



Institut de Physique de Nice

---

# TRANSMISSION D'ONDE WiFi ET APPLICATIONS AU TRAVERS DU SYSTÈME MIMO

---

PROJET TUTEURÉ



LAGARRIGUE Alek  
ROY Anthony  
TAHMI Yanel

Tuteur : M. KUHL Ulrich

19 Janvier 2017 - 31 Mai 2017

# Table des matières

## 1 Présentation

- 1.1 Introduction . . . . .
- 1.2 Objectif du projet . . . . .
- 1.3 Déroulement du projet . . . . .

## 2 Étude du signal entrant

- 2.1 Calibration de l'analyseur de fréquence . . . . .
- 2.2 IQ modulateur . . . . .
  - 2.2.1 Théorie . . . . .
  - 2.2.2 Analyse des Résultats . . . . .
    - 2.2.2.1 Evolution de l'intensité en variant la phase . . . . .
    - 2.2.2.2 Evolution de l'intensité en variant dB . . . . .
    - 2.2.2.3 Evolution de la phase en variant la phase . . . . .
    - 2.2.2.4 Evolution de la phase en variant dB . . . . .

## 3 WiFi et MIMO

- 3.1 WiFi . . . . .
- 3.2 MIMO . . . . .
  - 3.2.1 Diversité spatiale . . . . .
  - 3.2.2 Multiplexage spatial . . . . .
  - 3.2.3 Beamforming . . . . .

## 4 Etude de l'expérience MIMO

- 4.1 Une antenne émettrice . . . . .
- 4.2 Deux antennes émettrices . . . . .
- 4.3 Conclusion et ouverture . . . . .

## 5 Remerciements et Bibliographie

- 5.1 Remerciements . . . . .
- 5.2 Bibliographie . . . . .

# Chapitre 1

## Présentation

### 1.1 Introduction

Le début du 20ème siècle voit l'émergence d'une nouvelle technologie, qui sera, en l'espace d'un siècle, utilisée par plusieurs millions de personnes dans leur quotidien : la transmission sans fil ou TSF. Cette technologie permet l'échange de données par modulation d'ondes électromagnétiques et permet donc d'échanger ou juste de transmettre des informations entre deux endroits spatialement différents sans condition sur le milieu séparant les points de transmission et de réception. Hormis le fait que le milieu permette la propagation de l'onde (généralement le vide, l'air ou l'eau). Le nombre d'application est énorme, notamment dû au fait que l'échange est quasiment instantané, l'onde se propageant à la vitesse de la lumière. Cependant, la généralisation de l'utilisation de la transmission sans fil, crée de nouveaux problèmes techniques, liés au débit de données transmises mais aussi à la qualité du signal reçu.

### 1.2 Objectif du projet

L'objet d'étude du projet est la transmission de données via des ondes électromagnétiques en ne modifiant que l'intensité et la phase des sources. C'est le concept du codage d'une onde, WiFi ici, mais nous ne travaillerons pas sur les mêmes fréquences que le WiFi, afin de ne pas interférer avec les signaux existants. Cependant le principe reste le même.

On étudie donc le comportement du signal en fonction du milieu entre les 2 antennes (émettrice et réceptrice) au départ, puis entre plusieurs couples d'antennes : des émettrices et une réceptrice (ou également une émettrice et des réceptrices dont on ne s'intéressera pas pour le projet). Dans notre projet on se limitera à une seule antenne réceptrice pour des raisons techniques et matérielles. Les antennes sont assimilées à des dipôles électriques mais nous ne rentrerons pas dans le détail de leur fonctionnement car ce n'est pas l'objectif de notre sujet.

On étudie le comportement des signaux transmis et réfléchis uniquement entre les antennes, car on peut faire abstraction de ce qui se passe dans les câbles et différents modules (IQ modulateur) grâce à la calibration. Ces différentes informations, coefficients de transmission et de réflexion, apparaissent au sein d'une matrice S contenant sur sa diagonale les coefficients de réflexion, et sur ses termes non-diagonaux, les informations de transmission à partir des différentes antennes.

### 1.3 Déroulement du projet

Dans la première partie du projet on s'intéressera surtout sur la calibration du système et sur le fonctionnement de l'IQ modulateur, ce qui nous permettra de connaître avec précision les composantes de notre signal arrivant sur l'antenne émettrice. On effectuera ensuite une analyse sur la réception du signal avec une seule antenne réceptrice. On traitera ensuite le fonctionnement de notre système avec plusieurs dipôles d'émission.

# Chapitre 2

## Étude du signal entrant

### 2.1 Calibration de l'analyseur de fréquence

Afin de pouvoir réaliser nos expériences, nous utiliserons un analyseur de fréquence qui nous permettra d'imposer les fréquences que l'on appliquera à nos antennes mais aussi de mesurer les phases et les amplitudes des signaux arrivant sur notre antenne réceptrice. Pour cela nous devons faire une calibration pour augmenter la précision de nos mesures. Lors de la calibration, on effectue 3 mesures sur chaque câble à l'aide de 3 outils. Ces outils sont load (une résistance de 50 ohm), short et open.

Load nous permet de connaître la perte du câble, car sa résistance est connue.

Short met le câble en court-circuit et nous permet de connaître sa transmission ainsi que le déphasage du signal introduit par celui-ci.

Open met le câble en circuit ouvert et nous permet d'en connaître la réflexion et retrouve le même déphasage qu'avec le Short.

Les outils Short et Open permettent également de trouver la longueur du câble. Ainsi lorsque l'on met un circuit entre les 2 câbles calibrés, on peut étudier directement l'action du circuit sur le signal, car l'analyseur de réseau prend déjà en compte l'action des câbles sur le signal. De plus l'analyseur de réseau fournira des informations sur les signaux transmis et réfléchis par chacun des câbles.

Le signal

$$e^{j\omega t + \phi_m(\omega)} \quad (2.1)$$

avec

$$\phi_m(\omega) = \phi_{\text{ligne}} + \phi_{\text{open/short}} \quad (2.2)$$

### 2.2 IQ modulateur

#### 2.2.1 Théorie

Fonctionnement de l'IQ modulateur : le signal entrant est décomposé en 2 parties :  $I$  et  $Q$ . Chacune possédant les informations sur la phase, la pulsation et l'amplitude.  $I$  contient l'information de la phase dans un cosinus,  $Q$  dans un sinus. Pour modifier l'amplitude et la phase, on opère les variations dans  $I$  et  $Q$ .

$$\begin{aligned} e(t) &= E \cos(\omega t + \phi(t)) & (2.3) \\ &= E(\cos(\omega t) \cos(\phi(t)) - \sin(\omega t) \sin(\phi(t))) \\ &= I(t) \cos(\omega t) + Q(t) \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

$$I(t) = E \cos(\phi(t)) \quad (2.4)$$

$$Q(t) = E \sin(\phi(t)) \quad (2.5)$$

$$I^2(t) + Q^2(t) = E^2 \quad (2.6)$$

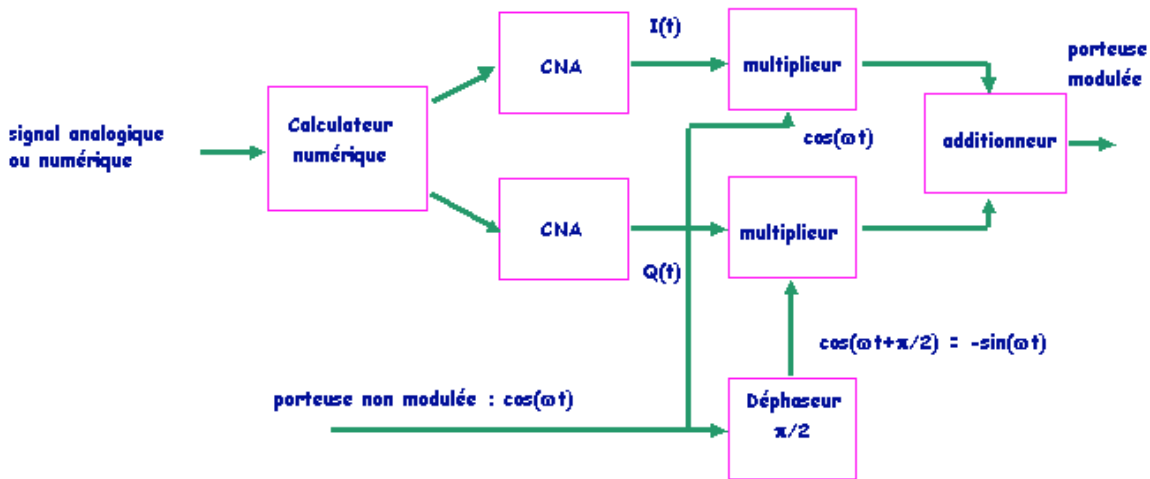


FIGURE 2.1 – Description IQ modulateur

Limites de l'IQ modulateur : On peut modifier facilement l'amplitude du signal. Ceci est lié au fonctionnement de l'IQ, pour augmenter l'intensité du signal. Il faudrait apporter de l'énergie via un nouveau signal qui posséderait une même période et même phase, chose difficile à introduire. Mais pour diminuer l'intensité, il suffit d'introduire une résistance ou d'avoir une augmentation de la longueur du circuit, ce qui est simple et facile à appliquer sur la partie  $I$  et  $Q$  du signal, sans entraîner d'erreur. Cependant l'amplitude du signal ne peut être que diminuée. On peut alors définir la nouvelle amplitude et la nouvelle phase de notre signal en posant :

$$E = Q'^2 + I'^2 \quad (2.7)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{Q'}{I'} \right) \quad (2.8)$$

Avec  $Q'$  et  $I'$  les valeurs de  $I$  et  $Q$  transformé par le IQ modulateur.

Lors de la variation de la phase, on ne varie pas la phase sur le signal  $e(t)$  de départ, mais sur le signal  $I$  et  $Q$ . On doit donc modifier de la même manière la phase comprise dans un cosinus dans un côté ( $I(t)$ ) et dans un sinus de l'autre ( $Q(t)$ ). On peut facilement modifier une phase via une action mécanique (augmentation de la distance parcourue dans un métal spécifique, ainsi on peut agir sur la phase d'un des signaux, et compenser la perte d'amplitude sur l'autre).

L'introduction d'un déphasage de  $2\pi$  n'introduit aucune erreur, ce qui est équivalent à introduire aucun déphasage. Les erreurs potentielles découlent de la limite du codage des valeurs de déphasage, l'ordinateur converti les valeurs introduites en codage 8 bits, ce qui peut apporter une incertitude entre les valeurs utilisées par l'IQ Modulateur et celles données dans le terminal.

En pratique on ne fera pas varier les composantes  $I$  et  $Q$  sur l'ordinateur de contrôle mais l'atténuation de l'intensité en décibel  $dB$  et la phase  $\phi$ . Le rapport entre les différentes courbes prises à des  $dB$  différents respecte une loi qui est défini par l'équation 2.9 :

$$\frac{I(dB = j)}{I(dB = i)} = 10^{\frac{j-i}{10}} \quad (2.9)$$

### 2.2.2 Analyse des Résultats

On observe que l'intensité de l'onde transmise varie avec la fréquence. Certaines fréquences sont donc plus aptes à transmettre le signal que d'autres et ainsi minimiser la réflexion, l'absorption ou la perte du signal dans l'IQ modulateur (contact entre câble et le IQ, système interne de l'IQ).

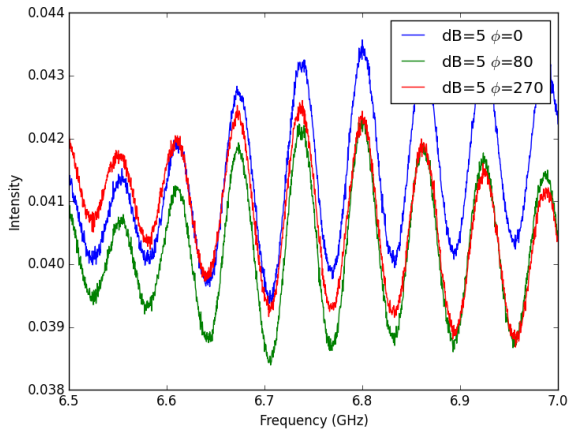


FIGURE 2.2 – Evolution de l'intensité du signal en fonction de la fréquence à dB constant et différents  $\phi$

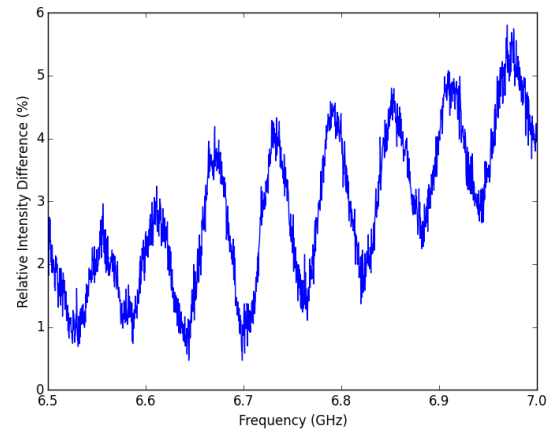


FIGURE 2.3 – Différence relative des intensités en fonction de la fréquence à dB constant et différents  $\phi$

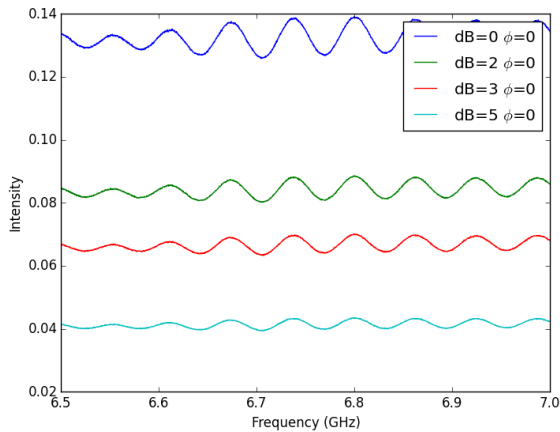


FIGURE 2.4 – Evolution de l'intensité du signal en fonction de la fréquence à  $\phi$  constant et différents dB

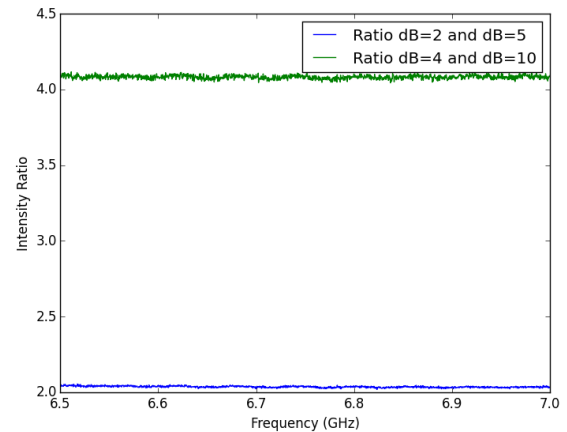


FIGURE 2.5 – Rapport des intensités en fonction de la fréquence à  $\phi$  constant et différents dB

### 2.2.2.1 Evolution de l'intensité en variant la phase

À dB constant, si on fait varier  $\phi$ , on note que l'intensité transmise change en fonction de la fréquence. Ceci est lié aux limites de l'IQ (voir fonctionnement de l'IQ plus haut). Certaines fréquences permettent une meilleure transmission du signal, alors que d'autres vont l'atténuer.

Si l'on change uniquement la phase introduite via l'I/Q modulateur on notera que l'amplitude du signal transmis varie légèrement en comparaison du signal "étalon" qui est celui à déphasage nul. L'intensité des différentes courbes varie plus pour les hautes fréquences. Ceci est lié au fonctionnement de l'IQ modulateur et à ses limitations (on a une erreur comprise entre 1 et 6% qui croit avec la fréquence). (voir figure 2.3)

### 2.2.2.2 Evolution de l'intensité en variant dB

À une phase constante, on observe que le signal transmis est atténué de deux façons différentes. Tout d'abord en moyenne de l'intensité mais également en amplitude de cette même intensité.

On constate que les différentes courbes possèdent la même phase et la période. Cependant on a une baisse d'intensité et d'amplitude lorsque qu'on augmente la valeur du dB au travers de l'IQ modulateur. L'intensité varie en fonction de la fréquence utilisée (générant donc cette courbe quasi-sinusoidale observée). Ceci confirme donc une différence de transmission en fonction de la fréquence employée (voir figure 2.4).

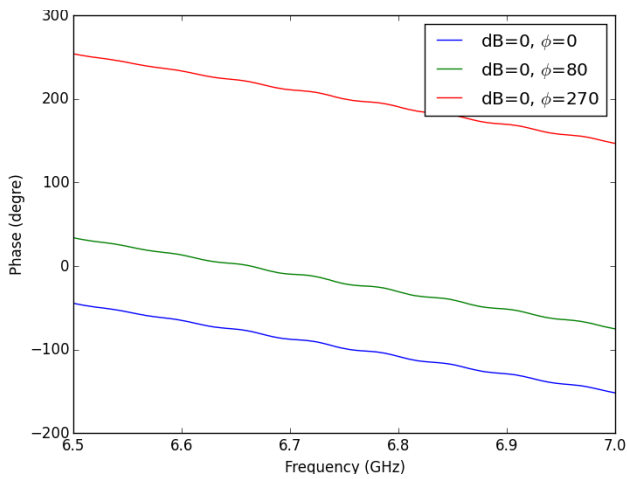


FIGURE 2.6 – Evolution de la phase en fonction de la fréquence à  $dB$  constant

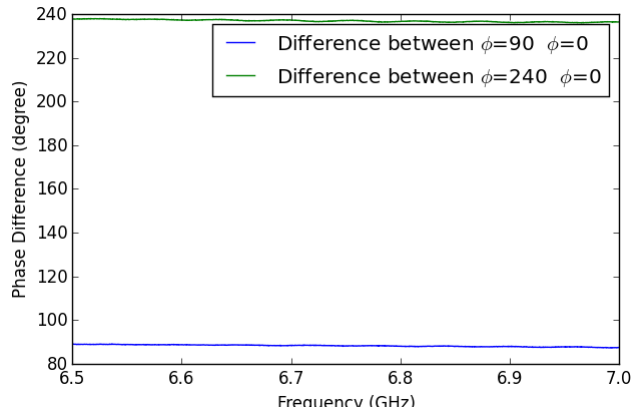


FIGURE 2.7 – Différence des phases en fonction de la fréquence à  $dB$  constant

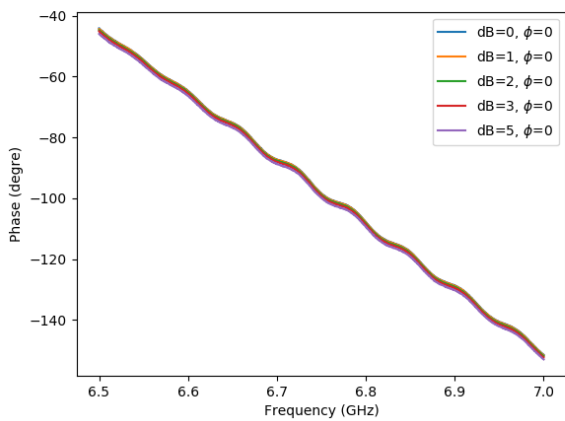


FIGURE 2.8 – Evolution de la phase en fonction de la fréquence à  $dB$  différents et  $\phi$  constant

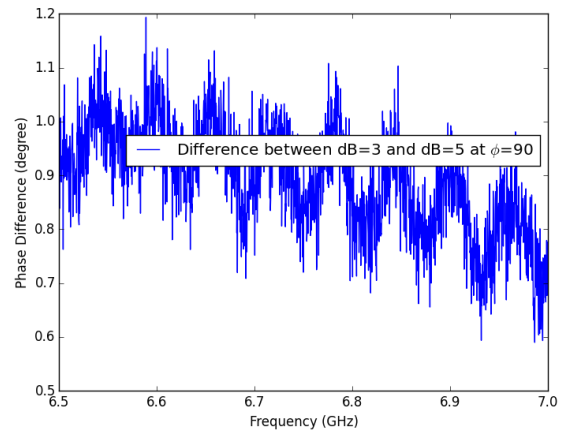


FIGURE 2.9 – Différence de phase en fonction de la fréquence à  $dB$  différents et  $\phi$  constant

Si l'on s'intéresse maintenant à la conformité des résultats des rapports des intensités avec l'approche théorique (voir 2.9), on peut constater une légère erreur avec les valeurs attendues. On prend pour exemple des courbes d'intensité à  $\phi$  constant et un  $\Delta dB$  valant 3dB ou 6dB. La théorie nous donne, respectivement, des valeurs pour les rapports de 2,00 et 3,98. Or sur notre graphique les valeurs valent à peu près 2,05 et 4,1 ce qui nous donne une erreur relative équivalente à 3% (voir figure 2.5).

### 2.2.2.3 Evolution de la phase en variant la phase

Le graphique représentant l'évolution de la phase en fonction de la fréquence ne présente pas d'erreur notable lors de la variation de phase introduite par l'IQ modulateur (voir figure 2.6). On note cependant une légère différence entre les écarts relatifs des phases quand on modifie les phases, de l'ordre de  $3^\circ$  (voir figure 2.7).

### 2.2.2.4 Evolution de la phase en variant dB

Cependant on notera des légères variations de la phase lors de la comparaison de courbes à phases constantes et de dB variables. Les raisons de ce déphasage, proviennent des limites de l'IQ modulateur à

conserver une phase constante en variant l'intensité (l'inverse est également valable comme vu précédemment, conserver l'intensité en variant la phase) comme détaillé ci-dessus (voir figure 2.8).

Si l'on regarde maintenant l'évolution de la phase en fonction de la fréquence, on remarque que la phase imposée par l'IQ modulateur ne change pas le comportement de la phase. Elle effectue une translation sur l'axe des ordonnées (axe de phase) de valeur égale à la phase imposée. De plus la différence des phases entre les différents graphiques confirme cette idée. On notera que la variation en dB n'influe en rien (variation inférieure à 1 degré, liée aux limitations et à l'erreur de l'IQ modulateur) (voir figure 2.9).



# Chapitre 3

## WiFi et MIMO

### 3.1 WiFi

Le WiFi (Wireless Fidelity)

### 3.2 MIMO

Le système MIMO utilise des fréquences de 2,4 GHz ou de 5GHz. Avec des écarts de 20MHz au minimum entre chaque antenne émettrice.

Le principe du système MIMO provient de l'utilisation de plusieurs couples d'antennes et de récepteurs utilisant les ondes WiFi. On en tire 3 utilisations : la diversité spatiale, le multiplexage spatial et le beamforming.

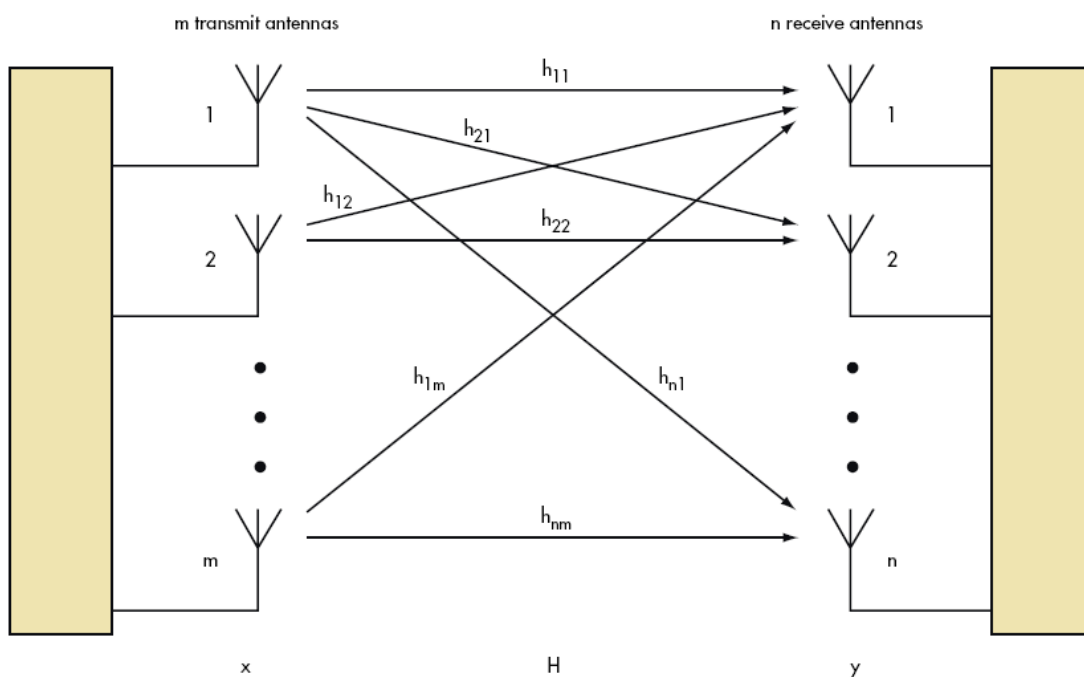


FIGURE 3.1 – Description MIMO

#### 3.2.1 Diversité spatiale

En employant les diverses antennes émettrices et réceptrices, on identifie le couple d'antennes amenant à la meilleure transmission d'informations, ou à la meilleure qualité de transmission ce qui permet d'augmenter le radio signal/bruit.

On emploie les canaux  $h_{ij}$  les plus efficaces (voir figure 3.1).

### 3.2.2 Multiplexage spatial

En créant plusieurs canaux d'informations entre les différentes antennes émettrices et réceptrices (création de plusieurs couples), on répartit l'information totale qui doit se faire transmettre. On améliore donc la vitesse de transmission d'informations, ou débit.

On emploie donc les canaux  $h_{ij}$  avec  $i = j$  (voir figure 3.1).

On peut également utiliser le multiplexage spatial en l'associant à la diversité spatiale. Ainsi nous avons la possibilité de créer à partir d'un système MIMO, composé de plusieurs antennes réceptrices et émettrices, des sous-systèmes traitant d'un côté le multiplexage et de l'autre la diversité.

### 3.2.3 Beamforming

En modifiant les phases des signaux émis par les différentes antennes, on crée des interférences, qui sont destructives en différents points de l'espace. Ainsi on peut se retrouver avec uniquement certains récepteurs dans des zones sans signal, via les interférences. Ceci permet de cibler celui qui peut recevoir l'information. Cela correspond donc au fait que certains canaux n'apportent aucun signal.

Il existe des  $j$  tel que  $h_{ij} = 0$  pour tout  $i$  (voir figure 3.1).

## Chapitre 4

# Etude de l'expérience MIMO

Nous utiliserons pour notre expérience trois antennes : deux émettrices et une réceptrice. Nous envoyons un signal au travers de l'une ou l'autre ou les deux antennes, ayant différentes phases et intensités. On en tire une évolution de l'intensité reçue, au niveau de l'antenne réceptrice, liée à la transmission du milieu entre les antennes et à l'interférence que subissent les signaux (quand les deux antennes émettent). L'intensité du signal au niveau des deux antennes émettrices est divisé par 2. En effet, nous divisons le câble apportant le signal de départ en 2, afin d'amener le même signal sur les 2 IQ modulateurs couplés chacun à leur antenne respective (voir figure 4.1). On peut donc retrouver sur l'antenne réceptrice une intensité égale à l'intensité de départ (sans compter les pertes) ou inférieure.

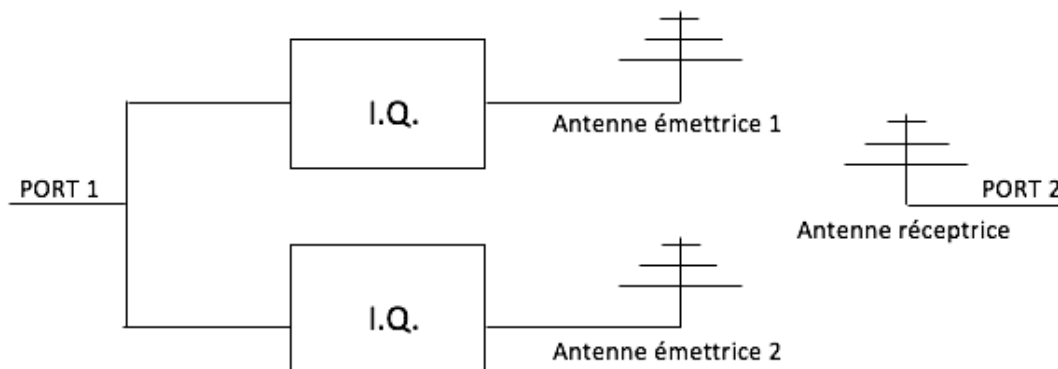


FIGURE 4.1 – Schéma de l'expérience du système MIMO

### 4.1 Une antenne émettrice

On constate que le signal varie grandement en fonction de la fréquence, traduisant la transmission du signal au travers des antennes et du milieu entre celles-ci (émettrice et réceptrice). De plus, le signal reçu n'est pas le même suivant l'antenne émettrice choisie, ceci s'explique par la disposition des antennes. En effet, la distance entre l'antenne émettrice 1 et la réceptrice est différente de la distance entre l'antenne émettrice 2 et la réceptrice. On observe que le signal transmis par l'antenne 1 uniquement est plus puissant pour les

hautes fréquences de notre plage d'étude (6.5 à 7.0 GHz) que pour l'antenne émettrice 2, et le signal est plus puissant dans les basses fréquences pour l'antenne 2 (pic d'intensité vers 6.6 GHz) (voir figure 4.2).

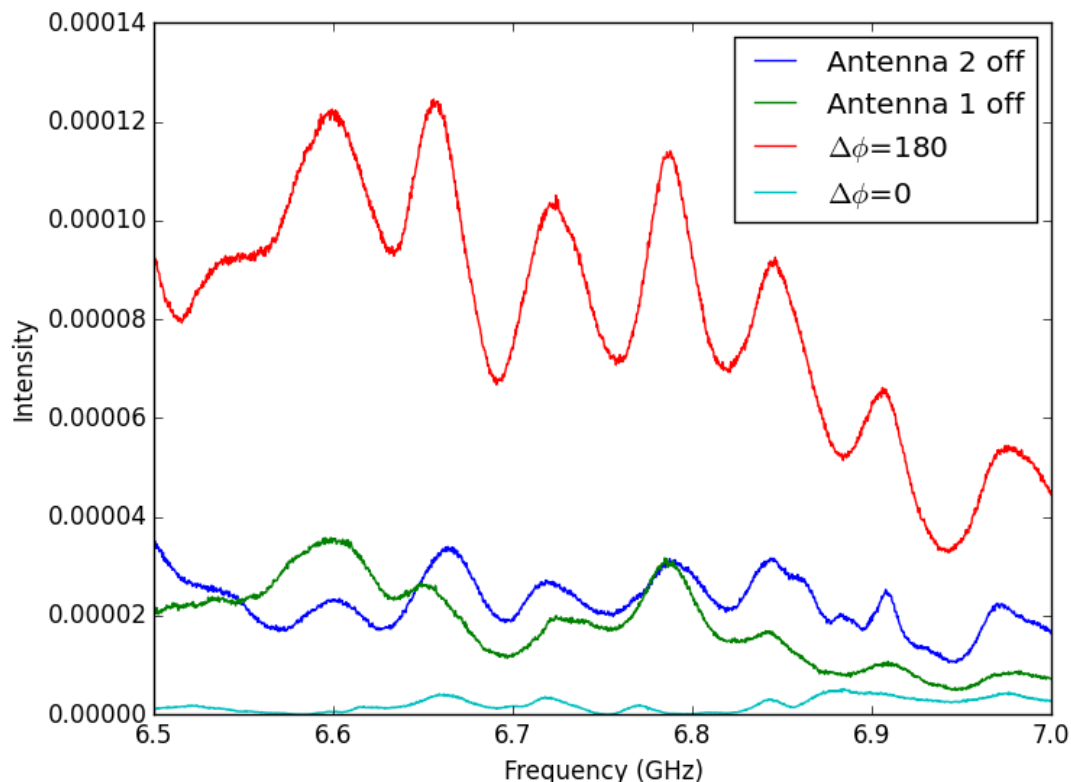


FIGURE 4.2 – Evolution de l'intensité du signal reçu en fonction de la fréquence, avec uniquement l'antenne 1 émettant, uniquement l'antenne 2 émettant, et les 2 antennes émettant pour un déphasage différent

On fera l'approximation que la fixation de dB=40 reviendra à considérer que l'antenne n'émette aucun signal, car l'amplitude de l'onde résultante est de l'ordre du bruit dans le laboratoire (voir figure 4.3).

## 4.2 Deux antennes émettrices

On note que l'intensité du signal reçu peut être plus importante ou faible que dans le cas où il n'y avait qu'une seule antenne émettrice (voir figure 4.2). Ceci traduit le principe du Beamforming (décrit précédemment), soit le fait que les ondes interfèrent de manière constructive ou destructive (voir figure 4.4).

On observera cependant que pour le cas des deux antennes émettrices fonctionnant en même temps avec un déphasage de 180 degrés, l'intensité reçue est plus importante que la somme des modules des intensités des deux antennes émettant individuellement (s'il y avait égalité, on aurait le cas d'une interférence constructive parfaite). Les réflexions des ondes dans le milieu ambiant sont prises en compte dans les deux cas, et les conditions du milieu de l'expérience n'ont pas changé entre temps. Cette intensité plus importante que prévue, ne sera pas expliquée. Cependant cette courbe illustre le phénomène d'interférence constructive.

Dans notre expérience, la distance entre l'antenne 1 et le récepteur est de 22,7 cm et celle entre l'antenne 2 est de 20,2 cm. Le milieu entre les antennes peut être considéré comme isotrope et homogène (l'air). Pour calculer le déphasage optimal pour obtenir une intensité maximale en réception peut donc être calculé juste avec la différence de chemin parcouru par les 2 ondes. On pourra dans cette première expérience négliger les réflexions des ondes sur le milieu entourant notre configuration.

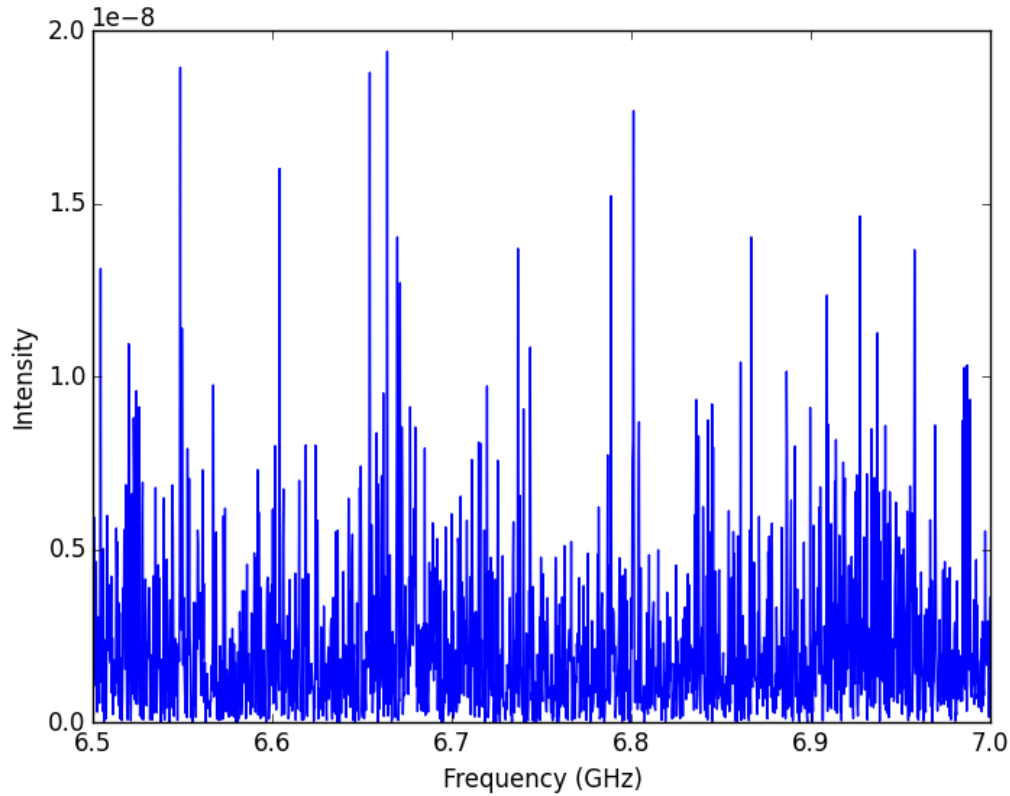


FIGURE 4.3 – Evolution de l'intensité du signal reçu lorsque les dB des 2 antennes est égale à 40

$$2\text{Re}(e^{ik_1r_1+\phi}e^{-ik_2r_2}) = 2\cos(k_1r_1 - k_2r_2)$$

$$\text{Maximum quand } k_1r_1 - k_2r_2 + \phi = 2n\pi$$

$$k_1 = k_2 = k \Rightarrow \phi = 2n\pi + k(r_2 - r_1) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{On prend } n = 0; &= k(r_2 - r_1) \\ &= \frac{2f\pi}{c}(r_2 - r_1) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Application numérique  $r_2 - r_1 = 2,5 * 10^{-2}\text{m}$

$$f = 6,5 * 10^9\text{Hz}$$

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2\pi 6,5 * 10^9 * 2,5 * 10^{-2}}{3 * 10^8} \\ \phi &= \pi \frac{32,5}{3} 10^{-1} \\ \phi &= 1,1\pi \end{aligned} \quad (4.3)$$

La théorie nous donne donc un déphasage optimal pour une valeur de  $\Delta\phi$  autour de  $\pi$  à une fréquence de 6,5 Ghz. La théorie et notre expérience sont donc en adéquation.

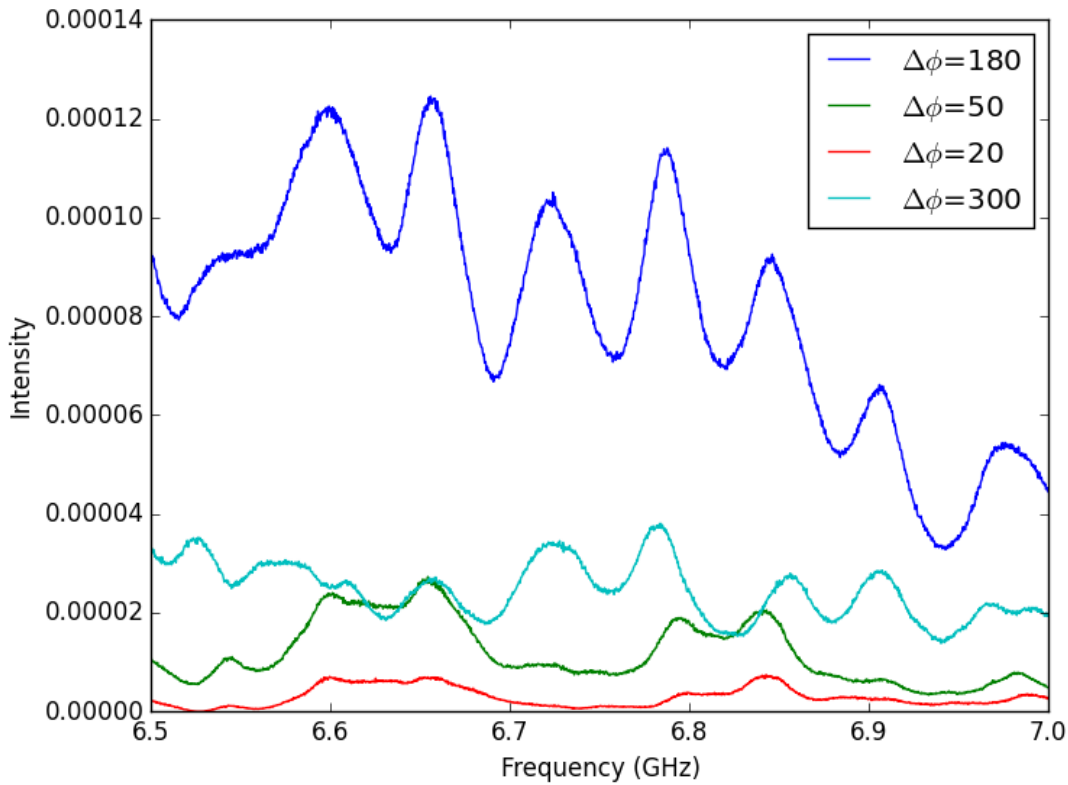


FIGURE 4.4 – Evolution de l'intensité du signal reçu en fonction de la fréquence, avec les 2 antennes émettant pour un déphasage différent

### 4.3 Conclusion et ouverture

Les expériences menées jusqu'ici nous ont permis de connaître avec de bonnes précisions, les composantes nécessaires et modulables de nos signaux. Elles sont en accord avec des modèles simples de l'électromagnétisme. Ainsi, nous pouvons commencer des expériences plus complexes, notamment en traitant des milieux qui ne sont pas homogènes entre nos antennes, afin d'optimiser la qualité et les performances de notre réseaux.

On pourra par la suite placer des objets de différentes natures entre nos antennes, voire augmenter le nombre d'antennes pour mieux gérer les zones de réceptions optimales et ainsi se rapprocher d'un réseau Beamforming complexe.

# Chapitre 5

## Remerciements et Bibliographie

### 5.1 Remerciements

Nous remercions le Laboratoire de Physique de la Matière Condensée pour nous avoir permis la réalisation de notre projet dans leur laboratoire de recherche, ainsi que l'utilisation de leur matériel.

Également, nous remercions notre encadrant Monsieur Ulrich Kuhl pour avoir accepté d'encadrer notre projet, de nous avoir aidé lors de sa réalisation, sa manipulation et sa programmation sur python (logiciel permettant le traitement des données).

Monsieur Olivier Legrand pour sa contribution à l'utilisation du logiciel LaTeX.

Ainsi que Monsieur Ali El Amri pour son aide lors de la programmation de python sur Maccintosh.

Enfin Madame Valérie Doya, pour l'encadrement du projet, son aide sur le fonctionnement du logiciel LaTeX, ainsi que sa flexibilité concernant l'échéance du rapport.

### 5.2 Bibliographie

<https://fr.wikipedia.org/wiki/MIMO>

<http://www.ta-formation.com/applets/mod-IQ/jav-IQ.htm>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Décibel>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>

Wave Front Shaping in Quasi-One-Dimensional Waveguides from Julian Böhm and Ulrich Kuhl