

Introduction à la compatibilité électromagnétique (CEM)

4. Câblage et mise à terre

J. Unger – heig-vd - 2006

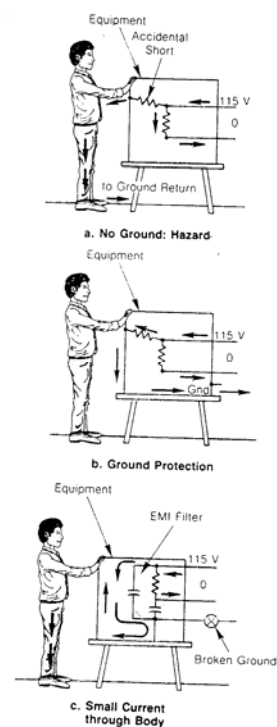
Les objectifs de la mise à terre

- Sécurité des personnes
- Assurer un potentiel de référence
- Permettre et séparer les chemins de retour des courants vers leur source

Mis à part la nécessité de protéger les personnes, les buts de la conception de bons systèmes de mise à terre sont de deux ordres : Premièrement **minimiser les perturbations provoquées par couplage à travers une impédance commune**, et deuxièmement **éviter de créer des boucles de terre** sujettes au couplage inductif, et aux courants de circulation en raison des différences de potentiel entre deux points de terre (système à terre unique).

Sécurité

- Eviter qu'un être humain soit mis en danger, suite à une défaut ou simplement au montage
- C'est la raison du conducteur de protection dans le câblage réseau

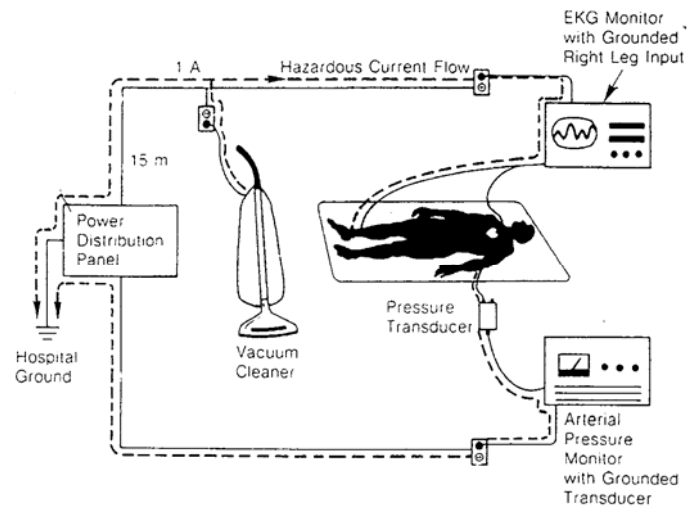


La protection des personnes appelées à manipuler un système exige de relier le châssis (le boîtier et toutes les parties conductrices accessibles au toucher) à la terre.

En effet, dans le cas où le châssis n'est pas relié à la terre (a ou c), les éléments parasites, toujours présents entre le châssis et la terre d'une part, entre le châssis et les différentes parties du circuit d'autre part, déterminent le potentiel du châssis. Ce potentiel peut devenir dangereux pour l'être humain déjà en fonctionnement normal. Si de plus un défaut d'isolation apparaît, mettant en contact le châssis avec l'alimentation primaire du circuit (partie de droite de la figure), alors l'homme peut se trouver directement en contact avec le circuit alternatif de puissance et être mis en danger.

Si, par contre, le châssis est relié par un bon contact à la terre, (conducteur de protection isolé en jaune-vert = connecteur central des prises 230V), alors, en fonctionnement normal, le potentiel du châssis par rapport à la terre est nul et l'homme ne risque rien. De même en cas de défaut d'isolation (figure b), un fort courant s'établit dans la ligne d'alimentation, provoquant la rupture immédiate du fusible, et la protection est assurée.

Exemple d'un accident d'hôpital



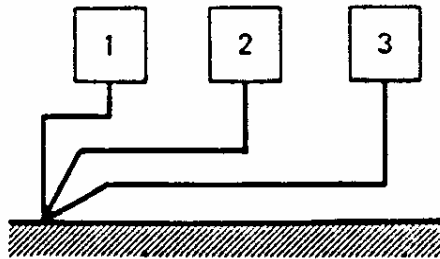
Le courant de consommation de l'aspirateur a provoqué dans l'impédance commune du réseau, partie supérieure, un différence de potentiel suffisante pour qu'un courant s'établisse entre la jambe droite du patient et son bras gauche.... À travers de cœur... d'où l'accident mortel.

Définitions

- Terre : connexion liée à la terre
 - Mise à terre spécifique ou par le réseau d'eau
 - Une seule liaison par bâtiment (impédance de terre élevée)
- Masse : carcasse métallique conductrice du système = potentiel de référence
- Circuit flottant : sans liaison avec la terre (ou à la masse)
- Commun : référence 0 Volt d'un circuit (ampli), c'est le point commun entre le circuit et les alimentations, d'où son nom

Principe de terre unique

- Idéal : connexion individuelle de chaque circuit à la mise à terre unique
 - Evite les impédances communes
 - Assure un potentiel de référence bien défini
- ***Totalement irréalisable !!***

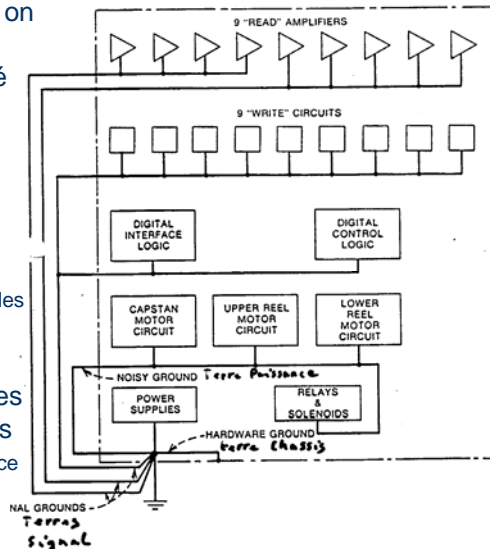


Si chaque connexion est individuelle, seuls les courants propres à chaque circuit circulent dans le fil de terre. Il n'y a donc pas d'impédance commune et d'influence d'un circuit sur l'autre. De plus le potentiel 0 V est le même partout.

Malheureusement, même pour des systèmes simples, on n'arrive pas à réaliser ce principe.

Réalisation par catégories

- A partir d'une mise à terre unique on relie en chaîne des éléments de même type et de même sensibilité
 - Terre Signal (A-GND) : signaux analogiques
 - Terre Digitale (D-GND) : signaux numériques
 - Terre Puissance (Power GND) : forts signaux, relais, moteurs....
 - Terre Chassis : blindages extérieurs, armature, tous les éléments susceptibles de recevoir des courants parasites (couplage C, ESD)
- Dans une même chaîne on relie les éléments les plus sensibles le plus près de la terre (la plus faible impédance commune)



Terre signal utilisée comme référence zéro par tous les circuits à faible niveau (capteur, préamplis, étage d'entrée des convertisseurs). Terre à faible bruit.

Terre logique utilisée comme référence pour les circuits logiques (courants de commutation des portes logiques de quelques mA). Terre de qualité médiocre

Terre puissance utilisée pour les amplis de puissance et les relais (courants de plusieurs centaines de mA). Terre perturbée à la fréquence du signal, et du réseau

Terre châssis utilisée pour la protection (boîtier) et pour les circuits d'alimentation. Terre fortement perturbée à la fréquence du signal et à celle du réseau, plus impulsions occasionnelles (ESD), + couplage C parasites de l'extérieur

L'exemple montre le montage interne d'un enregistreur à bande magnétique 9 canaux.

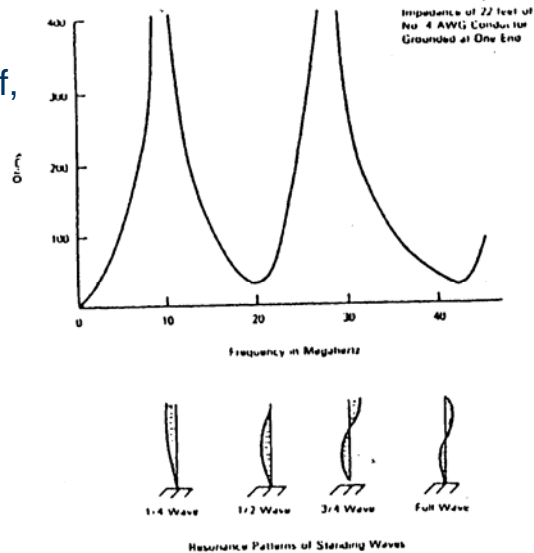
Les têtes de lecture travaillent à très faible signal, on les a regroupées en deux chaînes séparées pour pouvoir limiter les bruits et perturbations.

Les têtes d'écriture travaillent à un niveau beaucoup plus important (il faut saturer la poudre magnétique de la bande), on les regroupe en une 3e chaîne avec les circuits de commande digitale qui supportent un niveau de bruit plus élevé.

La terre puissance comprend les moteurs et relais de commande de la bande

Grille de masse, Plan de masse

- La chaîne a pour but d'éviter les boucles de terre (couplage inductif, et mélange des courants)..... Mais.....
- Lorsque les longueurs des conducteurs sont grandes ($> \lambda/20$) alors l'impédance devient grande, puis le fil se comporte comme une antenne



L'image représente l'impédance d'un fil de 7.5m.

A 10MHz la longueur d'onde $\lambda = 30$ m, le fil a donc une longueur de $\lambda/4$, c'est une très bonne antenne

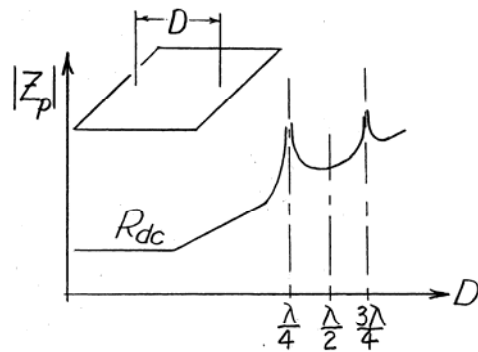
A 20 MHz $\lambda = 15$ m et le fil a une longueur de $\lambda/2$, d'où très peu d'émissions

A 30 MHz $\lambda = 10$ m. On a donc un fil de $3 \lambda/4$, à nouveau avec une bonne émission

Etc.

Grille de masse, Plan de masse

- Dans ces cas, on a un avantage à réaliser une grille de terre avec des contacts de bonne qualité à chaque intersection
- Ou mieux : Utiliser un plan de terre.



AC Impedance of Ground Plane

La grille de masse se réalise dans l'armoire de montage du système par soudure ou contacts étanches large surface entre les barres de la structure.

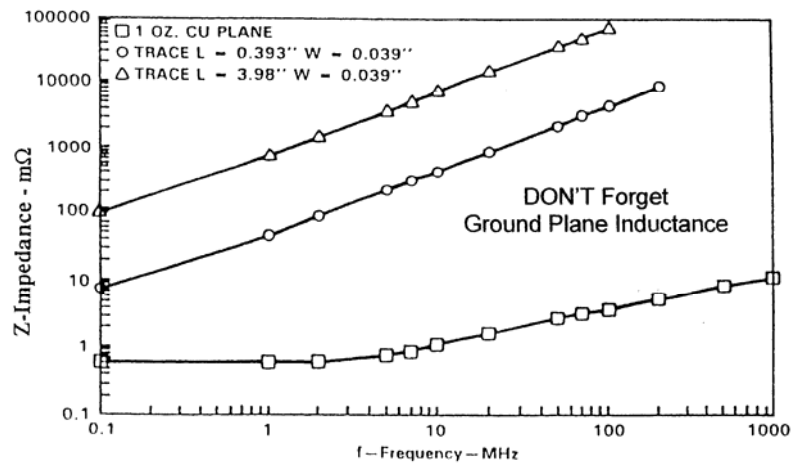
Le plan de masse s'utilise dans les circuits imprimés, à l'intérieur des appareils et tiroirs.

L'avantage est alors que, tant que les dimensions sont faibles vis-à-vis de la longueur d'onde l'impédance reste environ constante (pour une surface d'épaisseur uniforme, la résistance se spécifie en Ohm/carré: un carré de côté D et d'épaisseur e a une résistance $R = \rho D / (De) = \rho / e$, indépendant de D). Entre 2 points on décompose la surface en un ensemble de carrés en série et en parallèle, ce qui permet de calculer facilement la résistance. Si la surface n'est pas limitée (deux point dans la région centrale) c'est le carré de dimension D qui intervient.

Par contre on retrouve en très haute fréquence les mêmes problèmes de résonance.

Impédance : piste vs plan de masse

($L = 0.393'' = 1.0 \text{ cm}$, $L = 3.98'' = 10.1 \text{ cm}$)



10

Cette figure ne fait pas apparaître les résonances: à 100 MHz la longueur d'onde est de 3 m; un fil de 10 cm est donc plus court que le 1/20e de la longueur d'onde.

On voit à l'évidence la diminution de l'impédance de masse entre le plan de terre et les fils, même de 1 cm de long.

3.98" = 10 cm 0.398" = 1 cm

Résumé

- Un point unique de mise à terre (si possible)
 - Masse interconnectée par soudure ou contact sans oxydation
 - Plan de masse ou grille de masse dès que les conducteurs sont plus longs que $\lambda/20$ (HF)
- Séparer par catégories selon les courants de retour
 - Agnd, Dgnd, Power-gnd, Chassis...
 - Dans une chaîne placer l'élément le plus sensible au début (coté mise-à-terre)

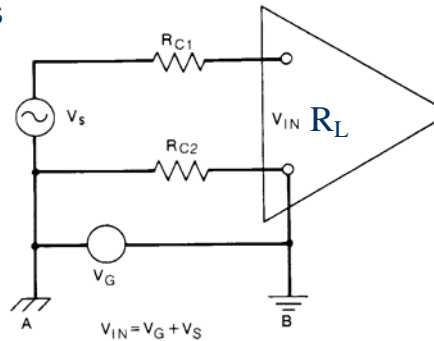
Principe de base d'analyse

- Tout conducteur est une impédance
- La masse conduit les courants (consommés par les équipements) retournant vers les alimentations
- Les connexions de terre ne sont donc pas des équipotentielles
- Par conséquent, deux points de terre distincts risquent toujours d'être à des potentiels différents \Rightarrow supposer qu'il y a une source de tension entre ces 2 points
- Il y aura perturbation dès que le courant d'un élément utilise le même chemin qu'un autre circuit (impédance commune)
- Le choix d'une solution est toujours un compromis

Il n'existe pas de solution parfaite: dans des circuits à terre multiple, on crée forcément des boucles de terre, avec tous leurs inconvénients. Reste à choisir la solution la mieux adaptée à un cas particulier : c'est – en principe- celle qui minimise les courants parasites (de boucle, couplage capacitif ou inductif) utilisant un trajet commun avec le signal.

Analyse d'un cas à « terre multiple », avec d'une charge asymétrique

- Symboles de terre différents pour exprimer deux points différents, A et B
- Source V_G : représente la différence de potentiels existant entre les 2 points
- Applicable à toute source et à toute charge
- V_G s'ajoute au signal et représente une erreur (R_{C2} est en fait inutile !)
- V_G provoque un courant dans R_{C2} (et dans $R_{C1}+R_L$) commun avec le signal



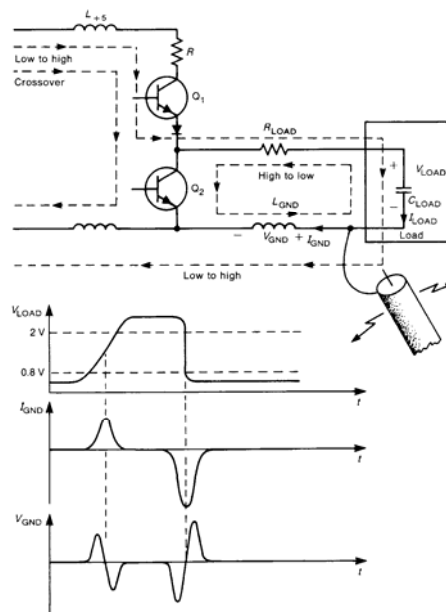
Le cas présenté utilise un amplificateur « asymétrique » (« single ended »), il mesure en fait le potentiel de la borne supérieure, par rapport à son point commun. C'est généralement le cas de la majorité des circuits.

La source V_s représente la source signal, elle a souvent une impédance de sortie non négligeable et peut en plus avoir un potentiel de mode commun, qu'on représentera alors en série dans la liaison de V_s à A, s'ajoutant à V_G (dc ou basse fréquence). On analyse en utilisant le principe de superposition : signal avec V_s alors que $V_G=0$, et perturbation avec V_G , alors que $V_s=0$. C'est le rapport entre le signal et la perturbation qui est significatif (rapport signal sur bruit S/N); on recherche le plus grand rapport possible (perturbation nulle!)

Exemple : $V_s = 40$ mV résistance interne 1 kOhm, $V_G = 0.1$ V, $R_c = 0.1$ Ohm, $R_L = 100$ kOhms. Calculer le rapport signal sur bruit du montage (signal = V_s , bruit = effet de V_G)

« Bumps » de terre dans un circuit imprimé

- Même sur un circuit imprimé, d'importants potentiels de terre peuvent se développer:
- Exemple - porte TTL: R_{load} est la charge DC des portes utilisant le signal, C_{load} est l'ensemble des capacités des portes et du câblage, L_{GND} est l'inductance du plan de terre entre les connexions
- Effet supplémentaire lors de la conduction simultanée de Q1 et Q2
- Si le blindage d'un câble est relié à terre près de la charge, alors il rayonnera en HF !!!!



Le temps de montée est plus lent que le temps de descente (montée: $\tau = C_{load} \cdot (R + R_{load})$ descente: $\tau = C_{load} \cdot R_{load}$).

Le courants de terre présentent des transitoires $I_{gnd} = \text{dérivée de la tension} = C_{load} \cdot dU/dt$

Les bumps de terre sont dûs à l'inductance L_{gnd} : $V_{gnd} = L_{gnd} \cdot d/dt (I_{gnd})$

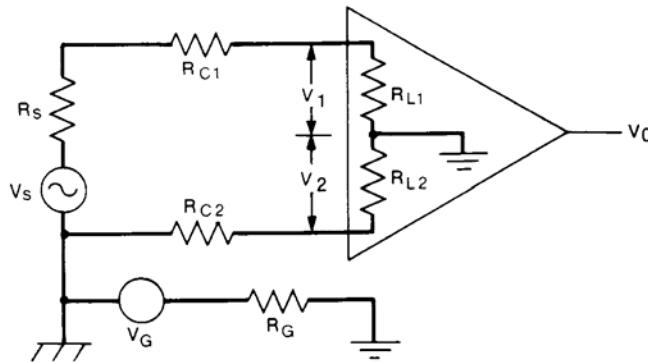
Exemple : $C_{load} = 10\text{pF}$, supposons des transitions trapézoïdales de 3V en 5 ns, les courants de terre auront donc une amplitude de 6 mA, avec des temps de montée et de descente bien plus courts que le signal TTL, par exemple 1 ns.

Sachant que l'inductance d'un fil est de l'ordre de 5 nH/cm, si l'on admet une piste de terre de 10 cm, alors on peut estimer les bumps à 0.3V !!! En augmentant le nombre de portes et/ou la longueur de la piste, on atteint très vite la marge de sécurité des portes TTL, et le circuit ne fonctionne plus. Un plan de terre devient donc indispensable.

La conduction simultanée de Q1 et Q2 peut facilement atteindre 50 mA pendant une durée très courte (< 1 ns) renforçant encore le phénomène

Analyse « terre multiple » avec un ampli différentiel

- L'ampli différentiel a son point commun mis à la masse, les deux bornes d'entrée présentent la même impédance de mode commun
- L'influence de V_G est fortement diminuée



V_G provoque presque le même courant dans les deux fils R_{C1} et R_{C2} . L'amplificateur mesure la différence entre les deux bornes, alors que V_G provoque essentiellement du mode commun. Si l'ampli a un grand taux de réjection du mode commun, alors V_G ne provoque presque plus d'erreur (voir EAN et/ou Chap 5).

Exemple : $V_s = 40 \text{ mV}$, $V_G = 0.1 \text{ V}$, $R_c = 0.1 \text{ Ohm}$, $R_L = 100 \text{ kOhms}$. Calculer le rapport signal sur bruit du montage (signal = V_s , bruit = effet de V_G), comparer au cas asymétrique.

Câblage et potentiels de terre : méthodes de protection (cf Chap 5)

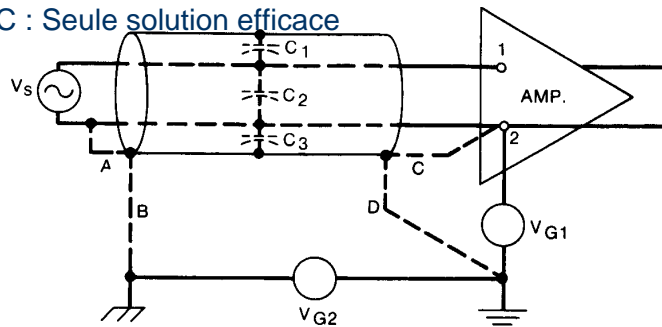
- Amplificateur différentiel d'instrumentation
 - Grand CMR et Haute impédance d'entrée
- Circuits de garde
- Isolement par transfo ou optique
- Transfo longitudinal « Choke »
- Balance (=équilibrage des impédances dans les deux fils de liaison)
- Boucle de courant

Toutes ces méthodes (sauf la dernière) tendent d'une part à augmenter l'impédance série de la boucle de terre (donc à diminuer les courants qui peuvent y circuler), d'autre part à rendre symétrique l'effet de V_g , donc de permettre son élimination par mesure de la différence (réjection du mode commun de l'ampli de mesure).

La dernière méthode implique un contrôle du chemin de retour du courant signal – vraie terre unique. L'impédance des fils n'influence pratiquement pas la transmission du signal, et elle permet en plus l'alimentation à distance des circuits. C'est une méthode plus particulièrement employée dans les bus de terrain, ou dans les transmetteurs pour capteur.

Mise à la masse du blindage des câbles

- Rappel : signaux digitaux/HF liaison aux deux bouts
- Signaux analogiques BF: paire torsadée blindée
- Cas d'une charge mise à la masse, source flottante:
 - A : retour des courants de couplage capacitif par le fil signal
 - B+D : V_{G1} ou $V_{G1}+V_{G2}$ couplés par diviseur capacitif C_2+C_3
 - C : Seule solution efficace



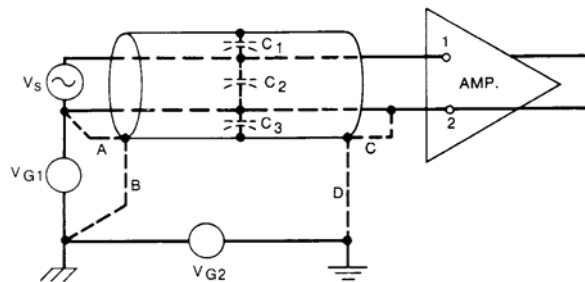
Dans le cas A, le courant parasite injecté dans le blindage par couplage capacitif circule dans le fil signal 2 avant de retourner à la masse – il y a donc perturbation, même si elle est relativement faible.

Dans les cas B et C les potentiels de mode commun et de terre apparaissent aux bornes de C_3 et du diviseur C_1-C_3 . La tension d'erreur est donc $V_g * C_1/(C_1+C_2)$. On oublie trop facilement de penser à ces capacités internes du câble !!!

Dans le cas C, les courants de couplage capacitif retournent à la masse sans utiliser de trajet commun avec le signal, et le potentiel aux bornes de C_3 est nul. Il n'y a donc aucune perturbation.

Mise à la masse du blindage de câble

- Cas de la source mise à la masse, charge flottante :
 - Solution A seule efficace



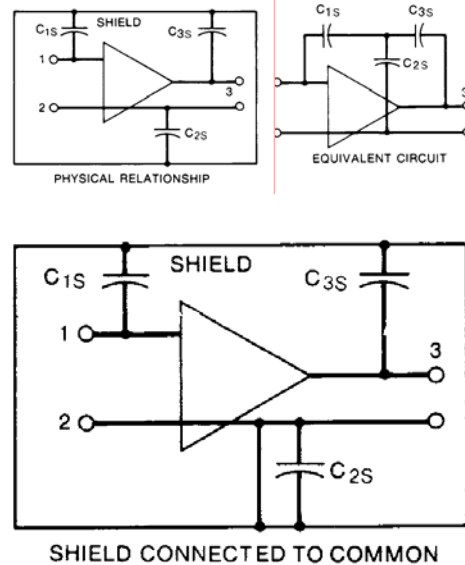
- Règle : Relier au point commun de l'élément qui est lui-même mis à la masse
- Terre multiples: faire un compromis sur le même principe d'analyse

18

Même analyse qu'au cas précédent; le résultat ne diffère que par les mises à la masse différentes. Le choix implique donc d'imaginer par où passent les courants parasites de couplage capacitif ou ceux dûs aux potentiels de terre.

Mise à la masse du blindage d'un amplificateur

- Les capacités entre le blindage et les bornes d'entrée constituent un chemin de réaction
- **Risque d'oscillation**
- Blindage au point commun : seul moyen de rompre la réaction



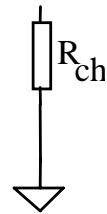
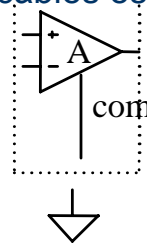
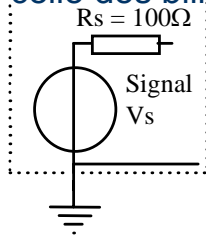
Le diviseur C_{3S} - C_{2S} génère une proportion importante de V_3 aux bornes de C_{1S} . L'ampli peut se mettre à osciller en permanence, ou présenter des oscillations amorties à chaque transition du signal d'entrée => mauvais fonctionnement, circuit inutilisable.

Dans le cas où le blindage est relié au point commun de l'ampli, C_{2S} est en court-circuit, C_{1S} ne représente plus qu'un charge capacitive sur la source signal (limitation de la bande passante) et C_{3S} devient une charge capacitive sur la sortie de l'ampli (limitation de bande passante, éventuellement distorsion par le slew rate), mais la fonction de transfert reste stable.

Ex CEM 4-13-mise à terre, circuit analogique

- $V_s = 15 \text{ mV}$, $R_{ch} = 40 \Omega$, Ampli différentiel gain 300, $R_{in} = 100 \text{ k}\Omega$

- Câbler le circuit avec des paires torsadées blindées, et relier les blindages en respectant les règles de mise à terre
- Quelle est la conséquence d'une différence des potentiels de terre (source et ampli+charge) de 0.3 V , si la résistance des fils torsadés est de 0.5Ω , alors que celle des blindages de ces câbles est de 0.08Ω ?



Foudre et ESD

- Une charge électrostatique s'établit par frottement de deux isolants l'un contre l'autre
 - Soulier sur moquette
 - Couches d'air sec en météo
- Lorsque les deux isolants s'éloignent une tension apparaît entre eux $U = Q/C$, comme C diminue avec la distance, U peut devenir très grand
 - De l'ordre de 25 kV sur l'homme
 - Beaucoup plus dans les nuages

C'est l'effet « triboélectrique ». Certains matériaux cèdent plus ou moins facilement leurs électrons et se chargent donc positivement, alors que d'autres en captent plus ou moins facilement et se chargent négativement.

Série triboélectrique :

Positif air , peau humaine, verre, mica, cheveux, nylon, laine, fourrure, cuir, Aluminium, papier, coton, bois, acier, caoutchouc durci, mylar, verre epoxy, nickel, cuivre, argent or, platine, mousse polystyrène, verre acrylique, polyester, celluloïd, orlon, mousse polyuréthane, polyéthylène, polypropylène, PVC(chlorure de polyvinyle), silicone, teflon

Négatif

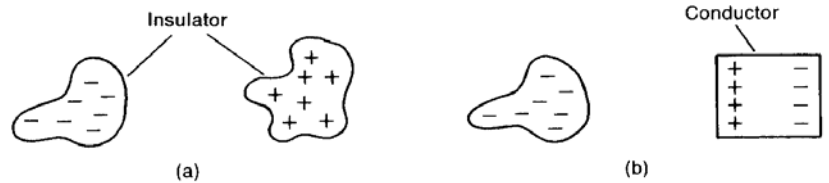
Si l'on frotte deux matériaux, celui qui se trouve le plus à gauche de la liste se charge positivement alors que celui se trouvant sur la droite se charge négativement.

L'importance du phénomène dépend de bien d'autres facteurs, en particulier de la température, alors que l'humidité relative permet une décharge partielle.

C'est ainsi que la rencontre et le frottement de deux masses d'air chaude et froide conduit également à l'apparition d'une charge dans les nuages

Décharge électrostatique

- Dans un isolant les charges sont très peu mobiles, ce n'est pas l'isolant qui pose problème!
- L'isolant chargé induit par le champ E un déplacement de charges dans les conducteurs proches (l'homme dans ses chaussures! Ou nuage chargé d'humidité)



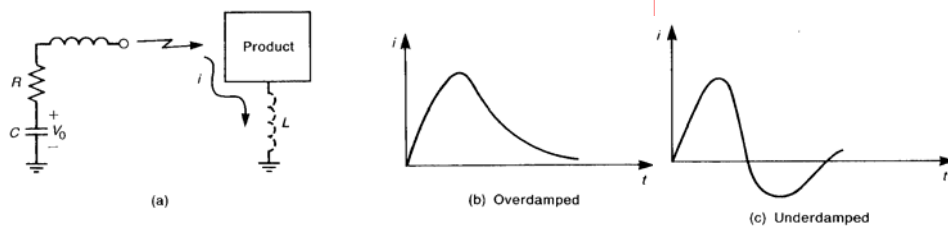
- Si ce conducteur approche un circuit mis à terre alors il peut se décharger par claquage, ou par contact: Impulsion de courant forte et rapide

Ainsi un homme portant des chaussures à semelles de caoutchouc, marchant sur une moquette de nylon laisse des traces positives sur la moquette alors que ses semelles se chargent négativement. Par proximité ses pieds se chargent positivement, alors que sa tête et ses mains se chargent négativement, le corps humain étant conducteur. En approchant la main d'un circuit le champ électrique devient très intense, puis provoque le claquage de la couche d'aire de séparation.

De même une charge peut se développer dans la chaise ou le fauteuil d'un opérateur, et induire des charges dans les parties métalliques de celle-ci, d'où des décharges ESD avec une résistance interne bien plus faibles qu'avec le corps humain. On parle de « décharges de l'ameublement ».

Modélisation de la décharge

- Le conducteur est donc une capacité chargée, il a une résistance interne et une inductance
- La décharge se fait dans le conducteur de protection, qui représente lui même une grande inductance
- Selon la valeur de la résistance interne on obtient une impulsion sur-amortie (homme) ou oscillatoire amortie (ameublement)



Rappel:

la capacité entre deux plaques métalliques vaut $X = \epsilon S/d$

La capacité entre deux sphères concentriques de rayon R_1 et R_2 ($R_2 > R_1$) vaut $(4 \pi \epsilon) / (1/R_1 - 1/R_2)$

On peut estimer la capacité d'un conducteur sphérique de rayon R_1 seul, en faisant tendre R_2 vers l'infini soit

$(4 \pi \epsilon) R_1$.

Si l'on représente l'homme par une sphère de 0.5 à 1m de diamètre, alors sa capacité propre est de 55pF à 110pf, bien en accord avec le modèle de l'homme vu au §2 (et utilisé dans les normes) où l'on indique une capacité de l'homme, en présence de parois métalliques de 50 à 250 pF.

Effets principaux des ESD

- Champ électrique très intense avant la décharge
 - Peut provoquer le claquage des éléments du circuit
- Courant très important et très rapide, pendant la décharge
 - Temps de montée 0.2 à 70 ns
 - Durée 100 ns à 2 μ s
 - Courant de l'ordre de 10A pour une tension de 10kV
- La foudre se manifeste de même par des très grands courant (50 kA) dans la mise à terre du bâtiment.

Dans le cas de la foudre il s'agit de courants de l'ordre de 50 kA, mais ils passent généralement du paratonnerre (ou de ce qui en fait office) dans la mise à terre, provoquant également de très fortes variations de potentiel de terre. Deux circuits d'un système mis à terre en deux endroits différents peuvent donc être soumis à des tensions provoquant la destruction des circuits.

Effet du courant de décharge

- Conduction directe dans le circuit => destruction
- Décharges secondaires par claquage entre différentes parties du circuit, sous l'effet de l'élévation momentanée de tension de terre et des champs électriques
- Rayonnement direct en champ proche:
 - Couplage capacitif (circuits à haute impédance)
 - Couplage inductif (circuits à basse impédance)

Il est évident qu'il faut tout tenter pour éviter que le courant de décharge puisse traverser le circuit. Il n'en reste pas moins que ce grand courant, présentant une variation très rapide présente un très large spectre de fréquences.

Le potentiel de terre dépend ainsi de l'impédance haute fréquence de la mise à terre, pouvant suffire à provoquer des décharges secondaires dans le circuit.

De même les couplages capacitifs (potentiel de terre) et inductifs (courant de décharge) sont des composantes à très large spectre, capables de provoquer des erreurs mêmes dans de très petits circuits.

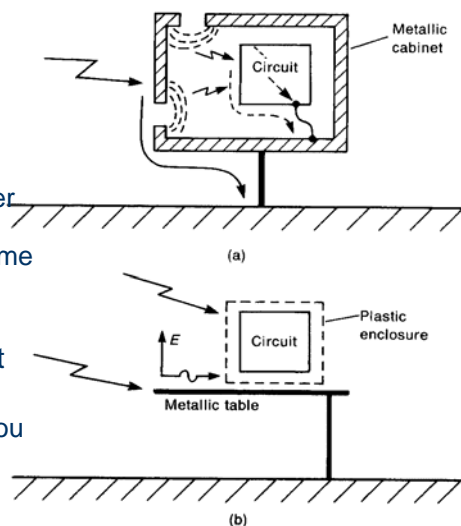
Protection - idéal

- L'idéal serait d'enfermer le circuit complet dans un boîtier métallique continu et hermétique, et de relier ce boîtier à la terre par le conducteur de protection.
 - Même si l'inductance de la mise à terre provoque une élévation de potentiel du boîtier de plusieurs kV, le circuit interne s'élèvera également parallèlement au boîtier, et il n'y a pas d'effet sensible (pas de décharge secondaire, blindage par le boîtier et amortissement des champs magnétiques par courants de Foucault dans le boîtier)

Le cas idéal ne peut bien sûr jamais être réalisé, il y a forcément des ouvertures dans le boîtier (passages de câbles, boutons, interrupteurs, affichages, aérations). Ces ouvertures sont des points de pénétration tant pour le courant de décharge que pour le champ électrique avant la décharge

Protection – cas réel

- Les ouvertures permettent aux influences de l'ESD de pénétrer dans le boîtier
 - Des décharges secondaires peuvent apparaître
 - Une partie du courant peut trouver un chemin à moindre impédance contre terre dans le circuit lui-même
 - Les couplages Cet L deviennent possibles
- Très souvent un boîtier plastic est imposé
 - Une peinture métallique interne, ou l'inclusion de fibres conductrices apportent une protection partielle
 - Sinon le circuit est directement exposé aux ESD



Si l'utilisation d'un blindage métallique est hautement recommandée, elle n'assure donc pas une protection complète. De plus dans le cas de boîtiers plastic, la protection est quasi inexistante.

Il est donc indispensable d'envisager des précautions supplémentaires

Moyens supplémentaires de protection

- Prévenir l'établissement des charges statiques
 - Dans de rares cas on peut empêcher la formation des charges : contacts de décharge sur un rouleau plastic d'imprimante, bande de mise à terre sur un véhicule
 - Transport de l'électronique : sachets et mousses antistatiques (conductibilité beaucoup plus grande que les emballages standard)
 - Fabrication : bracelet antistatique mis à terre par une résistance de $1\text{ M}\Omega$
- Réduire le couplage (conduction et rayonnement)
- Utiliser des moyens logiciels pour corriger les erreurs dues aux ESD

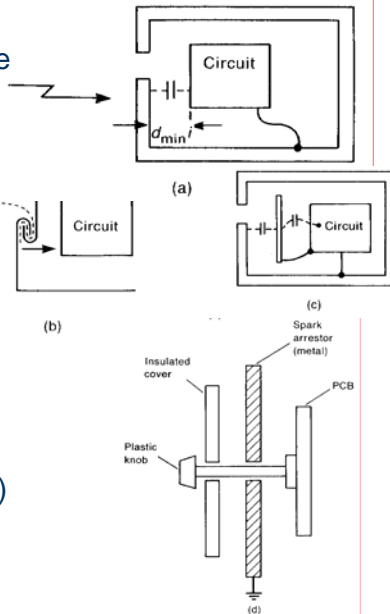
Les matériaux antistatiques cherchent à permettre une décharge relativement lente directement au niveau de la formation de ces charges. Il existe même des sprays antistatiques, assurant une conductibilité minimale de décharge au niveau même des zones de frottement.

La réduction de couplage fait l'objet des pages suivantes

La réduction par logiciel suppose que les autres méthodes garantissent une immunité suffisante, évitant la destruction, mais laissent un effet visible des ESD sur les signaux internes. De cas en cas il est envisageable de prévoir ce type d'erreur et de les corriger.

Protection contre les décharges secondaires

- Toute partie métallique exposée doit être mise à terre, toute partie métallique non mise à terre doit être protégée par un isolant.
- Maintenir une distance entre le circuit électronique et les parties isolées de 1cm au moins, et de 1mm aux parties mises à terre a)
- Augmenter la longueur du chemin de décharge b) c)
- Ajouter un écran d'arrêt (spark arrestor) c) d)



Certaines parties métalliques ne peuvent simplement pas être mises à terre, il faut alors isoler les parties exposées, et s'attendre à ce que, sous l'effet d'un ESD leur potentiel atteigne le potentiel de la source (avant décharge). Sachant que pour l'homme cette tension est de l'ordre de 25 kV, et que le champ électrique de claquage de l'air est de 30 kV/cm, il faut maintenir une distance de 1 cm entre le circuit et cette partie métallique.

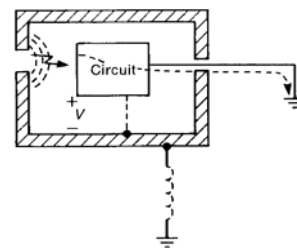
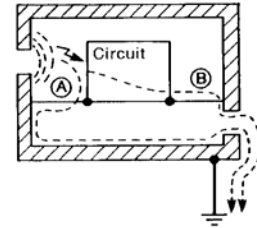
Pour les parties métalliques mises à terre on admet que le potentiel dû au fil de protection reste de l'ordre de 1500V. Le même critère impose alors une distance minimale de 1mm.

L'augmentation du chemin de décharge peut s'obtenir par recouvrement des différentes parties du boîtier autour des zones de pénétration, ou en plaçant un écran secondaire en face de la pénétration. Le diviseur capacitif réduit alors la tension effective de l'écran et le chemin direct est allongé, d'où l'élimination du risque de claquage.

L'écran d'arrêt permet de détourner les éventuelles décharges secondaires directement vers la terre, sans impliquer le circuit à protéger.

Couplage par conduction

- L'objectif est d'éviter qu'un courant résiduel dû à l'ESD ne traverse le circuit (géométrie)
 - A évite le trajet commun
 - B !! risque fort que le courant traverse le circuit
- Toutes les masses du circuit à l'intérieur du blindage doivent être reliées à ce blindage en un point
 - Évite de grandes différences de potentiels dû à la mise à terre, qui pourraient faire circuler une partie du courant dans le circuit

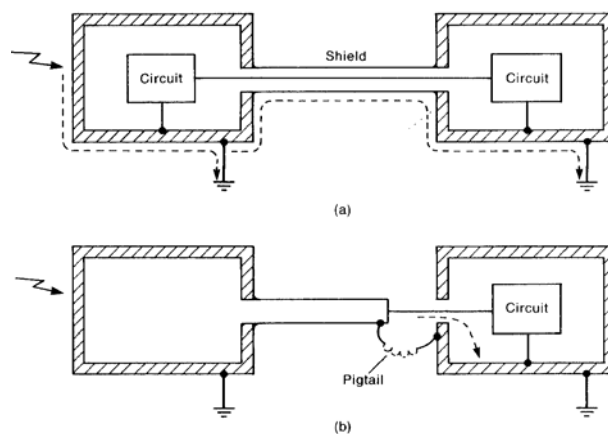


Le choix de la disposition est particulièrement important. Le courant, ou une partie de celui-ci recherche le chemin à moindre impédance. Comme on a des composantes très hautes fréquences, ce n'est pas toujours celui qui nous paraît le plus évident !!! Le problème est essentiellement géométrique et difficile à résoudre en présence de plusieurs points de pénétration possibles. Tout dépend du choix de la liaison du circuit au boîtier et de la liaison du boîtier à la terre.

Même si un câble signal est mis à terre à l'extérieur du boîtier, il faut en interne relier cette masse au boîtier. La figure illustre ce cas: deux chemins de mise à terre coexistent, l'un par le boîtier mis à terre, l'autre par le câble. Les impédances en haute fréquence font que la différence de potentiels des deux parties peuvent atteindre quelques centaines de V !!

Câbles - 1

- Pour être efficace le blindage d'un câble doit être relié au boîtier sur 360°

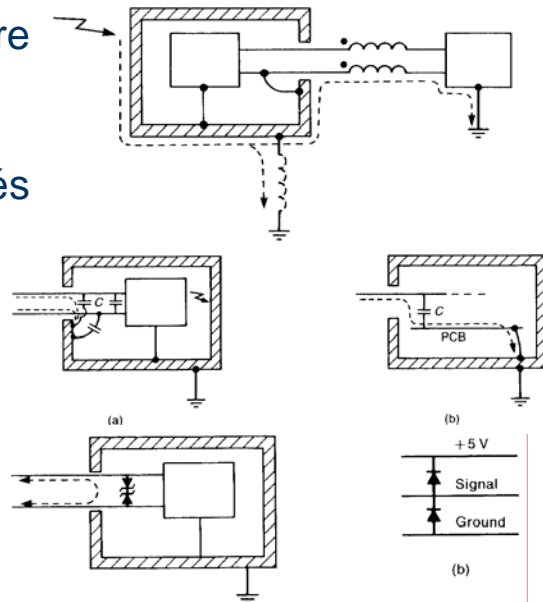


Dans le cas d'une connexion 360° il y a prolongation du boîtier sur l'ensemble de l'installation, la double mise à terre ne porte pas à réelle conséquence.

En cas de connexions asymétrique (« queue de cochon »), alors une partie du courant passant dans le blindage de câble et l'inductance du contact, provoque une grande différence de potentiel entre les deux parties et il y a pénétration dans le circuit.

Câbles - 2

- Dans le cas contraire il faut éviter la pénétration des courants ESD captés par le câble
 - Soit par blocage (Choke)
 - Soit par dérivation capacitive, diodes, diodes Zener



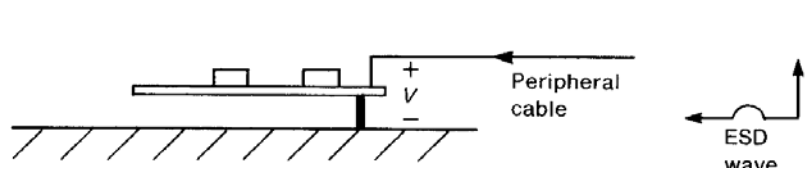
L'inductance « Choke » (ferrite entourant l'entier du câble) s'oppose aux courants de mode commun, conséquence des ESD, forçant l'entier de la décharge à se faire par le conducteur de protection – il y a bien blocage du courant ESD dans le câble. Le signal différentiel est relativement peu influencé par le transfo ainsi créé, mais il faut en tenir compte dans la conception du circuit !!!

Les capacités liant les fils individuels au boîtier offrent un chemin basse impédances aux composantes HF de l'ESD, mais attention au mauvais placement (cf image b où le courant ESD est amené dans la masse du circuit, provoquant des couplages par impédance commune, capacitifs et inductifs. Mais la présence de ces capacités a également une influence sur la transmission du signal qu'il faut prendre en compte.

Les diodes et diodes Zener spécifiques de « suppression des surtensions » n'agissent que comme protection pour éviter la destruction. Elles sont particulièrement nécessaires pour se protéger contre la foudre (qui implique les plus fortes surtensions parasites. La vitesse de réaction est liée à l'énergie qu'elles peuvent dissiper, si bien qu'il est souvent nécessaire d'en monter plusieurs en parallèle: rapide et faible énergie en parallèle avec une lente mais forte énergie.

Boîtier plastic

- Avec un boîtier plastic, prévoir un plan de terre, et exploiter les méthodes précédentes.
 - Le plan collecte les courants ESD, et les conduit à terre
- A proximité du plan de terre
 - le champ E associé à l'ESD est perpendiculaire au plan
 - le champ H est parallèle au plan
- La masse des câbles doit être reliée au plan de terre au niveau du connecteur d'entrée
 - Car il faut éviter une grande différence de potentiel entre la masse signal et le plan de terre



Disposition du circuit

- Le circuit doit être parallèle à ce plan et très proche de lui
 - Si le circuit est perpendiculaire au plan, toute boucle du circuit intercepte un flux maximum, et intègre le champ E sur toute sa hauteur
 - Si le circuit est parallèle une boucle n'intercepte plus de flux et n'intègre pas le champ E

