



Documentation des mesures des composants

Résultats compilés des composants et performances

Nom : Nicolas Lezaud & François Bordas

Entreprise : Avantix

Date : Juillet 2025

Table des matières

1	Préambule	1
2	Filtre Tunable	2
2.1	Objectifs	2
2.2	Méthodologie	2
2.3	Résultats expérimentaux	3
2.3.1	Paramètres de réflexion et de transmission des filtres	3
2.3.2	Mesure du point de compression à 1 dB en entrée (IP1dB)	6
2.3.3	Mesure de la vitesse de commutation des filtres	6
2.3.4	Ondulation dans la bande passante	7
2.3.5	Vitesse de programmation	7
2.3.6	Données brutes des filtres	8
3	Filtre de l'OL	9
3.1	Objectifs	9
3.2	Méthodologie	9
3.3	Résultats expérimentaux	9
3.3.1	Paramètres de transmission et de réflexion du filtre	9
3.3.2	Atténuation dans la bande passante	10
4	PLL	11
4.1	Objectifs	11
4.2	Méthodologie	11
4.3	Résultats expérimentaux	12
4.3.1	Mesure de la puissance de sortie et de la consommation	12
4.3.2	Mesure du bruit de phase	12
4.3.3	Vitesse de programmation	14
4.3.4	Vitesse de verrouillage	14
5	LNA	15
5.1	Objectifs	15
5.2	Méthodologie	15
5.3	Résultats expérimentaux	16
5.3.1	Gain et consommation	16
5.3.2	Paramètres S du LNA	16
5.3.3	Noise Figure	17
5.3.4	Point de compression à 1 dB en entrée	18
5.3.5	Mesure des spurious à $2f$ créés par le LNA	18
5.3.6	Mesure de l'isolation	19

6 Mixer	21
6.1 Objectifs	21
6.2 Méthodologie	21
6.3 Résultats expérimentaux	22
6.3.1 Mesure des pertes de conversion	22
6.3.2 Fuite de la RF dans la FI	23
6.3.3 Fuite de l'OL dans la FI	23
6.3.4 Fuite de l'OL dans la RF	24
6.3.5 Consommation électrique	24
6.3.6 Dépendance à la puissance de l'OL	24
6.3.7 Spurious 2 RF – OL dans la bande FI	25
Bibliographie	26
A Annexes	28
.A.1 Fichiers <i>.zip</i>	28

Table des figures

2.1	Pertes d'insertion ($ S_{21} $) pour les 16 états des filtres HPF1–4 (gauche) et LPF1–4 (droite)	4
2.2	Pertes de réflexion ($ S_{11} $) pour les 16 états des filtres HPF1–4 (gauche) et LPF1–4 (droite)	5
2.3	Point de compression à 1 dB en entrée (IP_{1dB}) mesuré en fonction de la fréquence d'écoute pour les différentes configurations de filtres sélectionnées.	6
2.4	Temps de commutation mesuré lors du passage d'un filtre à l'autre.	6
2.5	Zoom sur les pertes d'insertion – Observation de l'ondulation (6–18 GHz)	7
3.1	Courbes constructeur du filtre LFCG-4800+ (Mini-Circuits).	10
3.2	Zoom sur les pertes d'insertion du filtre LFCG-4800+ entre 0 et 4,5 GHz.	10
4.1	Puissance de sortie de la PLL ADF4382A pour $RFOUT1_OPWR = 0 \dots 15$	12
4.2	Bruit de phase de référence du R&S FSV 46 GHz.	12
4.3	10 GHz – $RFOUT1_OPWR = 0$	13
4.4	10 GHz – $RFOUT1_OPWR = 15$	13
4.5	15 GHz – $RFOUT1_OPWR = 0$	13
4.6	15 GHz – $RFOUT1_OPWR = 15$	13
4.7	20 GHz – $RFOUT1_OPWR = 0$	13
4.8	20 GHz – $RFOUT1_OPWR = 15$	13
5.1	Gain du LNA mesuré par analyseur de spectre (gauche) et VNA (droite)	16
5.2	Paramètres S_{11} et S_{21} du LNA mesurés avec le ZVA 40 GHz	17
5.3	Gauche : détermination de l' IP_{1dB} à 6 GHz — Droite : IP_{1dB} mesuré de 6 à 18 GHz (pas 2 GHz)	18
5.4	À gauche : exemple de calcul du SFDR à 6 GHz — puissance du signal RF, puissance du spurious à $2f$, et SFDR. À droite : SFDR minimal mesuré entre 6 et 12 GHz.	19
5.5	Isolation entre RF_{out} et RF_{in} du LNA, pour une excitation de -30 dBm sur RF_{out}	19
6.1	Pertes de conversion du mélangeur en fonction de la fréquence RF (-10 dBm) avec une FI fixe à 4 GHz.	22
6.2	Fuite du signal RF dans la sortie FI en fonction de la fréquence RF.	23
6.3	Fuite du signal OL dans la sortie FI en fonction de la fréquence OL.	23
6.4	Fuite du signal OL vers la RF. La fréquence en abscisse est celle du signal fondamental (1F). La courbe 2F représente la puissance mesurée au double de cette fréquence.	24
6.5	Influence de la puissance OL sur la puissance FI pour différentes fréquences RF (FI = 4 GHz, RF = -20 dBm).	25

Liste des tableaux

2.1	Estimation du pire cas du temps de programmation en fonction de la fréquence SPI	8
5.1	Noise Figure mesuré par bande	17
6.1	Niveau du spurious 2 RF – OL (dBc)	25

Chapitre 1

Préambule

Ce document présente une synthèse des mesures réalisées sur les différents composants électroniques étudiés au cours du stage.

Les mesures ont été effectuées à l'aide d'équipements adaptés et selon des procédures représentatives des conditions de fonctionnement typiques. Les résultats permettent d'identifier les grandes tendances et caractéristiques des composants testés (filtre tunable, PLL, LNA, mélangeur), notamment en termes de réponse en fréquence, bruit de phase, gain, figure de bruit et conversion de fréquence.

Les données brutes issues des campagnes de mesure sont disponibles au fil du document ou regroupées en annexe sous forme d'une archive `.zip` contenant les fichiers au format `.dat`. Des scripts Python sont également fournis pour illustrer le traitement et l'exploitation de ces données, accompagnés de fichiers de configuration utilisés à titre d'exemple.

Les instruments utilisés incluent principalement un analyseur de réseau vectoriel (VNA), un analyseur de spectre, ainsi que des bancs de mesure pour les étages RF actifs. Les conditions de mesure (tension de polarisation, température ambiante, etc.) ont été maintenues constantes dans la mesure du possible, mais peuvent varier légèrement selon les configurations testées.

Ce document a également vocation à servir de support pour une étude ultérieure plus approfondie, ou comme base de référence en cas de doute sur le bon fonctionnement d'un composant. Il permet ainsi de faciliter une éventuelle reproduction des mesures, afin de confirmer ou d'inflimer une anomalie ou une dérive constatée.

Chapitre 2

Filtre Tunable

2.1 Objectifs

Le but est de mesurer la réponse en fréquence des différents filtres disponibles sur ce filtre tunable.

Il y a quatre filtres passe-bas et quatre filtres passe-haut, avec 16 états disponibles pour chaque filtre.

Le filtre tunable utilisé est l'AMDV8818 de chez Analog Devices.

Les mesures porteront sur :

- le paramètre de réflexion et de transmission du filtre,
- le point de compression en entrée à 1 dB,
- la vitesse de commutation,
- la vitesse de programmation du filtre,
- l'ondulation dans la bande passante.

2.2 Méthodologie

Le filtre est utilisé avec l'application ACE fournie par Analog Devices. Le PC communique avec le filtre via la carte d'interface EVAL-SDP-CB1Z.

Mesure des paramètres S

Les paramètres S ont été mesurés avec le VNA R&S ZVA 40 GHz à température ambiante. La calibration utilisée est une full 2 ports TOSM.

Les données ont été exportées au format S2P avec la procédure suivante : `Trace Funct → More 2/3 → Trace Data → S-Export`.

Mesure du point de compression en entrée à 1 dB

Le point de compression en entrée à 1 dB (IP_{1dB}) a été mesuré avec l'analyseur de spectre R&S FSV 30 GHz, sur une plage de puissance d'entrée de 0 dBm à 20 dBm.

La plage de fréquence utilisée s'étend de 6 GHz à 18 GHz, par pas de 1 GHz.

Les filtres testés sont ceux assurant un rejet correct de la fréquence image.

Mesure de la vitesse de commutation

La vitesse de commutation a été mesurée en observant le temps d'établissement de la puissance sur l'analyseur de spectre R&S FSV 30 GHz, avec un span de 0 Hz (mode base de temps).

Cette mesure a été réalisée pour chacun des filtres utilisés.

Extraction de l'ondulation dans la bande passante

L'ondulation dans la bande passante a été extraite à partir des résultats des paramètres S mesurés.

Mesure de la vitesse de programmation via SPI

Le filtre tunable est piloté par l'application ACE d'Analog Devices via la carte d'interface EVAL-SDP-CB1Z connectée au PC. Pour mesurer la vitesse de programmation effective, on a capturé les échanges SPI lors d'un changement d'état entre *LPF3_State0* et *LPF3_State2*.

2.3 Résultats expérimentaux

2.3.1 Paramètres de réflexion et de transmission des filtres

Les figures suivantes présentent les **paramètres S** mesurés pour les 8 filtres configurables du circuit *ADMV8818*, à savoir les filtres passe-haut (*HPF1* à *HPF4*) et passe-bas (*LPF1* à *LPF4*).

Pour chaque filtre, les **pertes d'insertion** ($|S_{21}|$) et les **pertes de réflexion** ($|S_{11}|$) sont représentées pour l'ensemble des 16 états de configuration.

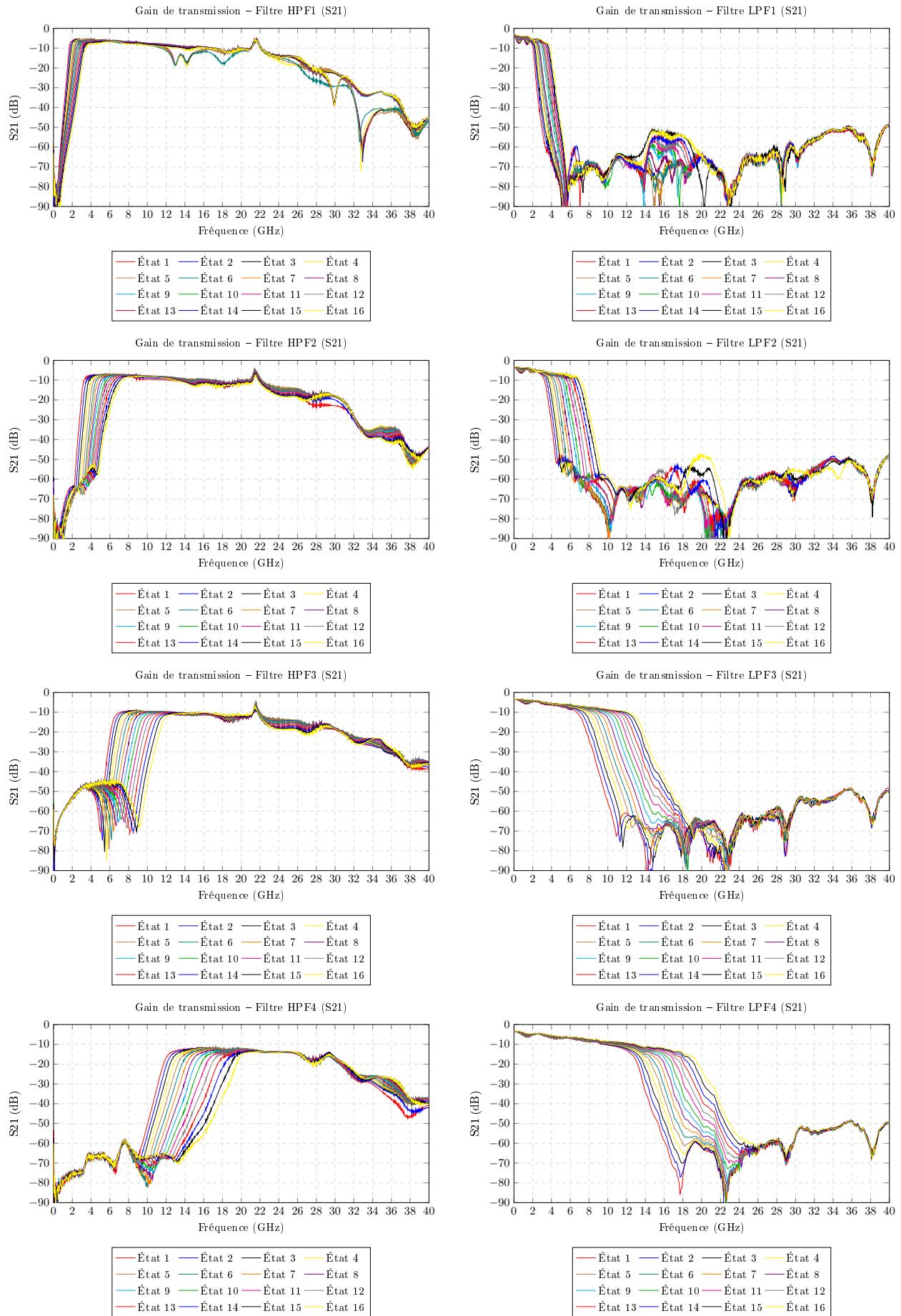


FIGURE 2.1 – Pertes d’insertion ($|S_{21}|$) pour les 16 états des filtres HPF1–4 (gauche) et LPF1–4 (droite)

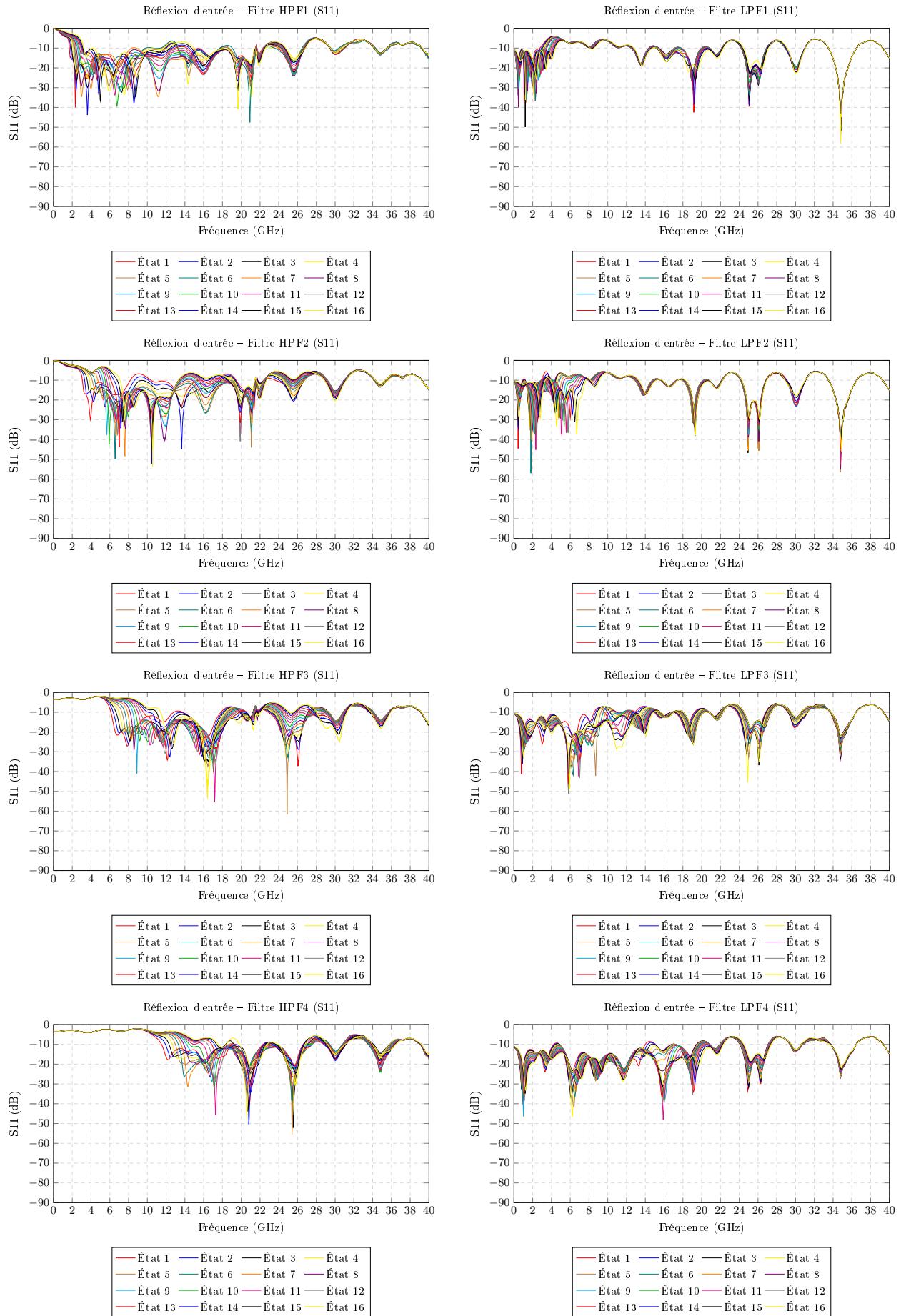


FIGURE 2.2 – Pertes de réflexion ($|S_{11}|$) pour les 16 états des filtres HPF1–4 (gauche) et LPF1–4 (droite)

2.3.2 Mesure du point de compression à 1 dB en entrée (IP_{1dB})

Le point de compression à 1 dB en entrée (IP_{1dB}) a été mesuré pour chaque configuration de filtre précédemment sélectionnée (cf :??), correspondant aux fréquences centrales de 6 GHz à 18 GHz, par pas de 1 GHz.

La méthode consiste à faire varier la puissance d'entrée entre 0 et 20 dBm et à mesurer la puissance de sortie à l'aide d'un analyseur de spectre *R&S FSV 30 GHz*. L'**IP_{1dB}** est déterminé comme la puissance d'entrée à laquelle le gain en sortie chute de 1 dB par rapport au gain linéaire attendu.

Les mesures ont été réalisées sans correction de l'atténuation due aux câbles.

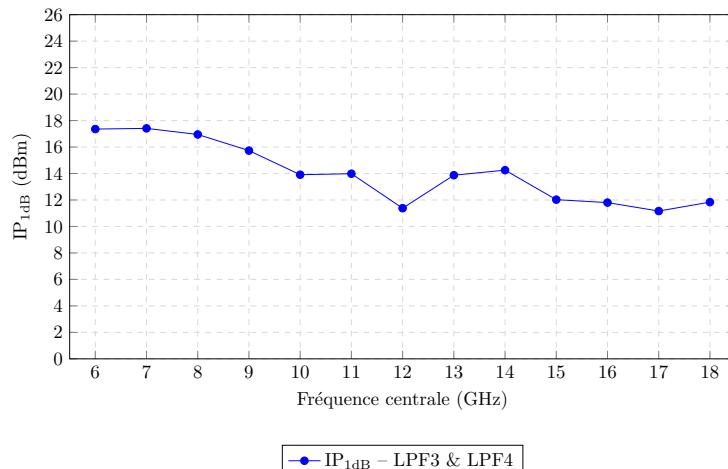


FIGURE 2.3 – Point de compression à 1 dB en entrée (IP_{1dB}) mesuré en fonction de la fréquence d'écoute pour les différentes configurations de filtres sélectionnées.

2.3.3 Mesure de la vitesse de commutation des filtres

Les appareils utilisés sont un analyseur de spectre R&S Spectrum FSV (10 Hz–30 GHz) et un générateur de signal R&S SignalGenerator (10 MHz–40 GHz).

L'analyseur de spectre est configuré avec un span nul (0 Hz) en mode base de temps pour observer la variation temporelle de la puissance lors du changement d'état du filtre.

La datasheet indique un temps de commutation de 1 µs.

Les temps de commutation ont été mesurés pour les filtres sélectionnés entre 6 GHz et 18 GHz, en basculant successivement d'un état à l'autre dans l'ordre croissant (par exemple LPF3_State0 → LPF3_State2 → LPF3_State4, etc.).

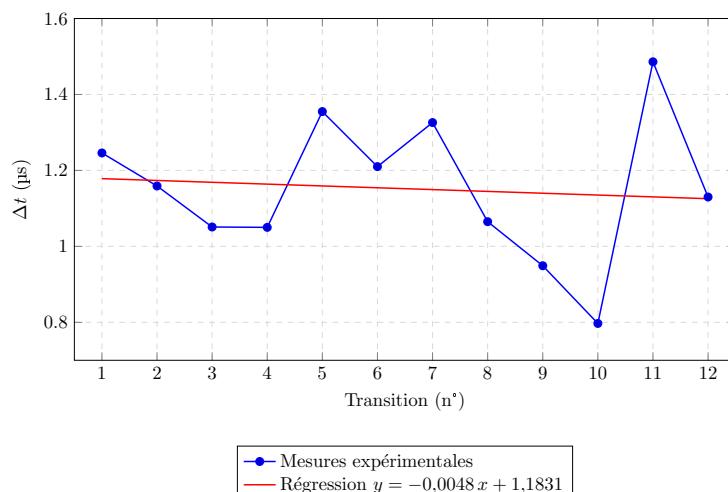


FIGURE 2.4 – Temps de commutation mesuré lors du passage d'un filtre à l'autre.

2.3.4 Ondulation dans la bande passante

Cette figure présente un simple **zoom** des courbes précédemment mesurées, centré sur l'intervalle de **4 GHz à 20 GHz** correspondant à la bande passante utile des filtres retenus. On y observe plus finement l'*ondulation des pertes d'insertion* : les petites variations de niveau autour du minimum de transmission.

Seuls les états réellement utilisés des filtres *LPF3* et *LPF4* sont affichés ici (un état par gigahertz). Aucun nouveau calcul n'est effectué ; il s'agit simplement d'un extrait visuel des mesures, destiné à évaluer la régularité du comportement spectral dans la bande utile.

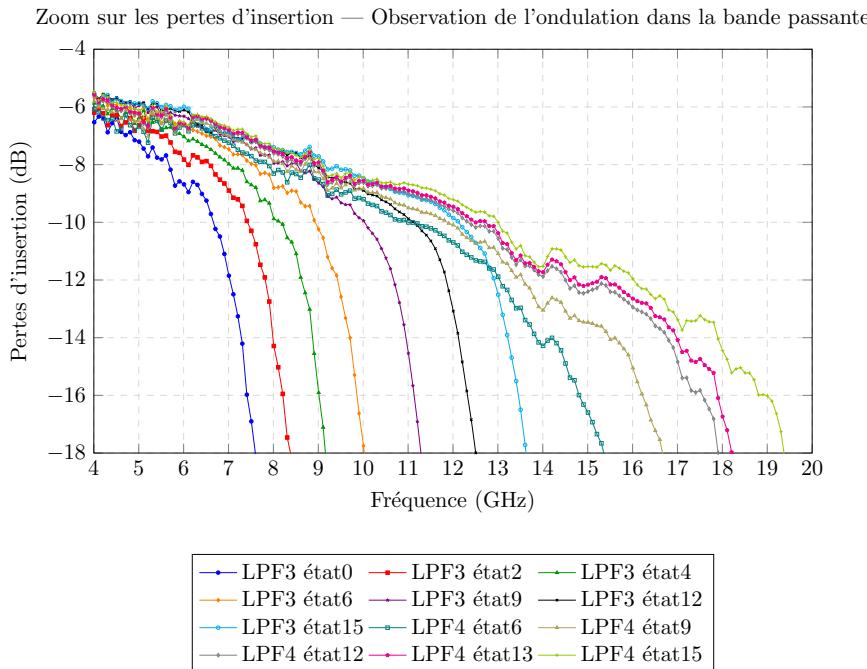


FIGURE 2.5 – Zoom sur les pertes d'insertion – Observation de l'ondulation (6–18 GHz)

2.3.5 Vitesse de programmation

La vitesse de programmation du filtre tunable dépend du débit du bus SPI, qui n'est pas toujours connu précisément. Pour estimer le temps de programmation, on considère qu'un changement d'état modifie deux registres :

- le registre de sélection du filtre (LPF3, LPF4, ...)
- le registre d'état (State0, State2, ...)

En supposant des registres de 8 bits d'adresse et 8 bits de données, le temps de programmation s'évalue par :

$$t_{\text{prog}} = \frac{1}{f_{\text{SPI}}} \times (2 \times 16)$$

Le tableau ci-dessous donne le pire cas du temps de programmation en fonction de la fréquence SPI :

TABLE 2.1 – Estimation du pire cas du temps de programmation en fonction de la fréquence SPI

Fréquence SPI	Temps de programmation
75 MHz	0,32 μ s
50 MHz	0,48 μ s
25 MHz	0,96 μ s
10 MHz	2,4 μ s
1 MHz	24 μ s
500 kHz	48 μ s
100 kHz	240 μ s

2.3.6 Données brutes des filtres

Les données brutes des filtres sont disponibles en pièces jointes ci-dessous. Cliquez sur les fichiers pour les ouvrir ou les enregistrer localement. Chaque fichier contient les résultats sous forme de colonnes : fréquence (Hz), S_{11} , S_{21} .

-  : données brutes du filtre LPF3
-  : données brutes du filtre LPF4

Chapitre 3

Filtre de l'OL

3.1 Objectifs

L'objectif vise à caractériser les performances RF du filtre passe-bas **LFCG-4800+** fourni par Mini-Circuits.

Les mesures porteront sur :

- les paramètres de réflexion (S_{11}) et de transmission (S_{21}) sur l'ensemble de la bande 0–26GHz
- le point de compression en entrée à 1 dB (P_{1dB})
- l'atténuation dans la bande passante

3.2 Méthodologie

Mesure des paramètres S

Les paramètres S ont été extraits des données fournies directement par Mini-Circuits.

Mesure du point de compression en entrée à 1 dB

Le point de compression en entrée à 1 dB (P_{1dB}) a été mesuré à l'aide de l'analyseur de spectre R&S FSV 30 GHz, sur une plage de puissance d'entrée allant de 0 dBm à 20 dBm.

La plage de fréquences utilisée s'étend de 6 GHz à 18 GHz, avec un pas de 1 GHz.

Les filtres testés sont ceux assurant un rejet suffisant de la fréquence image.

Extraction de l'ondulation dans la bande passante

L'ondulation dans la bande passante a été extraite à partir des résultats des paramètres S fournis par Mini-Circuits.

3.3 Résultats expérimentaux

3.3.1 Paramètres de transmission et de réflexion du filtre

Les courbes ci-dessous proviennent des *S-paramètres* publiés par Mini-Circuits pour le filtre passe-bas **LFCG-4800+**. Elles ont été exportées directement depuis la fiche technique du constructeur ; aucune re-mesure n'a été effectuée.

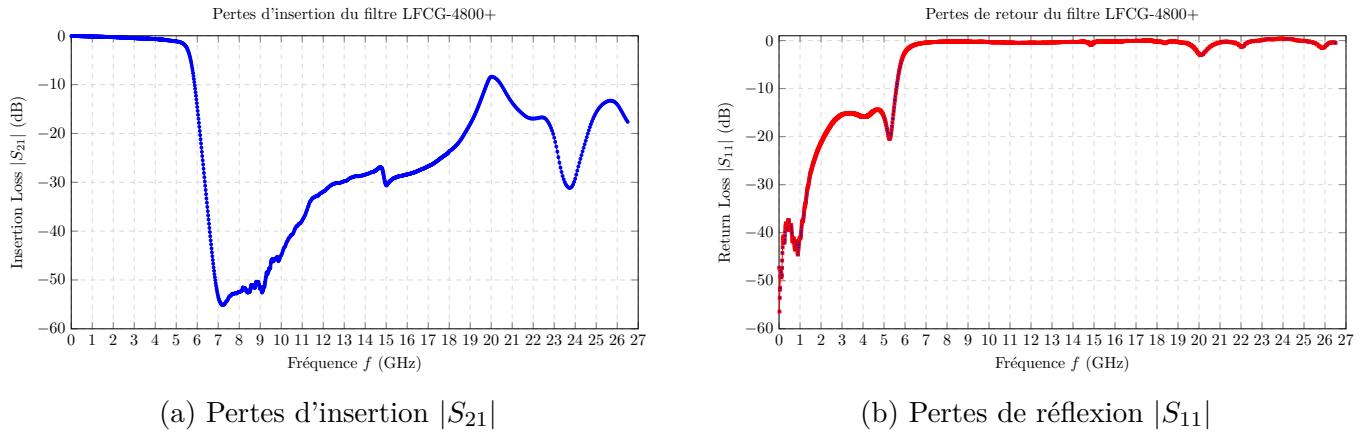


FIGURE 3.1 – Courbes constructeur du filtre LFCG-4800+ (Mini-Circuits).

Il est très clair que ce filtre présente une forte remontée des pertes d’insertion au-delà de 15 GHz, ce qui peut poser problème pour atténuer efficacement la fuite de l’OL dans la bande FI.

3.3.2 Atténuation dans la bande passante

La figure 3.2 ci-dessous présente un agrandissement des pertes d’insertion $|S_{21}|$ du filtre **LFCG-4800+** dans sa bande passante utile (0–4,5 GHz). Ces données proviennent, comme précédemment, des fichiers S-paramètres fournis par Mini-Circuits.

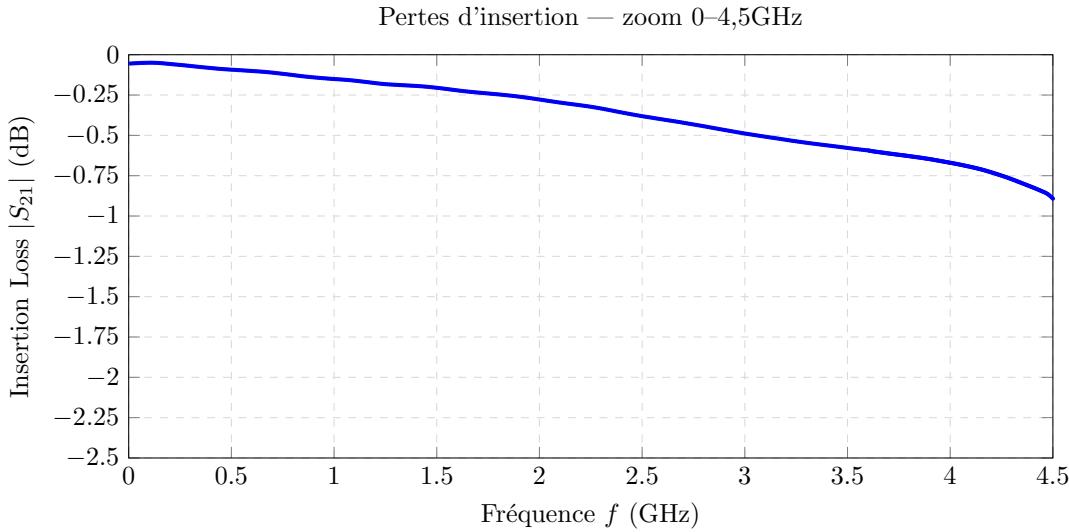


FIGURE 3.2 – Zoom sur les pertes d’insertion du filtre LFCG-4800+ entre 0 et 4,5 GHz.

L’atténuation dans la bande d’intérêt, comprise entre 2,5 GHz et 4,5 GHz, reste inférieure à 1 dB.

Chapitre 4

PLL

4.1 Objectifs

Le but est de caractériser la PLL utilisée dans le système. La PLL testée est l'ADF4382A de chez Analog Devices, couvrant une plage de fréquences de 2,875 GHz à 21 GHz.

Les mesures effectuées portent sur :

- la consommation électrique,
- la puissance de sortie du signal,
- le bruit de phase,
- la vitesse de verrouillage,
- la vitesse de programmation.

4.2 Méthodologie

Mesure de la puissance de sortie et de la consommation

La PLL testée est l'ADF4382A de chez Analog Devices, alimentée en 6 V. La consommation a été directement mesurée via l'alimentation. La puissance de sortie (`RFOUT1_OPWR`) a été mesurée avec le R&S FSV30 GHz, de 5 GHz à 21 GHz par pas de 1 GHz, sans correction pour l'atténuation des câbles.

Mesure du bruit de phase

Le bruit de phase a été mesuré avec le R&S FSV46 GHz, plus performant et doté d'un meilleur bruit de phase que le FSV30 GHz. Les mesures ont été réalisées à trois fréquences différentes (10 GHz, 15 GHz et 20 GHz), avec une mesure à la puissance minimale et une autre à la puissance maximale (`RFOUT1_OPWR`).

Mesure de la vitesse de programmation

La vitesse de programmation a été estimée en comparant le nombre de registres modifiés lors d'un changement de fréquence de verrouillage et la vitesse du protocole SPI.

Mesure de la vitesse de verrouillage

La vitesse de verrouillage a été mesurée à l'oscilloscope Agilent Technologies DSO1102B en observant la commutation du signal de verrouillage.

4.3 Résultats expérimentaux

4.3.1 Mesure de la puissance de sortie et de la consommation

La puissance RF disponible sur RFOUT1 a été relevée de 5 GHz à 21 GHz (pas de 1 GHz) pour six valeurs de commande RFOUT1_OPWR ($0 \rightarrow 15$, pas de 3). La figure 4.1 illustre l'évolution de P_{OUT} sur l'ensemble de la bande :

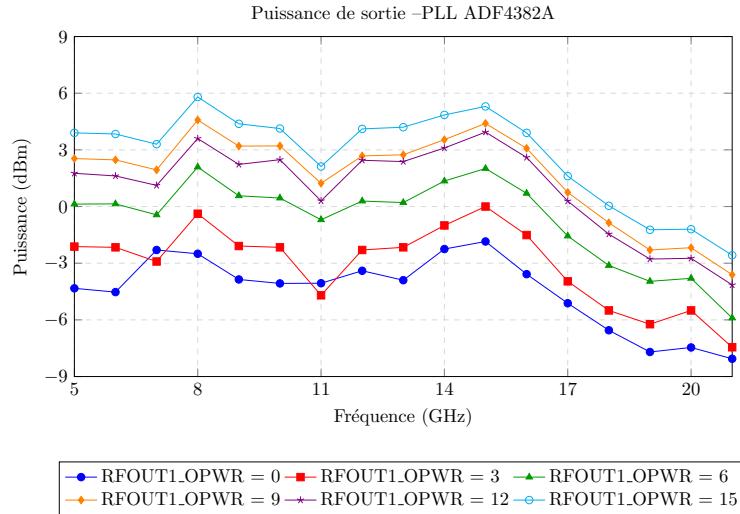


FIGURE 4.1 – Puissance de sortie de la PLL ADF4382A pour RFOUT1_OPWR = 0 . . . 15

Consommation. L'ADF4382A est polarisée sous 6 V. Le courant mesuré reste globalement constant à environ 0,67 A, soit une puissance maximale consommée d'environ 4 W. Cette consommation est indépendante de la fréquence, mais présente une très légère dépendance au niveau de sortie RFOUT1_OPWR.

Les données brutes issues des mesures de puissance de sortie de la PLL sont disponibles ici : Les données sont organisées sous la forme : Fréquence (GHz) Puissance (dBm).

4.3.2 Mesure du bruit de phase

Le bruit de phase a été mesuré à l'aide du FSV 46 GHz, plus performant que le modèle 30 GHz, comme illustré ci-dessous. Trois mesures ont été réalisées à 10 GHz, 15 GHz et 20 GHz, pour deux niveaux de puissance de sortie (RFOUT1_OPWR = 0 et RFOUT1_OPWR = 15).

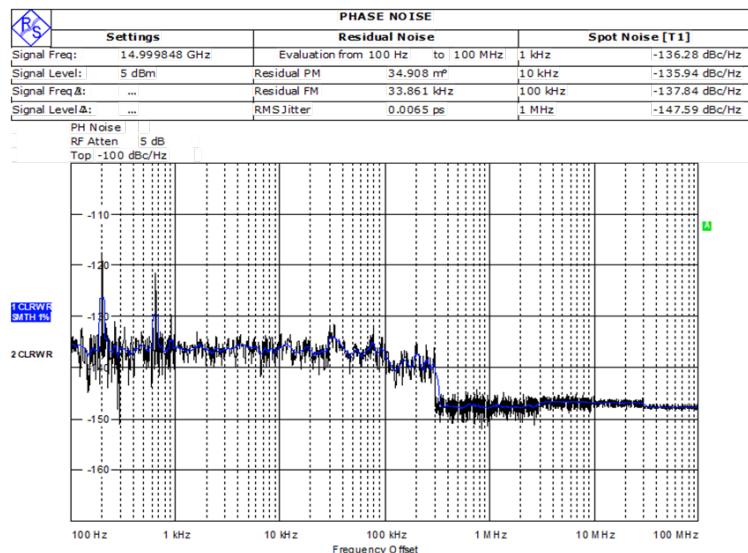


FIGURE 4.2 – Bruit de phase de référence du R&S FSV 46 GHz.

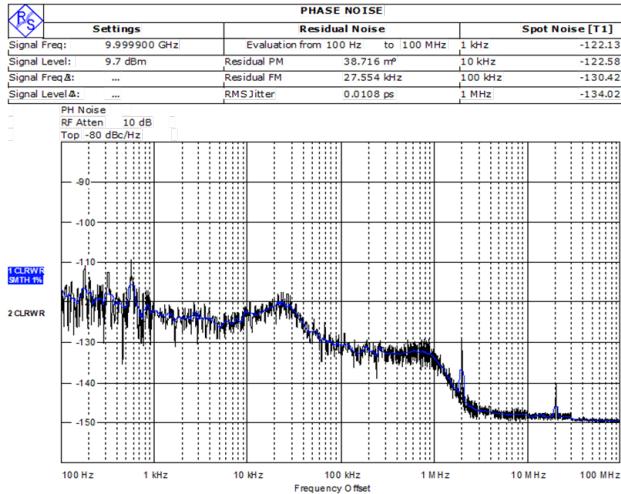


FIGURE 4.3 – 10 GHz – RFOUT1_OPWR =0

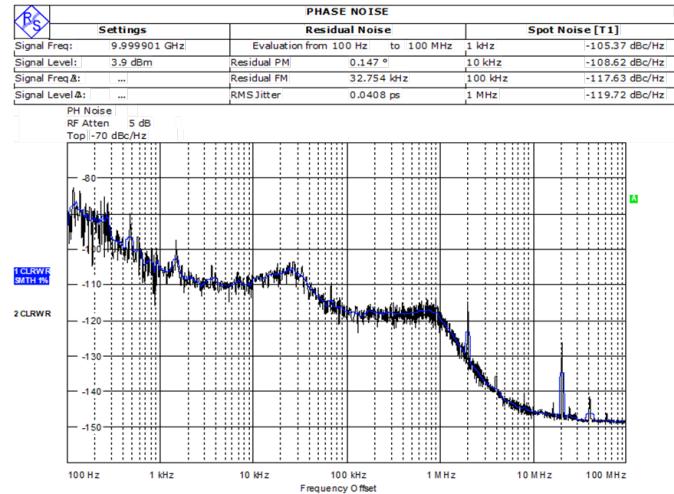


FIGURE 4.4 – 10 GHz – RFOUT1_OPWR =15

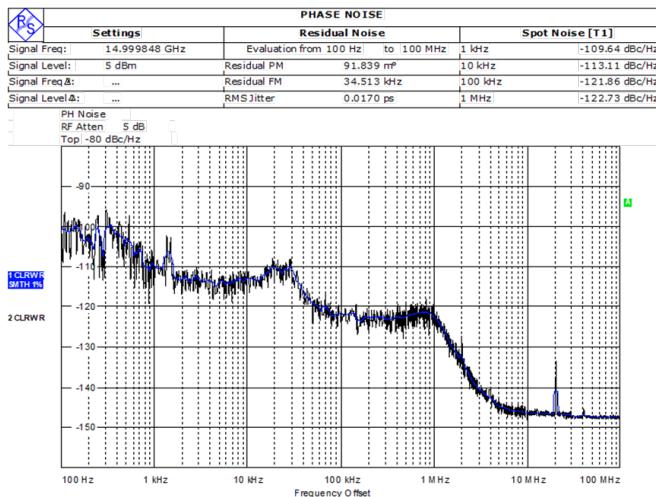


FIGURE 4.5 – 15 GHz – RFOUT1_OPWR =0

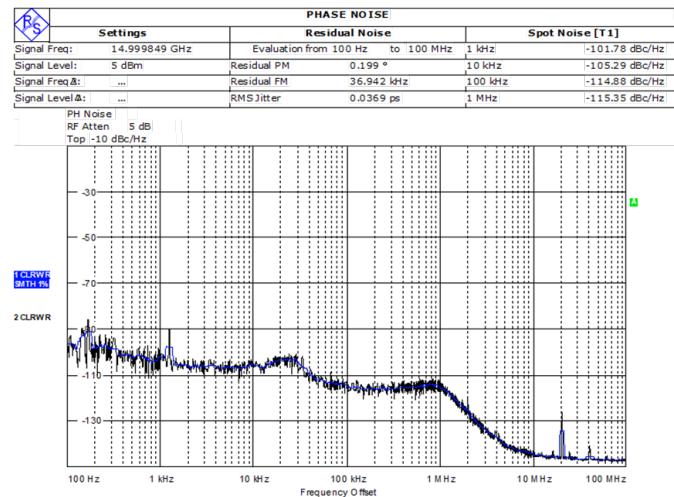


FIGURE 4.6 – 15 GHz – RFOUT1_OPWR =15

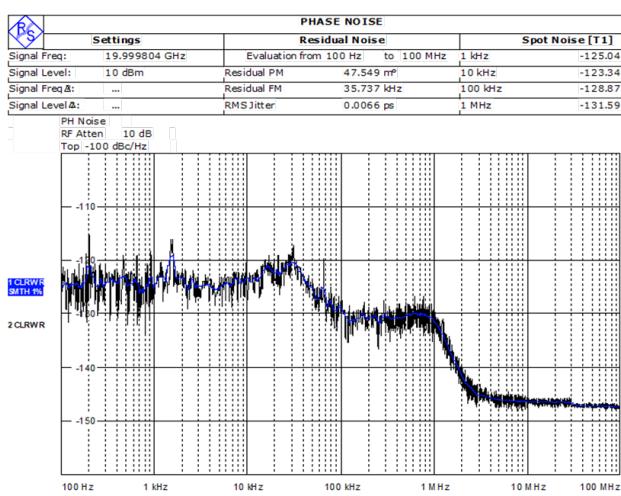


FIGURE 4.7 – 20 GHz – RFOUT1_OPWR =0

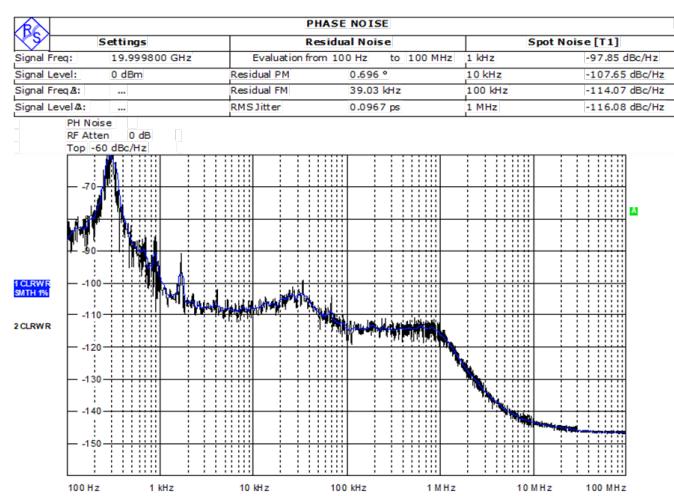


FIGURE 4.8 – 20 GHz – RFOUT1_OPWR =15

4.3.3 Vitesse de programmation

La programmation de l'ADF4382A s'effectue via un bus SPI cadencé à $f_{\text{SPI}} = 75 \text{ MHz}$ (donnée datasheet). En analysant les trames échangées lors de multiples sauts de fréquence ($\pm 1 \text{ GHz}$, $\pm 5 \text{ GHz}$, $\pm 10 \text{ GHz}$, pas de $0,5 \text{ GHz}$, etc.), le pire cas observé correspond à la mise à jour de $N_{\text{reg}} = 21$ registres.

$$t_{\text{prog}} = \frac{1}{f_{\text{SPI}}} (N_{\text{reg}} \times (8_{\text{data}} + 8_{\text{addr}})) = \frac{1}{75 \text{ MHz}} (21 \times 16) \simeq 4,5 \mu\text{s}.$$

Ainsi, même dans le pire scénario (21 registres modifiés), la programmation complète de la PLL prend environ $4,5 \mu\text{s}$.

4.3.4 Vitesse de verrouillage

La durée de verrouillage a été déterminée en chronométrant l'allumage de la LED « LOCK » de la carte EVAL-ADF4382A au moyen d'un oscilloscope Agilent DSO1102B. Le bit EN_DRCLK (registre REG002D, adresse 0x02D) est critique :

- **EN_DRCLK = 1** : temps de verrouillage compris entre **100 µs** et **250 µs**.
- **EN_DRCLK = 0** : temps de verrouillage réduit à **6 – 10 µs**, quelle que soit la fréquence programmée (tests réalisés sur sauts de fréquence pairs, impairs, décimaux et de 5 GHz à 21 GHz).

D'après les informations difficiles à trouver dans la documentation, DIV_RCLK est une horloge dérivée utilisée pendant la calibration automatique du VCO. Elle est générée à partir de l'horloge de référence (REF) et utilisée pour cadencer les étapes internes de calibration. Désactiver EN_DRCLK (et donc DIV_RCLK) après la calibration est recommandé pour :

- **Réduire les interférences** : l'horloge DIV_RCLK peut générer des spurious (bruits parasites) si elle reste active.
- **Améliorer le bruit de phase (jitter)** : en désactivant les horloges inutiles, on réduit les sources de bruit dans le système.

Dans notre cas, ce bit a été désactivé dès le départ via l'interface ACE d'Analog Devices, sans observation de comportement anormal. Néanmoins, il faut rester vigilant sur les effets secondaires de ce bit, dont le rôle reste relativement flou dans la documentation.

Chapitre 5

LNA

5.1 Objectifs

Les mesures suivantes ont pour objectif de caractériser les performances du **LNA ADL9006** d'Analog Devices. Les tests porteront sur les points suivants :

- La **matrice S** (S_{11} , S_{21}) ;
- La **puissance des harmoniques**, notamment le **spurious à $2f$** généré par le LNA ;
- Le **facteur de bruit (Noise Figure)** ;
- Le **point de compression en entrée à 1 dB** ($IP_{1\text{dB}}$) ;
- Le **gain global** ;
- L'**isolation** mesurée entre RF_{out} et RF_{in} ;
- La **consommation électrique** du composant.

5.2 Méthodologie

Mesure du gain

Le gain du LNA a été mesuré sur une large plage de fréquences allant de 6 GHz à 18 GHz, en prenant en compte l'atténuation introduite par les câbles RF. La puissance de sortie a été mesurée à l'aide de l'analyseur de spectre **R&S FSV 30 GHz**.

Mesure de la matrice S

La matrice S (S_{11} , S_{21}) a été mesurée à l'aide du **VNA R&S ZVA 40 GHz**. Aucun atténuateur n'a été placé à l'entrée ou à la sortie durant cette mesure afin de conserver la fidélité des résultats.

Mesure du facteur de bruit (Noise Figure)

Le facteur de bruit du LNA a été mesuré sur plusieurs plages de fréquence couvrant la bande 2 GHz à 22 GHz. Les mesures ont été réalisées à l'aide de l'analyseur de spectre **R&S FSV 30 GHz**.

Mesure du point de compression en entrée à 1 dB

Le point de compression en entrée à 1 dB ($IP_{1\text{dB}}$) a été déterminé pour des fréquences comprises entre 6 GHz et 18 GHz, avec un pas de 2 GHz. Les puissances ont été mesurées à l'aide de l'analyseur **R&S FSV 30 GHz**.

Mesure de l'isolation entre RF_{out} et RF_{in}

L'isolation a été mesurée entre 4 GHz et 22 GHz avec une puissance d'entrée de -30 dBm appliquée sur la broche RF_{out} . La puissance de sortie a été relevée sur la broche RF_{in} , le LNA étant alimenté en 5 V.

Mesure des spurious à $2f$

Les produits harmoniques générés par le LNA, notamment à $2f$, ont été mesurés pour des fréquences d'entrée allant de 6 GHz à 12 GHz, avec un pas de 1 GHz. Ces mesures ont également été effectuées avec le **R&S FSV 30 GHz**.

5.3 Résultats expérimentaux

5.3.1 Gain et consommation

Le gain du LNA, alimenté avec **VDD=5 V**, a été mesuré entre **6 GHz et 18 GHz** à l'aide d'un générateur RF et d'un analyseur de spectre, en tenant compte des pertes dans les câbles. Le gain est globalement **linéaire** avec une moyenne d'environ **+15 dB**.

La consommation est d'environ **250 mW** sous 5 V.

Les graphiques ci-dessous montrent :

- le gain mesuré avec l'analyseur de spectre, corrigé des pertes ;
- le gain obtenu à partir du paramètre S_{21} mesuré au VNA.

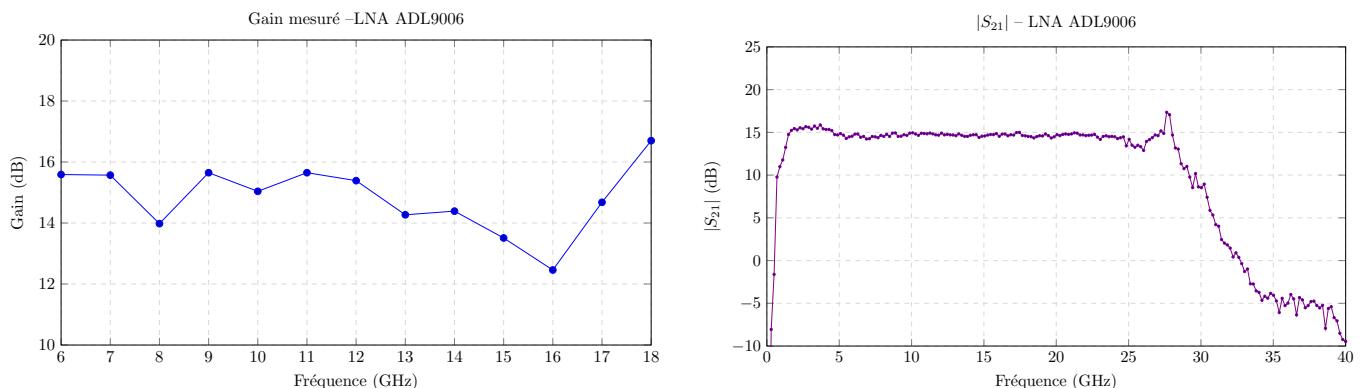


FIGURE 5.1 – Gain du LNA mesuré par analyseur de spectre (gauche) et VNA (droite)

5.3.2 Paramètres S du LNA

Les paramètres S ont été mesurés à l'aide d'un analyseur vectoriel de réseau **R&S ZVA40**, couvrant jusqu'à **40 GHz**, sans atténuateur en entrée ni en sortie. La calibration a été effectuée en **full 2 ports TOSM**. Le graphique ci-dessous présente les amplitudes de S_{11} et S_{21} sur la plage de fréquences mesurée.

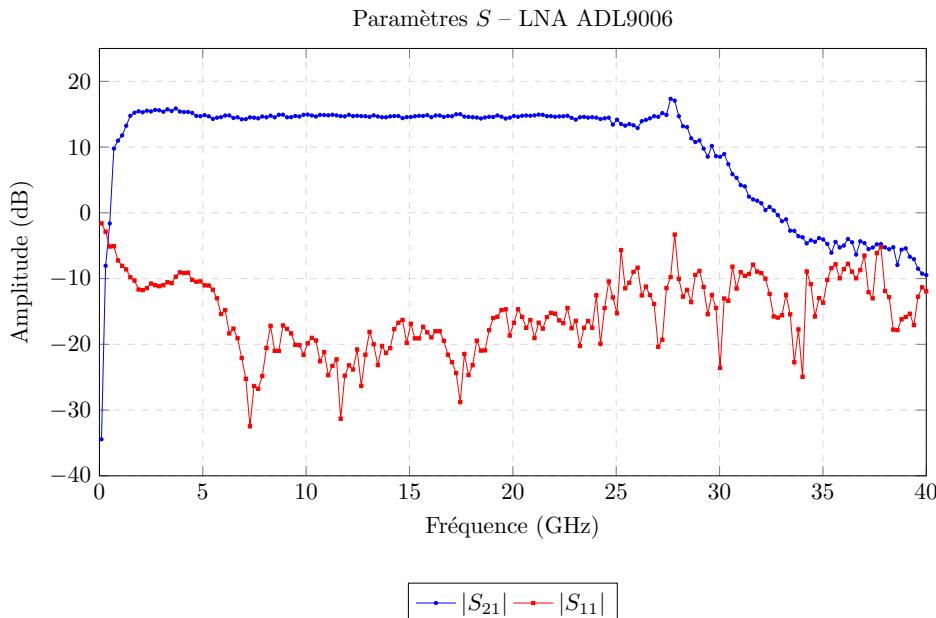


FIGURE 5.2 – Paramètres S_{11} et S_{21} du LNA mesurés avec le ZVA 40 GHz

5.3.3 Noise Figure

Le *Noise Figure* (NF) a été évalué sur cinq bandes de fréquences :

2–6 GHz, 6–10 GHz, 10–14 GHz, 14–18 GHz, 18–22 GHz.

Protocole de mesure.

- Analyseur de spectre **R&S FSV 30 GHz**
- Fonction de mesure de bruit activée : **Mkr Func → Noise Meas ON**
- Moyennage de la trace : **Trace → Trace 1 → Average**
- Réglage d'amplitude : -60 dBm (**AMPT Scale**)

Le bruit thermique à température ambiante est donné par :

$$P_{\text{th}} = 10 \log(kT) + 30 \simeq -173,85 \text{ dBm/Hz.}$$

Le Noise Figure est alors obtenu selon :

$$\boxed{NF = P_{\text{th}} - P_{\text{mesuré}} + G_{\text{LNA}} - P_{\text{câbles}}}.$$

Exemple de calcul. Pour la bande 2–6 GHz, avec une puissance de bruit mesurée à $-156,5 \text{ dBm/Hz}$, un gain de $15,17 \text{ dB}$ et des pertes dans les câbles de $1,956 \text{ dB}$, on obtient :

$$|NF| = -173,85 - (-156,5) + 15,17 - 1,956 = 4,14 \text{ dB.}$$

TABLE 5.1 – Noise Figure mesuré par bande

Band (GHz)	NF (dB)
2–6	4,14
6–10	3,53
10–14	3,82
14–18	3,16
18–22	2,86

5.3.4 Point de compression à 1 dB en entrée

Le point de compression en entrée à 1 dB (IP_{1dB}) a été mesuré de **6 GHz à 18 GHz** (pas de 2 GHz). Pour chaque fréquence, P_{in} a été balayé de -3 à $+14$ dBm et P_{out} relevé. L' IP_{1dB} correspond au niveau d'entrée où la courbe réelle s'écarte de 1 dB de la réponse linéaire idéale.

Exemple à 6 GHz. La droite idéale obtenue par régression est

$$P_{out,idéal} = 11,871 + 1,2665 P_{in} .$$

La courbe réelle sature à $P_{out} \approx 18,21$ dBm. Le point de compression s'en déduit :

$$IP_{1dB} = \frac{18,21 - 11,871}{1,2665} \approx 23,94 \text{ dBm.}$$

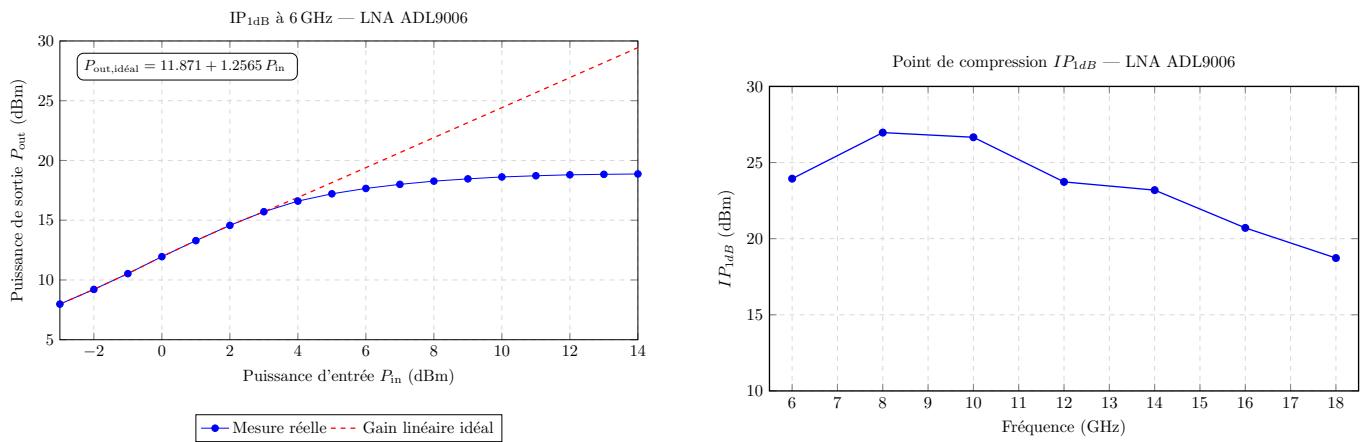


FIGURE 5.3 – Gauche : détermination de l' IP_{1dB} à 6 GHz — Droite : IP_{1dB} mesuré de 6 à 18 GHz (pas 2 GHz)

5.3.5 Mesure des spurious à $2f$ créés par le LNA

Les spurious à la fréquence $2f$ ont été mesurés en faisant varier la puissance d'entrée dans le LNA entre -20 dBm et $+5$ dBm, par pas de 1 dBm, sur une plage de fréquences allant de 6 GHz à 12 GHz par pas de 1 GHz.

Pour calculer cette puissance, l'objectif est d'extraire le SFDR (Spurious-Free Dynamic Range) à partir de ces mesures. Dans cette démarche, la puissance du signal RF souhaité a été relevée en sortie de LNA ainsi que la puissance du spurious à $2 \times f_{RF}$ créé par le LNA.

La différence entre ces deux puissances permet de déterminer le SFDR.

Un exemple de calcul du SFDR est donné dans la figure ci-dessous pour un signal RF à 6 GHz (figure de gauche), tandis que le graphique de droite représente le minimum du SFDR mesuré dans la plage de fréquence de 6 GHz à 12 GHz.

En règle générale, le SFDR minimal est d'environ 19 dBc.

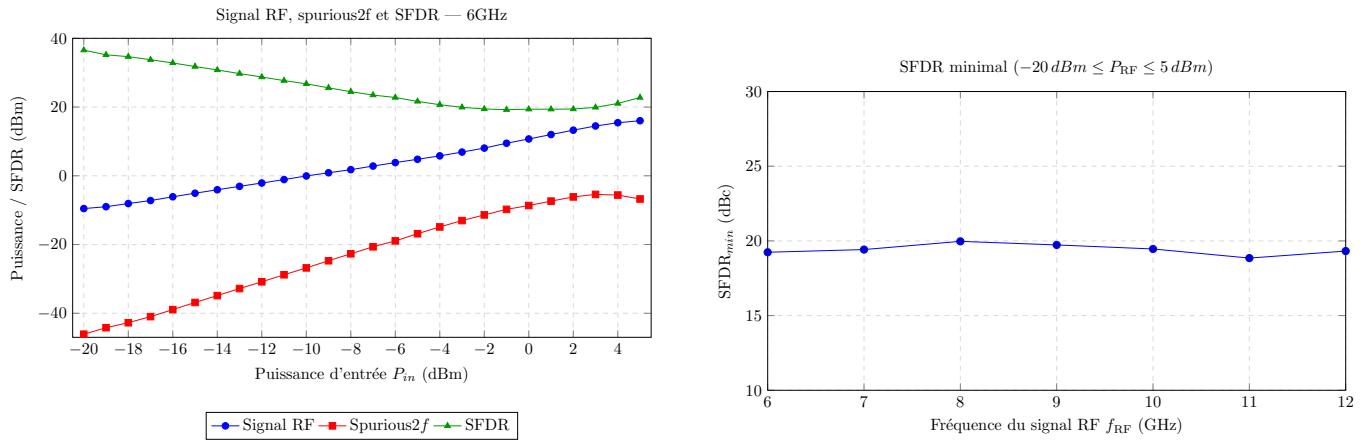


FIGURE 5.4 – À gauche : exemple de calcul du SFDR à 6 GHz — puissance du signal RF, puissance du spurious à $2f$, et SFDR. À droite : SFDR minimal mesuré entre 6 et 12 GHz.

5.3.6 Mesure de l’isolation

L’isolation entre les broches RF_{out} et RF_{in} du LNA a été mesurée dans le sens inverse de fonctionnement normal, c’est-à-dire de la sortie vers l’entrée. Pour cette mesure, le LNA est alimenté en 5 V, et un signal de -30 dBm a été injecté sur la broche RF_{out} .

La puissance fuyante a été mesurée sur la broche RF_{in} à l’aide d’un analyseur de spectre Rohde & Schwarz FSV 30 GHz. La mesure a été effectuée pour des fréquences comprises entre 4 GHz et 22 GHz.

La figure 5.5 montre le niveau d’isolation en fonction de la fréquence.

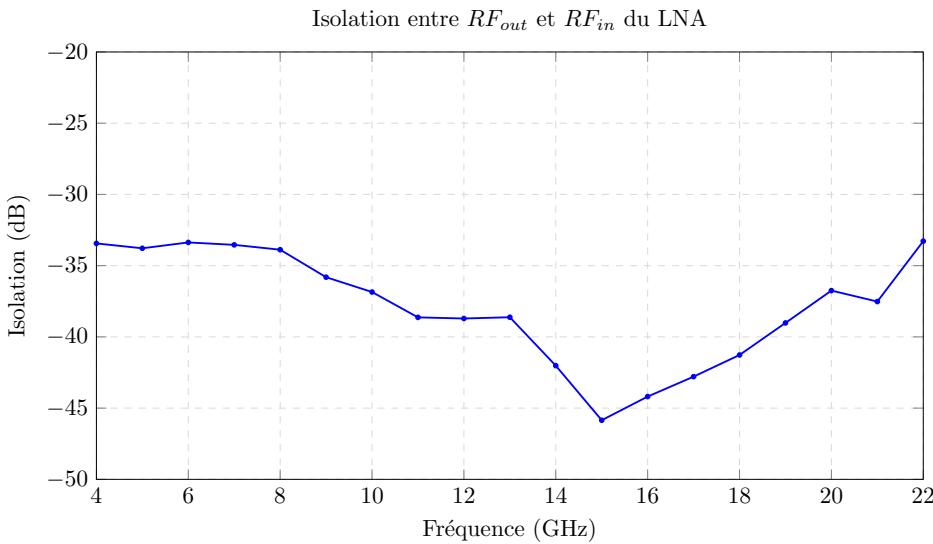


FIGURE 5.5 – Isolation entre RF_{out} et RF_{in} du LNA, pour une excitation de -30 dBm sur RF_{out} .

Fichiers de données

Les données expérimentales utilisées pour l’analyse sont disponibles ici :

— Les données du point de compression à 1 dB (P_{1dB}) sont au format suivant :

IN (dBm)	OUT (dBm)	OUT (dBm)	Continuité
----------	-----------	-----------	------------

où la première colonne correspond à la puissance d’entrée appliquée, la deuxième à la puissance de sortie réelle mesurée, et la troisième à la puissance de sortie idéale extrapolée (continuity curve).

- Les données des paramètres S (S_{11} , S_{21}) sont enregistrées avec la fréquence en hertz (Hz) en première colonne et les valeurs de S_{11} ou S_{21} en décibels (dB) en deuxième colonne.
- Les données relatives aux spurious à la fréquence $2f$ sont présentées sous la forme suivante :

%SMF (dBm) RF (dBm) Spurious $2f$ (dBm) SFDR (dBc)

où la première colonne indique la puissance d'entrée, la deuxième la puissance du signal RF utile mesurée, la troisième la puissance du spurious à $2f$, et la quatrième la différence entre ces deux dernières puissances, correspondant au SFDR.

Ces données permettent de reproduire les graphiques et analyses présentés dans cette étude.

Chapitre 6

Mixer

6.1 Objectifs

Le composant testé est le mélangeur MM1A-0626SPSM de chez Marki, avec un amplificateur intégré sur l'entrée OL. Les mesures visent à caractériser ses performances en conversion descendante.

Les objectifs sont les suivants :

- **Pertes de conversion** : mesurer l'atténuation entre l'entrée RF et la sortie FI.
- **Fuites RF->FI** : quantifier la présence du signal RF à la sortie FI.
- **Fuites OL->FI** : mesurer l'injection directe de l'OL dans la FI.
- **Fuites OL->RF** : mesurer les fuites directes de l'OL dans la RF.
- **Dépendance à la puissance OL** : observer l'impact de la puissance OL sur la sortie FI.
- **Consommation électrique** : relever la consommation du circuit intégré.
- **Signaux spurious** : analyser les produits non linéaires à la sortie FI pour une RF à 4 GHz.

6.2 Méthodologie

Conditions générales de mesure

Le mélangeur MM1A-0626SPSM de Marki a été alimenté avec : $V_{g1} = V_{g2} = V_{d1} = V_{d2} = 5 \text{ V}$.

Deux générateurs de signaux ont été utilisés : un pour le signal RF, l'autre pour l'OL. La sortie FI a été analysée avec un FSV 30 GHz de Rohde & Schwarz. Les pertes des câbles ont été corrigées dans toutes les mesures.

Pertes de conversion

La RF a été balayée de 6 GHz à 18 GHz, avec un OL situé 4 GHz au-dessus (OL = RF + 4 GHz), pour obtenir une FI fixe à 4 GHz. La perte de conversion est calculée comme la différence entre la puissance RF en entrée et la puissance FI en sortie.

Fuite RF → FI

Avec l'OL désactivé, la RF à 0 dBm a été balayée de 4 GHz à 22 GHz, et la fuite directe à la sortie FI a été mesurée, en tenant compte des pertes de câbles.

Fuite OL → FI

Avec le port RF non alimenté, l'OL a été injecté à 8 dBm, balayé de 4 GHz à 22 GHz, et sa présence directe à la sortie FI a été mesurée.

Fuite OL → RF

Avec le port FI connecté à une charge 50Ω , l'OL a été injecté à 8 dBm , balayé de 4 GHz à 22 GHz , et sa présence directe à la sortie RF a été mesurée.

Consommation électrique

Le courant total a été mesuré sur chaque ligne d'alimentation avec $V_{g1} = V_{g2} = V_{d1} = V_{d2} = 5 \text{ V}$, pour calculer la consommation.

Dépendance à la puissance OL

Pour une FI fixe à 4 GHz , la RF a été balayée de 6 GHz à 18 GHz . Pour chaque fréquence, la puissance OL a été variée de -9 dBm à 8 dBm , par pas de 1 dBm , et la puissance FI enregistrée.

Signaux spurious

Le spurious 2RF – OL a été étudié avec une RF à 4 GHz (-20 dBm) et un OL à 8 dBm . Le SFDR a été calculé comme la différence entre la puissance du signal utile (FI) et celle du spurious.

6.3 Résultats expérimentaux

6.3.1 Mesure des pertes de conversion

Les pertes de conversion ont été mesurées avec les conditions suivantes :

- Signal RF fixe à -10 dBm , balayé de 6 GHz à 18 GHz ,
- OL fixe à 6 dBm , balayé de 10 GHz à 22 GHz ,
- FI maintenue constante à 4 GHz .

Les pertes dues aux câbles ont été corrigées. La puissance du signal FI a été mesurée à chaque fréquence, ce qui permet de déduire la perte de conversion par :

$$\text{Conversion Loss (dB)} = P_{\text{RF}} - P_{\text{FI mesurée}}$$

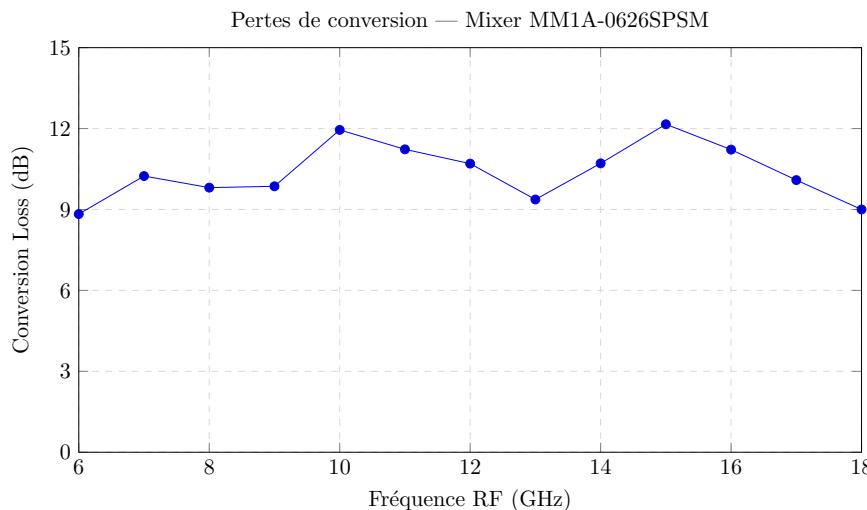


FIGURE 6.1 – Pertes de conversion du mélangeur en fonction de la fréquence RF (-10 dBm) avec une FI fixe à 4 GHz .

6.3.2 Fuite de la RF dans la FI

La fuite directe du signal RF dans la sortie FI a été mesurée pour évaluer le découplage entre les ports RF et FI.

La puissance du signal RF a été fixée à 0 dBm, et la fréquence RF a été balayée de 4 GHz à 22 GHz.

Les pertes dues aux câbles ont été prises en compte pour assurer la précision des mesures.

La figure 6.2 présente l'évolution de la puissance de fuite RF en fonction de la fréquence.

De manière générale, la fuite du signal RF est environ 50 dB inférieure à la puissance du signal RF injecté.

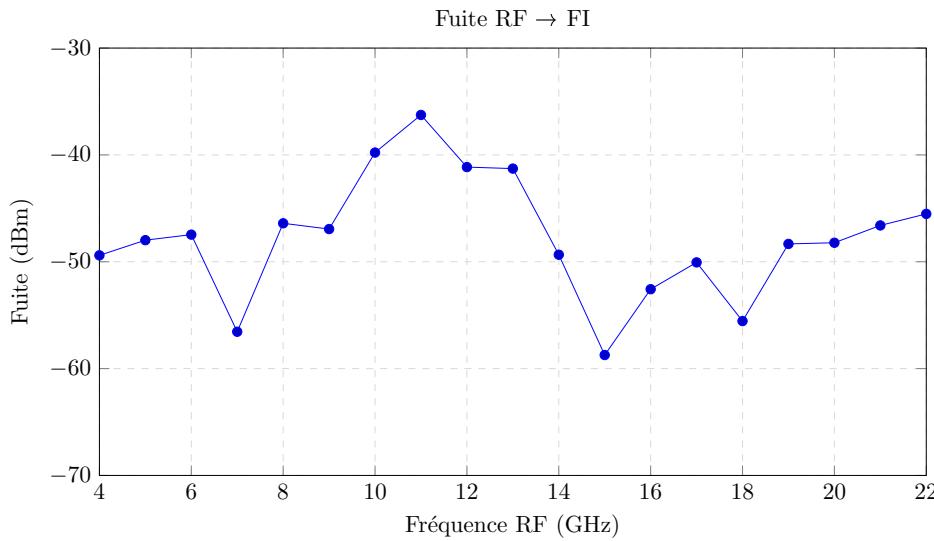


FIGURE 6.2 – Fuite du signal RF dans la sortie FI en fonction de la fréquence RF.

6.3.3 Fuite de l'OL dans la FI

La fuite directe du signal OL dans la sortie FI a été mesurée pour évaluer la propagation du signal OL vers la sortie FI.

La puissance de l'OL a été fixée à 8 dBm, avec une fréquence balayée de 4 GHz à 22 GHz.

Les pertes dues aux câbles ont été corrigées pour assurer la précision des mesures.

La figure 6.3 montre la puissance de fuite OL en fonction de la fréquence.

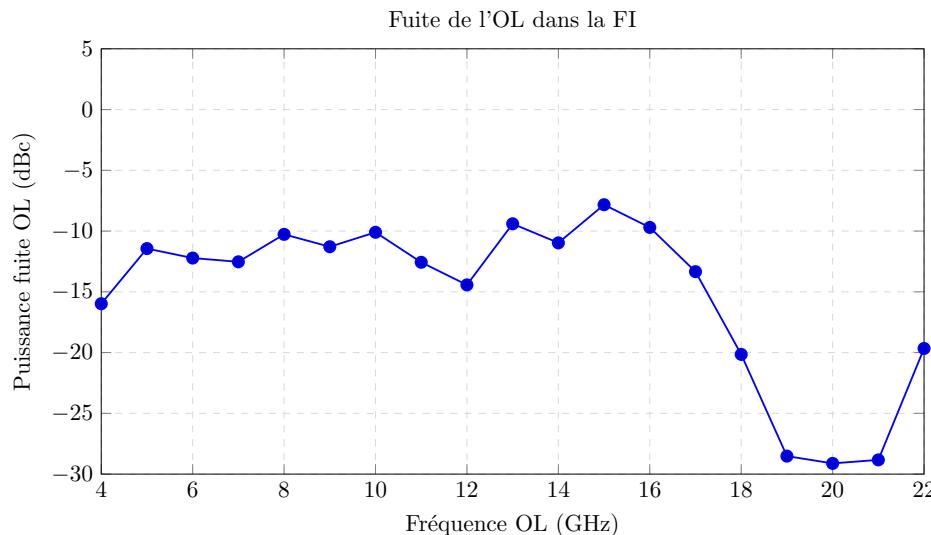


FIGURE 6.3 – Fuite du signal OL dans la sortie FI en fonction de la fréquence OL.

6.3.4 Fuite de l'OL dans la RF

La fuite du signal OL dans la sortie RF a été mesurée afin d'évaluer les éventuelles réémissions indésirables de l'OL vers l'antenne.

La puissance du générateur local a été fixée à 8 dBm, avec une fréquence balayée de 4 GHz à 22 GHz. Les pertes dues aux câbles ont été corrigées pour assurer une mesure précise.

Deux composantes de fuite ont été mesurées :

- la composante fondamentale (notée **1F**), correspondant directement à la fréquence de l'OL ;
- la composante harmonique (notée **2F**), correspondant au second harmonique de l'OL, soit à $2f_{OL}$.

La figure 6.4 présente ces deux fuites en fonction de la fréquence de l'OL (**axe des abscisses : fréquence fondamentale de l'OL**).

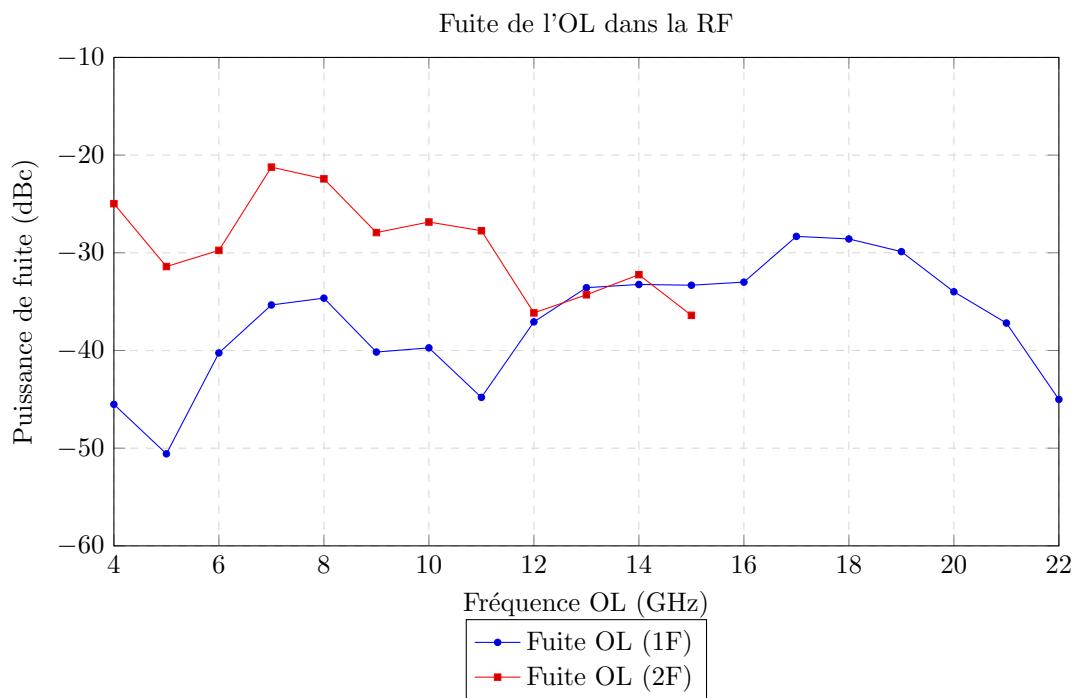


FIGURE 6.4 – Fuite du signal OL vers la RF. La fréquence en abscisse est celle du signal fondamental (1F). La courbe 2F représente la puissance mesurée au double de cette fréquence.

6.3.5 Consommation électrique

Le mixer a été alimenté avec $V_{g1} = V_{g2} = V_{d1} = V_{d2} = 5 \text{ V}$.

Le courant de drain mesuré est de 0.22 A et le courant de gate de 0.01 A, ce qui donne une consommation totale approximative de 1.15 W.

6.3.6 Dépendance à la puissance de l'OL

Cette mesure vise à étudier l'influence de la puissance du signal OL sur la puissance du signal converti à la sortie FI. Pour cela, la fréquence RF est balayée de 6 GHz à 18 GHz, par pas de 2 GHz, avec une puissance constante de -20 dBm . La FI est maintenue constante à 4 GHz, ce qui implique un OL entre 10 GHz et 22 GHz.

Pour chaque fréquence RF, la puissance de l'OL est balayée de -9 dBm à 8 dBm , et la puissance de la FI est mesurée. Cela permet de caractériser le comportement du mélangeur en fonction du niveau d'excitation de l'OL, et d'identifier la plage de puissance optimale pour une conversion efficace.

On observe que, grâce à l'amplificateur intégré pour l'OL au sein du mélangeur, il n'est pas nécessaire d'injecter une puissance OL élevée. Le fonctionnement optimal est atteint dès une puissance

d'environ -2 dBm, qui constitue ainsi le plancher de puissance requis pour assurer une conversion efficace.

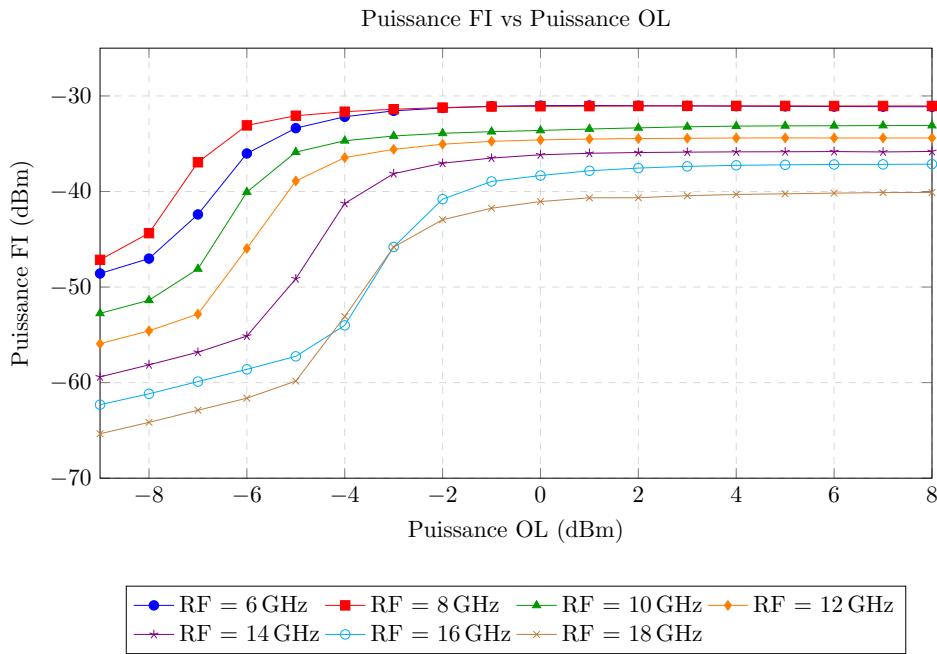


FIGURE 6.5 – Influence de la puissance OL sur la puissance FI pour différentes fréquences RF (FI = 4 GHz, RF = -20 dBm).

6.3.7 Spurious 2RF – OL dans la bande FI

Les spurious 2RF – OL ont été identifiés au préalable par le script Python . Ce programme lit un fichier d'entrée (fréquences RF min/max, OL fixe ou variable, bande FI min/max, coefficients m, n , pas de balayage, mode *infradyne/supradyne*) et dresse la liste complète des fréquences utiles, images et parasites. Dans la présente campagne de mesure, seuls les spurious 2RF – OL situés dans la bande FI ont ensuite été mesurés sur le banc.

Les mesures ci-dessous ont été réalisées avec un OL à **+8 dBm** et une RF à **-20 dBm**. La RF est balayée de 7 GHz à 13 GHz (par pas de 0.5 GHz) de façon à viser une FI à 4 GHz ($2f_{RF} - f_{OL} = f_{FI}$).

TABLE 6.1 – Niveau du spurious 2 RF – OL (dBc)

RF (GHz)	OL (GHz)	2 RF – OL
7	10	79.6
7.5	11	86.44
8	12	85.2
8.5	13	89.0
9	14	72.25
9.5	15	77.3
10	16	81.95
10.5	17	83.94
11	18	78.6
11.5	19	81.2
12	20	91.6
12.5	21	93.5
13	22	91.0

Données brutes du mélangeur

Les fichiers de mesure sont regroupés dans l'archive : 
Contenu principal :

- `conversion_loss.dat` : pertes de conversion (RF 6–18 GHz, FI 4 GHz).
- `RF_leakage.dat` : fuite de la RF vers la FI.
- `OL_leakage.dat` : fuite de l'OL vers la FI.
- `OL_driver6GHz.dat`, `OL_driver8GHz.dat`, ..., `OL_driver18GHz.dat` : dépendance de la puissance OL pour chaque fréquence RF.

Bibliographie

- [1] Everything RF, “Spurious Free Dynamic Range (SFDR) Calculator.” <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/spurious-free-dynamic-range>.
- [2] Everything RF, “What is P1dB ?” <https://www.everythingrf.com/community/what-is-p1db>.
- [3] Analog Devices, “Noise Figure Measurement Methods and Formulas.” <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/noise-figure-measurement-methods-and-formulas--maxim-integrated.html>.
- [4] Mini Circuit, “How to calculate cascaded P1dB.” <https://www.csesolutions.com.au/2023/05/18/what-is-directivity-in-a-directional-coupler/>.

Annexe A

Annexes

.1 Fichiers .zip

Liste des données

-  → Données de mesure du LNA
-  → Données de mesure du filtre tunable
-  → Données de mesure du mélangeur
-  → Données de mesure de la puissance de sortie du PLL

Liste des codes python

-  → Code de calcul du SFDR
-  → Script de détection de raies parasites
-  → Outil d'exploration d'architectures
-  → Script de vérification des architectures générées

Remarque : double-cliquez sur chaque épingle pour télécharger le dossier depuis le PDF.