|  |  |
| --- | --- |
| Une image contenant texte, carte  Description générée automatiquement | |
| **Stage Assistant Ingénieur**  **-**  **Ingénieur des Études et Techniques de l’Armement Maxime BARRET** | |
| Une image contenant chemise  Description générée automatiquement | École Royale Militaire  Rue Hobbema, 8  1000 Bruxelles, Belgique  BARRET, Maxime, maxime.barret@ensta-bretagne.org |

# Remerciements

Je tiens à remercier Mr Ali Kenchaf, de m’avoir orienté vers l’École Royale Militaire pour ce stage. Malgré le contexte actuel, j’en retiens de bonnes expériences qui ont permis de développer mon esprit d’initiative.

Merci au Pr. Xavier Neyt de m’avoir donné ce sujet, et avoir encadré mon stage d’assistant ingénieur.

De plus, je tiens à remercier Élie et François pour le soutien, la solidarité et l’esprit d’entraide dont ils ont su faire preuve durant ce stage.

Enfin je remercie ma compagne, Julia, de m’avoir soutenu dans mes initiatives et pour sa patience sans faille.

# Résumé

Mon stage d’assistant ingénieur s’est entièrement déroulé en ligne, et sur ordinateur. Axé sur la formation de faisceaux et la simulation, mon travail a été réalisé sur l’outil Jupyter Notebook[[1]](#endnote-1).

Dans ce rapport, nous considérerons que nous sommes aux commandes d’un drone aérien ou terrestre dont la discrétion est primordiale. La position et la vitesse de ce drone peuvent être déterminées par un ou plusieurs RADAR « ennemis » : le but est ici d’utiliser la formation de faisceaux pour tromper ces RADAR, et ainsi transmettre des informations contradictoires ou effacer la présence du drone. Après détermination du domaine d’application des différentes méthodes de formation de faisceaux, plusieurs simulations sur Jupyter ont été faites pour correspondre à des situations réalistes, et analyser les résultats.

# Abstract

My internship as a deputy engineer was solely remote, on my computer. Based on beamforming and simulation, the results of my work were coded on Jupyter Notebooks.

In this report, we will consider ourselves to be in charge of a UAV or UGV of which stealth is primordial. The drone’s position and speed can be determined by enemy RADAR systems : our goal is to make use of beamforming in order to send contradictory information or even make the drone disappear. After determining the validity domain of the many beamforming methods available, several Jupyter simulations were conducted to be as close as possible to reality and draw conclusions.

Sommaire

[Remerciements 2](#_Toc51932130)

[Résumé 3](#_Toc51932131)

[Abstract 3](#_Toc51932132)

[Introduction 5](#_Toc51932133)

[I. Contexte académique et sanitaire 6](#_Toc51932134)

[1. École Royale Militaire 6](#_Toc51932135)

[2. Département d’accueil 7](#_Toc51932136)

[3. Déroulement du stage 7](#_Toc51932137)

[4. Actions prises et outils utilisés 7](#_Toc51932138)

[II. Objectifs du stage 9](#_Toc51932139)

[1. Comprendre la situation décrite 9](#_Toc51932140)

[2. Processus de contre-mesure 9](#_Toc51932141)

[3. Attentes du stage 9](#_Toc51932142)

[III. Théorie – Beamforming 11](#_Toc51932143)

[1. Introduction 11](#_Toc51932144)

[IV. Simulation – Les notebooks 11](#_Toc51932145)

[Conclusion 11](#_Toc51932146)

[Table des figures 12](#_Toc51932147)

[Annexes 12](#_Toc51932148)

[Glossaire technique 12](#_Toc51932149)

# Introduction

Dans l’industrie de défense, les ingénieurs civils ou militaires sont amenés à travailler sur des systèmes complexes ayant des capacités toujours plus à la pointe de la technologie : cela permet de s’adapter aux différents contextes opérationnels pouvant être rencontrés sur les différents théâtres.

Dans un contexte opérationnel, il est nécessaire de pouvoir s’affranchir des capacités d’un appareil ennemi. Dans notre cas, nous souhaiterions être capable de tromper un RADAR ennemi. Des solutions passives permettent de réduire la *RADAR Cross Section* [[2]](#endnote-2) ou même d’absorber une grande partie des ondes reçues, mais il est aussi possible d’utiliser des solutions actives. Émettre un signal dont la fréquence, la phase et l’amplitude sont générées de façon à imiter un écho RADAR provenant d’un autre endroit permettrait d’être tout aussi furtif. Afin de pouvoir émettre le signal dans une direction intéressante vis-à-vis de la situation, il est préférable de disposer d’outils à forte directivité. Cette directivité doit aussi s’adapter au contexte électromagnétique en présence, et aux positions des sources éclairant notre système. Les *Uniform Linear Arrays[[3]](#endnote-3)* (ULA) remplissent ces prérequis.

Le Professeur Xavier Neyt m’a proposé le sujet suivant :

« **Conception d’un banc de contre-mesure RADAR – Production d’un faux écho par Beamforming** »

Le but de ce stage a été de confronter les compétences acquises en cours d’année aux activités du département d’accueil, ainsi que de se familiariser avec les techniques de formations de faisceaux avec les ULA, les algorithmes de détection de directions d’arrivée, dans le but de créer une contre-mesure RADAR.

# Contexte académique et sanitaire

## École Royale Militaire

L’École Royale Militaire est un établissement militaire d’enseignement universitaire, chargé de la formation militaire, académique et physique des officiers de toutes les composantes belges. Fondée par le roi Leopold 1er en 1834 afin de fournir à la Belgique des officiers professionnels et bien formés, dont les qualités sont à la fois athlétiques et intellectuelles. L’École Royale Militaire dispense une formation pluridisciplinaire répondant aux exigences de la défense et de la société.

Ce modèle de formation, semblable en de nombreux point à la formation des Officiers des Corps de l’Armement[[4]](#endnote-4), m’a tout de suite attiré afin d’obtenir de nouvelles compétences et aptitudes dans les domaines qui me seront d’une grande utilité dans mon parcours professionnel.

Une image contenant extérieur, bâtiment, grand, rue

Description générée automatiquement

Figure : École Royale Militaire de Belgique

L’établissement possède aussi un centre de recherche dans les domaines vastes de la défense et de la sécurité. Ce centre permet de développer des systèmes technologiquement avancés à partir des différentes recherches des départements le composant.

## Département d’accueil

Le département m’ayant accueilli durant l’été est le CISS : *Communication, Information, Systems & Sensors*.

Mon tuteur, le Dr. Ir. Xavier Neyt, fait partie de ce département, et dirige l’unité de recherche sur le traitement d’image.

Les recherches et les travaux d’ingénierie effectués dans ce département se concentrent sur l’acquisition, le traitement, et l’interprétation de données multimodales dans le but d’assister une prise de décision.

Répondant au besoin constant de montée en niveau technologique, ce département est particulièrement sollicité de par l’évolution du contexte opérationnel. Les équipements et infrastructures dont le département bénéficie sont multiples et variés, tout comme les sujets traités par les unités de recherche : une chambre semi-anechoïque, une plateforme de réception RADAR bistatique, un cluster de calcul, et bien d’autres.

## Déroulement du stage

Le début du stage était initialement prévu le 5 Mai, cependant la COVID-19 a bouleversé les conventions établies, et nous a obligé à faire preuve d’inventivité et de résilience afin que le stage se déroule sans encombre. L’établissement n’était pas disposé à nous accueillir début Mai, et n’ayant pas l’autorisation de sortir du territoire à ce moment-ci, mes camarades[[5]](#footnote-1) et moi-même avons préféré consolider nos connaissances académiques et suivre la seconde partie du semestre 4.

Cette partie terminée, nous avons recontacté notre tuteur début Juin afin de commencer à réfléchir à nos sujets respectifs. Nous devions faire une réunion en visio-conférence, mais les indisponibilités récurrentes du Pr. Neyt ne nous ont pas permis de nommer les objectifs, ni d’avoir une base de notations et de termes en commun, développant ainsi notre esprit d’initiative et notre autonomie.

## Actions prises et outils utilisés

Le télétravail s’étant imposé comme la solution la moins contraignante pour mener à bien ce stage en faisant fi des difficultés sanitaires, il était nécessaire d’utiliser des outils en ligne collaboratifs. En effet, travailler sur des fichiers stockés localement augmenterait considérablement la quantité d’échanges de mails, et aurait été une perte de temps.



Figure - Logo de Jupyter, outil utilisé durant le stage

Après un succinct échange avec le Pr. Xavier Neyt, j’ai pris l’initiative de simuler les situations sur des notebooks, et de mettre en place un *repository*[[6]](#endnote-5) GitHub®[[7]](#footnote-2) afin de garder une trace de mon travail, mais aussi faciliter les éventuelles interventions de mon tuteur sur le code déjà réalisé.

Afin de rester joignable en tout temps et en tout lieu, j’ai utilisé Skype Entreprise®, logiciel préconisé par mon tuteur, mais aussi Discord® pour pouvoir discuter avec mes camarades sur des questions techniques. Ces outils sont tout particulièrement adaptés au contexte du télétravail.

# Objectifs du stage

## Comprendre la situation décrite

Afin de m’expliquer au mieux quelles étaient ses attentes vis-à-vis de moi, le Pr. Xavier Neyt m’a proposé une mise en situation. Un drone terrestre, aérien, ou maritime, se déplace dans un plan, et se fait éclairer[[8]](#footnote-3) par un ou plusieurs RADAR hostiles. Cette situation n’est pas souhaitable, car un RADAR peut dévoiler notre position, notre vitesse et certaines propriétés intrinsèque de notre drone. Ces informations peuvent mettre à mal la discrétion d’une mission dans un contexte opérationnel, mais aussi alimenter les autodirecteurs d’engins anti-drones.

L’idée pour contrer l’acquisition de données par le camp adverse sera de falsifier les données reçues par le RADAR. Pour cela il faut envoyer un signal perturbateur : ce dernier peut augmenter le RSB[[9]](#endnote-6), ou interférer de manière destructive avec la réflexion du signal RADAR.

Pour illustrer ses propos, je me suis proposé de modéliser cette situation en utilisant le langage Python[[10]](#footnote-4).

## Processus de contre-mesure

Le principe de contre-mesure que l’on souhaite mettre en place a été expliqué précédemment, il faut toutefois détailler le procédé, et le décortiquer en plusieurs phases.

* Dans un premier temps, on va d’abord estimer les directions d’arrivés des signaux RADAR hostiles. Il existe plusieurs algorithmes d’estimation de *DoA[[11]](#endnote-7)*
* Dans un second temps, ces signaux vont être analysés dans le but de savoir quels signaux envoyer pour brouiller les pistes.
* Enfin, un écho trompeur sera émis par notre drone, dans les directions d’arrivées

Dans cette situation, nous utiliserons des *ULA*. Contrairement à une simple antenne omnidirectionnelle, un ULA va nous fournir les outils d’estimation des *DoA*, mais aussi la directivité souhaitée pour émettre l’écho trompeur vers les RADAR.

## Attentes du stage

Compte-tenu de la situation et de l’objectif décrit, une contre-mesure sera efficace si chaque étape se déroule correctement. Nous simulerons une situation simple, avec plusieurs RADAR et une source, afin de nous familiariser avec les diverses notions et notations à adopter. Aussi, étant donné que toutes les notions sont nouvelles pour moi, il est nécessaire de poser un cadre simple pour commencer, et ne pas s’éparpiller à vouloir faire une simulation complète d’un bout à l’autre.

L’objectif du stage était toujours de concevoir un banc, et donc d’utiliser des équipements pour générer et recevoir des signaux : deux solutions étaient proposées par le Pr. Neyt. Tout d’abord, une initiative open source nommée HackRF[[12]](#footnote-5) est un périphérique permettant de recevoir ou transmettre des émissions RF[[13]](#footnote-6) allant de 1MHz à 6 GHz. Une autre possibilité était celle d’utiliser la plateforme propriétaire de National Instruments®, cette plateforme étant à la fois matérielle et logicielle.

En attendant les directives précisants que le stage ne se fera pas en présentiel, je me suis intéressé uniquement de manière superficielle à ces solutions. J’ai déjà eu affaire à la plateforme de National Instruments® pour utiliser un accéléromètre, système bien plus simple à mettre en place. Ici, il faut utiliser des réseaux de capteurs, l’acquisition et le traitement de données sont plus compliqués à coder avec le logiciel propriétaire[[14]](#footnote-7) de National Instruments®.

## Solutions atteignables

Le contexte dans lequel ce stage a été effectué n’a pas permis de manipuler du matériel, quel qu’il soit. De ce fait, seules des simulations ont été à ma portée. Cela permettra de développer plusieurs compétences essentielles : parfaire mes connaissances en Python, mais aussi utiliser de manière plus poussée les outils de visualisation, et d’algèbre linéaire. De plus, l’utilisation quotidienne de l’outil GitHub par le terminal, puis par l’outil graphique, est un incontournable du travail collaboratif en ligne.

Les simulations seront détaillées en IV. Tout au long de ce rapport et des fichiers en annexes, les problèmes sont considérés plans, les bruits gaussiens additifs, et les ondes en champs lointain.

# Théorie – Beamforming

## Introduction

Le *Beamforming*, ou formation de faisceaux, est une technique de traitement du signal utilisée avec des réseaux de capteurs afin d’émettre ou de recevoir des signaux directionnels. Dans le cas où le réseau d’antenne est utilisé pour recevoir un signal, on l’appellera *beamformee*, et *beamformer* dans le cas contraire.

Les signaux peuvent être sonores, mais aussi électromagnétiques, ce qui est le cas pour nous.

Pour connaitre la direction dans laquelle on reçoit une onde incidente dans une direction principale, le principe de base est le suivant : le déphasage induit par la différence de chemin entre chaque capteur.

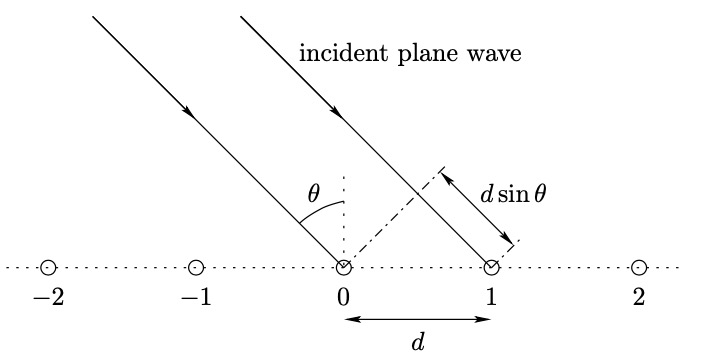


Figure - Différence de chemin entre deux capteurs successifs

Ce déphasage permet d’estimer l’angle entre la normale aux capteurs, et la direction de l’onde incidente.

Pour ce qui est de l’émission, il suffit d’induire un déphasage à chaque capteur : on favorise donc l’émission dans une émission particulière, comme décrit à la figure 4.

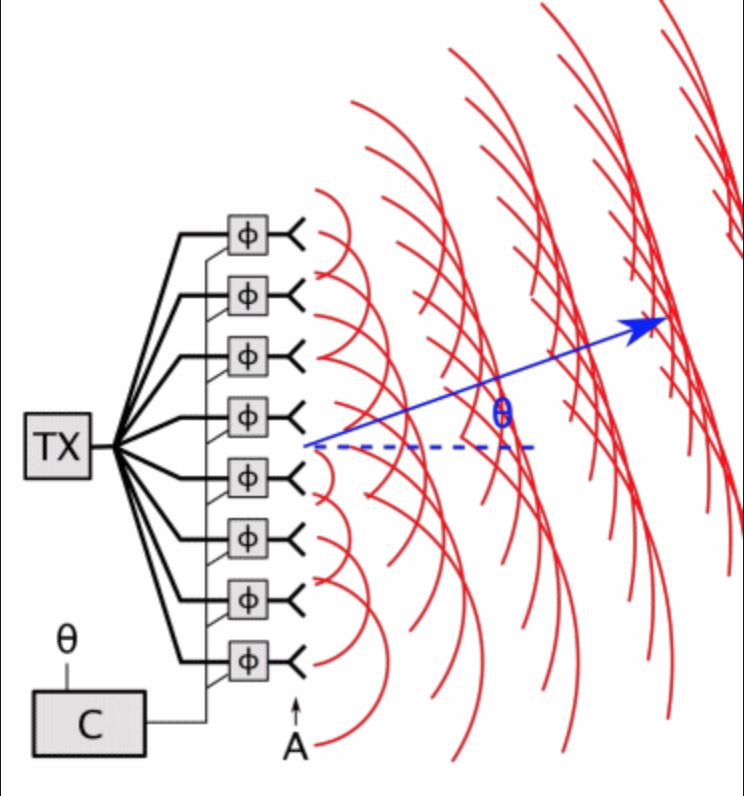


Figure - Illustration de la directivité des ULA

## Mise en équation

Dans cette partie seront données les équations régissant nos simulations, ainsi que les objets mathématiques clés pour comprendre les notions en jeu.

Afin de définir notre *ULA*, il est nécessaire de donner une distance *d*, un nombre de capteurs *M*. La grandeur correspond au rapport entre la fréquence de l’onde (émise ou reçue) et de la célérité de la lumière dans le vide.

Notre *ULA* va effectuer plusieurs *snapshot[[15]](#footnote-8)* selon l’équation suivante :

Où

* S est le nombre de sources RADAR éclairant notre cible
* correspond à l’onde envoyée par la s-ième source RADAR
* est la direction dans laquelle se trouve la s-ième source
* est le *steering vector[[16]](#endnote-8) correspondant à la direction*
* est un bruit additif

Le *steering vector* est défini par le déphasage induit entre deux capteurs successifs, de la manière suivante :

Ce vecteur va simuler le déphasage que subirait une onde provenant de la direction .

Enfin, à partir de notre *snapshot*, nous allons établir une matrice de covariance de la manière suivante :

Nous verrons que cette matrice de covariance est primordiale pour les algorithmes de *DoA.*

Il y a aussi des précautions à prendre quant à la résolution spatiale !

Au même titre que la transformée de Fourier nécessite une certaine résolution fréquentielle, le *beamforming* doit respecter certaines règles de bases, dont les équivalences sont rappelées ci-dessous.

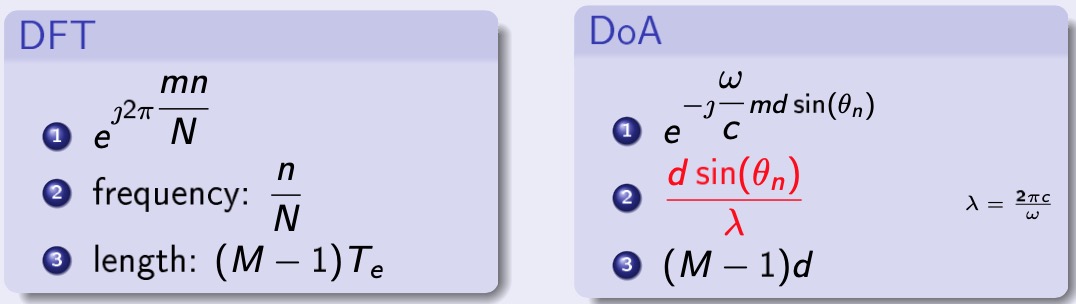


Figure - Équivalence des conditions Transformée de Fourier / DoA : Sources localization with sensor array, C. Vanwynsberghe - A. Drémeau

Avec ces équivalences, le critère de Shannon-Nyquist s’adapte à notre cas, et se met sous la forme suivante :

Nous devons donc faire attention à l’espacement entre nos capteurs, compte-tenu de la classe d’onde à laquelle on s’attend.   
  
Enfin, il faut au moins autant de capteurs que de sources à détecter.

## *Directions of Arrival* (DoA)

Lorsqu’éclairé par un ou plusieurs RADAR, et pour mettre en place notre stratégie de contre-mesure, il est nécessaire de connaître avec une certaine précision la ou les directions d’arrivée des signaux RADAR. Plusieurs méthodes existent pour les *ULA*, chacune avec leurs avantages et leurs inconvénients. Notre but est ici de les énumérer : les avantages et inconvénients de chaque méthode seront détaillés dans la partie IV.

Chaque méthode nous donne une manière de calculer la puissance reçue par notre *ULA* : à nous d’interpréter les courbes formées et d’en déduire les directions, donnée par les maxima.

### *Classical Beamforming*

Cette méthode, comme son nom l’indique, est la plus simple et la plus intuitive à mettre en place.

Nous allons calculer la puissance reçue par notre *ULA* pour chaque angle selon la formule suivante :

Les maxima de cette fonction, sur une grille allant de nous permet d’identifier les directions d’intérêt.

### *MVDR*

MVDR, ou *Minimum Variance Distortionless Response* ou encore CAPON, est une méthode de beamforming permettant de minimiser la variance du signal reçu, et d’ainsi avoir une détection plus précise. La puissance est donnée par :

On notera tout de même que pour calculer cette puissance, il faut d’abord calculer l’inverse d’une matrice. est de taille (M,M), ce qui correspond au nombre de capteurs. Si ce nombre s’était avéré trop grand, il aurait été impossible de faire tous les calculs assez rapidement.

### *MUSIC*

MUSIC est un nom mélodieux, signifiant *MUltiple Signal Classification*. Cette méthode ressemble à celle la précédente, mais est plus fine dans ce qu’elle analyse. En effet, MUSIC nous fait décomposer notre matrice de covariance en valeurs et vecteurs propres.

Les sous-espaces contenant le bruit et le signal sont donc séparés, de telle sorte que le sous-espace contenant le signal soit de dimension S [[17]](#footnote-9) et que les sous-espaces soient orthogonaux. Ainsi, aux directions d’intérêt, le sous-espace du bruit est nul.

Voici la fonction de puissance correspondante :

Où

* est la matrice correspondant au sous-espace du bruit

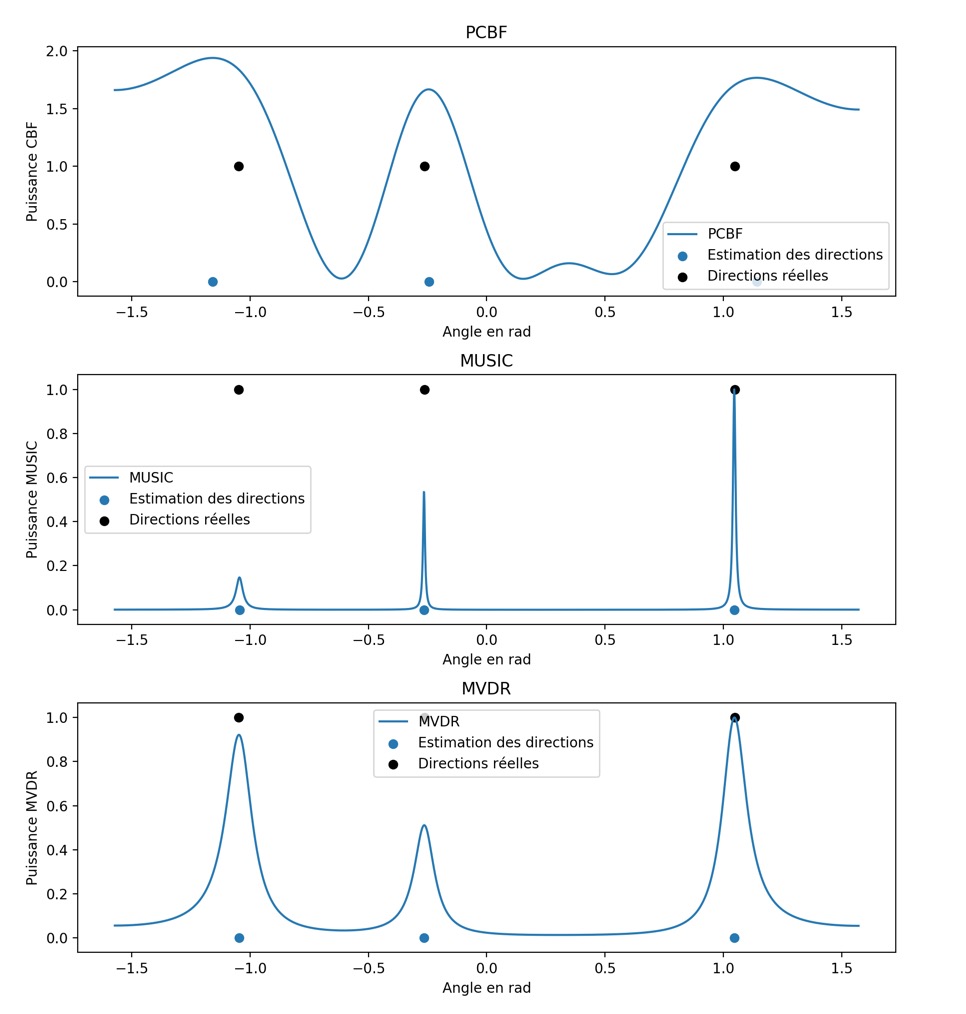


Figure - Illustration des différentes méthodes de DoA pour 3 sources

## Émission de l’écho trompeur

Après avoir détecté les directions d’arrivée, il faut donc y émettre un écho trompeur. Les émetteurs de notre *ULA* vont émettre un même signal **s**, mais déphasé, afin de générer un faisceau. C'est un *classic beamformer*.

Le signal envoyé, dans l’idéal, serait un signal de la même forme que celui reçu, tout en inversant sa phase : les interférences destructives avec l’écho renvoyé atténueront la visibilité de notre cible.

Le déphasage entre 2 émetteurs consécutifs sera de , comme décrit à la Figure 3.

# Simulation – Les notebooks

## Présentation de l’outil

Un *notebook,* ou calepin, est un outil s’ouvrant dans un navigateur. Il est composé de cellules, qui peuvent être soit du texte (Titres, formules mathématiques, équations, images), ou du script exécutable (Python, Julia, R). Sur chacune de mes *notebook*, je détaille le titre, mes sources, et explique la situation. Ainsi, indépendamment les uns des autres, chaque notebook se suffit à lui-même pour les explications.

Afin d’alléger au maximum la lecture, j’ai fait en sorte de rassembler toutes les fonctions dans un fichier python à part, que j’importe au début. De même, afin de mieux illustrer le beamforming, j’ai utilisé la bibliothèque Matplotlib, et ai fait en sorte de pouvoir animer mes courbes.

Le début de chaque notebook sert à poser toutes les variables qui seront utiles tout au long, mais aussi à importer toutes les bibliothèques pouvant s’avérer utiles : *matplotlib* pour l’affichage, *time* pour avoir le temps de calcul, *warnings* pour afficher des erreurs (faux-positif, détection manquée), mais aussi scipy

## DoANotebook

Ce notebook est le premier que j’ai créé. Il m’a permis de poser les bases de ma simulation. On montre d’abord comment change le diagramme de rayonnement de notre *ULA* en changeant la direction d’émission principale. Cela nous permet dans un premier temps de nous habituer à l’utilisation de la bibliothèque matplotlib, ainsi que de bien illustrer le fait que le gain est maximal pour une direction particulière.

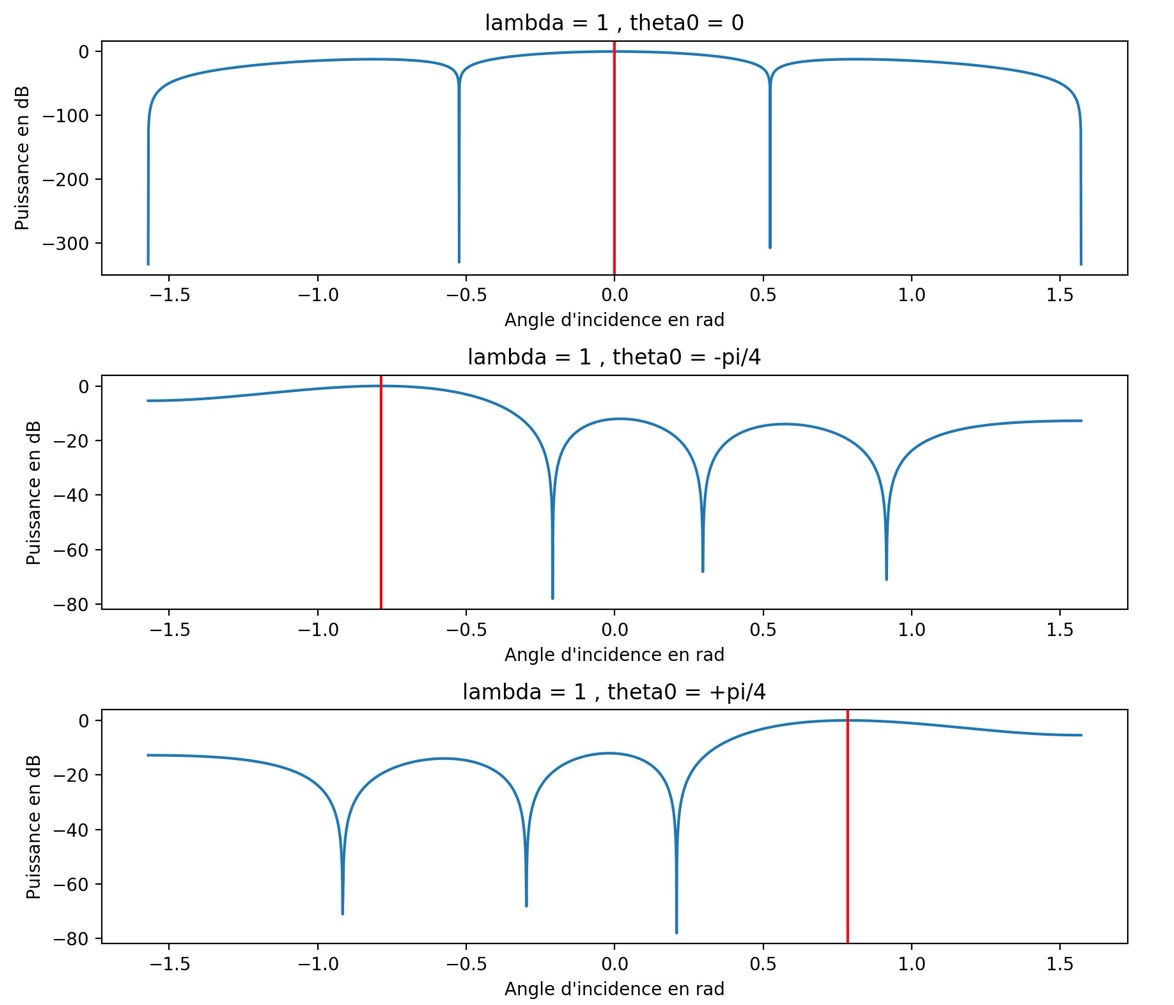


Figure - Diagrammes de rayonnement d'un ULA à 5 capteurs dans des directions données

Par la suite, j’ai construit plusieurs variables permettant de définir plusieurs sources RADAR éclairant directement notre cible, que j’ai placé aux angles suivants : , , et

# Conclusion

# Table des figures

[Figure 1 : École Royale Militaire de Belgique 6](#_Toc52196180)

[Figure 2 - Logo de Jupyter, outil utilisé durant le stage 8](#_Toc52196181)

[Figure 3 - Différence de chemin entre deux capteurs successifs 11](#_Toc52196182)

[Figure 4 - Illustration de la directivité des ULA 12](#_Toc52196183)

[Figure 5 - Illustration des différentes méthodes de DoA pour 3 sources 15](#_Toc52196184)

# Annexes

Tout est dans le git, mais bon. le Readme, le suivi du travail effectué, les fichiers Matlab permettant de simuler une antenne.

# Glossaire technique

1. Jupyter Notebook : Calepin contenant à la fois du code exécutable et du texte de type *Markdown.* [↑](#endnote-ref-1)
2. RADAR Cross Section : Aussi appelée Surface Équivalente RADAR, elle représente l’importance relative de la surface de réflexion d'un faisceau électromagnétique qu’un objet provoque. [↑](#endnote-ref-2)
3. ULA : Un Uniform Linear Array est une succession de capteurs disposés linéairement et à distances égales. Dans notre cas, les capteurs utilisés sont des antennes RADAR. [↑](#endnote-ref-3)
4. OCA : Les Ingénieurs de Études et Techniques de l’Armement et les Ingénieurs de l’Armement constituent les Officiers des Corps de l’Armement. [↑](#endnote-ref-4)
5. Élie Nguyen-Huy-Thuy et François Schmidt ont effectué leur stage au même département CISS, ainsi qu’avec le même tuteur. [↑](#footnote-ref-1)
6. Github : Entreprise américaine développant l’outil de suivi de version et de stockage éponyme, le dossier où sont enregistrés les fichiers utilisés s’appelant un repository. [↑](#endnote-ref-5)
7. [Repository Github](https://www.github.com/MaxENSTAB/Stage2A) [↑](#footnote-ref-2)
8. Ici, « éclairer » est une expression militaire correspondant à « viser avec une pulsation électromagnétique ». [↑](#footnote-ref-3)
9. RSB : Rapport signal sur bruit. [↑](#endnote-ref-6)
10. Python est un langage Open Source, complet et facile à appréhender grâce à ses nombreuses bibliothèques. [↑](#footnote-ref-4)
11. DoA : *Directions of Arrival,* littéralement directions d’arrivée d’un signal. [↑](#endnote-ref-7)
12. [HackRF Git](https://github.com/mossmann/hackrf/wiki/HackRF-One) [↑](#footnote-ref-5)
13. *Radio Frequencies*: Fréquences Radio [↑](#footnote-ref-6)
14. LabView® [↑](#footnote-ref-7)
15. Un snapshot = un vecteur de mesures [↑](#footnote-ref-8)
16. Steering Vector : Vecteur représentant l'ensemble des déphasages subis par une onde plane, évalués au niveau d'*ULA.* [↑](#endnote-ref-8)
17. Soit le nombre de sources éclairant la cible [↑](#footnote-ref-9)