

## Avant-propos

Étant enseignant/chercheur à l'ESIGELEC depuis 1982, j'ai été confronté au « bruit en électronique radiofréquence » dans le cadre de mes activités d'enseignant, mais aussi durant mes travaux de recherche.

Pour mes activités d'enseignant, il s'est agi, dès la seconde moitié des années 1980, de bâtir des supports de cours, de travaux dirigés et de travaux pratiques sur ce sujet aussi bien pour les étudiants de l'ESIGELEC suivant des cursus dans le domaine des radiofréquences et des hyperfréquences que pour des techniciens et ingénieurs travaillant pour des sociétés de ces domaines.

En ce qui concerne mes activités de recherche, mon premier contact « en profondeur » avec le « bruit en électronique » remonte à l'époque de mon DEA puis de mon doctorat, quand il m'a fallu quantifier « à la main » l'impact de l'utilisation d'une « polarisation par charges actives » sur le facteur de bruit d'un « Mesfet monté en grille commune ».

Dans les deux cas, j'ai été confronté au même problème : des sources bibliographiques de niveau inadapté. La raison en est la suivante :

- soit on lit des documents de cours où seules les notions de base sont présentées et souvent de façon rapide en omettant parfois des détails de notations qui rendent l'information difficile à utiliser et toujours les longues démonstrations qui ennuient les étudiants, mais leur permettraient de comprendre ce qui se passe vraiment ;

- soit on lit des articles de journaux scientifiques et là les prérequis sont de haut niveau et les longues démonstrations, vitales pour l'utilisation correcte

des informations, doivent être reconstituées par le lecteur lui-même à partir des hypothèses fournies et du résultat donné. Cela peut prendre des jours, des semaines ou même des mois suivant le niveau de départ du lecteur.

C'est donc pour combler une partie du vide qui existe entre ces deux mondes que j'ai décidé de rédiger ce document pour synthétiser ce que j'ai appris d'essentiel sur le bruit pendant ces presque quarante années.

À cette occasion, je tiens à remercier particulièrement messieurs J.L. Gautier et D. Pasquet qui m'ont mis le pied à l'étrier sur ce sujet pendant mon DEA et mon doctorat, alors qu'ils étaient enseignants à l'ENSEA.

Je tiens aussi à remercier M. Rivette et J.B. Dioux, anciens élèves de l'ESIGELEC, qui m'ont donné envie de faire ce travail, alors que je corrigeais leur rapport intitulé « Facteur de bruit d'un atténuateur adapté ».

## Introduction

L'objectif de ce document est de fournir des informations précises au niveau des notations et argumentées qui permettront au lecteur :

- de mener à bien des calculs littéraux sur un circuit électronique pour en prévoir le comportement en bruit ;
- d'interpréter des résultats de simulation en bruit et de modifier de façon raisonnée le circuit pour en améliorer les performances vis-à-vis du bruit ;
- de conduire de façon structurée et cohérente des mesures de facteur de bruit ou des caractérisations en bruit et d'avoir un œil critique sur les résultats.

Pour arriver à ce résultat, certaines démonstrations, parfois longues, seront détaillées car c'est une bonne façon de comprendre ce que signifie réellement une formule ou une équation quand on est capable de refaire le chemin qui va des hypothèses au résultat ; en particulier, on comprend vraiment ce qu'est chacun des termes de cette formule ou de cette équation.

En termes de prérequis, le niveau est celui d'un électronicien qui connaît la loi d'Ohm, sait ce qu'est un générateur de tension ou de courant, qu'il soit libre ou lié à une consigne, et sait ce que sont une impédance et une puissance en régime harmonique. Il faut aussi des notions de base sur les nombres complexes, mais surtout avoir envie d'exploiter ses connaissances de base d'électronicien pour monter en compétences sur le sujet du bruit en électronique qui peut paraître, à tort me semble-t-il, un domaine difficile.

L'organisation de l'ouvrage est la suivante :

– dans le chapitre 1 nous mettrons en place les notions de bases sur le bruit en électronique comme les origines du bruit de fond en électronique et les grandeurs utilisées dans ce domaine avec en particulier la notion de facteur de bruit et son importance en télécommunications ;

– le chapitre 2 est exclusivement consacré à la formule de Friis qui joue un rôle essentiel dans la mesure de facteur de bruit, puisque aucun dispositif électronique n'échappe au bruit de fond, pas même l'appareil qui est utilisé pour faire la mesure de facteur de bruit. Cette formule, si fondamentale, est parfois si mal écrite qu'elle en perd toute utilité. Nous redémontrons cette formule avec un formalisme nettement plus lisible que celui utilisé dans l'article original de Friis (Friis 1944) ;

– dans le chapitre 3 nous nous intéresserons au cas des dispositifs passifs qui ont un comportement en bruit particulier puisque l'on peut le prédire à partir de leur comportement petit signal. Nous le ferons sur un exemple – un atténuateur adapté – avant d'examiner le théorème de Bosma ;

– dans les chapitres 4 et 5 nous verrons comment faire des mesures pour déterminer, dans un premier temps, le facteur de bruit sur  $50\ \Omega$  pour un quadripôle adapté  $50\ \Omega$ , puis ensuite comment caractériser complètement en bruit un dispositif quelconque. Nous mettrons en évidence les besoins en matériels, en calibrations et en calculs qui sont très différents dans les deux cas ;

– quelques exercices sont proposés dans le chapitre 6. Ils permettront au lecteur de mettre en application les méthodes décrites dans les chapitres précédents et d'obtenir de nouveaux résultats, en particulier sur les transistors.

En complément, le lecteur trouvera, sous forme d'annexes, des informations utiles dans le contexte du bruit sur les paramètres admittances, la matrice  $S$ , le graphe de fluence et la règle de Mason puis, pour terminer, sur les ondes de puissance de bruit. Un lecteur peu familier avec les paramètres admittances et les paramètres  $S$  aura intérêt à lire les trois premières annexes avant la lecture de cet ouvrage.

Il faut préciser qu'il n'y a pas de résultats nouveaux sur le bruit dans cette étude, mis à part les quelques résultats issus de mesures faites avec les bancs

de l'ESIGELEC. En revanche, la formulation de certains problèmes a été revue afin de les rendre plus facilement compréhensibles pour un lecteur peu familier avec le domaine du bruit de fond en électronique et pour qu'il puisse en tirer profit.

Bien que la littérature soit abondante sur le sujet du bruit dans les revues scientifiques, la bibliographie citée dans cet ouvrage se limite au strict nécessaire pour rendre hommage aux pionniers dans le domaine qui, dès les années 1940, ont formalisé un certain nombre de concepts, nouveaux à l'époque, mais qui sont toujours d'actualité, pertinents et utilisés. Néanmoins, certains articles plus récents sont utilisés, en particulier sur la problématique du bruit dans les transistors en technologie RFCMOS.