

## **Etude et évaluation d'un système à pré-distorsion RF digitale**

Ing. A. RAHMEH  
ECAM – Bruxelles

*La plupart des chaînes de transmission hautes fréquences ont un amplificateur de puissance (PA). Celui-ci présente cependant une caractéristique non linéaire qui s'accroît avec l'amplitude du signal. Un moyen pour résoudre ce problème et ainsi éviter la distorsion du signal consiste à linéariser la caractéristique du PA. La solution présentée dans cet article est basée sur le principe de pré-distorsion.*

*Mots-clés : pré-distorsion, linéarisation, distorsion, caractéristique non-linéaire, DSP Builder*

*Most of transmission chains have a high frequency power amplifier (PA). They have, however, a non-linear characteristic that increases with signal amplitude. A solution to address this problem and avoid signal distortion is to linearize the characteristic of the PA. The solution presented in this article is based on the principle of predistortion.*

*Keywords: predistortion, linearization, distortion, non-linear characteristic, DSP Builder*

## 1. Introduction

La conception d'un amplificateur de puissance (PA) doit répondre à un cahier des charges stipulant une distorsion limitée du signal. Une technique possible s'appelle le « back-off ». Elle implique un surdimensionnement du PA pour pouvoir rester dans des limites acceptables de distorsion. La consommation de ces PA est alors importante (et donc coûteuse) et leur dissipation thermique pose problème dans le cas d'utilisation en lieu clos. Une solution à ce problème est la linéarisation du PA qui peut être effectuée de plusieurs manières. L'idée de base est de compenser la distorsion générée par le PA pour ainsi élargir sa zone linéaire. La solution qui fait l'objet de cet article consiste à pré-distordre le signal de manière digitale avant son passage dans le PA. Cette solution permettant d'augmenter la zone linéaire du PA assure ainsi la validation du cahier des charges au moyen d'un PA plus modeste.

L'article débute par l'exposé du problème. Suit une partie théorique présentant l'amplificateur de puissance et ses caractéristiques utiles pour la compréhension. Viennent ensuite la présentation du problème de non-linéarité et une manière de modéliser le PA par le modèle de Volterra.

L'introduction théorique à la non-linéarité du PA est suivie d'une brève présentation des principales techniques de linéarisation.

Enfin, cet article se termine par une explication théorique de la pré-distorsion réalisée de deux manières différentes. La première consiste à baser la pré-distorsion sur une table de correspondances contenant des valeurs corrigées du signal. La seconde se base quant à elle sur l'implémentation d'un polynôme qui corrige le signal. Le résultat obtenu au moyen de cette deuxième méthode est présenté au terme de l'explication théorique.

## 2. Domaine d'application

Les amplificateurs de puissance analysés dans ce travail s'inscrivent dans une chaîne destinée à assurer la continuité de la réception de signaux RF (Radio Frequency) à l'intérieur des tunnels. Le schéma suivant présente la situation.

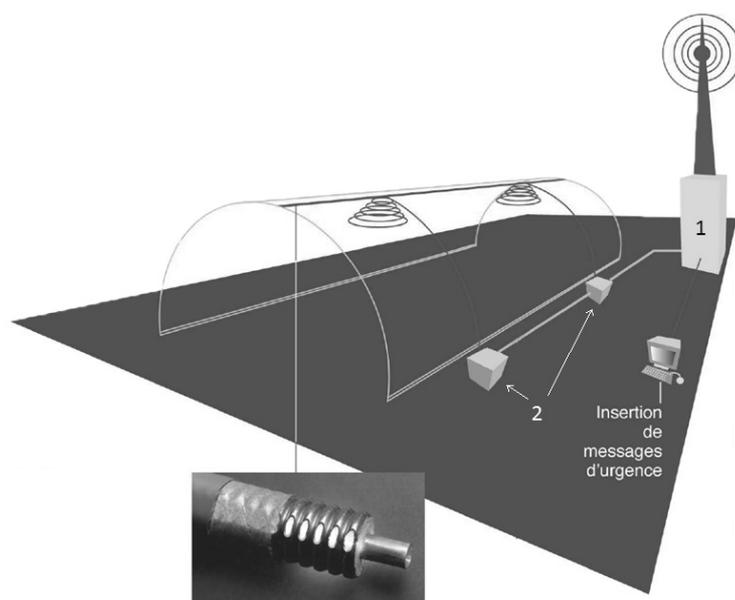


Figure 1 – Application : retransmission de signaux dans un tunnel ([www.tdf.fr](http://www.tdf.fr))

On retrouve différentes parties essentielles à la retransmission de signaux dans un milieu confiné.

- (1) Sur la partie supérieure droite de l'image se trouve la « tête du réseau » constituée d'une antenne assurant la réception des signaux de l'extérieur. Ces signaux sont captés, filtrés, adaptés et transmis vers le tunnel par une fibre optique.
- (2) A l'autre bout de la fibre se trouvent les sous-stations qui permettent de réaliser la transition entre la fibre optique et le câble rayonnant. C'est dans ces sous-stations que l'on retrouve l'amplificateur de puissance sur lequel porte cet article.
- Enfin, la retransmission est effectuée dans le tunnel grâce au câble rayonnant qui est un câble coaxial sur lequel ont été pratiquées des ouvertures à distance régulière permettant d'obtenir un champ homogène réparti sur toute sa longueur.

Ce système peut également être utilisé par les services de secours pour assurer le suivi de la transmission des messages dans le tunnel (via le standard d'entente TETRA (TERrestrial TRunked RAdio)) mais également pour prévenir les automobilistes. En effet, il est possible d'émettre des messages d'urgence sur toutes les ondes radios et d'y inclure en plus un message en RDS (Radio Data System) pour qu'il s'affiche sur l'écran des autoradios compatibles.

### 3. Aspects théoriques de l'amplificateur de puissance

Le rôle de l'amplificateur de puissance est d'augmenter la puissance d'un signal électrique. En théorie, l'amplification est réalisée sans déformation du signal amplifié. Ce qui veut dire que le signal récupéré en sortie est une image du signal d'entrée multipliée par une valeur précise appelée « le gain ».

#### 3.1 Gain et linéarité

L'amplificateur idéal répond à l'équation :

$$Y = G + X$$

où : X : l'entrée [dBm]  
Y : la sortie [dBm]  
G : le gain [dB]

On travaille en décibels [dB] par souci de facilité. En effet, dans ce cas, les multiplications sont de simples additions tandis que les divisions sont des soustractions.

Le passage en [dBm] se fait de la manière suivante :

$$P \text{ [dBm]} = 10 * \log\left(\frac{P \text{ [W]}}{1 \text{ [mW]}}\right)$$

où : P est une puissance

Le dBm est une valeur absolue alors que le dB est une valeur relative.

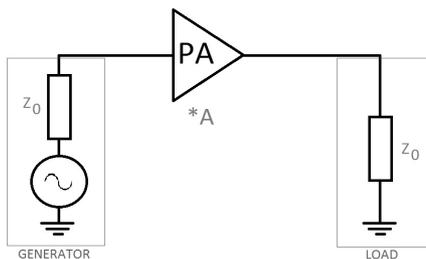


Figure 2 – Schéma de l'utilisation du PA

Sur la figure 2 se trouve un schéma simplifié reprenant le cas d'utilisation d'un PA. Sur ce schéma,  $Z_0$  représente l'impédance caractéristique de la ligne utilisée.

Un amplificateur est composé d'un ou plusieurs étages de transistors en fonction du type d'amplificateur et de son gain.

Le PA dispose de son gain sur une bande de fréquence appelée « bande passante ». Idéalement, le gain reste constant sur toute son étendue.

De plus, pour un PA idéal, le gain reste constant quelle que soit la puissance mise en entrée de celui-ci. On dit aussi que le gain est linéaire. En pratique, ce n'est pas tout à fait vrai.

La linéarité est un élément-clé de la caractéristique d'un PA. Elle permet en sortie de garder une image « propre » du signal d'entrée amplifié. Cette « propriété spectrale » est caractérisée par divers paramètres en fonction de la norme du signal utilisé.

## 4. Non-linéarité

Ce point comprend d'une part le paramètre utilisé pour caractériser la non-linéarité d'un PA et d'autre part une manière de modéliser un PA tout en tenant compte de la non-linéarité de sa caractéristique.

### 4.1 Intermodulation : TOIP

L'utilisation du PA implique inévitablement l'apparition de signaux d'intermodulation. On parle aussi simplement d'« intermodulation » qui se caractérise par l'apparition de composantes fréquentielles.

Ces signaux d'intermodulation sont d'autant plus gênants que la puissance du signal mis en entrée du PA devient grande. On retrouve des intermodulations à plusieurs fréquences différentes en fonction de leur nature.

La technique « deux tons » est une technique de base permettant de quantifier les intermodulations générées par le PA.

Pour ce faire, deux tons sont générés à deux fréquences différentes ( $F_1$  et  $F_2$ ). Le signal est ensuite envoyé à l'entrée du PA :

- Si l'amplificateur est parfaitement linéaire, on retrouve à sa sortie les signaux amplifiés aux fréquences  $F_1$  et  $F_2$ .
- Si l'amplificateur n'est pas parfaitement linéaire, d'autres fréquences que  $F_1$  et  $F_2$  seront visibles. Ces autres fréquences sont  $F_1+F_2$ ,  $F_1-F_2$ ,  $2*F_1-F_2$ ,  $2*F_2-F_1$ , etc. On peut les noter de façon générale :  $nF_1+mF_2$  (où  $n$  et  $m$  sont des entiers relatifs).

Les intermodulations générées aux différentes fréquences sont classées par ordre. L'ordre étant égal à la somme des valeurs absolues de  $m$  et  $n$ .

Voici une représentation de la technique « deux tons » :

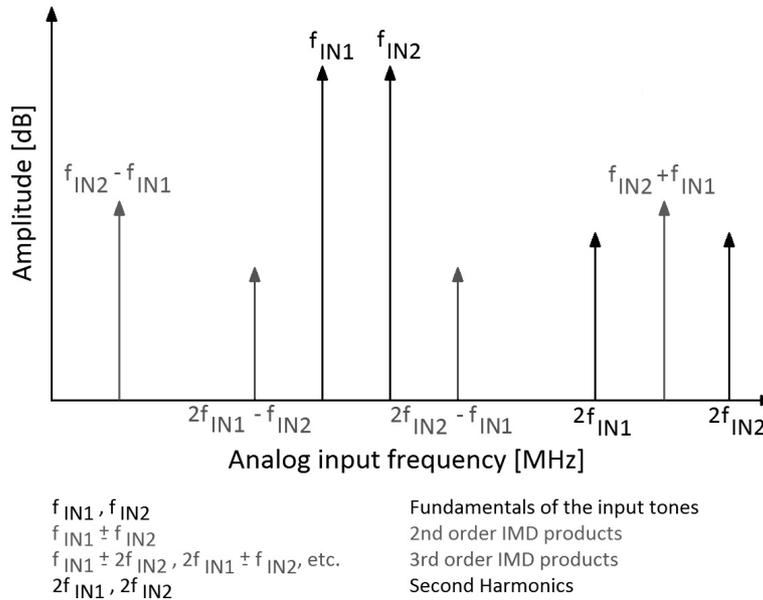


Figure 3 – Mesure « deux tons »

Les composantes d'intermodulation les plus dérangeantes sont les composantes correspondant à l'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre ou tout simplement de rang impair (5, 7,...).

D'une part, leurs amplitudes sont non négligeables et d'autre part, ces intermodulations se trouvent dans des zones fréquentielles fort proches des zones utiles. Ce dernier point implique qu'il est impossible de réaliser un filtrage correct de ces intermodulations sans empiéter sur le signal utile.

En ce qui concerne les intermodulations d'ordre pair, il est imaginable de réaliser un filtrage pour s'en débarrasser.

Dans le cadre de cet article, on s'intéressera uniquement aux composantes d'intermodulation d'ordre 3 qui sont (comme on le voit sur la figure 3) les plus proches des deux tons (le signal utile).

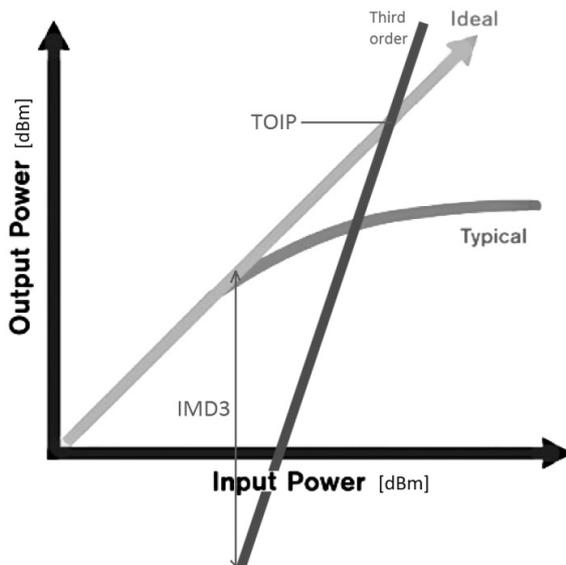
Le niveau de l'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre peut être mesuré comme suit :

$$\text{IMD}_3 = P_O - P_{O3} \quad [\text{dB}]$$

L'IMD3 correspond à la différence en décibels entre les composantes fondamentales et les composantes d'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre.

Pour caractériser l'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre, il existe un paramètre particulier : le TOIP (Third-Order Intercept Point = Point d'intersection du 3<sup>ième</sup> ordre).

C'est un paramètre permettant de caractériser un PA. Il se mesure sur le graphique de la fonction de transfert du PA (figure 4) comme étant le point



d'intersection entre la droite idéale de linéarité et la droite de réponse du 3<sup>ème</sup> ordre. Cette droite ayant une pente de coefficient 3. Le graphique présent sur la figure 4 illustre le TOIP. Notons que l'IMD3 est représenté sur cette figure comme l'écart entre la droite idéale et celle du 3<sup>ème</sup> ordre.

Figure 4 – Third-Order Intercept Point (TOIP)

L'amplitude du TOIP est donnée par

$$\text{TOIP} = \text{IMD}_3/2 + P_o = \frac{1}{2} (3*P_o - P_{o3}) \text{ [dBm]}$$

Dans les diverses applications, on essayera d'avoir le TOIP le plus haut possible pour ainsi bénéficier d'une distorsion limitée à haute puissance.

#### 4.2 Modélisation du PA par série de Volterra

Le développement en série de Volterra permet de modéliser tout système non linéaire sous la forme d'un polynôme. Il est fort similaire au développement de Taylor si ce n'est que le développement par Volterra permet de tenir compte de l'effet mémoire. Ceci veut dire que la modélisation du système ne se fait pas uniquement par rapport aux valeurs présentes mais également en tenant compte des valeurs passées. De plus, cette modélisation tient également compte du fait que la non-linéarité dépend des fréquences en entrée et de celles auxquelles se trouve l'intermodulation à la sortie du PA.

La figure 5 montre une manière de représenter schématiquement le PA. H1, H2 et H3 sont des noyaux représentant respectivement les ordres d'intermodulation 1, 2 et 3. Grâce à la modélisation par série de Volterra, il est possible de connaître la caractéristique de chacun de ces noyaux pour ainsi modéliser le PA en tenant compte de son aspect non linéaire.

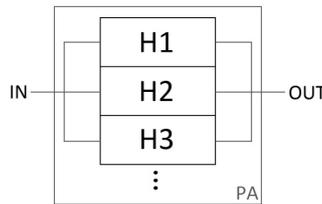


Figure 5 – Schéma bloc du PA

La figure 6 présente une décomposition d'un signal initial composé de deux tons après son passage dans le PA. Dans le cas de cette figure, on suppose que les non-linéarités du PA se limitent aux 3<sup>ième</sup> et 5<sup>ième</sup> degrés comme présenté dans l'équation suivante.

$$v_o(t) = a_1 v_i(t) + a_3 v_i^3(t) + a_5 v_i^5(t)$$

On se rend compte que les deux tons sont constitués des composantes du 1<sup>er</sup>, 3<sup>ième</sup> et 5<sup>ième</sup> degré. L'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre qui nous intéresse principalement dans ce travail est quant à elle constituée de composantes du 3<sup>ième</sup> et 5<sup>ième</sup> degré. Du fait que l'on s'intéresse uniquement à l'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre, seules les non-linéarités de degrés impairs sont prises en compte dans le modèle.

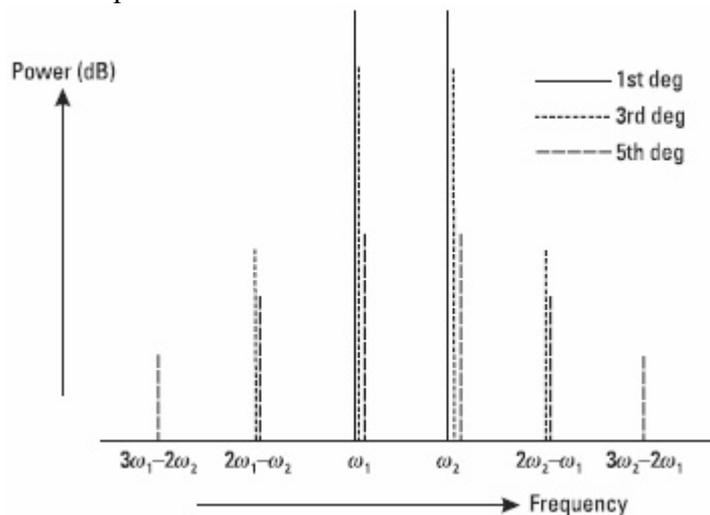


Figure 6 – Décomposition des composantes d'intermodulation [3]

Prenons à présent le cas utilisé dans ce travail, à savoir : les deux tons :

$$v_i(t) = v \cos \omega_1 t + v \cos \omega_2 t$$

En introduisant cette expression dans le polynôme du 5<sup>ème</sup> degré présenté plus haut, nous pouvons exprimer le signal que l'on retrouve en sortie du PA dans le cas où deux tons sont placés en entrée. Après un développement mathématique conséquent, on obtient l'expression suivante pour représenter le niveau de sortie des deux tons (composantes fondamentales) :

$$v_{ofund} = \left\{ a_1 v + \frac{9}{4} a_3 v^3 + \frac{25}{4} a_5 v^5 \right\} \cos(\omega_{1,2} t)$$

Les composantes de l'intermodulation du 3<sup>ème</sup> ordre sont alors données par :

$$v_{oIM3} = \left\{ \frac{3}{4} a_3 v^3 + \frac{25}{8} a_5 v^5 \right\} \cos(2\omega_{1,2} - \omega_{2,1})$$

En plus de connaître l'amplitude des différentes composantes obtenues par le passage dans l'élément non linéaire, le modèle basé sur Volterra prend également en compte la phase de chaque composante non linéaire,  $\phi_1, \phi_3, \phi_5$  dans notre cas. Ces différentes phases ont une valeur pouvant aller de  $-\pi$  à  $\pi$ . L'addition des différents éléments non linéaires doit donc se faire de manière vectorielle comme présenté à la figure 7. Dans cette figure, on suppose un système modélisé en s'arrêtant à l'élément linéaire du 3<sup>ème</sup> degré. Elle présente donc le calcul des composantes fondamentales dans le cas de ce système.

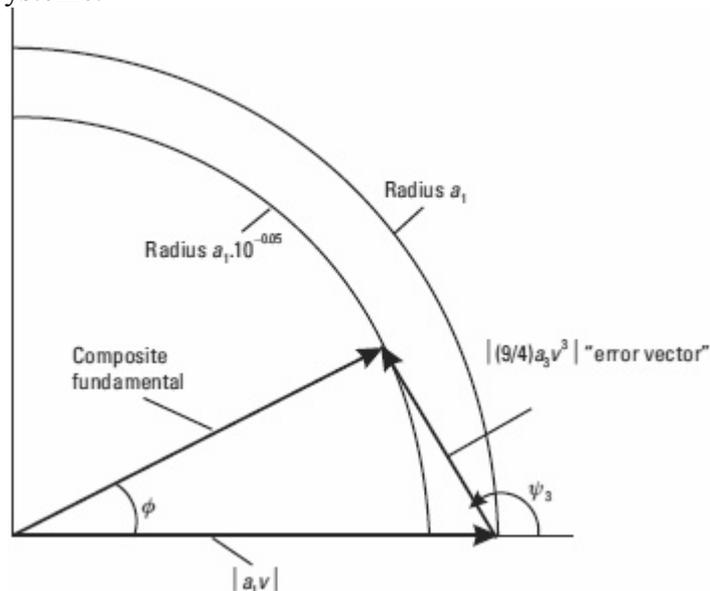


Figure 7 – Représentation vectorielle de l'effet de l'IMD3 sur la composante fondamentale

## 5. Linéarisation

### 5.1 Utilité

La figure 8 permet de visualiser l'apport qu'introduit une linéarisation du PA. La linéarisation permet d'étendre la zone linéaire mais est également traduite par un déplacement vers la droite de la droite du 3<sup>ème</sup> ordre. Le TOIP voit donc sa valeur augmenter. La valeur de l'IMD3, pour une puissance de sortie donnée, augmente également.

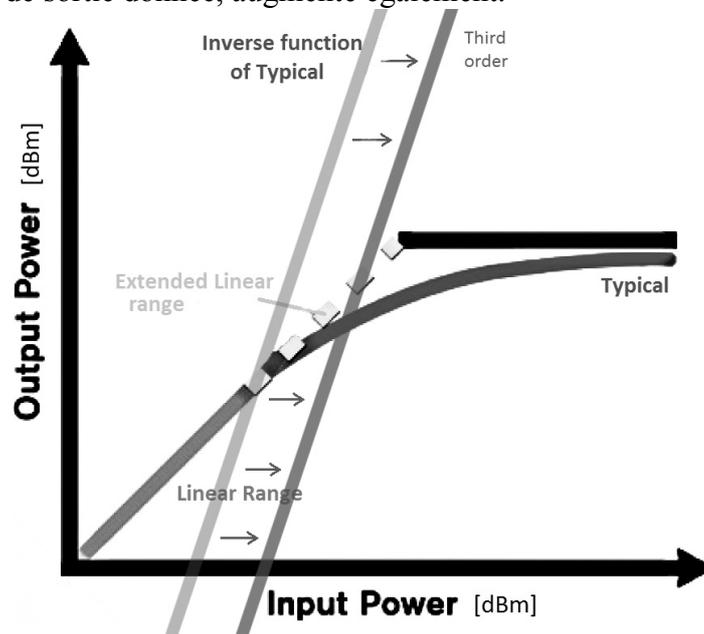


Figure 8 – Amélioration apportée par la linéarisation

### 5.2 Techniques de linéarisation

Ces différentes techniques présentent des niveaux de complexité variables et possèdent chacune leurs avantages et leurs inconvénients.

C'est principalement en fonction de l'application que la technique est choisie. Mais il n'est pas rare d'avoir plusieurs possibilités de linéarisation valables pour une même application.

Comme principales techniques, nous avons

- « back-off » :

Comme présenté dans l'introduction, elle consiste à utiliser le PA loin de ses caractéristiques maximales pour éviter la distorsion

- « feed-forward » :  
Le signal en sortie du PA est analysé pour extraire la distorsion générée. Celle-ci est adaptée pour ensuite être soustraite au signal final et ainsi annuler la distorsion générée par le PA
- « feedback » :  
L'idée est que la sortie du PA suive l'évolution de l'entrée. Pour ce faire, le signal en sortie du PA est analysé pour en extraire la distorsion et ainsi pouvoir modifier le signal en entrée du PA afin de limiter la distorsion à sa sortie
- « pré-distorsion » :  
Il s'agit de la technique sur laquelle se focalise cet article.  
Ici, on anticipe la distorsion. La mise en cascade du bloc de pré-distorsion et de l'amplificateur RF donne en sortie le signal d'entrée amplifié sans distorsion. Pour cette technique, il faut implémenter un bloc permettant de générer un signal de caractéristique non linéaire opposée à celle du PA.

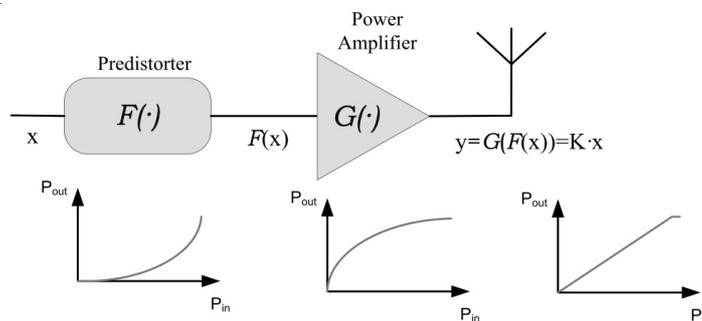


Figure 9 – Principe de la pré-distorsion [4]

La figure 9 présente la mise en cascade et l'effet engendré par la pré-distorsion sur la correction AM/AM (amplitude de sortie par rapport à l'amplitude d'entrée). En général, une même correction est apportée pour la phase corrigeant ainsi l'effet de la distorsion AM/PM (phase de sortie par rapport à l'amplitude d'entrée).

Ce type de linéarisation peut être effectué en RF, IF (fréquence intermédiaire) ou en bande de base.

Pour ce qui est de la pré-distorsion digitale, on retrouve dans la plupart des cas une implémentation en bande de base.

Différentes techniques existent pour trouver la fonction inverse à la fonction de l'amplificateur de puissance.

Dans tous les cas, le système de pré-distorsion commence par obtenir les caractéristiques du PA pour permettre le calcul de l'inverse de la non-linéarité de celui-ci.

Pour une bonne performance, les distorsions AM/AM et AM/PM doivent être prises en compte. Si ces distorsions sont statiques, la caractéristique du PA dépend uniquement du moment présent.

Mais, dans la plupart des cas, la sortie dépend du moment présent mais également des valeurs passées. Ces valeurs passées peuvent changer en fonction de la bande passante du signal d'entrée. Ce phénomène est appelé « l'effet mémoire ».

Il faut donc clairement indiquer dans quel cas on travaille. La pré-distorsion sans effet mémoire est plus simple et donne de bons résultats. Mais elle devient limitée dans le cas de systèmes où l'effet mémoire est fort prononcé.

Pour expliquer plus en détail le principe de la pré-distorsion, revenons à la théorie concernant le développement en série de Volterra exposée dans le point 4.2. Pour rappel, le PA avait été modélisé par un polynôme du 3<sup>ième</sup> degré avec une valeur de phase propre à chaque degré de non-linéarité.

L'idée dans le cas de la pré-distorsion est de créer le polynôme inverse à celui servant à modéliser le PA donné par :

$$v_o(t) = a_1 v_i(t) - a_3 v_i^3(t)$$

La figure suivante présente le schéma bloc classique d'une pré-distorsion ainsi que la notation utilisée dans les équations qui suivent.

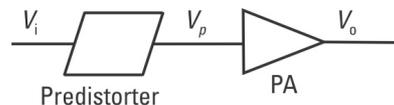


Figure 10 – Chaîne de pré-distorsion

Une analyse sous forme d'équation de la figure précédente nous donne pour le PA

$$v_o = a_1 v_p - a_3 v_p^3$$

et

$$v_o = a_1 v_i$$

pour la chaîne complète.

Ce qui laisse entendre que le bloc de pré-distorsion compense bien la non-linéarité du 3<sup>ième</sup> degré générée dans le PA. Prenons dans un premier temps un bloc de pré-distorsion ayant une caractéristique du type

$$v_p = v_i + b_3 v_i^3$$

Dans ce cas, la sortie du PA sera donnée par

$$\begin{aligned} v_o &= a_1 v_p - a_3 v_p^3 \\ &= a_1 (v_i + b_3 v_i^3) - a_3 (v_i + b_3 v_i^3)^3 \\ &= a_1 v_i + (a_1 b_3 - a_3) v_i^3 - 3a_3 b_3 v_i^5 - 3a_3 b_3 v_i^7 - a_3 b_3^3 v_i^9 \end{aligned}$$

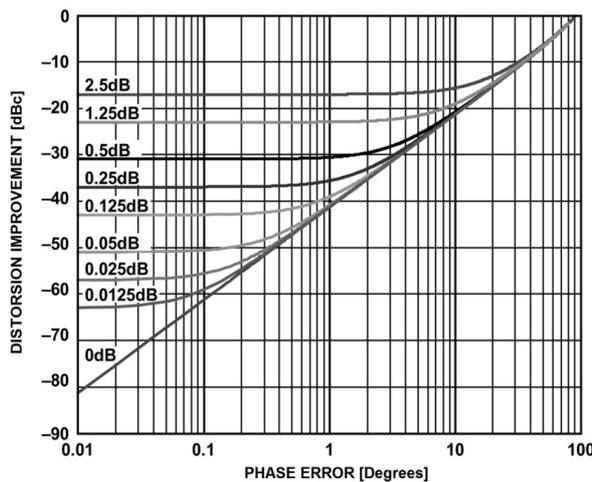
Pour  $b_3 = a_3/a_1$ , nous obtenons

$$v_o = a_1 v_i - 3a_3 b_3 v_i^5 - 3a_3 b_3 v_i^7 - a_3 b_3^3 v_i^9$$

On remarque que dans le cas où  $b_3 = a_3/a_1$ , toute la distorsion amenée par le 3<sup>ième</sup> degré disparaît. Malheureusement, cette caractéristique dans le bloc de pré-distorsion amène de la non-linéarité de degré supérieur dans la chaîne. Cependant, un bon niveau de performance peut déjà être obtenu avec une caractéristique de ce genre.

Bien évidemment, au plus le degré de la caractéristique de PD sera élevé, au plus les degrés de non-linéarité élevés pourront être compensés.

Rappelons qu'une compensation de l'effet dû à un certain degré de non-linéarité n'est efficace que si cette compensation se fait en opposition de phase.



La figure 11 présente une variation typique de la compensation apportée par la PD en fonction d'une variation de phase et d'amplitude. On se rend bien compte que la PD est très sensible au réglage de l'amplitude et de la phase pour chaque degré de non-linéarité. Le réglage de ces deux paramètres doit donc être réalisé de manière précise et stable.

Figure 11 – Amélioration de la PD en fonction des erreurs de phase et d'amplitude [5]

Enfin, pour assurer une bonne pré-distorsion du PA, il faut également tenir compte de l'effet mémoire. Pour rappel, cet effet est lié au fait que la caractéristique du PA à un moment donné dépend d'événements qui se sont passés antérieurement. L'effet mémoire est principalement de nature électrique.

Suite à cet effet mémoire, le bloc de pré-distorsion ne peut donc pas avoir une correction basée sur des paramètres figés si on veut avoir une pré-distorsion valable dans tous les cas de figure et pouvant s'adapter aux variations des non-linéarités dans le temps. La solution réside dans le fait de rendre possible une modification des paramètres constituant le bloc de pré-distorsion. Comme on le verra plus tard, l'effet mémoire est combattu manuellement dans un premier temps grâce à une modification manuelle des paramètres. Dans un deuxième temps, un système de régulation automatique permettra de combattre cet effet sans l'intervention d'un opérateur humain.

La pré-distorsion peut être réalisée de manière analogique en utilisant des composants comme des diodes et transistors.

D'autre part, la pré-distorsion peut se faire sous forme digitale. Le principe est assez identique à la version analogique; les fonctions sont simplement implémentées dans une unité de calcul. C'est cette technique qui a été choisie.

L'implémentation sur des composants digitaux rend cette technique robuste et flexible par rapport à son équivalent analogique.

### **5.3 Solution choisie**

Après une étude des différents moyens de linéariser le PA, il a été possible de sélectionner la solution appropriée.

Dans le cadre de ce travail, c'est une solution digitale qui a été choisie en raison de la forme sous laquelle les données sont recueillies. En effet, SEE Telecom travaille actuellement sur l'élaboration de répéteurs digitaux. Les données peuvent donc être directement récupérées au format digital (16 bits) pour subir un traitement visant à linéariser le PA.

Le fait de travailler sous la forme digitale du signal nous offre la possibilité d'utiliser la puissance de calcul d'un processeur pour réaliser la linéarisation. Sachant que ces processeurs sont améliorés au fil du temps, le processus de linéarisation peut ainsi bénéficier d'un traitement de plus en plus rapide et de plus en plus complexe.

Au vu de la forme digitale du signal, la technique de linéarisation choisie dans ce travail est basée sur le principe de pré-distorsion. Comme analysé précédemment, la pré-distorsion se décline sous deux formes. La première est basée sur un traitement analogique du signal. Cette technique est déjà implémentée dans certains produits de SEE Telecom mais sans la boucle de régulation. Elle permet une linéarisation acceptable du PA mais nécessite un réglage en fin de production pour garantir son utilité. Ce réglage étant définitif, il ne s'adapte pas à la fluctuation possible de la caractéristique du PA en fonction de sa durée d'utilisation, de sa température, etc.

Ce principe de linéarisation analogique peut être reproduit sous forme digitale avec un gros avantage. En effet, en plus d'offrir une pré-distorsion similaire à celle réalisée en analogique, il est possible de créer un système d'adaptation de la pré-distorsion à l'aide d'une boucle de régulation. La pré-distorsion digitale peut ainsi s'adapter aux fluctuations de la caractéristique du PA pour assurer un maintien du niveau de linéarisation.

## **6. Outils de développement**

La technique retenue est donc la pré-distorsion digitale. Celle-ci est basée sur la technologie FPGA (Field-Programmable Gate Array) d'Altera.

Comparés aux microprocesseurs (CPU, DSP, microcontrôleurs) basés sur une logique séquentielle dans laquelle une suite d'instructions est exécutée séquentiellement, les FPGA sont basés sur une logique parallèle. Dans cette logique, un ensemble d'opérations est effectué à chaque coup d'horloge. Ce qui veut dire qu'un FPGA va pouvoir traiter un nombre arbitraire d'échantillons à chaque cycle d'horloge, alors qu'un processeur séquentiel prendra un plus grand nombre de cycles d'horloge pour effectuer le même traitement.

De plus, étant donné la grande souplesse du FPGA, il est possible d'implémenter un processeur séquentiel dans celui-ci.

### **6.1 Carte de développement**

La carte de développement utilisée est constituée du FPGA Stratix III. Elle dispose également de deux ports HSMC (High Speed Mezzanine Card) permettant de connecter une carte de conversion. Enfin, une rangée d'interrupteurs facilite le développement en offrant la possibilité de modifier le système développé sans pour autant devoir compiler et programmer une nouvelle fois.

## 6.2 Carte de conversion

La carte fille choisie est la « Highspeed AD/DA Card » de marque Terasic. Elle dispose d'un double convertisseur A/D (AD9248) de 14 bits pouvant aller jusqu'à 65 MSPS et d'un double convertisseur D/A (DA9767) de 14 bits pouvant aller jusqu'à 125 MSPS.

Cette carte de conversion dispose d'un oscillateur de 100 MHz à partir duquel peuvent travailler le DAC et l'ADC. Par quelques manipulations, il est également possible de récupérer ce signal à 100 MHz pour l'injecter sur la carte de développement et ainsi faire fonctionner le FPGA à cette fréquence. On est donc assuré d'avoir un signal d'horloge parfaitement synchrone dans tout le système, ce qui est indispensable pour traiter correctement les signaux en entrée et en sortie de la carte de conversion.

## 6.3 Modulateur et Démodulateur IQ

Les signaux utilisés en RF sont de l'ordre de quelques centaines de MHz. A une telle fréquence, il est difficile de réaliser directement un traitement digital sur un signal. La solution est de travailler en bande de base. Dans le cadre de ce travail, la bande de base s'étend sur 20 MHz. Un signal à cette fréquence peut quant à lui être traité par un FPGA.

Une fois le traitement effectué par le FPGA, le signal doit être placé à une fréquence se trouvant dans la plage d'utilisation du PA utilisé (60-600 MHz). La solution est d'utiliser un modulateur IQ. Celui-ci va permettre de transposer la bande de base dans la plage fréquentielle du PA. Il est alors nécessaire de travailler avec un signal en phase « I » et un autre en quadrature « Q » pour représenter le signal.

Ensuite, pour permettre l'adaptation du système de pré-distorsion en fonction des fluctuations de la caractéristique du PA, il nous faut un moyen de récupérer une image de la sortie. Cette image étant en RF, il n'est pas possible de la traiter directement. L'idée est donc de faire l'opération inverse à celle de la modulation : la démodulation. Le principe est le même mais dans l'autre sens. Il s'agit de récupérer le signal qui se trouve sur la plage fréquentielle du PA (60-600MHz) et de le ramener en bande de base pour pouvoir vérifier le bon fonctionnement de la pré-distorsion. Cette démodulation IQ va permettre de récupérer une image en phase et en quadrature de la sortie du PA. Le fait d'obtenir le signal sous cette forme permet d'avoir une idée de sa phase ainsi que de son amplitude. La récupération de la bande de base est réalisée par un démodulateur IQ.

## 6.4 Environnement de développement

Suite au choix de la solution Altera, le logiciel Quartus II est utilisé comme environnement de développement.

D'autre part, ce projet étant basé sur des calculs et du traitement de signal, la plate-forme Simulink liée à MATLAB semble être un bon choix. En effet, Simulink permet une construction simplifiée de boucles de régulation et d'autres architectures de ce type.

Une fois le projet développé dans Simulink, il existe deux moyens de répertorier le processus vers du code en langage VHDL.

D'une part, il y a la toolbox « HDL coder » de MATLAB. D'autre part, il y a « DSP Builder » développé par Altera qui vient en fait compléter la librairie de Simulink mais permet également de convertir le processus en code VHDL. Le grand avantage de ce dernier est sans nul doute la compatibilité assurée avec les FPGA Altera. De plus, même les cartes de développement y sont implémentées, ce qui facilite grandement la configuration des entrées et des sorties.

Une fois le modèle fini, DSP Builder le compile à l'aide de Quartus II pour générer un projet en VHDL sous Quartus II. Dès que ce projet est créé, il peut directement être programmé sur le FPGA à partir d'une interface utilisateur conçu dans Simulink.

## 7. Systèmes de pré-distorsion

Dans le cadre de ce travail, c'est la pré-distorsion digitale qui nous intéresse. Celle-ci est implémentée de deux manières générales. En effet, il est possible d'implémenter la fonction réciproque à l'aide d'une LUT (Look-Up Table) ou d'un polynôme.

### 7.1 Pré-distorsion par une LUT

Avant d'élaborer un algorithme de pré-distorsion digitale complexe, un système relativement simple permettant de linéariser le PA a été réalisé. Il s'agit d'un système non-adaptatif (sans prise en compte de l'effet mémoire) basé sur une LUT statique qui corrige la non-linéarité en amplitude. La LUT est une table de correspondance qui fournit en sortie une valeur correspondante à sa valeur d'entrée en fonction des coefficients qu'elle contient.

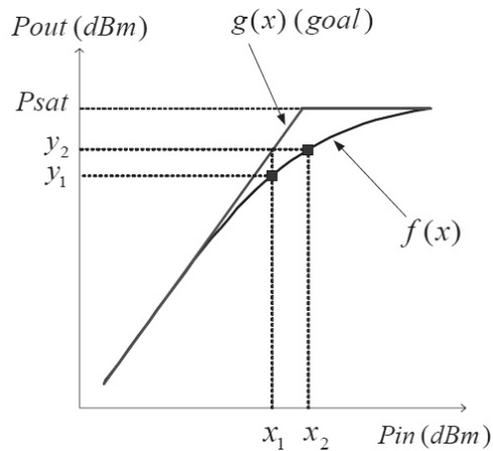


Figure 12 – Caractéristique AM/AM avant :  $f(x)$  et après pré-distorsion :  $g(x)$  (goal) [2]

L'idée de ce système est illustrée à la figure 12. Pour une valeur en entrée égale à  $x_1$ , sans pré-distorsion, on retrouve  $y_1$  en sortie. Cependant, pour respecter la linéarité, on devrait avoir  $y_2$  en sortie.

La LUT contient donc une série de valeurs qui permet de distordre le signal d'entrée pour garantir la linéarité en sortie.

Cette technique n'offre malheureusement pas la possibilité d'adapter le phénomène de pré-distorsion. Il a donc été mis de côté au profit de la technique présentée au point suivant.

## 7.2 Pré-distorsion polynomiale

Un autre grand moyen de réaliser une pré-distorsion est de remplacer la LUT par un polynôme caractérisant la fonction réciproque de la caractéristique du PA. Ce polynôme a un ordre qui est fonction du degré de linéarisation désiré. L'avantage de cette technique de pré-distorsion réside dans la facilité d'adaptation du système. En effet, pour une LUT, il faut trouver le moyen d'actualiser rapidement les valeurs qui ne sont plus bonnes. Dans le cas d'une pré-distorsion par polynôme, une simple modification d'un coefficient du polynôme permet d'avoir rapidement une réponse corrigée de la pré-distorsion.

Comme exposé au point 4.2 traitant du modèle de Volterra, on peut modéliser le PA à l'aide d'un polynôme de degré aussi élevé que l'on désire pour avoir un modèle se rapprochant de la réalité. D'autre part, rappelons qu'il est possible de se baser sur ce modèle polynomial pour créer le bloc de pré-distorsion permettant de linéariser le PA.

Dans ce travail, c'est le polynôme déjà présenté dans le point 5.2 qui a été choisi pour constituer le bloc de pré-distorsion polynomiale. Ce polynôme du 3<sup>ième</sup> degré permet de compenser en suffisance l'intermodulation du 3<sup>ième</sup> ordre comme le montrent les tests et résultats présentés plus bas.

La figure 13 présente le schéma final du système développé dans ce travail. On retrouve dans cette figure les éléments étudiés auparavant. Le double convertisseur DAC permet de transformer le signal digital sortant du bloc de pré-distorsion en un signal analogique que l'on rentre dans le modulateur IQ. Pour rappel, le modulateur IQ va permettre de transposer le signal en fréquence pour ainsi le placer dans la plage fréquentielle du PA.

De plus, une boucle de régulation permet de rendre la PD polynomiale adaptative de manière automatique. Elle est constituée d'un démodulateur IQ qui permet de transposer le signal récupéré à la sortie du PA en bande de base. Ensuite, le double convertisseur ADC permet de convertir le signal analogique en un signal traitable par le FPGA.

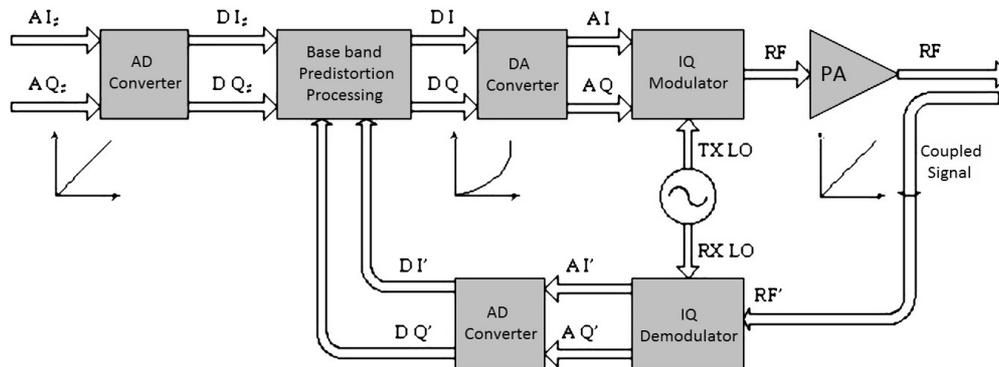


Figure 13 – Schéma de la chaîne de pré-distorsion polynomiale avec régulation

Dans un premier temps, le développement s'est porté sur l'adaptation d'un des deux paramètres (coefficient du  $x^3$  et délai) en fixant l'autre à une valeur correcte. Une fois la régulation mise au point pour les deux paramètres séparément, il a fallu trouver une manière de passer de la régulation d'un paramètre à la régulation de l'autre.

La figure 14 présente le résultat obtenu pour la PD polynomiale adaptative prenant en compte l'adaptation automatique des deux paramètres propres à la pré-distorsion grâce à la boucle de régulation. L'IMD3 passe de 44dB à environ 69dB. La résolution permettant de régler le coefficient du  $x^3$  et le délai permet donc une amélioration de 25dB de l'IMD3.

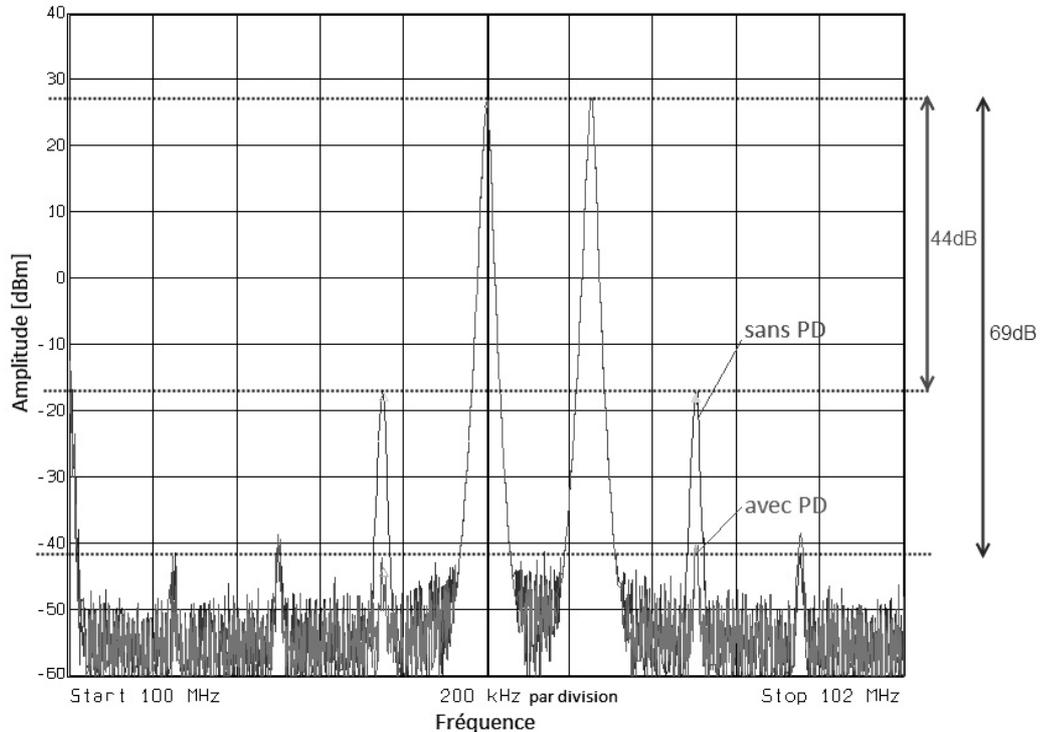


Figure 14 – Résultat de la pré-distorsion polynomiale à adaptation automatique

## 8. Conclusion

Cet article reprend d'abord les bases théoriques nécessaires à la compréhension du phénomène de non-linéarité dans le cas du PA. Il présente un moyen de le modéliser mathématiquement grâce au développement en série de Volterra.

Ensuite vient la présentation succincte des outils utilisés pour réaliser ce travail avant le développement des deux grands moyens permettant de pré-distordre un signal.

La technique de pré-distorsion polynomiale traitée dans ce travail offre des résultats satisfaisants. Le gain engendré par cette technique de linéarisation de l'amplificateur permet de respecter des spécifications en sortie du PA ( $P_{OUT}$ , TOIP) avec un PA beaucoup plus modeste. La consommation électrique et la dissipation thermique du PA peuvent donc être maintenues dans des valeurs raisonnables malgré des spécifications exigeantes.

Un test du processus de pré-distorsion a aussi été réalisé sur un signal composé de 5 tons. Là encore, une amélioration satisfaisante de l'IMD3 a

été constatée. Il est donc possible de conclure que de bons résultats devraient être obtenus sur un signal TETRA réel.

Pour finir, signalons que la pré-distorsion digitale est véritablement une solution d'avenir. En effet, elle permet de traiter les signaux sous forme digitale (par un FPGA dans ce cas-ci), ce qui constitue un avantage majeur pour les chaînes de transmission qui tendent à se digitaliser.

## 9. Sources

- [1] BRIFFA Mark A., *Linearization of RF Power Amplifiers*, Thèse de doctorat, Décembre 1996, Université de technologie de Victoria
- [2] CEYLAN Nazim, *Linearization of power amplifiers by means of digital predistorsion*, Thèse de doctorat, Avril 2005, Université d'Erlangen-Nürnberg
- [3] CRIPPS Steve C., *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Boston 2002, ARTECH HOUSE
- [4] GILABERT PINAL Pere Lluís, *Multi Look-Up Table Digital Predistorsion for RF Power Amplifier Linearization*, Thèse de doctorat, Décembre 2007, Université Polytechnique de Catalogne
- [5] NASH Eamon, *Correcting Imperfections in IQ Modulators to Improve RF Signal Fidelity*, Application Note (AN-1039), Analog Devices
- [6] TEIKARI Ilari, *Digital predistorsion linearization methods for RF power amplifiers*, Thèse de doctorat, Septembre 2008, Université de technologie d'Helsinki

## 10. Remerciements

Je tiens à remercier tout le personnel du laboratoire de R&D de SEE Telecom ainsi que celui du laboratoire électronique de l'ECAM pour le soutien apporté durant ce travail.