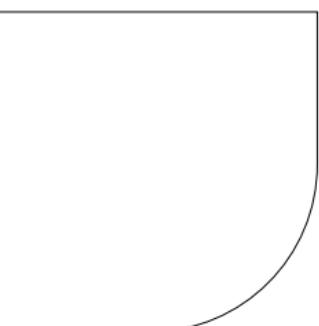


ENSTA Bretagne  
2, rue François Verny  
29806 BREST cedex  
FRANCE  
Tel +33 (0)2 98 34 88 00  
[www.ensta-bretagne.fr](http://www.ensta-bretagne.fr)



Projet système,  
*PerfHyper*,  
caractérisation  
d'un radar  
**FISE 2023**  
14 décembre 2021



# Projet système, *PerfHyper*, caractérisation d'un radar

---

Chris ARRIDI  
Benjamin CHAUVEL  
Ahmed AL MULHIM  
Samuel DUBOS  
*FISE 2023*  
10 Avril 2022

## Résumé

PerfHyper est un projet qui s'inscrit dans la lignée du projet ObsHyper de l'année précédente (FISE 2022). Lors de ce dernier, nos prédecesseurs ont pris en main le radar allant jusqu'à la création d'acquisitions pour valider le bon fonctionnement du radar. Du côté post-traitement ils ont réussi à concevoir un algorithme de suivi de cible en 1D suivant l'axe principal d'émission. Cependant, le RADAR n'a pas été caractérisé. Nous ne connaissons donc pas ses limites. L'enjeu du projet PerfHyper est de déterminer ces limites déterminantes et donc potentiellement d'élargir le cadre d'application du travail de nos prédecesseurs. Pour cela, nous devons donc appréhender la théorie relative aux RADAR (Ondes Électromagnétiques, Traitement du Signal etc.). À partir de cette bibliographie, il s'agit de déterminer les limites pertinentes à étudier et d'établir les protocoles des expérimentations. À l'heure actuelle, nous avons appréhendé la théorie nécessaire à la compréhension des objectifs du projet, même si nous avons besoin de souvent nous y reporter lorsqu'une nouvelle problématique est soulevée. Nous avons également réussi à lancer une acquisition avec le RADAR pour obtenir un aperçu de la quantité et de la nature des données recueillies. Nous avons aussi déterminé les limites à étudier : à savoir la portée, l'angle d'ouverture, la résolution et la précision en termes de distance et de vitesse. Nous travaillons actuellement sur les protocoles d'expériences ainsi que les signaux et algorithmes à utiliser pour optimiser le système et « repousser » ses limites.

## Abstract

PerfHyper is a continuation of last year's ObsHyper project (FISE 2022). During this last one, our predecessors took in hand the radar going until the creation of acquisitions to validate the good functioning of the radar. On the post-processing side they succeeded in designing a 1D target tracking algorithm along the main axis of emission. However, the RADAR is not characterized. We do not know its limitations. The challenge of the PerfHyper project is to determine these limits and thus possibly broaden the scope of application of the work of our predecessors. To do this, we must therefore understand the theory relating to RADAR (electromagnetic waves, signal processing, etc.). From this bibliography, it is a question of determining the relevant limits to be studied and of establishing the protocols of the experiments. At present, we have grasped the theory necessary to understand the objectives of the project, even if we often need to refer to it when a new problem is raised. We have also managed to launch an acquisition with RADAR to get an overview of the amount and nature of data collected. We have also determined the limitations to be studied, namely range, aperture angle, resolution and accuracy in terms of distance and speed. We are currently working on the experimental protocols and the signals and algorithms to be used to optimize the system and 'push' its limits.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Le projet PerfHyper</b>	<b>4</b>
2.1	Matériel d'étude . . . . .	4
2.2	Acquisition . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Traitement du signal</b>	<b>8</b>
3.1	Train d'onde sinusoïdal . . . . .	8
3.1.0.1	Portée . . . . .	8
3.1.0.2	Résolution spatiale . . . . .	9
3.1.0.3	Résolution angulaire . . . . .	9
3.1.0.4	Ambigüité en distance . . . . .	10
3.2	Compression d'impulsion . . . . .	11
3.2.0.1	Distance . . . . .	13
3.2.0.2	Vélocité . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Détection</b>	<b>15</b>
4.1	Taux de fausses alarmes . . . . .	15
4.2	Taux de fausses alarmes constant (CFAR) . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Les principes de l'ingénierie système</b>	<b>17</b>
5.1	Analyse de l'ingénierie système . . . . .	17
5.2	Mise en évidence des exigences . . . . .	17
5.2.1	Exigences . . . . .	17
5.2.2	Estimation des Exigences . . . . .	18
5.2.2.1	Portée du radar . . . . .	18
5.2.2.2	Résolution . . . . .	19
5.2.2.3	Ouverture Angulaire . . . . .	20
5.2.2.4	Ambigüité en distance . . . . .	21
5.3	Conformité de l'architecture fonctionnelle . . . . .	22
<b>6</b>	<b>Post-Traitemet</b>	<b>23</b>
6.1	Structure du traitement numérique . . . . .	23
6.2	Traitements spécifiques . . . . .	23
6.3	Tests unitaires . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Logiciel</b>	<b>25</b>
7.1	Interface . . . . .	25
7.2	Illustration des résultats . . . . .	25
<b>8</b>	<b>La méthode Agile</b>	<b>27</b>
8.1	Diagramme de Gantt : semestre 3 . . . . .	28
8.2	Diagramme de Gantt et matrice SWOT : semestre 4 . . . . .	28
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>30</b>

## 1 Introduction

Pour ce projet nous devons établir les limites d'utilisation d'un RADAR Hyperfréquence mis à notre disposition par l'ENSTA Bretagne, c'est-à-dire générateur d'ondes hyperfréquence, oscilloscopes, ordinateurs, disque durs, analyseurs, convertisseurs, duplexeurs etc. Le travail théorique est nécessaire dans un premier temps afin d'appréhender les attendus du projet, de comprendre l'utilité des différents composants ainsi que leur place dans la chaîne. Cet aspect permet aussi de connaître les différentes limites d'un RADAR, de pouvoir les calculer d'un point de vue théorique et nous aiguille sur leur détermination empirique. Le travail pratique, en présentiel, consiste principalement à la mise en fonctionnement de la baie RADAR, c'est-à-dire comprendre le fonctionnement des différents éléments et des différents logiciels pour obtenir une acquisition.

Au sein de ce rapport nous ne traiterons que le cas d'un radar monostatique, c'est-à-dire que l'on émet et reçoit le signal par la même antenne.

## 2 Le projet PerfHyper

### 2.1 Matériel d'étude

Un radar hyperfréquence est en général constitué de cinq éléments : un émetteur, un duplexeur, une ou plusieurs antenne(s), un récepteur et enfin un moyen d'affichage.

Le duplexeur est un commutateur qui relie alternativement l'antenne à l'émetteur puis au récepteur radio. Il est ici non nécessaire car bien que nous travaillions en monostatique, nous disposons d'une antenne émettrice et une réceptrice. Pour notre projet, l'émetteur (ou générateur de signaux) sera le générateur de signaux en bande de base RS AFQ 100B. Dans le jargon des télécommunications, le terme de bande de base (ou en anglais baseband) désigne une technique de transmission dans laquelle le signal est envoyé directement sur le canal après codage en ligne sans passer par un codage canal (sans modulation). Ce générateur peut produire des signaux radar complexes avec des impulsions courtes et des temps de montée et de descente rapides. Il possède également un bon rapport signal sur bruit (SNR : signal-to-noise ratio en anglais). Les impulsions émises sont de très courtes durées, ce qui permet à la bande passante d'atteindre de très grandes valeurs, on parle alors d'UltraLargeBand (ULB), utilisées notamment pour la communication en haut débit sur courte distance.

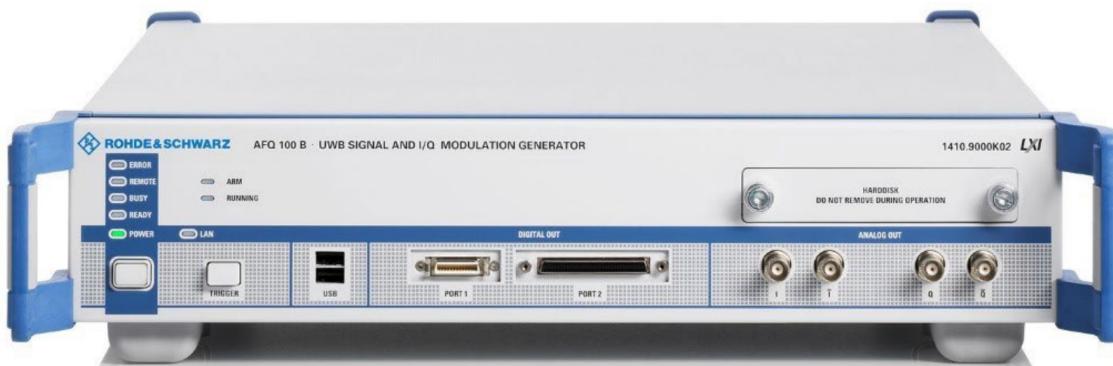


FIGURE 1 – RS AFQ B100B [5]

Grâce au logiciel K6 Pulse Sequencer de Rohde & Schwarz, nous avons pu créer un signal complètement personnalisé. En partant d'un chirp de 500 MHz, nous avons configuré notre signal tel que décrit par l'image ci-dessous. En effet, pour éviter l'ambiguïté (détaillée plus tard), il était nécessaire de mettre un "off-time" conséquent relativement à la durée du signal. Cela représente le temps "d'écoute" entre l'émission des trains d'impulsions.

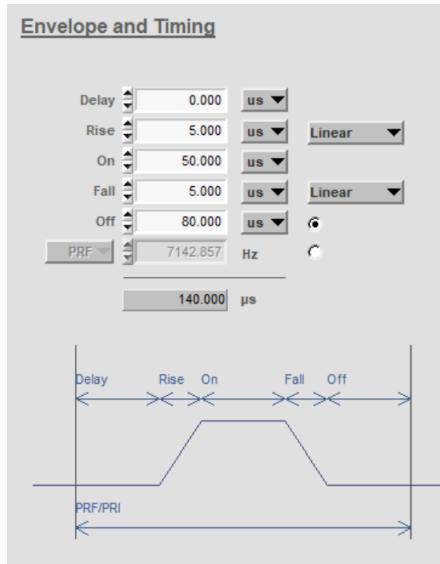


FIGURE 2 – Configuration d'un chirp spécifique sur K6 Pulse Sequencer [7]

Le générateur de signaux en bande de base RS AFQ 100B est ensuite couplé au générateur de signaux vectoriels RS SMBV 100 A qui transpose les signaux en bande de base en signal RF. Ce dernier pourrait servir de générateur signaux mais dispose de caractéristiques moins intéressantes que son homologue. Dans notre cas, il sert uniquement de modulateur numérique et analogique : après avoir généré le signal, il le transforme pour l'adapter au canal de transmission. Ici, le canal est hertzien mais il aurait pu être filaire ou optique. C'est ce qu'on appelle la modulation. On va donner à l'onde porteuse de nouvelles caractéristiques d'amplitude de fréquences et de phases. On a vu que ce générateur avait la particularité de posséder une modulation de type IQ (la modulation d'amplitude en quadrature qui modifie la porteuse elle-même) et une onde en quadrature, autrement dit déphasée de 90 degrés. Cela permet de modifier simultanément la phase et l'amplitude.



FIGURE 3 – RS SMBV 100A [5]

Enfin, le générateur de signaux vectoriels RS SMBV 100A est branché au convertisseur GeoSync Microwave. Ce dernier sert à la fois de Up Converter à l'émission et de Down Converter à la réception. En d'autres termes, son rôle est d'effectuer une translation en fréquence entre la bande L (fournie et reçue par le générateur de signaux vectoriels) et des fréquences décryptables par le transpondeur qui reçoit l'onde électromagnétique émise par l'antenne.



These block converter systems provide frequency translation between the transponder band and L-band frequencies.

The two independent converter assemblies are “hot swappable” through the rear of the chassis. Each converter tray has independent control of the front panel. The front panel can be replaced without loss of signal.

#### BLOCK DOWNCONVERTERS

Input (GHz)	Output (MHz)	LO (GHz)	Conv Tray Model #
9.75-10.25	250-750	9.5	D10
14.0-14.5	250-750	13.75	D14.25
14.75-15.25	250-750	14.5	D15

#### BLOCK UPCONVERTERS

Input (GHz)	Output (GHz)	LO (GHz)	Conv Tray Model #
250-750	9.75-10.25	9.5	U10
250-750	14.0-14.5	13.75	U14.25
250-750	14.75-15.25	14.5	U15

FIGURE 4 – Convertisseur GeoSync Microwave [5]

## 2.2 Acquisition

Nous pouvons résumer la description structurelle du système par le diagramme ci-dessous.

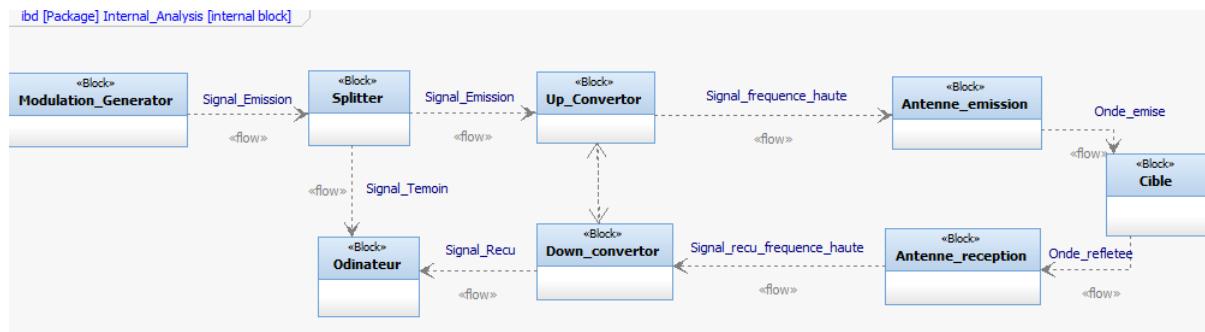


FIGURE 5 – Chaîne fonctionnelle d’acquisition - B. CHAUVEL

Un logiciel lié au AFQ 100B sert à paramétriser le signal que nous voulons émettre. L’interface est la même que celle présente sur la Figure3. Nous n’intègrerons pas l’oscilloscope dans la chaîne d’acquisition des signaux car le générateur AFQ 100B génère le signal d’émission et l’ordinateur équipé du logiciel adéquat nous permet de le visualiser après passage par les antennes.

Nous remarquons un splitter qui permet de transférer le flux de données du signal émis vers la carte d’acquisition. Il duplique le signal émis et l’envoie directement au sein du logiciel d’acquisition. L’inconvénient majeur est le bruitage des signaux dû à la multiplication des canaux. Toutes les informations dont nous avons besoin pour effectuer le post-traitement se trouvent alors dans un fichier texte de la forme suivante :

chirp_perso -	
Fichier	Édition
130	128
127	128
128	127
127	128
129	124
129	131
124	128

FIGURE 6 – Données acquises

La colonne de gauche représente le signal émis venant du splitter et celui de droite le signal acquis. La forme de ce fichier est idéale pour son traitement, que nous effectuons sous python pour rester dans la même ligne que nos prédecesseurs.

### 3 Traitement du signal

L'objectif d'un radar est premièrement de détecter une cible, par exemple un avion, puis ensuite de déterminer ses caractéristiques. Elles peuvent être la vitesse, la distance radar-cible ou encore la détermination du type de cible (avion commercial / militaire). Pour cela, on envoie une onde électromagnétique qui se reflète sur la cible et devient l'écho que l'on reçoit. Il existe certaines formes d'ondes privilégiées pour le signal émis, que nous développerons par la suite. Une fois l'écho reçu, il faut le traiter. Le traitement diffère selon ce que l'on cherche comme information. De plus, certaines formes d'onde favorisent la détection en distance de la cible, d'autres la mesure de la vitesse. Il faut alors faire un choix en prenant en compte la difficulté du traitement du signal a posteriori. Nous allons dans la suite de cette partie évoquer plusieurs formes d'ondes ainsi que leurs applications et traitements associés. Par la suite, nous pourrons choisir ce qui nous convient le mieux parmi cette liste non-exhaustive.

#### 3.1 Train d'onde sinusoïdal

Le train d'onde sinusoïdal est une forme très basique. Elle consiste à envoyer une succession d'ondes monochromatiques. En pratique, on génère une fonction sinus pendant un temps fini  $\tau$  puis un temps d'écoute  $T - \tau$ . Cette opération est effectuée tous les temps  $T$ .

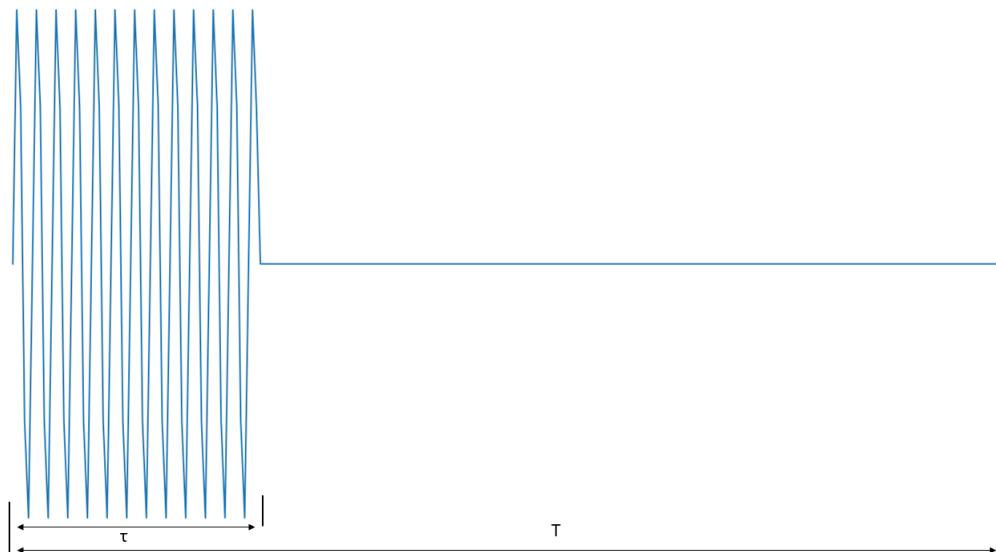


FIGURE 7 – Tracé d'une impulsion sur un temps  $\tau$  et de la période  $T$  de répétition des impulsions - B. CHAUVEL

**3.1.0.1 Portée** [6] La portée d'un RADAR est une caractéristique prépondérante, elle va notamment discriminer les solutions utilisées en fonction du contexte. La portée est étroitement liée à la notion de puissance, qu'elle soit émise ou reçue.

Pour être plus précis, la portée d'un RADAR peut être vue comme un seuil de détection de la puissance reçue. C'est un seuil en dessous duquel le signal n'est pas détecté, on est alors hors rang. Ce seuil est propre à chaque matériel et la puissance reçue  $P_{reue}$  dépend de nombreux paramètres. En premier lieu, la puissance émise  $P_{mise}$  évidemment, mais aussi le gain de l'antenne **G**, la longueur d'onde  $\lambda$ , la surface apparente de la cible **SER** et la distance RADAR-cible **d** (ce qu'on appelle la portée). Dans notre cas, on considère que les gains de l'antenne réceptrice et de l'antenne émettrice sont identiques, et on considère les antennes confondues spatialement. On obtient alors les équations :

$$P_{reue} = P_{mise} \frac{G^2 \lambda^2 * SER}{(4\pi)^3 * d^4}$$

On en déduit assez directement l'expression de la portée maximale atteignable par le radar.

$$Porte = P_{mise} \frac{G^2 \lambda^2 * SER}{(4\pi)^3 * P_{min}}$$

Avec  $P_{min}$ , la puissance de retour minimum détectée par le RADAR. C'est en manipulant ces différents paramètres qu'on peut espérer maximiser la portée du RADAR *PerfHyper* et ainsi trouver ses limites.

La résolution d'un radar est sa capacité à distinguer deux cibles très proches l'une de l'autre, en azimut ou en distance. Les radars de contrôle d'armes, qui demandent une grande précision, doivent être capables de distinguer des cibles espacées de quelques mètres. Les radars de veille, généralement moins précis, ne peuvent faire de distinction qu'entre des cibles espacées de quelques centaines, voire même milliers de mètres. La résolution est traditionnellement divisée en deux parties : la résolution en distance et la résolution angulaire (en azimut).

**3.1.0.2 Résolution spatiale** La résolution en distance est la capacité d'un système radar à distinguer deux ou plusieurs cibles situées dans la même direction mais à des distances différentes. La qualité de la résolution dépend de la largeur de l'impulsion émise, du type et de la taille des cibles, et de l'efficacité du récepteur et de l'indicateur. La largeur d'impulsion est le paramètre prépondérant pour la résolution en distance. Un système radar bien conçu, en considérant que tous les autres facteurs permettent une efficacité maximale, devrait être capable de distinguer des cibles espacées d'un temps égal à une demi-largeur d'impulsion  $\tau$ . En conséquence, la résolution en distance théorique d'un radar peut être calculée grâce à la formule suivante :

$$\Delta r = \frac{c * \tau}{2}$$

**3.1.0.3 Résolution angulaire** La résolution angulaire est l'écart minimum qui permet au radar de distinguer deux cibles identiques se présentant à la même distance. La résolution angulaire du radar est principalement caractérisée par la largeur de son lobe d'antenne.

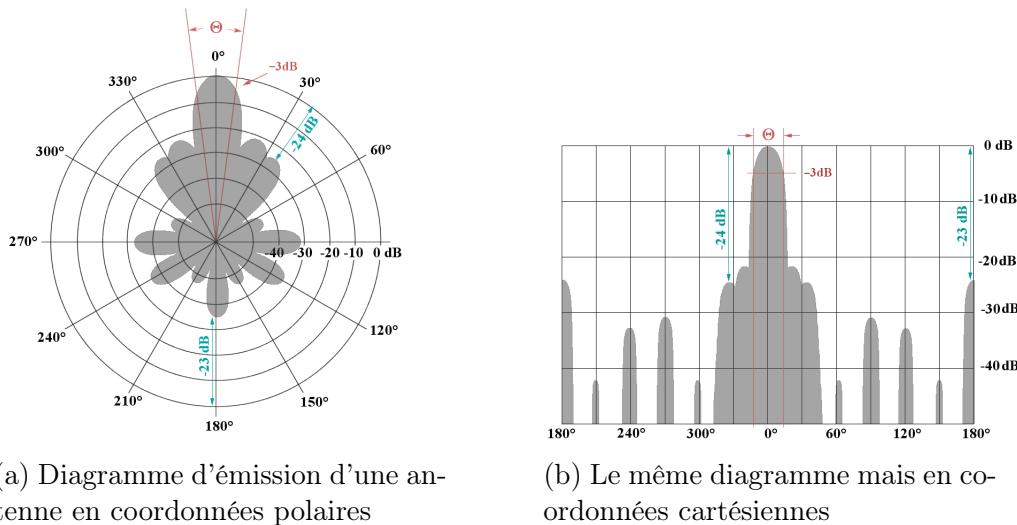


FIGURE 8 – Représentation des diagrammes d'antenne [8]

Ce sont des diagrammes d'émission dans différentes bases de coordonnées. Ils représentent l'énergie d'émission dans chaque direction autour de l'antenne (en coordonnées polaires l'antenne à l'intersection des axes). L'intensité est normalisée, c'est-à-dire que l'intensité pointée dans chaque direction est divisée par celle de la direction d'émission maximale, appelée axe du lobe principal. On le trouve à l'angle zéro degré. Les autres lobes sont dits "secondaires". Nous voulons les atténuer au plus possible pour avoir une antenne directive et ne pas perdre de puissance inutilement.

L'angle d'ouverture est défini comme la région angulaire où l'énergie radiée du lobe principale est supérieure à -3 dB sur le diagramme d'émission. Elle est définie entre les lignes rouges sur les figures ci-dessus.

La section efficace d'ouverture  $A_e$  d'une antenne est la surface en coupe que représente l'antenne en émission et réception. Le gain  $G$  est relié à l'ouverture par la relation suivante avec  $\lambda = \text{longueur d'onde}$

$$G = \frac{4\pi \cdot A_e}{\lambda^2}$$

**3.1.0.4 Ambiguité en distance** Cette ambiguïté se manifeste lorsque le temps que met le signal pour faire l'aller-retour avec la cible est supérieur au temps d'écoute entre deux impulsions. La fréquence de répétition des impulsions  $f^{PRF} = \frac{1}{T}$  est donc déterminante pour la portée du radar. En considérant le temps d'aller-retour, la distance maximale non ambiguë est

$$\frac{c}{2 * f^{PRF}}$$

En pratique, le traitement du signal pour extraire la distance et la vitesse de la cible est simple. C'est exactement le même principe que pour un radar autoroutier. En ce qui concerne la distance, il suffit de mesurer la différence entre le temps

d'émission et de réception de l'écho, connaissant la célérité des ondes électromagnétiques on obtient alors la distance radar-cible. En ce qui concerne la vitesse de la cible, nous devons effectuer une transformation de Fourier et évaluer la différence de fréquence avec la fréquence de la sinusoïde émise. Grâce à la relation Doppler-Fizeau suivante nous pouvons obtenir la vitesse  $v$  de la cible :

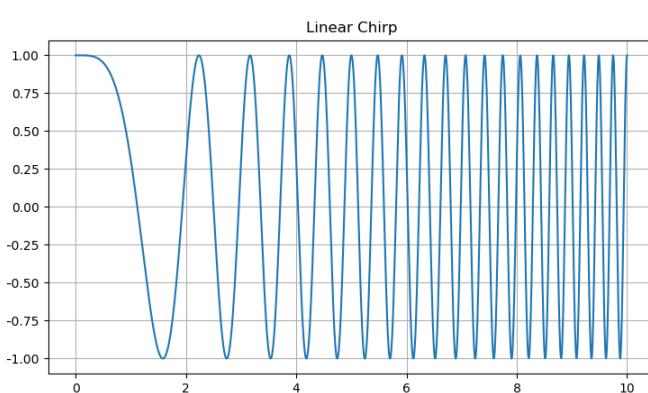
$$v = \frac{c}{2} * \left( \frac{f_{emis}}{f_{recu}} - 1 \right)$$

Néanmoins, ce traitement ne fonctionne que pour des signaux qui ont des fréquences constantes dans le temps. Ici, le spectre d'un sinus monochromatique est très simple à comparer car il s'agit ni plus ni moins que d'une fine barre verticale au niveau du fondamental.

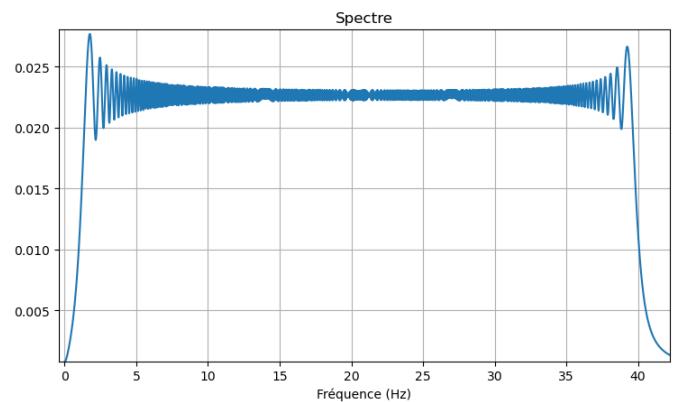
Cette forme d'onde est la plus simple à laquelle on peut penser en termes de détection radar, ce qui fait qu'elle est peu optimisée pour les besoins et contraintes actuels. Nous allons par la suite l'utiliser pour pouvoir valider le fonctionnement du radar et notre chaîne de traitement du signal brut.

### 3.2 Compression d'impulsion

La compression d'impulsion est une technique utilisée dans le domaine du radar afin d'obtenir une meilleure résolution en distance ainsi qu'améliorer le rapport signal-bruit en modulant le signal émis. Nous allons pratiquer ici une modulation en fréquence d'une impulsion sinusoïdale. Voici une représentation du signal temporel avec son spectre en fréquence :



(a) Exemple de chirp linéaire balayant la plage de fréquence  $\Delta f$  et centré sur  $f_0$



(b) Spectre en fréquence d'un chirp linéaire avec une bande passante de 40 Hz

FIGURE 9 – Illustration des caractéristiques d'un chirp linéaire - B. CHAUVEL

On remarque l'augmentation de la fréquence au cours du temps du signal sinusoïdal sur la figure de gauche. Il en vient assez facilement que le spectre en fréquence de ce signal est une fonction porte de largeur  $\Delta f$ .

Il faut savoir qu'il est difficile d'avoir une bonne puissance moyenne et une bonne résolution en même temps en utilisant un système avec des formes d'ondes à impulsions :

- la puissance est proportionnelle à la durée de l'impulsion (*Pulse width*)
- la résolution est inversement proportionnelle à la durée de l'impulsion

Donc une impulsion longue qui permet une bonne puissance d'émission peut avoir la même largeur de bande (résolution) qu'une impulsion courte si celle-là est modulée en fréquence ou en phase. La compression d'impulsion permet alors à un radar d'émettre simultanément avec une énergie maximale et une résolution minimale.

Maintenant que l'on a envoyé ce super signal puis reçu l'écho, il faut le traiter pour en tirer les informations dont on a besoin. On parle de filtrage adapté : cela sert à maximiser le rapport signal bruit. Concrètement ce que l'on va implémenter est une intercorrélation entre le signal émis et le signal reçu. Les figures ci-dessous montrent à gauche les signaux envoyés (orange) et reçus (bleu) ainsi que leurs intercorrélations sur les figures du bas. Il y a ici modélisé deux échos placés volontairement proches l'un de l'autre. Nous remarquons que l'intercorrélation avec des chirps permet une mise en évidence plus net de la visualisation d'une cible qu'avec un signal basique tel que des impulsions sinusoïdales. Cela vient du fait que la largeur du pic d'intercorrélation est inversement proportionnelle à la largeur de bande l'impulsion. Or cette largeur est maximisée grâce à la modulation en fréquence afin d'obtenir un chirp. Cela nous permet de détecter deux cibles plus proches qu'avec la forme d'onde initiale, comme illustré ci-dessous :

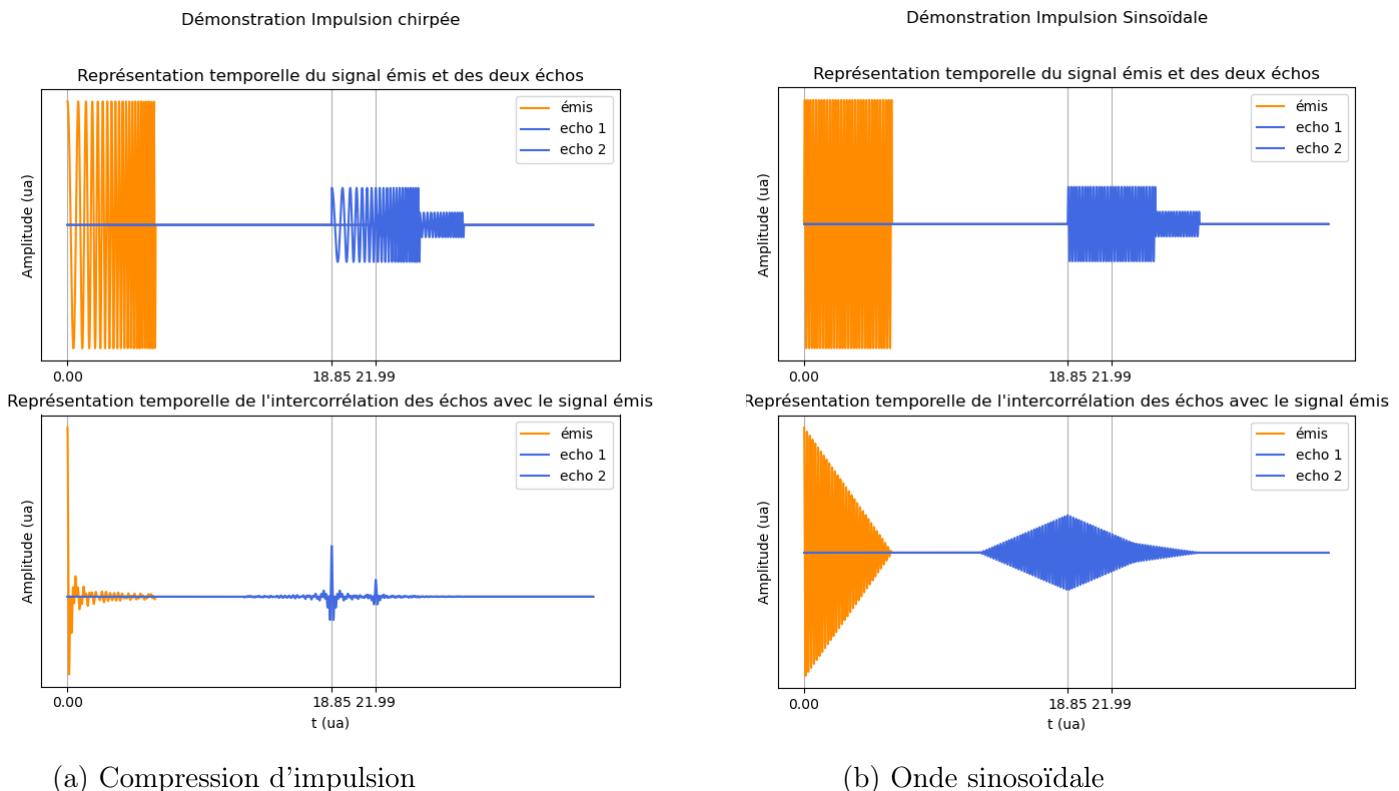


FIGURE 10 – Illustration de la différence de résolution spatiale entre l'écho d'une impulsion sinusoïdale simple et d'une impulsion avec modulation en fréquence. - B. CHAUVEL

**3.2.0.1 Distance** En utilisant la simple formule  $v = \frac{d}{t}$  il est possible de déterminer la distance radar - cible. Ici  $d$  est la distance aller - retour divisée par deux. De même,  $t$  le temps d'aller - retour est le décalage temporel entre l'émission de l'impulsion et sa réception. On obtient alors

$$d_{\text{radar-cible}} = \frac{c * t}{2}$$

La méthode pour déterminer le plus précisément possible la distance de la cible détectée est d'envoyer un train de chirps et non pas un chirp à la fois. L'intercorrélation d'un train de chirps ressemble à la figure suivante en forme de peigne. Chaque branche du peigne est un pic de l'intercorrélation de chirps un à un comme on peut retrouver 10a. Une meilleure estimation de la distance peut être effectuée en identifiant le pic de plus grande amplitude du peigne grâce à l'algorithme CFAR. Ce dernier a été implémenté par le groupe précédent. Son fonctionnement sera détaillé dans une prochaine partie.

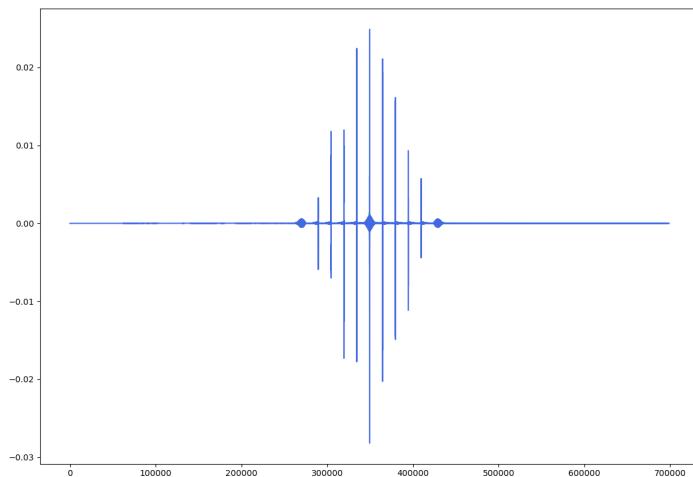


FIGURE 11 – Intercorrélation d'un train de chirps - B. CHAUVEL

Maintenant que l'on a détecté une cible et que l'on sait à quelle distance elle est, nous aimerais savoir comment elle se déplace. À quelle vitesse ? Dans quel sens ? Nous pouvons trouver dans la littérature des méthodes sophistiquées [4] pour décorrélérer la phase de la fréquence dans un chirp. Cela permet d'utiliser l'effet Doppler pour déterminer la vitesse de la cible. Cependant, dans notre cas d'utilisation, il y a une méthode plus adaptée et facile à utiliser.

**3.2.0.2 Vélocité** Dans le signal émis, l'écart temporel entre les chirps d'un même train est constant. Lors de la réception de l'écho, si l'écart entre les chirps du train n'est plus constant, cela signifie que la cible s'est déplacée. En mesurant la différence entre les écarts des impulsions au sein d'un train nous sommes capable de calculer alors la vitesse correspondant à la cible que l'on a détecté. C'est ce qui est en train d'être mis en place en ce moment.

Tous les traitements qui ont été évoqués sont ou seront mis en place grâce à Python, dans la continuité de nos prédecesseurs. Une bonne partie est déjà en place mais le code n'est pas assez optimisé et présentable pour être dans ce rapport, même s'il reste fonctionnel.

Jusqu'à maintenant tous les signaux utilisés sont théoriques et non bruités pour montrer le plus efficacement possible au lecteur le travail effectué. Par la suite, tous ces traitements se dérouleront en conditions réelles. Comme nous le verrons par la suite, l'ingénierie système est délicate à appliquer ici car le système est déjà présent et fonctionnel. Premièrement, des acquisitions seront faites pour retrouver les critères des exigences du radar étudié. Dans un second temps nous implémenterons du post-traitement des données pour améliorer le suivi de cible mis en place par l'équipe précédente.

La partie qui suit a été faite l'année dernière, lors de la première partie de ce projet [7], par le groupe précédent chargé du projet. Il en vient que ce n'est pas notre travail mais nous avons jugé utile de l'ajouter ici pour votre compréhension globale du projet et de la chaîne de traitement pour aboutir à la détection d'une cible.

## 4 Détection

La détection consiste à mettre en évidence les cibles potentielles, à partir du signal reçu et préalablement traité. Pour ce faire il faut être en mesure d'isoler les pics correspondants à des cibles du bruit environnant. La complexité de la manipulation est de réussir à faire ceci en évitant de provoquer de fausses alarmes dues au bruit. Pour ce faire, nous utilisons un seuil de détection ; lorsque ce seuil est dépassé nous considérons qu'il y a présence d'une cible. Néanmoins, puisqu'un bruit ou d'autres signaux peuvent interférer et eux aussi dépasser ce seuil, nous sommes confrontés à de fausses alarmes. Il faut donc une façon robuste de choisir le seuil de détection afin de limiter le taux de fausses alarmes, c'est ce que nous allons développer ici.

### 4.1 Taux de fausses alarmes

La première notion importante du problème de détection, que nous souhaitons maîtriser au mieux est donc le taux de fausses alarmes, c'est un facteur primordial pour assurer la fiabilité de notre système radar. Une fausse alarme est « une décision de détection de cible radar erronée causée par du bruit ou d'autres signaux interférents dépassant le seuil de détection ». Le taux de fausses alarmes (FAR) est calculé à l'aide de la formule suivante :  $FAR = \frac{\text{Fausses cibles par PRT}}{\text{Nombre de cellules}}$  Ainsi, de fausses alarmes

sont générées lorsque le bruit dépasse un niveau seuil prédéfini, par la présence de signaux parasites.

- Si le seuil est réglé trop haut : il y aura très peu de fausses alarmes mais le rapport signal sur bruit requis empêchera la détection de cibles valides.
- Si le seuil est réglé trop bas : le grand nombre de fausses alarmes masquera la détection de cibles valides.
- Si le seuil est réglé de façon optimale : probabilité de détection = 83%, mais une fausse alarme se produit,  $FAR = 1.5 * 10^{-3}$
- Le seuil est défini de façon variable : taux de fausses alarmes constant

Le taux de fausses alarmes dépend du niveau de toutes les interférences (bruit, encombrement, brouillage). À courte distance l'influence du clutter fixe (ensemble d'échos retournés par l'environnement) est plus importante que le bruit. À longue distance c'est le plus bruit qui a le plus gros impact. Donc le taux de fausses alarmes dépend de la plage. Il faut noter que le taux de fausses alarmes augmente à courte distance.

## 4.2 Taux de fausses alarmes constant (CFAR)

Afin de maîtriser ce point-clé nous allons utiliser un schéma conservant un taux de fausses alarmes constant et faisant varier le seuil de détection en fonction de fonction de l'environnement. Ainsi le seuil de détection restera au-dessus du niveau du bruit ce qui nous permettra d'isoler les cibles. Il existe un grand nombre de type de circuit CFAR, qui sont pour la plupart basés sur le CFAR à moyenne de cellules que nous allons mettre en œuvre ici.

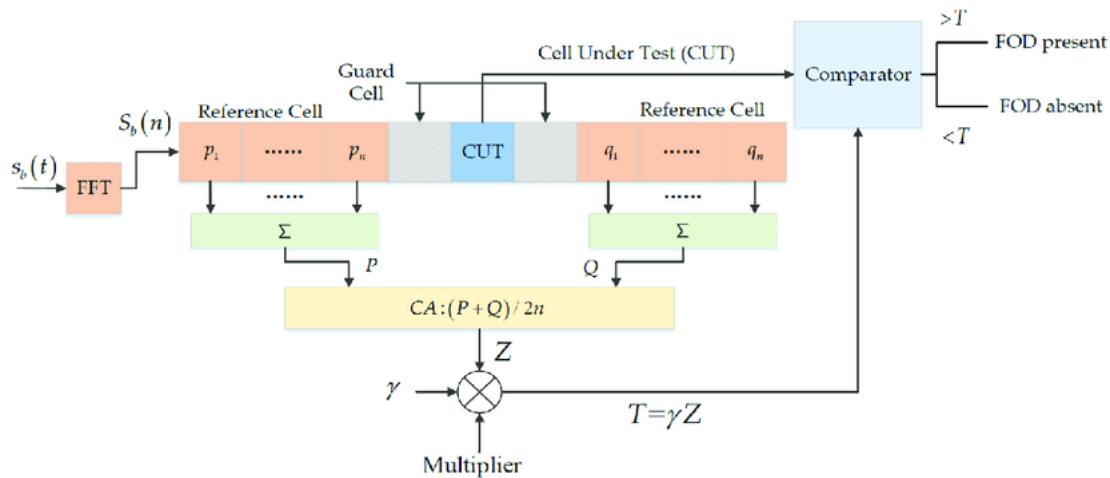


FIGURE 12 – Principe du "Cell-averaging CFAR" [3]

Le signal reçu est découpé en "cellules" permettant de comparer sa valeur à un instant donné à ses valeurs précédentes et suivante. Ainsi le circuit estime le niveau d'interférence (clutter et bruit) grâce aux cellules en amont et en aval de la cellule sous test, et utilise cette estimation pour décider s'il y a ou non une cible dans la cellule sous test. Le bruit est considéré comme homogène sur la plage testée donc l'estimation faite autour de la cellule de test est valable pour cette dernière. Ce processus est répété sur toutes les cellules. Nous aurons théoriquement un taux de fausses alarmes constant qui est indépendant du niveau du clutter et de bruit. De plus des cellules de gardes sont ajoutées afin de ne pas prendre en compte le signal écho présent juste avant et juste après la cible, qui présente une forte amplitude.

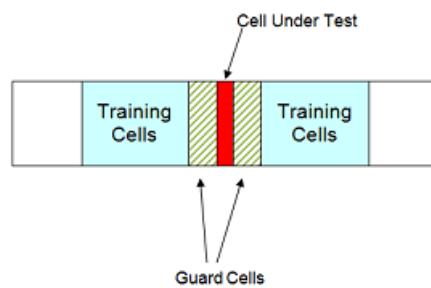


FIGURE 13 – Schéma de principe des cellules testées [2]

## 5 Les principes de l'ingénierie système

### 5.1 Analyse de l'ingénierie système

Dans la mesure où notre projet système s'inscrit dans la continuité directe du projet ObsHyper de l'an passé, les outils pertinents mis à disposition lors du cours d'Ingénierie Système sont totalement différents de ceux de nos collègues, qui avaient à réaliser un système. En effet, dans le cadre du projet PerfHyper, le système existait déjà au moment du choix du sujet. Nous n'avons pas eu à décrire une quelconque architecture, qu'elle soit physique ou fonctionnelle. Nous n'avons pas eu à analyser les besoins ou exigences du client pour la conception du système. Néanmoins notre tâche sera de les définir tant qualitativement que quantitativement.

Quels sont donc les éléments de cours adéquats à la poursuite de notre projet ? Quel point de vue adopter pour appréhender l'étude de notre système fonctionnel ? À la différence de bien des groupes de travail, notre objectif était ici de nous approprier autant que faire se peut les travaux de nos prédecesseurs d'ObsHyper. Notre objectif sera de définir quantitativement les exigences qui ont servi à concevoir le système.

### 5.2 Mise en évidence des exigences

#### 5.2.1 Exigences

La baie radar étant déjà construite, ici la prise en compte des exigences structurelles est peu pertinente. En revanche nous n'avons aucune information de la performance globale du radar. Ainsi pour tenter de l'évaluer nous allons déterminer quantitativement les critères essentiels à un radar. Suite à l'état de l'art nous avons rassemblé dans le diagramme ci-dessous les exigences à déterminer.

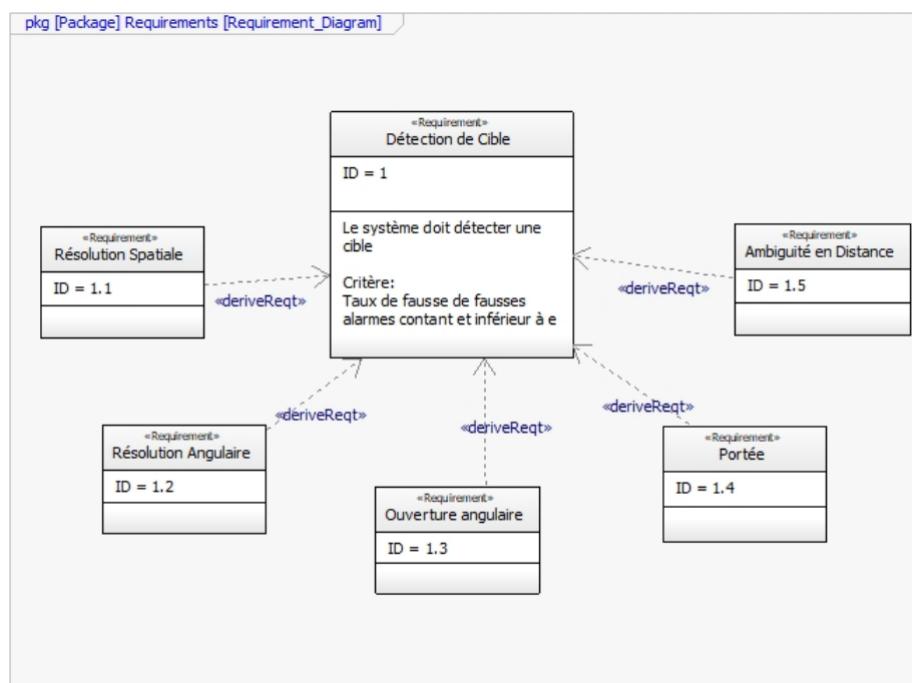


FIGURE 14 – Diagramme des exigences pour la Détection de cible - B. CHAUVEL

Un fois que l'on aura une idée plus précise des performances du radar nous pourrons tenter d'optimiser les méthodes d'acquisition et de post-traitement pour essayer de déterminer les limites de notre baie radar.

### 5.2.2 Estimation des Exigences

Pour procéder à l'évaluation qualitative des exigences citées ci-dessus nous avons mis en place les expérimentations ainsi que les post-traitements adéquats.

#### 5.2.2.1 Portée du radar

**Contexte** La portée d'un RADAR est la distance maximale entre la cible et baie RADAR pour laquelle la cible est encore détectée par le RADAR. Pour cela, nous avons placé la baie radar en extérieur, en milieu ouvert sans objet dans les environs proches afin d'éviter les échos ou autre perturbation. Le stade de rugby de l'ENSTA Bretagne convient parfaitement à cette expérience compte tenu de la taille importante de ce dernier en comparaison de la portée estimée du radar. De plus, l'alimentation de la baie radar ne pose pas de problème sur le stade de l'ENSTA Bretagne, il s'agit donc également d'un choix logique pour la logistique de l'expérience. Cette expérience doit avoir lieu par beau temps car les composants de la baie radar sont fragiles et ne tolère pas une exposition à l'eau.

#### Matériel nécessaire

- La baie radar (l'ensemble des composants est énuméré plus haut dans ce rapport)
- Le trépied, support de l'antenne
- Une cible
- Une rallonge électrique pour l'alimentation

**Déroulement de l'expérimentation** Initialement la cible est placée proche du RADAR. Par exemple à 2 fois la portée minimale théorique du RADAR. On lance une acquisition pour vérifier qu'on a un écho. Puis on éloigne la cible de quelques mètres. On réitère l'opération jusqu'à ce que l'écho de la cible soit confondu avec le bruit environnant. Une fois l'écho perdu, on effectue une dichotomie entre la position de perte du signal et la dernière position où l'écho a été reçu afin d'affiner le résultat. Compte tenu de la portée estimée, nous avons décidé de commencer l'expérimentation à une distance de 5 mètres puis de reculer tous les 5 mètres jusqu'à la perte d'écho, puis d'effectuer la dichotomie.

**Points importants de la réalisation** La durée d'acquisition, certainement de l'ordre de la microseconde comme pour les acquisitions déjà effectuées en laboratoire, elles permettent une acquisition avec suffisamment de données pour qu'un traitement puisse être possible mais pas trop pour éviter de mobiliser inutilement trop de mémoire. La forme, la taille et le matériau de la cible ont été choisis pour pouvoir détecter les cibles. Nous avons pris 1 plaque en métal d'une dimension de 40cmx40cm. Le pas d'éloignement entre les deux cibles entre chaque acquisition,

initialement choisi est de 5 mètres puis nous aurions effectué une dichotomie. Étant donné que la puissance du radar a été fortement bridée nous n'avions aucune idée de la distance à laquelle commencer l'expérimentation. Nous avons donc décidé de commencer très proche et s'éloigner de plus en plus.

**Réalisation et conclusion immédiate** Malheureusement dès le premier essai à 5 mètres, nous n'avions déjà plus d'écho. Ce qui nous semblait très peu et qui n'arrangeait pas pour les expériences suivantes qui nécessitaient des mesures de plusieurs dizaines de mètres comme nous le verrons par la suite.

Nous avons alors effectué des mesures à 1.7, 2.7, 3.2 et 4.7 mètres pour déterminer cette portée. Nous avons fait le choix d'arrêter la détection à 4.7 mètres car nos expériences de résolution longitudinale et angulaire seraient effectuées à ces longueurs, inférieures à 5 mètres, nous y reviendront plus tard. Aux vues de la petite distance, la recherche précise de portée ne semblait plus pertinente. Nous avons donc fait le choix de laisser ce point sans réponse plus précise que "entre 4.7 et 5 mètres". Nous pouvons agir sur plusieurs leviers tels que le type de cible ou sa taille. Cependant il nous aurait fallu une cible d'une échelle beaucoup trop importante. De plus nous pouvons ajuster les antennes pour viser précisément la cible mais l'inclinaison de celle-ci est très délicate à régler.

### 5.2.2.2 Résolution

**Contexte** On rappelle que la résolution d'un radar est sa capacité à distinguer deux cibles différentes proches l'une de l'autre. Nous devons donc déterminer quelle est la résolution maximale atteignable par le radar PerfHyper. Le choix du lieu et des conditions expérimentales est inchangé par rapport à la recherche de la portée maximale pour les mêmes raisons.

#### Matériel nécessaire

- La baie radar (l'ensemble des composants est énuméré plus haut dans ce rapport)
- Le trépied, support de l'antenne
- Deux cibles avec leurs trépieds
- Une rallonge électrique pour l'alimentation
- Un mètre pour mesurer la distance entre les deux cibles

**Déroulement de l'expérimentation** L'expérience consiste à placer les deux cibles dans l'axe d'émission/détection du radar pour la résolution spatiale et dans l'axe perpendiculaire à celui d'émission pour la résolution angulaire. Dans un premier temps ces cibles sont collées, on fait l'hypothèse que leur petite distance est être inférieure à la résolution du radar. On lance alors une acquisition, puis on écarte les cibles de quelques centimètres et on lance une nouvelle acquisition. On réitère l'opération jusqu'à ce qu'on détecte deux cibles distinctes. Une fois les deux cibles distinguées, on effectue une dichotomie entre cette position et la dernière position où une seule cible était perçue afin d'affiner le résultat.

**Points importants du protocole** La durée d'acquisition, certainement de l'ordre de la microseconde comme pour les acquisitions déjà effectuées en laboratoire, elles permettent une acquisition avec suffisamment de données pour qu'un traitement puisse être possible mais pas trop pour éviter de mobiliser inutilement trop de mémoire. Nous avons mis la première cible à un peu moins de 2 mètres du radar. La forme, la taille et le matériau de la cible ont été choisis pour pouvoir détecter les cibles. Nous avons pris 2 plaques en métal d'une dimension de 40 cm x 40 cm. Théoriquement avec un système radar bien conçu, en considérant que tous les autres facteurs permettent une efficacité maximale, devrait être capable de distinguer des cibles espacées d'un temps égal à une demi largeur d'impulsion  $\tau$ . D'où la résolution est  $d \geq \frac{c_0 * \tau}{2}$ . Ici sur les réglages faits  $\tau = 0.1\mu s \Rightarrow d = 30m$ . La distance entre les cibles doit être supérieure à 30m amis avec nos quelques mètres de portée obtenus précédemment nous étions bien embêtés. Le seul moyen de réduire cette distance pour l'adapter à notre cas d'usage est de diminuer  $\tau$ , cependant celui-ci est déjà au minimum de la capacité du générateur de formes d'ondes.

**Réalisation et conclusion immédiate** Comme nous l'avons conclu un peu plus haut dans ce rapport, la portée est un facteur limitant aux autres expériences. Idéalement nous aurions dû travailler à une vingtaine de mètres pour espérer des mesures concluantes sur la résolution longitudinale. Nous avons tout de même réalisé l'étude de la résolution en alignant 2 plaques d'acier de 40 centimètres de côté dans l'axe d'émission de l'antenne. Nous avons testé 4 écartements 5,10,15,20 centimètres. Le point de départ correspond à une distance à peine quelque fois plus grande que la portée minimale théorique, donc logiquement la distance minimale théorique entre deux objets pour être distinctement détectés.

Nous avons effectué ces mesures à 4 distances distinctes : 1.7, 2.7, 3.5 et 4.7 mètres. Ce qui correspond environ à une double dichotomie entre les distances 1.7 mètres, notre point de départ arbitraire, et 5 mètres notre portée maximale supposée d'après ce qui précède.

Nous obtenons des résultats similaires à la portée, de manière très logique mais nous n'obtenons aucun résultat relatif à la résolution. Un seul objet est détecté masquant complètement le deuxième derrière.

Nous en avons conclu immédiatement que la puissance du radar ne suffisait pas à voir derrière la plaque, car nous le savions déjà avant, et également que la première cible masquait complètement la deuxième physiquement car trop grande à l'échelle de la portée. Nous aurions alors dû utiliser des cibles plus petites pour espérer un résultat mais nous étions confrontés à des problèmes expérimentaux. Avec des cibles plus petites, la taille des trépieds tenant les cibles serait devenue trop importante en proportion et nous aurions alors davantage détecté les trépieds. Ce qui pose problème car ils sont eux aussi trop imposant en considérant les distances auxquelles on travaillait. Nous avons alors été dans l'impasse et par manque de temps et de conditions climatiques favorables nous n'avons pas pu essayer de faire mieux.

### 5.2.2.3 Ouverture Angulaire

**Contexte** Comme défini auparavant, l'ouverture angulaire est la région angulaire où l'énergie radiée du lobe principale est supérieure à -3dB sur le diagramme d'émission. Matérialisée entre les lignes rouges sur la Figure8

#### Matériel nécessaire

- La baie radar (l'ensemble des composants est énuméré plus haut dans ce rapport)
- Le trépied, support de l'antenne
- Une cible avec son trépied
- Une rallonge électrique pour l'alimentation.
- Chambre anéchoïque

**Déroulement de l'expérimentation** L'idéal serait de déterminer le diagramme d'antenne de notre radar. Pour cela selon la littérature il doit être fait au sein d'une chambre anéchoïque avec des capteurs à 360° autour de l'antenne pour mesurer l'intensité d'émission.

**Réalisation et conclusion immédiate** Malheureusement ce genre d'expérimentation est trop compliquée pour être réalisée dans le cadre de ce projet. La difficulté de la mise en œuvre et le lourd post-traitement pourrait faire un sujet de projet à part entière.

#### 5.2.2.4 Ambiguïté en distance

**Contexte** Cette ambiguïté se manifeste lorsque le temps que met le signal pour faire l'aller-retour avec la cible est supérieur au temps d'écoute entre deux impulsions. Elle ne dépend que du signal choisi pour l'émission. Cette expérience consistera à une validation de la théorie car nous connaissons le signal émis.

#### Matériel nécessaire

- La baie radar (l'ensemble des composants est énuméré plus haut dans ce rapport)
- Le trépied, support de l'antenne
- Deux cibles avec leurs trépieds
- Une rallonge électrique pour l'alimentation

**Déroulement de l'expérimentation** De même que pour l'expérience concernant la résolution nous nous placerons sur le stade de Rugby de l'ENSTA Bretagne. Nous placerons les 2 cibles dans l'axe d'émission du radar. La première sera à une distance inférieure à la distance ambiguë théorique et la seconde au-delà. Cette distance théorique sera calculée selon le signal choisi pour l'expérience. De même qu'avec les distances précédentes celle-ci est théoriquement trop grande pour en faire l'expérimentation réelle.

**Réalisation et conclusion immédiate** Malheureusement nous n'avions pas eu le temps de mener cette expérience à notre grand regret. Mais au regard des résultats des autres expériences, de portée et de résolution, nous nous attendions à ne pas obtenir de résultats concluants encore une fois.

### 5.3 Conformité de l'architecture fonctionnelle

Fonction	Description	Validation
FP (Détection)	Déetecter un objet immobile ou en mouvement et rendre compte de sa vitesse radiale.	Oui
FS (Matière)	Rapporter la matière de l'objet détecté par le radar.	Non
FC (Filtrage)	Réduire le bruit environnant pour analyser correctement l'écho d'ondes électromagnétiques ; augmenter le rapport signal sur bruit.	Oui
FS (Simulation des signaux)	Produire des signaux proches de ceux obtenus avec la carte d'acquisition.	Oui
FP (Suivi de cible)	Utiliser la technique du beamforming pour orienter électroniquement le lobe d'antenne en fonction du mouvement de la cible.	Abandon
FS (Distinguer)	Trouver la distance minimale nécessaire pour détecter deux objets proches.	Théorie Oui
FS (Performance)	Trouver la taille minimale requise pour que l'objet soit détecté par l'antenne. Trouver les distances minimales et maximales de l'objet à l'antenne.	Partiellement

TABLE 1 – Tableau synthétique des fonctions du système étudié [7]

## 6 Post-Traitement

Le traitement des données acquises est un élément essentiel de la chaîne de fonctionnement d'un radar. L'objectif d'un radar est de détecter des cibles et sans traitement des données brutes cela est impossible. Il est garant du bon fonctionnement du radar ainsi que de la responsabilité des décisions qui peuvent suivre. Dans le cadre militaire si un radar ne fait pas correctement la différence entre un avion civil ou militaire cela peut avoir de graves conséquences par la suite. Ce maillon essentiel n'est pas à prendre à la légère. Nous avons pu reprendre des codes commencés par le groupe précédent. Vous pouvez les retrouver sur le GitHub du projet dans la branche "ObsHyper". Les changements et ajouts effectués sont sur la branche principale. Précédemment ils avaient développé des codes basiques de traitement de données radar avec des fonctions pas forcément liées entre elles. C'est sur quoi nous avons travaillé.

### 6.1 Structure du traitement numérique

Tout d'abord nous avons réorganisé le code pour qu'il soit orienté objet. Nous avons mis en place des classes pour faciliter la lecture du code par un observateur non averti. Cela nous semblait judicieux car les actions à faire sur une série de données est globalement la même à chaque fois. Donc le fait de le formaliser et généraliser en créant un objet nous paraissait évident. C'est d'autant plus efficace que le changement de paramètres entre deux mesures à traiter est plus facile. Il a fallu donc refondre une bonne partie du code déjà réalisé.

Nous avons décidé d'abandonner le début de tentative de tracking de cible qui nous paraissait peu intéressant sachant que le test de cet algorithme n'est pas du tout facile avec notre baie radar. Pour apporter un exemple le groupe précédent faisait plusieurs acquisitions où ils bougeaient la cible manuellement entre temps. Ce qui donnait des résultats approximatifs et peu pertinents sachant qu'avec le radar nous pouvons seulement détecter des changements de distance radiale. Pour pouvoir acquérir des données dans un plan il nous faudrait un second radar et ensuite entre-couper les mesures acquises. En 1-dimension et en supposant un mouvement stationnaire de la cible il nous faut uniquement 2 points pour estimer la prochaine position de la cible. Un algorithme de k plus proches voisins est trop complexe et gourmand en calcul pour peu de résultats.

### 6.2 Traitements spécifiques

Rappel des exigences

- Résolution
- Ouverture Angulaire
- Portée du radar
- Ambiguïté en distance

Chaque exigence évoquée au-dessus nécessite un traitement commun et un autre différent. Le point commun est le pré-traitement des données. La fonction `SignaltoMatrix()` dans `util.py` permet d'uniformiser les données avec lesquelles on travaille.

De plus pour chaque acquisition on pratique une intercorrélation entre le signal émis et celui reçu.

Dans la mesure où seule la mesure de distance est pertinente dans le cas de notre utilisation elle est la plus développée. Les fonctions utiles aux autres cas d'usages sont rassemblées dans *radar.py* mais non intégrées au sein d'un programme plus développé.

### 6.3 Tests unitaires

Nous avons implémenté des tests unitaires de nos algorithmes de traitement grâce au module *unittest*.

Afin de ne pas faire de longues phrases explicatives, tout le code est expliqué et détaillé sur le GitHub du projet au lien suivant [1].

## 7 Logiciel

Depuis le début du semestre 3 nous sommes frustrés par le fonctionnement non trivial du radar. Malgré la documentation conséquente il n'est pas facile de comprendre le fonctionnement de celui-ci ainsi que le logiciel d'acquisition intégré. Nous avons ressenti qu'il nous manquait un outil pour mieux l'appréhender. C'est pour cela que nous avons décidé de le fournir aux prochains à notre place si le projet est amené à continuer ou seulement pour les personnes qui travailleront avec.

### 7.1 Interface

Nous avons mis en place un outil que nous aurions voulu avoir pour se familiariser avec le projet. Il se présente sous la forme d'un logiciel sur lequel le projet est vulgarisé et regroupe tous les tutoriels nécessaires à acquérir une mesure. Nous avons aussi développé cette interface comme support de démonstration de projet qui aura lieu fin Avril. Elle permet de réaliser une mesure en direct, de la traiter et afficher les résultats souhaités.



FIGURE 15 – Page d'accueil Interface

Le menu sur la gauche sert à choisir le domaine que l'on veut explorer à propos du radar. A partir de là des sous-menus se dévoilent. Le jour de la démonstration il sera possible de lancer une acquisition de mesures grâce au bouton LAUNCH.

### 7.2 Illustration des résultats

La philosophie choisie est d'être le plus clair et synthétique possible dans l'illustration des résultats. Il nous a semblé logique d'utiliser des images. Pour cela nous

avons utilisé un moteur d'animations développé sous python que l'on importe comme un module. Il nous sert à auto-générer des images pour illustrer les résultats en direct via l'interface. Il s'appelle MANIM et a été développé par un ancien doctorant américain qui a une chaîne YouTube de visualisations mathématiques avec plusieurs millions d'abonnés. C'est un outil très puissant qui permet de générer des images et des vidéos à partir de codes python très simplistes. C'est exactement l'outil qu'il nous faut pour répondre à notre attente.

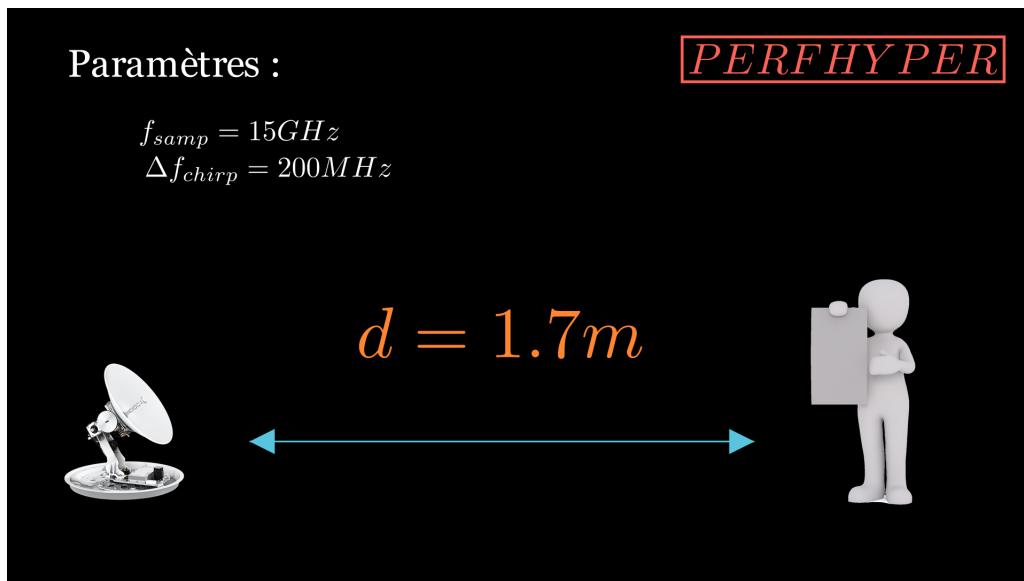


FIGURE 16 – Illustration Résultats

L'image ci-dessus est auto-générée. L'obtention des paramètres se fait à partir du nom de fichier lu (les noms des fichiers sont normalisés) et la distance est calculée directement avant de générer l'image.

C'est sous cette forme que nous présenterons le projet. Il sera possible de traiter et visualiser des acquisitions directement par le biais de l'interface créée.

## 8 La méthode Agile

Le respect strict de la méthode Agile a été pour l'ensemble de notre groupe un pilier majeur de la bonne réalisation du projet. En effet, nous avons dès le début réfléchi aux meilleures conditions de travail, autant dans la stimulation intellectuelle que dans la bonne entente qui facilite inévitablement la synergie de groupe. Le seul aspect qui nous a été difficile à mettre en pratique est l'adaptabilité de nos réponses aux demandes du client. En effet, le système étant déjà conçu, notre marge de manœuvre résultante se trouvait légèrement limitée quant à la possibilité de changer drastiquement des éléments du système.

Dans un premier temps, notre groupe a constamment cherché le contact avec nos deux encadrants de projet Fabrice COMBLET et Didier TANGUY. C'est en échangeant avec eux au maximum, dans leur bureau ou dans les salles d'expérimentations, que nous avons pu obtenir autant d'informations. Cette relation que nous avons créée peut être assimilée à la relation entre un client et le réalisateur d'un système complexe. Elle nous a beaucoup apporté sur le domaine purement technique, lorsque nous devions nous familiariser avec le matériel mis à notre disposition : le radar PerfHyper. D'un point de vue académique ensuite, c'est avec eux que nous avons consolidé nos bases en Traitement du signal et Ondes, des matières qui nous sont enseignées à l'ENSTA Bretagne mais dont certaines notions nécessitaient des explications supplémentaires. C'est enfin avec eux, sur le plan informatique, que nous avons pu nous approprier pleinement les logiciels d'émission, réception et traitements des signaux que nous manipulons.

Pour consolider les liens entre les membres du groupe, nous avons fait le choix de travailler systématiquement en équipe. De cette façon, nous avons vite appris les points forts de chacun et, forts du recul pris sur nos précédents travaux de groupe, nous avons su mettre à profit les avantages naturels de tous, en gardant un esprit d'équipe. Dès le début, il nous a paru essentiel de travailler dans un environnement stimulant : le plus clair de notre temps de travail pur s'est déroulé dans le laboratoire du premier étage du bâtiment E de l'école, dans une grande salle contenant le radar, objet de l'étude. Nos professeurs encadrants ont eu la gentillesse de nous faire visiter les matériels mis à notre disposition ainsi que les équipements plus techniques, dont l'usage dépassait pour certains le cadre de nos besoins pour le projet. C'est ainsi que nous avons passé un moment dans la chambre anéchoïque de l'école. Ce genre d'attention qui semble anodine est pour nous très importante afin de motiver le groupe, d'attirer l'attention de tous et de donner envie d'aller de l'avant.

Notre groupe s'est également distingué par sa capacité à répartir régulièrement le travail, du fait de notre bonne connaissance des forces de chacun. C'est pourquoi une bonne atmosphère régnait lors des séances en laboratoire, sans nul besoin d'un superviseur général des travaux d'untel. Afin de favoriser encore davantage la bonne ambiance, nous n'avons pas hésité à parler du projet dans des lieux de vie dynamique où la parole est libérée et où aucun n'hésite à faire des remarques, toujours aussi constructives que possible, pour nous aiguiller sur le bon cheminement. Dans la même idée, nous avons pris très au sérieux la fiche d'auto-évaluation : elle a été

lue par tous les membres du groupe et les conclusions faciles à en tirer nous ont aidé à restructurer légèrement la répartition des tâches et l'organisation générale du travail.

Lors de l'initialisation du projet, il a bien sûr été question d'utiliser les outils technologiques qui existent pour partager au mieux nos avancements respectifs. Après une rapide analyse de ce qui était disponible, nous avons jugé inutile d'en faire usage. Nous avons donc encore une fois privilégié le travail de groupe, qui favorise la volonté de chacun et incite les membres à pousser le groupe. Cela nous a permis de limiter les intermédiaires dans un projet déjà conséquent, sur de nombreux supports et logiciels jusqu'alors inconnus. Le matériel que nous avons manipulé quotidiennement est d'une haute complexité : le fonctionnement précis de beaucoup de ses composants nous sont inconnus et leur manipulation en était d'autant plus délicate. C'est pourquoi nous avons très tôt voulu comprendre les enjeux du projet ObsHyper afin de faire un usage optimal du matériel. Il en résulte un projet assez facile de compréhension, dont la simplicité fait honneur aux valeurs de la méthode Agile.

## 8.1 Diagramme de Gantt : semestre 3

Le travail de groupe constant que nous nous sommes efforcés de maintenir a fortement influencé sur l'accomplissement de nos objectifs. Cela transparaît naturellement dans le diagramme de Gantt, où les tâches se chevauchent presque systématiquement. On observe une première étape dans la réalisation du projet à la date du mardi 19 octobre 2021, soit une semaine avant les vacances de la Toussaint. En effet, c'est à cette date que nous avons déclaré achevées les tâches préliminaires d'appropriation des bases sur le plan technique et académique.

Au mardi 7 décembre, soit une semaine avant le rendu de mi-année, les phases d'études étaient pratiquement toutes achevées comme en témoigne cette seconde étape de notre diagramme de Gantt. Des retards dus à une mauvaise compréhension du matériel d'acquisition, à la difficulté à mettre en œuvre nos ambitions et à la météo peu favorable ont provoqué un décalage : la phase de prise de mesures a dû être reportée.

Le diagramme de Gantt est un outil simple d'utilisation, qui résume efficacement les étapes menant au rendu d'un projet. Il faut cependant prendre garde à tenir la moindre échéance afin de ne pas décaler de façon trop importantes les phases pratiques du projet.

## 8.2 Diagramme de Gantt et matrice SWOT : semestre 4

Au semestre quatre, l'expérience acquise au cours des quelques mois que nous avions déjà consacrés à ce projet nous a permis de prendre du recul sur notre façon de travailler. Ainsi, c'est dès la première semaine que nous nous sommes réunis pour discuter des forces et faiblesses de la première ébauche de notre rapport. En effet, nous avions conscience du fait que les débuts de notre projet manquaient de consistance et aurait mérité d'être initié plus rigoureusement. Afin de ne pas faire de cette réunion de lancement une nième rencontre improductive (mais excellente pour le moral des membres et l'activation de l'esprit d'équipe), nous avons décidé ensemble

d'utiliser une méthode d'analyse bien connue des ingénieurs : la construction d'une matrice SWOT.

	POSITIF	NÉGATIF
ORIGINE INTERNE	Strengths	Weaknesses
	Existence préalable du matériel nous assurant des bases solides.	L'absence totale de mesures exploitables au semestre 3.
	Des professeurs à l'écoute, capables de nous aiguiller et de nous informer.	La limitation en termes d'originalité due à la pré-existence du projet.
ORIGINE EXTERNE	Opportunities	Threats
	Une variété des compétences des différents membres.	La difficulté à prendre les mesures à cause du protocole et de la météo.
	Des données facilement traitables grâce à nos études préliminaires.	L'éparpillement dû aux possibilités variées pour présenter le projet.
	Des idées innovantes pour présenter le projet sous un angle valorisant.	Le risque de s'écartier du sujet, parfois trop limitant.

FIGURE 17 – Matrice SWOT - S. DUBOS

Cet outil nous a permis de définir proprement des axes d'amélioration, de réfléchir ensemble à des solutions, d'estimer leur durée dans le temps. Enfin, nous les avons organisées en fonction des sprints et des points de rendu imposés par le sujet. Il en ressort un Diagramme de Gantt bien plus complet que celui proposé au semestre 3, où les étapes s'articulent parfaitement et où les sprints se devinent sans peine, facilitant le travail de rédaction final.

Au 1er mars, nous avons réalisé un bilan de notre avancée : cette période correspond au premier Diagramme de Gantt proposé en annexe<sup>1</sup>. Malgré quelques retards sur les mesures, ce bilan fut encourageant.

1. Si ceux-ci ne sont pas assez nets ils sont disponibles sur le GitHub au lien suivant [1]

## 9 Conclusion

Au sein de la première phase de projet, nous nous sommes mis au niveau technique pour comprendre les tenants et aboutissants du rapport établi par le groupe précédent l'année dernière. La compréhension de la chaîne de formation de la forme d'onde ainsi que son acquisition nous ont bien occupés car cela ne ressemblait en rien aux expériences qu'on ait pu avoir jusque-là. Mis à part l'oscilloscope, tous les autres outils étaient nouveaux. Une fois cette première approche passée, nous nous sommes appropriés le code que nos prédecesseurs ont mis en œuvre pour traiter les données acquises. Ensuite pendant la seconde phase, depuis début Janvier 2022, nous avons effectués des expérimentations pour déterminer le cahier des exigences du RADAR. Tout ne s'est pas déroulé comme prévu dans les protocoles à cause de sous performances du RADAR. De plus nous avons totalement refondu les codes Python qu'avaient commencé le projet ObsHyper afin de travailler avec de la programmation orientée objet. Les avantages sont une plus grande modularité et une simplicité des modifications. Après une petite rétrospective, nous avons pris conscience que le démarrage du projet a été lent et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord le sujet nous était inconnu et hors programme, le fonctionnement de la baie RADAR est très complexe d'un point de vue matériel et logiciel et est sur-documentée. Nous étions totalement perdus et sans outils efficaces pour nous guider dans la compréhension du fonctionnement du RADAR. C'est pour cela que nous avons développé une interface qui vulgarise, accompagne dans la mise en place d'une acquisition, du début au post-traitement des mesures. Celle-ci est interactive et simple. Nous espérons qu'elle sera utile et mise à disposition de tout utilisateur du RADAR dans les prochains projets dans lesquels elle est impliquée.

## Table des figures

1	RS AFQ B100B [5] . . . . .	4
2	Configuration d'un chirp spécifique sur K6 Pulse Sequencer [7] . . . . .	5
3	RS SMBV 100A [5] . . . . .	6
4	Convertisseur GeoSync Microwave [5] . . . . .	6
5	Chaîne fonctionnelle d'acquisition - B. CHAUVEL . . . . .	7
6	Données acquises . . . . .	7
7	Tracé d'une impulsion sur un temps $\tau$ et de la période T de répétition des impulsions - B. CHAUVEL . . . . .	8
8	Représentation des diagrammes d'antenne [8] . . . . .	10
9	Illustration des caractéristiques d'un chirp linéaire - B. CHAUVEL . . . . .	11
10	Illustration de la différence de résolution spatiale entre l'écho d'une impulsion sinusoïdale simple et d'une impulsion avec modulation en fréquence. - B. CHAUVEL . . . . .	12
11	Intercorrélation d'un train de chirps - B. CHAUVEL . . . . .	13
12	Principe du "Cell-averaging CFAR" [3] . . . . .	16
13	Schéma de principe des cellules testées [2] . . . . .	16
14	Diagramme des exigences pour la Détection de cible - B. CHAUVEL . . . . .	17
15	Page d'accueil Interface . . . . .	25
16	Illustration Résultats . . . . .	26
17	Matrice SWOT - S. DUBOS . . . . .	29
18	Diagramme de Gantt de la première période - S. DUBOS . . . . .	33
19	Diagramme de Gantt de la seconde période - S. DUBOS . . . . .	34

## Liste des tableaux

1	Tableau synthétique des fonctions du système étudié [7] . . . . .	22
---	---	----

## Références

- [1] Benjamin CHAUVEL. *GitHub - radar signal post-processing*. Jan. 2022. URL : <https://github.com/bento7/perfhypert> (visité le 11/04/2022).
- [2] *Constant False Alarm Rate (CFAR) Detection - MATLAB & Simulink - MathWorks France*. URL : <https://fr.mathworks.com/help/phased/ug/constant-false-alarm-rate-cfar-detection.html> (visité le 06/01/2022).
- [3] *Figure 1. Basic principle of the cell average constant false alarm rate...* en. URL : [https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-the-cell-average-constant-false-alarm-rate-CA-CFAR-detector-FFT\\_fig1\\_340838325](https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-the-cell-average-constant-false-alarm-rate-CA-CFAR-detector-FFT_fig1_340838325) (visité le 06/01/2022).
- [4] Patrick FLANDRIN. *Détection temps-fréquence et réallocation- ens Lyon*. URL : [http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/IC2\\_ECMWF.pdf](http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/IC2_ECMWF.pdf) (visité le 07/12/2021).
- [5] Rohde & Schwarz INTERNATIONAL. *Groupe technologique de pointe*. fr-fr. URL : [https://www.rohde-schwarz.com/fr/accueil\\_48230.html](https://www.rohde-schwarz.com/fr/accueil_48230.html) (visité le 06/01/2022).
- [6] Christophe PAUMIER. *Radar Tutoriel - L'Equation du Radar*. fr. Publisher : Dipl.-Ing. (FH) Christian Wolff. URL : <https://www.radartutorial.eu/01.basics/L%27Equation%20du%20Radar.fr.html> (visité le 06/01/2022).
- [7] *RapportFinalUE44ObsHyper*.
- [8] Pierre VAILLANT. *Radar Tutoriel - Caractéristiques de l'antenne*. fr. Publisher : Dipl.-Ing. (FH) Christian Wolff. URL : <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Caract%C3%A9ristiques%20de%20l%E2%80%99antenne.fr.html> (visité le 05/01/2022).

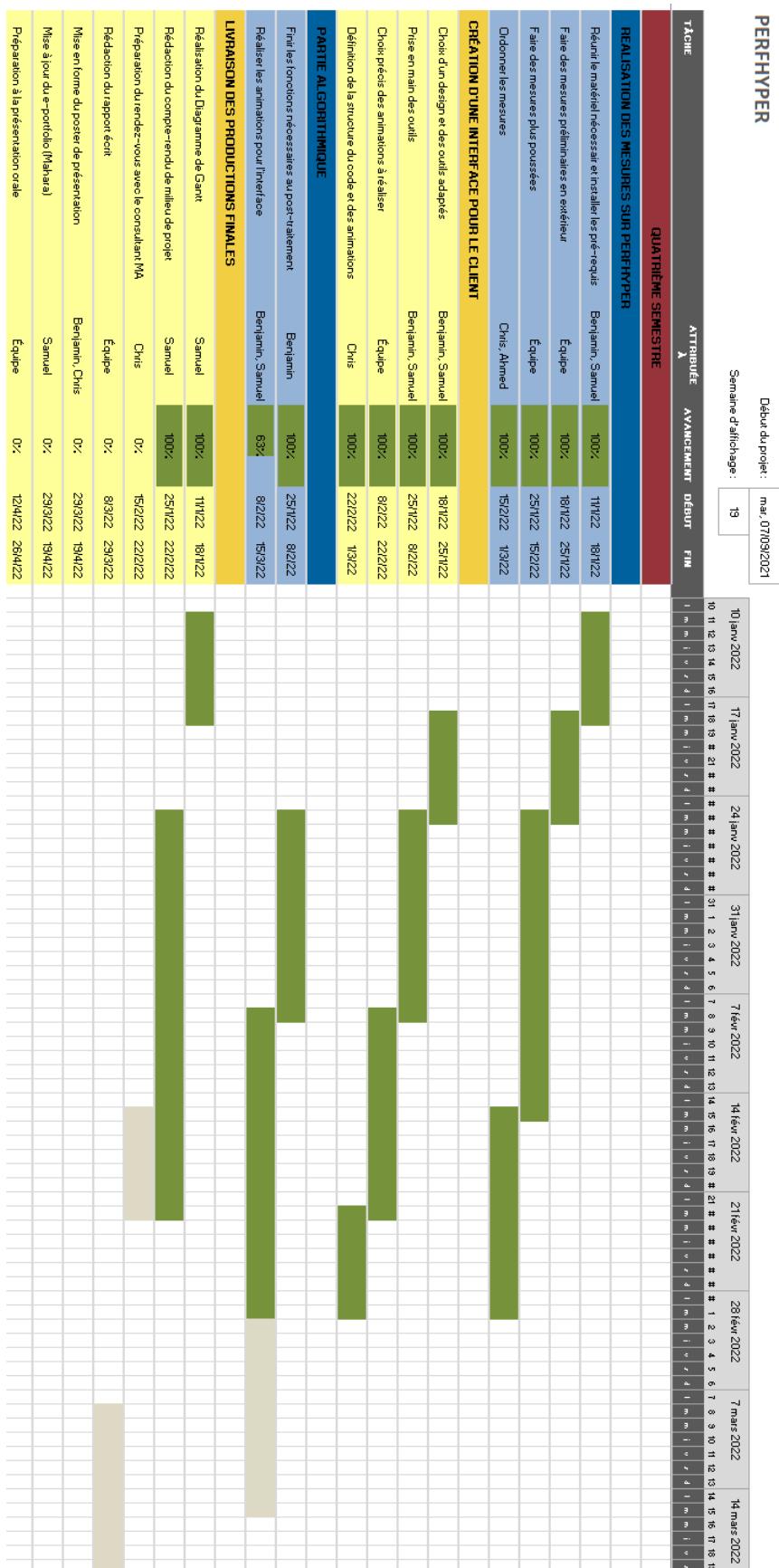


FIGURE 18 – Diagramme de Gantt de la première période - S. DUBOS

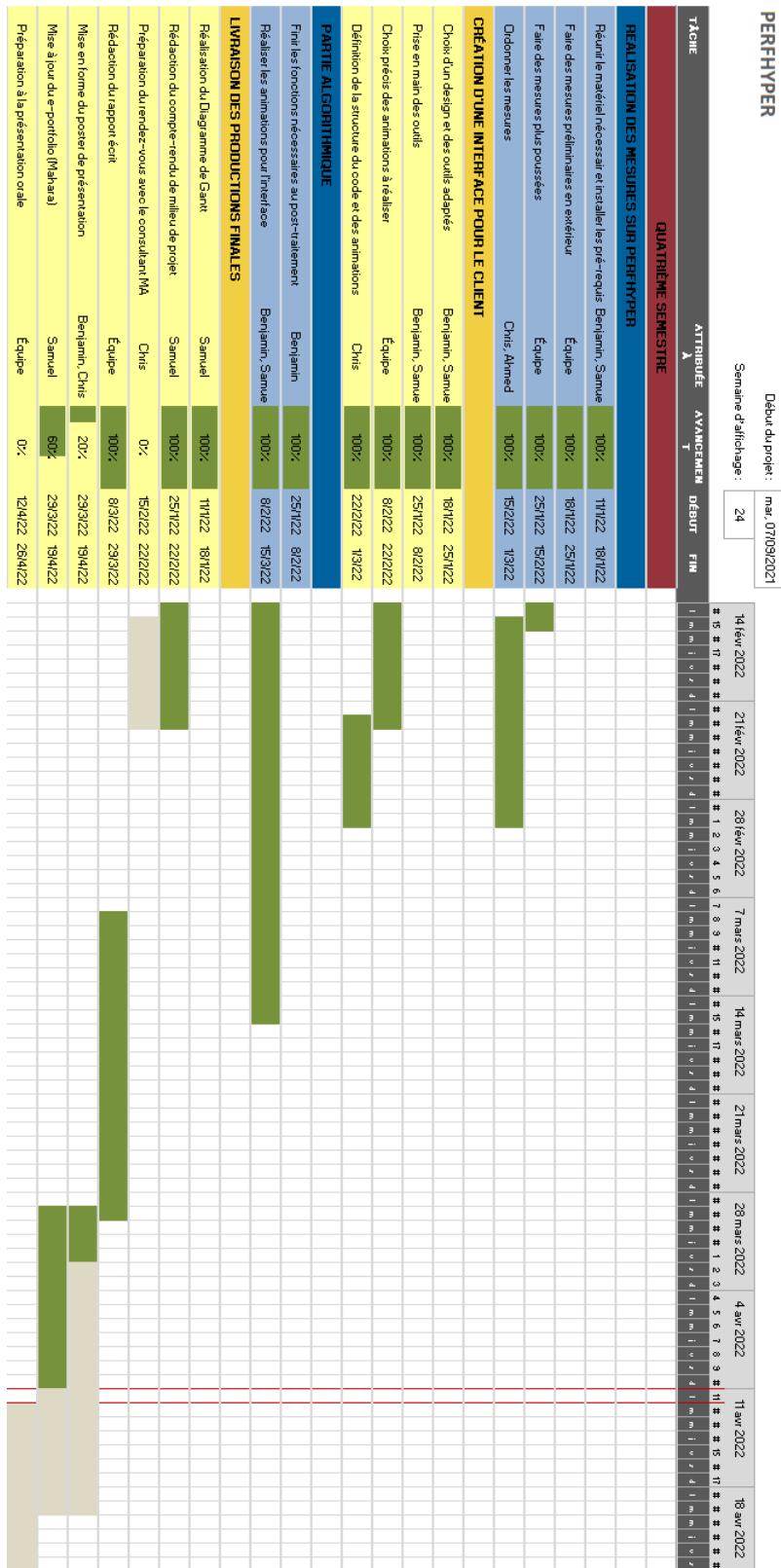


FIGURE 19 – Diagramme de Gantt de la seconde période - S. DUBOS