



**INSTITUT  
POLYTECHNIQUE  
DE PARIS**



**IP PARIS**

Télécom paris

## D2 : Radio-frequency system and hardware modeling - Extra -

---

### Project C-RAN

---

Developed by :  
Said Agouzal  
Fernandes Maciel Edson

Academic year : 2024/2025

# Table des matières

<b>1</b>	<b>BER Vs Distance</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Introduction à l'AD9361</b>	<b>3</b>
2.1	Caractéristiques Principales . . . . .	3
2.2	Applications dans les systèmes SDR . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Architecture Générale</b>	<b>3</b>
3.1	Diagramme Fonctionnel Complet . . . . .	3
3.2	Vue d'ensemble des principaux sous-systèmes . . . . .	4
3.3	Organisation des blocs fonctionnels . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Blocs de Réception (RX)</b>	<b>5</b>
4.1	Description détaillée des canaux RX1 et RX2 . . . . .	5
4.2	Spécifications du contrôle automatique de gain (AGC) . . . . .	5
4.3	Performances RF par bande de fréquence . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Blocs de Transmission (TX)</b>	<b>5</b>
5.1	Description des canaux TX1 et TX2 . . . . .	5
5.2	Caractéristiques de modulation et linéarité . . . . .	5
5.3	Performances RF par bande de fréquence . . . . .	5
<b>6</b>	<b>Traitement en Bande de Base et Synthèse</b>	<b>6</b>
6.1	Architecture des filtres numériques . . . . .	6
6.2	Convertisseurs ADC/DAC intégrés . . . . .	6
6.3	Synthétiseurs de fréquence fractionnaires-N . . . . .	6
<b>7</b>	<b>Alimentation et Convertisseurs Auxiliaires</b>	<b>6</b>
7.1	Spécifications des différentes alimentations . . . . .	6
7.2	Convertisseurs ADC/DAC auxiliaires . . . . .	6
7.3	Recommandations d'alimentation . . . . .	7
<b>8</b>	<b>Spécifications RF Principales</b>	<b>7</b>
8.1	Tableau comparatif des performances à 800 MHz, 2.4 GHz et 5.5 GHz . . . . .	7
8.2	Figures de mérite clés (NF, IIP3, EVM) . . . . .	7
8.3	Isolation entre canaux . . . . .	7
<b>9</b>	<b>Conclusion et Applications</b>	<b>7</b>
9.1	Synthèse des capacités de l'AD9361 . . . . .	7
9.2	Cas d'usage typiques . . . . .	8

# Optimisation d'un système de communication

## 1 BER Vs Distance

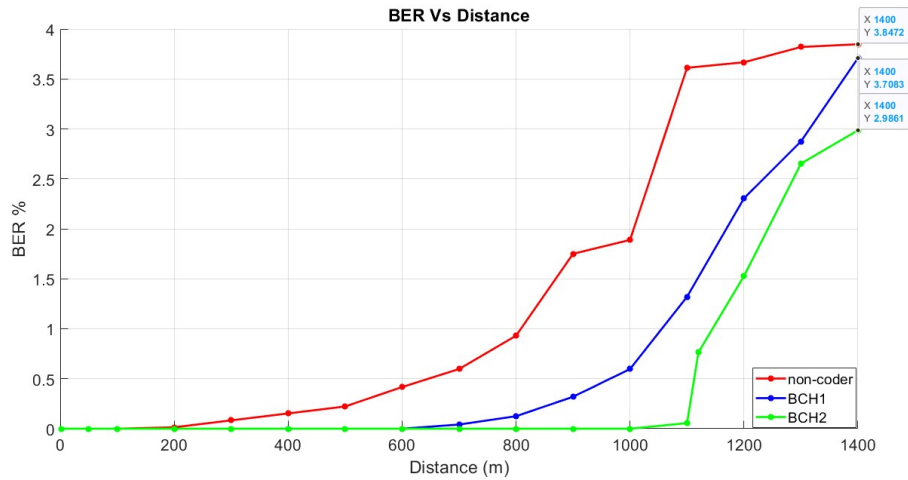
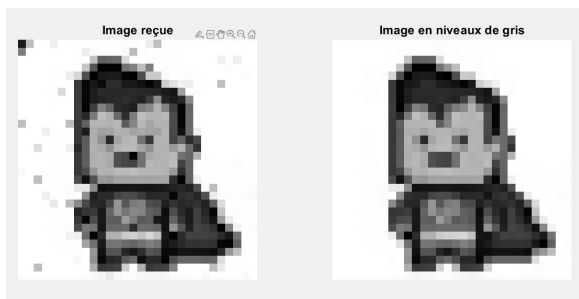


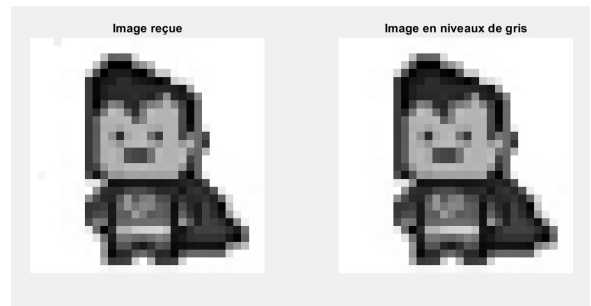
FIGURE 1 – BER pour deffirent distance sans et avec codage

En général, le BER augmente avec la distance, ce qui est normal car l'atténuation et le bruit augmentent également. Ce qui est remarquable, c'est que l'utilisation des codes BCH permet d'améliorer significativement les performances et de transmettre l'information sur de plus longues distances par rapport à un signal non codé. Cependant, cela a un coût : on envoie davantage de bits en ajoutant des bits de parité, ce qui augmente la consommation électrique et diminue le débit comparé à un signal non codé.

- Pour le code BCH correcteur de 2 erreurs, le débit original est divisé par  $31/21$ , et l'énergie consommée est multipliée par  $31/21$ .
- Pour le code BCH correcteur d'une erreur, le débit original est divisé par  $31/26$ , et l'énergie consommée est multipliée par  $31/26$ .



(a) Comparaison d'une image non-coder recue à une distance 1000m



(b) Comparaison d'une image code en BCH-2 recue à une distance 1000m

FIGURE 2 – Emission et reception d'une image à une distance de 1000 m

## 2 Introduction à l'AD9361

L'AD9361 est un émetteur-récepteur RF Agile™ hautement performant et intégré, conçu pour les applications de stations de base 3G et 4G. Sa programmabilité et sa capacité large bande le rendent idéal pour une vaste gamme d'applications d'émetteurs-récepteurs. Le dispositif combine une section RF front-end avec une section de bande de base mixte-signal flexible et des synthétiseurs de fréquence intégrés, simplifiant la conception en fournissant une interface numérique configurable à un processeur.

Le LO du récepteur AD9361 fonctionne de 70 MHz à 6,0 GHz et le LO de l'émetteur fonctionne de 47 MHz à 6,0 GHz, couvrant la plupart des bandes sous licence et sans licence. Les largeurs de bande de canal de moins de 200 kHz à 56 MHz sont prises en charge.

### 2.1 Caractéristiques Principales

- Émetteur-récepteur RF  $2 \times 2$  avec DAC et ADC 12 bits intégrés
- Bande TX : 47 MHz à 6,0 GHz
- Bande RX : 70 MHz à 6,0 GHz
- Prend en charge les opérations TDD et FDD
- Largeur de bande de canal réglable : <200 kHz à 56 MHz
- Deux récepteurs : 6 entrées différentielles
- Sensibilité supérieure du récepteur avec un facteur de bruit de 2 dB à 800 MHz LO
- Contrôle de gain RX
- Signaux de surveillance et de contrôle en temps réel pour le gain manuel
- Contrôle de gain automatique indépendant
- Deux émetteurs : 4 sorties différentielles
- Émetteur large bande très linéaire
- EVM TX :  $\leq -40$  dB
- Bruit TX :  $\leq -157$  dBm/Hz plancher de bruit
- Moniteur TX :  $\geq 66$  dB de plage dynamique avec une précision de 1 dB
- Synthétiseurs fractionnaires-N intégrés
- Pas de LO maximal de 2,4 Hz
- Synchronisation multipuce
- Interface numérique CMOS/LVDS

### 2.2 Applications dans les systèmes SDR

L'AD9361 est largement utilisé dans les systèmes de radio logicielle (SDR) en raison de sa flexibilité et de ses performances. Ses applications incluent :

- Systèmes de communication point à point
- Stations de base Femtocell/picocell/microcell
- Systèmes radio à usage général

## 3 Architecture Générale

L'AD9361 est un émetteur-récepteur RF Agile™ hautement intégré qui combine un front-end RF avec une section de bande de base à signaux mixtes flexible et des synthétiseurs de fréquence intégrés. Cette architecture permet une grande flexibilité et une large bande passante, ce qui en fait une solution idéale pour les applications SDR.

### 3.1 Diagramme Fonctionnel Complet

Le diagramme fonctionnel de l'AD9361 (Figure 3) illustre l'intégration de ses divers sous-systèmes, chacun contribuant à la capacité globale du dispositif à traiter les signaux RF sur une large gamme de fréquences.

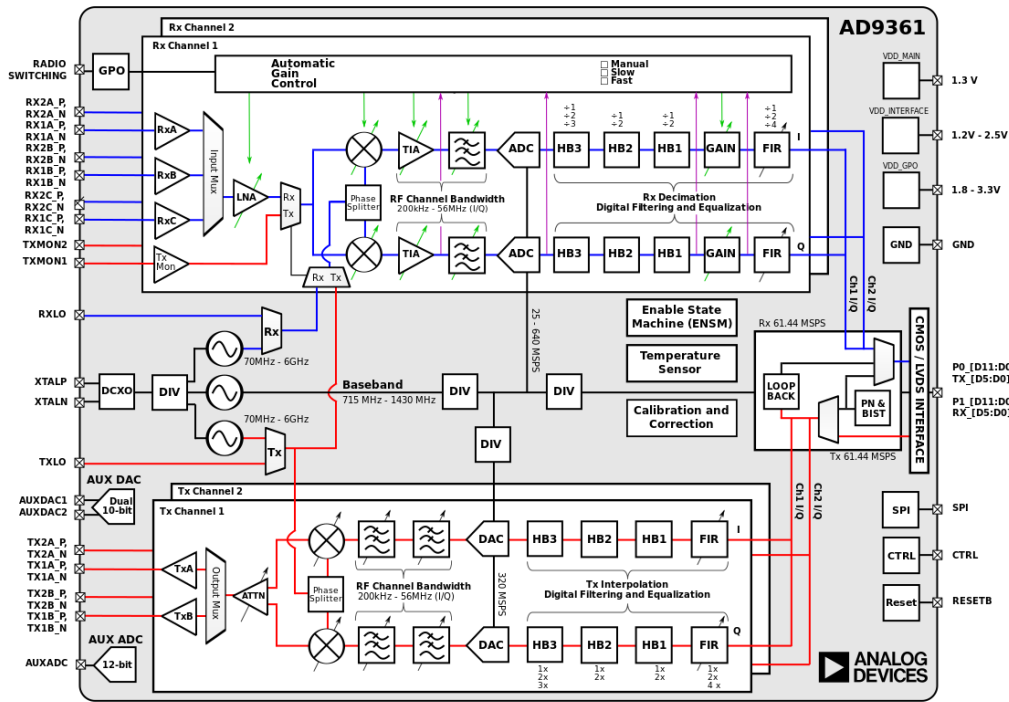


FIGURE 3 – Diagramme Fonctionnel de l'AD9361

### 3.2 Vue d'ensemble des principaux sous-systèmes

L'AD9361 est composé de plusieurs sous-systèmes clés qui travaillent en synergie pour fournir une solution RF complète. Ces sous-systèmes incluent les blocs de réception (RX), les blocs de transmission (TX), le traitement en bande de base, les synthétiseurs de fréquence, les interfaces de contrôle et les blocs d'alimentation.

### 3.3 Organisation des blocs fonctionnels

L'organisation des blocs fonctionnels de l'AD9361 est conçue pour optimiser les performances et la flexibilité. Chaque bloc est spécialisé dans une tâche spécifique, mais tous sont interconnectés pour permettre un flux de données et de contrôle transparent. Les principaux blocs fonctionnels sont les suivants :

- **Rx Channel 1 & 2** : Canaux de réception indépendants pour le traitement des signaux RF entrants.
- **Tx Channel 1 & 2** : Canaux de transmission indépendants pour la génération et l'envoi de signaux RF.
- **Baseband** : Section de traitement numérique en bande de base, incluant des filtres et des convertisseurs ADC/DAC.
- **Enable State Machine (ENSM)** : Machine d'état pour la gestion de l'activation et de la désactivation des différents blocs.
- **Temperature Sensor** : Capteur de température intégré pour la surveillance thermique.
- **Calibration and Correction** : Blocs dédiés à la calibration et à la correction des erreurs pour améliorer la précision et les performances.
- **Loop Back** : Fonctionnalité de bouclage pour les tests et la calibration interne.
- **PN & BIST** : Générateur de séquence pseudo-aléatoire (PN) et auto-test intégré (BIST) pour le diagnostic.
- **CMOS/LVDS Interface** : Interface numérique pour la communication avec le processeur hôte.
- **SPI** : Interface série périphérique pour le contrôle et la configuration du dispositif.
- **CTRL** : Bloc de contrôle général pour la gestion des opérations internes.
- **Reset** : Fonctionnalité de réinitialisation du dispositif.
- **GPO** : Broches de sortie à usage général pour des fonctions de contrôle externes.
- **AUX DAC** : Convertisseur numérique-analogique auxiliaire.
- **AUX ADC** : Convertisseur analogique-numérique auxiliaire.
- **VDD\_MAIN, VDD\_INTERFACE, VDD\_GPO** : Différentes alimentations pour les blocs principaux, l'interface et les broches GPO.
- **GND** : Masse.

## 4 Blocs de Réception (RX)

L'AD9361 intègre deux canaux de réception (RX1 et RX2) indépendants, chacun conçu pour offrir des performances RF élevées sur une large gamme de fréquences. Ces canaux sont optimisés pour la réception de signaux dans les applications SDR, avec des fonctionnalités avancées telles que le contrôle automatique de gain (AGC) et des filtres numériques configurables.

### 4.1 Description détaillée des canaux RX1 et RX2

Chaque canal de réception est composé d'un chemin de signal RF qui inclut des amplificateurs à faible bruit (LNA), des mélangeurs, des filtres passe-bas et des convertisseurs analogique-numérique (ADC). Les signaux I et Q sont numérisés et traités en bande de base numérique.

### 4.2 Spécifications du contrôle automatique de gain (AGC)

L'AD9361 dispose d'un système AGC (Automatic Gain Control) sophistiqué qui ajuste dynamiquement le gain du chemin de réception pour optimiser la plage dynamique et la qualité du signal. L'AGC peut fonctionner en mode automatique ou manuel, offrant une grande flexibilité pour différentes conditions de signal. Il est essentiel pour maintenir un niveau de signal optimal à l'entrée de l'ADC, évitant la saturation et maximisant le rapport signal/bruit.

### 4.3 Performances RF par bande de fréquence

Les performances des canaux RX varient en fonction de la bande de fréquence. Des paramètres clés tels que le facteur de bruit (NF), le point d'interception du troisième ordre (IIP3) et la linéarité sont spécifiés dans la fiche technique pour différentes fréquences. Ces spécifications sont cruciales pour évaluer l'aptitude de l'AD9361 à des applications spécifiques.

## 5 Blocs de Transmission (TX)

L'AD9361 intègre également deux canaux de transmission (TX1 et TX2) indépendants, conçus pour générer des signaux RF de haute qualité avec une excellente linéarité et une faible distorsion. Ces canaux sont essentiels pour les applications d'émission dans les systèmes SDR.

### 5.1 Description des canaux TX1 et TX2

Chaque canal de transmission comprend un chemin de signal qui convertit les données numériques en signaux analogiques (DAC), puis les module sur une porteuse RF via des mélangeurs et les amplifie pour la transmission. Des filtres passe-bas sont également inclus pour la suppression des harmoniques.

### 5.2 Caractéristiques de modulation et linéarité

Les canaux TX de l'AD9361 sont caractérisés par leur capacité à supporter divers schémas de modulation avec une grande fidélité. La linéarité est un paramètre critique, mesuré par des métriques telles que l'erreur de vecteur de magnitude (EVM) et le point d'interception du troisième ordre (OIP3). Une bonne linéarité assure que le signal transmis est une reproduction fidèle du signal d'entrée, minimisant la distorsion et les interférences avec les canaux adjacents.

### 5.3 Performances RF par bande de fréquence

Les performances des canaux TX, y compris la puissance de sortie, l'EVM et le bruit, varient en fonction de la bande de fréquence. La fiche technique de l'AD9361 fournit des spécifications détaillées pour ces paramètres à différentes fréquences, permettant aux concepteurs d'évaluer l'adéquation du dispositif à leurs besoins spécifiques en matière de transmission.

## 6 Traitement en Bande de Base et Synthèse

Le traitement en bande de base et la synthèse de fréquence sont des éléments cruciaux de l'AD9361, permettant la conversion et la manipulation des signaux numériques et analogiques, ainsi que la génération de fréquences précises pour les opérations de réception et de transmission.

### 6.1 Architecture des filtres numériques

L'AD9361 intègre des filtres numériques configurables en bande de base pour le traitement des signaux. Côté réception, des filtres de décimation configurables et des filtres FIR (Finite Impulse Response) à 128 taps sont utilisés pour produire un signal de sortie 12 bits à la fréquence d'échantillonnage appropriée. Côté transmission, des filtres d'interpolation et des filtres FIR sont employés pour préparer le signal avant la conversion numérique-analogique. Ces filtres sont essentiels pour le contrôle de la bande passante, la suppression des interférences et l'optimisation du rapport signal/bruit.

### 6.2 Convertisseurs ADC/DAC intégrés

L'AD9361 est équipé de convertisseurs analogique-numérique (ADC) et numérique-analogique (DAC) 12 bits intégrés. Les ADC sont utilisés dans le chemin de réception pour numériser les signaux I et Q reçus, tandis que les DAC sont utilisés dans le chemin de transmission pour convertir les signaux numériques I et Q en signaux analogiques avant la modulation RF. La résolution de 12 bits assure une bonne fidélité du signal et une large plage dynamique.

### 6.3 Synthétiseurs de fréquence fractionnaires-N

Le dispositif intègre des synthétiseurs de fréquence fractionnaires-N à faible consommation d'énergie. Ces PLL (Phase-Locked Loops) sont responsables de la génération des fréquences locales (LO) pour les chemins de réception et de transmission. La capacité de ces synthétiseurs à générer des fréquences avec une grande précision et une faible gigue est fondamentale pour les performances globales du transmetteur-récepteur. La synchronisation multipuce est également prise en charge, ce qui est utile dans les systèmes MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

## 7 Alimentation et Convertisseurs Auxiliaires

Une gestion efficace de l'alimentation est cruciale pour les performances de l'AD9361, en particulier pour maintenir une faible consommation d'énergie et une haute intégrité du signal. Le dispositif intègre également des convertisseurs auxiliaires pour des fonctions de surveillance et de contrôle.

### 7.1 Spécifications des différentes alimentations

L'AD9361 est alimenté par plusieurs rails de tension pour ses différentes sections, notamment VDD\_MAIN pour les blocs principaux, VDD\_INTERFACE pour l'interface numérique, et VDD\_GPO pour les broches de sortie à usage général. La fiche technique fournit des spécifications détaillées pour chaque rail, y compris les plages de tension recommandées et les courants typiques. Une alimentation stable et propre est essentielle pour garantir les performances optimales du transmetteur-récepteur.

### 7.2 Convertisseurs ADC/DAC auxiliaires

En plus des ADC/DAC principaux pour les chemins de données RF, l'AD9361 inclut des convertisseurs auxiliaires (AUX ADC et AUX DAC). Ces convertisseurs sont utilisés pour des fonctions de surveillance et de contrôle internes, telles que la lecture de la tension d'alimentation, la surveillance de la température du capteur intégré, ou le contrôle de tensions de polarisation externes. Ils offrent une flexibilité supplémentaire pour la gestion du système et le diagnostic.

## 7.3 Recommandations d'alimentation

Pour assurer un fonctionnement stable et des performances optimales, il est recommandé de suivre scrupuleusement les directives d'alimentation fournies par Analog Devices dans la fiche technique. Cela inclut l'utilisation de régulateurs de tension à faible bruit, un découplage adéquat des alimentations avec des condensateurs appropriés, et une disposition soignée du PCB pour minimiser les boucles de courant et les interférences.

## 8 Spécifications RF Principales

Les performances RF de l'AD9361 sont caractérisées par plusieurs figures de mérite clés qui sont essentielles pour évaluer son adéquation à diverses applications. Ces spécifications varient en fonction de la fréquence de fonctionnement et sont détaillées dans la fiche technique du composant. Nous présentons ici un tableau comparatif des performances à 800 MHz, 2.4 GHz et 5.5 GHz, ainsi que l'isolation entre les canaux.

### 8.1 Tableau comparatif des performances à 800 MHz, 2.4 GHz et 5.5 GHz

Le tableau 1 résume les spécifications RF clés de l'AD9361 pour les bandes de fréquences mentionnées, mettant en évidence des paramètres tels que le facteur de bruit (NF), le point d'interception du troisième ordre (IIP3) et l'erreur de vecteur de magnitude (EVM).

TABLE 1 – Spécifications RF Principales de l'AD9361

Paramètre	Unité	800 MHz	2.4 GHz	5.5 GHz
Facteur de Bruit (NF)	dB	2	3	3
IIP3 (RX)	dBm	-18	-14	-14
EVM (TX)	dB	$\leq -40$	$\leq -40$	$\leq -40$
Isolation RX1 vers RX2	dB	70	70	70
Isolation RX2 vers RX1	dB	70	70	70

### 8.2 Figures de mérite clés (NF, IIP3, EVM)

- **Facteur de Bruit (NF)** : Mesure la dégradation du rapport signal/bruit introduite par le récepteur. Un NF faible indique une meilleure sensibilité.
- **Point d'Interception du Troisième Ordre (IIP3)** : Indique la linéarité du récepteur. Un IIP3 plus élevé signifie une meilleure résistance à la distorsion due aux signaux forts.
- **Erreur de Vecteur de Magnitude (EVM)** : Mesure la qualité de la modulation du signal transmis. Un EVM faible indique une meilleure fidélité du signal.

### 8.3 Isolation entre canaux

L'isolation entre les canaux RX1 et RX2 est un paramètre important pour les applications MIMO ou les systèmes où plusieurs canaux opèrent simultanément. Une isolation élevée garantit que les signaux d'un canal n'interfèrent pas avec les autres, maintenant ainsi l'intégrité du signal.

## 9 Conclusion et Applications

L'AD9361 est un transmetteur-récepteur RF Agile™ hautement polyvalent et intégré, offrant une solution complète pour une large gamme d'applications de radio logicielle (SDR). Ses caractéristiques, telles que la large bande passante, les canaux RX/TX indépendants, les synthétiseurs de fréquence intégrés et les interfaces flexibles, en font un composant de choix pour les systèmes de communication modernes.

### 9.1 Synthèse des capacités de l'AD9361

En résumé, l'AD9361 se distingue par :

- Une couverture de fréquence étendue (70 MHz à 6.0 GHz pour RX, 47 MHz à 6.0 GHz pour TX).



- Des capacités 2x2 MIMO avec des chemins RX et TX indépendants.
- Des convertisseurs ADC/DAC 12 bits intégrés pour une haute fidélité du signal.
- Des filtres numériques configurables pour une flexibilité de traitement en bande de base.
- Un système AGC sophistiqué pour une gestion optimale du gain.
- Des interfaces de contrôle et de données polyvalentes (SPI, CMOS/LVDS).
- Une faible consommation d'énergie et une gestion avancée de l'alimentation.

## 9.2 Cas d'usage typiques

Grâce à ses capacités, l'AD9361 est idéal pour une multitude d'applications, notamment :

- Les stations de base cellulaires (3G, 4G, et potentiellement 5G sub-6 GHz).
- Les systèmes de communication point à point.
- Les radios logicielles pour la recherche et le développement.
- Les systèmes de guerre électronique (simple) et de renseignement de signaux.
- Les applications IoT et M2M nécessitant des communications RF flexibles.
- Les systèmes radar et de détection.