

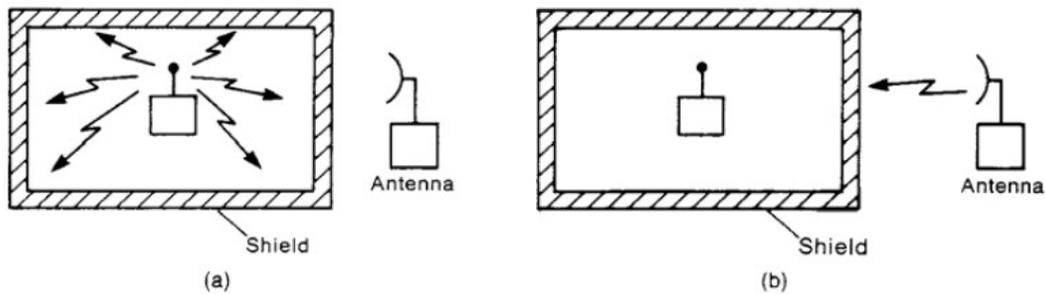
Chapitre 3

Pénétration dans les blindages de câbles

1. Traitement des boîtiers blindés

1.1. Introduction

Le blindage est une enveloppe métallique continue, entourant un circuit, qui empêche les perturbations externes à parvenir dans le circuit (immunité aux rayonnements). Le blindage empêche aussi les émissions du circuit de rayonner à l'extérieur (émission rayonnée). Le blindage procure aussi un chemin de déviations à basse impédance.



Généralement, les circuits sensibles sont regroupés à l'intérieur d'une enveloppe blindée pour les protéger des perturbations. Les circuits perturbateurs sont également mis d'une autre enveloppe blindée pour limiter et protéger l'environnement extérieur des perturbations émises.

1.2. Epaisseur du blindage

En basses fréquences, le blindage doit être suffisamment épais ou d'une grande perméabilité (μ_r). Par contre en hautes fréquences, un très mince blindage en cuivre est largement suffisant. L'étude de l'efficacité du blindage magnétique revient à étudier l'effet d'une source basse fréquence sur l'efficacité du blindage magnétique d'un boîtier métallique avec ou sans ouverture (fente).

1.3 Efficacité du blindage

L'efficacité de blindage est le ratio entre le champ incident (E_i , H_i) et le champ transmis (E_t , H_t), ou alternativement, le champ avec le blindage et le champ sans blindage en un point donné. Une atténuation de 100 dB traduit une réduction d'un facteur 105 du champ incident. Dans ce cas, le blindage doit être complètement fermé, ce qui est impossible dans la réalité puisque

- Si la longueur d'un câble blindé est de $\lambda/4$, le câble peut devenir une source de rayonnement.

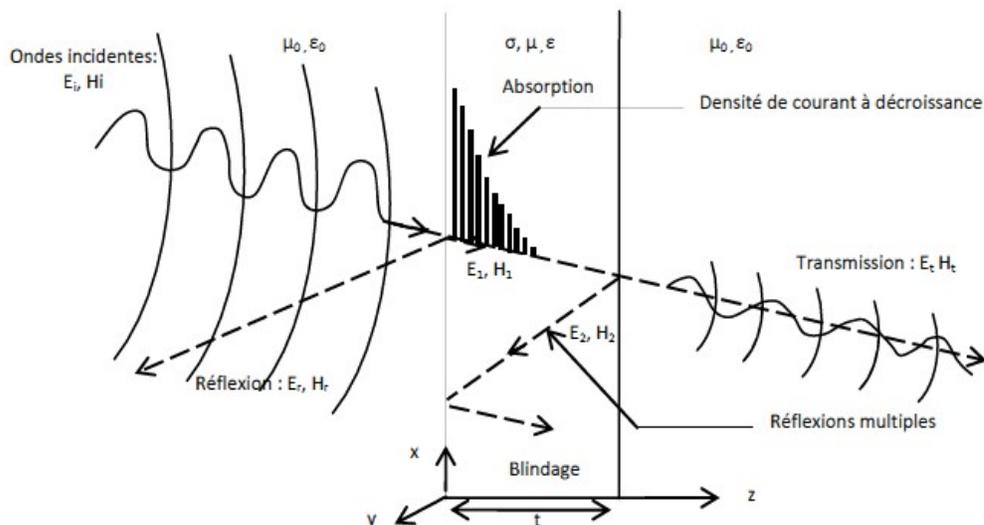
- Les ouvertures dans le blindage dégradent les performances du blindage. Elles sont considérées comme des antennes de rayonnement dont les dimensions sont identiques à celles de l'ouverture.

Efficacité de blindage est déterminée par cette expression:

$$E = \frac{\textit{intensite du champ coté perturbateur}}{\textit{intensite du champ coté victime}}$$

Champ électrique : $E_{dB} = 20 \log \left(\frac{E_{\text{perturbateur}}}{E_{\text{victime}}} \right)$,

Champ magnétique : $E_{dB} = 20 \log \left(\frac{B_{\text{perturbateur}}}{B_{\text{victime}}} \right)$



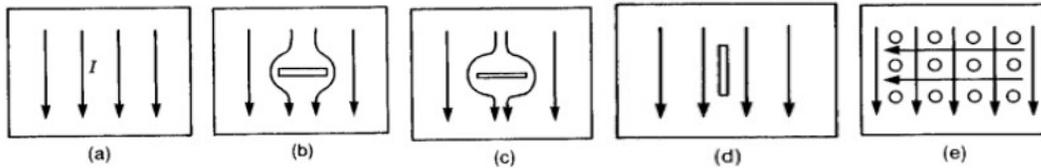
1.4 Influence de la fréquence sur l'efficacité du blindage

En basse fréquence, même une feuille d'acier de 0,5 mm n'atténue presque rien. Il faut augmenter l'épaisseur ou choisir des matériaux à haute perméabilité μ_r . Par contre en hautes fréquences, un blindage en cuivre même très mince est largement suffisant.

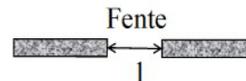
1.5 Ouverture des blindages

Des ouvertures (trous et fentes) sont aménagées dans le blindage pour: la ventilation, la mise en place des appareils de mesure, le branchement des connecteurs d'entrées et de sorties,... . Ces ouvertures diminuent considérablement les performances du blindage à réduire les champs électromagnétiques (EM) incidents. La présence des ouvertures déforme le trajet

des courants induits, si bien qu'un rayonnement existe, dépendant de la longueur du trou et de leur direction.

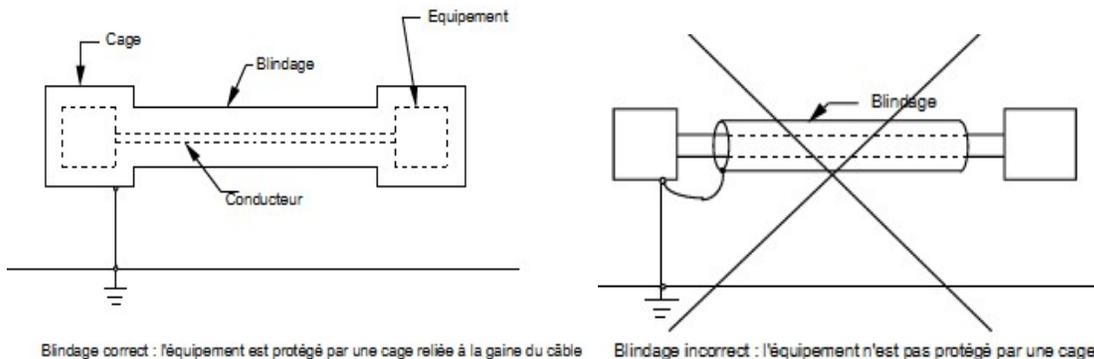


Les images a) à d) illustre la déformation de courant verticaux par différentes fentes. En b) et c) la déformation est quasi la même, presque indépendante de la largeur de la fente. En d) la fente parallèle aux lignes de courant ne provoque presque pas de déformation. De même en e) un réseau de petits trous déformera beaucoup moins les lignes de courant (quelque soit leur direction), qu'une ouverture unique de même surface totale. L'efficacité d'un blindage dépend de la longueur de la fente pratiquée et de la longueur d'onde considérée. Il est décrit par la relation ci-contre : $E_{dB} = 20 \log \left(\frac{2l}{\lambda} \right)$



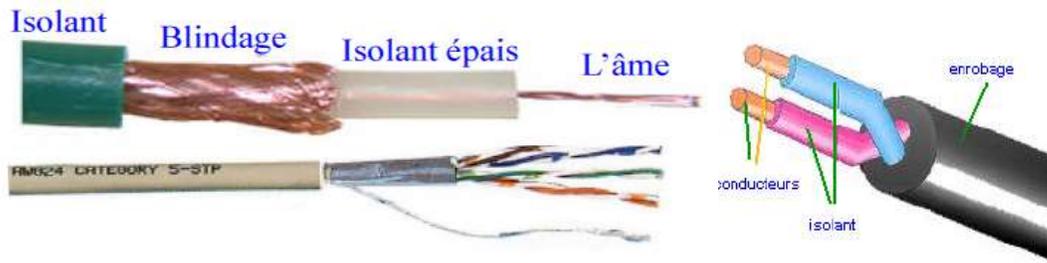
1.6 Continuité du blindage

Une des conditions les plus importantes pour assurer un blindage correct est de respecter la continuité du blindage entre une ou plusieurs enceintes blindées et les transmissions entre ces enceintes. L'intérieur du volume délimité par les parois des cages et les gaines des transmissions doit représenter topologiquement une zone uniforme où la réduction du champ électromagnétique par rapport à l'extérieur est la même partout. Par contre, si la connexion entre la gaine du câble blindé et les cages n'est assurée que par un fil, la condition de continuité n'est plus respectée.



Blindage correct : l'équipement est protégé par une cage reliée à la gaine du câble

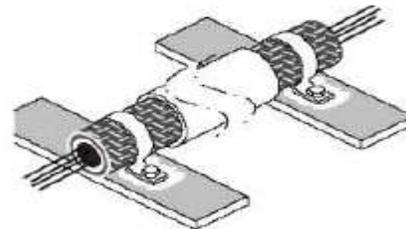
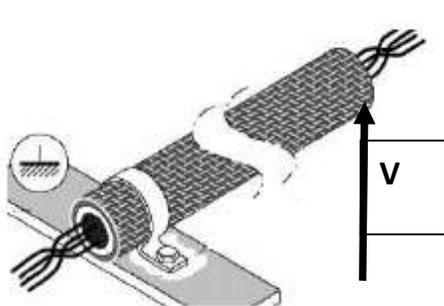
Blindage incorrect : l'équipement n'est pas protégé par une cage



1.7 Mise à la terre des blindages

Si les circuits à protéger n'ont aucune liaison électrique avec l'extérieur, le blindage n'a pas besoin d'être mis à terre pour être efficace. Mais un blindage à potentiel flottant induirait des perturbations dans les circuits à potentiel fixe avoisinants.

La mise à la terre permet d'évacuer les courants induits sur la face externe du blindage vers la terre. La mise à la terre assure aussi une protection en cas de défaut d'isolation. Dans le cas des câbles coaxiaux blindés, relié à une seule extrémité à la masse présente un danger mortel, une forte tension peut apparaître à l'extrémité non reliée à la masse. Pour cela, Le blindage doit donc être protégé contre les contacts directs.



La meilleure façon de raccorder le blindage

1.8.- Autre forme de blindage

Fenêtres blindées transparentes

Les affichages ou verres (écrans de PC, portière micro-onde,...) exigent de grandes ouvertures transparentes. Réseau de fils très fins (4 à 60 conducteurs par cm) disposés en 2 couches croisées, réseau de couches de carbone, Couche fine d'or

Boîtiers plastic

Recouvrir la face interne d'une couche conductrice (très mince) ou Mouler le plastic autour d'une feuille ou d'une structure conductrice, ou utilisation d'un adjuvant rendant la masse du plastic conducteur. Ces protections suffisent contre les décharges électrostatiques, mais pas assez contre les rayonnements électromagnétiques.

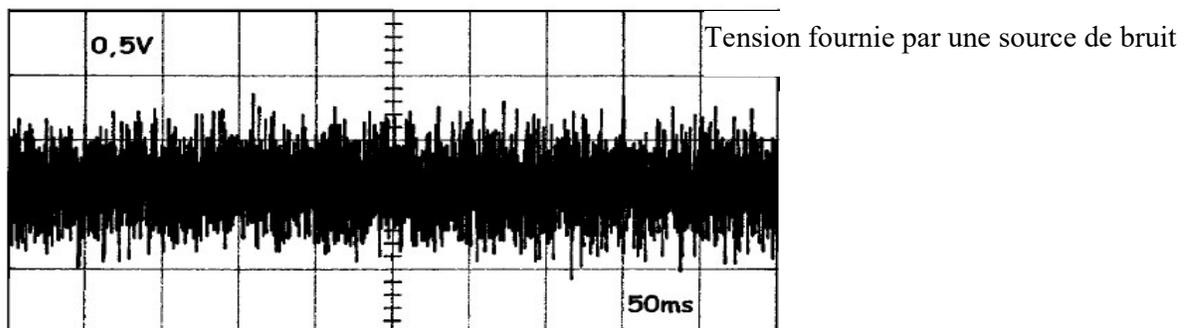
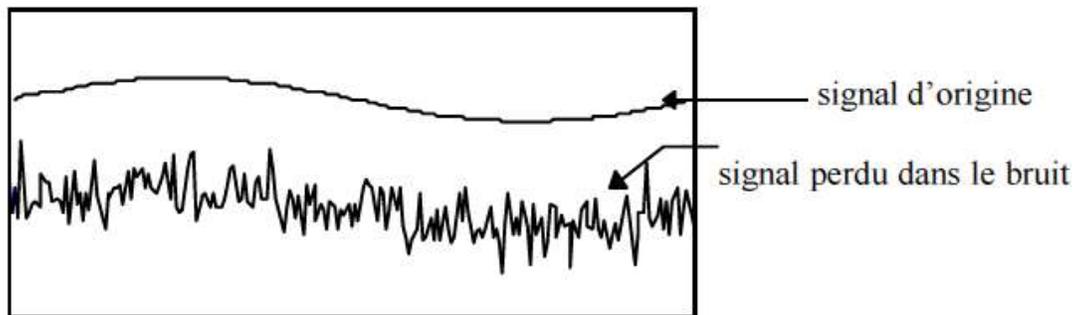
2. Sources de bruit

2.1 Introduction à la notion de bruit

Un signal est toujours affecté de petites fluctuations plus ou moins importantes. Ces fluctuations, dont les origines peuvent être diverses, sont appelées **bruit électrique**, **bruit de fond**, ou tout simplement bruit. On peut citer comme exemples :

- bruit de « friture » dans un récepteur radio entre deux stations ;
- bruit de souffle à la sortie d'un amplificateur.

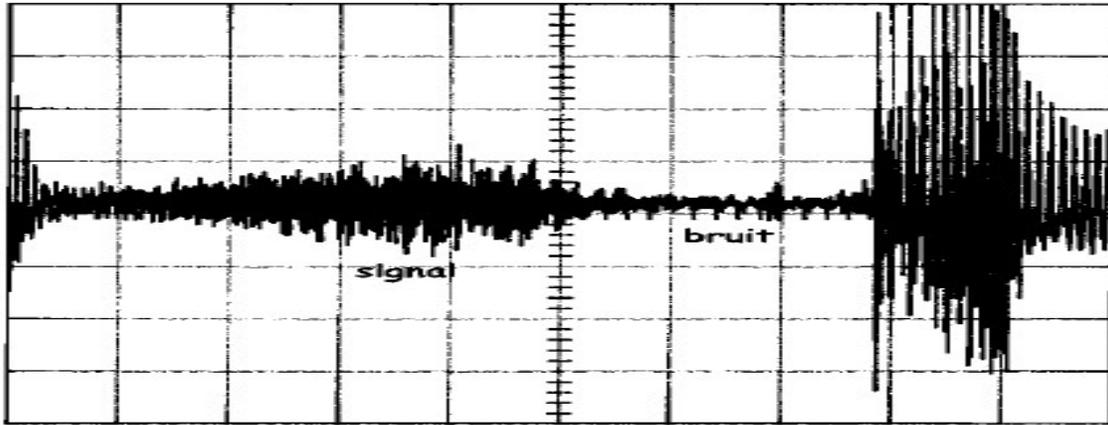
Un signal n'est jamais sans bruit. Simplement il peut être affecté d'un bruit plus ou moins important. Si celui-ci est très faible par rapport au signal, il devient invisible à l'oscilloscope.



Le bruit qui affecte le signal en sortie d'une chaîne de traitement a deux causes bien distinctes :

- **une cause extérieure** à la chaîne : c'est le bruit qui affecte déjà le signal à l'entrée de la chaîne et qui est amplifié et filtré avec le signal. l'antenne du récepteur capte le signal de l'émetteur, mais aussi des parasites industriels et le bruit de fond cosmique de tous les astres qui rayonnent des ondes électromagnétiques.

La tête de lecture du tourne-disque qui capte la musique inscrite dans le sillon mais aussi les bruits de surface, les vibrations de la platine et les décharges électrostatiques.



Bruit en sortie d'un récepteur FM

Pour ce type de bruit, une conception soignée du produit (mécanique, électronique, blindages, filtrages, etc ...) nous donne un bruit minimal en sortie.

- **une cause intérieure** : l'agitation thermique des électrons provoque des fluctuations aléatoires de la tension en tout point d'un circuit. C'est le bruit thermique qui existe toujours. On peut le diminuer en choisissant des composants à faible bruit mais on n'arrivera jamais à le supprimer.

Outre ce bruit thermique, il existe d'autres catégories de bruits, toujours associés à la nature discontinue des porteurs de charges.

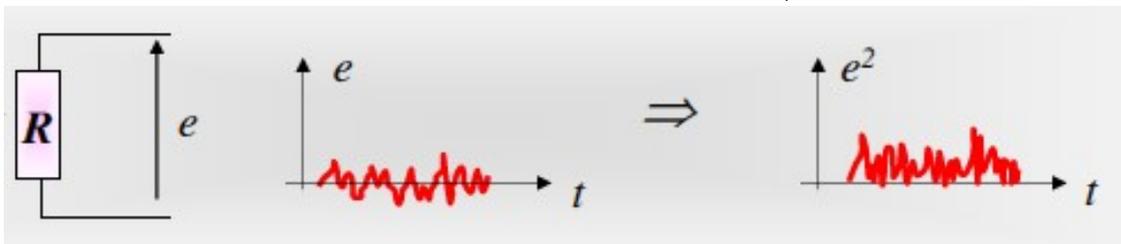
2.1.1 Valeurs moyenne et efficace d'un bruit

Les fluctuations étant aléatoires, $b(t)$ est aussi souvent positive que négative. Nous en déduisons un premier résultat important :

La valeur moyenne de tension d'un bruit est nulle : $\overline{e(t)} = 0$

Par contre, si nous élevons cette tension au carré avant de prendre la valeur moyenne, le résultat ne sera plus nul. Nous en déduisons que :

La valeur efficace d'une tension de bruit n'est pas nulle: $e_{eff} = \sqrt{\overline{e(t)^2}} \neq 0$



La tension de bruit est généralement mesurée par les voltmètres RMS.

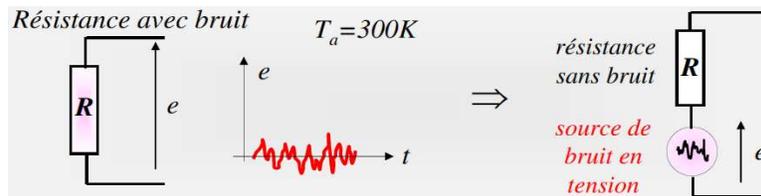
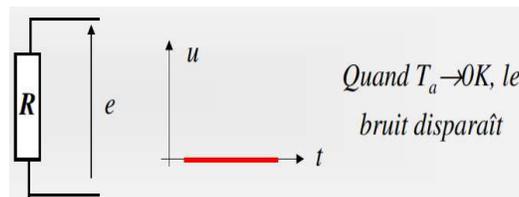
Les tensions de bruit sont en règle générale d'amplitude très faible et les voltmètres construits pour mesurer le bruit doivent être conçus pour avoir un bruit propre très faible.

2.2. Sources de bruits dans les circuits électroniques

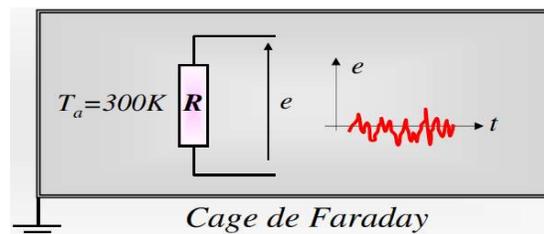
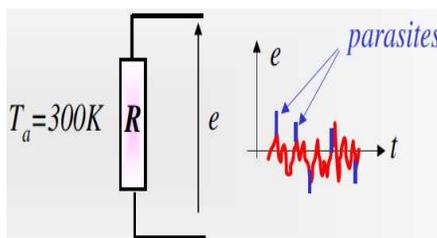
Il existe différents types de bruits en électronique dont : le bruit thermique, bruit de grenaille, bruit en inverse de la fréquence ($\frac{1}{f}$) ou bruit de flicker.

2.2.1. Bruit thermique

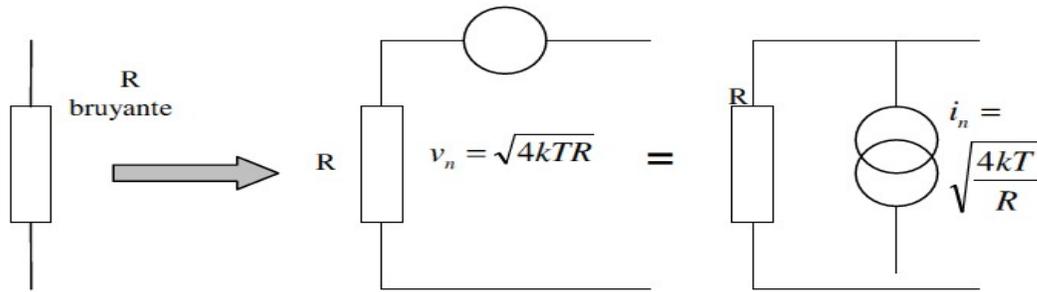
En absence de tout potentiel externe, si nous pouvions observer les électrons contenus dans un conducteur, nous verrions que l'ensemble de ces électrons sont animés d'un mouvement incessant et désordonné au lieu de rester immobiles. Ce mouvement, est dû à l'énergie thermique, si la température du conducteur pouvait être fixée à zéro degré Kelvin soit -273°C , cette agitation thermique serait inexistante. Depuis ce point théorique, l'agitation thermique augmente simultanément avec la température. La vibration des atomes autour de leurs positions d'équilibre entraîne une fluctuation spatiale de la densité électronique générant ainsi des courants et des tensions parasites. Le bruit thermique est observé dans des éléments résistifs



On peut supprimer les parasites électromagnétiques mais pas le bruit.



Le bruit d'une résistance :

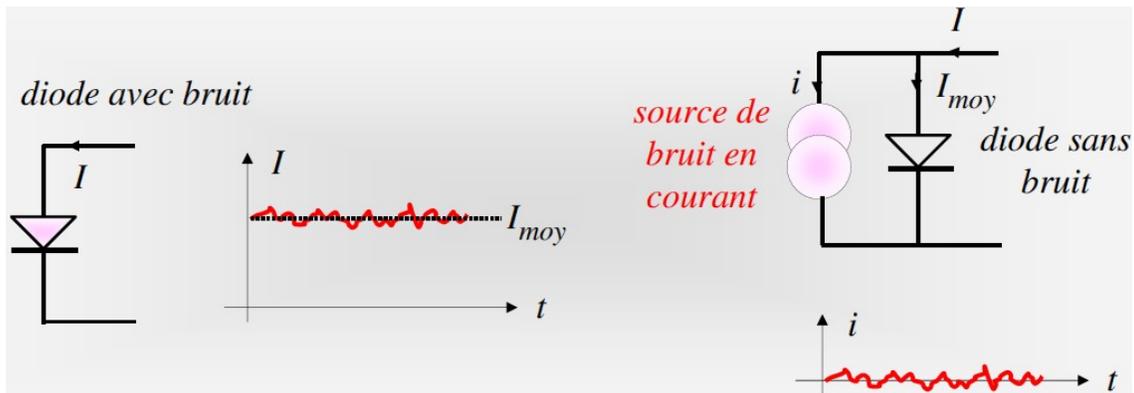


L'agitation thermique des porteurs de charges induit un courant et une tension aléatoires dans la résistance dont la puissance dans une bande passante de fréquence f :

$$P = K T f, K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}.$$

2.2.2 Bruit de grenaille

Le bruit de grenaille est lié au passage des porteurs de charges de manière aléatoire à travers des obstacles. Il apparaît dans les dispositifs parcourus par des courants dont la valeur moyenne est non nulle. Il existe dans toutes les jonctions où circule un courant électrique: Tube à vide et jonctions à semi conducteur; Le passage des électrons se fait de manière aléatoire et discrète.



Bruit dans une Jonction PN

Le passage du courant à travers la barrière de potentiel d'une jonction PN est dû aux électrons et aux trous qui traversent la zone de charge d'espace. Les porteurs sont injectés à des instants aléatoires, la traversée est très rapide, mais le nombre moyen de porteurs qui traversent par unité de temps est constant, c'est le courant continu. On peut représenter le courant par une succession d'impulsions arrivant au hasard.

Le bruit de courant est fonction de la charge d'un électron e , le courant continu I_{moy} circulant dans la jonction et Δf la bande passante, la valeur efficace du courant est donnée par cette expression :

$$i_{eff} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_{moy} \Delta f}, \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

2.2.3 Bruit de Flicker ou en 1/f

Le bruit en 1/f, est présent dans tous les composants actifs et dans certains composants passifs. Il est aussi appelé bruit de scintillation, bruit de scintillement, bruit de papillotement, bruit de basse fréquence, bruit en excès. Il fait partie des bruits roses ayant une courbe de puissance en 1/f. le bruit en 1/f décroît avec l'augmentation de la fréquence, la bande de fréquence où il est supérieur au bruit thermique tend à se rétrécir avec le progrès technologique et ne dépasse pas quelques dizaine de Hz pour les meilleures matériaux.

Ses origines sont variées, mais généralement il est du aux défauts :

- Des impuretés dans les matériaux
- Interface isolant-semi-conducteur
- Défauts dans un réseau cristallin

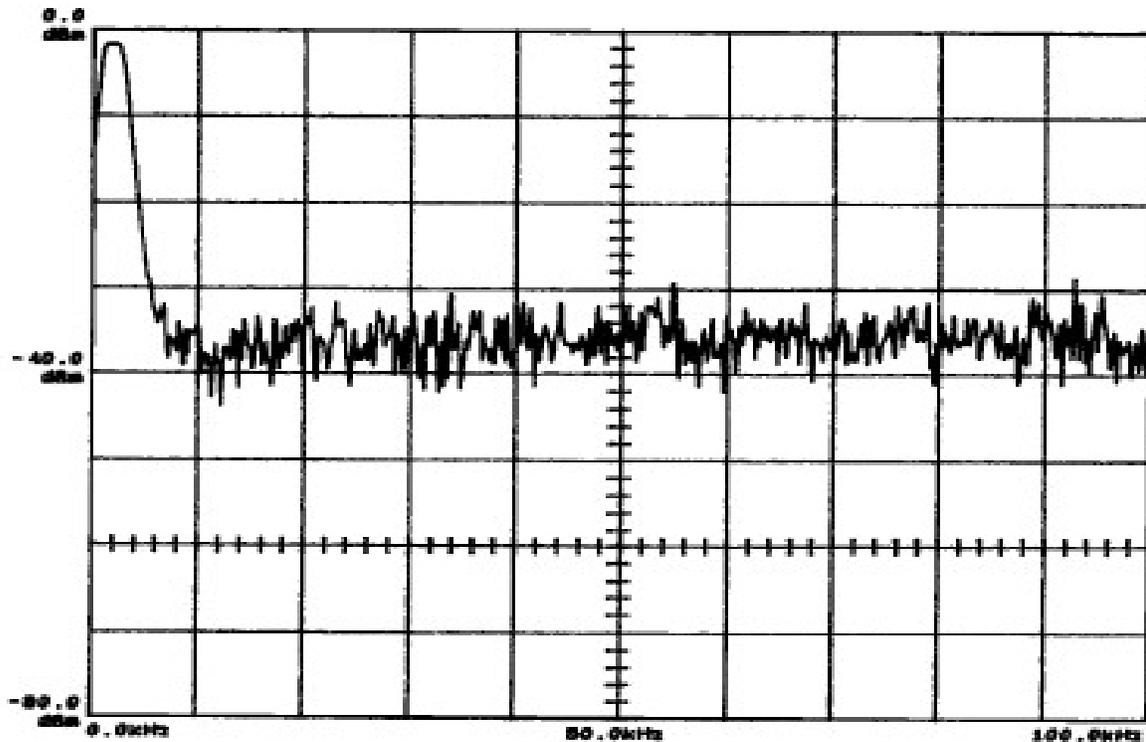
La densité spectrale du bruit de Flicker est de la forme : $D_{1/f} = k \cdot \frac{I^\alpha}{f^\beta}$

Avec : $0,5 < \beta < 1,3$ et $0,5 < \alpha < 2$

2.3. Spectre d'un bruit

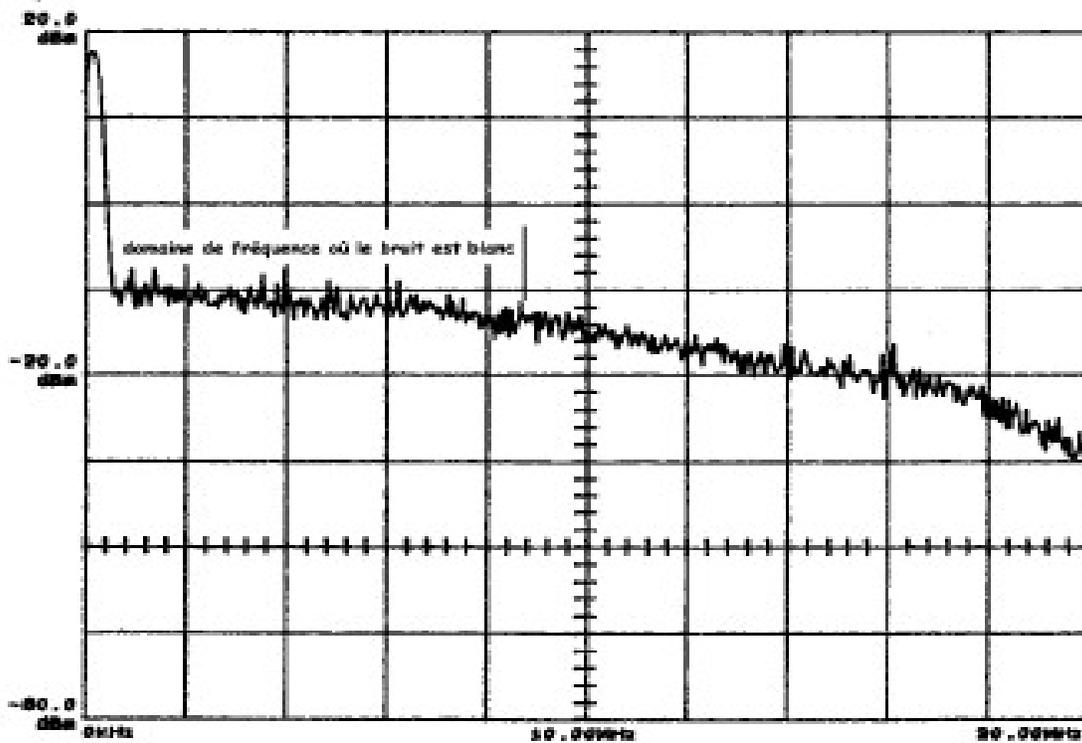
Le caractère aléatoire du bruit fait que les composante d'un bruit peuvent avoir toute les valeurs de la fréquence du continu jusqu'aux hautes fréquences

Le spectre d'un tel bruit est constant et continu sur toute la gamme des fréquences, et il a l'allure suivante :



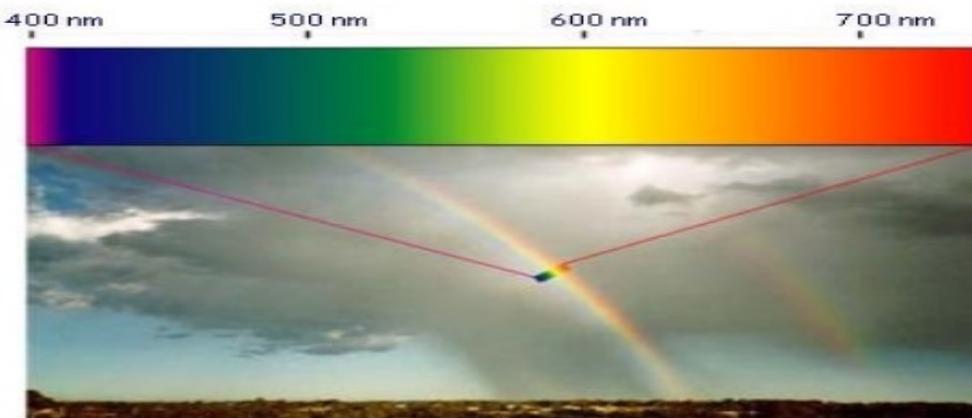
Un tel bruit est appelé blanc par analogie avec la lumière blanche qui est aussi un mélange de toute les fréquences. Cependant les fréquences très élevées sont forcément filtrées par les capacités parasite réparties dans le montage, ainsi dans la pratique le spectre d'un bruit thermique est toujours borné. Don on parlera de bruit blanc chaque fois que le spectre est constant dans une large bande de fréquences. Par exemple, un bruit ayant un spectre constant dans la gamme de fréquences 10 kHz à 100 kHz sera considéré comme bruit blanc.

La figure suivante présente le spectre d'un bruit blanc dans la gamme de fréquences 0- MHz



2.3.1 Bruit blanc et bruit coloré

La lumière blanche est composée de radiations de toutes longueurs d'onde entre 400 et 800 nm

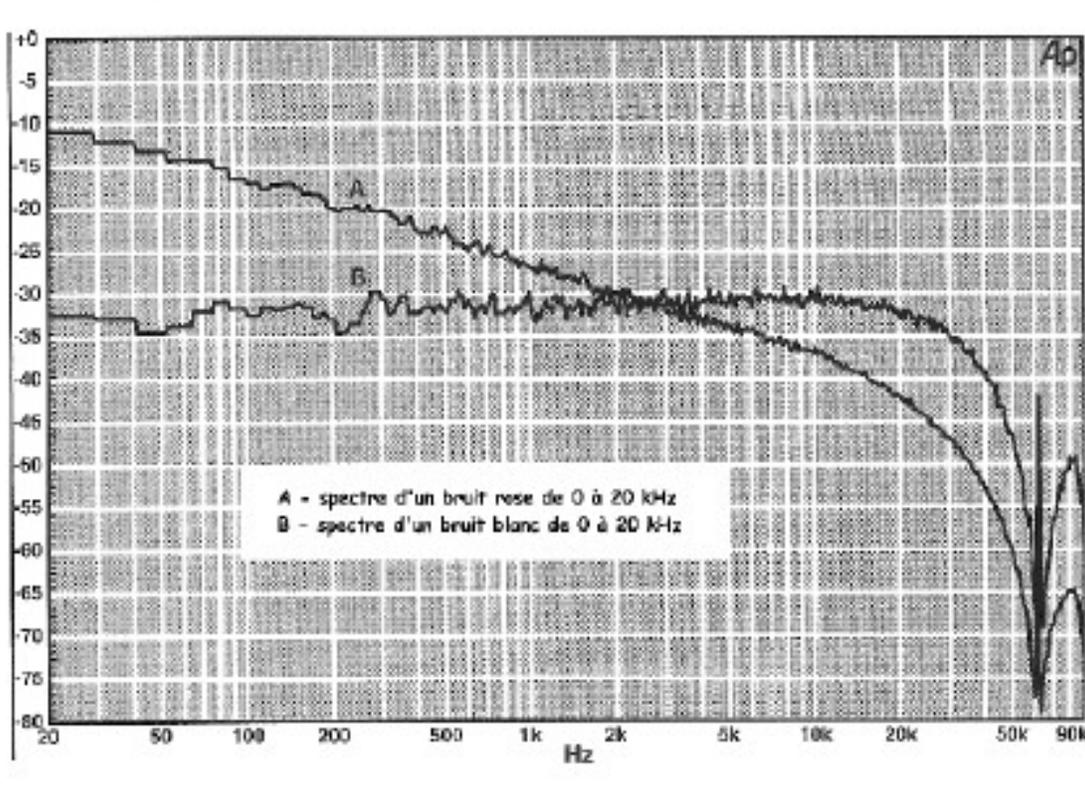


Lorsque la lumière contient davantage de radiations d'une certaine longueur d'onde, elle est colorée devient rouge si elle contient de grandes longueurs d'onde (fréquences basses) ou bleue si elle contient des radiations de longueur d'onde basse (fréquences élevées).

De la même façon et par analogie avec la lumière, lorsqu'un bruit traverse un filtre, certaines composantes sont atténuées. Le spectre n'est donc plus constant et on dit que le bruit est **coloré**.

- si les basses fréquences prédominent, on a un bruit **rose**
- si les fréquences élevées prédominent, on a un bruit **bleu**

Les bruits roses sont utilisés pour tes tests audio (amplis, enceintes), car ils ont une puissance par octave ou par tiers d'octave constante.



Spectre d'un bruit blanc et d'un bruit rose dans la bande audio.

3. Evolution des technologies

La course effrénée à la performance des circuits intégrés se traduit par des efforts technologiques colossaux permettant de doubler les performances des circuits intégrés tous les trois ans, ciblant en particulier les microprocesseurs et les mémoires.

Les progrès constants en procédés de lithogravure ont permis une réduction des dimensions des dispositifs actifs et interconnexions, afin d'accroître les vitesses de communication, de recevoir des systèmes intégrés plus complexes, tout en réduisant la consommation.

La lithographie industrielle la plus utilisée en 2011 correspondait à une dimension minimale des dispositifs de l'ordre de 22 nm, avec des recherches sur des dispositifs à l'échelle de 5 nm. En parallèle à la réduction des dimensions des dispositifs, le nombre de fonctions élémentaires intégrables sur une même puce n'a cessé de croître. Ainsi, il était possible d'intégrer plus d'un milliard de transistors en 22 nm.

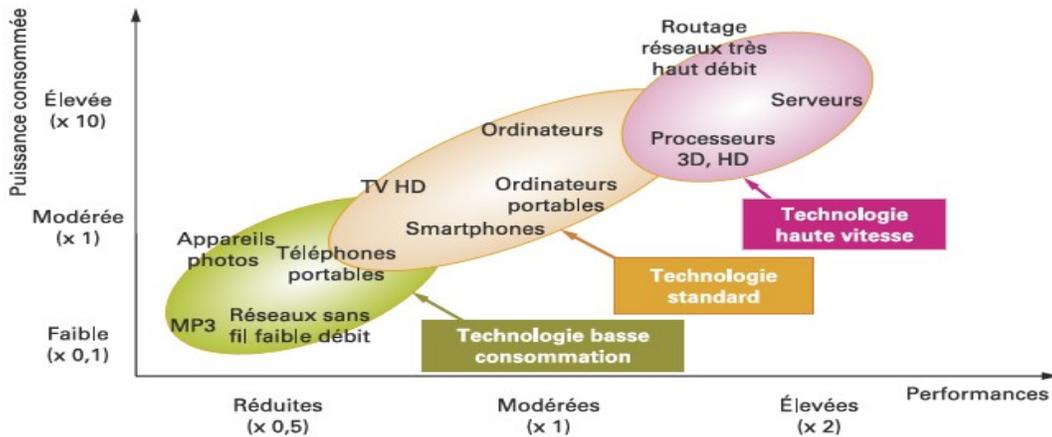
Génération technologique (année d'introduction)	Densité de portes (nombre portes/mm ²)	Point mémoire statique 6 transistors (µm ²)	Tension		Courant		Capacité intrinsèque (puce 20 x 20 mm) (nF) ⁽¹⁾
			Alimentation cœur (V)	Marge de bruit 10 % VDD (mV)	Élémentaire (mA/porte)	Pic (puce 20 x 20 mm) (A) ⁽¹⁾	
1,2 µm (1985)	1 500	250	5	500	1,1	1,65	7,5
0,8 µm (1990)	4 000	130	5	500	0,9	3,6	14
0,5 µm (1993)	10 000	60	5	500	0,75	7,5	21
0,35 µm (1995)	25 000	20	3,3	330	0,6	15	35
0,25 µm (1997)	50 000	12	2,5	250	0,4	20	38
0,18 µm (1999)	80 000	5	1,8	180	0,3	24	40
0,12 µm (2001)	200 000	2,4	1,2	120	0,2	40	45
90 nm (2003)	400 000	1,3	1,0	100	0,1	40	52
65 nm (2005)	800 000	0,6	1,0	100	0,07	56	64
45 nm (2007)	1 500 000	0,3	1,0	100	0,05	75	75
32 nm (2009)	2 800 000	0,17	1,0	100	0,04	112	84
22 nm (2011)	5 000 000	0,10	0,9	90	0,03	150	125
17 nm (2013)	8 000 000	0,06	0,9	90	0,025	200	160
11 nm (2015)	12 000 000	0,03	0,8	80	0,02	240	180

(1) Hypothèse : 10 % des portes commutent, facteur 10 d'étalement du courant, 25 % de la puce utilisée pour les portes logiques, 75 % pour les mémoires supposées inactives.

4. Conséquences sur la CEM

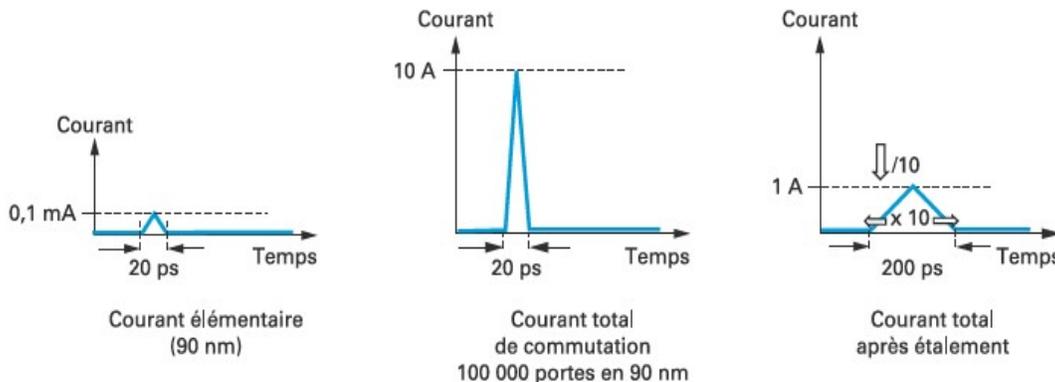
Du point de vue compatibilité électromagnétique, l'augmentation des performances des circuits intégrés s'accompagne par plusieurs effets parasites dont les conséquences sont particulièrement nuisibles: en particulier l'augmentation de la densité des composants (5 million de portes par mm²) et de la vitesse de commutation des portes logiques (autour de 10 pS pour des portes de 22 nm). La réduction des tensions d'alimentations diminue d'autant les marges de bruit, et la bande passante plus grande des entrées/sorties laisse craindre une plus grande fragilité aux agressions d'origines électromagnétique.

Même si le pic de courant élémentaire de chaque porte décroît un peu à chaque nœud technologique, Le temps de commutation plus rapide laisse craindre une augmentation du bruit de type di/dt.



Variantes technologiques au sein d'un même nœud

L'intégration de centaines de millions de portes et leurs commutations essentiellement synchrones sont à l'origine de pic de consommation de courant pouvant atteindre jusqu'à 1000 A dans un seul circuit.



Application d'un facteur d'atténuation au calcul du courant

5. Modélisation CEM et composants

La modélisation de l'émission parasite et de la susceptibilité des circuits électroniques et spécialement les circuits intégrés est une tâche d'autant plus délicate que le circuit est complexe dont les composantes interne peuvent aller jusqu'à une intégration 3D de puces hétérogènes, et qui sont difficilement accessibles. Cependant il est possible de construire un modèle à base des éléments simple (résistances, condensateurs, inductances, générateurs de courants) qui permettent une évaluation relativement précise des spectres tels qu'ils sont mesurés sur les composants.

Un exemple de modèle générique de composant, extrait de la proposition de norme IEC62433 est présenté dans la figure suivante, ou l'on retrouve les concepts tels que :

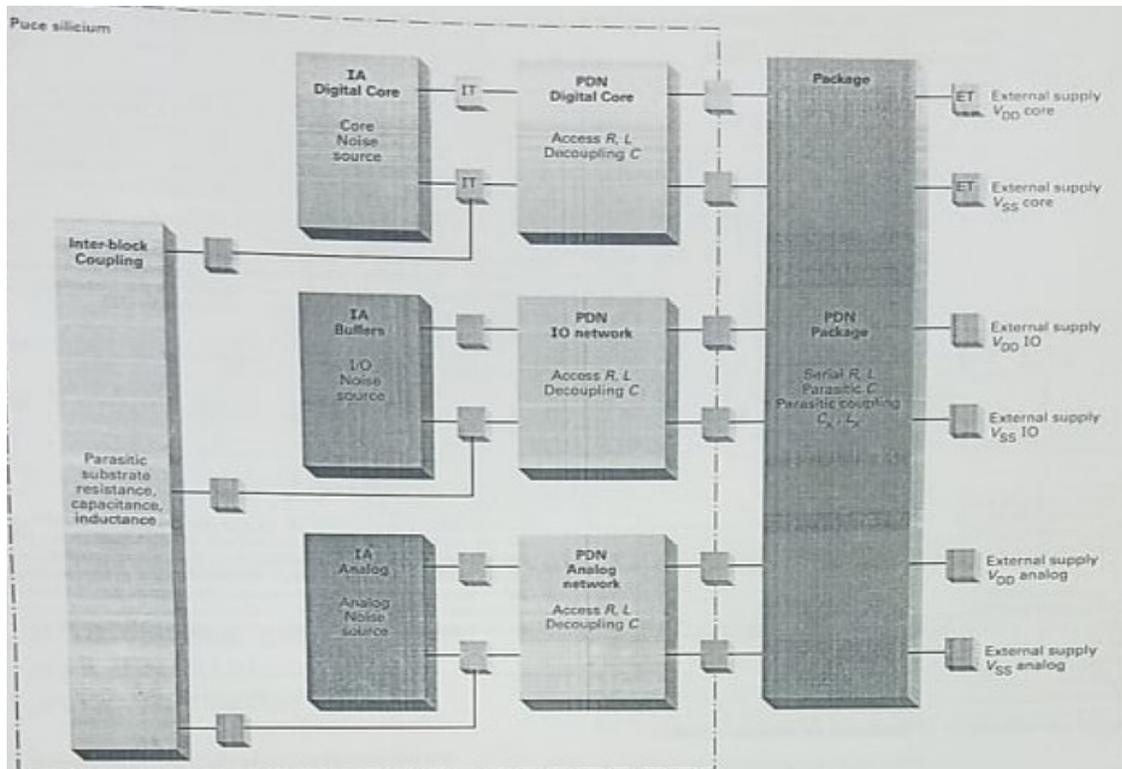
IA : modèle de l'activité interne, représentant la commutation des portes logiques (IA-Digital core), des entrees/ sorties (IA- Buffers), et des blocs analogiques (IA- Analog) ;

PDN : modèles des réseaux passifs d'interconnexion, d'alimentation, d'accès, de découplages, de bus internes ou de boîtiers ;

IBC : modèle des réseaux internes de couplage entre blocs dans lequel on trouve les couplages par substrat, par réseau commun interne, ou par couplage diaphonique de proximité ;

IT : représente un terminal interne ;

ET : représente un terminal externe.



Modèle générique d'émission proposé dans le cadre de la proposition de norme IEC62433

6. Rayonnement E, H

Le mécanisme de base du rayonnement d'un circuit intégré est basé sur trois éléments fondamentaux : le courant de commutation du circuit qui peut atteindre des pics de plusieurs centaines d'ampères ; La capacité équivalente du circuit C_d , incluse dans le PDN-Digital core selon la formation de la norme ; et les inductances du boîtier L_{VSS} et L_{VDD} , incluse dans le PDN-Package. L'ensemble constitue un circuit résonnant élémentaire comme il est présenté dans la figure suivante.

Le rayonnement de type magnétique prédominant. Les énormes pics de courant (10 à 1000 A selon la complexité des circuits) sont en partie absorbés par les étages de découplage, essentiellement capacitifs, mais une part importante circule dans les inductances cœur et boîtier, en provoquant un effet de type di/dt .

Lorsqu' un courant d'amplitude I circule dans un conducteur de diamètre d se situe a une distance R grande par rapport au diamètre du conducteur, le champ magnétique est calcule par cette relation : $H = \frac{I}{2\pi R}$

