COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE DE TOUS LES JOURS.

Qu’est-ce que la CEM ? 1
Quelques notions d'électricité 2
Un courant ou une tension ? 2
La notion de terre 4
L'équipotentialité de la terre 4
Quelques exemples 5
Moralité 5
Le phénomène électrostatique 6
Force entre 2 corps chargés 7
Exemples 8
La charge d'une personne 8
L'avion 10
La voiture 10
L'onde électromagnétique 11
Courant et champ magnétique 11
Tension et champ électrique 14
L'onde électromagnétique 16
Les effets du champ électromagnétique 17
Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique 19
Mode de propagation des signaux 22
Le mode différentiel 22
Le mode commun 22
Les fameuses boucles de masse 24
Pourquoi une boucle de masse peut être gênante ? 25
Toutes les boucles sont-elles gênantes ? 27
Le câblage des masses en étoile 28
Les blindages 30
Ce qu’il faut savoir 30
Comment se raccorder ? 31
Les structures métalliques 31
Châssis et cartes 32
Filtres et connecteurs 33
Notions de filtrage 35
Conclusion 38
Références 40

1. QU’EST-CE QUE LA CEM ?

" La CEM, Compatibilité ElectroMagnétique, recouvre tous les aspects de la pollution électromagnétique dans son environnement, la sécurité des personnes et des biens "

En d'autres termes :

- ☛ *Toutes les perturbations d'ordre électrique qui peuvent être dommageables.*

Depuis le 1 Janvier 1996 la directive 89/336/CEE s'applique à tout matériel électrique/électronique commercialisé. Tout matériel conforme affiche le marquage " CE ".

- ☛ *C'est donc une obligation de ne pas polluer et de ne pas être pollué.*

2. QUELQUES NOTIONS D'ÉLECTRICITÉ

2.1 Un courant ou une tension ?

C'est aussi un problème de vocabulaire :
Les prises de *courant* de votre résidence délivrent évidement une tension (220 Volts). Quand on dit : " branchons la prise de courant et fermons l'interrupteur pour établir la tension " en fait, nous faisons exactement le contraire : On branche la tension et on ferme l'interrupteur pour que le courant puisse circuler !.

Pour se représenter les notions de courant et de tension, on peut faire appel à l'analogie hydraulique (figure 2.1 et figure 2.2).

Le déplacement du liquide représente le *courant* alors que la hauteur H représente la *différence de potentiel ou la tension*.

☛ *Le Volt et l'Ampère sont les unités de mesure de la tension et du courant*

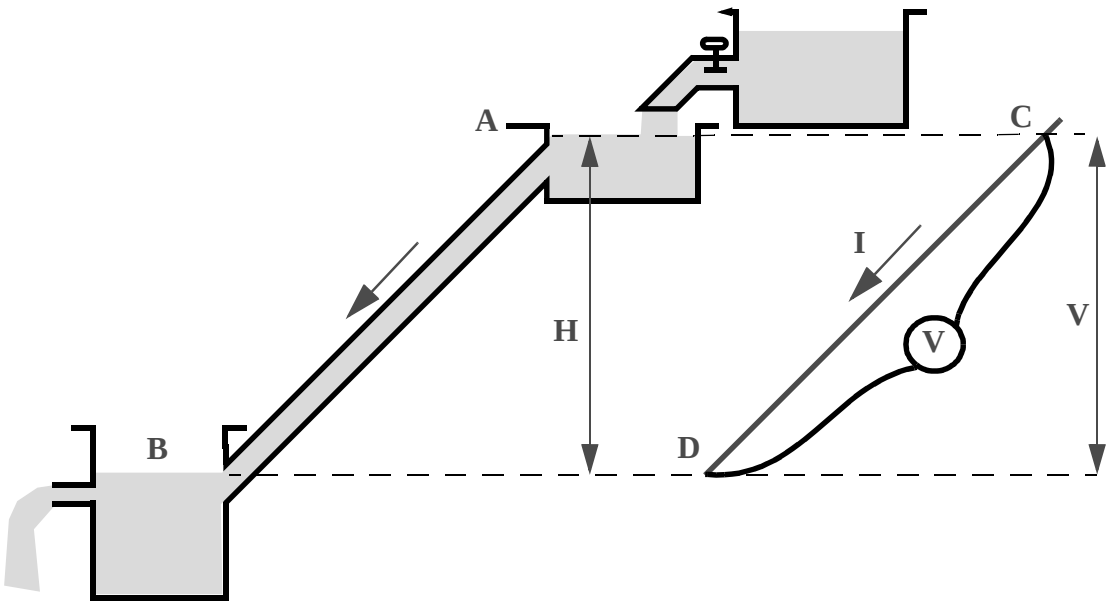

Figure 2.1 : Différence de potentiel / analogie hydrolique

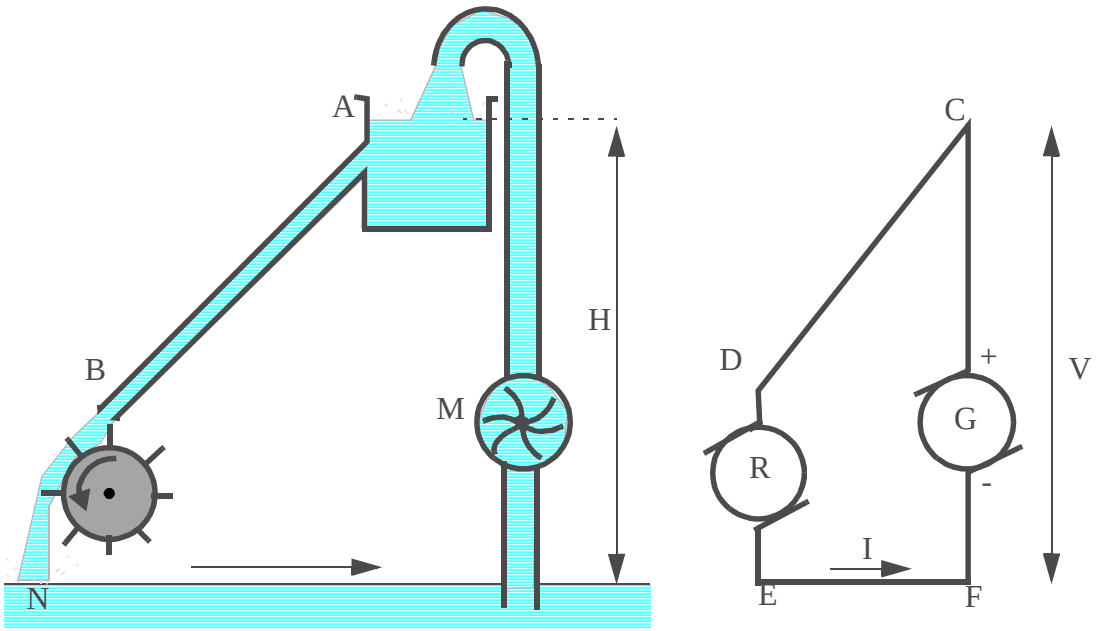

Figure 2.2 : Générateur et récepteur / analogie hydrolique

3. LA NOTION DE TERRE

Dans chaque installation électrique qui se respecte il y a une terre. C'est le troisième fil de la prise de courant de couleur vert et jaune (normalisé).
Tous les fils de terre sont reliés à un pieu enfoui physiquement dans le sol.

On peut se poser les questions suivantes :

- A quoi sert la terre ?
- Pourquoi certains appareils ont une prise de terre (appareils de classe I) ou n'ont pas de prise de terre (appareils de classe II) ?

Réponse : La sécurité des personnes.

3.1 L'équipotentialité de la terre

La notion de terre est relativement ambiguë. Elle laisse supposer que tous les points de la terre sont équipotentiels (c'est à dire qu'ils sont à la même référence 0 volt). En fait, il n'en est rien : la composition du sol n'est pas homogène, " c'est un complexe électrochimique mal connu, mal défini ".

Par exemple, lors d'un choc de foudre dans un champ, un mouton peut être tué même s'il se trouve à plusieurs centaines de mètres de l'impact. La différence de potentiel entre ses pattes de devant et celles de derrière peut être suffisante pour l'électrocuter !

☛ *2 points de terre séparés ne sont pas équipotentiels*

☛ *La terre est un symbole électrique théorique*

3.2 Quelques exemples

Question : Pourquoi les tondeuses électriques ne sont pas reliées à la terre ?

Réponse : Pour éviter des accidents tous les dimanches.
Le potentiel de terre ramené par un très long fil secteur peut être très différent de celui où se trouve la tondeuse !

Question : Pourquoi dans votre salle de bain les appareils sont généralement de classe II (double isolation sans prise de terre, par exemple les appareils de chauffage, sèche cheveux, etc.) ?

Réponse : Dans ce type de locaux, il est souvent possible de toucher à la fois l'appareil et la canalisation d'eau. Dans ce cas, le potentiel de terre ramené par la canalisation peut être différent de celui de la terre secteur !

Question : Dans ma salle de bain j'ai une machine à laver qui est reliée avec une prise de terre. Dois-je supprimer cette terre ?

Réponse : Non, votre machine n'est pas de classe II double isolation. Par contre, il est conseillé de relier la carcasse métallique (en enlevant la peinture isolante) à la tuyauterie d'eau. Une tresse métallique fera très bien l'affaire. Vous pourrez alors toucher simultanément votre machine et la tuyauterie sans aucun risque.

3.3 Moralité

☛ *Dans un souci de sécurité, il faut toujours rechercher l'équipotentialité*

4. LE PHÉNOMÈNE ÉLECTROSTATIQUE

Ce phénomène semble connu depuis 2500 ans. Le mot *électron* vient du grec (ambre) et statique vient du latin (immobile).
Thalès (un fameux grec) observa qu'un morceau d'ambre attirait de fines particules s'il était frotté avec une étoffe. L'expérience peut facilement être réalisé en frottant une règle en plastique avec une chiffon sec (figure 4.1).

> ☛ *Un matériau neutre (électriquement) possède la même quantité d'électricité positive et négative.*

Lorsque le chiffon frotte la règle, les charges négatives (électrons) de cette dernière passent sur le chiffon. La règle possède donc un excès de charges positives.

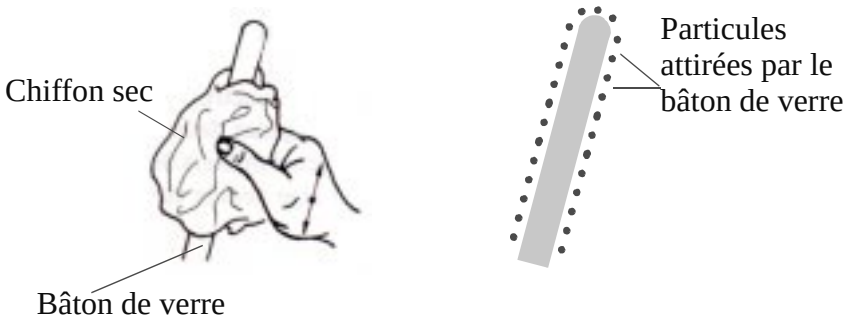

Figure 4.1 : Bâton de verre frotté avec un chiffon sec

4.1 Force entre 2 corps chargés

Il est possible de trouver des corps chargés positivement (moins d'électrons que de charges positives) et des corps chargés négativement (plus d'électrons que de charges positives).
Une sphère suspendue chargée négativement sera attirée par le bâton de verre chargé positivement. De même, une sphère chargée positivement sera repoussée par le même bâton de verre (figure 4.2).

☛ *Deux charges de signe opposé s'attirent*

☛ *Deux charges de même signe se repoussent*

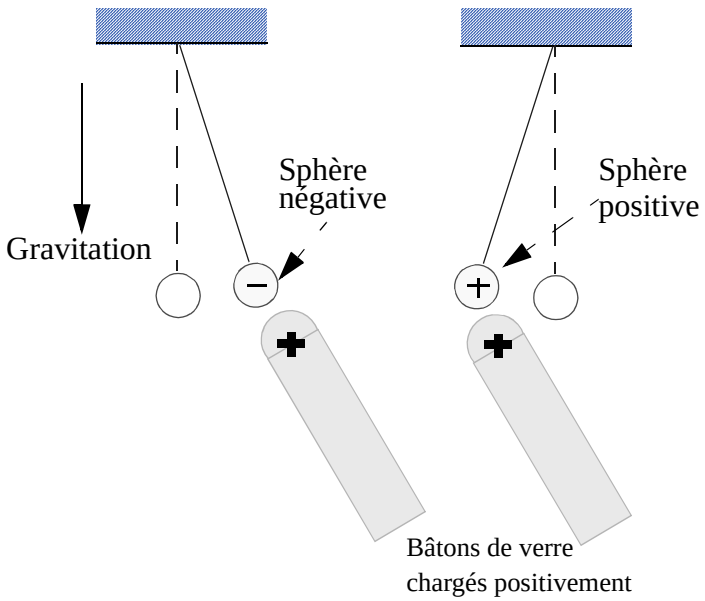

Figure 4.2 : Forces entre des corps chargés

4.2 Exemples

La charge d'une personne

Quand nous marchons sur un sol isolant (une moquette par exemple) avec des chaussures, il se produit généralement un certain désagrément lorsque l'on touche un objet métallique relié au sol.
En marchant, nos semelles arrachent du sol des électrons et se chargent négativement (figure 4.3). A chaque pas, la tension de notre corps par rapport au sol augmente et peut atteindre plusieurs milliers de volts (kV). Entre les pas, il se produit une décharge et au bout de quelques dizaines de secondes, la décharge équilibre la charge (heureusement). Le graphe suivant représente cette évolution (figure 4.4).
Si l'on touche un corps conducteur relié à la terre, il se produit une décharge brutale du corps au travers la terre avec les désagréments que l'on connaît (figure 4.5 et figure 4.6).

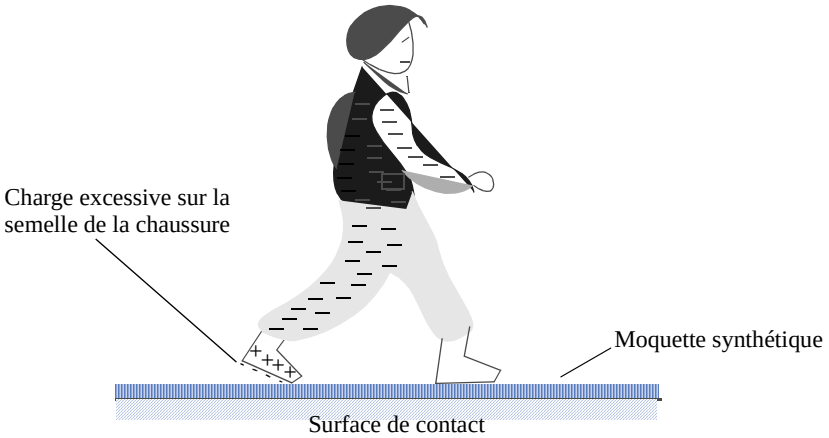

Figure 4.3 : Charge d'une personne

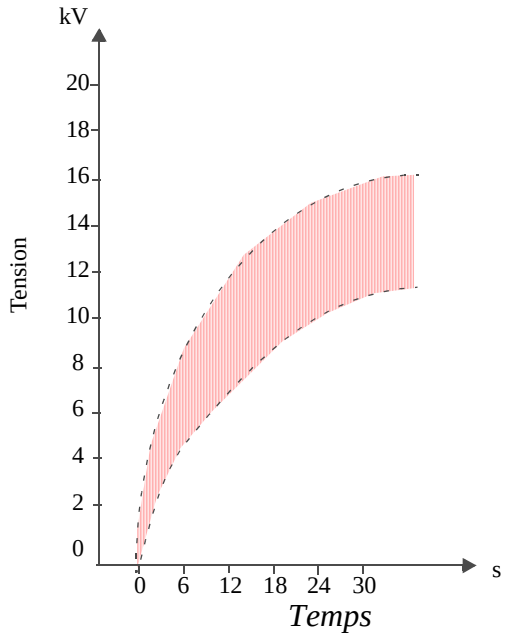

Figure 4.4 : Graphique d'évolution de la tension

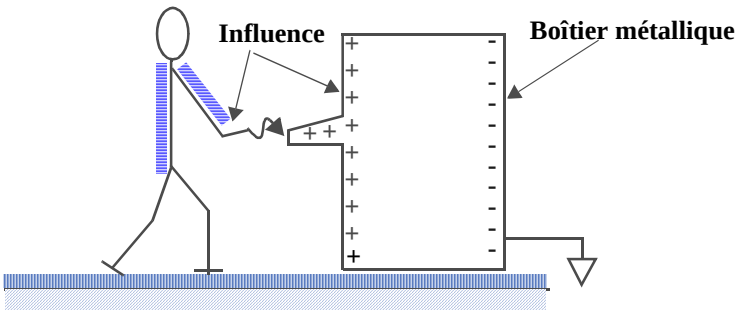

Figure 4.5 : Décharge brutale

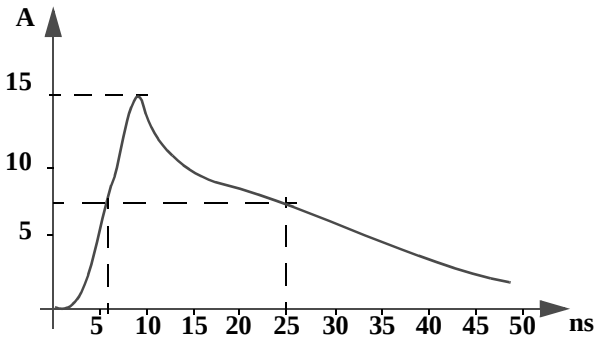

Figure 4.6 : L'impulsion de courant d'une décharge

L’avion

Un avion en vol se charge considérablement. Dès que l'avion est à l'arrêt, on fait le plein de kérosène. Si aucune précaution n'était prise, il y aurait une décharge électrostatique entre l'avion et le kérosène du camion citerne avec une explosion à la clé !
Pour éviter ce type de problème, on assure en premier lieu l'équipotentialité de l'avion et du camion par un câble courant le long du tuyau.

La voiture

Par temps sec, il est fréquent que l'on prenne une décharge électrique en descendant de voiture.
La charge électrostatique est obtenue par le frottement de nos vêtements sur les sièges en synthétique. On peut limiter l'effet désagréable en procédant de la manière suivante : ouvrir la portière, tenir le haut de la portière avec une main, puis mettre ensuite les pieds à terre.

5. L'ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

5.1 Courant et champ magnétique

Réalisons l'expérience suivante : Au dessus d'un fil parcouru par un courant I, plaçons une boussole (figure 5.1a). L'aiguille de la boussole se tourne perpendiculairement au fil. De même, une bobine parcourue par un courant est équivalente à un aimant et s'oriente perpendiculairement au fil (figure 5.1b).

☛ *Un courant I parcourant un conducteur engendre un champ magnétique H exprimé en A/m*

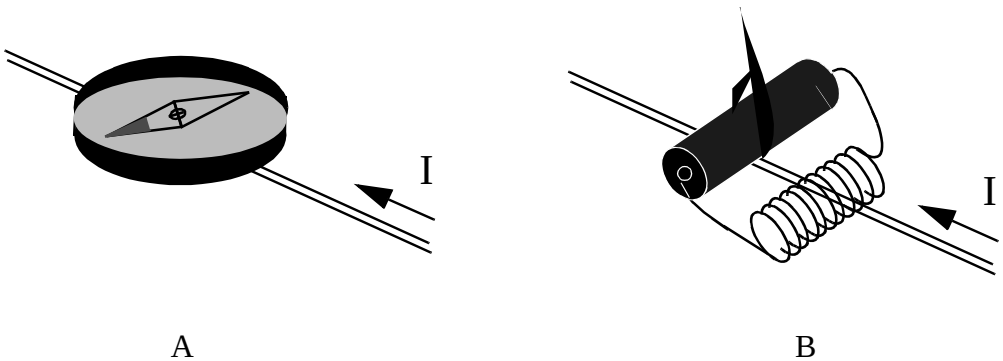

Figure 5.1 : Courant et champ magnétique

Si l'on plaçait des petites aiguilles aimantées tout autour du fil, on aurait un ensemble de cercles représentant le champ magnétique (figure 5.2).

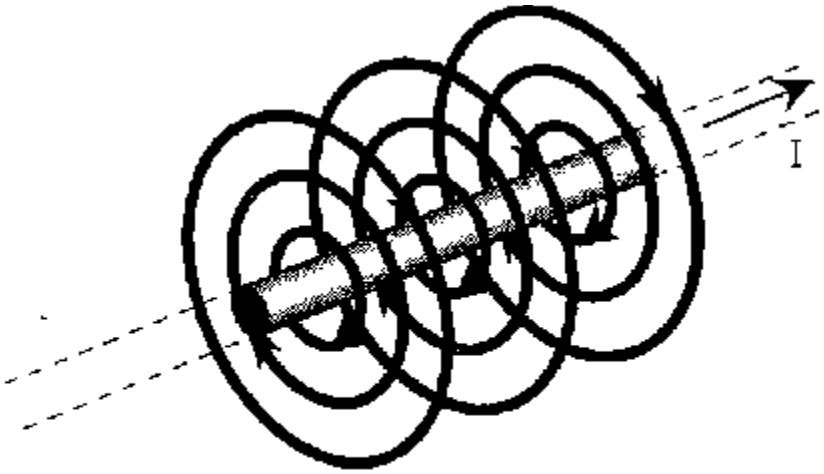

Figure 5.2 : Champ magnétique autour d'un fil rectiligne traversé par un courant

De même, considérons un fil électrique parcouru par un courant *I* et placé parallèlement à un tube cathodique. Le champ magnétique engendré par le courant *I* va dévier le faisceau d'électrons (figure 5.3). Ceci est équivalent à placer un aimant perpendiculairement au tube cathodique.

☛ *Un champ magnétique dévie un faisceau d'électrons*

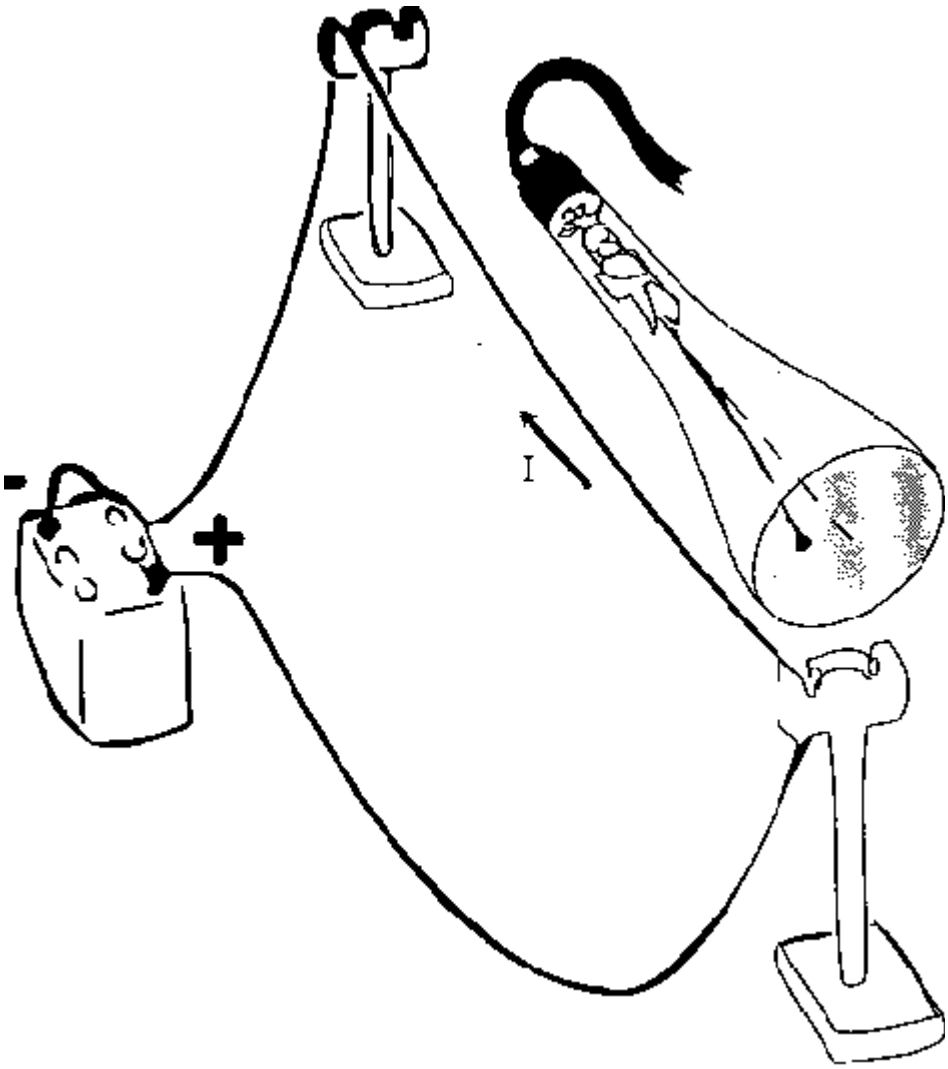

Figure 5.3 : Le champ magnétique engendré dévie le faisceau d'électrons

5.2 Tension et champ électrique

Deux charges de signe contraire s'attirent (voir l'expérience électrostatique du bâton de verre). Il existe donc une force capable d'attirer une charge élémentaire.

☛ *On appelle champs de forces électriques ou champs électriques les régions de l'espace où une charge électrique se trouve soumise à une force électrique*

Le long d'une ligne de champ, l'intensité du champ augmente dans les zones où les lignes se resserrent et diminue lorsque les lignes s'écartent.

☛ *L'intensité du champ électrique varie avec la distance. Elle est exprimé en V/m*

Les figures suivantes montrent l'allure du champ magnétique dans le cas d'une charge ponctuelle (figure 5.4), de deux charges ponctuelles égales et de signe contraire (figure 5.5). La figure 5.6 montre le champ électrique entre deux plaques parallèles conductrices portées à un certain potentiel.

☛ *Une tension sur un conducteur engendre un champ électrique*

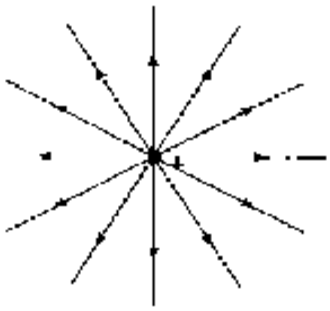

Figure 5.4 : Lignes de champ créées par une charge ponctuelle

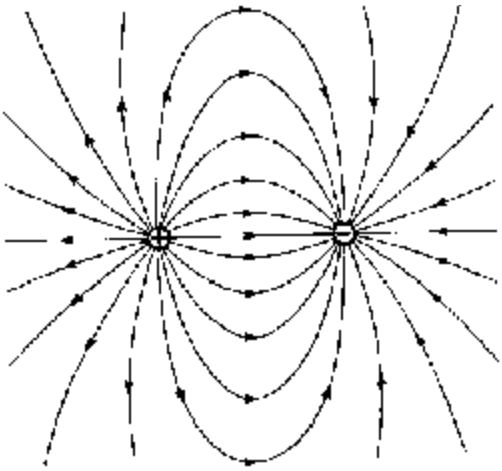

Figure 5.5 : Lignes de champ créées par deux charges ponctuelles

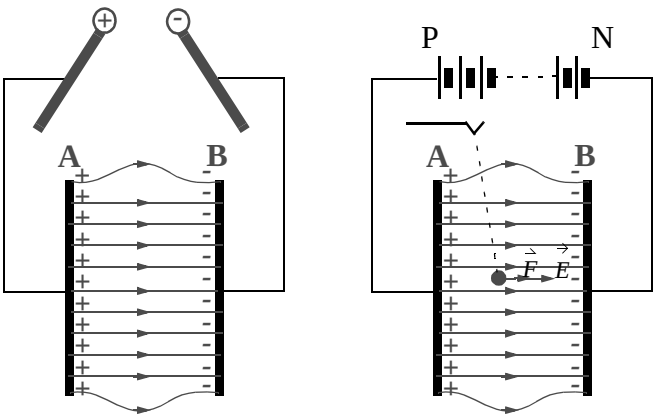

Figure 5.6 : Lignes de champ électrique entre 2 plaques polarisées

5.3 L'onde électromagnétique

Nous avons vu qu'un conducteur :
- Parcouru par un courant *I* engendrait un champ magnétique.
- Porté à un potentiel *V* engendrait un champ électrique.

Ces deux effets conjugués forment le *champ électromagnétique*. La figure 5.7 illustre un tel phénomène.

D'une manière générale, à un signal électrique, qui est l'évolution au cours du temps d'un courant et d'une tension, est associé une onde électromagnétique.

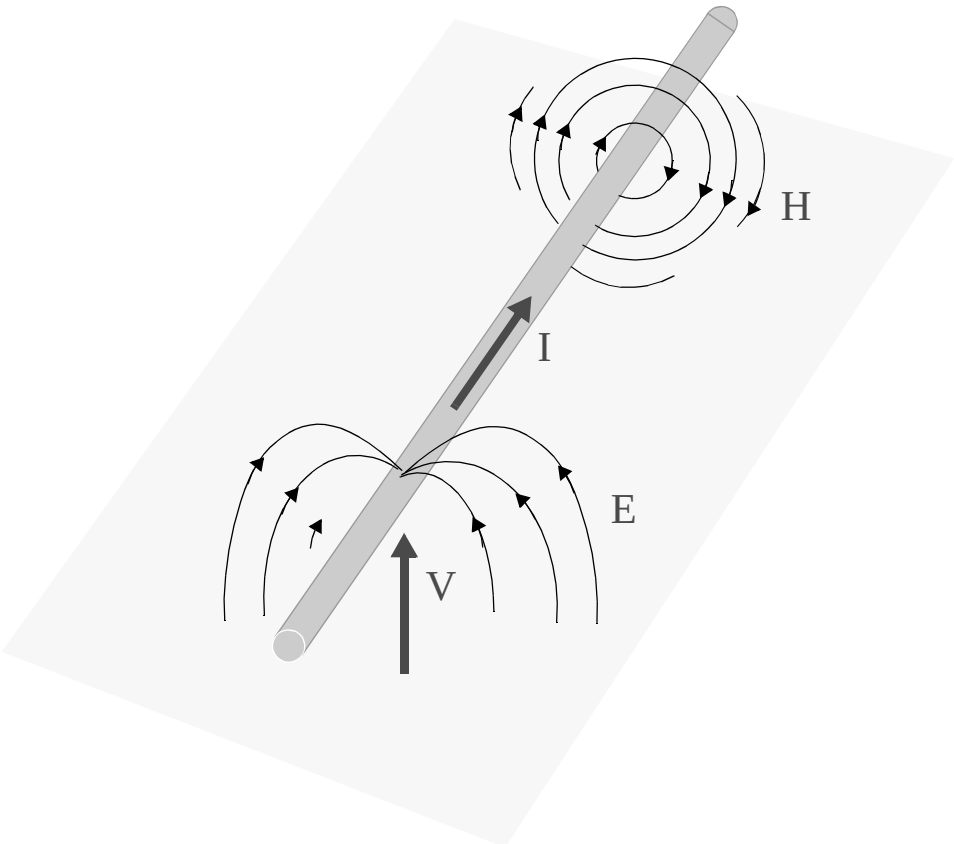

Figure 5.7 : Champ électromagnétique

5.4 Les effets du champ électromagnétique

Le champ électromagnétique est composé d'un champ magnétique et d'un champ électrique. Ces deux champs sont toujours présents simultanément sauf dans des cas particuliers (aimant, condensateur chargé, etc.).
Selon les cas, la source pourra être à prédominance électrique ou magnétique.

- ☛ *L'effet du champ électrique est d'induire un courant sur les fils parallèles aux lignes de champ*

- ☛ *L'effet du champ magnétique est d'induire une tension dans les boucles perpendiculaires aux lignes de champ. La tension induite est proportionnelle à la surface de la boucle*

Ces 2 effets sont fondamentaux en *CEM*, leur connaissance permet de mieux s'en protéger. La figure 5.8 et la figure 5.9 illustrent ces deux effets.

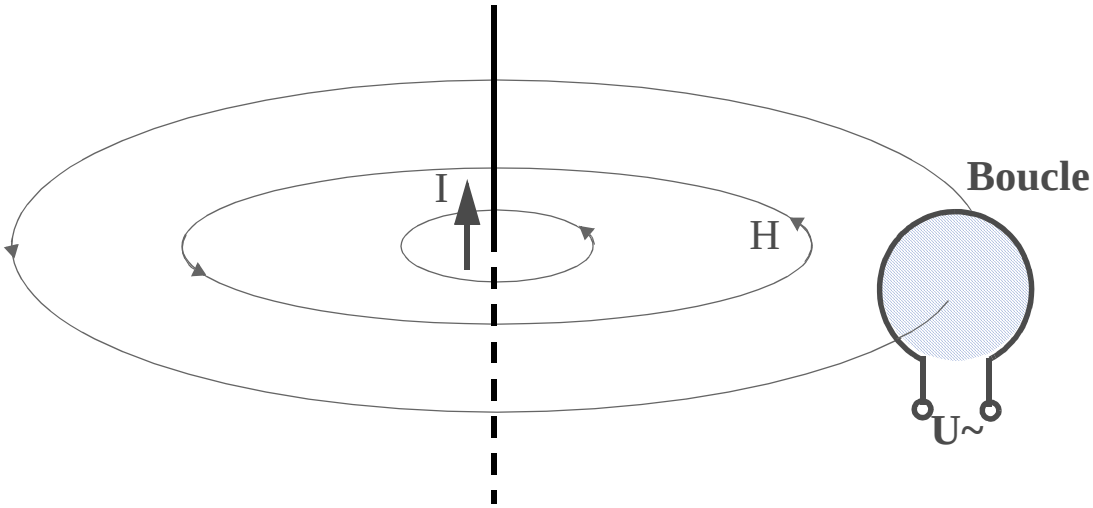

Figure 5.8 : Effet d'un champ magnétique H sur une boucle

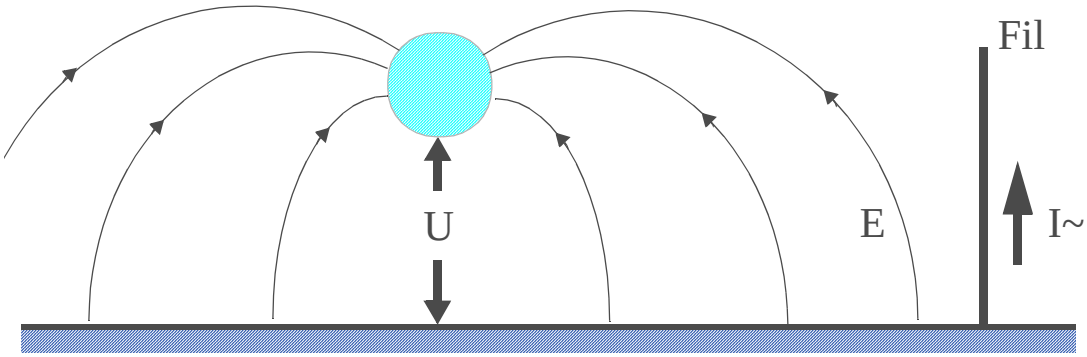

Figure 5.9 : Effet d'un champ électrique sur un fil

5.5 Pour aller un peu plus loin avec le champ électromagnétique

Comme son nom l'indique, le champ électromagnétique est constitué d'une composante électrique et d'une composante magnétique. En *CEM*, il est nécessaire de pouvoir considérer ces deux composantes indépendamment l'une de l'autre. Une protection contre le champ magnétique sera différente d'une protection contre le champ électrique.

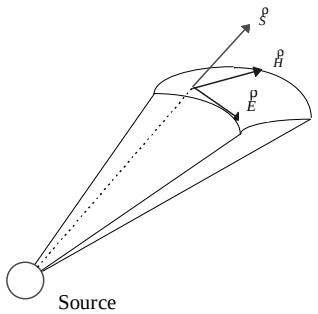

Figure 5.10 Structure du champ électromagnétique

La figure 5.10 montre la structure d'un champ électromagnétique dans l'espace. À une distance supérieure à $\frac{\lambda}{2\pi}$ de la source (λ est la longueur d'onde de la source), le champ est dit «éloigné» ou encore en «espace libre». Dans ce cas les composantes électrique et magnétique sont perpendiculaires et le plan engendré est normal à la direction de propagation des ondes. Le vecteur $\vec{S}$ définit la direction de propagation, c'est le vecteur de *Pointing* :

$$\boxed{\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}} \qquad \text{Equ(5.1)}$$

avec :
E en *V/m*
H en *A/m*
S en W/m^2

En espace libre ($l > \frac{\lambda}{2\pi}$), le champ magnétique est proportionnel au champ électrique : les deux champs sont couplés.

Le rapport *E*/*H* est homogène à une impédance et s'exprime en ohms. C'est l'impédance de l'onde en espace libre :

$$\boxed{Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 377\Omega}$$

ε est la *permittivité électrique* $\left(\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \qquad \frac{A \cdot s}{V \cdot m} = F \cdot m^{-1}\right)$, dans l'air $\varepsilon_0 = 8,85 pF/m$.

μ est la *perméabilité magnétique* et $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H \cdot m^{-1})$

En espace libre, la connaissance du champ électrique permet de connaître simplement le champ magnétique.

A très grande distance de la source d'émission, la surface d'onde peut être assimilée, dans une région limitée, à un plan tangent. Dans ce cas, on peut parler *d'onde plane*.

Si la source est une antenne de dimension importante ($D > \frac{\lambda}{4}$), le champ varie peu dans la direction privilégiée d'émission du lobe principal. Il faut alors se trouver à une distance $l > \frac{2D^2}{\lambda}$.

La figure 5.11 résume ces différents aspects.

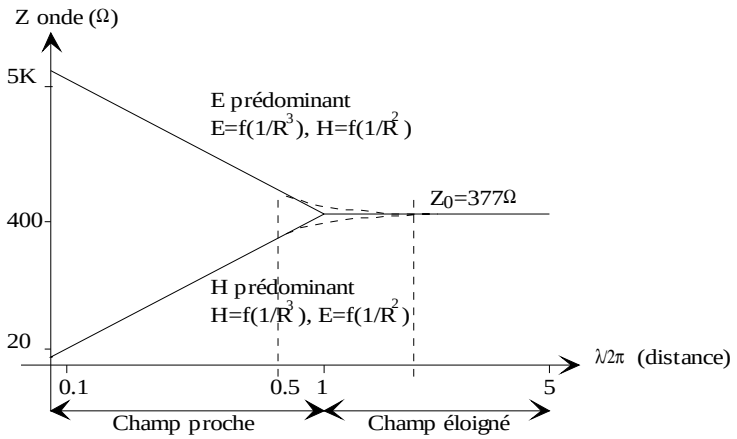

Figure 5.11 : Champ proche et champ éloigné

Dans la zone de champ proche, l'impédance de l'onde n'est pas constante. Si la source est de haute impédance (une antenne fouet par exem-

ple), de tension élevée et de courant faible, l'impédance de l'onde est élevée et le champ électrique est prédominant. E varie comme $1/r^3$ et H comme $1/r^2$.

Si la source est de faible impédance (une boucle par exemple), de tension faible et de courant élevé, l'impédance de l'onde est faible et le champ magnétique est prédominant. H varie comme $1/r^3$ et E comme $1/r^2$.

6. MODE DE PROPAGATION DES SIGNAUX

6.1 Le mode différentiel

Le mode différentiel est le mode idéal de transmission de l'information.

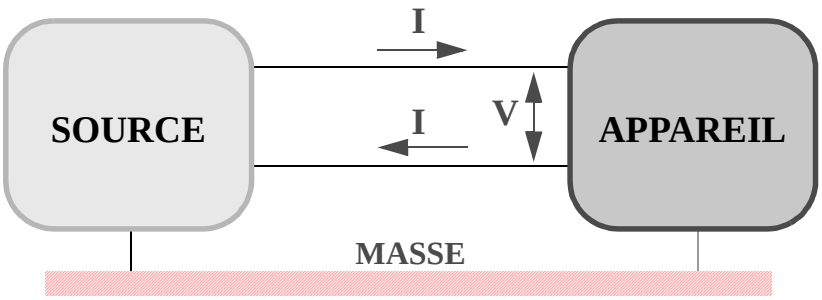

Figure 6.1: Transmission en mode différentiel

Dans ce mode tout le courant qui entre dans le récepteur revient vers la source par le fil de retour, différent de la masse. La différence de potentiel est mesurée entre les deux fils. Ce mode est très peu sensible aux perturbations. En effet, une perturbation externe sera reçue simultanément sur les deux fils, la mesure de tension différentielle supprime toute information commune aux deux fils.

☛ *Le mode différentiel est peu sensible aux perturbations*

6.2 Le mode commun

Le mode commun est un mode de propagation des parasites. Les signaux de mode commun se propagent dans le même sens sur tous les conducteurs. Les courants de mode commun reviennent par la masse ! (figure 6.2, figure 6.3, figure 6.4).

Si un conducteur perturbé entre dans l'équipement, il contaminera tous les autres conducteurs. Pour éviter cela, il est nécessaire que l'équipement ne soit pas isolé.

☛ *Pour éviter d'être perturbé par les courant de mode commun, il faut que l'équipement soit correctement relié à la masse*

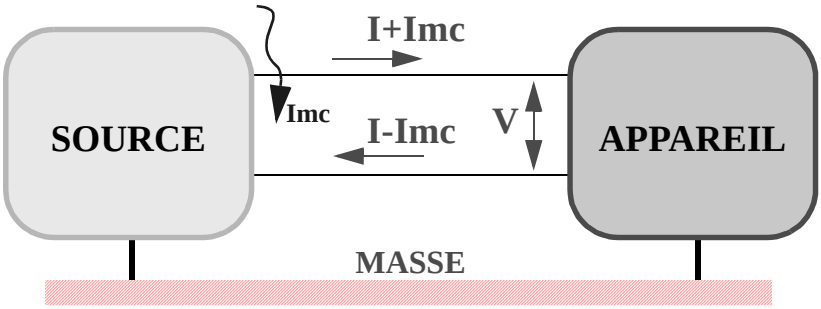

Figure 6.2 : Mode différentiel

Figure 6.3 : Dans un environnement équipotentiel les courants de mode commun sont écoulés dans la masse

Figure 6.4: Dans un environnement isolé l'équipement est très sensible aux courants de mode commun

7. LES FAMEUSES BOUCLES DE MASSE

Dès que l'on connecte deux appareils entre eux par un câble, on crée une boucle de masse. (figure 7.1).

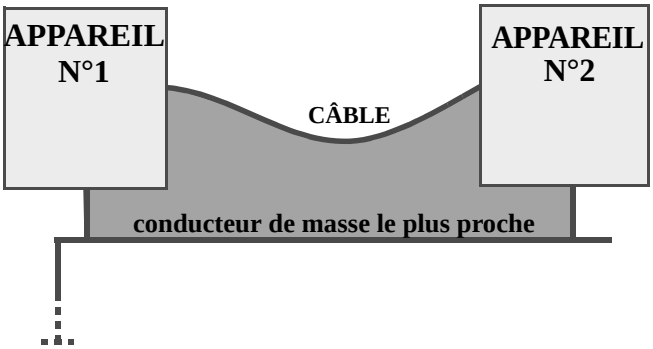

Figure 7.1: Schèma d'une boucle de masse

Question : Beaucoup de personnes font la chasse aux boucles de masse. Est-ce vraiment raisonnable ?
Réponse : non. (Sauf transmettre tous les signaux par des fibres optiques par exemple.)

7.1 Pourquoi une boucle de masse peut être gênante ?

Plusieurs effets peuvent se combiner :

- Une certaine impédance peut exister entre les masses de deux appareils distants. Tout courant dans cette impédance modifiera l'équipotentialité tant recherchée. Cela signifie que si l'on transmet le signal *V1*(*t*) par rapport à *GND1* on risque de recevoir le signal *V2*(*t*) par rapport à *GND2*.

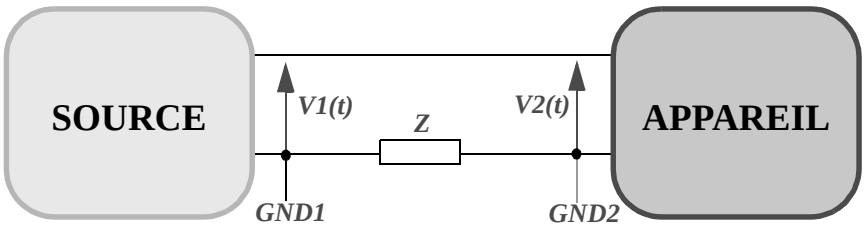

Figure 7.2 : Impédance commune entre 2 systèmes

- Un champ magnétique engendre une tension dans une boucle. Cette tension perturbatrice sera d'autant plus importante que la boucle sera grande. Cette tension perturbatrice va se superposer à la tension utile.

La figure 7.3 illustre ces deux effets.

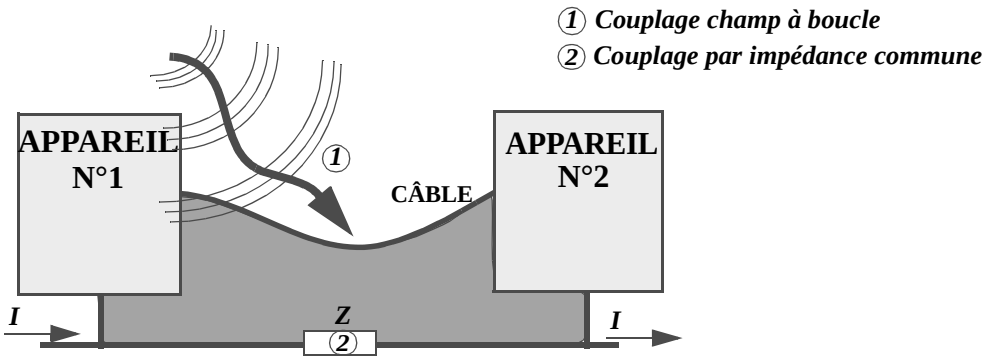

Figure 7.3 : Exemple de couplages sur une boucle de masse

7.2 Toutes les boucles sont-elles gênantes ?

Les boucles dans les boucles de masse ne sont pas gênantes, au contraire !

- Plus il y aura de câbles de masse entre les appareils et plus l'équipotentialité sera bonne.

Multiplier les boucles limite la surface de la boucle principale et par conséquent l'effet du champ magnétique (figure 7.4).

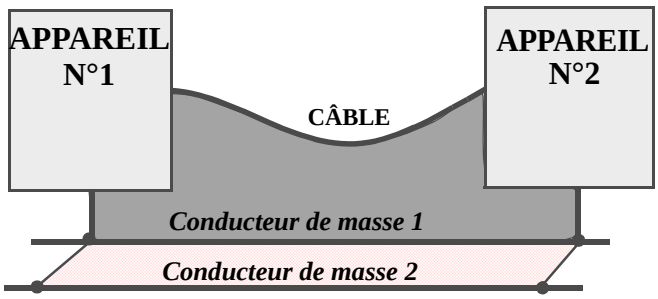

Figure 7.4 : Boucle entre les masses

7.3 Le câblage des masses en étoile

Souvent préconisé, le câblage des masses en étoile est dramatique dès que l'on n'est plus en basse fréquence. Son principal inconvénient est qu'il favorise les grandes boucles de masse (figure 7.5).

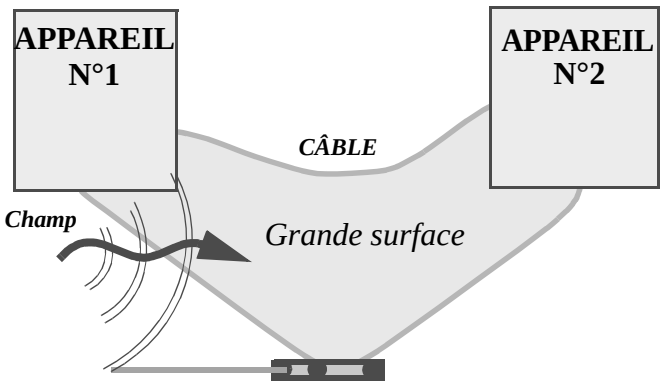

Figure 7.5 :Le câblage en étoile favorise les grandes boucles de masse

Dans tous les cas une liaison supplémentaire de masse (la plus courte possible) réduit l'impédance commune et est efficace contre les champs rayonnés (figure 7.6).

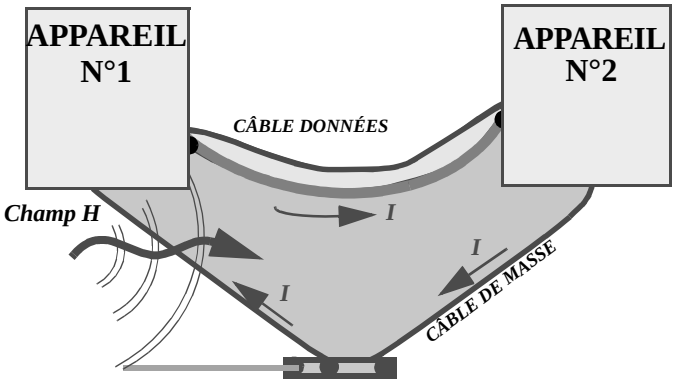

Figure 7.6 : Une liaison supplémentaire réduit l'impédance commune et limite la boucle principale

8. LES BLINDAGES

Un blindage permet de se protéger contre le champ électromagnétique.

8.1 Ce qu’il faut savoir

- Un champ électrique est réfléchi (comme la lumière sur un miroir) par une surface conductrice. L'épaisseur n'intervient pas : du papier aluminium ménager est aussi efficace qu'une plaque métallique très épaisse.

- Un champ magnétique sera absorbée par l'écran. L'épaisseur de la tôle intervient. L'épaisseur nécessaire sera d'autant plus grande que la fréquence de l'onde est petite.

- Le blindage doit être hermétique. Il faut éviter les trous et les fentes qui se comportent comme des antennes !

- Des courants peuvent circuler dans les blindages. Il faut impérativement qu'ils soient reliés, au plus court, à la masse de l'électronique (plutôt deux fois qu'une !).

9. COMMENT SE RACCORDER ?

Les grands principes de la *CEM* sont basés sur l'équipotentialité.

9.1 Les structures métalliques

Il faut pour cela utiliser toutes les structures métalliques disponibles : Trains de câbles, tuyaux conducteurs, poutrelles, etc. (figure 9.1).

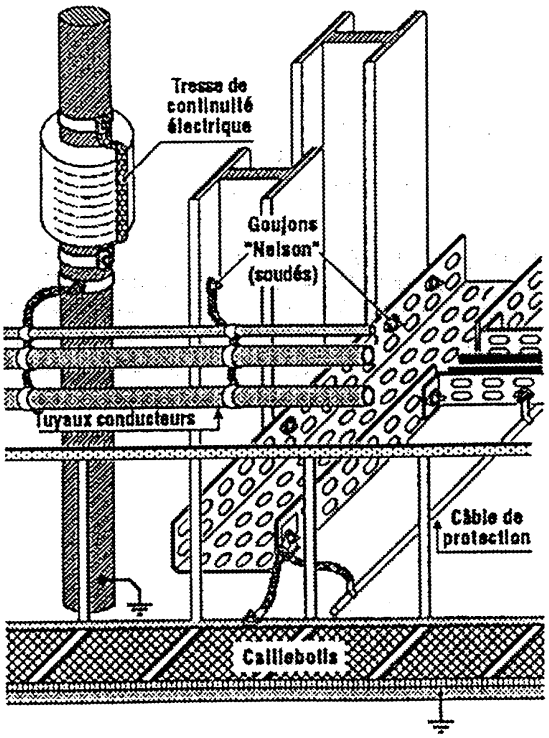

Figure 9.1 : Interconnexion de toutes les structures conductrices

9.2 Châssis et cartes

La figure 9.2 illustre ce type de raccordement.

- Le plan de masse de l'électronique doit être relié, au plus court, au châssis (Colonnettes par exemple.).

Les connecteurs doivent être fixés sur la face avant conductrice (Il faut gratter les peintures isolantes !).

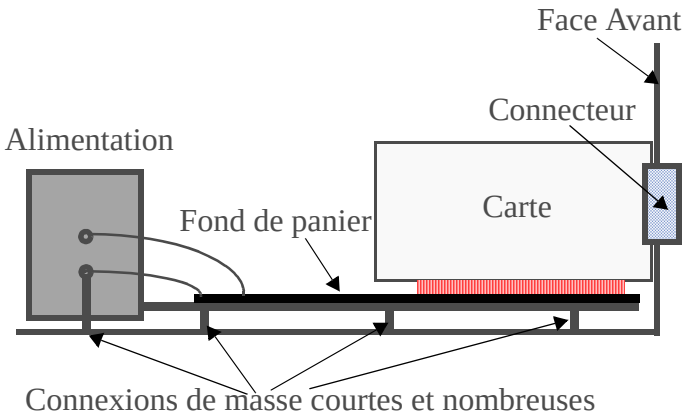

Figure 9.2 : Châssis et cartes

9.3 Filtres et connecteurs

Évitez d'entrer les câbles directement dans le châssis. Il faut passer par des filtres (figure 9.3) ou des connecteurs (figure 9.4).

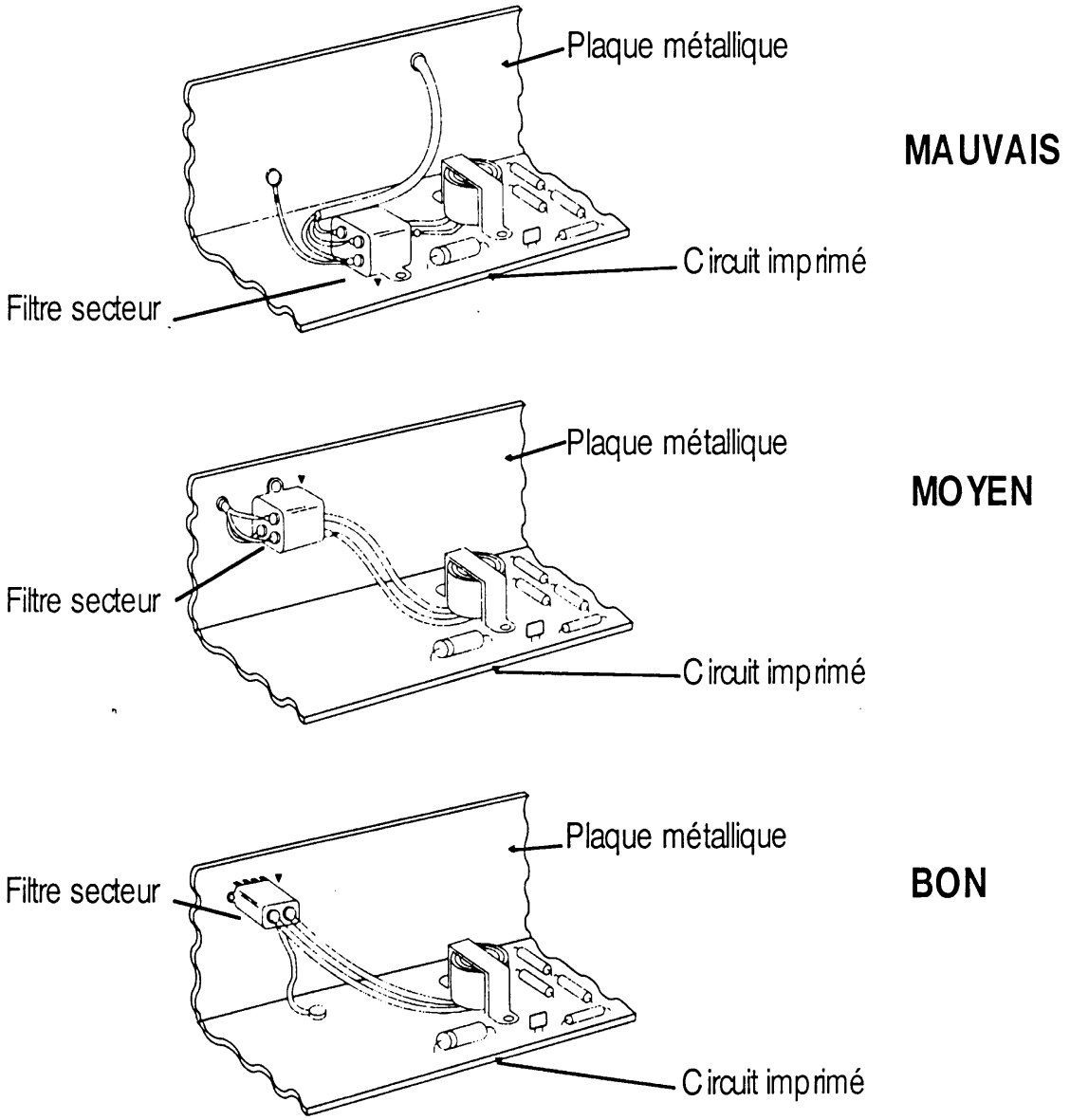

Figure 9.3 : Efficacité d'un filtre secteur

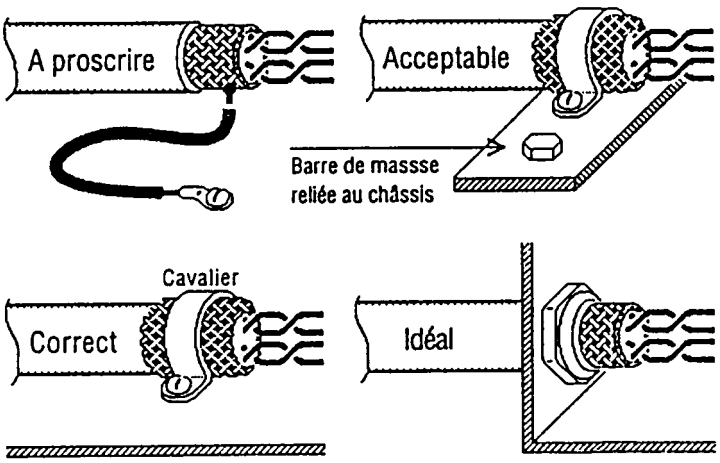

Figure 9.4 : Raccordement de connecteurs coaxiaux

10. NOTIONS DE FILTRAGE

Les Principaux filtres utilisés en physique nucléaire et en physique des particules sont les filtres passe-bas et les filtres passe-hauts(figure 10.1).

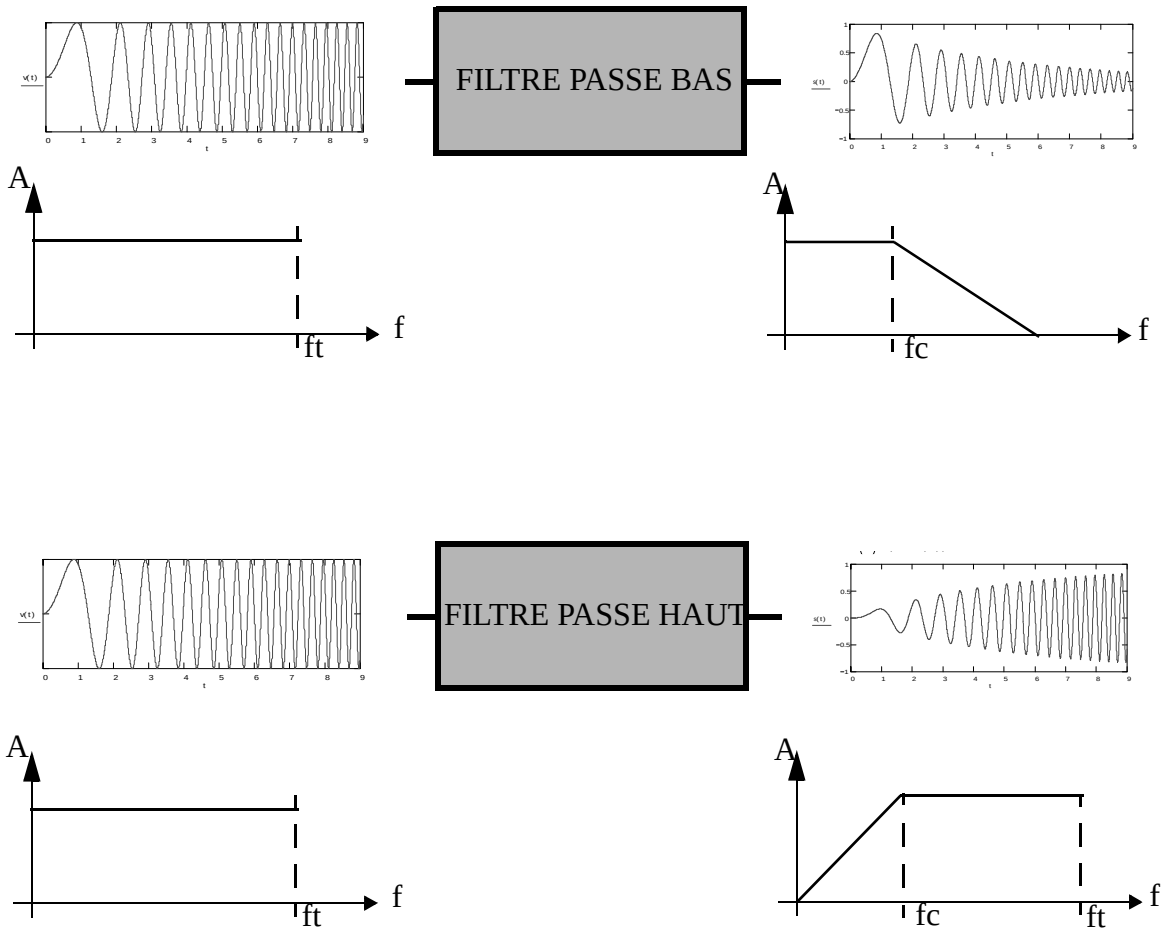

Figure 10.1: Filtres passe bas et passe haut

Lorsqu'un signal est entaché de bruit le filtrage permet de limiter le bruit présent... en limitant la bande passante du système (figure 10.2).

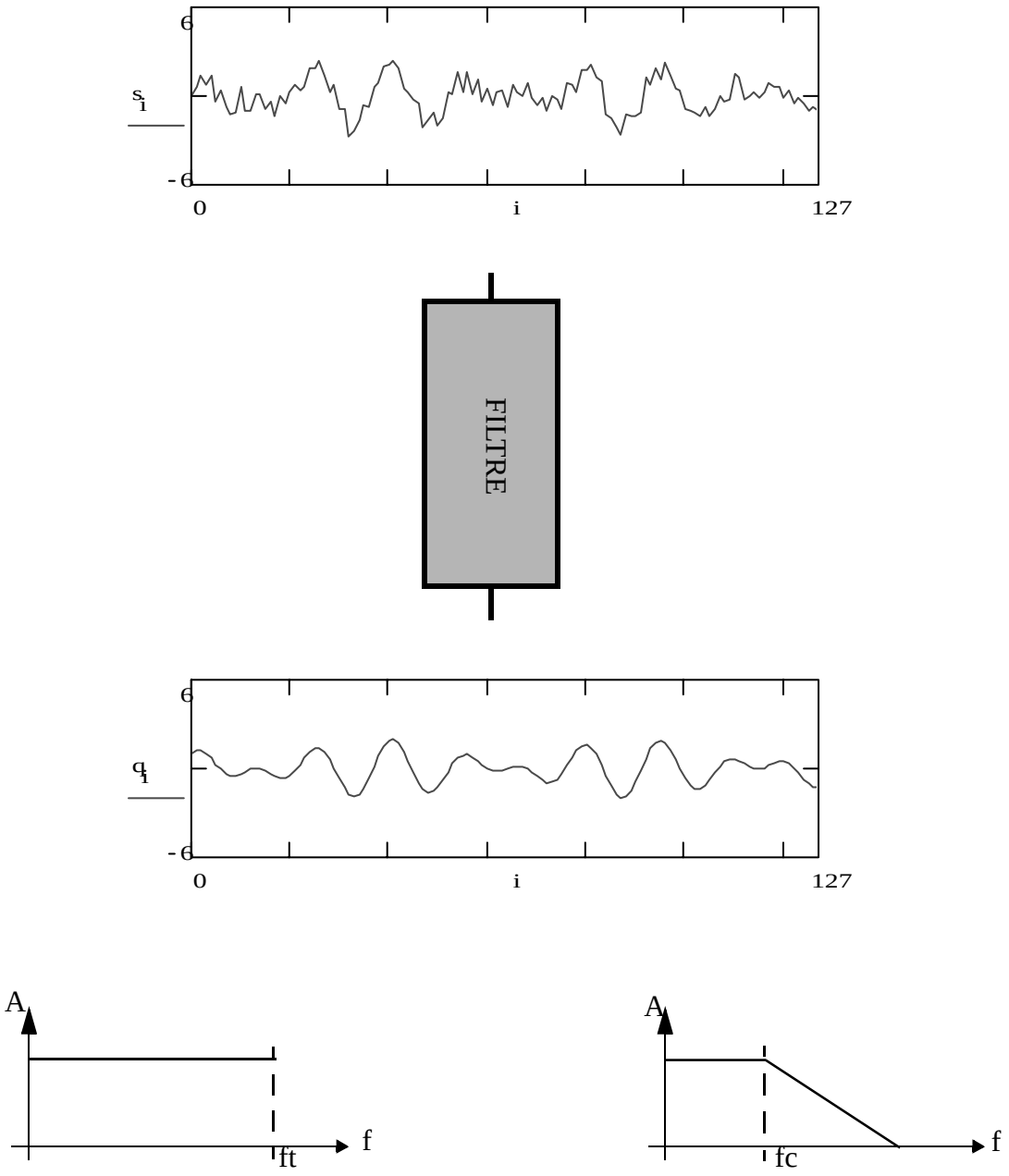

Figure 10.2: Filtrage d'un signal bruité

Considérons le signal issu dun détecteur. Ce signal peut être perturbé par du bruit d'origine diverse (figure 10.3)....

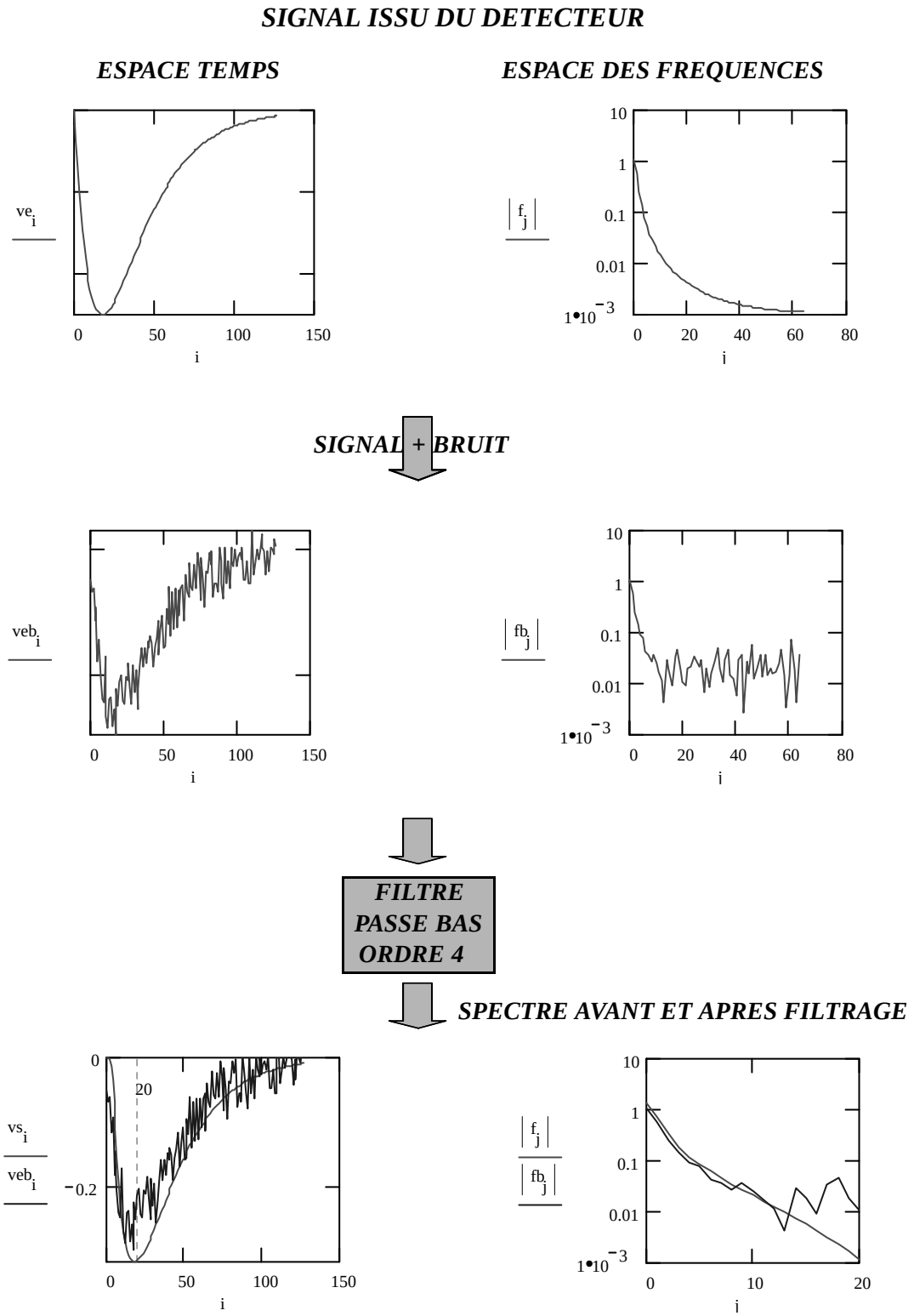

Figure 10.3 : Filtrage d'un signal détecteur

11. CONCLUSION

Les règles de connexions, de câblage ou encore d'implantation ne sont pas des séances de magie. La CEM a pour première vertu d'expliquer, par des règles de physique simples, des phénomènes qui semblent bien mystérieux.

En guise de conclusion, voici un texte de Jean-Pierre DELWAULLE (Dassault Electronique) paru dans la revue *REE N° 5- Mai 1996*.

SECTES, MAGIE ET SORCIERS

" Comme s'il ne suffisait pas de devoir concilier les différentes " sensibilités " normalisatrices, la diffusion du savoir-faire *CEM* auprès des concepteurs de matériels électriques ou électroniques est freinée par une multitude de préjugés, qui viennent contaminer jusqu'à certaines spécifications *CEM*, dont on aimerait croire qu'elles procèdent d'un passé révolu. On peut ainsi citer quelques " sectes " (hélas, sans la moindre chance d'exhaustivité) :
Les adorateurs de la Terre sont convaincus, au mépris de la loi de *Kirschoff*, qu'un " parasite " sera attiré par " une bonne terre ", et sera ainsi précipité à tout jamais dans les profondeurs infernales (ou quelque chose de ce genre). Plus à l'aise dans l'industrie ou l'informatique " lourdes " que dans l'aéronautique, ils sont dangereux en cas de polythéisme (rappelons que des tensions mortelles peuvent apparaître, en cas de défaut électrique ou de foudroiement de lignes, entre terres séparées).
Le culte de l'étoile de masse est un souvenir de l'époque où tout parasite " convenable "était à *50 Hz*. Ou à une fréquence harmonique pas trop grande ". En tous cas, dans une bande de fréquence assez faible pour que les amplificateurs opérationnels puissent afficher un chiffre de taux de réjection d'alimentation flatteur (on parle toujours d'étoile de masse, et jamais d'étoile d'alimentation...). C'était avant la généralisation des radiotéléphones cellulaires, des micro-ordinateurs et des équipements audio-vidéo numériques... Tout au plus, ce culte aura donné lieu à quelques gravures sur cuivre d'une esthétique indéniable.
Les " raccordeurs de blindages à un seul bout " sacrifient, bien qu'ils

n'en aient pas toujours conscience, à une variante du culte précédent.

Peut-être souffrants le jour du cours sur l'antenne quart d'onde (à chaque résonance, le blindage " semi-raccordé "....disparaît purement et simplement, par couplage capacitif avec le câblage qu'il est censé protéger), ils servent de " compagnons de route " et de " caution morale " à l'association amicale des amateurs d'authentiques raccordements en " queue de cochon ", pourtant en bonne place dans le tableau *CEM* des " nuisibles ".
Les propagateurs (souvent innocents) de ces croyances - et leurs victimes - oublient, sous couvert de " complexité de la *CEM* ", que tout cela est régi par les lois normales et habituelles de la physique, qu'ils connaissent et pratiquent en d'autres circonstances. A ce jour, ni la loi d'*Ohm*, ni les équations de *Maxwell* n'ont été abrogées, et les électrons " *CEM* " ne se distinguent des autres que par le fait qu'ils sont absolument pareils.
S'il est vrai qu'au pays des aveugles, les borgnes font des consultants prospères, y voir clair n'a rien d'impossible. En tout cas, rien de sorcier... ".

12. RÉFÉRENCES

Certaines figures de ce polycopié sont tirées des ouvrages de références suivants :

ADELINE H. - Manuel d'électricité du gradé radiotélégraphiste - 4° édition - 1939.
AEMC : différents supports de formation.
BERKELEY : cours de physique - électricité et magnétisme - vol 2 - Armand Colin.
CHAROY Alain : Parasites et perturbations des électroniques - Dunod tech - tome 1,2,3,4.
REE : revue N° 4 et 5 - avril, mai 1996.
SCHAFFNER : CEM.