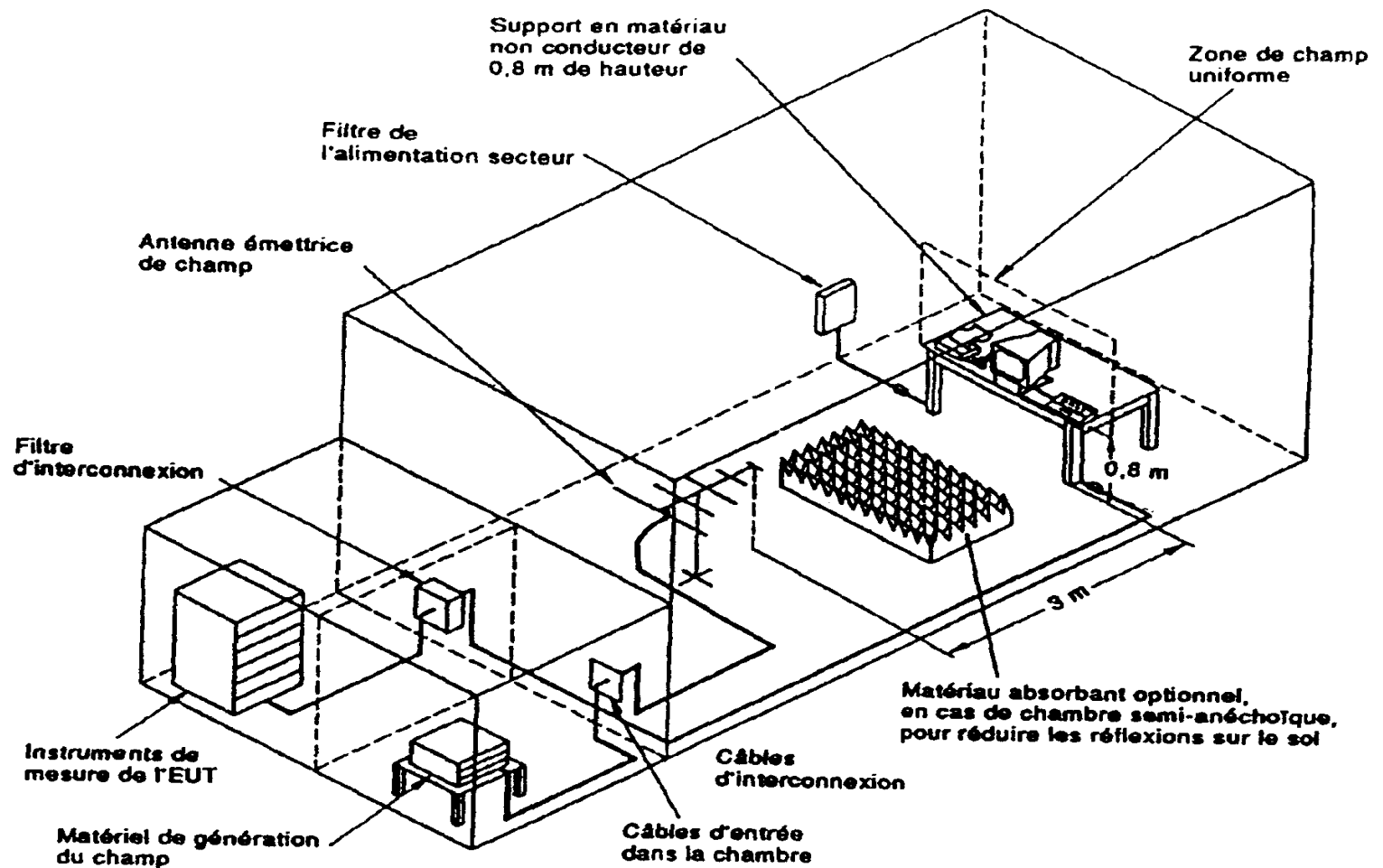
Exemple de chambre anéchoïque (Atcom)



<D:\cem2008\CEM2008-Final\ChambreAtcom.mpg>

Essais d'immunité rayonnée

IMMUNITE AUX CHAMPS RAYONNES



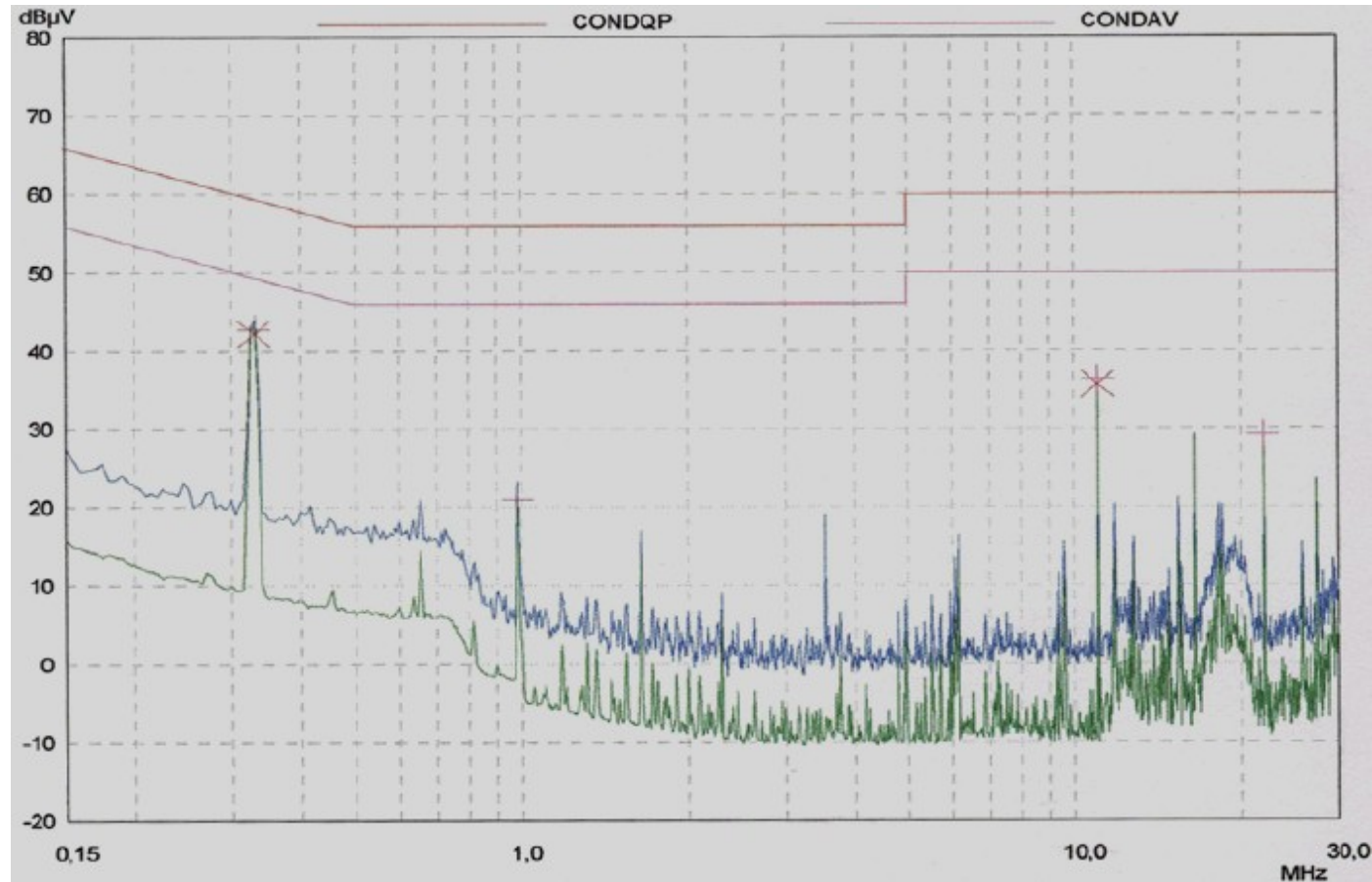
Essais d'immunité rayonnée : analyseur de spectre et ampli HF



Essais d'émissivité



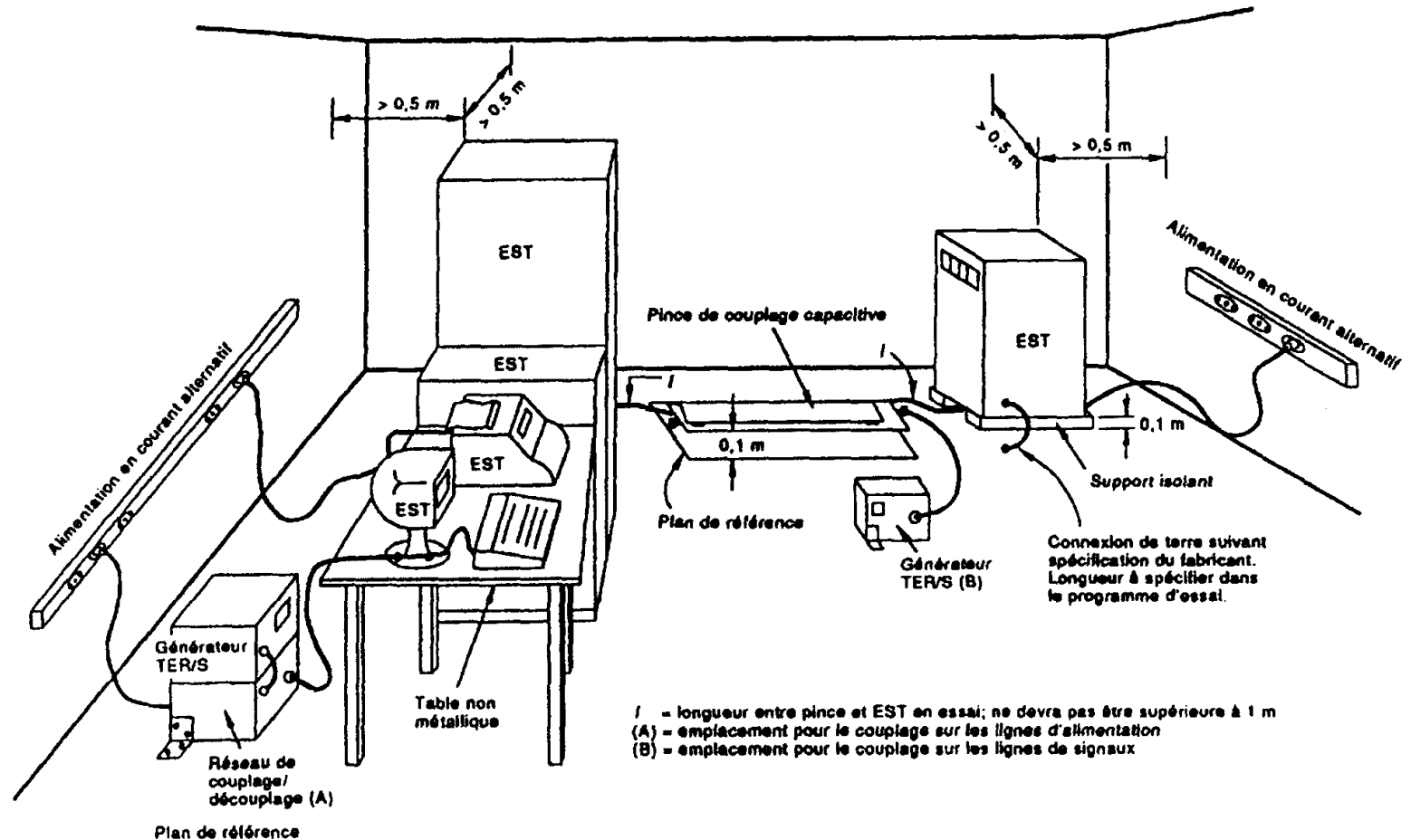
Essais d'émissivité 150 kHz à 30 MHz (BF)



- Mesure : valeur moyenne (vert), quasi-crête (bleu)
- Norme : Gabarits à respecter (max) en rouge

Essais de transitoires rapides

TRANSITOIRES RAPIDES EN SALVES



Essais de transitoires rapides : pince de couplage, générateur de transitoires, ...

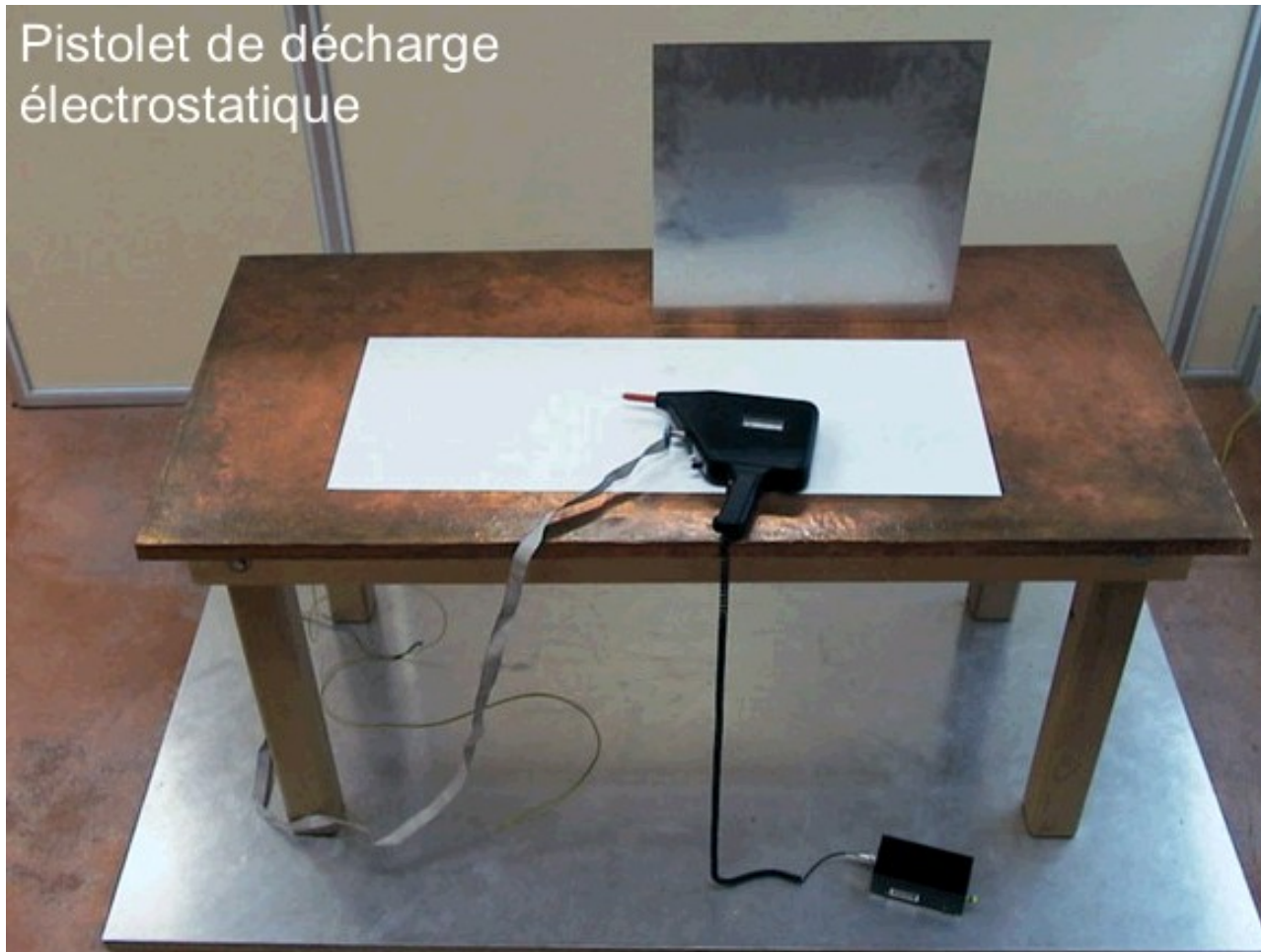


Essais de transitoires rapides

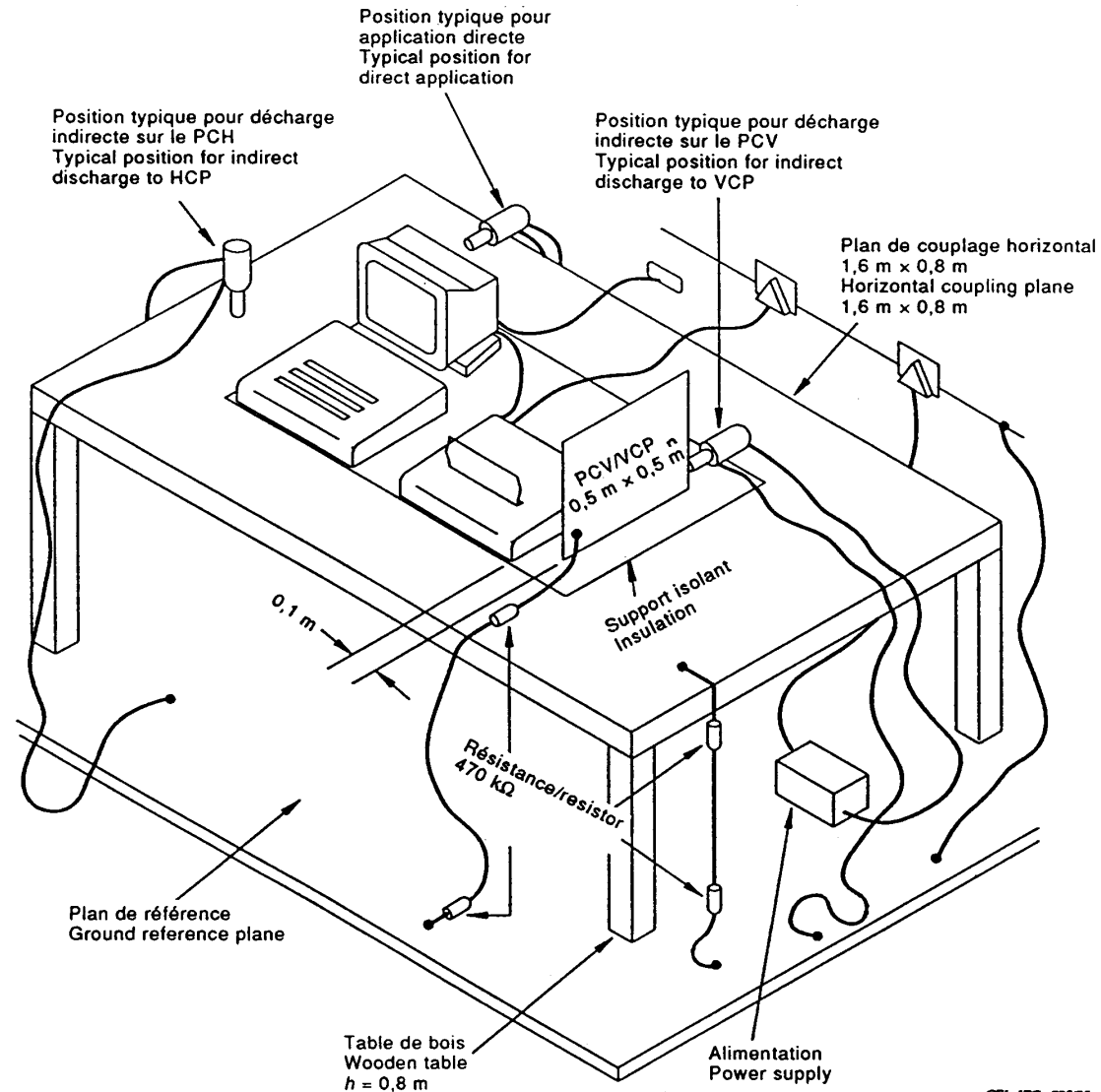


Générateur de transitoires

Essai de décharge électrostatique (DES) : application de décharges sur des points de test

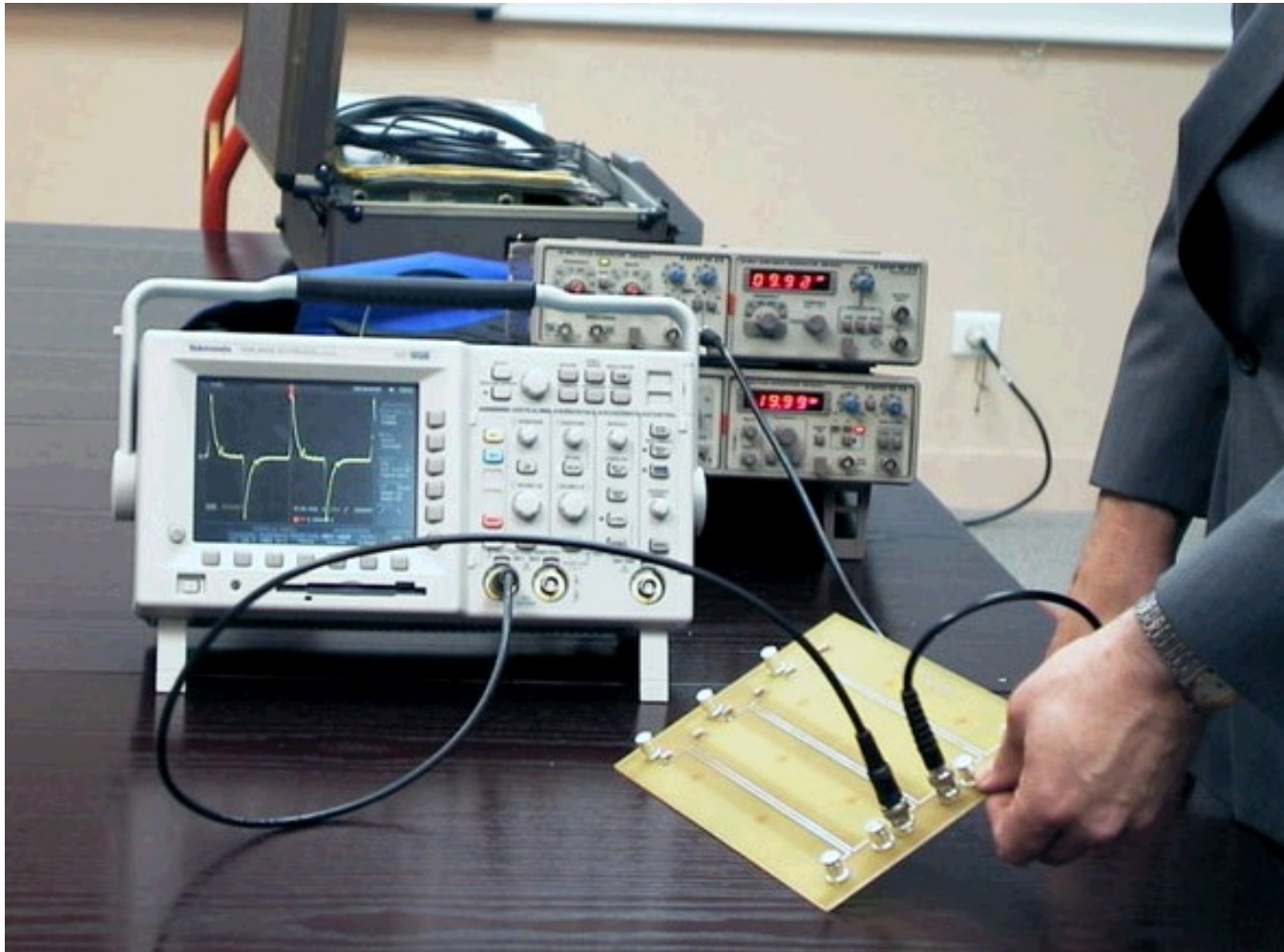


Essai de décharge électrostatique



CEI-IEC 005/95

Aspects physiques de la CEM



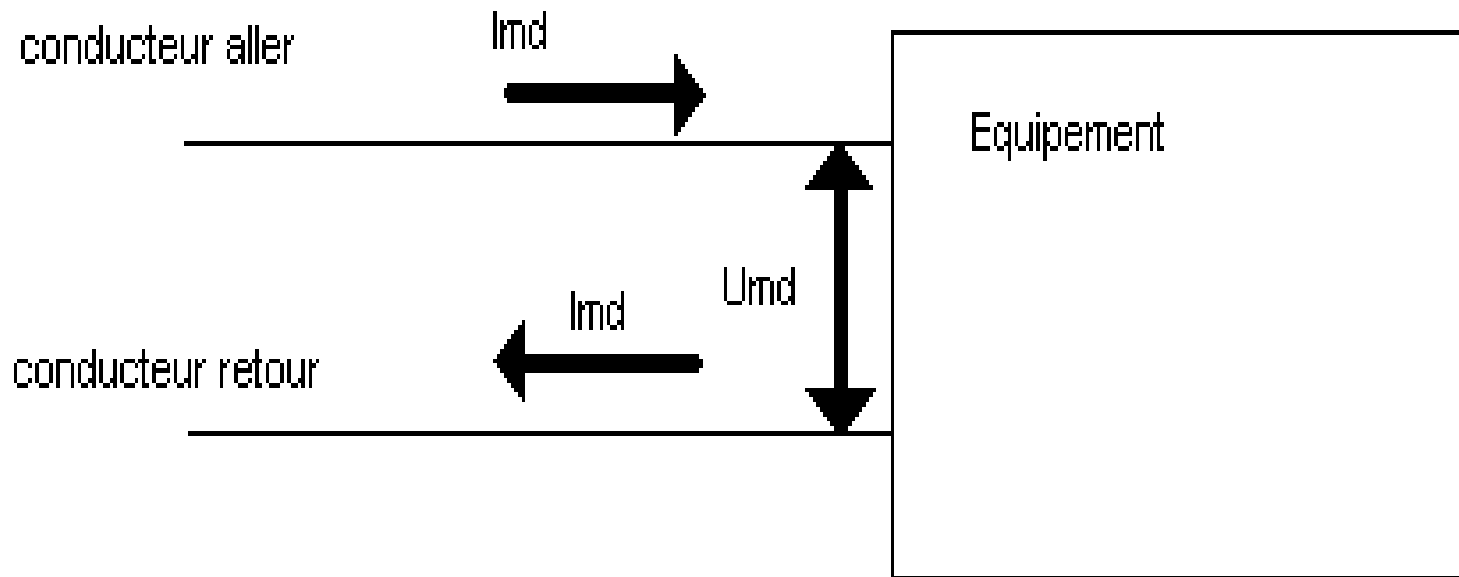


Notions essentielles

- Mode différentiel / mode commun
- Modes de couplage
- Champ E, champ H : attention aux HF !
- Les remèdes et surtout les règles de conception de cartes

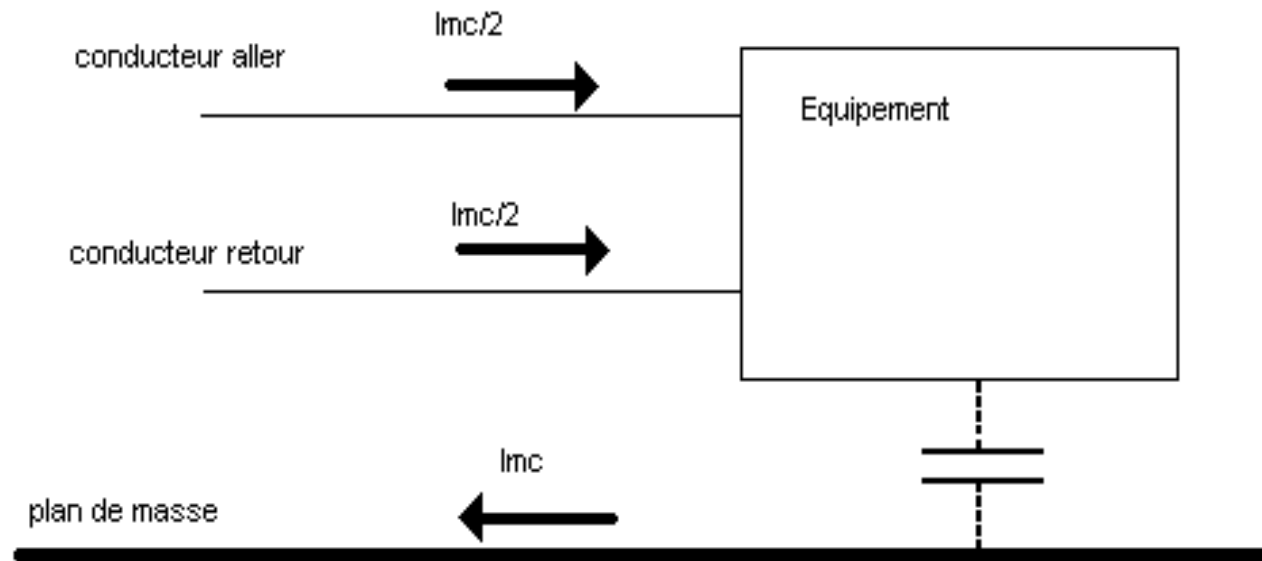
Notions : mode différentiel

- Noté MD, ce mode est la façon normale de véhiculer un signal électrique. Il est aussi appelé mode symétrique.
- Si les conducteurs aller et retour sont très proches, les perturbations sont faibles : paires torsadées sur les signaux



Notions : Mode commun

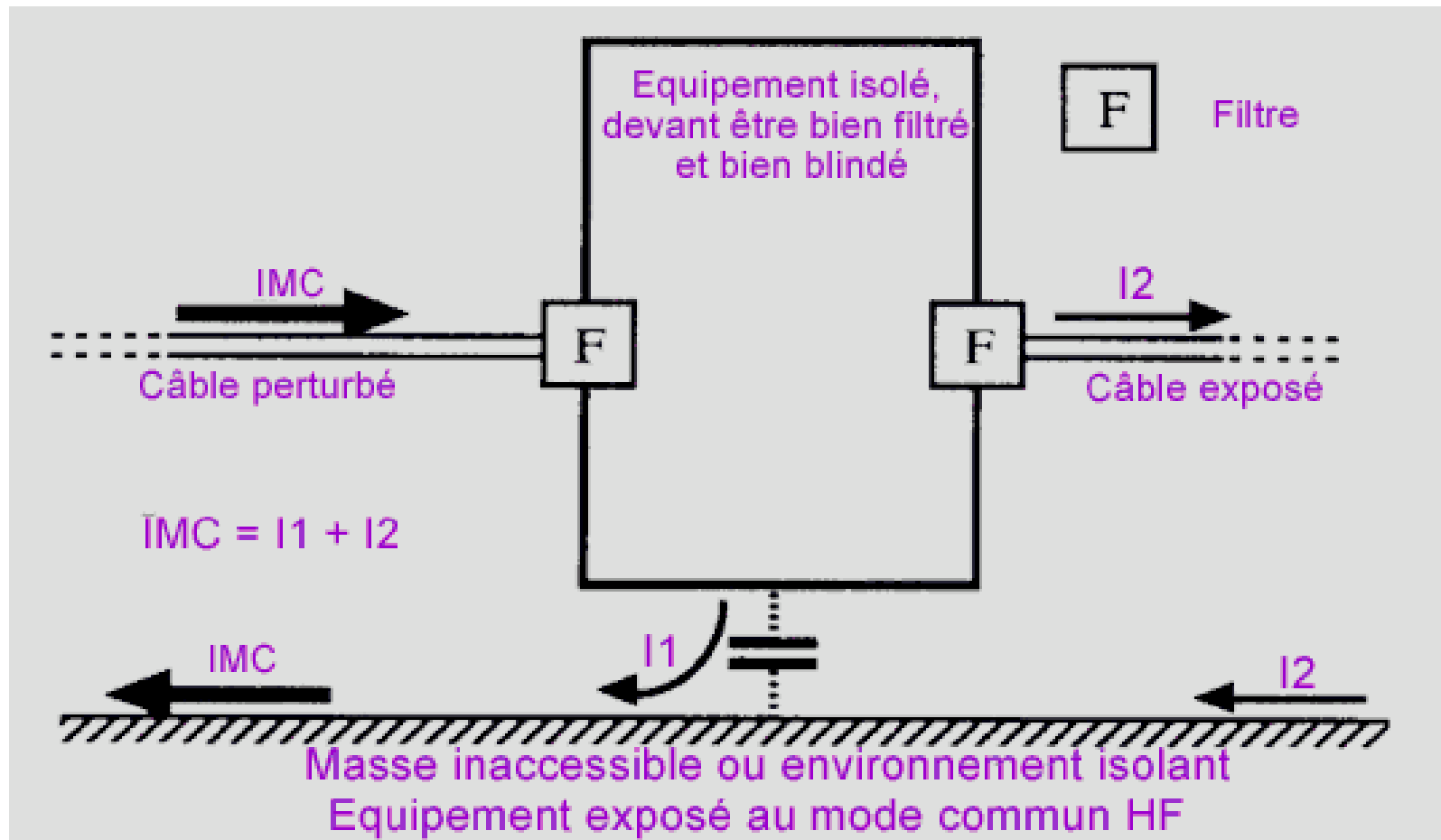
- Le mode commun, noté MC, est un **mode parasite**, **perturbant**. Il est aussi appelé mode asymétrique. Le courant de MC se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse.



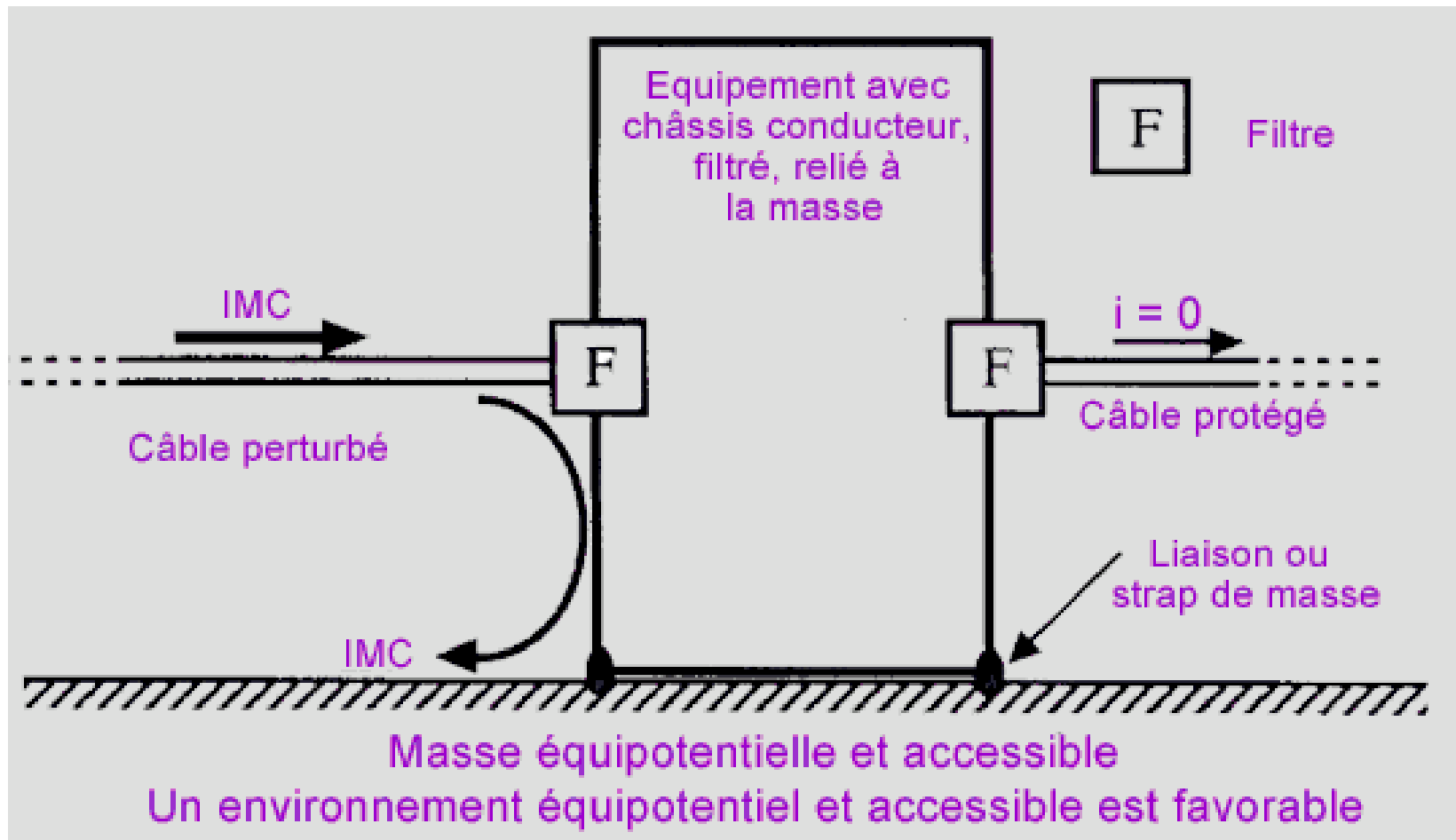
Notions : Mode commun

- Les perturbations électromagnétiques se couplent très peu en MD et principalement en MC sur les câbles.
- C'est la conversion du MC en MD par la dissymétrie des entrées qui crée les problèmes (notamment en HF).
- L'ennemi principal en CEM est donc presque toujours le MC.

Notions : Mode commun



Notions : Mode commun



Notions : Mode commun

■ Réduction des perturbations de MC

- ☐ Filtres référencés à la masse mécanique en entrée de chaque appareil.
- ☐ Câbles blindés, proximité de masse.
- ☐ Ferrites sur les câbles.
- ☐ Éviter la conversion MC/MD par l'emploi de liaisons symétriques. A noter qu'un isolement galvanique n'est efficace qu'aux basses fréquences (capacités parasites).
- ☐ Utilisation de circuits ayant un grand taux de réjection en mode commun (CMRR), passage en différentiel



Les 6 modes de couplage des perturbations sur les circuits

- ☐ Le couplage par impédance commune.
- ☐ Le couplage par capacité « effet main ».
- ☐ Le couplage par diaphonie inductive.
- ☐ Le couplage par diaphonie capacitive.
- ☐ Le couplage champ à câble.
- ☐ Le couplage champ à boucle.

La CEM : Les modes de couplage



CONDUIT

① IMPEDANCE COMMUNE

$$U=ZI$$

② EFFET DE MAIN

$$I=1/C \cdot dV/dt$$

RAYONNE

① DIAPHONIE INDUCTIVE $I \rightarrow H \rightarrow U=MdI/dt$

② DIAPHONIE CAPACITIVE $U \rightarrow E \rightarrow I=1/C \cdot dV/dt$

③ ANTENNE (Champ électrique) $I=k E / f$

④ BOUCLE (Champ magnétique) $U=uSdH/dt$

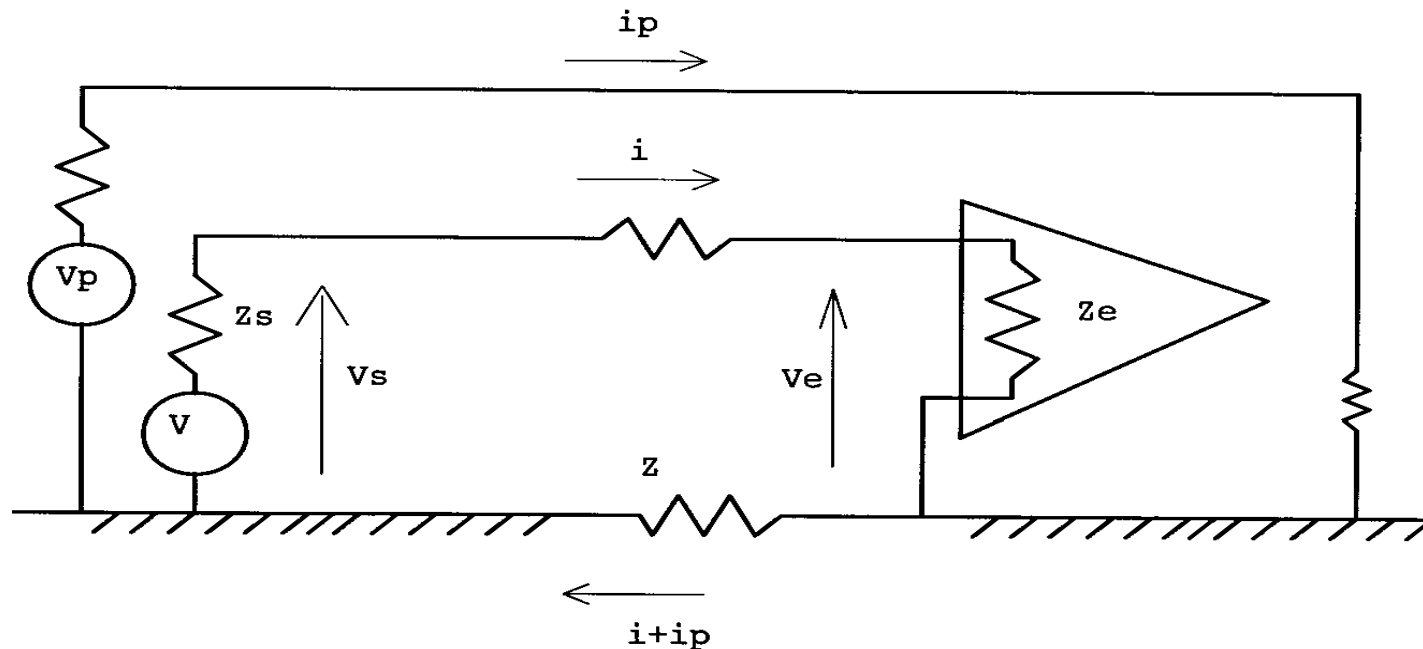
Le couplage par impédance commune

- L'impédance d'un conducteur n'est jamais nulle. Tout courant y circulant génère donc aux bornes de ce conducteur une tension $u = Z \cdot I$
- Ce phénomène est particulièrement sévère pour les circuits bas niveaux (mesure) ou rapides (radio).
- Pour réduire ce phénomène il existe deux possibilités : abaisser l'impédance commune ou réduire le courant parasite y circulant.

Le couplage par impédance commune

$$V_e = V_s - Z (i_p + i)$$

- L'impédance Z d'un conducteur est variable avec la fréquence et n'est jamais nulle, même en continu : **Z doit être très faible ou nulle**
- Tension de décalage



Le couplage par impédance commune : abaissier l'impédance commune Z

- Résistance d'un conducteur de cuivre en continu :

$$R=17 \cdot L / S$$

R : résistance du conducteur en milliohms .

L : longueur du conducteur en m.

S : section du conducteur en millimètres carrés.

- Résistance d'une piste de cuivre de 35 μm en continu :

$$R=0,5 \cdot L / d$$

R : résistance de la piste en milliohms .

L : longueur de la piste (même unité que d).

D : largeur de la piste (même unité que L).

Le couplage par impédance commune

- Impédance d'un conducteur de cuivre en HF :

$$Z = R + j.L.\omega$$

R et L sont également variables avec la fréquence à cause de l'effet pelliculaire (effet de peau).

- Retenir en CEM :

$L = 10 \text{ nH/cm}$ pour un fil de cuivre

$L = 8 \text{ nH/cm}$ pour une piste de cuivre de largeur 0,25 mm.

Retenir : environ 1microH/m

Le couplage par impédance commune

- A cause de l'effet de peau, l'épaisseur d'une piste n'a que peu d'importance en HF. Pour réduire l'impédance d'un conducteur, il convient donc d'augmenter sa surface.
 - Épaisseur de peau :
- Un **plan de masse** présente une surface importante et est la meilleure géométrie utilisable.

PLAN DE MASSE

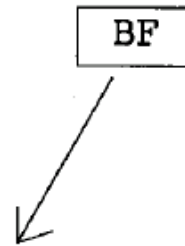
Le couplage par
impédance commune :
remède = plan de
masse

e épaisseur tole
 δ_r conductivité (par rapport
au Cu)
 μ perméabilité magnétique

Acier doux (mumetal, ..)
meilleur en BF

$$Z_{\square} = 17.2 / (\delta_r * e)$$

micro ohm/cm2 mm



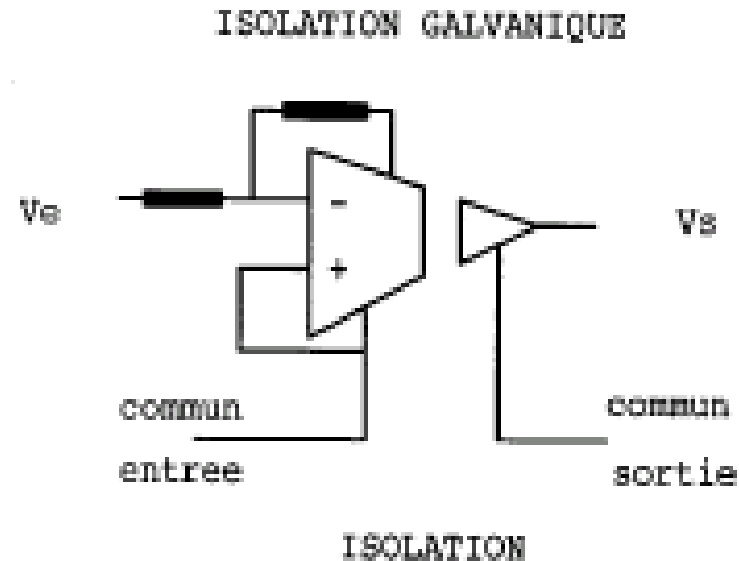
HF

$$Z_{\square} = 370 \sqrt{\frac{F * \mu_r}{\delta_r}}$$

MHz

	δ_r	μ_r
cuivre	1	1
mumetal	0.03	20000

Le couplage par
impédance
commune :
remède = **isolation**
entrée-sortie
(attention les alim
aussi doivent être
séparées)



Couplage

modulation / demodulation
conversion V/F \rightarrow F/V

Technologie couplage

magnetique
optique
capacitif

Alimentation

systeme 2 ou 3 ports

Isolée

convertisseur DC/DC

Utilisation cable blindé

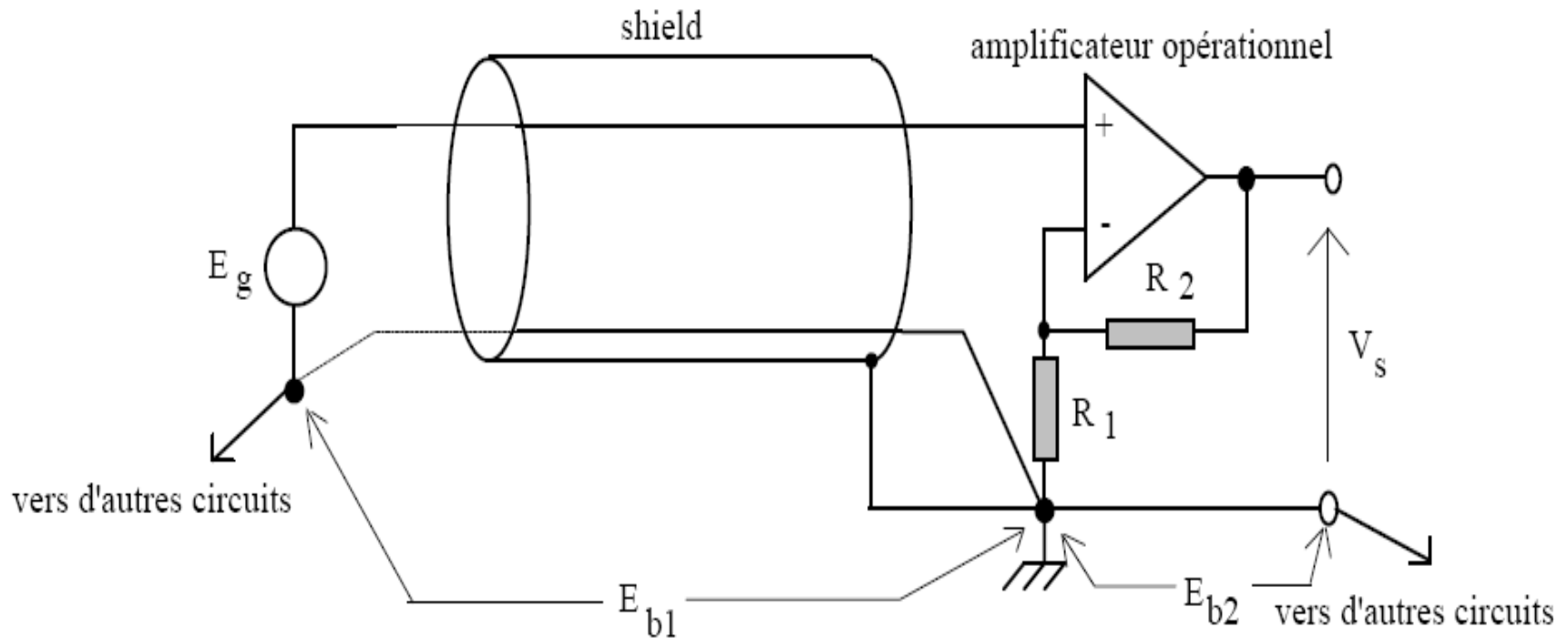


Fig. 28 Connection avec un amplificateur "single ended"

Cable blindé et ampli différentiel

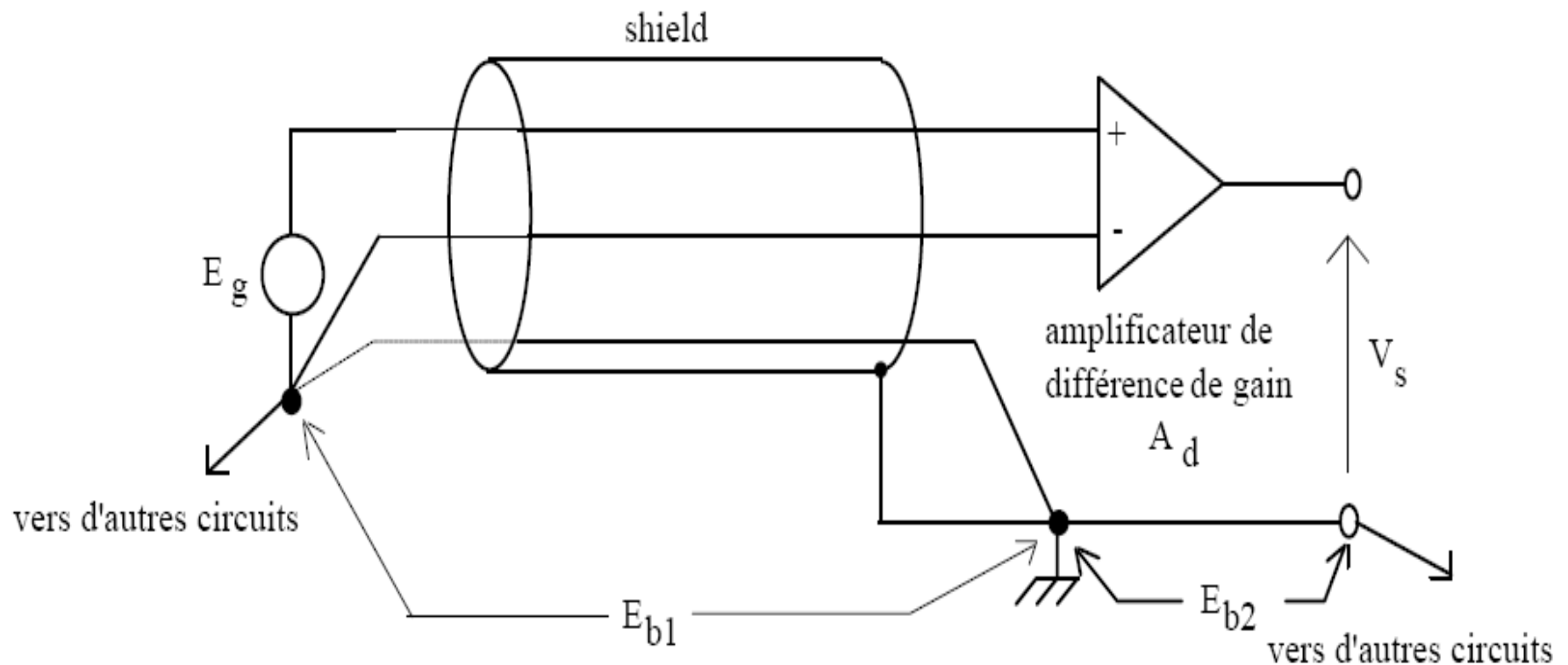
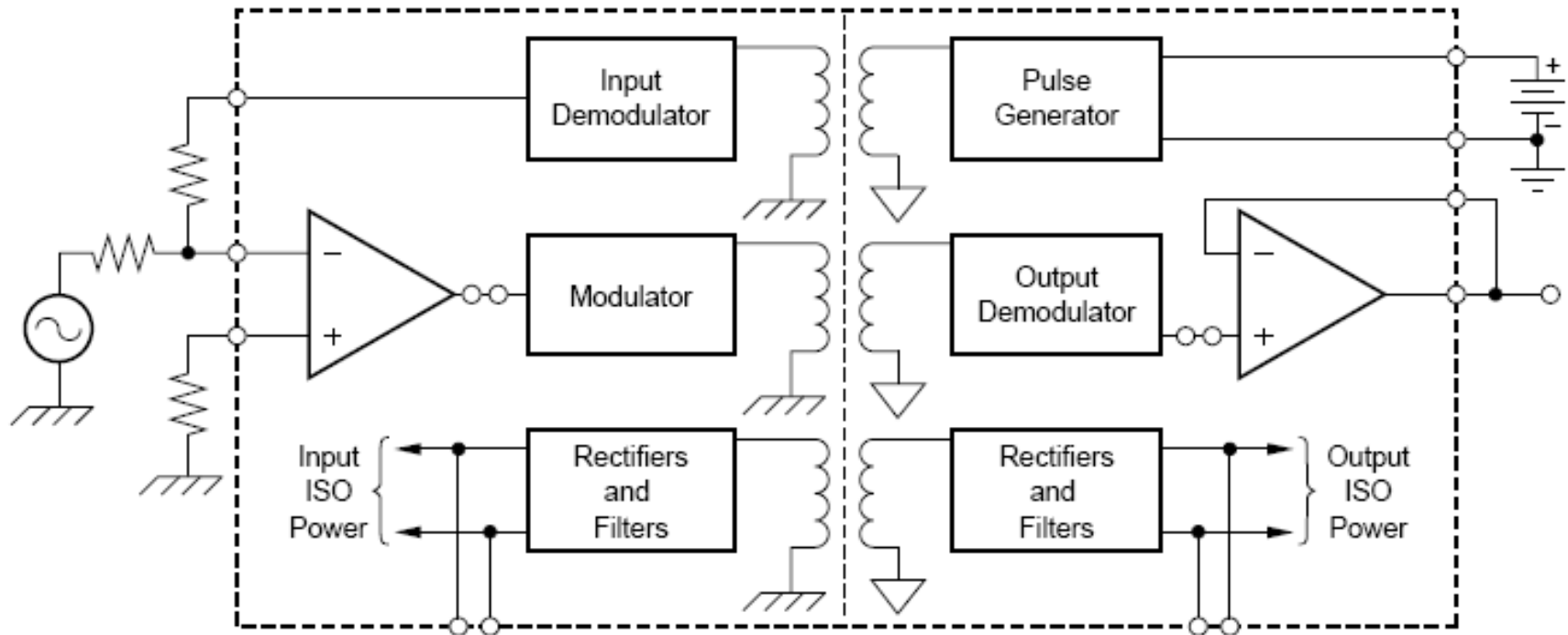
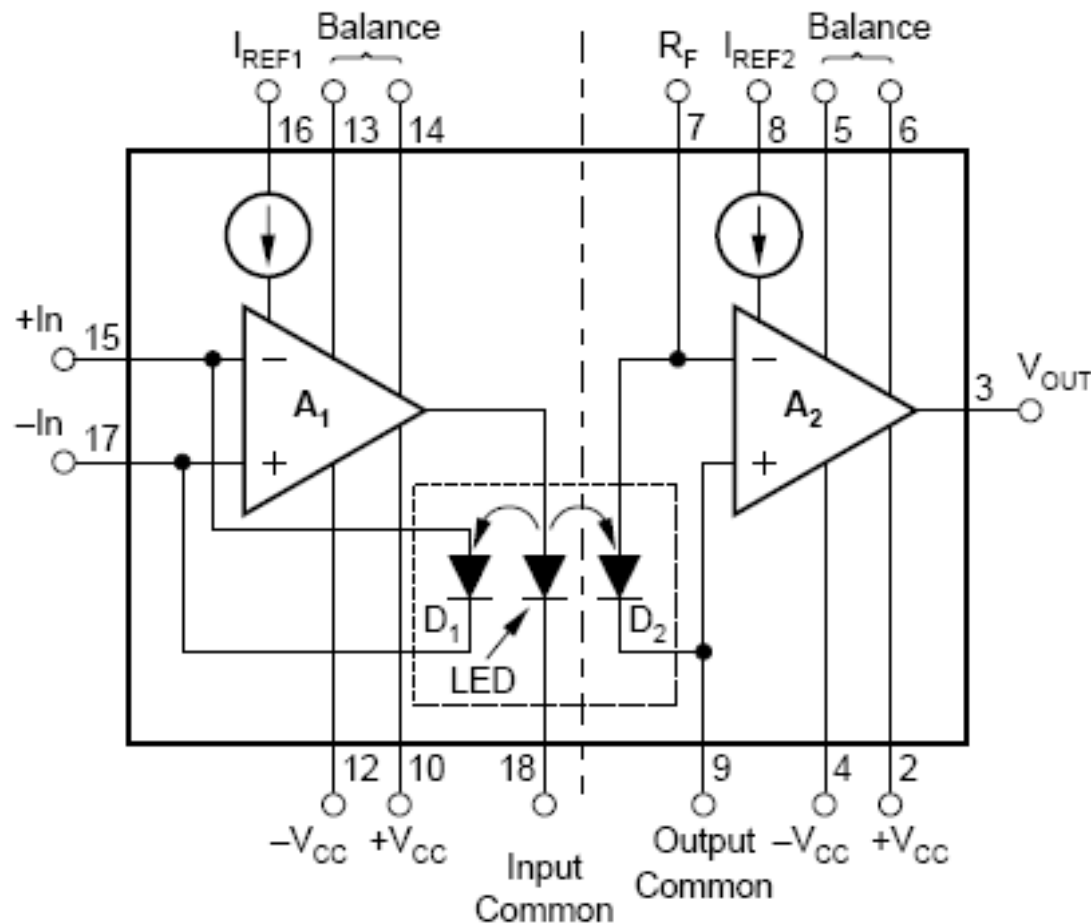


Fig. 29 Connection avec un amplificateur de différence

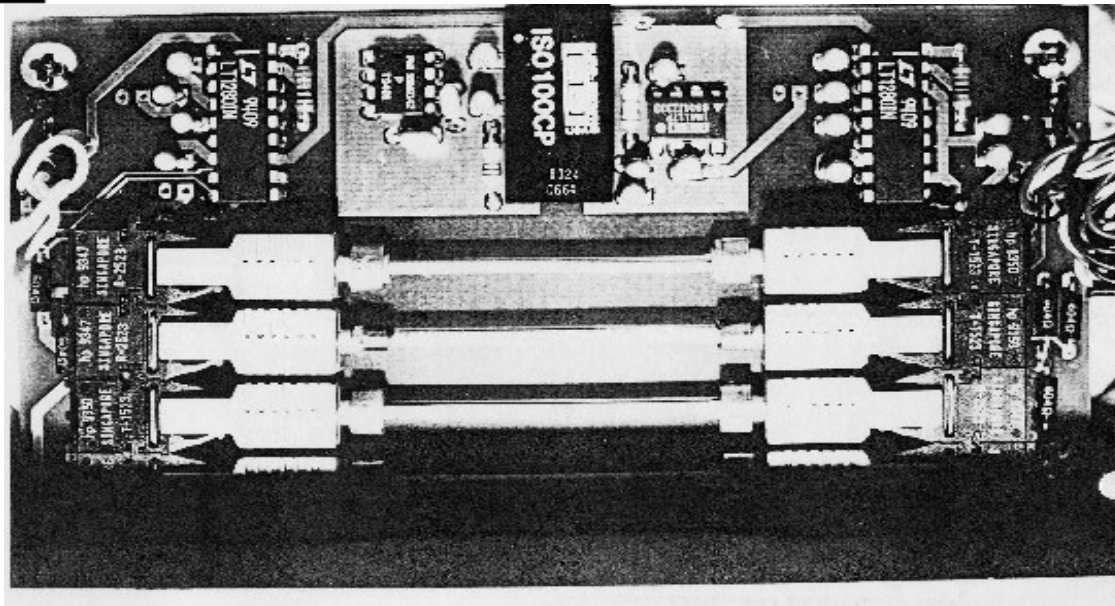
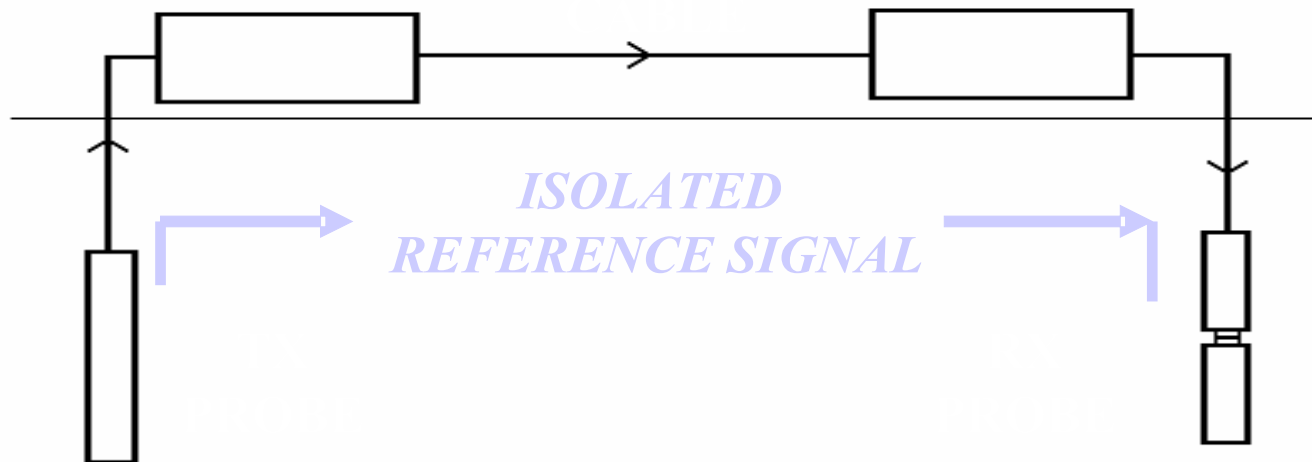
■ Amplificateur d'isolement par transfo Burr Brown 3656



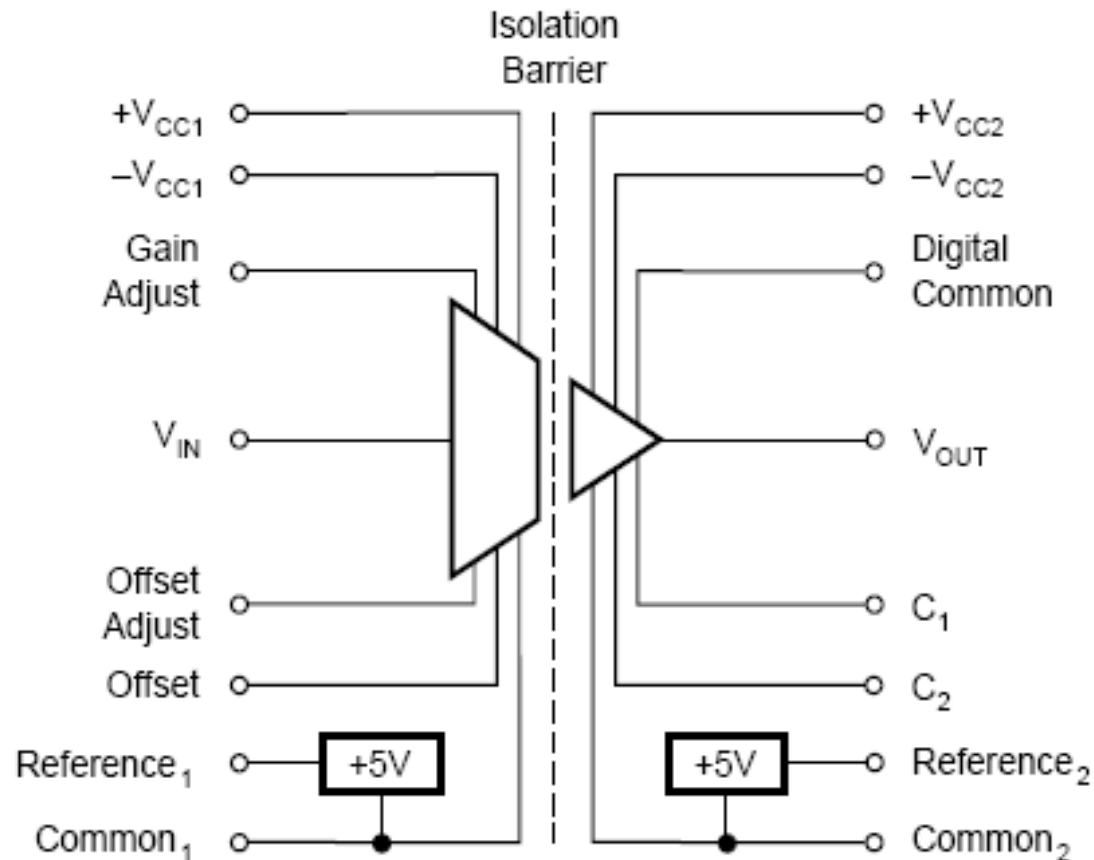
■ Amplificateur d'isolement optique Burr Brown ISO100



Barrière à fibre optique plastique (exemple de mesure tomographique en géophysique)



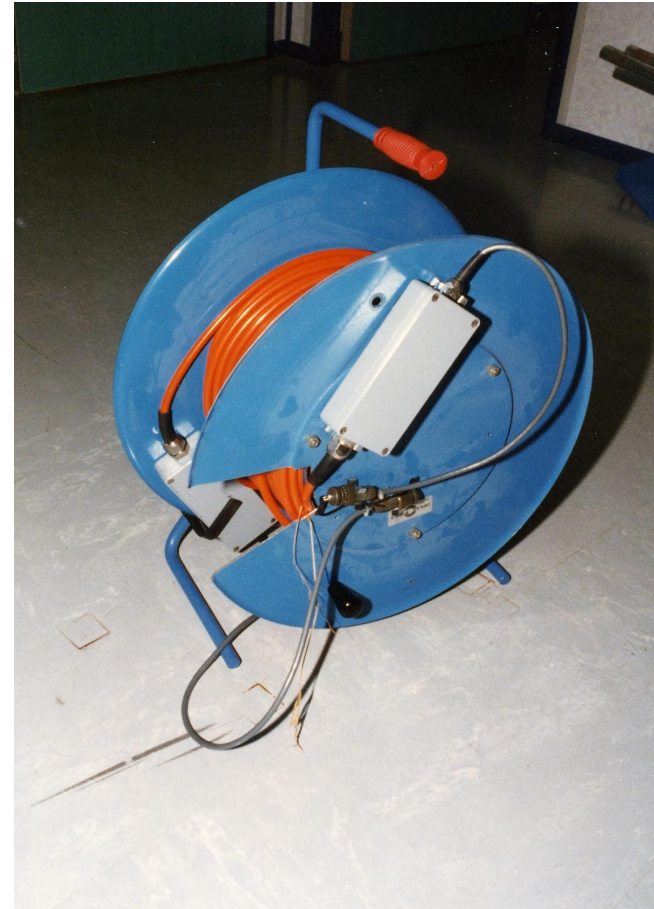
■ Amplificateur d'isolement capacitif Burr Brown ISO102



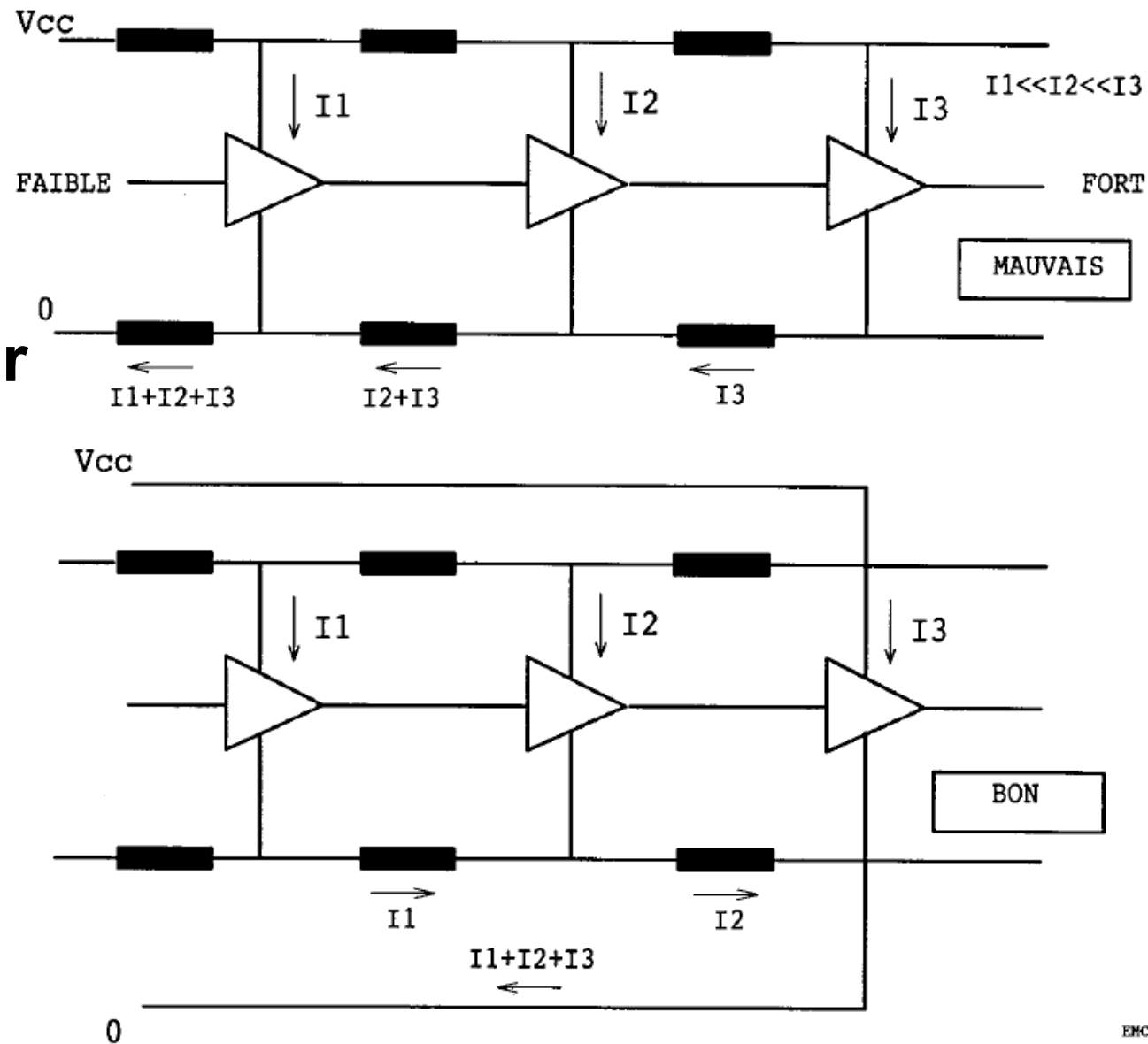
Câble optique « de terrain » pour MT (et sismique) :

- permet l'éloignement de l'unité d'acquisition et capteurs du calculateur et de l'utilisateur (vibration)
- haut débit (full duplex)
- pas de rayonnement
et isolation galvanique
- fibre plastique utilisable en remplacement

Isolation par fibre optique



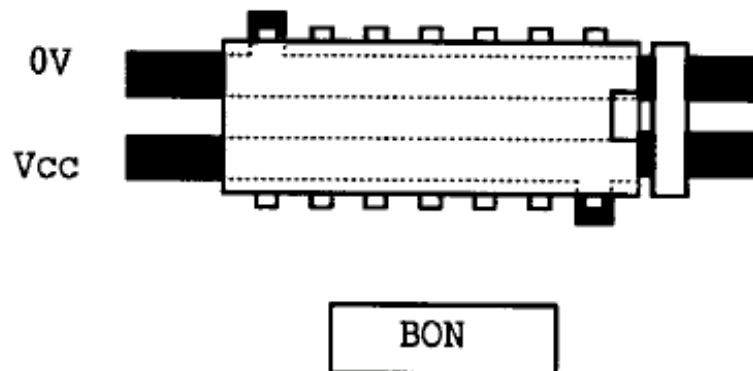
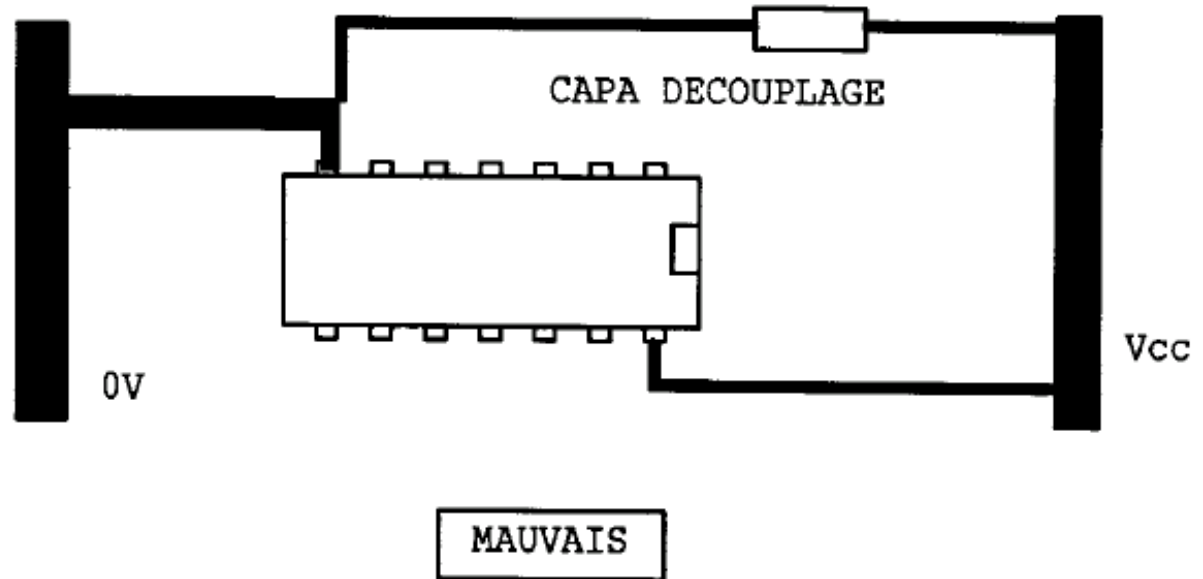
Le couplage par impédance commune :
Règle = **alimenter directement les plus gros consommateurs**



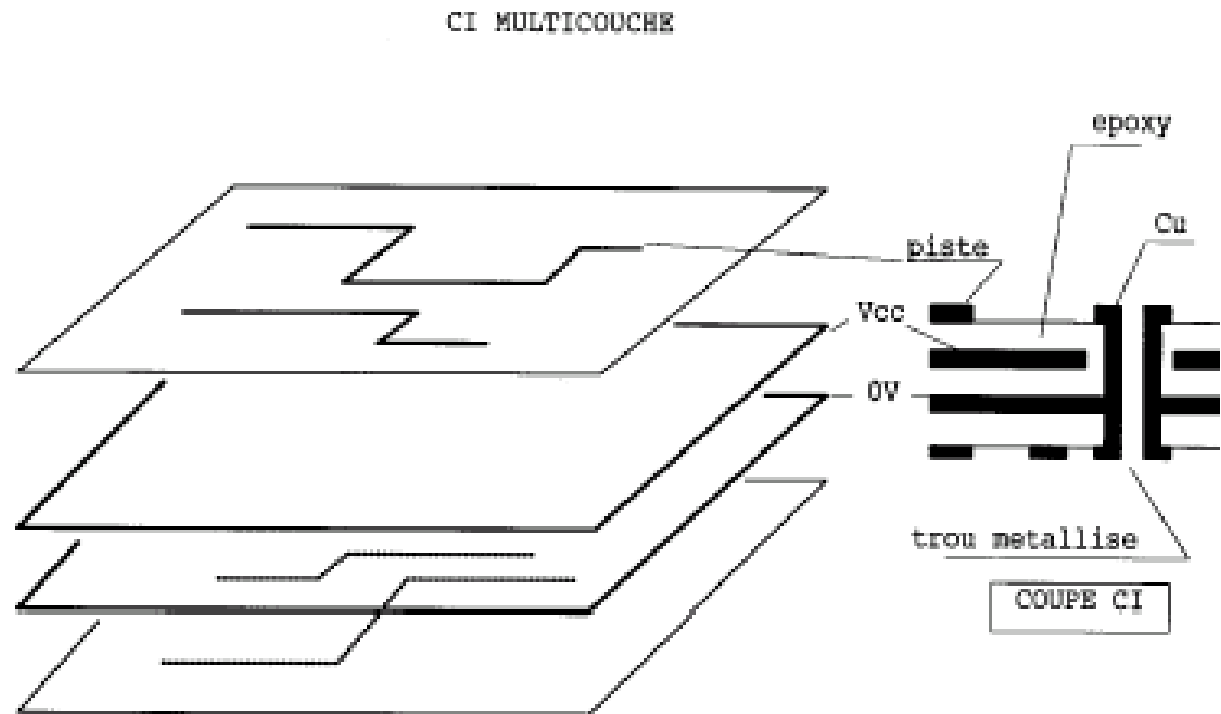
Le couplage par
impédance
commune :

Règle =

- pas de boucle
d'alim, au plus
court
- découpler



Le couplage par
impédance
commune :
remède = circuit
imprimé
multicouche avec
couches d'alim et
de couche de
masse (écran)

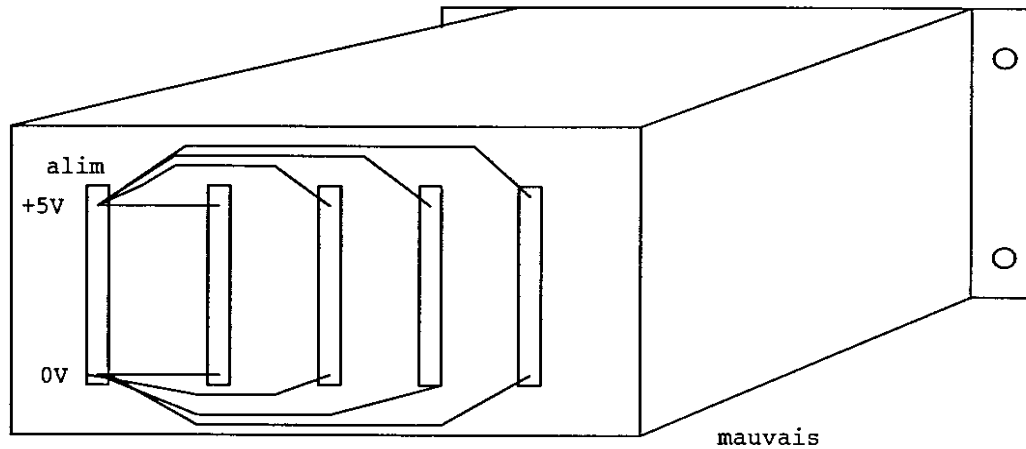


Z_{Alim} diminue si S croît

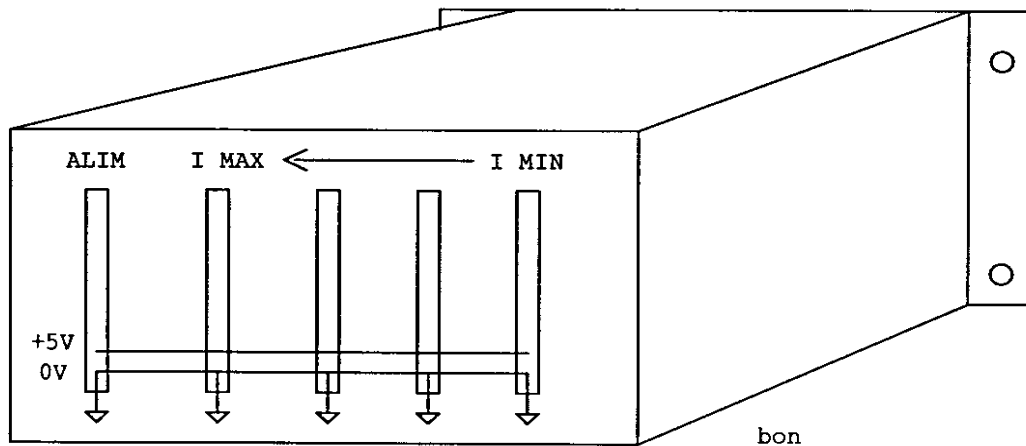
Capa répartie $= kS/e$ (1000pF/cm²)

Ecran pour la diaphonie entre signaux

cablage ALIMENTATION RACK



Idem pour
le cablage
de rack :
carte à I max
près de la
carte alim.



Le couplage par impédance commune

- Résistance d'un plan de masse en continu $R = 17 / \sigma_r e$

σ_r : conductivité du métal par rapport au cuivre, sans dimension.
Avec e : épaisseur de la tôle en mm

- Impédance d'un plan de masse en HF :

Z : impédance de surface en $\mu\Omega$

$$Z = 370 \sqrt{\frac{F_{MHz} \cdot \mu_r}{\sigma_r}}$$

Avec F : fréquence exprimée en MHz.

μ_r : perméabilité magnétique du matériau.

σ_r : conductivité du conducteur par rapport au cuivre

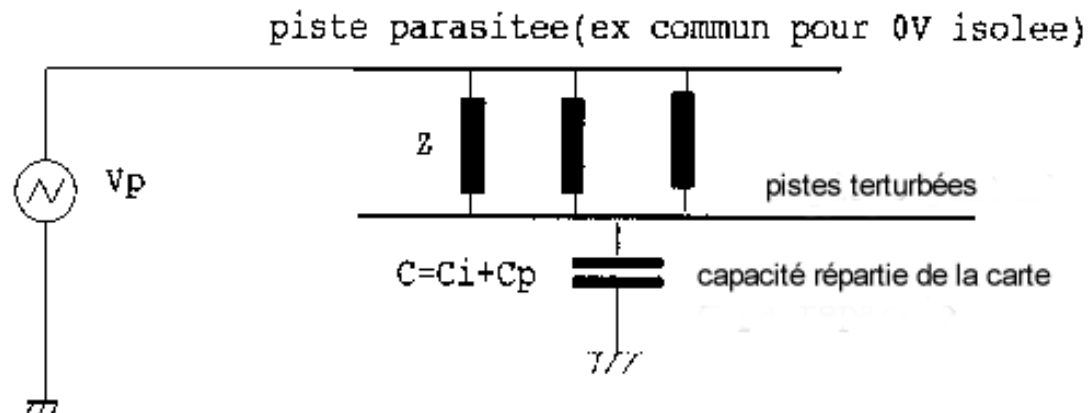
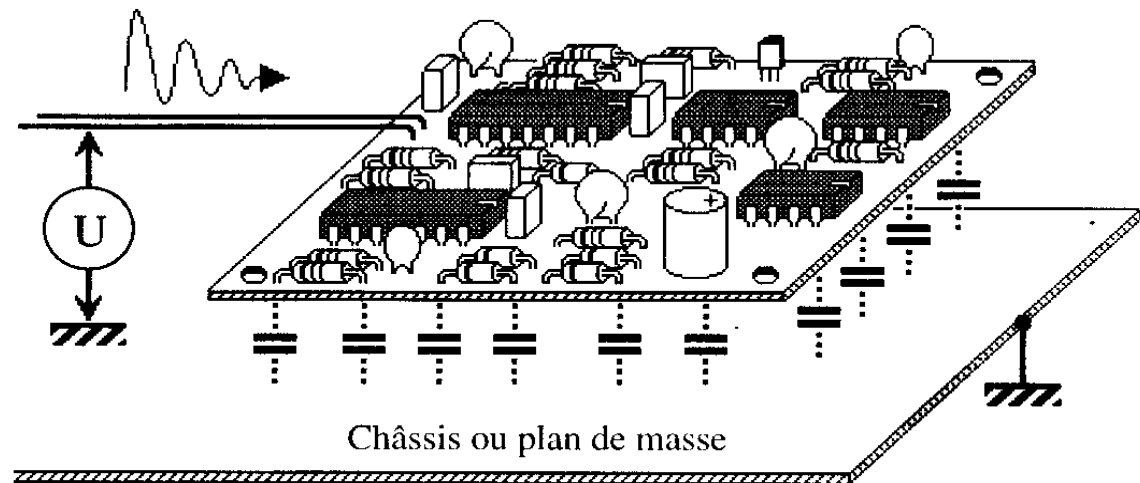
Le couplage par impédance commune

- Remèdes pour diminuer ce couplage :
 - Diminuer Z en mettant plus de cuivre.
 - Circuit imprimé multicouches.
 - Plan de masse.
 - Grille.
 - Diminuer le courant parasite.
 - Alimenter les circuits de puissance en priorité.
 - Découpler les composants à fort di/dt .
 - Séparer l'analogique et le numérique.

Le couplage par capacité « effet main »

■ Principe :

Couplage carte à châssis, ou couplage par « effet de main ».



$$C_i = 35 \frac{d}{m} \text{ pf}$$

$$C_p = 9 \frac{s}{h} \text{ pf}$$

d = diamètre du disque équivalent ou diagonale de la carte



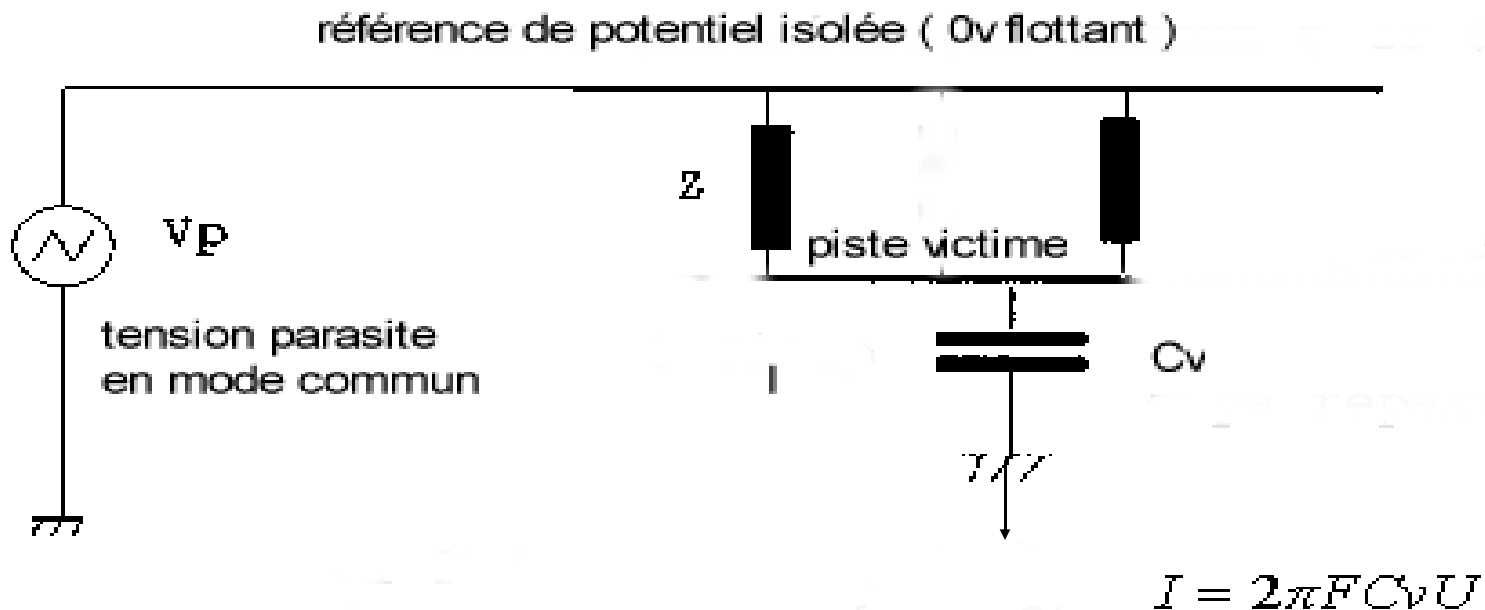
Couplage par effet de main

Le couplage par capacité « effet main »

- La capacité répartie d'un conducteur avec son environnement fait qu'une variation de potentiel entre eux injecte un courant de l'un à l'autre.
- Les circuits à bas niveaux et haute impédance sont les plus exposés.
- Les pistes d'un circuit imprimé peuvent être parasitées par ce couplage, même au cœur de la carte.
- Particulièrement dangereux lorsque le boîtier est plastique ou isolant.

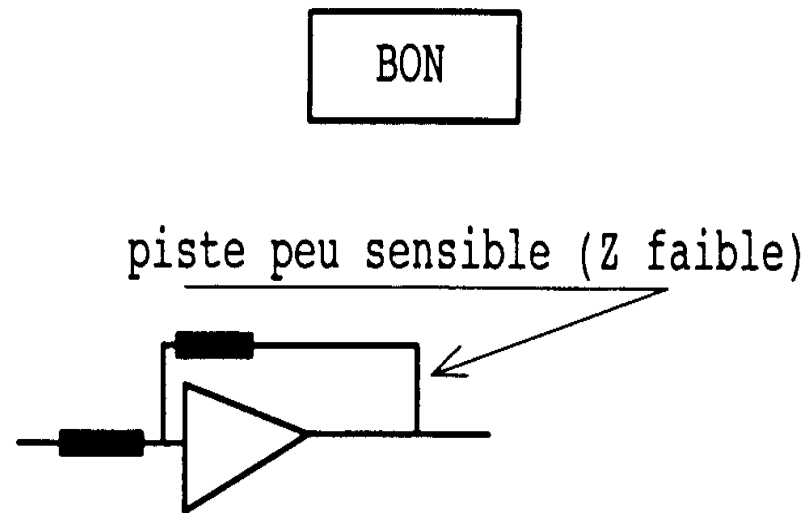
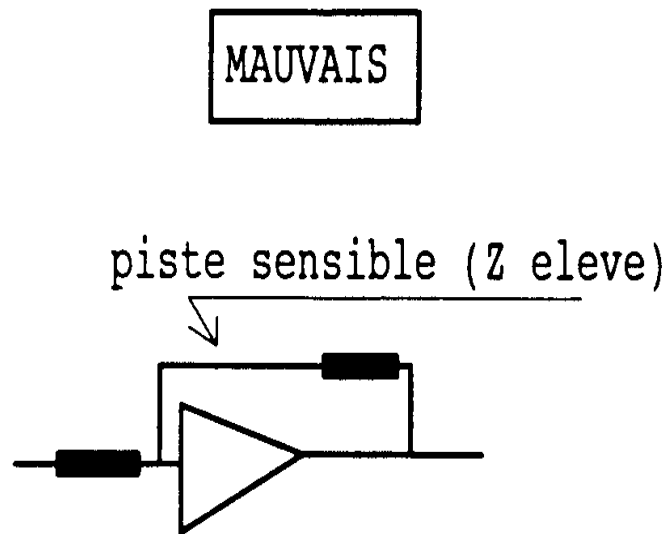
Le couplage par capacité « effet main »

- La capacité totale C correspond à l'ensemble des lignes de champ électrique qui arrivent sur la carte.
- Heureusement, chaque piste ou composant ne reçoit qu'une fraction du champ. La capacité C_v entre une piste victime et la masse n'est qu'une fraction de la capacité C .
- Capacité de couplage = capacité intrinsèque + capacité plane



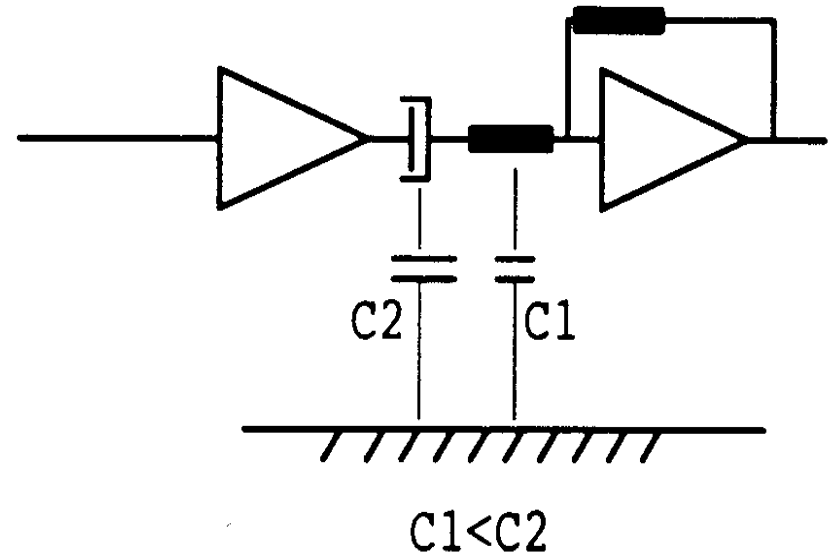
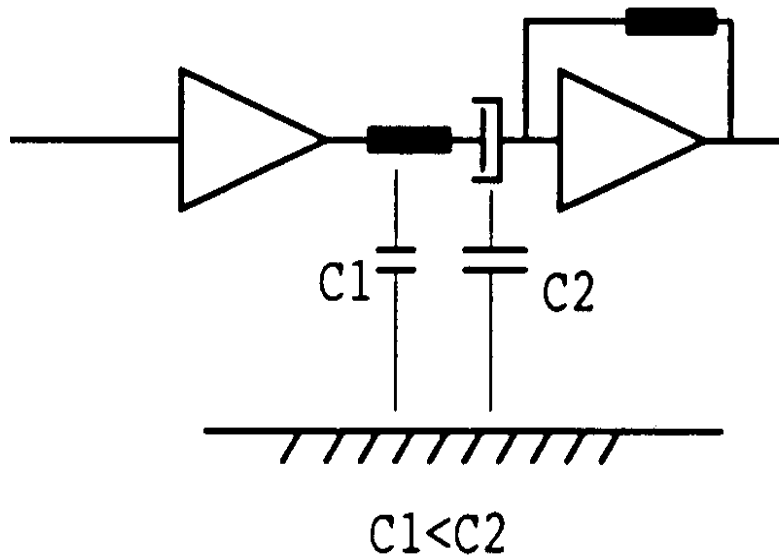
Le couplage par capacité « effet main »

- **Remèdes** : Diminuer la capacité répartie entre le circuit et la masse au niveau des pistes sensibles en diminuant leur surface (au routage).



Le couplage par capacité « effet main »

■ Remèdes

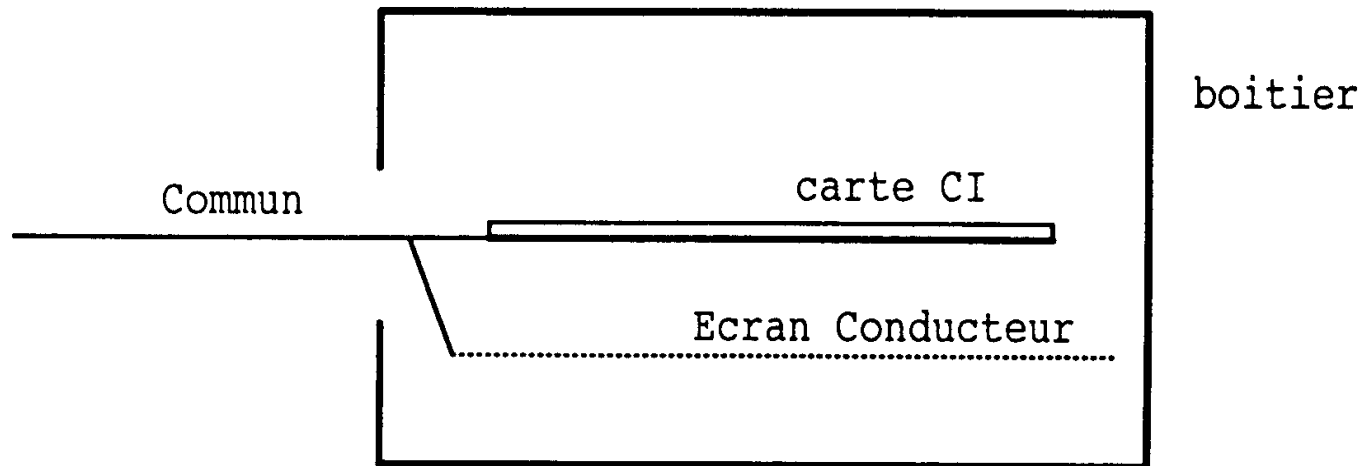


PISTE SENSIBLE COURTE GROS COMPOSANT PRES de Z FAIBLE

Le couplage par capacité « effet main »

■ Remèdes

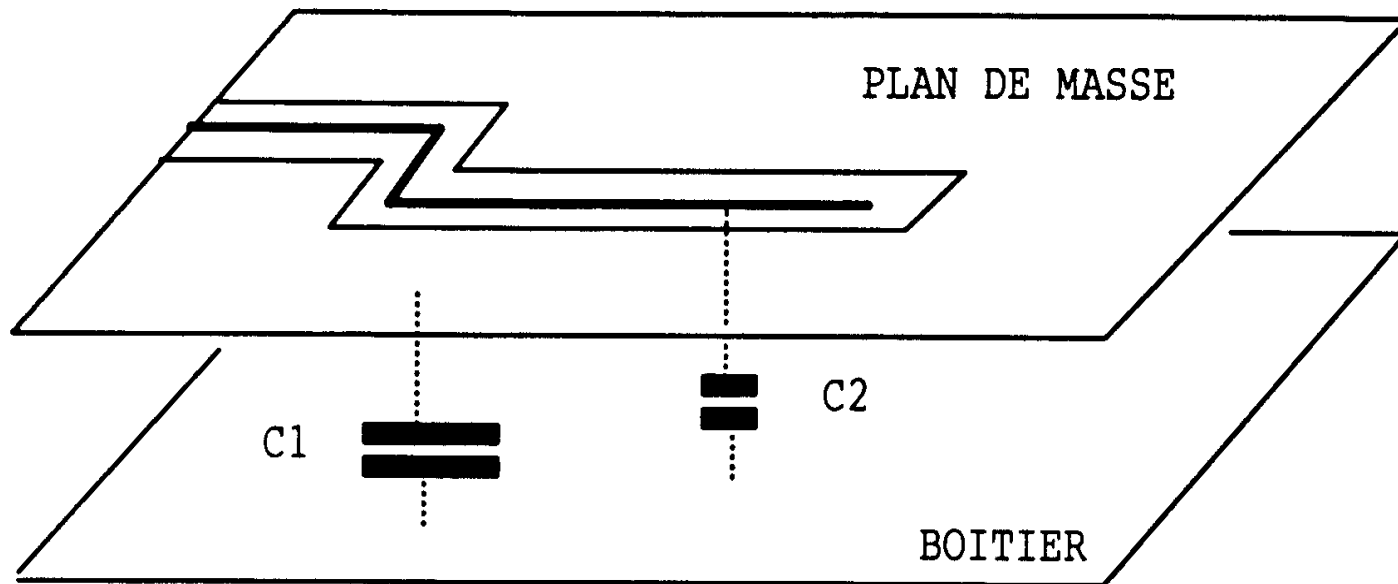
- Diminuer les variations de tension entre la carte et le châssis. Relier le « zéro volt » (noté 0v) de la carte au châssis résout ce problème en boîtier métallique. L'utilisation d'un écran conducteur (type papier alu) relié au 0v de la carte peut être utilisé en boîtier isolant.



Le couplage par capacité « effet main »

■ Remèdes

- Augmenter au maximum les plans de masse autour des signaux
- Mettre des pistes de garde




$$C1 > C2$$

Le couplage par diaphonie inductive

- Un courant i circulant dans un fil génère un champ magnétique autour de celui-ci.
- Si ce champ est variable, il induit une tension e dans les boucles voisines :

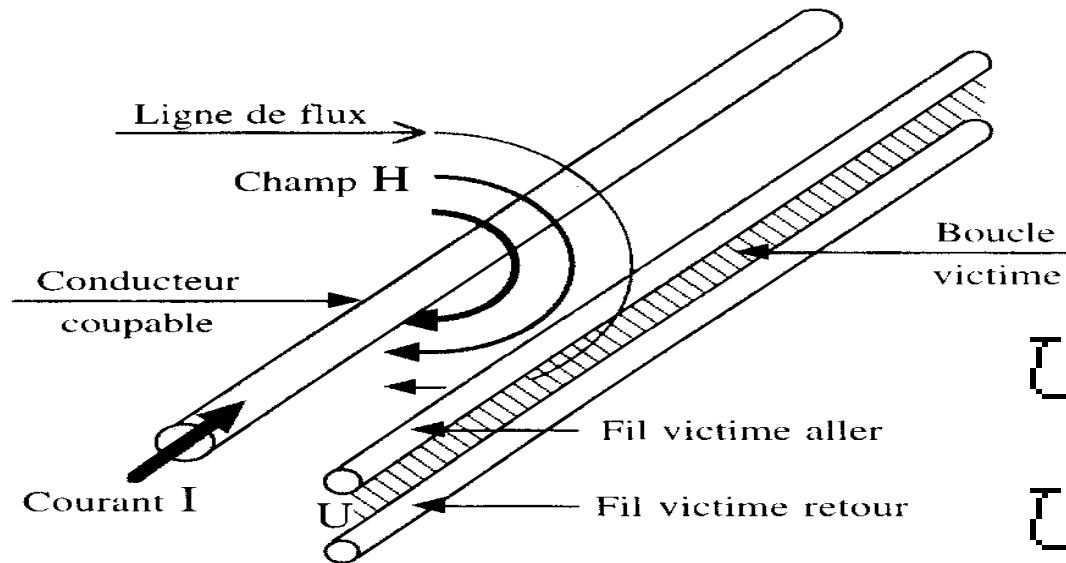
$$e = -L \, di/dt \text{ (loi de Lentz)}$$

L est l'inductance mutuelle entre les deux circuits et di/dt la vitesse de variation du courant, donc du champ. Cette inductance L est un artifice qui permet d'éviter l'introduction des notions de champ magnétique.



Couplage par diaphonie inductive

Le couplage par diaphonie inductive en mode différentiel



$$U = 2\pi F L I$$

$$U = -L \frac{di}{dt}$$

F fréquence du courant source

L mutuelle inductance

I courant source de perturbation

di/dt vitesse de variation du courant

Le couplage par diaphonie inductive

- La diaphonie est nulle en continu et reste faible jusqu'à des fréquences de quelques KHz.
- Une perturbation générée par un courant de 1000 A à 50 Hz a le même effet qu'un courant de 1 mA à 50 MHz, c'est à dire très peu d'incidence, sauf pour des circuits très sensibles aux champs magnétiques.

Le couplage par diaphonie inductive en mode différentiel

- La diaphonie en mode différentiel n'est gênante que pour les signaux à bas niveaux proches de conducteurs transportant des courants rapidement variables.
- C'est généralement un problème de conception et rarement un problème d'installation.

Le couplage par diaphonie inductive en mode différentiel

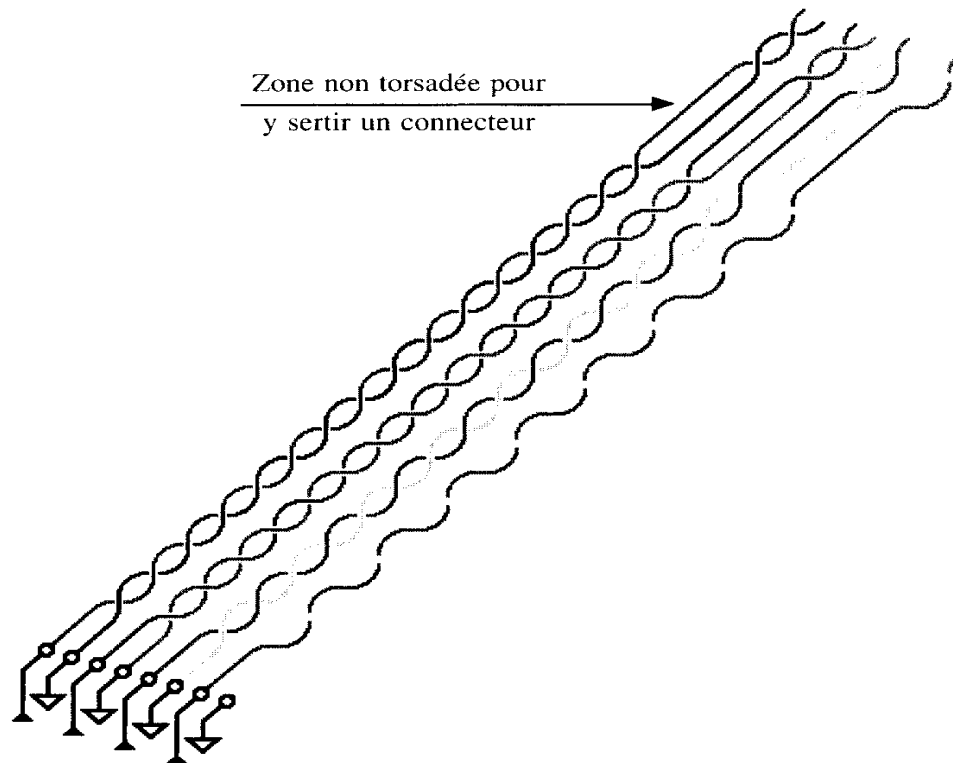
■ Remèdes

- Diminuer la mutuelle inductance en éloignant le perturbé du perturbateur.
- Utilisation de paires torsadées, utiles que contre la diaphonie en MD uniquement !
- Câbles plats blindés, de mise en oeuvre difficile, efficaces uniquement en HF.
- Multiplication des conducteurs de 0v.
- Adapter les impédances terminales des lignes pour limiter le phénomène dans le temps.

Le couplage par diaphonie inductive en mode différentiel

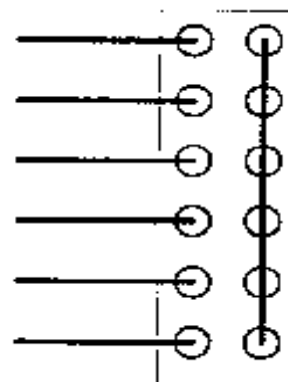
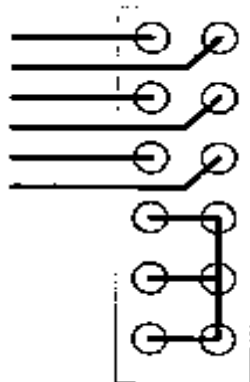
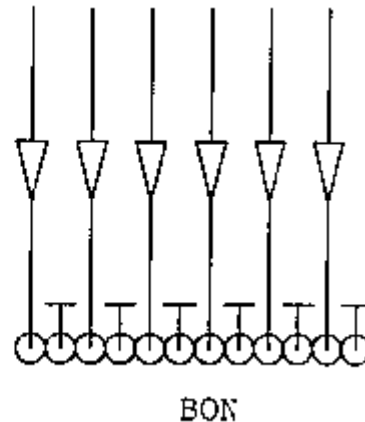
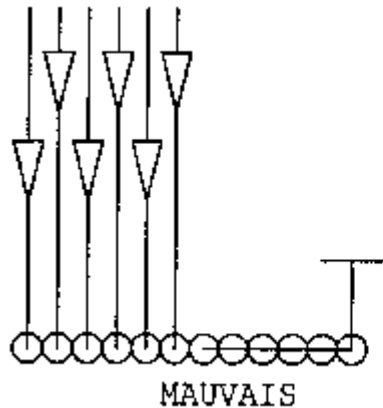
■ Remèdes...

- Utiliser des câbles en nappe torsadés

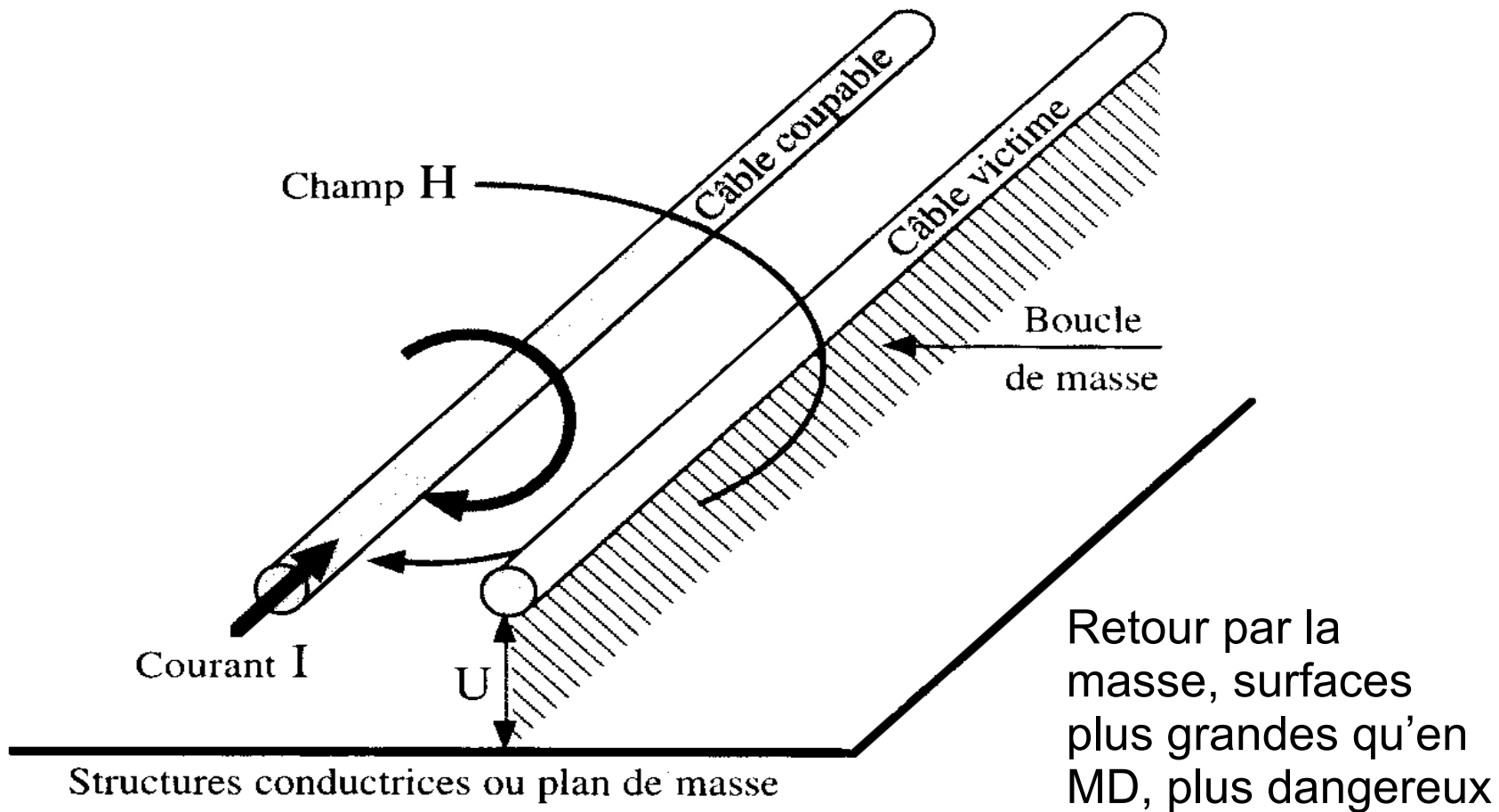


Le couplage par diaphonie inductive en mode différentiel

- Câblage de câbles plats : alterner signal et masse



Le couplage par diaphonie inductive en mode commun

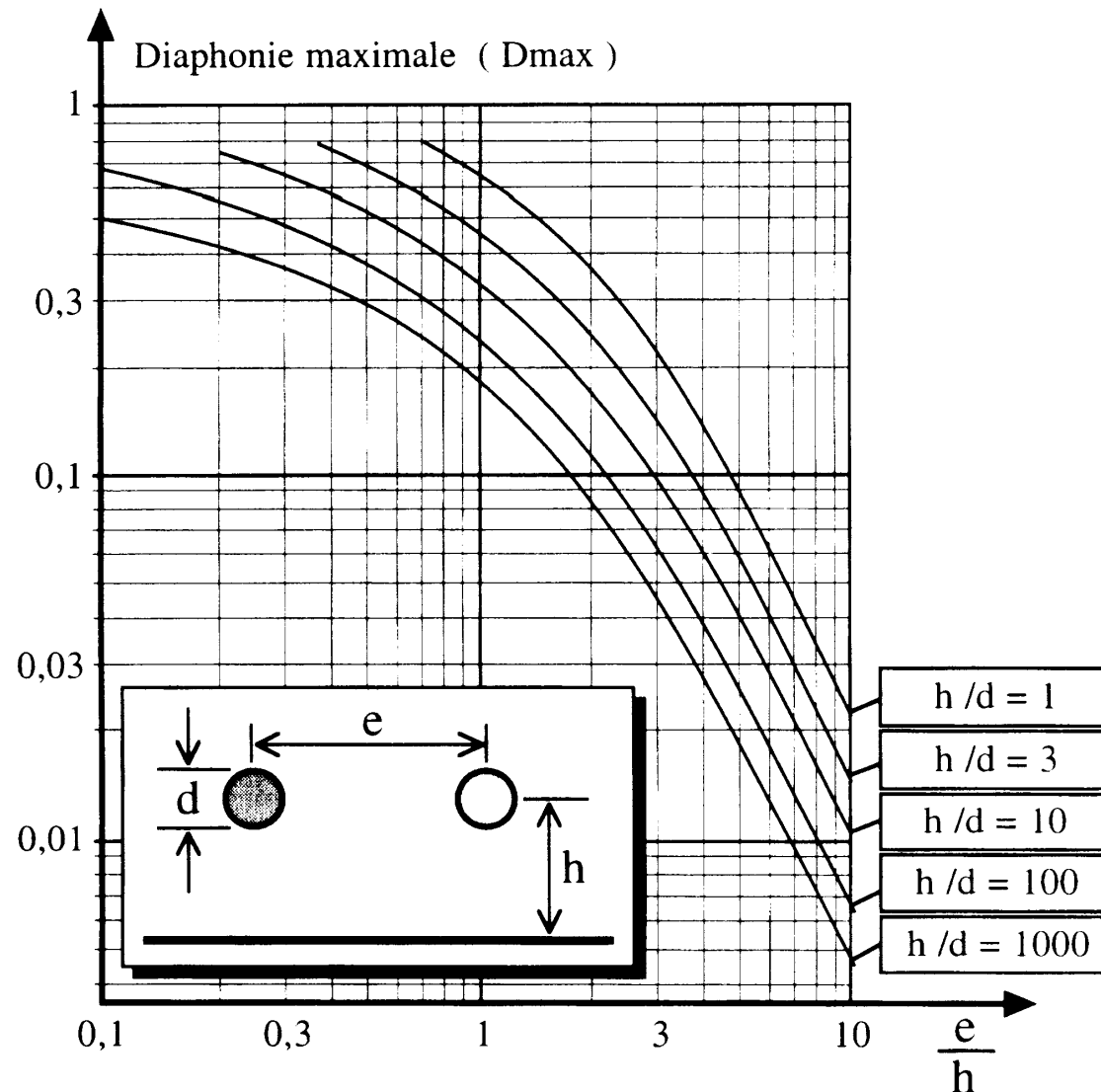


Le couplage par diaphonie inductive en mode commun

- La diaphonie inductive de MC est générée par les courants de MC circulant sur les câbles perturbateurs.
- L'effet est une tension induite entre un câble victime parallèle et la masse la plus proche.
- La configuration extrême à éviter est le cheminement de câbles voisins avec des conducteurs de retour éloignés.
- Attention ! Les courants de MC sont supérieurs en intensité aux signaux utiles en MD.
- Le problème le plus courant en CEM : couplage inductif en MC et en HF

Le couplage par diaphonie inductive en mode commun

■ Cas extrême



Le couplage par diaphonie inductive en mode commun

□ Remèdes :

- Diminuer la mutuelle inductance en éloignant le perturbé du perturbateur.
- Utilisation d'un anneau de garde relié au 0V autour des pistes sensibles.
- Éviter les parcours parallèles de câbles sur de longues distances.
- Mettre le conducteur de retour dans le même câble que le conducteur aller.
- Diminuer la vitesse de variation du courant .

Le couplage par diaphonie inductive en mode commun

□ Remèdes...

- Plaquer les conducteurs victimes et perturbateurs sur la masse.
- Travailler en basse impédance.

Le couplage par diaphonie capacitive

- Les variations de tension entre un conducteur et son environnement génèrent un champ électrique variable. Celui-ci injecte à son tour un courant, proportionnel aux lignes de champ coupées, dans les conducteurs proches.
- La diaphonie capacitive est un couplage par champ électrique. La notion de capacité de couplage parasite nous évite de calculer les champs électriques (ouf !).



Couplage par diaphonie capacitive

Le couplage par diaphonie capacitive

- Cette capacité nous permet de calculer le courant collecté par un conducteur victime.

$$I = 2\pi F C U$$

$$I = C \frac{dv}{dt}$$

I : courant collecté par la piste victime en A.

F : fréquence du signal source en Hz.

C : capacité de couplage en F.

U : tension de source coupable .

du/dt : vitesse de variation de la tension coupable

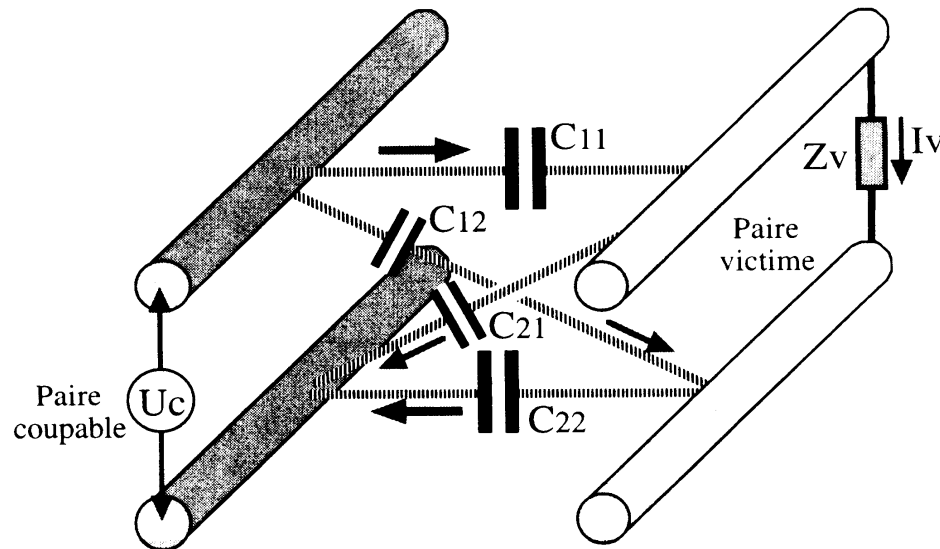
- Couplage important si C élevé ou dv/dt élevé

Le couplage par diaphonie capacitive

- La diaphonie capacitive est faible aux basses fréquences et nulle en continu.
- Elle se décompose en deux, MD et MC.
- Comme pour la diaphonie inductive de MC, la diaphonie capacitive de MC est la plus gênante.
- Aux fréquences élevées, les diaphonies inductives et capacitatives sont équivalentes en énergie : connaître l'un nous donne l'autre !

Le couplage par diaphonie capacitive

■ La diaphonie capacitive de MD



$$C_{MD} = \frac{C_{11} - C_{12} - C_{21} + C_{22}}{2}$$

- Elle perturbe, en BF, surtout les circuits à haute impédance et bas niveaux.
- Le pire cas de figure est le câble en nappe mal utilisé.

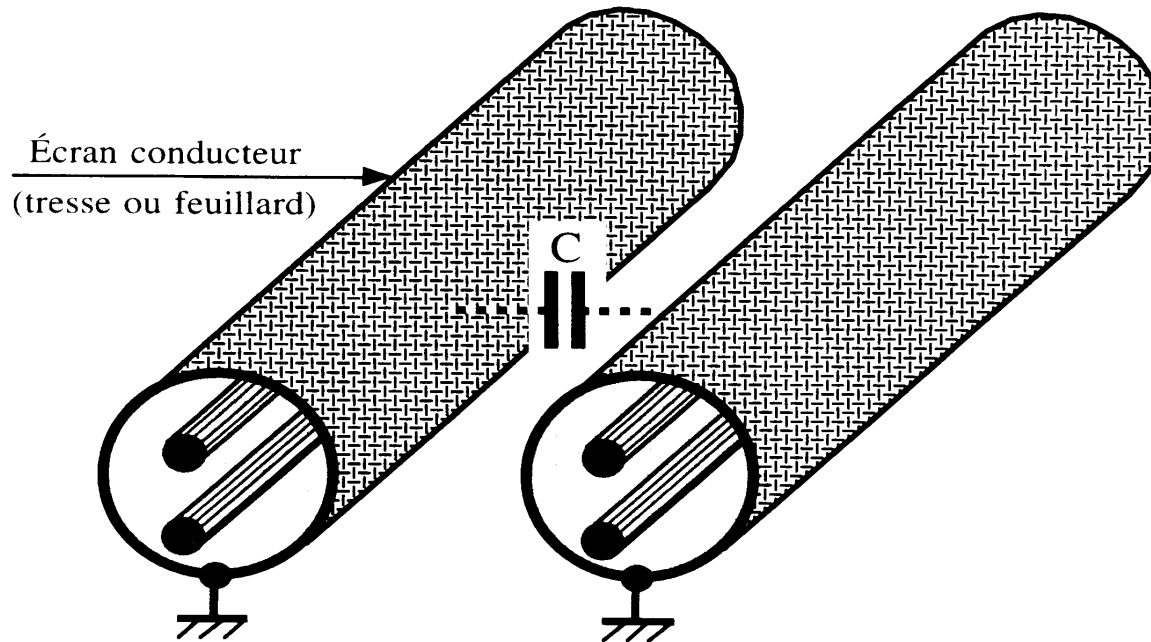
Le couplage par diaphonie capacitive.

■ Remèdes :

- ☐ Limiter les variations rapides de tension.
- ☐ Diminuer la capacité de couplage entre les deux circuits.
- ☐ Un écran conducteur, tresse, feuillard, plastique conducteur, est efficace même aux basses fréquences

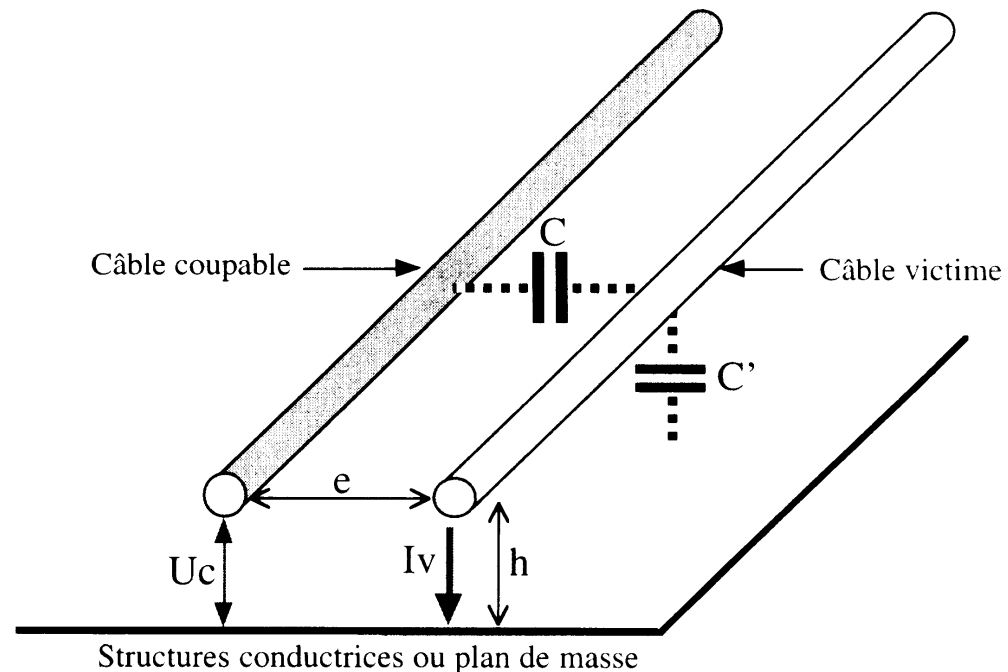
Le couplage par diaphonie capacitive

■ Remèdes : blinder les câbles



Le couplage par diaphonie capacitive

- La diaphonie capacitive de mode commun.



- Elle suit la même loi de décroissance que la diaphonie inductive de MC

Le couplage par diaphonie capacitive

- La diaphonie maximale est voisine de 50%
- Dès que l'éloignement e des câbles est supérieur à la hauteur h par rapport au plan de masse, la diaphonie dans les cas extrêmes tend vers le rapport :

$$R = \left(\frac{h}{e}\right)^2$$

Le couplage par diaphonie capacitive

- **Remèdes** : les mêmes que pour la diaphonie inductive
 - Diminuer la capacité de couplage en éloignant le perturbé du perturbateur.
 - Séparation des câbles bas niveaux des autres dans des goulottes séparées.
 - Éviter les parcours parallèles de câbles sur de longues distances.
 - Mettre le conducteur de retour dans le même câble que le conducteur aller.
 - Diminuer la vitesse de variation du courant .

Le champ électromagnétique

■ Unités :

- ☐ d : distance de la source en mètres (m)
- ☐ I : courant dans l'antenne en ampères (A)
- ☐ S : surface équivalente de l'antenne en m²
- ☐ L : longueur du fouet en mètres (m)
- ☐ F : fréquence en MHz
- ☐ H : champ magnétique en ampères par mètres (A/m)
- ☐ E : champ électrique en volts par mètres (V/m)
- ☐ P : puissance rayonnée en watt (W)
- ☐ U : tension induite en volts (V)
- ☐ C : célérité de la lumière (300 10⁸ m/s)
- ☐ μ : perméabilité magnétique du vide en henry par mètre (H/m)
$$\mu = 4 \pi 10^{-7}$$
- ☐ La longueur d'onde λ en mètres $\lambda = 300 / F \text{ (MHz)}$

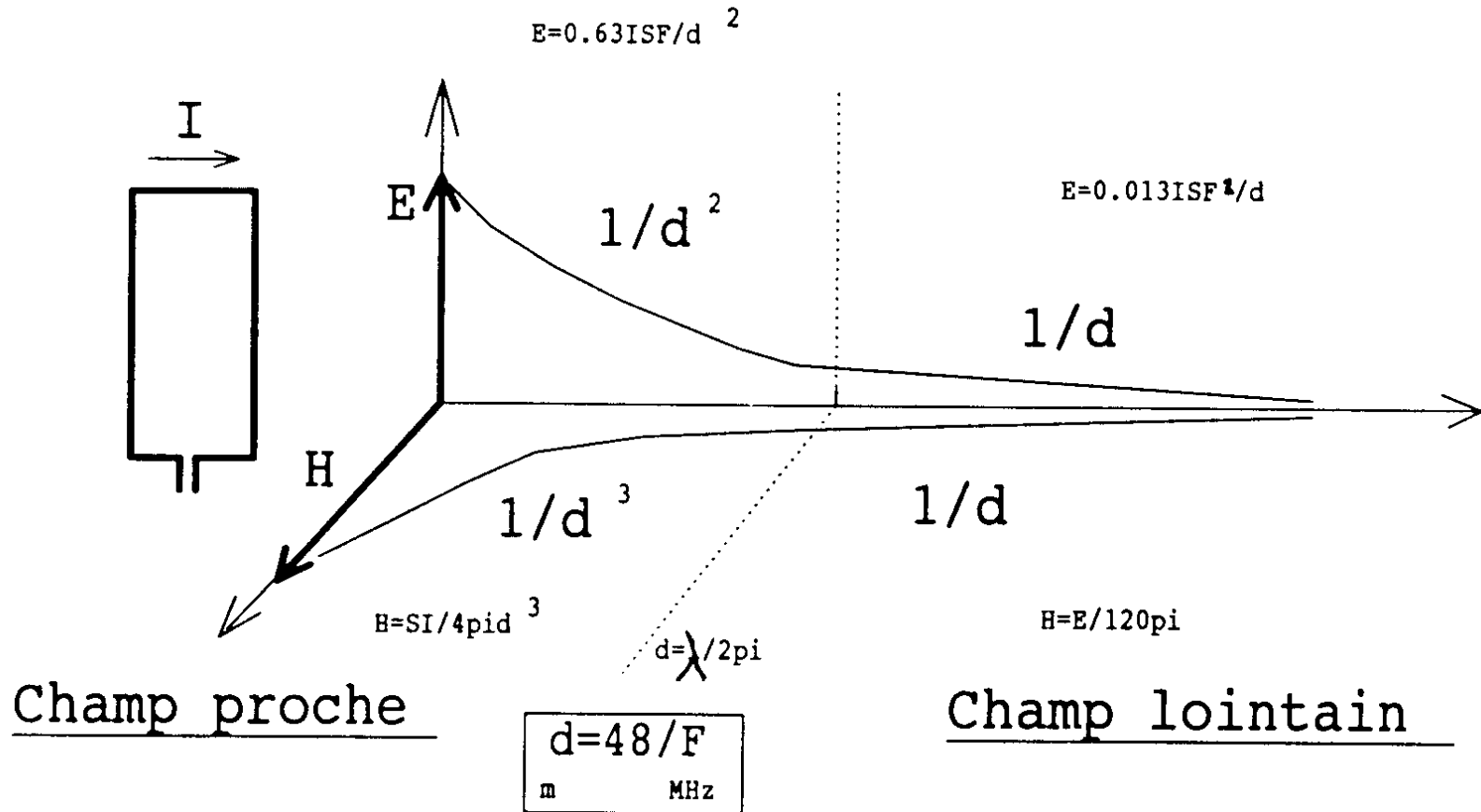


Couplage par champ électromagnétique

- Effet du champ E et H sur les cables
- Effet du champ E et H sur les boucles

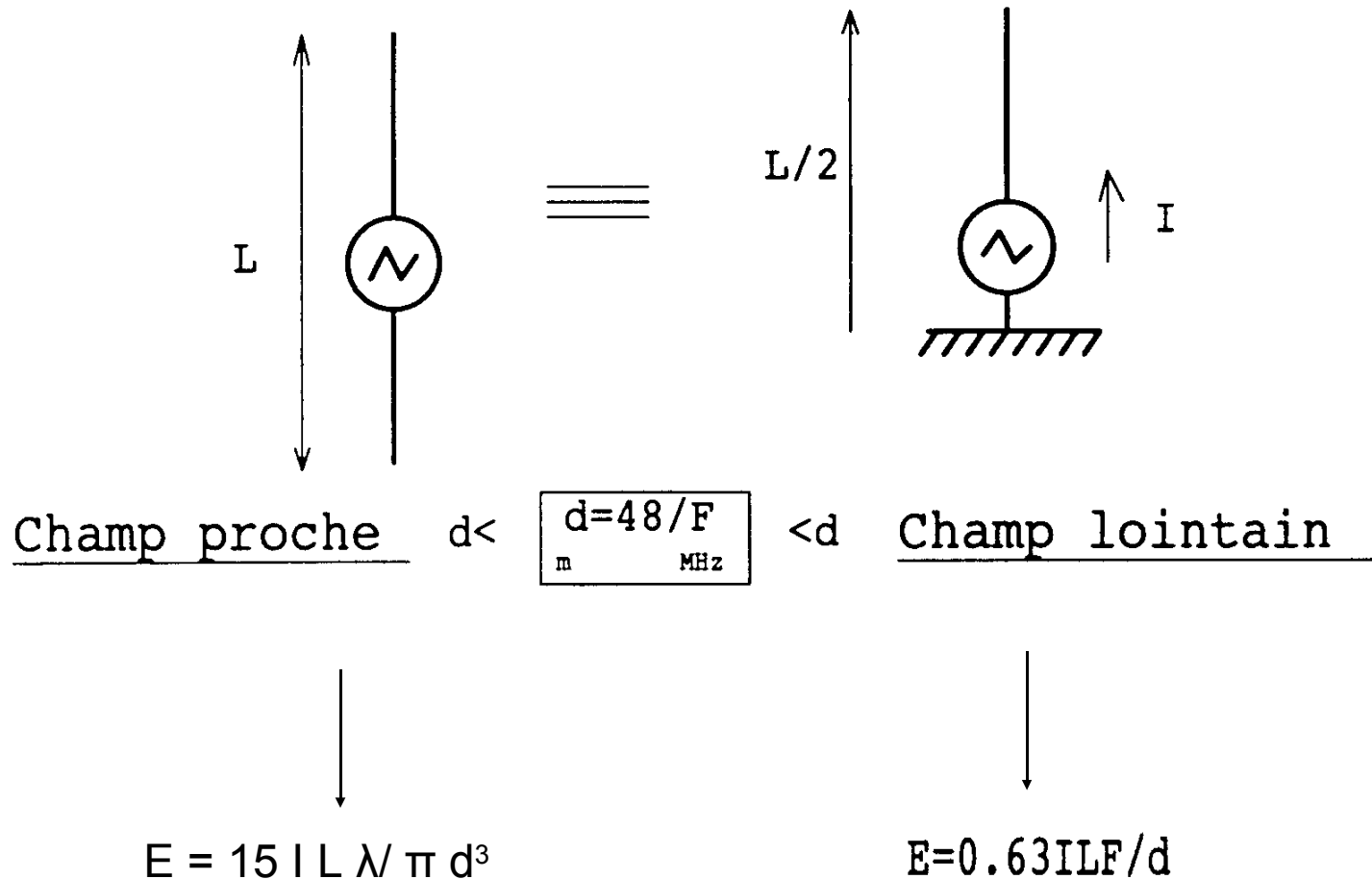
Le champ électromagnétique

– L'antenne boucle :



Le champ électromagnétique

- l'antenne fouet :



Le champ électromagnétique

- Puissance rayonnée P en champ lointain :

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{30PG}$$

P Watt

G Gain antenne

- Le gain G de l'antenne est le gain numérique (non ramené en dB) :

Pour un doublet il vaut 1.

Pour une parabole classique il vaut 1000.

Le champ électromagnétique

- Pour une antenne fouet, le champ E décroît en fonction du cube de la distance et le champ H décroît en fonction du carré de la distance en champ proche.

- L'impédance d'onde du vide Z est :

$$Z = E/H = 377 \text{ ohms}$$

- Cette valeur d'impédance correspond à une distance d (en champ lointain) fonction de la fréquence où les champs E et H sont couplés.

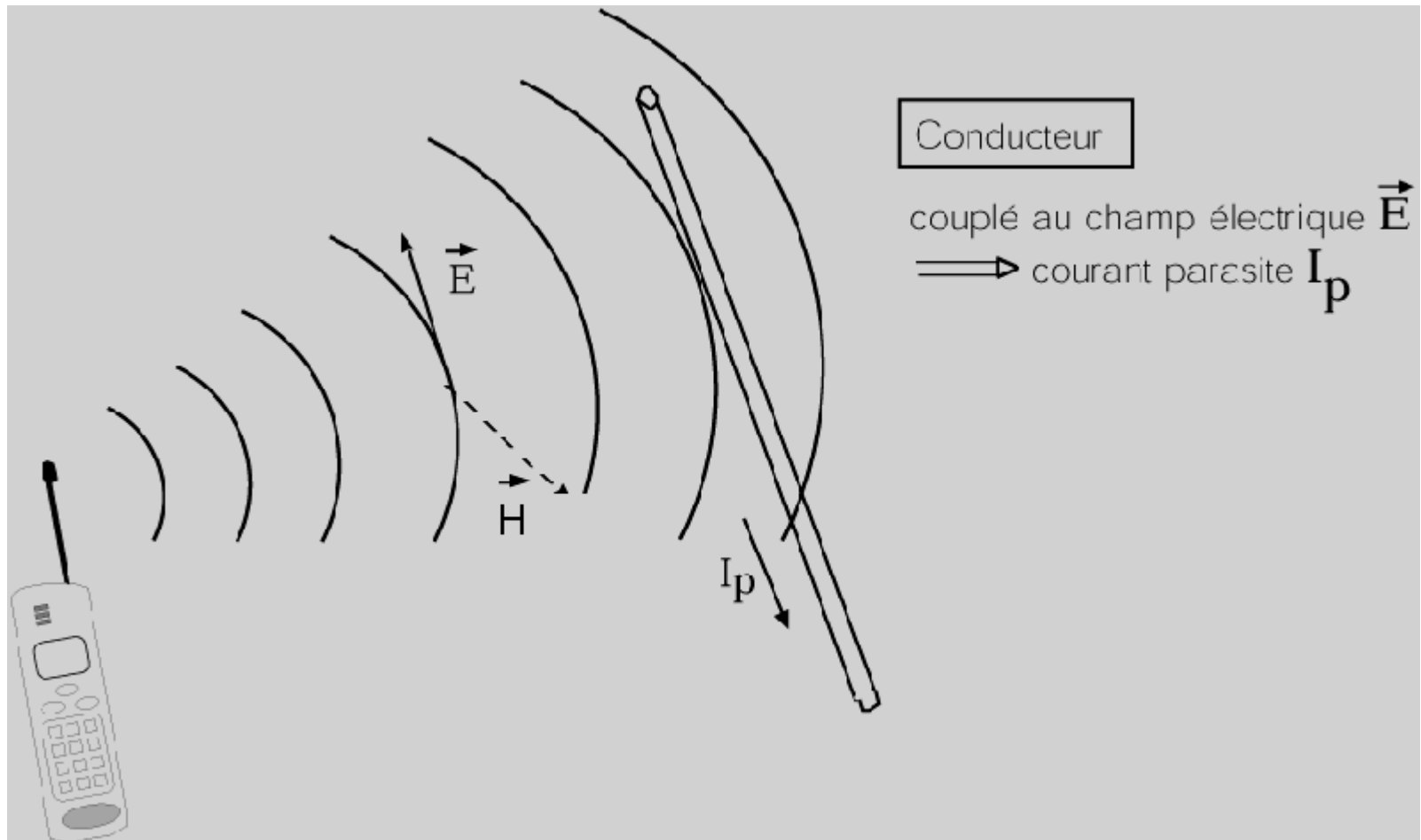
Pour une source de petite taille.

$$d = \lambda / 2 \pi$$

Le champ électromagnétique

- A proximité d'un fouet, le champ prédominant est le champ E. L'impédance dans cette zone est donc $Z_c > 377$ ohms.
- A proximité d'une boucle, le champ prédominant est le champ H. L'impédance en cette zone est donc $Z_c < 377$ ohms.

Le couplage « champ à câble ».

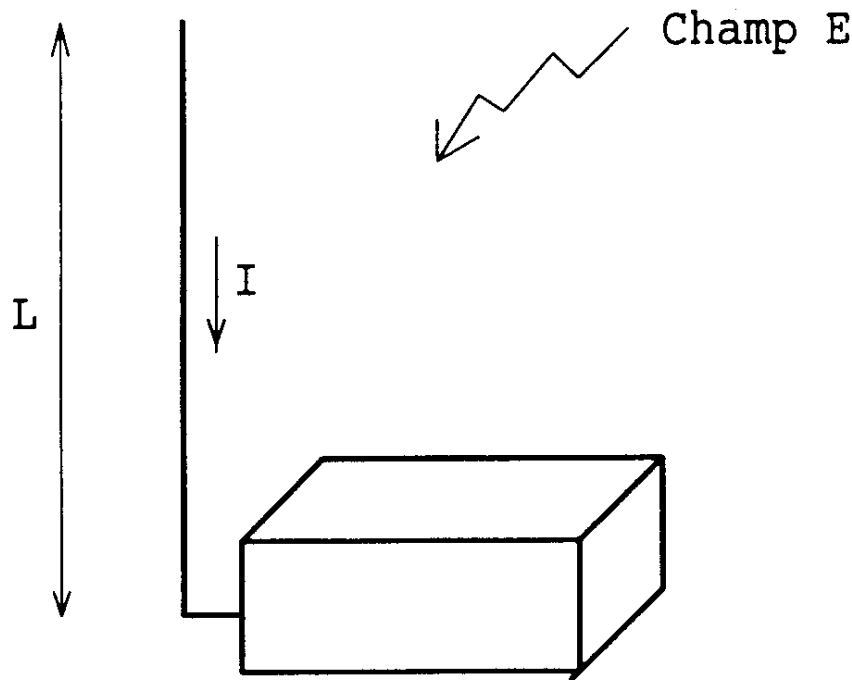


Le couplage « champ à câble ».

- Un champ électrique, en se réfléchissant sur un conducteur, crée un courant en surface de ce conducteur. Le condensateur entre les extrémités du conducteur permet la circulation du courant.
- Ce phénomène s'appelle aussi « couplage champ à fil » et est très faible aux fréquences basses.

Le couplage « champ à câble ».

- Courant collecté en fonction du champ électrique



$$\text{Si } L < c/4F$$

$$I = E L^2 F / (2400 \ln(L/2d))$$

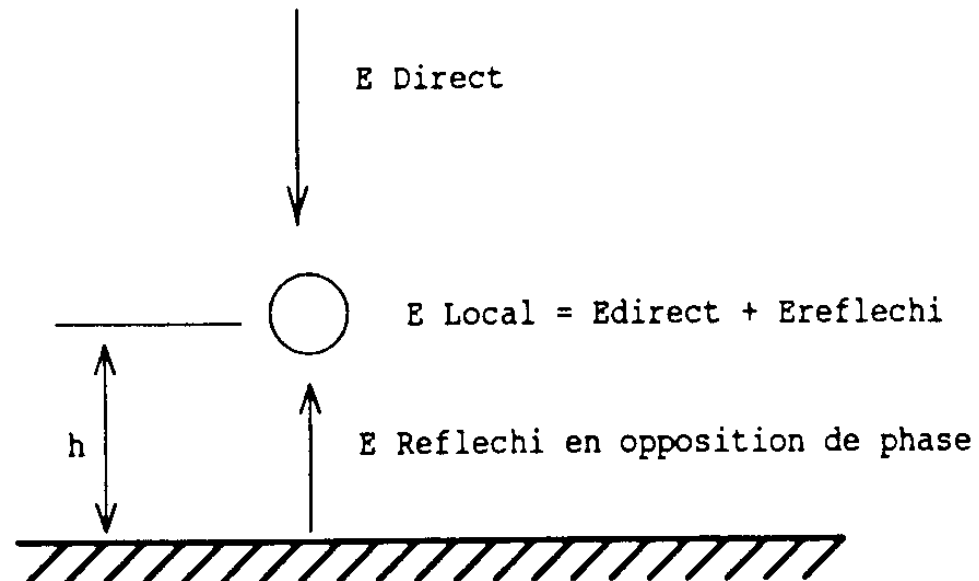
$$\text{Si } L > c/2F$$

$$I = 1.25 E / F$$

Le couplage « champ à câble ».

■ Remèdes :

- Pour le réduire on peut diminuer l'effet d'antenne en rapprochant le câble de la masse, en blindant ou en éloignant le champ électrique perturbateur.
- Plaquer le câble contre un plan de masse conducteur .

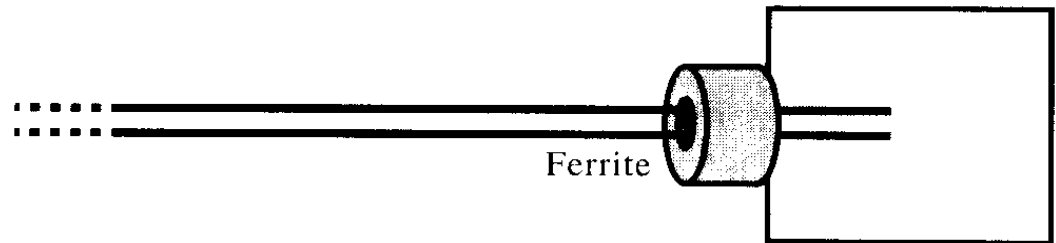
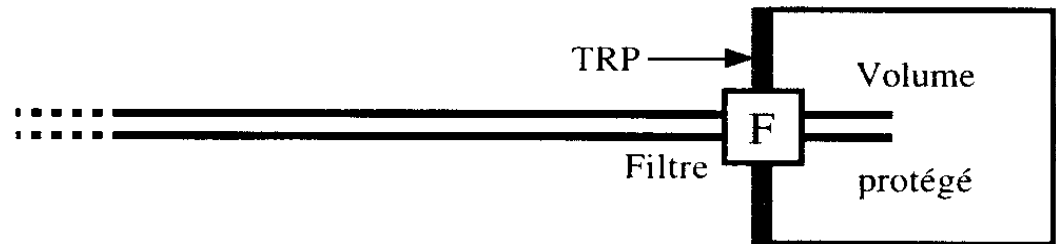
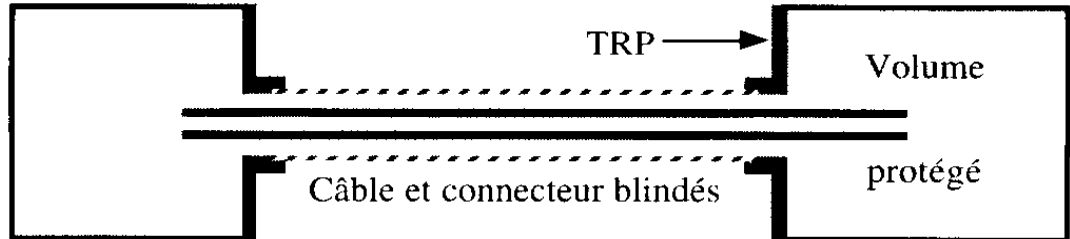


Le couplage « champ à câble ».

- Remèdes : blindages et filtrages
 - Blinder les câbles et les coffrets.
 - Filtrer les entrées et sorties par rapport à la masse mécanique.
 - Monter des tores de ferrites sur les câbles collecteurs.

Le couplage « champ à câble ».

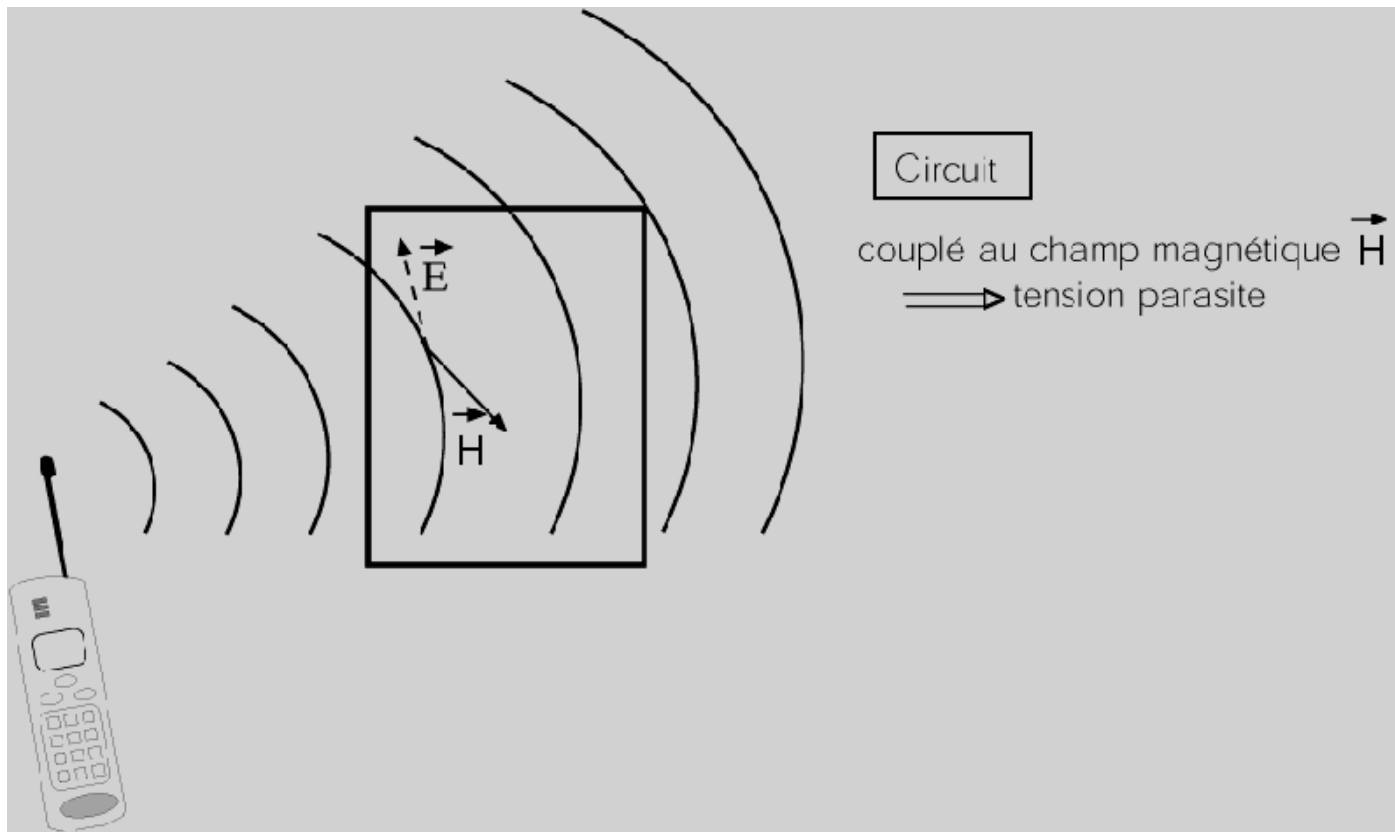
■ Remèdes



□ La TRP est une
tête de référence de
potentiel.

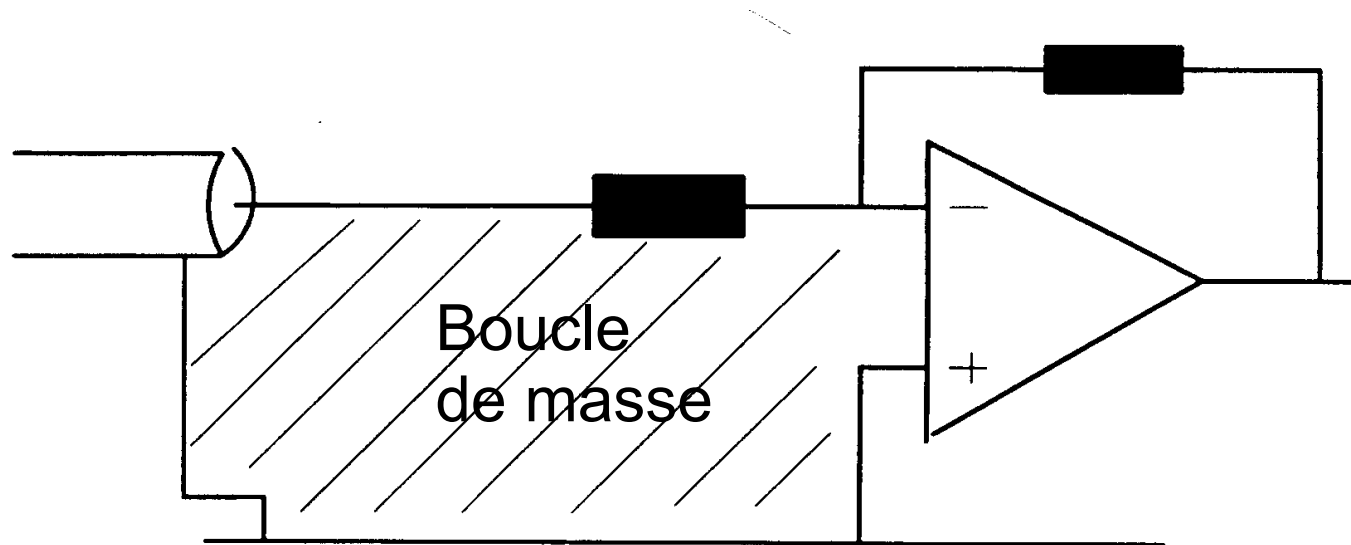
Le couplage « champ à boucle ».

Un champ magnétique variable traversant une boucle y crée un flux magnétique variable. Ce flux induit une tension électrique aux bornes de cette boucle.



Le couplage « champ à boucle »

- La tension induite aux bornes d'une boucle soumise à un champ électromagnétique, si la plus grande dimension de cette boucle est $< C/4F$, est :



Champ E

$$V = S E F / 48$$

Champ H

$$V = S u \, dH/dt$$

Le couplage « champ à boucle »

- Proportionnel à la fréquence, donc faible en BF, à 50 Hz et harmoniques
- Tension collectée en HF :
 - Si les dimensions de la boucle sont $d > c/4F$ alors la loi de Lentz ne s'applique plus directement. En effet la tension induite fluctue entre des minima et des maxima qui valent :

$$U \approx 600 e H$$

e : espace entre les conducteurs aller et retour en mètres.

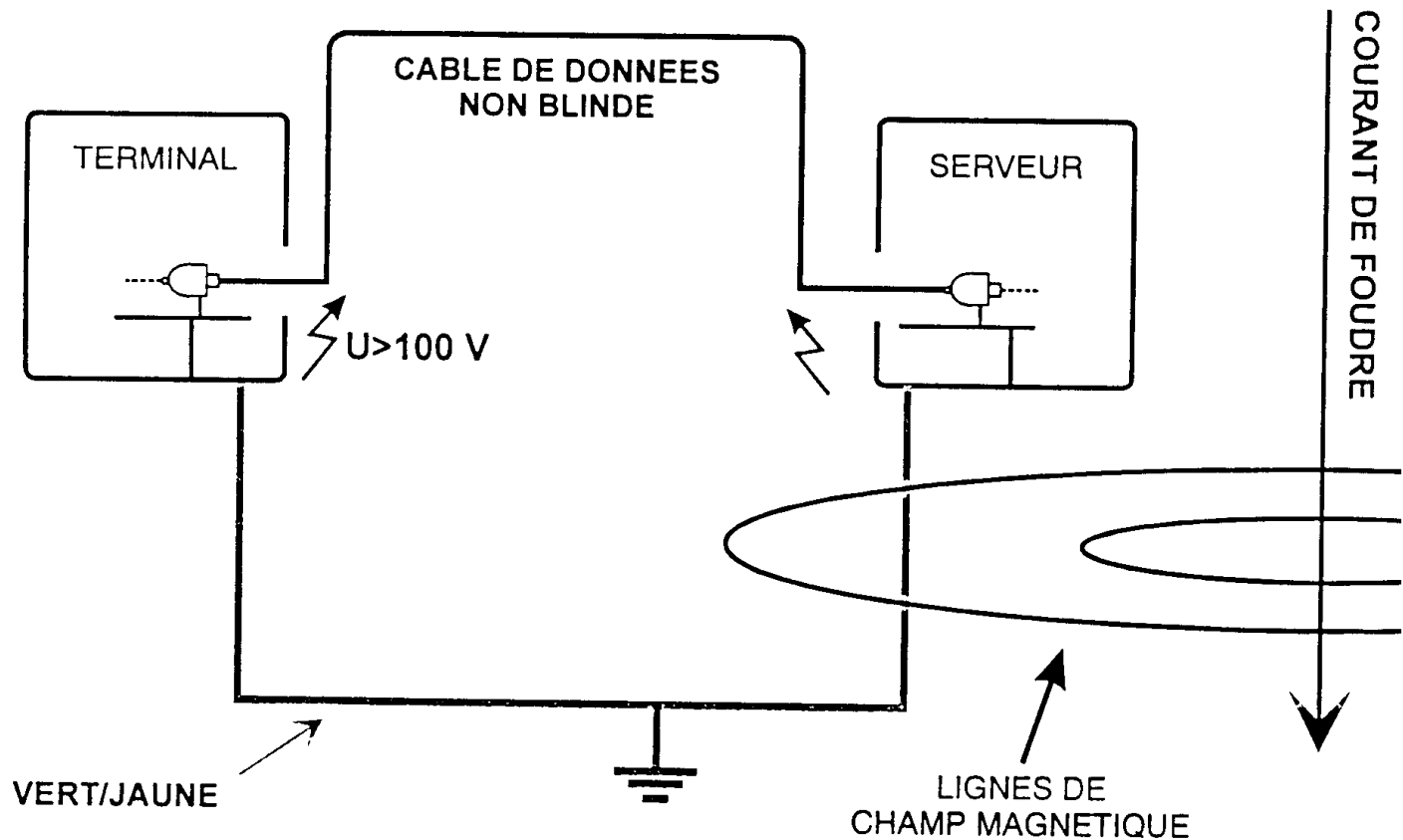
Le couplage « champ à boucle ».

■ Remèdes :

- ☐ diminuer la surface des boucles, utiliser un plan de masse sur les circuits imprimés.
- ☐ se protéger par blindage du champ magnétique perturbateur (difficile).
- ☐ regrouper les entrées/sorties du même côté des cartes plutôt que de les répartir sur le périmètre.

Le couplage « champ à boucle »

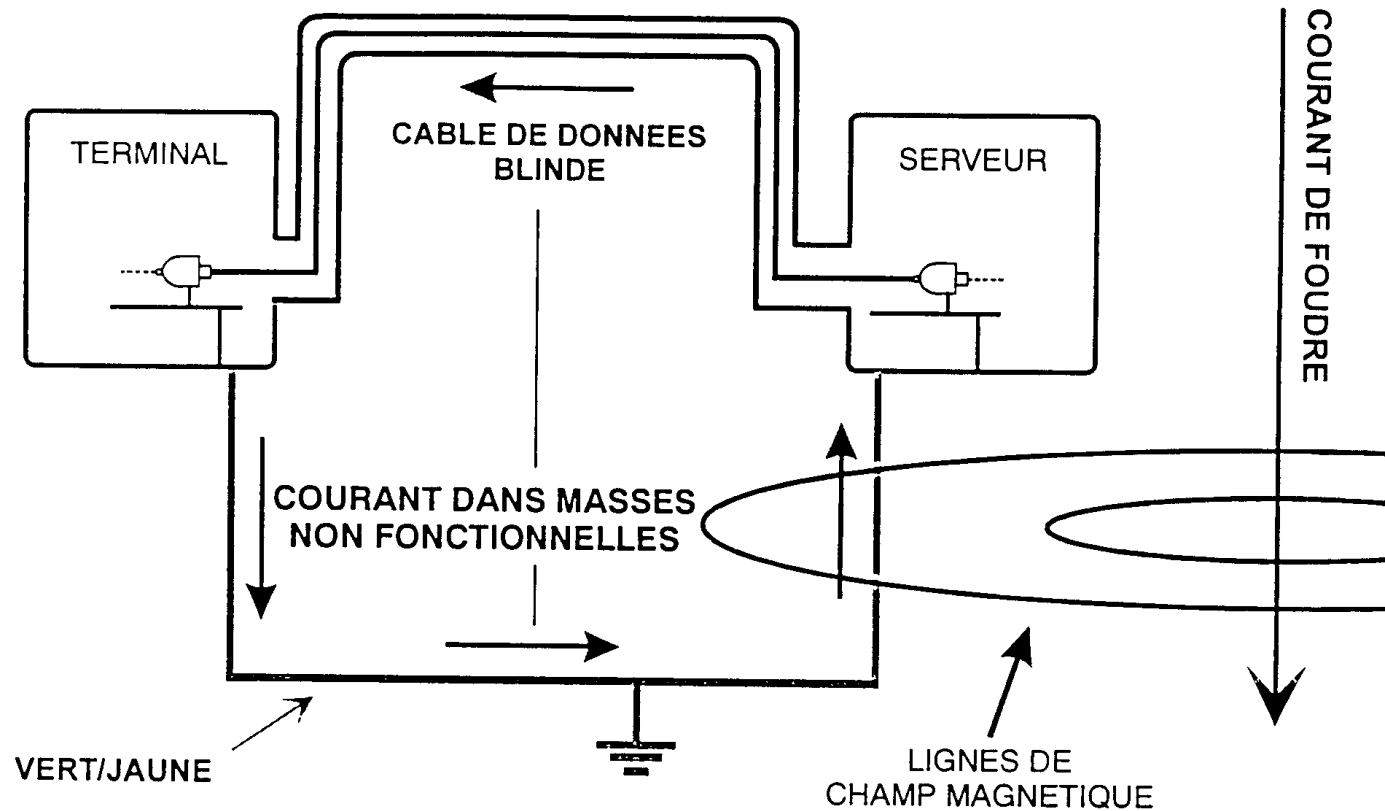
■ Exemples ...



DESTRUCTION PAR CHAMP MAGNETIQUE DE LA FOUDRE

Le couplage « champ à boucle ».

■ ... et remèdes.



PROTECTION CONTRE LE CHAMP MAGNETIQUE DE LA FOUDRE
PAR BLINDAGE DES CABLES DE DONNEES

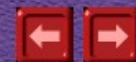
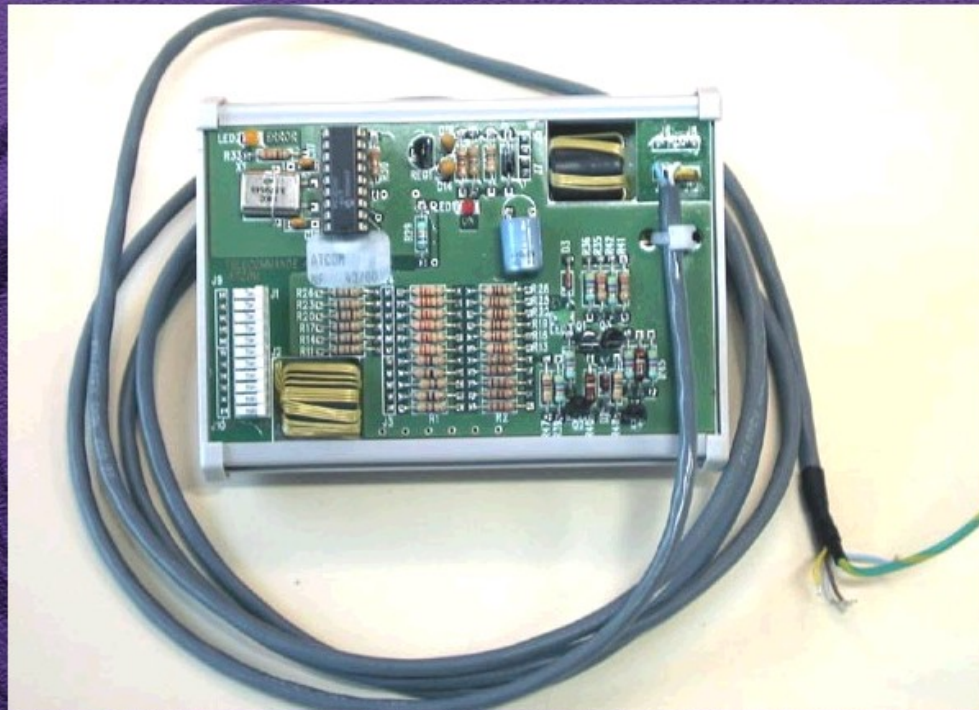
Le couplage par diaphonie capacitive.

■ Remèdes :

- Tous les conseils donnés sur la diaphonie inductive sont ici valables
 - Diminuer la capacité de couplage en éloignant le perturbé du perturbateur.
 - Séparation dans des goulottes distinctes des câbles transportant des signaux bas niveaux des autres câbles.
 - Éviter les parcours parallèles de câbles sur de longues distances.
 - Mettre le conducteur de retour dans le même câble que le conducteur aller.
 - Diminuer la vitesse de variation des tensions .

La technologie

141



Le filtrage : R en HF

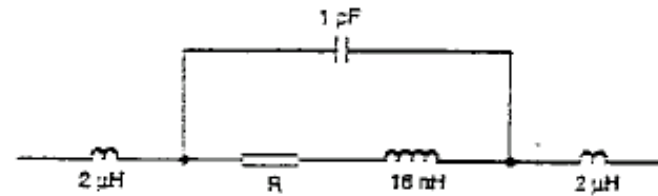


Figure 3b: Simplified Equivalent for a Spiral Metal Film Resistor.

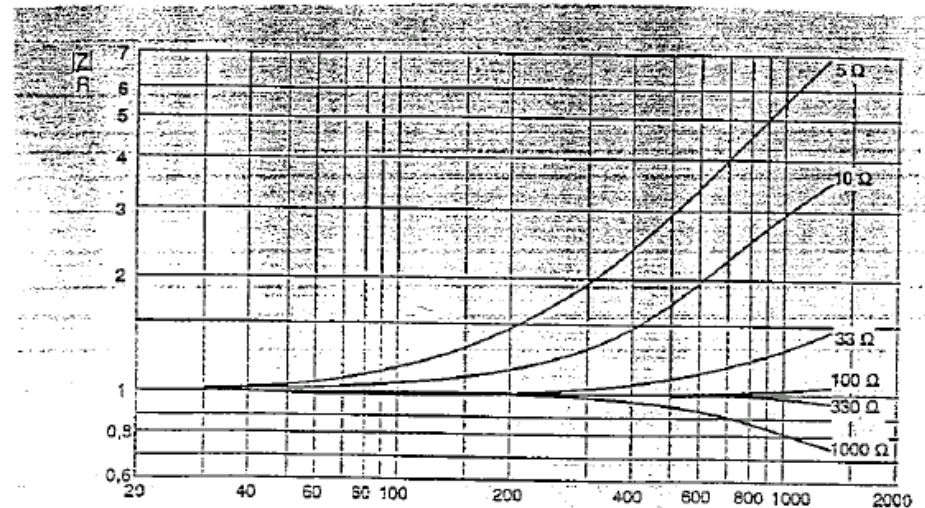


Figure 5c: Frequency dependence of the especially low inductive type of metallic film resistor MRS 25 li.

Condensateur en HF

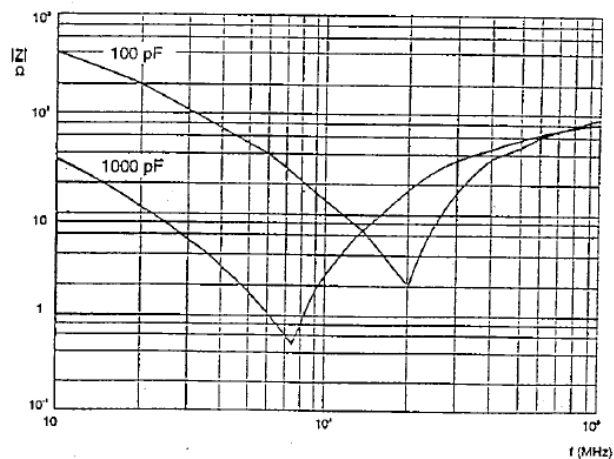
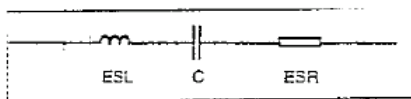
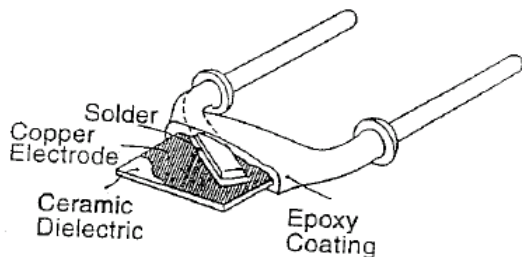


Figure 8: Impedance Z as a Function of the Frequency of Capacitors with Wires.

Self en HF

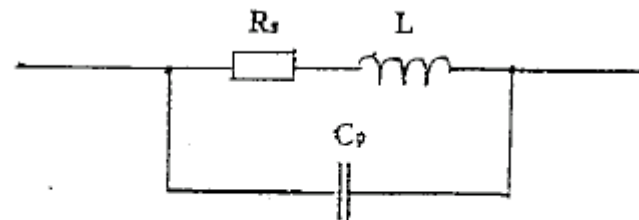


Figure 17: Equivalent Circuit of Inductance.

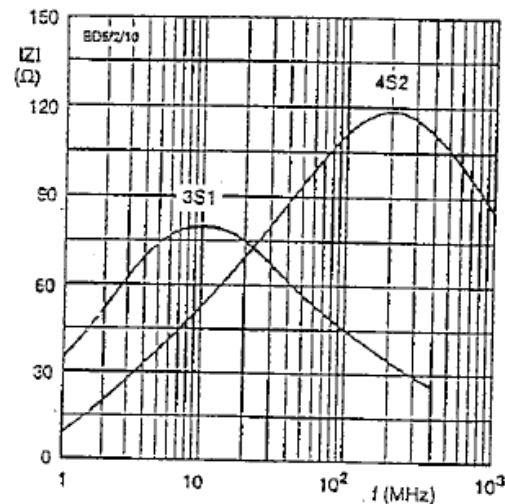
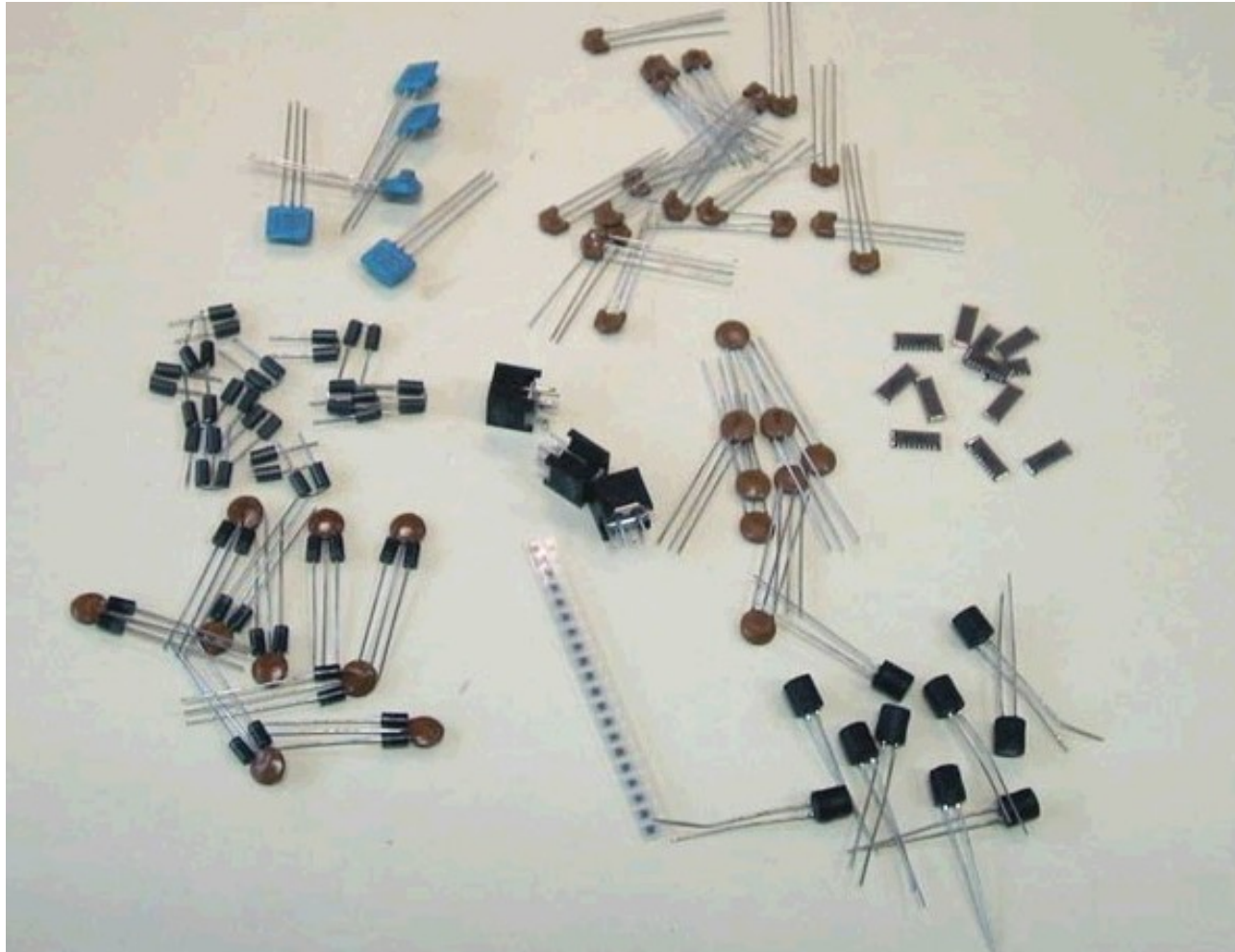


Figure 18: Impedance as a Function of Frequency for Different Types of Ferrites.

Les filtres

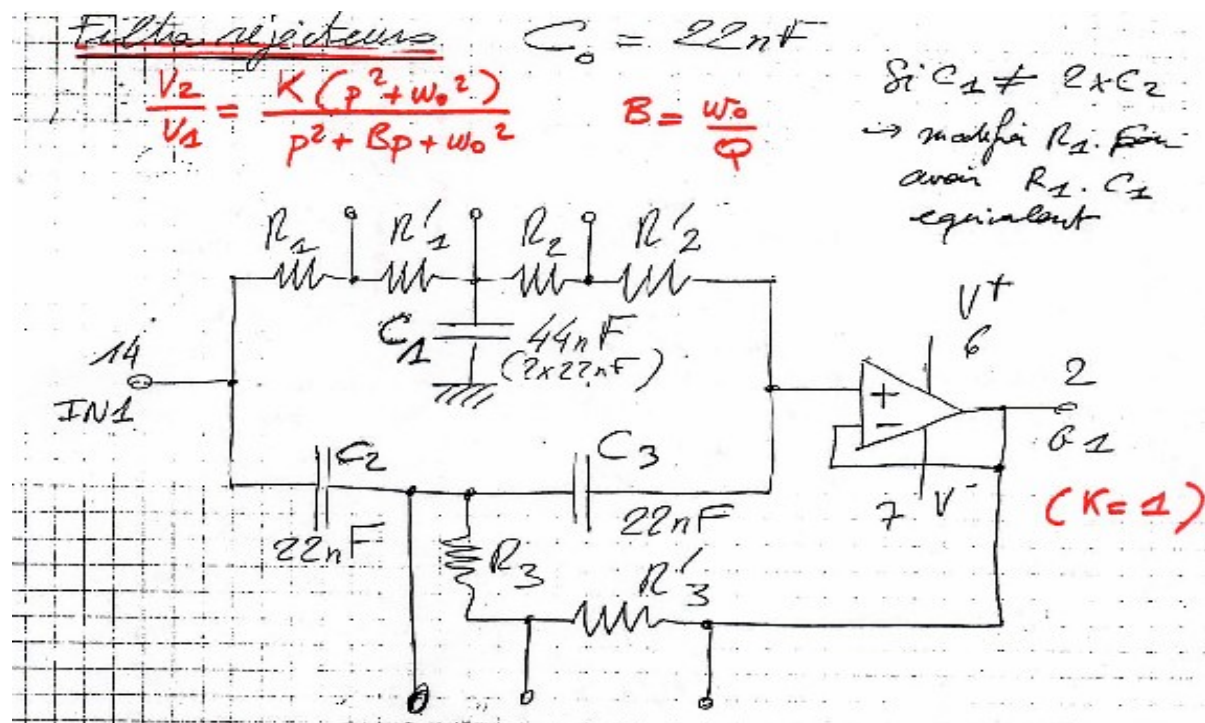


Les filtres : utilité

- Le but d'un filtre est de laisser passer le signal utile tout en affaiblissant les signaux hors bande.
- Les filtres passe-bas sont les plus utilisés en CEM.
- **Le filtre le plus simple est un simple condensateur.**
- Les filtres classiques sont de type R, L, C.
- Les filtres « coupe bande » sont utilisés pour la réjection des fréquences secteur et harmoniques

Réjecteurs 50 Hz et harmoniques

- Bruit secteur : 50 Hz (ou 60 Hz) et plutôt harmoniques impaires (150, 250, ...)
- Réjecteur analogique (base : double T) et/ou filtre numérique (coupe-bande ou en peigne)



Les filtres : les produits

- De simples filtres RC peuvent être utilisés sur les entrées signaux (bas niveaux).
- Des filtres selfiques tels que les ferrites sont très efficaces car ils présentent en HF une importante composante résistive amortissant ainsi les résonances. Ils peuvent, de plus, être montés après coup sur les câbles.
- Des filtres plus complexes intégrant des selfs et des condensateurs tels les filtres en L, π ou T, permettent une coupure plus raide.

Les filtres : précautions d'emploi

- Les filtres travaillent soit par absorption, soit par désadaptation.
- Pour présenter une grande perte d'insertion, un filtre placé sur un circuit à haute impédance doit présenter une faible impédance.
- Un filtre placé sur un circuit à faible impédance doit présenter une haute impédance.

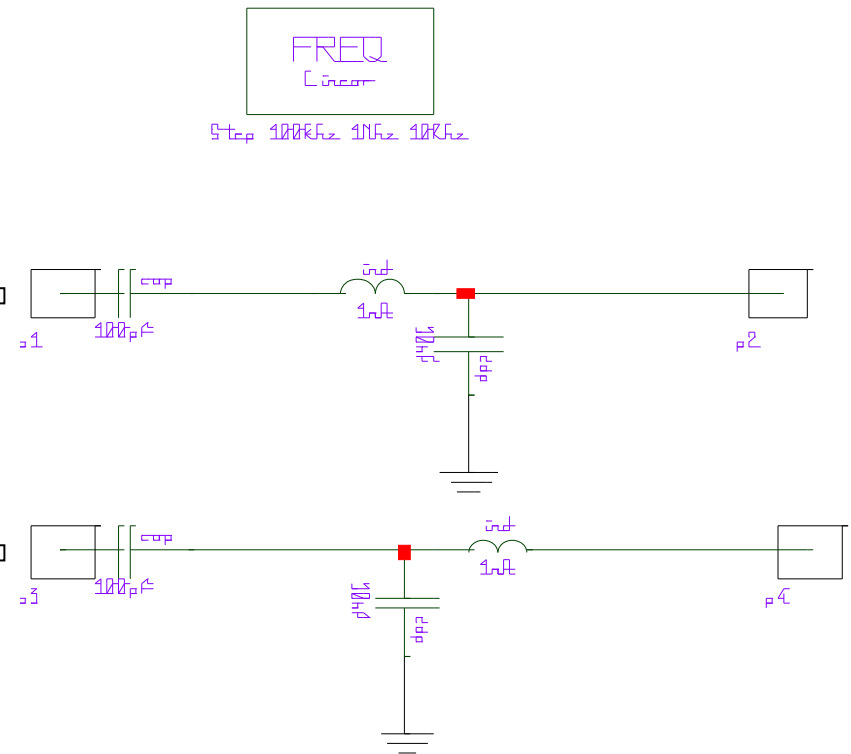
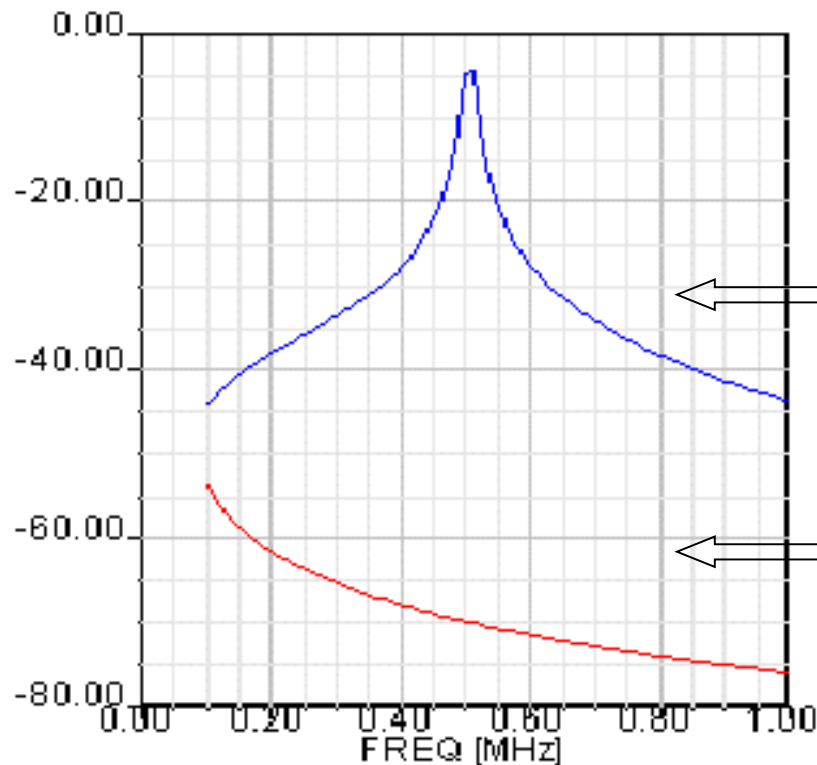
Les filtres : précautions d'emploi

- Les filtres linéaires sont réciproques. Leur atténuation est la même dans les deux sens. Néanmoins, compte tenu du fait que les impédances terminales sont rarement égales, seuls les filtres symétriques sont réversibles !!!

Les filtres : précautions d'emploi

■ Attention au sens de montage des filtres !!!

Atténuation du filtre en fonction de la fréquence



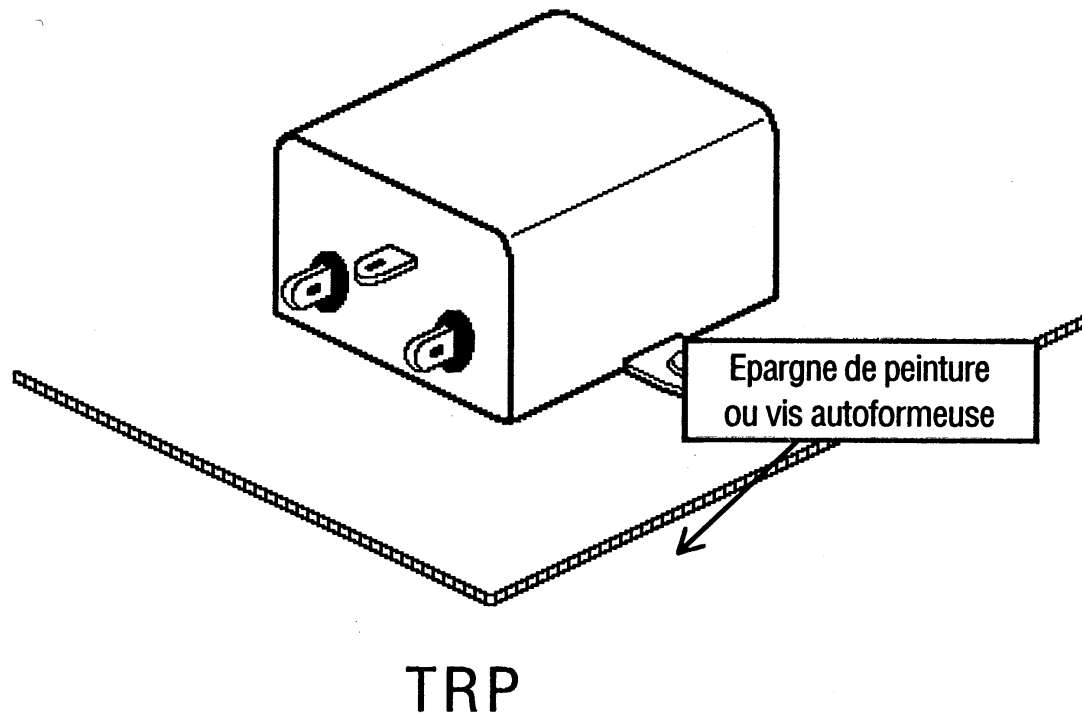
Les filtres secteurs



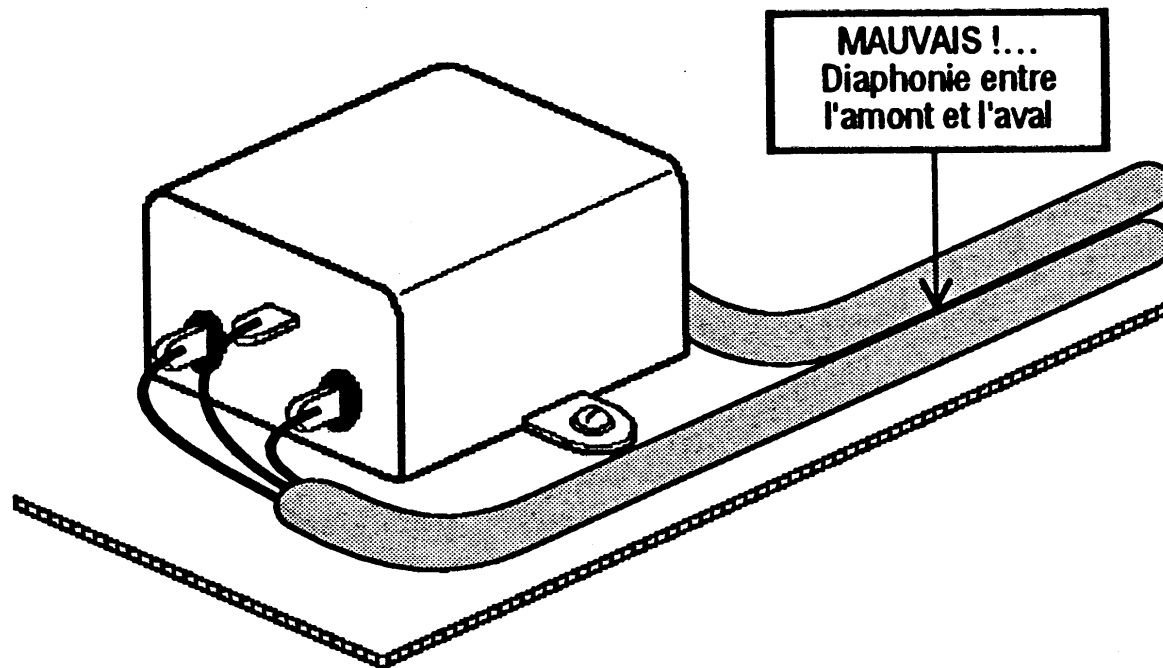
Les filtres secteur : mise en oeuvre

- Le filtre doit être monté sur le châssis mécanique, masse de l'appareil.
- Prévoir des épargnes de peinture sous le filtre. Attention aux matériaux traités !
- Éviter les couplages entre les fils qui arrivent et ceux qui partent.
- Les filtres secteur ne sont généralement pas réversibles. Attention au sens de montage !!!
- Plaquer les câbles contre les tôles.

Les filtres secteur : mise en oeuvre

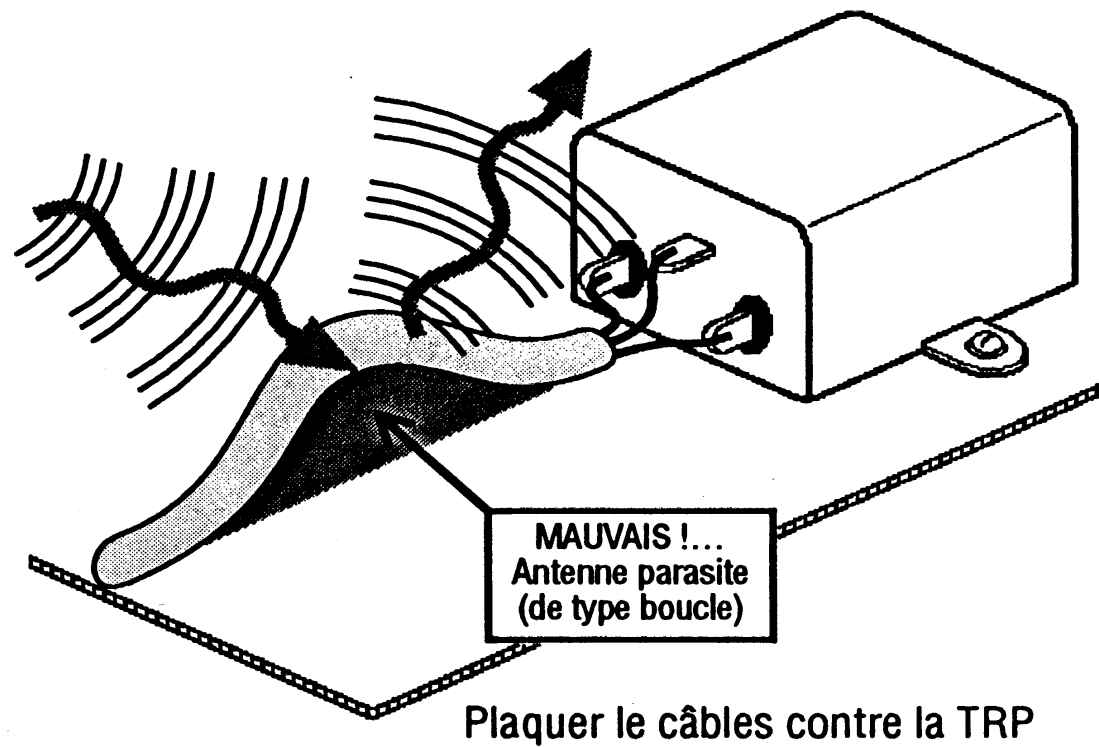


Les filtres secteur : mise en oeuvre



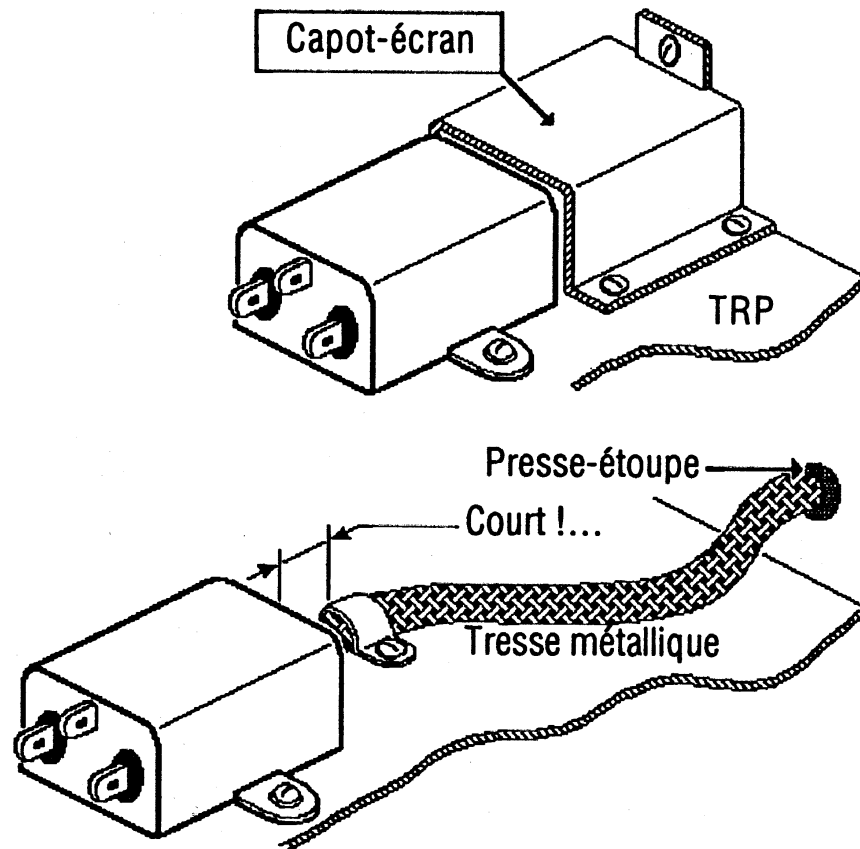
Tirer les câbles amont et aval à 180°

Les filtres secteur : mise en oeuvre

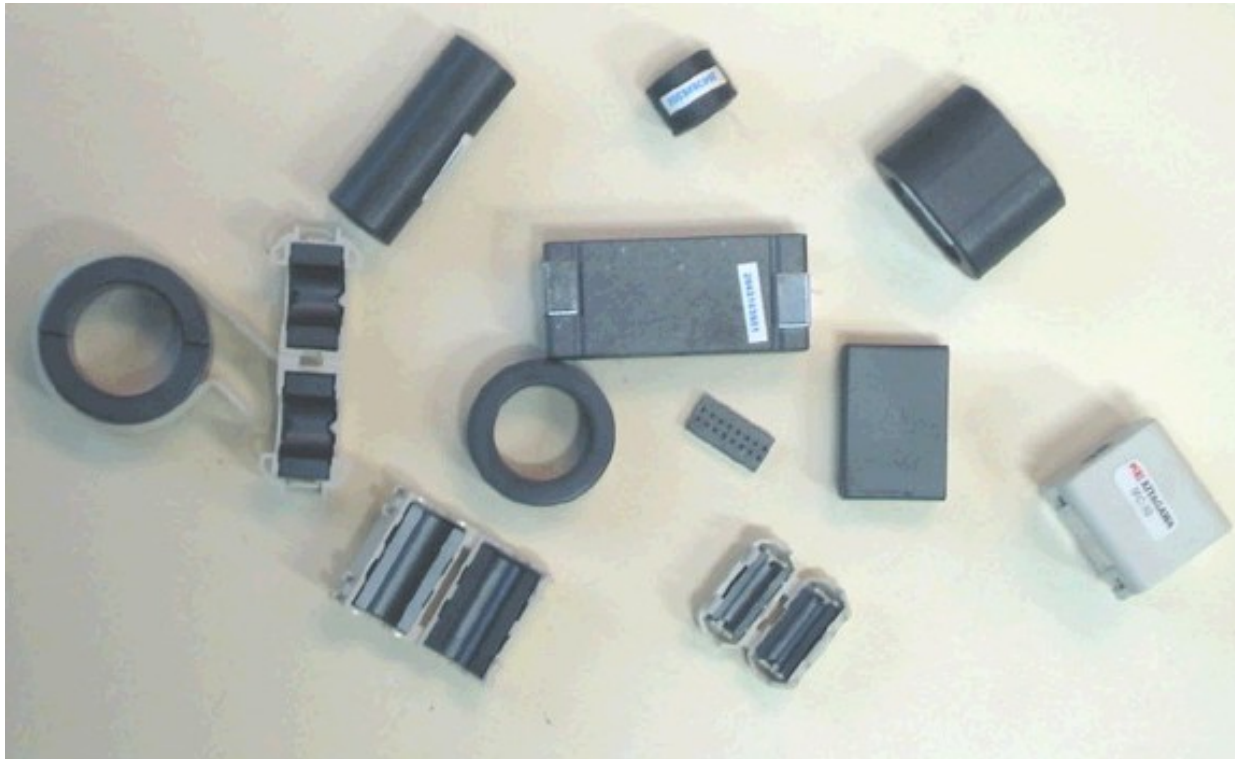


Les filtres secteur : mise en oeuvre

■ Montages recommandés :



Les ferrites



Les ferrites : utilisation

- Les ferrites sont choisies en fonction de la bande de fréquence à filtrer.
- Elles peuvent se rencontrer sous diverses formes : implantable sur circuit imprimé, coque à monter sur les câbles (protection contre le MC), tores, ...
- On choisira des ferrites dont la partie résistive est élevée aux fréquences à supprimer.

Les ferrites

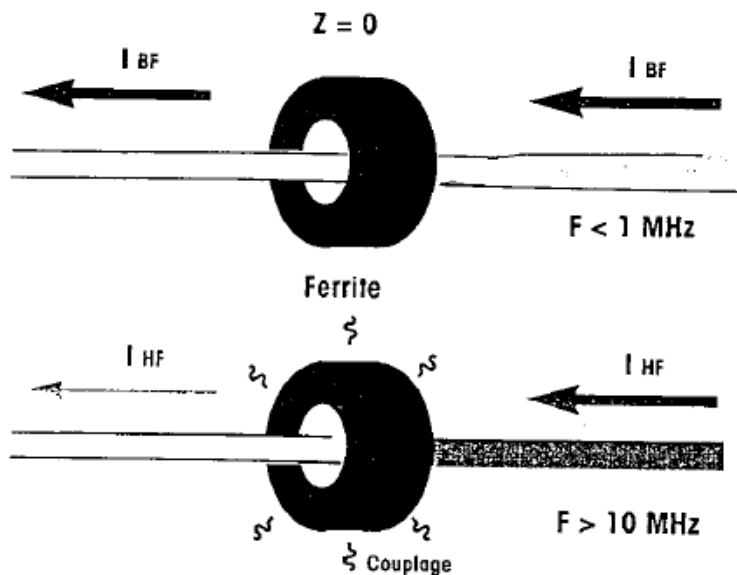


Les ferrites : utilisation

- Pour augmenter l'impédance présentée par une ferrite, il est possible de passer plusieurs boucles à travers le noyau :
 - Attention, la fréquence de résonance décroît avec le nombre de tours.
 - Au delà d'un certain nombre de tours l'impédance ne croît plus.

Les ferrites : utilisation

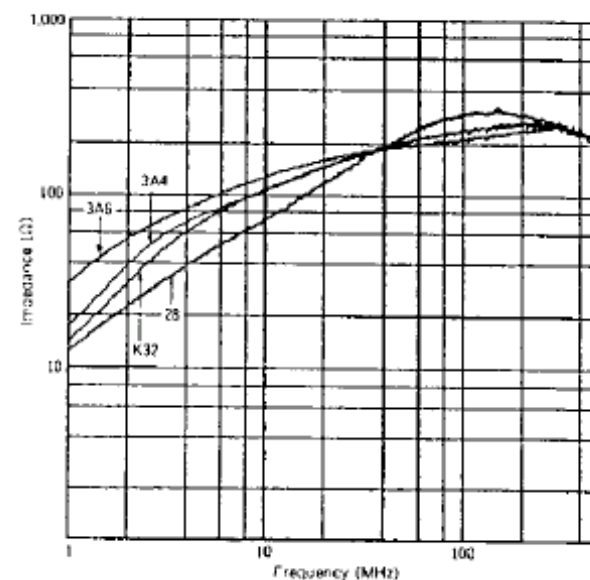
Principe de fonctionnement



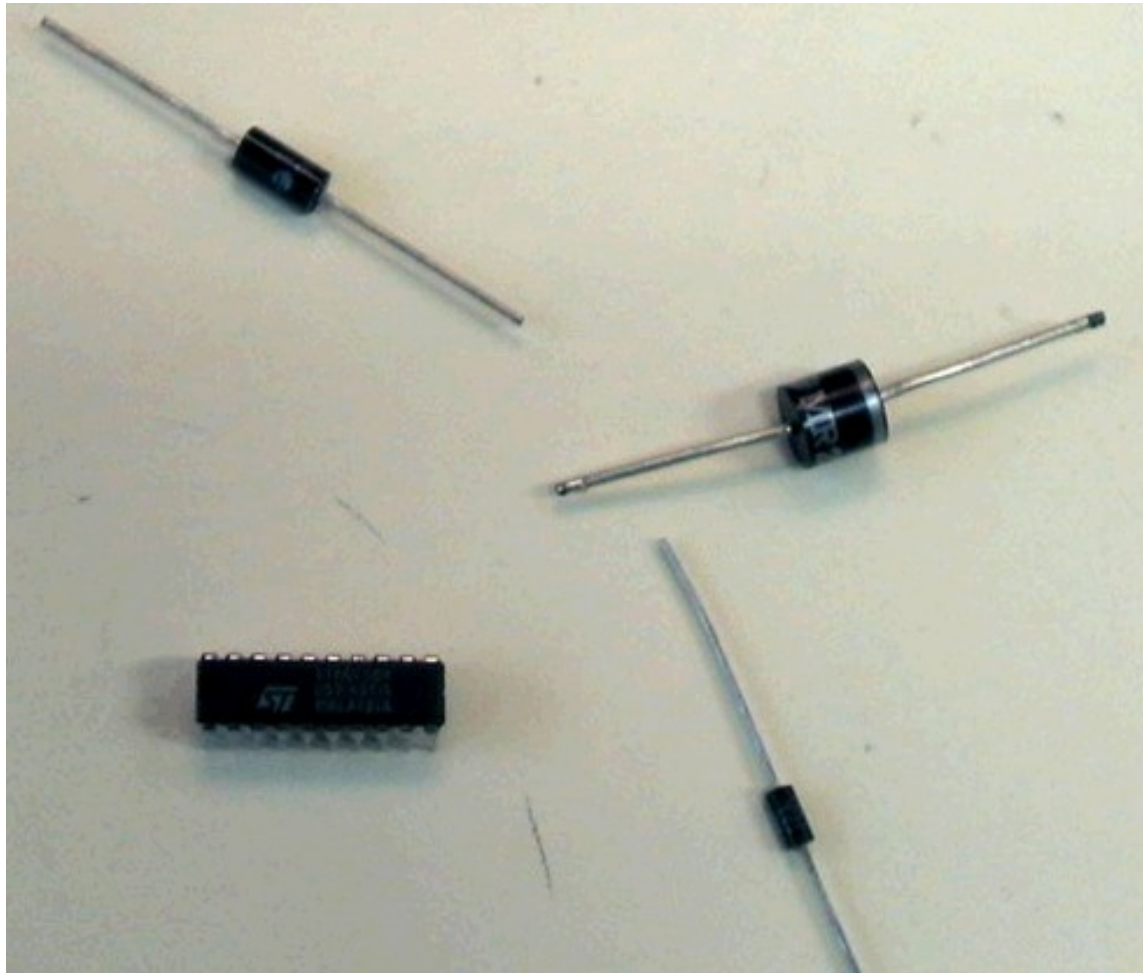
$Z =$ quelques dizaines ou centaines d'ohms

μ_i matériaux
(Perméabilité initiale)
Kitagawa

K 32	$\mu_i = 700$
3 A 4	$\mu_i = 800$
28	$\mu_i = 850$
3 A 6	$\mu_i = 1000$



Les parasurtenseurs

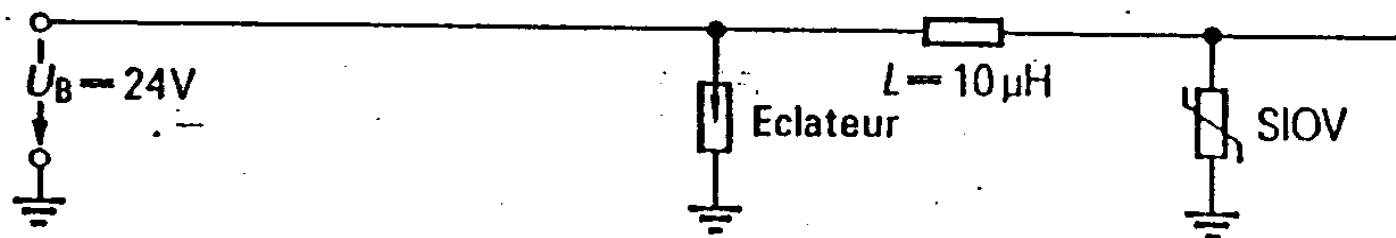
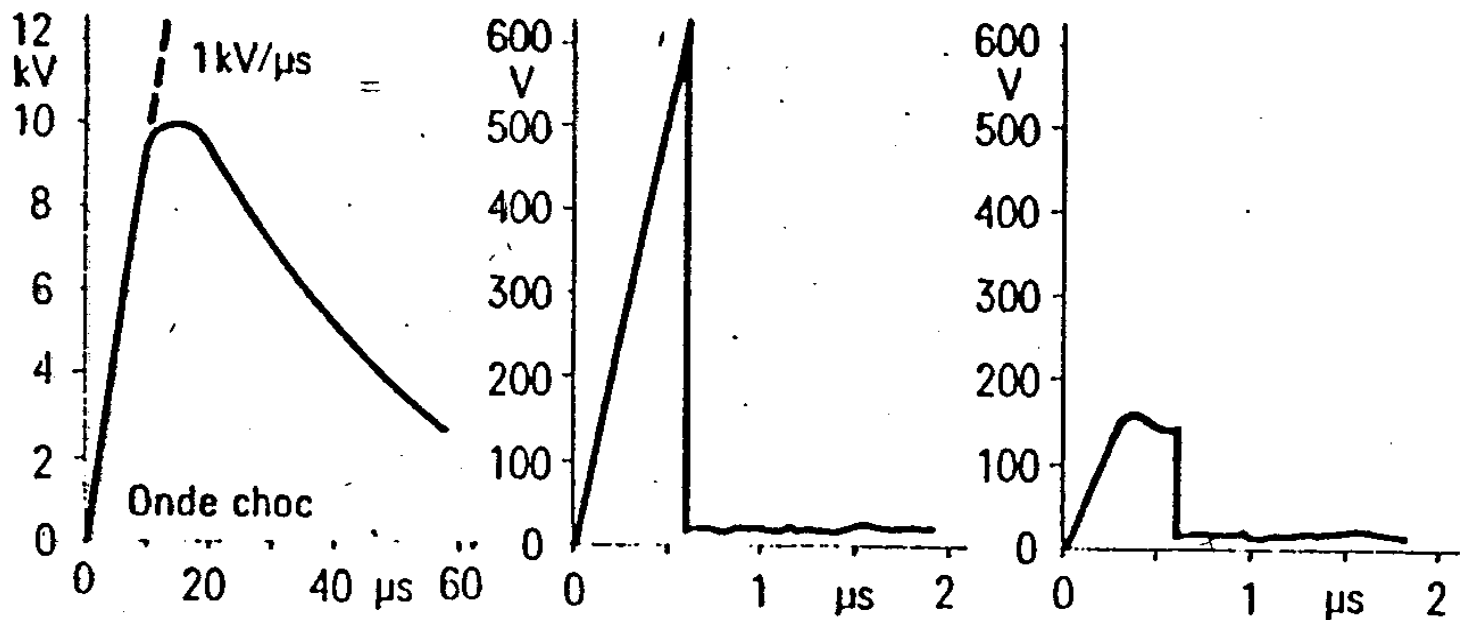


Les parasurtenseurs : utilisation

- Les parasurtenseurs sont des composants devant écouler des courants importants pendant parfois plusieurs millisecondes (foudre, surtensions).
- C'est une protection montée en parallèle avec la ligne à protéger. Ils doivent donc présenter une grande impédance vis à vis des signaux utiles et passer à un état « faible impédance » lors d'une surtension.

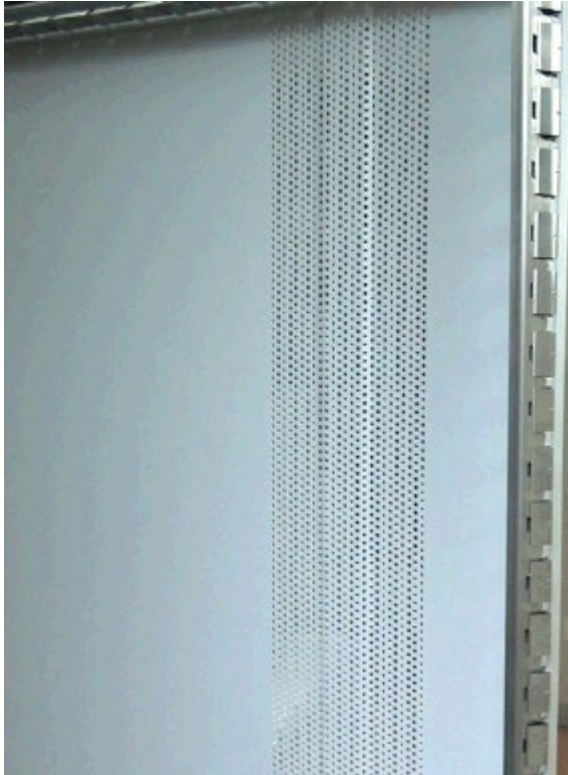
Les parasurtenseurs : les produits

- Ces produits se rencontrent sous forme de :
 - Diode, type tranzorb.
 - Varistances .
 - Eclateurs à gaz.
 - Thyristors, triacs.
- Les performances de ces produits sont variables et le choix de l'un ou l'autre type dépend du niveau des perturbations dont on souhaite se protéger.
- Les filtres passe-bas ne sont pas des parasurtenseurs.



Désignation	S1-C150	SIOV-S20 K25
Courant de choc dérivé jusqu'à	50 kA	2 kA
Temps de réponse	500 ns ¹⁾	<25 ns

Les blindages



On parle d'**efficacité** d'un blindage

Les blindages : utilisation

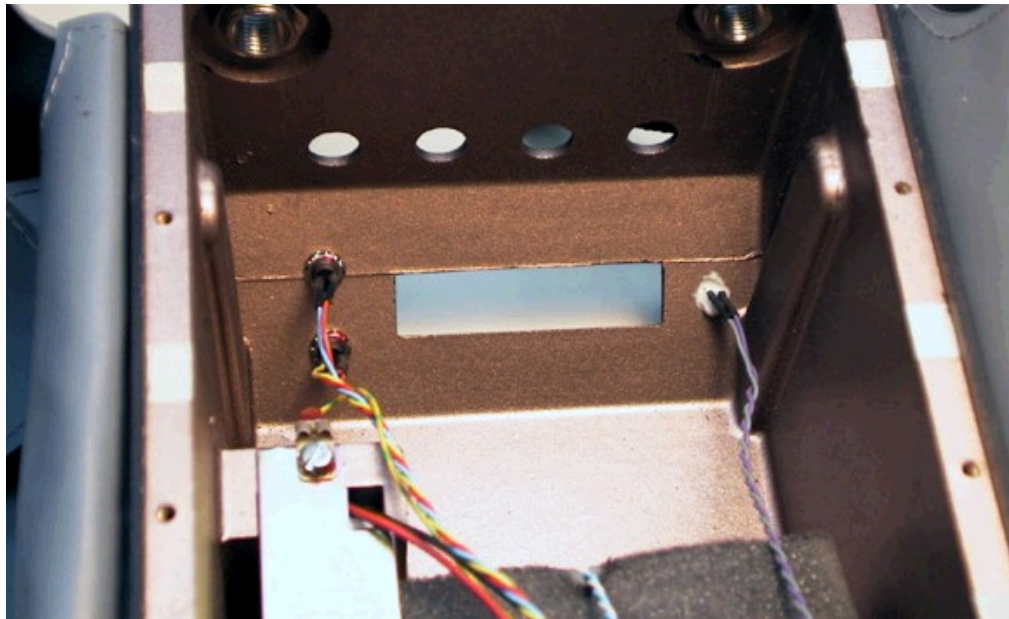
- L'efficacité d'un blindage est limitée par le nombre d'ouvertures.
- Les fentes sont plus rayonnantes qu'un alignement de trous.
- On préfère les matériaux à perméabilité magnétique élevée pour blinder les champs magnétiques en BF.
- Attention aux entrées-sorties de câbles

Les blindages : les produits

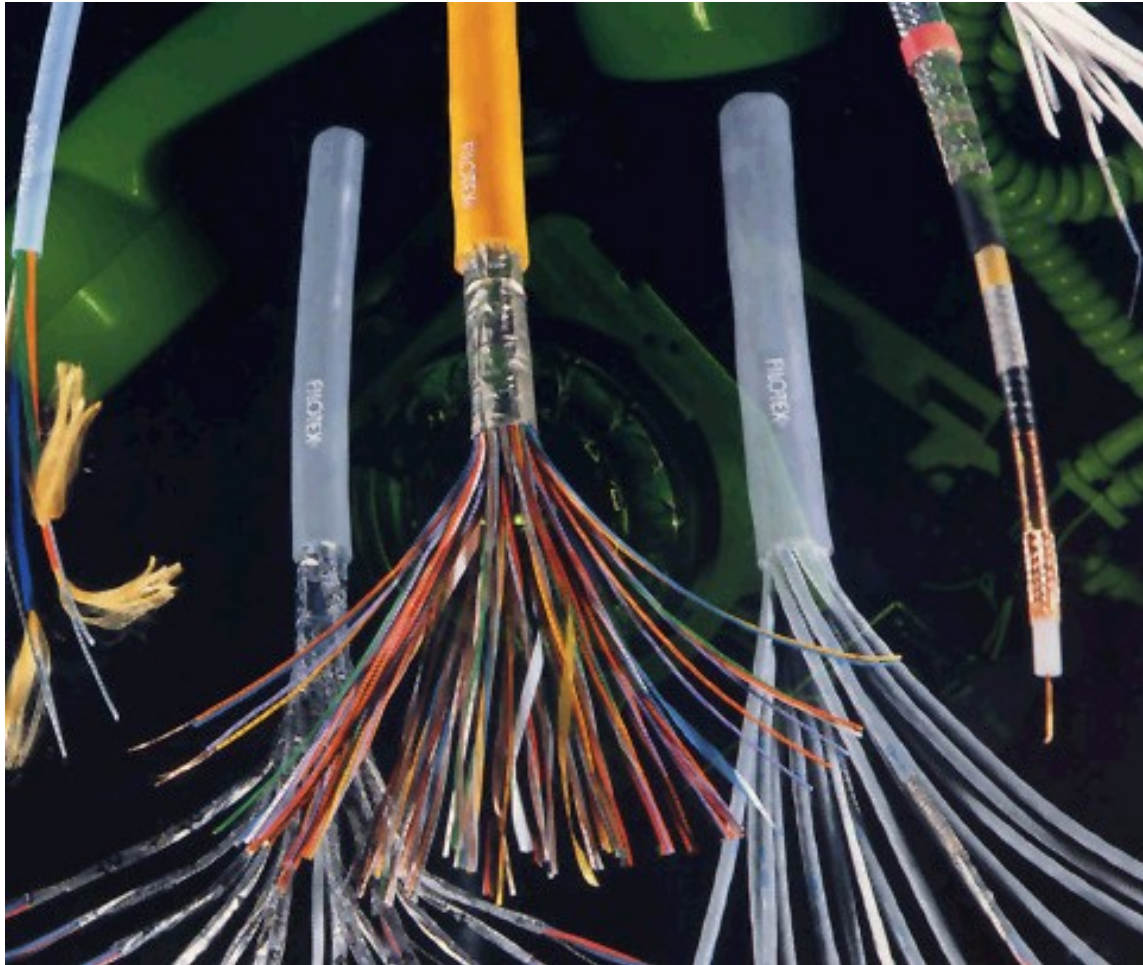
- Les boîtiers en acier, cuivre, aluminium, etc..., blindent parfaitement les champs HF.
- Les matériaux à μ élevé (mumétal, permalloy) sont à utiliser en BF pour se protéger des champs magnétiques.
- Les métallisations (peinture, vernis, poudre) sont utilisables en HF.

Les blindages : les produits

- Dépôt conducteur sur support polyuréthane



Les câbles blindés



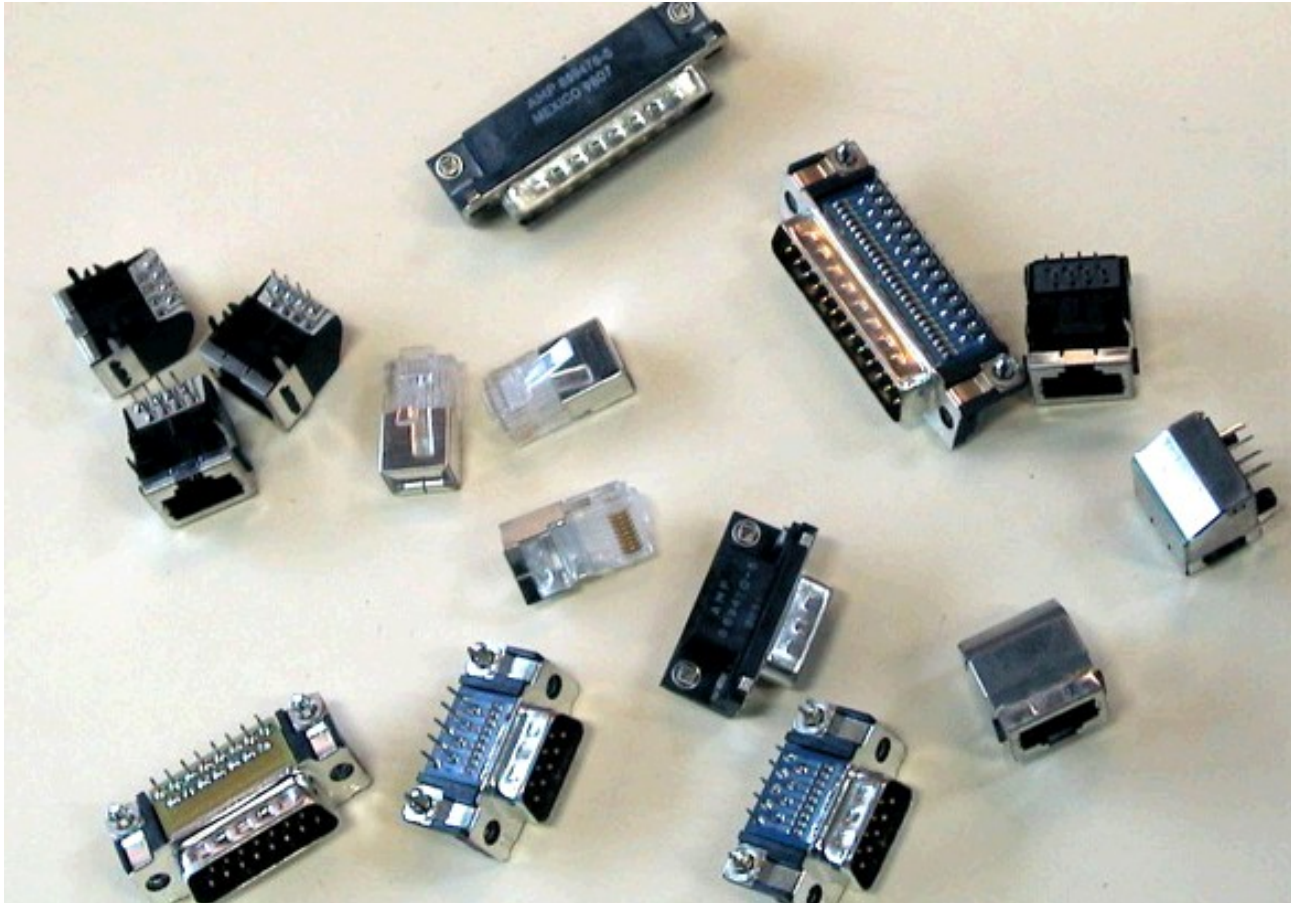
Les câbles blindés : mise en oeuvre

- Le blindage d'un câble doit être relié des deux côtés.
- Les câbles coaxiaux sont moins performants pour la réjection du mode commun en BF que les paires symétriques ou blindées.

Les câbles blindés : mise en oeuvre

- Le raccordement unilatéral doit rester exceptionnel et uniquement si les conditions suivantes sont toutes réunies :
 - Les signaux à transmettre ne dépassent pas quelques KHz.
 - Les signaux à transmettre sont à bas niveau (bruit tolérable pour une paire blindée en BF inférieur au millivolt).
 - Existence en BF d'une tension en MC entre les extrémités du câble supérieur au bruit tolérable multiplié par le CMRR de la liaison.
 - La transmission s'effectue en tension .
 - L'écran incriminé est celui immédiatement autour des conducteurs et non un surblindage isolé.
- Si une seule de ces cinq conditions n'est pas satisfaite, relier l'écran des deux côtés.

Les connecteurs



Les connecteurs : les produits

- Il existe différents types de protection pour les connecteurs :
 - Connecteur blindé avec reprise de masse périphérique.
 - Connecteur filtré :
 - Filtrage capacitif
 - Filtrage inductif

Les connecteurs : mise en oeuvre

- Les connecteurs filtrés inductifs ne nécessitent pas de précaution particulière, si ce n'est au niveau du routage des pistes (CAO).
- Les connecteurs filtrés capacitifs nécessitent une reprise périphérique de la masse au niveau du châssis ainsi qu'un plan de masse sur les circuits imprimés.
- Les connecteurs blindés nécessitent une reprise périphérique sur le châssis.

Les joints



Les joints : les produits

- Il existe différents types de joints :
 - Les tricots conducteurs.
 - Les textiles conducteurs.
 - Les élastomères chargés de poudres ou de fibres métalliques.
 - Les ressorts de contact.

Les joints : le but

- Assurer la continuité électrique entre deux tôles
- et donc :
 - Compenser les irrégularités mécaniques.
 - Résister à l'usure, la pollution, les vibrations,
...
- Doit rester simple à installer.

La CEM : conclusion

- Une carte ou un système électronique bien conçu, bien câblé, respectera toujours les obligations en matière de CEM
- La pollution électromagnétique ne faisant qu'augmenter, la prise en compte de la CEM à la conception d'un système électronique est essentielle
- Penser également aux autres obligations : produits « RoHS » (sans plomb), recyclable (DEEE), faible consommation, ...
- Bon courage !