

Introduction : bruit de fond et perturbations électromagnétiques

I. Définitions et classification

Selon le dictionnaire de l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), le **bruit électrique** (ou tout simplement le *bruit*) est défini comme étant « l'ensemble de toutes les perturbations indésirables qui se superposent au signal utile et ont tendance à masquer son contenu ».

Rheinfelder en 1964 (et plus tard Hartmann en 1976) ont énoncé des définitions semblables, tout en suggérant que **par signal indésirable, on doit sous-entendre un signal qui ne transporte pas d'informations utiles.**

Une précision supplémentaire est apportée par Chenette (1966) qui ajoute, dans la définition, l'idée que ces **signaux perturbateurs** sont **décrits uniquement par leurs propriétés statistiques**. Dès le début, Van der Ziel (1955) insiste sur le fait que, du point de vue théorique, le terme **fluctuations spontanées** semble plus adapté que **bruit**.

Quelles que soient les nuances de la définition adoptée, le bruit, qui est **présent dans n'importe quel système électronique** peut être classé en **deux catégories**, en fonction de son origine.

I.1. Bruit de fond (ou bruit électrique)

Il est **directement lié à la structure de la matière**. Dans les circuits linéaires, le **bruit trouve son origine, principalement, dans la nature corpusculaire de l'électricité et il est lié aux fluctuations aléatoires du nombre de porteurs traversant une section donnée**. Ce bruit est universel, dans le sens où il est **inévitable**. Il apparaît à **l'intérieur même des composants électroniques**.

L'exemple le plus significatif est le **bruit thermique**, provoqué par les **déplacements aléatoires des électrons dans un barreau métallique non soumis à une différence de potentiel externe**. La tension de bruit qui apparaît aux bornes du barreau a une valeur moyenne nulle, mais sa valeur efficace est donnée par l'équation :

$$V_b = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

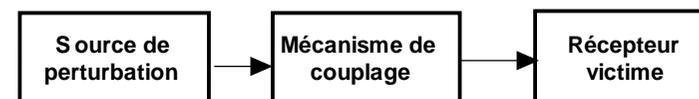
où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue (en Kelvin), R la résistance du barreau et Δf la bande de fréquence de l'appareil utilisé pour mesurer la tension.

D'autres types de bruit existent : le **bruit de grenaille** (dû au passage d'un courant à travers une structure inhomogène, comme la jonction PN par exemple), le **bruit en $1/f$** (dont les ori-

gines sont mal comprises, mais qui est lié aux défauts de tous genres dans la structure cristalline), le **bruit de diffusion** (associé au déplacement des porteurs lorsqu'un matériau semi-conducteur est soumis à une tension), etc.

I.2. Perturbations électromagnétiques (ou signaux parasites) ; CEM

Elles sont **créées par des sources de champ électromagnétique** (courants, tensions) ; **le champ ainsi créé peut se coupler avec des conducteurs** voisins ou éloignés, **y faisant apparaître des courants et des tensions parasites** : on parle d'**interférences électromagnétiques**.



Leur étude est le domaine de la **compatibilité électromagnétique (CEM)**. On distingue 2 grandes catégories de sources de perturbations EM :

- les sources de perturbations d'**origine naturelle** (perturbations atmosphériques, solaires, cosmiques, ...)
- les sources de perturbations provenant de l'**activité humaine**, qu'on peut aussi qualifier de sources **industrielles** ou **technologiques** (décharges électriques de haute tension, les moteurs électriques, l'effet Corona, les systèmes d'allumage des moteurs à explosion, la commutation des circuits, les signaux de radiodiffusion ou de télévision, les signaux radar, ...).

Les couplages électromagnétiques peuvent se produire :

- en **champ proche** ; on peut alors les modéliser à l'aide de circuits à constantes localisées (couplage capacitif, couplage inductif) ;
- en **champ lointain** ; il faut alors utiliser le champ électromagnétique (et les équations de Maxwell !).

Ces perturbations peuvent être **éliminées ou fortement diminuées par des blindages** (perturbations externes au système considéré) ou un **mode de construction et de câblage soignés** (perturbations internes).

I.3. Autre classification

On parle aussi parfois de **bruit interne** (aux composants) en ce qui concerne le **bruit de fond** et de **bruit externe** pour les perturbations électromagnétiques.

Intégrité du signal

L'intégrité du signal est une **spécialité de la compatibilité électromagnétique qui s'occupe de prédire et de maîtriser les caractéristiques d'un signal se propa-**

geant dans des interconnexions, qui peuvent être des interconnexions entre appareils, des interconnexions entre cartes électroniques d'un même appareil, des interconnexions entre composants d'une même carte électronique ou encore des interconnexions à l'intérieur d'un circuit intégré. Les phénomènes principaux traités en intégrité du signal sont l'écho, la diaphonie, les pertes, les décalages temporels fixes (skew), et variables dans le temps (jitter).

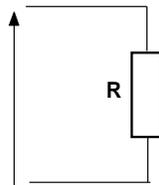
I.4. Rapport signal sur bruit

s(t) : signal utile de valeur efficace S

n(t) : bruit de valeur efficace N

Le rapport signal / bruit aux bornes du dipôle est défini par : $s(t)+n(t)$

$$SNR = \frac{\text{Puissance du signal utile}}{\text{Puissance du bruit}} = \frac{P_S}{P_B}$$



Les puissances de bruit et de signal sont dissipées dans la même résistance R :

$$SNR = \frac{S^2/R}{N^2/R} = \frac{S^2}{N^2}$$

$$SNR_{dB} = 10 \log \gamma$$

Une audition « confortable » en radiodiffusion requiert un rapport signal / bruit de 60 dB, 40 dB en téléphonie.

II. Comparaison entre le bruit de fond et les perturbations

II.1. Caractéristiques

Le bruit de fond est assimilable à un signal aléatoire de type gaussien.

Les perturbations électromagnétiques se prêtent moins à une description statistique, car elles peuvent être périodiques (par exemple 50 Hz), impulsionnelles ou aléatoires. Souvent ces perturbations résultent de la superposition de plusieurs parasites de types différents.

II.2. Bande de fréquences

Le bruit de fond se manifeste à toutes les fréquences qui nous sont accessibles, avec une dominante vers les basses fréquences, à cause du bruit en $1/f$. Ce dernier est aussi universel que le bruit thermique, mais moins bien décrit par des équations.

Dès que le bruit thermique et/ou le bruit de grenaille sont présents dans un circuit, on ne peut rien faire pour les supprimer complètement (bande de fréquences allant de zéro jusqu'à des fréquences souvent bien au-delà des limites physiques des circuits actuels).

Par opposition, chaque type de perturbation électromagnétique a un spectre beaucoup plus restreint, sur lequel nous avons plus ou moins d'informations (plus si elles sont d'origine humaine), ce qui facilite le filtrage et/ou la transposition de la bande utile du système en dehors de la région contaminée.

II.3. Amplitude

Le bruit de fond se situe à de très faibles niveaux ; à titre d'exemple, le bruit thermique d'une résistance de 100 kΩ, dans une bande élémentaire de 1 Hz et se trouvant à la température ambiante (300 K) vaut environ 40 nV.

Par comparaison, un courant de 1 μA (ce qui est très faible par rapport à ce qu'on rencontre habituellement) induit par une perturbation électromagnétique et traversant un fil de connexion vers la masse de résistance 4 mΩ produira la même tension.

Souvent les perturbations industrielles du voisinage génèrent des tensions parasites dont les amplitudes atteignant des fractions de volt, presque de la même valeur (sinon plus) que les signaux utiles du circuit étudié.

II.4. Évaluation

Le bruit de fond se prête bien aux calculs, qui conduisent à des estimations satisfaisantes dans la plupart des cas.

Les perturbations électromagnétiques du milieu environnant sont difficilement modélisées par des expressions mathématiques. Lorsqu'il s'agit de champs électromagnétiques perturbateurs, on doit faire appel aux équations de Maxwell ; on ne dispose alors pas d'une solution valable dans le cas général, ce qui explique pourquoi en pratique les signaux parasites sont évalués plutôt par des mesures in situ que par calculs.

II.5. Optimisation

Le seul remède contre le bruit de fond est de prendre celui-ci en compte très tôt, au moment de la conception. En dehors des objectifs qui lui sont imposés dans le cahier de charges, le concepteur doit se donner les moyens d'atteindre un rapport signal/bruit maximal (topologie du circuit, composants actifs et passifs, transistors, etc.).

Une fois la conception terminée, presque plus rien ne peut être entrepris pour diminuer le bruit de fond.

Pour les signaux parasites on dispose de moyens efficaces pour empêcher leur pénétration dans les circuits sensibles : blindage, filtrage, découplage, choix judicieux des points de masse, l'équilibrage des circuits, etc. Néanmoins, par souci de coût et d'efficacité ces moyens doivent être mis en oeuvre également dès la conception.

II.6. Nocivité

Les circuits analogiques travaillant avec des faibles signaux sont beaucoup plus sensibles au bruit de fond que les circuits logiques. Du fait que les signaux analogiques captés ont des amplitudes faibles (de l'ordre du millivolt ou du microvolt), des amplificateurs de gains élevés sont nécessaires pour les rendre utilisables. Le problème est que ces amplificateurs ajoutent leur propre bruit aux signaux qu'ils amplifient et de ce fait le rapport signal/bruit à la sortie est détérioré par rapport à l'entrée.

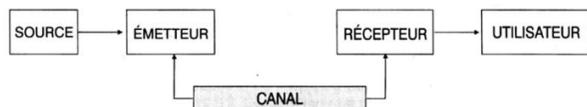
Par opposition, les circuits numériques opèrent avec des forts signaux, ce qui les rend insensibles au bruit de fond et aux parasites de faible amplitude. Par contre, ils génèrent eux-mêmes des perturbations électromagnétiques d'amplitudes élevées et peuvent ainsi s'auto-parasiter (en plus de perturber leur voisinage).

III. Importance du bruit

Les domaines cités ici en exemple ne sont pas les seuls où les problèmes de bruit interviennent, car dans la plupart des applications (imagerie médicale, systèmes radar, électronique d'instrumentation, systèmes électroniques embarqués, etc.), on retrouve les mêmes problèmes.

III.1. Systèmes de communications

La structure simplifiée d'un système de communication est représentée à la figure ci-dessous. Ce schéma correspond aussi bien à un système de transmission entre deux points éloignés qu'à un système dont l'entrée et la sortie sont situées en un même lieu (cas d'un radar ou d'un sonar par exemple).



Structure simplifiée d'un système de transmission.

Le rôle de l'émetteur est d'effectuer le codage (modulation) des informations émises par la source sous la forme d'un signal électrique convenablement adapté au canal. Autrement dit, le signal à transmettre est présenté sous une forme qui lui confère une immunité maximale aux perturbations existant dans le canal.

Au point de réception, l'opération inverse a lieu (démodulation), pour extraire l'information utile et la fournir à l'utilisateur.

En supposant que la source de signal est idéale (ni bruit interne, ni interférences), le signal émis vers le canal est contaminé uniquement par le bruit interne propre aux circuits de l'émetteur, qui reste quand même à un niveau faible par rapport au signal. Pendant la propa-

gation dans l'espace libre (ou dans un autre milieu), une multitude de parasites interfèrent avec le signal utile ; leur effet est accentué par l'atténuation importante subie par le signal pendant son trajet (qui peut atteindre des dizaines de milliers de kilomètres dans le cas des communications par satellite).

Pour cette raison, la première chose à envisager au niveau du récepteur est d'amplifier le signal reçu à des niveaux plus convenables, en filtrant une partie des perturbations superposées. Ensuite, par démodulation, on extrait le signal utile, mais il est inséparable du bruit interne qui l'a contaminé au niveau de l'émetteur. Pire encore, chaque étage du récepteur par où il passe ajoute son propre bruit.

Le seul degré de liberté de l'ingénieur reste la conception de circuits à faible bruit, surtout au niveau du récepteur, où le signal arrive avec une très faible amplitude.

On comprend donc l'importance de la pré-amplification et la nécessité de disposer à ce niveau non seulement de circuits à faible bruit interne, mais également bien protégés contre tous les parasites présents sur le site.

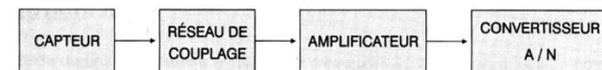
Par conséquent, dans tout système de transmission l'évaluation du bruit global est importante, pour deux raisons :

- le bruit détermine la limite inférieure du niveau du signal qui peut être traité par le système.
- la capacité du canal de transmission dépend du rapport signal/bruit existant à sa sortie. Shannon a prouvé qu'un système idéal a une capacité proportionnelle au logarithme de $(S + N)/N$, où S représente la puissance moyenne du signal et N est la puissance efficace du bruit.

Cela explique pourquoi il est nécessaire d'évaluer de façon quantitative le bruit qui existe dans les circuits d'un système de transmission.

III.2. Cas des applications industrielles

L'application industrielle typique présentée ici comporte un capteur qui transforme une grandeur physique non électrique (pression, température, débit, etc.) en un signal électrique (tension ou courant) de faible valeur. Ce signal est amené à l'entrée d'un amplificateur (figure ci-dessous) par l'intermédiaire d'un réseau de couplage, qui effectue une adaptation entre les deux étages.



Traitement d'un signal provenant d'un capteur.

À la sortie de l'amplificateur, le signal subit une conversion analogique-numérique, qui permet d'effectuer ensuite un traitement numérique et d'afficher sa valeur.

Le signal électrique fourni par le capteur est affecté par des perturbations aléatoires superposées au signal (bruit de fond) qui est déterminé principalement par le capteur et le premier étage de l'amplificateur ; les contributions des étages qui suivent sont souvent négligeables, pourvu que le gain du premier étage soit important.

Ce signal analogique est souvent de l'ordre de quelques millivolts, ce qui nécessite l'utilisation d'un amplificateur de gain très élevé et en même temps de faible bruit. Ces deux objectifs constituent des contraintes difficiles imposées à la conception.

Le signal qui se présente à l'entrée du convertisseur est donc affecté par le bruit du capteur et le bruit ajouté par l'amplificateur.

Afin d'avoir une précision accrue dans l'affichage de la valeur numérique correspondant à l'amplitude du signal analogique délivré par le capteur, le concepteur est tenté de choisir un convertisseur à très bonne résolution. Par exemple, pour une sortie pleine échelle de 5 V, il peut choisir entre un convertisseur à 10 bits (où le LSB vaut 5 mV) et un autre convertisseur à 16 bits, qui offre un LSB de seulement 77 μ V. Si le bruit total du signal analogique est supérieur à 100 μ V, il est évident qu'il est inutile de faire appel à un convertisseur de 16 bits !

En conséquence, chaque fois qu'une grande précision de la conversion A/N s'impose, toutes les sources de bruit intervenant en amont du convertisseur doivent être évaluées soigneusement, aussi bien internes qu'externes.