

Rapport de stage

ENTREPRISE : Thales

DATES : du 19/02/2024 au 16/08/2024

SUJET DE STAGE : Développement et génération de signaux sur simulateur

TUTEUR EN ENTREPRISE : DEQUE Clément



OPTION

☐ SE ☐ BIO ☐ EOC ☐ NRJ ☐ CSS ☐ LD ☒ DSMT ☐ NG ☐ TVI
☐ DI ☐ CS

CONFIDENTIALITÉ

Mon rapport est confidentiel niveau ☒ 1 (moy) ☐ 2 (élevé)
Un mail a été envoyé par votre tuteur à Mme Baronnet (Dijon),
Mme Nourai (Paris) ou Mme Omont (Angers) au moins un mois
avant votre soutenance, sinon l'ESEO retient le niveau 0 cf. fiche
d'encadrement.

DOMAINE
ENTREPRISE

☐ Auto. ☐ Aéron. ☐ Banques-fi-assur. ☐ Biomédical-santé ☐
Energie

☐ NTIC ☒ Télécoms ☐ Autres (précisez) :

AUTRES POINTS

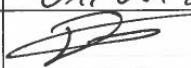
☐ Stage à dominante **management** ou ☒ Stage à dominante **recherche**

☐ E5e effectuée sous Contrat Pro

☒ Mon tuteur sera présent à ma soutenance

☒ Mon tuteur participera au déjeuner le jour de ma soutenance

THALES	
	FICHE D'ACCEPTATION DU RAPPORT OU MEMOIRE

Stagiaire ou apprenti		Tuteur de stage ou Maître d'Apprentissage	
Nom :	EDRI	Nom :	DEQUE
Prénom :	Anthony	Prénom :	Clément
Ecole :	ESEO	Fonction :	Ingénieur Dev Produits GE
Année de formation :	2024 (5 années)	Service :	INP / PRC
		Date :	01/08/24
		Signature :	

Le rapport ou le mémoire contient-il des informations sensibles ? (Case à cocher par le tuteur de stage)

- ☒ Non (OPEN, THALES GROUP INTERNAL)
☐ Oui (THALES GROUP CONFIDENTIAL, DIFFUSION RESTREINTE)

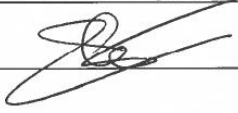
Dans l'hypothèse où le rapport de stage ou mémoire comporterait des informations sensibles, l'Officier de Sécurité décidera, après consultation du tuteur de stage ou du maître d'Apprentissage, des conditions de diffusion du rapport qui seront portées à la connaissance du stagiaire ou de l'apprenti et de l'établissement d'enseignement. Ces conditions seront stipulées en annexe de ce document. Sinon, la diffusion du rapport est libre.

La diffusion du rapport est-elle conditionnée ?

Sans restriction
 Soutenance à huis clos

(Case à cocher par l'Officier de Sécurité)

Visa de l'officier de sécurité (si rapport sensible)	
Date :	
Signature :	

Visa du Chef de Service	
Date :	01/08/2024
Signature :	

THALES GROUP INTERNAL

Ce document ne peut être reproduit, modifié, adapté, publié, traduit, d'une quelconque façon, en tout ou partie, ni divulgué à un tiers sans l'accord préalable et écrit de THALES
 83052318-ESS-TCS-FR / Rev 003

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à DEQUE Clément, mon tuteur de stage, pour son professionnalisme, sa disponibilité et sa sympathie tout au long de cette expérience. Grâce à son encadrement et à ses précieux conseils, j'ai pu énormément apprendre et développer de nouvelles compétences.

Je remercie également M. Latrache, mon tuteur académique, pour son suivi durant toute la durée de mon stage.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à l'ensemble du service, et en particulier à ceux qui ont été étroitement liés au projet. Leur accompagnement et leur soutien lors des réunions et des entrevues ont été inestimables, rendant l'environnement de travail agréable et stimulant.

Enfin, je remercie chaleureusement les autres stagiaires avec qui j'ai collaboré. Leur aide et leur camaraderie ont été précieuses face aux diverses difficultés techniques que nous avons rencontrées ensemble.

1 Table des matières

Introduction	5
2 Présentation de l'organisme d'accueil	6
2.1 Présentation de Thales	6
2.2 Structure globale	7
2.3 Service	8
2.3.1 Guerre électronique	8
2.3.2 Environnement de travail	9
3 Contexte	9
3.1 Motivation du stage	9
3.2 Objectif du stage	10
3.2.1 Création de signaux pour l'entraînement d'une IA	10
3.2.2 Enrichissement des fonctionnalités d'un logiciel	12
3.2.3 Méthodes suivies durant le stage	12
4 Réalisation	13
4.1 Génération automatisée de signaux pour l'entraînement de l'IA	13
4.1.1 Nouvelle arborescence	13
4.1.2 État de l'art	14
4.1.3 ARQ 6: Modulation: FSK2, Débit: 200 Bd/100 Bd, Shift: 400 Hz	16
4.1.4 ALIS / ALIS 2: Modulation: FSK2/ FSK8, Débit: 228.7 Bd/ 240 Bd, Shift: 170 Hz/ 240 Hz	18
4.1.5 Les PSK	21
4.1.6 Les RTTY	23
4.1.7 Les STANAG :	25
4.1.8 Conclusion du chapitre	29
4.2 Ajout de nouvelles fonctionnalités pour les modulations	30
4.2.1 Modulation CPM	30
4.2.2 Modulation Chirp	36
5 Conclusions	41
5.1 Conclusion générale	41
5.2 Bilan personnel	41
6 Bibliographie	42
7 Annexes	43

Introduction

La détection rapide et précise des signaux de communication est cruciale dans le domaine de la défense, où une identification rapide peut considérablement améliorer la réactivité des systèmes critiques. Ce besoin urgent a conduit à la réalisation de ce stage, visant à enrichir une bibliothèque de signaux capable d'être générés informatiquement. L'objectif principal est de modéliser des formes d'onde pour divers systèmes de communication en utilisant des paramètres techniques spécifiques pour permettre leurs identifications. Une fois définis et générés en grande quantité, ces signaux serviront à entraîner un modèle d'intelligence artificielle (IA) capable ainsi de détecter le système de communication utilisé.

La méthodologie a impliqué la génération de formes d'onde avec les modulations appropriées pour chaque type de transmission, suivie de la définition précise des protocoles d'identification des systèmes de communication pour obtenir des signaux détaillés. La pertinence des signaux générés a été soigneusement analysée. La deuxième phase du projet a consisté à développer de nouvelles fonctionnalités liées aux modulations de phase continue (CPM) et chirp dans le logiciel permettant la génération de signaux.

Les résultats montrent que l'outil de génération de signaux est efficace pour produire des formes d'onde utiles pour l'entraînement de modèles IA, mais nécessite des ajustements pour certaines fonctionnalités intégrées. L'ajout des modifications des modulations CPM et des Chirps représente un progrès notable, mais des améliorations supplémentaires sont nécessaires pour atteindre une fonctionnalité complète.

2 Présentation de l'organisme d'accueil

2.1 Présentation de Thales

Thales, fondée en 1968 et adoptant son nom actuel en 2000, est un acteur international majeur dans le secteur de la technologie. L'entreprise a su évoluer avec son temps, passant de 9 000 employés en 2002 à 81900 aujourd'hui. Cette croissance significative est dû à la compétitivité et à l'évolution constante de ses secteurs d'activité, où l'entreprise intervient principalement dans la défense, les transports, l'aérospatial et la cyber sécurité.

Avec un chiffre d'affaires en constante augmentation chaque année, Thales est l'un des plus grands leaders du marché technologique. Grâce à d'importants contrats et à des partenariats stratégiques, Thales dispose un avantage considérable face à ses concurrents, ce qui la place au 10ème rang dans le top 100¹ des entreprises les plus innovantes au monde.

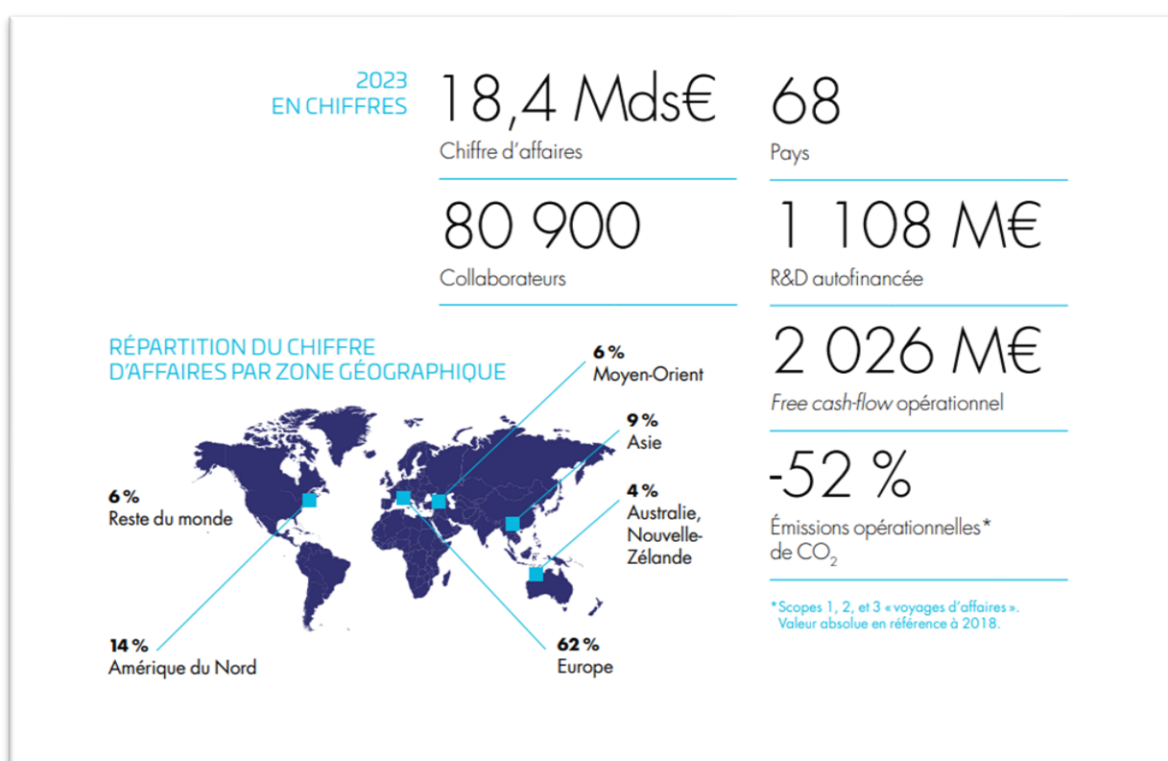


Figure 2-1 Performance et répartition géographique

Fort de cette position privilégiée, Thales attire une clientèle diversifiée issue de secteurs d'activité variés. Ses clients comprennent des institutions européennes, l'État, l'armée, l'industrie et la recherche, qui bénéficient de la palette de ressources la plus complète : compétences, systèmes, logiciels, services, financement, technologies. Ces collaborations favorisent l'émergence d'entreprises d'innovation, renforçant ainsi le positionnement de Thales sur le marché mondial de la technologie.

¹ D'après le « Clavirate Top 100 Global InnovatorTM »

2.2 Structure globale

Pour répondre de manière optimale aux exigences du marché international, Thales prend racine dans 7 unités commerciales mondiales, chacune spécialisée dans un domaine distinct. Cette organisation permet au groupe d'accentuer sa proximité avec ses clients tout en alliant efficacité et compétitivité. Voici un aperçu de ces unités :

SIX (Secure Information and Communication Systems) :

Fournit des solutions de communication sécurisées, des systèmes de renseignement et de surveillance, pour les secteurs de la défense et de la sécurité.

GTS (Ground Transportation Systems) :
--

Offre des solutions de signalisation pour les systèmes ferroviaires et urbains, ainsi que des systèmes de communication et de supervision intégrés.

DIS (Digital Identity & Security) :
--

Les technologies de l'unité commerciale DIS vont des logiciels sécurisés aux technologies biométriques et au chiffrement, permettant ainsi aux entreprises et aux gouvernements d'authentifier les identités et de protéger les données.
--

AVS (Avionics) :

Elle occupe une position de leader en tant qu'intégrateur de systèmes, architecte de systèmes et fournisseur d'équipements et de
--

services dans le domaine des systèmes avioniques. Ses clients incluent des industriels des avionneurs, des compagnies aériennes, et des armées de l'air.
--

TAS (Thales Alenia Space) :

TAS fournit des satellites, des charges utiles, des équipements, des systèmes et des services pour les programmes spatiaux de télécommunications, d'observation, de navigation et d'exploration.
--

LAS (Land & Air Systems) :

LAS fournit des systèmes, équipements, capteurs et services pour le contrôle du trafic aérien civil et militaire, la défense aérienne et les opérations terrestres de combat.

DMS (Defence Mission Systems) :
--

DMS fournit des produits, solutions et services dans le domaine des systèmes de combat électronique, des systèmes de surveillance et de reconnaissance aéroportés, ainsi que des systèmes de combat en surface et sous-marins.
--

2.3 Service

J'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage au sein de Thales SIX GTS, sur le site de Cholet, un lieu de haute expertise dédié aux radiocommunications tactiques et stratégiques, à la cybersécurité, aux communications par satellite et aux systèmes de guerre électronique. C'est dans ce dernier domaine, la guerre électronique, que j'ai eu la chance d'approfondir mes connaissances et de participer à des projets novateurs.

2.3.1 Guerre électronique

La guerre électronique consiste à détecter, intercepter, localiser ou perturber les signaux du spectre électromagnétique, notamment les transmissions radar, radio et infrarouges, afin de protéger les moyens militaires contre d'éventuelles menaces. Elle comprend trois modes d'action principaux, couvrant toute la gamme des opérations, de l'évaluation passive de la situation à la détection des transmissions ou menaces adverses, jusqu'à leur élimination active:

1. Soutien électronique :

L'objectif du soutien électronique est la détection et l'analyse des activités électromagnétiques ennemies. Les activités de renseignement et les mesures cyber permettent d'identifier les signaux émis par l'adversaire, de comprendre leurs intentions et de localiser leurs forces.

2. Protection électronique :

Ce mode vise à protéger les propres activités électromagnétiques contre les tentatives de brouillage ou d'interception de l'ennemi. Il inclut des mesures de défense et de cybersécurité pour assurer la confidentialité et l'intégrité des communications et des systèmes radar.

3. Attaque électronique :

Ce mode se concentre sur la neutralisation des capacités électromagnétiques de l'ennemi. Cela comprend des actions offensives telles que le brouillage des communications ennemies, la destruction de leurs radars ou la perturbation de leurs systèmes de navigation.

J'ai été affecté à la branche **soutien électronique**, travaillant sur un projet lié aux technologies COMINT (Communication Intelligence). Elle permet de révéler l'activité et les intentions des sources interceptées en accédant aux contenus de données. Avec la complexité croissante des communications, des moyens d'interception automatisés sont nécessaires pour détecter et localiser rapidement les menaces potentielles. On peut prendre pour exemple le programme ARCHANGE en coopération avec Dassault Aviation prévu pour 2026. Un avion visant à renforcer les capacités de renseignement d'origine électromagnétique sur de longue portée. Voici quelques réalisations du service :



Figure 2-3 le système de protection électronique (brouilleur) Eclipse



Figure 2-2 Intercepteur tactique et radiogoniométrie

2.3.2 Environnement de travail

Je travaille dans le bâtiment lié à l'organisation EWR (Electronic Warfare Radio), au sein du service PRC (Produits Radio Capteur) dans la branche développement logiciel. Ce service rassemble des experts en traitement du signal, goniométrie et analyse technique, des administrateurs systèmes, des concepteurs produit et des développeurs logiciels. Ce service est chargé de concevoir, développer, tester et maintenir des applications et des logiciels liés au traitement du signal, notamment dans les domaines de la goniométrie, de l'écoute et du cryptage.

En tant que stagiaire en développement et génération de signaux sur simulateur, mon rôle principal a été de participer à diverses phases. J'ai travaillé sur deux projets : l'un est une phase d'étude dont la finalité sera la conception d'un produit destiné à être vendu à des clients et l'autre pour répondre aux besoins internes de l'entreprise.

J'ai eu l'opportunité de collaborer avec des développeurs expérimentés, ce qui m'a permis de renforcer mes compétences techniques et de mieux comprendre les processus et les méthodologies de développement logiciel utilisés par l'entreprise.

Mon équipe projet est composée de développeurs et d'experts en traitement du signal. Cette double compétence m'a beaucoup aidé à apprendre de manière pratique. Les échanges réguliers et les réunions de suivi de projet ont facilité une communication efficace et une coordination optimale des tâches.

Quant à mon tuteur, DEQUE Clement, il occupe le poste d'ingénieur développement logiciel produit. Il a été d'un grand soutien tout au long de mon stage, m'a guidé dans mes tâches quotidiennes, et m'a fourni des retours constructifs sur mon travail. Grâce à son encadrement, j'ai pu aborder les défis techniques avec plus de confiance et trouver des solutions appropriées.

3 Contexte

3.1 Motivation du stage

La reconnaissance des signaux joue un rôle crucial sur le champ de bataille, où chaque prise d'information peut être déterminante et potentiellement changer l'issue du combat. Face à ces défis, les entreprises du secteur de la défense doivent constamment améliorer leurs capacités technologiques pour rester compétitives et efficaces.

Le stage que j'ai effectué s'inscrit dans ce cadre de la stratégie de développement technologique de l'entreprise. L'objectif global a été de renforcer les capacités de détection et d'analyse des signaux, cruciales pour les applications de surveillance.

3.2 Objectif du stage

Mon stage s'est déroulé en deux parties principales. De manière générale, cela inclut la reprise et le développement des projets. Dans le premier cas, il s'agit de répondre à des exigences client. Dans le deuxième cas, je devais répondre aux attentes de mon maître de stage et, par extension, aux besoins de l'entreprise.

3.2.1 **Création de signaux pour l'entraînement d'une IA**

Tout d'abord, j'ai travaillé sur la génération de formes d'onde numériques pour l'entraînement d'une IA dont le but est l'identification de signaux hautes fréquences. Cette démarche s'effectue en générant un grand nombre des signaux pour chaque forme d'onde (liste fournie comme donnée d'entrée du stage), afin de disposer de suffisamment d'éléments pour entraîner un modèle d'apprentissage automatique.

Les signaux que j'ai été amené à générer et analyser durant mon stage proviennent de divers systèmes de communication utilisés en bande HF (3MHz-30MHz), chacun ayant son propre ensemble de spécifications et applications. Ces signaux se caractérisent par leurs paramètres techniques de modulation (débit symbole, variations en amplitude, phase, et fréquence ...) ainsi que l'organisation des données pour leur envoi (codage canal). Ce sont ces critères qui permettront d'identifier l'unicité du type d'onde émis.

La génération de ces formes d'ondes est réalisée à l'aide d'un logiciel développé par Thales pour usage interne. Ce logiciel permet de générer des modulations analogiques et numériques usuelles (AM, FM, FSK, PSK, QAM, OFDM ...) en se basant sur des paramètres spécifiques fournis par l'utilisateur, tels que la fréquence d'échantillonnage, la durée, le type de modulation et la vitesse des symboles. Les données à envoyer (trains de symboles, signaux audio) ne sont pas créés par le logiciel, ils doivent être renseignés par l'utilisateur.

Les informations nécessaires pour cette génération sont organisées sous forme de scénarios et stockées dans un fichier de configuration appelé fichier GNT. Ce fichier GNT est associé à un fichier texte contenant les symboles à moduler. Le logiciel utilise le fichier GNT pour générer le signal correspondant selon les paramètres définis.

Un script Python préexistant automatise la génération de fichiers GNT de quelques formes d'ondes déjà implémentées. Dans un premier temps, il modifie les valeurs d'un fichier GNT de référence (nommé « template » dans la suite du rapport) pour l'adapter aux caractéristiques du signal souhaité. Le script permet également créer un fichier de données contenant des trains de symboles, nécessaires pour générer des protocoles spécifiques. C'est principalement cette fonctionnalité que nous mettrons à l'épreuve pour décrire nos signaux.

Ensuite, le script exécute le template modifié avec le fichier de symboles associé pour générer le signal. Grâce à ce script, il est possible de spécifier le nombre de générations pour chaque forme d'onde. Les données générées associées au codage source varient à chaque exécution, car elles sont créées de manière aléatoire, ce qui permet de constituer rapidement une base de données diversifiée.

3.2.1.1 Présentation de l'exécutable

L'exécutable se présente de cette manière : une suite d'instructions à remplir manuellement ou en passant un fichier au format GNT. Après avoir renseigné toutes les lignes, un fichier GNT est créé, contenant toutes les informations que l'on a renseignées.

```
Generation a partir d'un script existant (o/n) [n] ?
Generation a partir d'un script existant 1
Type de generation (0=carte son,1=monovoice,2=multivoices) [1] ?
Nom du fichier signal [signal.sig] ? signal.sig
Format du fichier :
    0 = Format detecte automatiquement
    1 = Type Anais 2.0 (Anais V1.0, ODET & TRC8050)
Format du fichier a generer [1] ?
Generation d'un signal IQ (o/n) [o] ?
Pas de mise a jour de la date dans les fichiers (depend du format) (o/n) [n] ?
Frequence d'echantillonnage [44100.000000] ?
Duree du signal a generer en seconde [120.000000] ?
Normalisation du signal a effectuer en short (o/n) [o] ?
Seed [0] ?
Modulation:
    0=ASK
    1=FSK
Choix [1] ?
Nombre d'etats [2] ?
Indice de modulation (Shift/Vitesse) [0.500000] ?
Vitesse de Transmission [600.000000] ?
Type de FSK (0=CPFSK, 1=incoherante, 2=Discontinue, 3=Fixe) [0] ?
Sur modulation (0=Aucune, 1=AM, 2=FM) [0] ?
Generateurs de symboles:
    0=Fichier
    1=RTTY5 (FSK2, PSK2 et FM-PSK2)
    2=RTTY7 (FSK2, FM-FSK2 et PSK2)
    3=SWEDARQ (FSK2)
    24=aleatoire
    25=DRM/CFEEE
    26=CROWD36 (FSK36 40 Hz 10 Bd ou 40 Bd)
    27=G.732/G.704 (E1 2048 kBits/s)
    28=G.742 (E2 8448 kBits/s)
    29=IFF
Générateur de symbole [24] ?
Sauvegarde du train de symboles (o/n) (o/n) [n] ?
```

Figure 3-3 Vue sur l'interface du générateur de signaux

```
Type de generation (0=carte son,1=monovoice,2=multivoices)=1
[GeneTran Fichier]
Nom du fichier signal=signal.sig
Format du fichier a generer=1
Generation d'un signal IQ=0
Pas de mise a jour de la date dans les fichiers (depend du format)=n
Frequence d'echantillonnage=44100.000000
Duree du signal a generer en seconde=120.000000
Normalisation du signal a effectuer en short=0
Modulation=1
Nombre d'etats=2
Indice de modulation (Shift/Vitesse)=0.500000
Vitesse de Transmission=600.000000
Type de FSK (0=CPFSK, 1=incoherante, 2=Discontinue, 3=Fixe)=0
Sur modulation (0=Aucune, 1=AM, 2=FM)=0
Générateur de symbole=24
Sauvegarde du train de symboles (o/n)=n
```

Figure 3-1 Exemple d'un fichier de configuration GNT

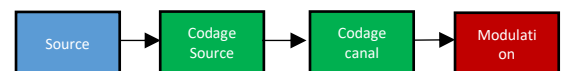


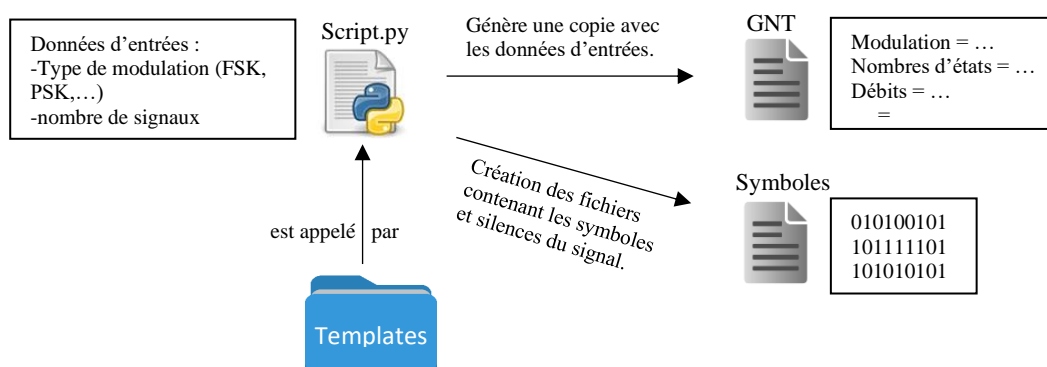
Figure 3-2 Chaîne de transmission

Ce fichier de configuration (Figure 4.1) démontre la capacité de l'exécutable à contrôler diverses fonctions de la chaîne de transmission numérique (côté émetteur). On y spécifie la fréquence d'échantillonnage et la durée du signal qui définissent les propriétés du signal source avant tout traitement, ainsi que les paramètres du générateur de symboles, permettant de choisir une séquence de symboles définis par un alphabet de codage adapté à la transmission. Pour finir, les options pour la modulation du signal sont clairement définies.

3.2.1.2 Déroulement du script

Pour chaque signal, le script réalise les actions suivantes :

1. Copie du template GNT associé à la classe du signal contenue dans « Templates ».
2. Réécriture du template pour configurer les caractéristiques spécifiques au signal.
3. Création du fichier ALB contenant les symboles et silences du signal.
4. Appel de l'exécutable GeneTran.exe pour la génération du fichier SIG (optionnel).



Durant cette première partie de stages, les étapes suivies ont d'abord consisté à générer les fichiers GNT avec la bonne modulation de chaque type de transmission, puis à obtenir un signal plus détaillé en définissant précisément le protocole, c'est-à-dire à décrire la composition du flux binaire dans le script python. Puis analyser la pertinence des signaux grâce à 2 outils.

Outil 1 : Un outil permettant de visualiser les signaux (IQ, spectre, constellation, etc).

Outil 2 : Un outil fournissant une identification probable du signal.

3.2.2 Enrichissement des fonctionnalités d'un logiciel

La deuxième partie de mon stage a été axée sur l'enrichissement des fonctionnalités du logiciel de génération de signaux. Mon rôle a été de développer de nouvelles fonctionnalités permettant la génération et l'analyse de nouveaux types d'ondes, répondant ainsi aux besoins évolutifs des utilisateurs interne à Thales. J'ai utilisé Eclipse comme environnement de développement et Git pour la gestion du code source, développant seul sur ma propre branche pour assurer une intégration fluide et sans conflits.

Les projets auxquels j'ai contribué répondent directement aux problématiques et aux objectifs stratégiques de l'entreprise. D'une part, ils permettent de satisfaire les besoins des clients externes et internes de Thales en respectant scrupuleusement leurs cahiers des charges. D'autre part, ils renforcent les outils de génération, de reconnaissance et d'analyse de signaux, s'alignant ainsi avec la stratégie d'innovation continue de l'entreprise.

3.2.3 Méthodes suivies durant le stage

1) Mise en place de l'environnement de travail

- a. Compréhension du script Python existant
- b. Conception d'une nouvelle architecture du script pour accélérer mon développement sur le projet

2) Génération des formes d'ondes

- a. Clarifier les types de signaux à générer et leurs spécifications à l'aide de leur documentation
- b. Création de template pour les formes d'onde sans leur protocole, utilisant des données aléatoires.
- c. Écrire des fonctions pour manipuler les données des formes d'onde et implémenter les protocoles requis.
- d. Analyse des signaux pour évaluer leur pertinence

3) Implémentation de fonctionnalité sur l'exécutable

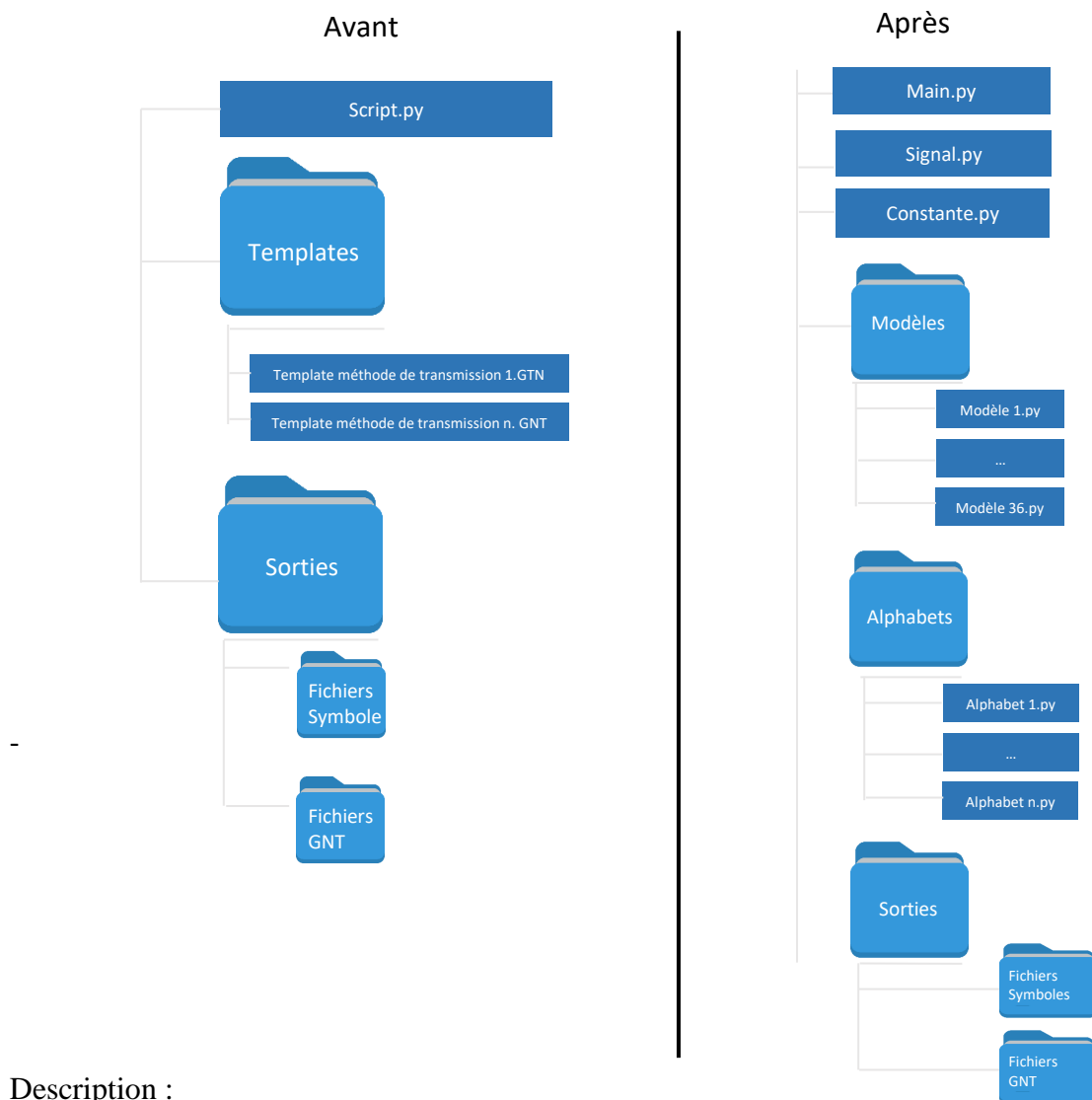
- a. Modification de la taille de la fenêtre en valeur réel pour les modulations CPM
- b. Intégrer une fenêtre de pondération à la réponse fréquentielle pour les modulations CPM raise cosinus
- c. Implémenter des symboles spécifiques pour les signaux « chirps ».

4 Réalisation

4.1 Génération automatisée de signaux pour l'entraînement de l'IA

4.1.1 Nouvelle arborescence

J'ai récupéré un projet existant sous forme de script Python et des templates de signaux déjà réalisés. Ce projet était initialement un script massif, difficile à maintenir et à comprendre dû à son grand nombre de lignes. Pour faciliter sa gestion et son évolution au cours de mon développement, durant les 2 première semaines j'ai fragmenté le script en plusieurs parties distinctes, chacune ayant une fonctionnalité spécifique.



Description :

J'ai structuré le script en trois sections distinctes. La première section contient une classe appelée "Signal" qui définit les caractéristiques du signal, telles que la durée et l'échantillonnage. La deuxième section regroupe les constantes qui paramètrent les signaux à générer. Enfin, la troisième section comprend la fonction principale qui exécute le code. Cette fonction principale appelle les modèles stockés dans le répertoire "modèles", en fonction du

scénario spécifié dans le fichier de constantes. Chaque modèle correspond à un type spécifique d'onde, et il génère un flux de données qui est ensuite sauvegardé dans un fichier texte situé dans le répertoire "sortie".

Le dossier « Alphabet » contient les fichiers conçus pour créer des symboles dont les valeurs correspondent aux caractères de l'alphabet. Un "alphabet" fait référence à un ensemble de symboles ou de caractères utilisés pour coder l'information à transmettre, le plus connu étant l'ASCII.

4.1.2 État de l'art

Un protocole de communication est un ensemble de règles permettant à deux ou plusieurs entités d'un système de communication de transmettre des informations via diverses variations d'une quantité physique. Ces protocoles définissent les règles de la communication, dans le cadre du stage ils sont implémentés de manière logicielle.

En effet la conception de protocoles de communication implique plusieurs éléments clés. Ces éléments sont :

1. **Les règles et la syntaxe** : Les protocoles définissent les règles de formatage des messages et la manière dont les données doivent être structurées. Cela inclut la syntaxe des messages, les en-têtes, les séquences de bits, et autres éléments nécessaires pour une communication claire et ordonnée.
2. **La sémantique** : Cela concerne le sens des messages échangés. Chaque message doit avoir une signification précise et provoquer une action ou une réponse spécifique de la part du destinataire.
3. **La synchronisation** : Les protocoles doivent gérer la synchronisation des communications, en assurant que les messages sont envoyés et reçus dans le bon ordre et au bon moment.
4. **Les récupérations d'Erreurs** : Les protocoles incluent des mécanismes pour détecter et corriger les erreurs de transmission, garantissant ainsi l'intégrité des données

Ainsi, en intégrant ces principes dans la conception des protocoles, je peux m'assurer que les signaux générés non seulement respectent une structure formelle et cohérente, mais également véhiculent des informations précises et significatives.

Dans le cadre de mon stage chez Thales, on m'a confié la tâche de réaliser la génération de 36 protocoles de communication. Pour la clarté de ce rapport, j'ai regroupé les méthodes de transmission en plusieurs catégories, en me concentrant sur certaines d'entre elles en raison de leur similarité. La première catégorie regroupe les protocoles ARQ en vert, essentiels pour le contrôle d'erreur et la retransmission des données. Ensuite, j'ai travaillé sur les protocoles utilisant la modulation PSK (en orange). Les protocoles RTTY en jaune. Enfin, la catégorie des protocoles STANAG en bleu, elle couvre les standards de communication militaire définis par l'OTAN.

ARQ6 96 Bd 170 Hz	MIL 188-110A	PSK-63 QPSK
ARQ6 200 Bd 400 Hz	MIL 188-141A	PSK-63F
ARQ-E	PACTOR 1 100 Bd	RTTY5 50 Bd 450 Hz
ARQ-M2-242	PACTOR III SL1	RTTY5 50 Bd 850 Hz
ALF-RDS	PACTOR III SL2	RTTY5 75 Bd 850 Hz
ALIS	PSK-10	RTTY5 150 Bd 850 Hz
ALIS-2	PSK-125 BPSK	SI-FEC mode 96 Bd
AX25 mode HF 600 Bd	PSK-125F	STANAG 4415
AX25 mode HF 300 Bd	PSK-220F	STANAG 4481 PSK
CIS 50-50	PSK-250 QPSK	STANAG 4529 1200 Bd
CODAN 8580	PSK-31 QPSK	STANAG 4538
DUP ARQ	PSK-31F	STANAG 4539 2400 Bd

Tableau 1 liste des cibles à générer

Commençons par la catégorie verte qui représente les transmissions ayant pour protection de donné de l'ARQ (Automatic Repeat/Repetition Request). Ce mécanisme est crucial car il joue un rôle majeur dans le formatage des données. L'ARQ (en français requête automatique de répétition) est une méthode de contrôle d'erreur pour la transmission de données. Parmi les versions de l'ARQ, deux sont principalement utilisées dans les 10 cibles à réaliser, qui sont :

Le Stop-and-wait ARQ:

Après avoir transmis une trame de données, l'émetteur attend un accusé de réception (acknowledgement) avant de transmettre la trame suivante, et ainsi de suite jusqu'à la fin du message à transmettre. Si un accusé de réception n'arrive pas après une certaine période (timeout) ou si le récepteur demande de répéter la trame de données en cas de détection d'une erreur, alors l'émetteur renvoie la trame de données.

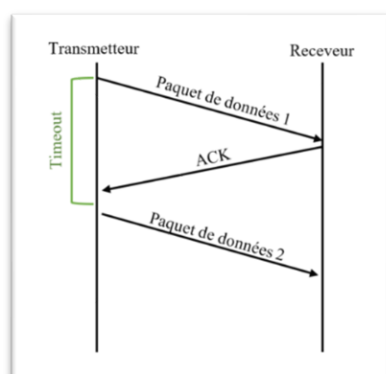


Figure 4-2 Visualisation Stop-and-wait ARQ

Le NAK-based ARQ:

Dans le protocole NAK-based ARQ, au lieu d'envoyer un accusé de réception positif (ACK) pour les données reçues correctement, le récepteur envoie un accusé de réception négatif (NAK) pour indiquer qu'une erreur a été détectée.

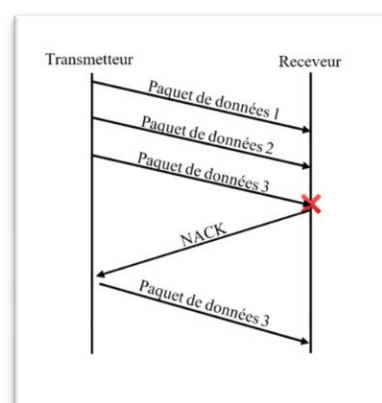


Figure 4-1 Visualisation NAK-based ARQ

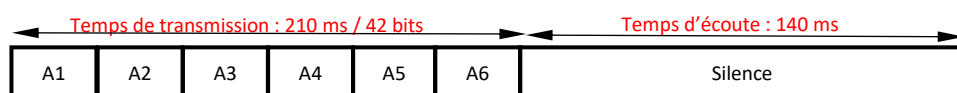
D'un point de vue du signal, du côté transmetteur, le signal émis est considéré comme un signal « burst ». C'est-à-dire une succession de données transmises sur une période relativement courte.

4.1.3 ARQ 6: Modulation: FSK2, Débit: 200 Bd/100 Bd, Shift: 400 Hz

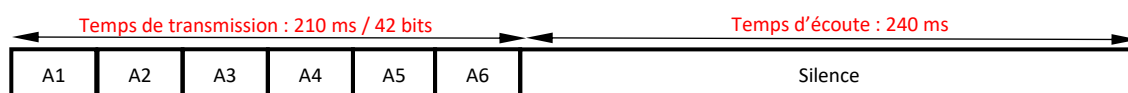
4.1.3.1 Description

Les signaux ARQ6 suivent un protocole ARQ et sont donc structurés en « burst ». Un burst se compose d'un bloc de données de 6 caractères, chaque caractère étant constitué de 7 bits, soit un total de 42 bits. Ce burst est suivi d'une période de silence de 140, 240 ou 280 ms, selon le type d'ARQ6 (voir figure ci-dessous), permettant au récepteur de répondre en cas d'erreur ou de non-réception.

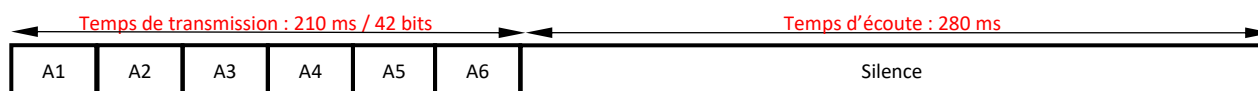
ARQ-6-70 :



ARQ 6-90 :



ARQ 6-98 :



4.1.3.2 Qualité et validité

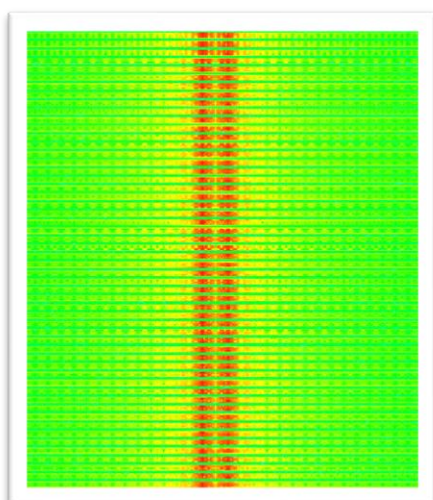


Figure 4-4 Vu temps/fréquence ARQ 6-70

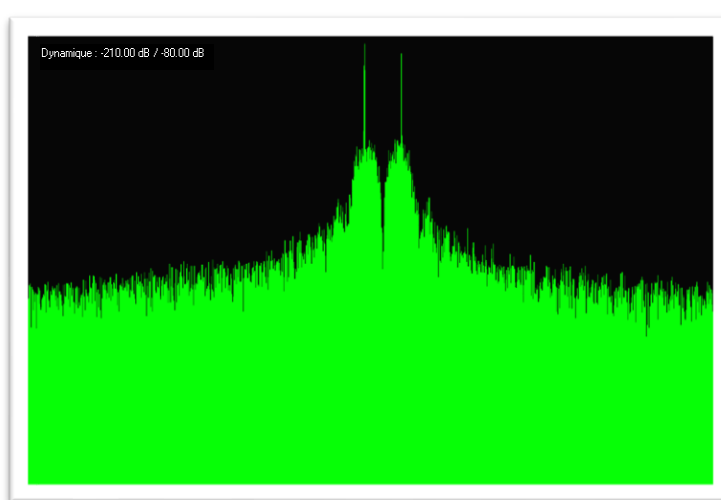


Figure 4-3 Densité spectrale de puissance ARQ 6-70

Sur la vue temps/fréquence le signal apparaît sous forme de bursts réguliers, ce qui correspond à la structure attendue des signaux ARQ6. Chaque burst est suivi d'une période de silence, ce qui permet de distinguer les différents segments de transmission.

La durée des bursts et des périodes de silence est conforme aux spécifications. Où chaque burst de données est suivi d'un silence de 140, 240 ou 280 ms, en fonction du type d'ARQ6 configuré (ici dans le cas ARQ-6-70).

On distingue la présence de deux pics indicateurs de la modulation en FSK2, respectant ainsi le décalage de 400 Hz. Les périodes de silence entre les bursts perturbent la continuité du signal et diminuent le RSB de l'ensemble du signal par les zones de bruit, effaçant les lobes secondaires sur la DSP.

Pour m'assurer de la validité du signal, j'ai à ma disposition l'outil 2 de Thales, capable de reconnaître les cibles que je dois générer. Cet outil attribue un score au signal analysé, ce score est basé sur plusieurs critères, chaque critère ayant un poids plus ou moins important. Ici on atteint un score de 92,9 le mieux étant d'atteindre le score max étant de 100. Cependant, il est important de noter que l'outil n'a détecté qu'un seul type de transmission. Cela vérifie l'unicité du signal et élimine ainsi tout conflit avec d'autres méthodes similaires.

Il est important de souligner que cet outil possède certaine limite notamment en termes de temps de calcul et mais aussi en confusion dans les identifications. Ces limitations justifient pleinement la nécessité de mon stage, qui vise à créer des logiciels plus performants avec l'émergence de l'IA.

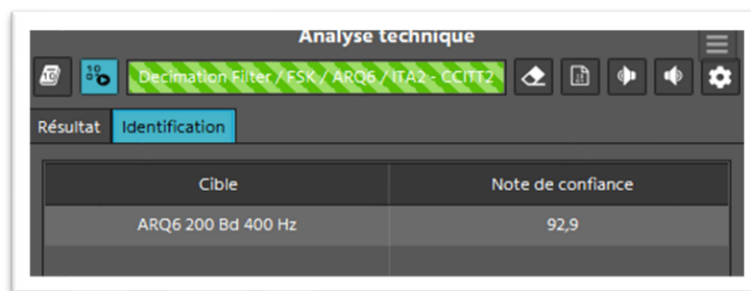


Figure 4-5 Vue sur l'analyse technique

Cet outil est également capable de décoder le signal une fois qu'il a identifié le protocole utilisé. Pour m'assurer davantage de la véracité du signal, j'ai intégré une partie de l'alphabet couramment utilisé par cette méthode de transmission, en l'occurrence l'ITA2/CCITT-2. Ce qui nous permet de générer des caractères aléatoires de cet alphabet. Pour vérifier que les caractères décodés proviennent bien de l'alphabet implémenté et non de bits aléatoires, j'ai fait transmettre un texte compréhensible par l'homme. Cet encodage a pu être partiellement décodé par l'outil, ce qui indique une certaine justesse dans le traitement des données. Cependant, il reste partiel, car une répétition de caractères est visible dans la vue Textes/Symboles.

Les nuages couraient sur la lune enflammée
Comme sur l'incendie on voit fuir la fumée,
Et les bois étaient noirs jusques à l'horizon.
Nous marchions sans parler, dans l'humide gazon,
Dans la bruyère épaisse et dans les hautes brandes,
Lorsque, sous des sapins pareils à ceux des Landes,
Nous avons aperçu les grands ongles marqués
Par les loups voyageurs que nous avions traqués.
Nous avons écouté, retenant notre haleine
....
Alfred de Vigny

Textes/Symboles

LES NUAGES COURAIENT SUR LA LUNE ENFLAMMÉE COMME SUR L'INCENDIE ON VOIT FUIR LA FUMÉE ET LES BOIS ÉTAIENT N
OIRS JUSQU'À L'HORIZON NOUS MARCHIONS SANS PARLER DANS HUMIDE GAZON DANS BRUYÈRE ÉPAISSE ET DANS LES HAUTES
BRANDES LORSQUE SOUS DES SAPINS PAREILS À CEUX DES LANDES NOUS AVONS APPERÇU LES GRANDS ONGLES MARQUÉS PA
R LES LOUPS VOYAGEURS QUE NOUS AVIONS TRAQUÉS NOUS AVONS ÉCOUTÉ RETENANT NOTRE HAL

Figure 4-6 Vue sur le texte décodé

4.1.4 ALIS / ALIS 2: Modulation: FSK2/ FSK8, Débit: 228.7 Bd/ 240 Bd, Shift: 170 Hz/: 240 Hz

4.1.4.1 Description

L'émetteur va émettre un certain nombre de fois sa procédure d'appel avant d'être détecté par le récepteur. Après être reconnue par le récepteur, la trame de départ est transmise 3 fois par la station maîtresse. Elle sert à fixer l'heure de synchronisation indique en outre l'adresse maîtresse à la station esclave puis les données sont transmises en suivant le standard ARQ.

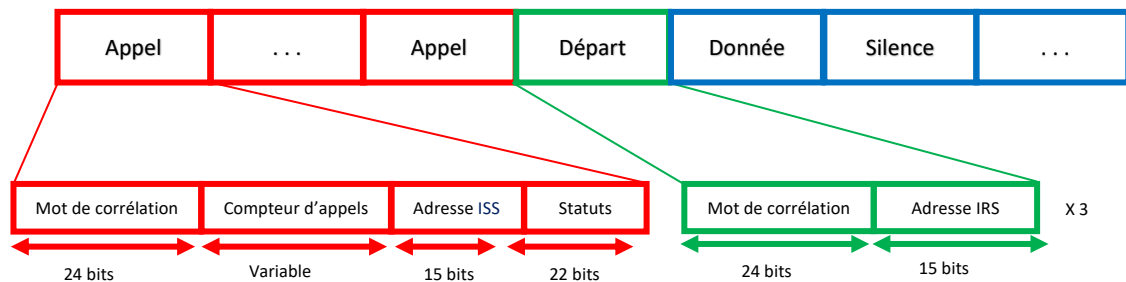
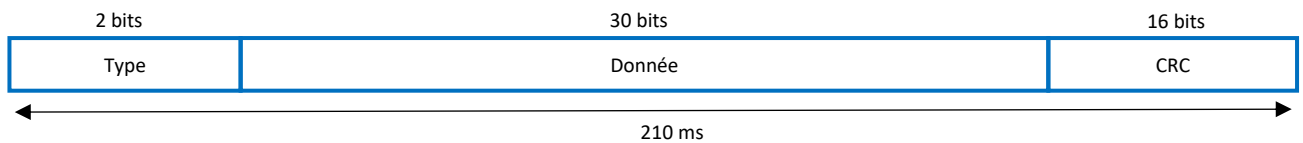


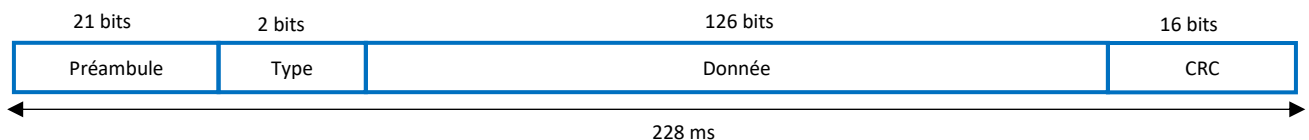
Figure 4-7 Procédure d'appel ALIS

Composition du flux binaire de **ALIS** :



La structure de données utilise la méthode ARQ. Sur une durée de 245 ms, la transmission est effectuée, suivie de 240 ms allouées pour le temps d'écoute. Un bloc transmis est composé de 2 bits qui définissent le type, 30 bits de données, et de 16 bits de checksum pour le cycle de répétition de caractères.

Composition du flux binaire de **ALIS 2** :



ALIS 2 présente quelques changements par rapport à son prédécesseur. Nous avons besoin de 3 bits pour former un symbole car le protocole utilise une FSK8. La taille des données est plus grande, avec l'ajout d'un préambule de 21 bits contenant des informations sur le mode de fonctionnement. Son temps de silence est de 262 ms.

Préambule : [0, 1, 0, 2, 3, 6, 2]

4.1.4.2 Code ALIS

Chaque modèle suit plus ou moins la même structure pour assurer une génération de signal cohérente et conforme aux spécifications du protocole. Voici un aperçu du modèle ALIS, d'abord avec les constantes pour le protocole (en jaune), cette section définit les adresses et les états constants nécessaires pour le protocole de communication. Puis la gestion des variables pour la modulation (en bleu foncé). Pour finir la gestion des données (en rouge, vert et bleu).

```
ALIS_WIDEBAND_HZ = 270
TEMPS_SILENCE = 0.275
TEMPS_DONNEE = 0.210

ADRESSE_ESCLAVE = [1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1]
ADRESSE_MAITRE = [1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0]
MOT_CORRELATION = [1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0]
STATUS = [1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0]
# dictionnaire pour convertir un chiffre en ITA 2 (utile pour la procedure d'appel)
ITA2_CHIFFRE = {'1': [1, 1, 1, 0, 1], '2': [1, 1, 0, 0, 1], '3': [1, 0, 0, 0, 0], '4': [0, 1, 0, 1, 0], '5': [0, 0, 0, 0, 1]}

def scenario_ALIS(signal):
    fmin = -ALIS_WIDEBAND_HZ / 2.0
    fmax = ALIS_WIDEBAND_HZ / 2.0
    nbEtats = 2
    signal.debit = 228.66

    # on genere un nombre aleatoire d'appel (ici entre 1 et 4)
    nbFrame = rd.randint(1, 5)
    # on cree la taille d'un temps d'ecoute pour l'ARQ
    duree_silence = (math.floor(signal.debit * TEMPS_SILENCE))
    silence = np.full(duree_silence, -1)

    # boucle pour créer les trames d'appelles
    for i in range(1, nbFrame):
        nbFrameIta = ITA2_CHIFFRE[str(i)]
        frame = MOT_CORRELATION
        frame.extend(nbFrameIta)
        frame.extend(ADRESSE_ESCLAVE)
        frame.extend(STATUS)
        signal.data.extend(frame)

    # boucle pour créer le start frame
    for j in range(3):
        signal.data.extend(MOT_CORRELATION)
        signal.data.extend(ADRESSE_MAITRE)

    signal.data.extend(silence)

    # boucle pour créer les donnees utiles
    for i in range(int(math.floor(DUREE_SIGNAL / 0.450))):
        signal.data.extend(rd.randint(0, nbEtats, int(math.floor(signal.debit * TEMPS_DONNEE))))
        signal.data.extend(silence)
    signal.zonesTF.append([0, DUREE_SIGNAL, fmin, fmax])
```

Constantes pour le protocole

Variables pour la modulation

Création d'appel

Trame de départ

Trame de données suivant un ARQ

Les adresses maître et esclave proviennent d'un tableau réalisé par l'Institut Suédois de Physique Spatiale recensant les coordonnées géographiques des stations ALIS. Tandis que le mot de corrélation et le statut sont des valeurs complètement aléatoires. Cette imprécision est dû à la difficulté d'accès aux documents.

4.1.4.3 Qualité et validité

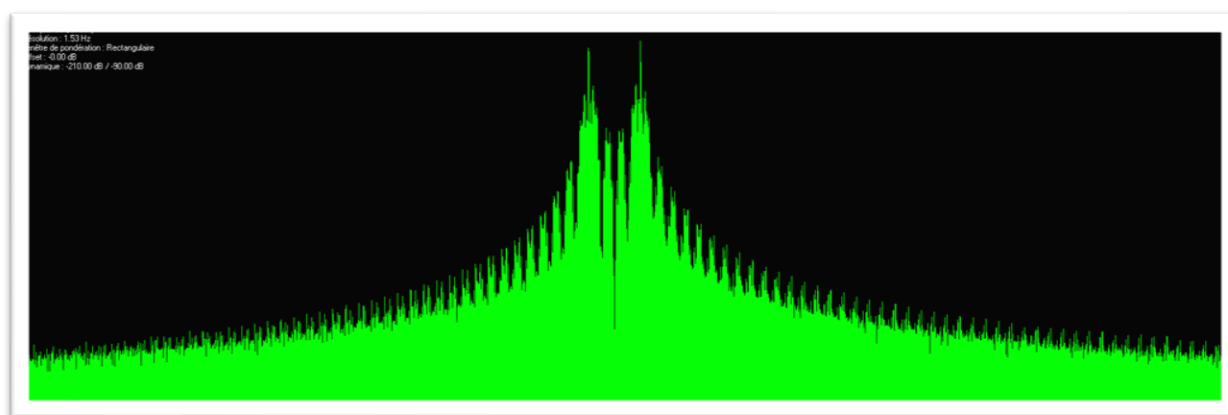


Figure 4-8 Densité spectrale de puissance ALIS

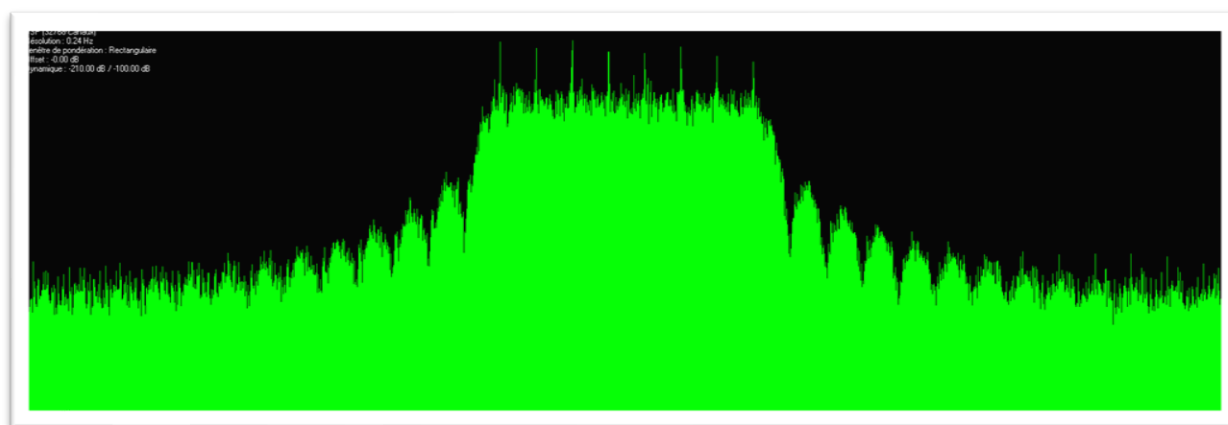


Figure 4-9 Densité spectrale de puissance ALIS 2

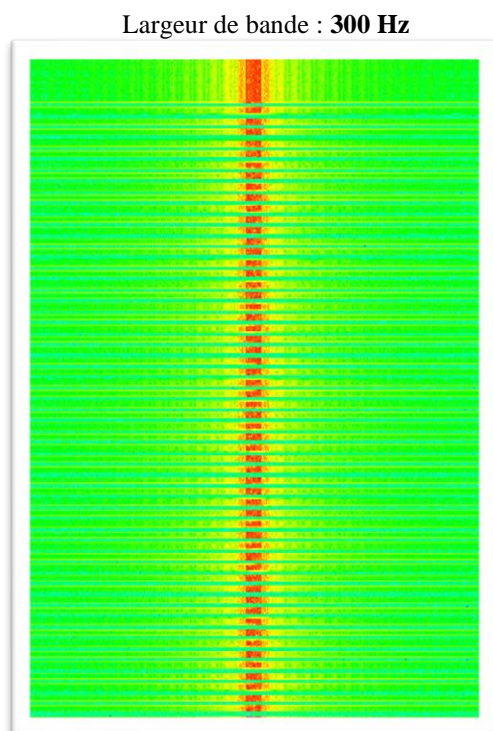


Figure 4-10 Vue temps/fréquence ALIS

Procédure
d'appel

Données utiles

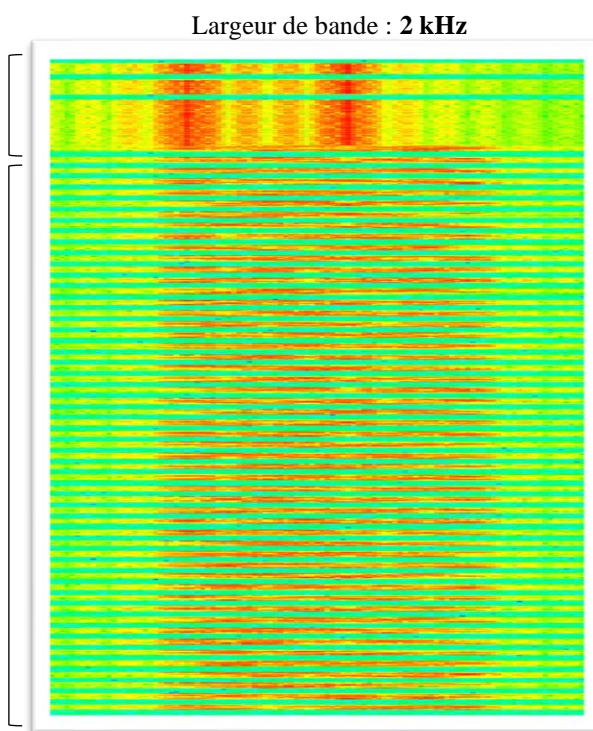


Figure 4-11 Vue temps/fréquence ALIS 2

La DSP du signal ALIS 2 montre un signal avec huit fréquences distinctes, contrairement à l'ALIS, ce qui implique que le signal est modulé en FSK8 (Frequency Shift Keying 8) pour l'ALIS 2 et en FSK2 pour l'ALIS. On voit aussi que la largeur de bande est beaucoup plus grande pour l'ALIS 2, avec une largeur de bande de 2 kHz contre 300 Hz pour l'ALIS, ce qui est conforme aux spécifications du signal dans la documentation.

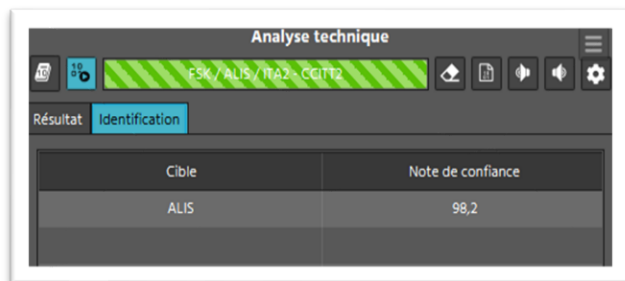


Figure 4-12 Vue sur l'analyse technique ALIS

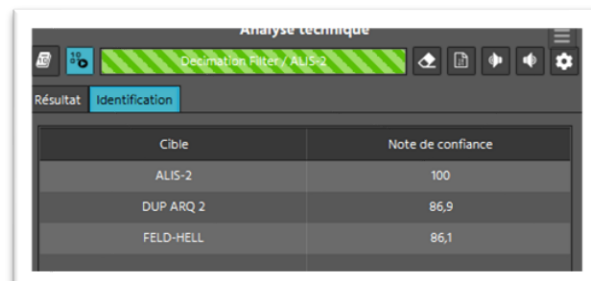


Figure 4-13 Vue sur l'analyse technique ALIS 2

Pour l'identification, l'outil 2 prend en compte, en partie, les tailles des trames de données et de silence. Par conséquent, cela entraîne une baisse de score lorsque nous prenons en compte la trame d'appel pour ALIS mais pas pour ALIS 2, car je suppose que le préambule a permis une authentification complète.

Il faut savoir que les scores attribués aux signaux ne sont pas directement comparables entre eux, car chaque signal est évalué en fonction de critères différents. Les scores n'ont de sens que pour le signal individuel, validant ce dernier après un certain seuil (score de 80).

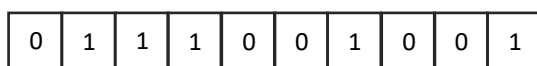
4.1.5 Les PSK

4.1.5.1 Description

La catégorie des signaux orange du tableau représente les méthodes de transmission utilisant exclusivement la modulation par déplacement de phase (PSK). Dans ce contexte, les modulations PSK sont toutes générées en modulation par déplacement de phase différentielle (DPSK), où l'on code non pas la valeur absolue du bit par l'état de phase, mais la différence de bit par rapport au bit précédent, évitant ainsi tout changement brusque entre chaque état.

PSK63F, PSK125F et PSK220F sont des variantes de PSK31. Dans ces variantes, une redondance supplémentaire pour la correction d'erreurs est introduite par codage convolutionnel avec un taux de code de 1/2. Cela signifie que chaque bit original génère 2 bits de transmission grâce à 2 polynômes. La longueur de contrainte, qui est la taille de la fenêtre coulissante pour sélectionner les bits du message participant aux calculs, est de 7 ($\deg P[X] = 7$). Le schéma ci-dessous illustre ce processus d'encodage.

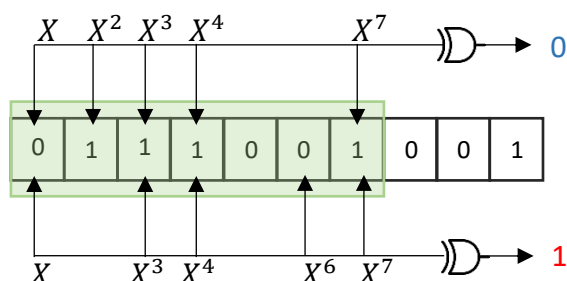
Mot binaire à transmettre :



Polynôme 1: $X^7 + X^6 + X^4 + X^3 + X$

Polynôme 2: $X^7 + X^4 + X^3 + X^2 + X$

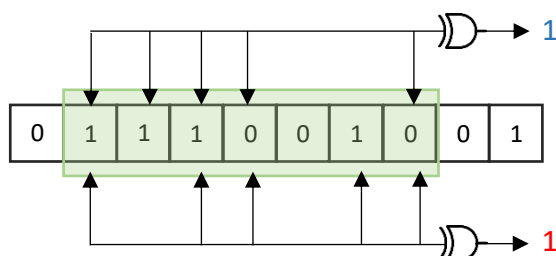
Itération 1 :



Sortie :

1	0
---	---

Itération 2 :



Sortie :

1	0	1	1
---	---	---	---

4.1.5.2 Qualité et validité

L'identification du signal repose principalement sur la modulation, le nombre d'états, et le débit de symboles. Cela pose un problème pour différencier les PSK avec ou sans FEC tel que la PSK125 et PSK125F. Pour résoudre ce problème, le principe de redondance des données, évoqué précédemment a été implémenté.

De plus la PSK10 présente une particularité notable : chaque caractère est séparé par le mot binaire « 011 » pour la synchronisation, contrairement aux autres qui utilisent le mot « 00 ». À noter que le type d'alphabet utilisé pour ces méthodes de transmission comportent des caractères à valeur variable. Ainsi, j'ai décidé d'implémenter cet alphabet, connu sous le nom de Varicode. J'ai ensuite vérifié son fonctionnement en transmettant le même texte que pour l'ARQ6 et en observant si l'outil 2 pouvait le décoder correctement.

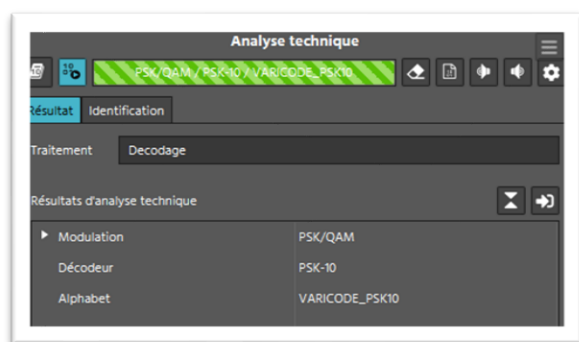


Figure 4-15 Vue sur l'analyse technique PSK 10



Figure 4-14 Vue sur le texte décodé

L'analyseur a réussi à identifier correctement le type de transmission et à détecter l'alphabet, ce qui permet de voir le texte clairement décodé dans la vue texte/symbole. À noter que le même texte décodé contient beaucoup moins de caractères que celui décodé par l'ARQ6. Cela est cohérent avec le faible débit de symboles de la PSK10, qui est dû à la génération de signaux de durée fixe. Cette caractéristique influe directement sur la densité des informations transmises, entraînant une réduction du nombre total de caractères décodés.

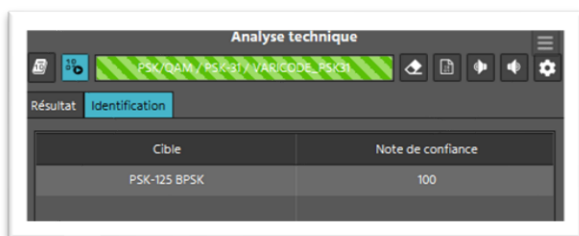


Figure 4-17 Vue sur l'analyse technique PSK 125

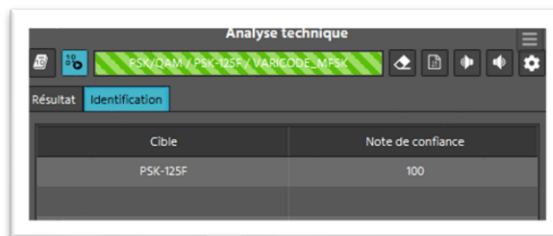


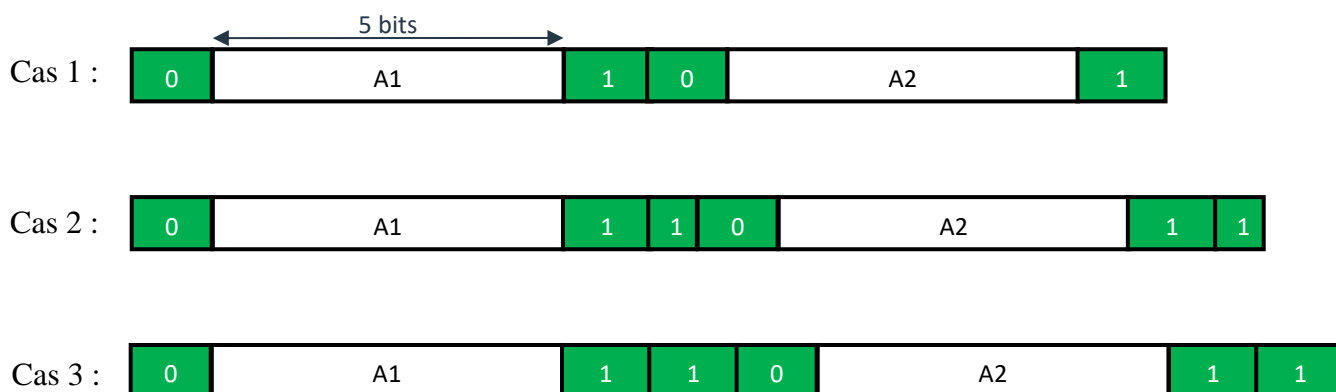
Figure 4-16 Vue sur l'analyse technique PSK 125F

Ici, on peut constater que l'analyseur de signaux a réussi à différencier la PSK125 de la PSK125F.

4.1.6 Les RTTY

Description :

Un mot codé en code RTTY se compose d'un bit de départ à 0, de 5 bits de données et de 1, 1,5 ou 2 bits de fin de valeur 1, donnant à chaque caractère une longueur de 7, 7,5 ou 8 bits. Le code RTTY est un code asynchrone dans lequel la synchronisation est effectuée pour chaque caractère par un bit de départ et de fin.



4.1.6.1 Qualité et validité

Sur le logiciel de génération de signaux, il est possible de choisir un générateur de symboles qui produit des symboles RTTY5, mais uniquement pour le cas 1. Par conséquent, j'ai également implémenté dans le script la possibilité de gérer le cas 3. La gestion des demi-bits (1,5 bits) n'a pas été implémentée dans ce projet pour des raisons de simplification. Bien que des solutions telles que le doublement du débit de transmission et la duplication des symboles aient été envisageables pour représenter les demi-bits, cette approche a été délibérément écartée afin d'éviter une complexité supplémentaire dans le développement.

Remarque :

Pour différencier les fichiers générant des signaux RTTY avec 1 ou 2 bits de fin à 1, une légère modification de la classe Signal a été effectuée en ajoutant l'attribut « mode ». Cet attribut permet d'afficher le nombre de bits de fin dans les noms des fichiers générés.

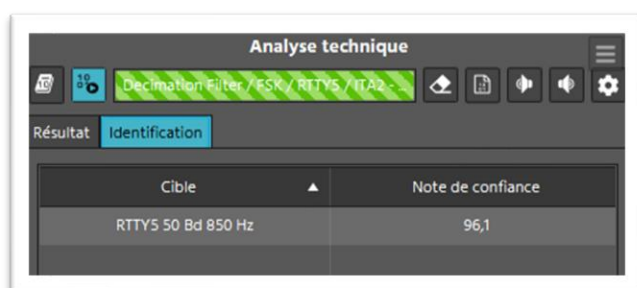


Figure 4-19 identification RTTY5 50 Bd 850 Hz :

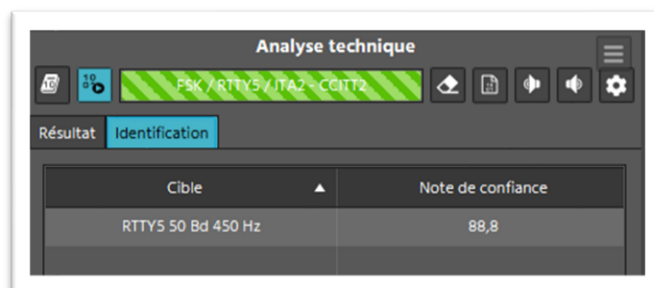


Figure 4-18 identification RTTY5 50 Bd 450 Hz

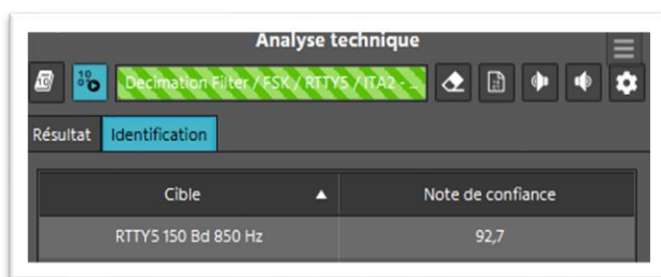


Figure 4-21 identification RTTY5 150 Bd 850Hz

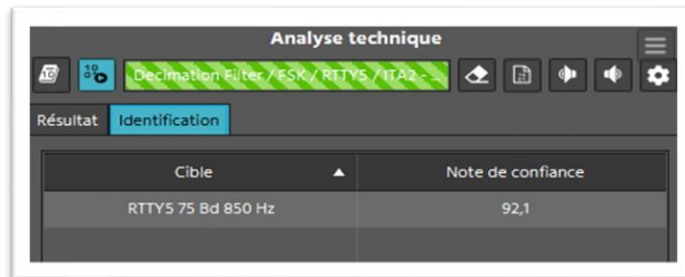


Figure 4-20 identification RTTY5 75 Bd 850 Hz

Les résultats montrent que chaque séquence produite est correctement identifiée par l'outil, confirmant ainsi la conformité des signaux générés aux standards RTTY5.

4.1.7 Les STANAG :

4.1.7.1 Description:

Pour la plupart des STANAG, seule l'implémentation de leur préambule (permettant de déterminer le début de la trame de données) a été ajoutée pour l'identification.

- STANAG 4415 / PSK8 / 2400 Bd :

Le STANAG 4415 est un dérivé du MIL-STD-188-110A. Chaque transmission commence par un préambule de synchronisation répété **soit 3 fois pour un entrelacement nul ou court, soit 24 fois pour un entrelacement long**. Ensuite, il y a une section de données de longueur inconnue, entrelacée avec la sonde canal (RP). L'entrelacement, dans ce contexte, fait référence à une technique utilisée pour améliorer la robustesse de la transmission en mélangeant les données.

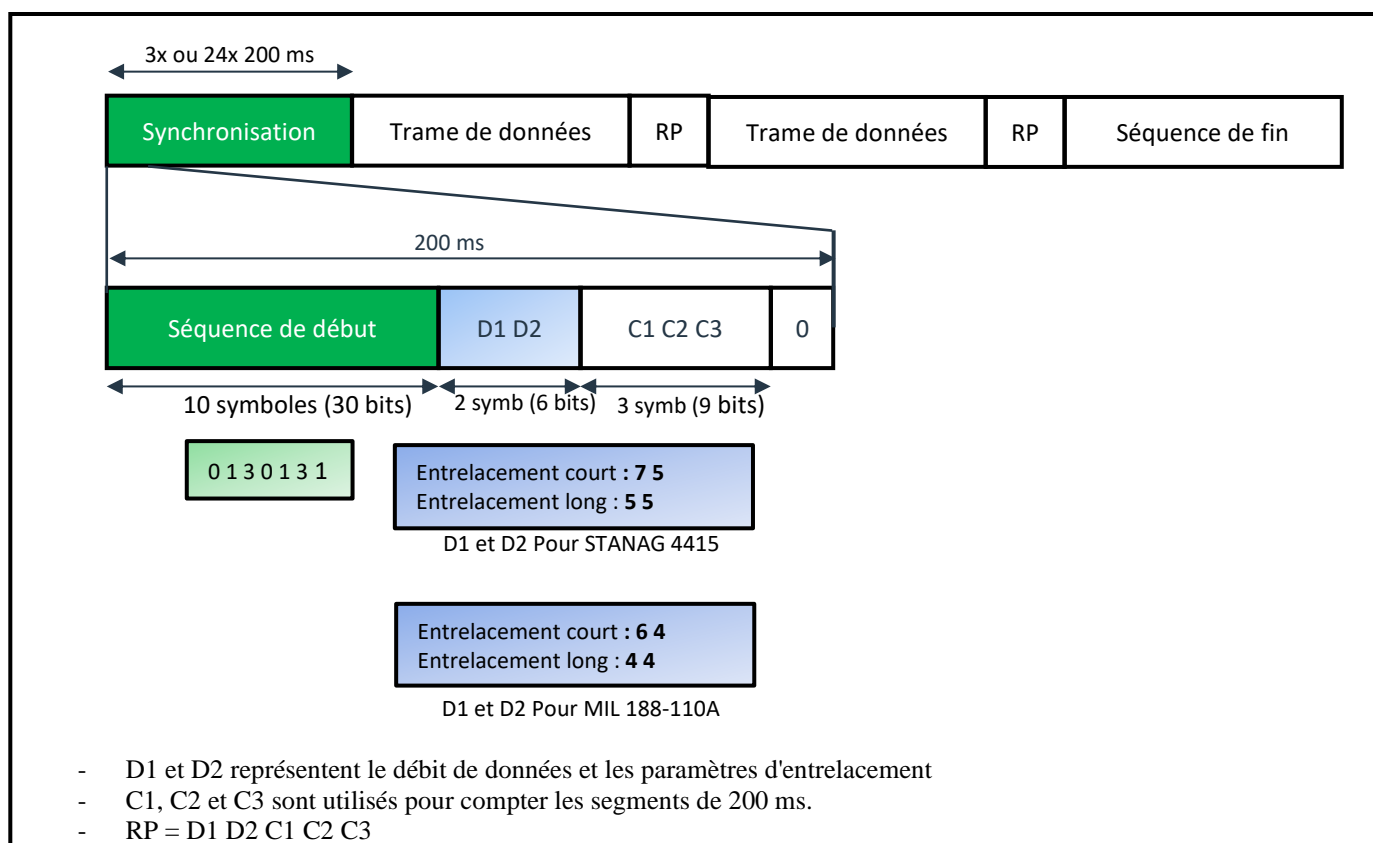


Figure 4-22 Structure d'une trame STANAG 4415

Le défi technique consiste à réussir à différencier le STANAG 4515 et le MIL-STD-188-110A pour l'outil d'identification des signaux. Dans les spécifications des documentations, j'ai identifié deux différences entre ces deux méthodes.

La première différence concerne la vitesse de transmission. Le STANAG 4515 fixe la vitesse de transmission à 75 bit/s, conformément aux spécifications de. Cependant, notre cahier des charges demande une émission à 2400 bauds, soit 7200 bits/s en utilisant une PSK8.

L'autre critère distinctif réside dans la séquence de synchronisation, où les valeurs de D1 et D2 sont différentes entre les deux normes.

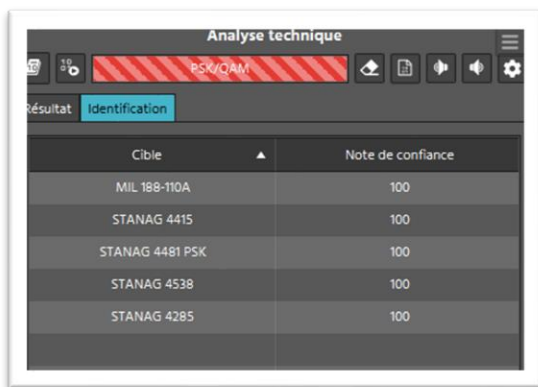


Figure 4-23 Vue analyse technique du STANAG 4415

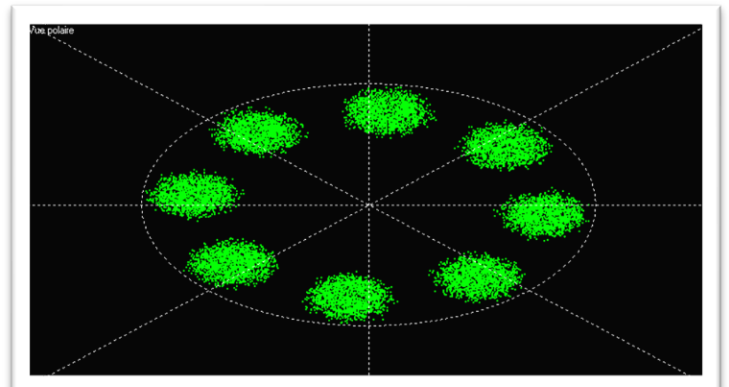


Figure 4-24 Constellation STANAG 4415

L'analyseur a bien détecté une modulation de phase à 8 états, mais il n'arrive pas à différencier entre le STANAG 4415, le MIL-STD-188-110A et le STANAG 4481. Cela pose un problème, car ces méthodes de transmission sont importantes et doivent être distinguées.

Une approche pour pallier ce problème pourrait être de répéter plusieurs fois la trame de synchronisation dans le signal, car elle n'est actuellement implémentée qu'au début de la transmission. Une autre solution serait d'ajouter des blocs RP au signal, mais en raison du manque d'informations, je n'ai pas pu le faire.

Les autres STANAG ont pu être identifiés par leur séquence de synchronisation :

- STANAG 4481 / PSK8 / 2400 Bd :

Préambule :

Le STANAG 4481 est composé d'un préambule émis sur deux états :

[0,4,0,4,4,0,0,4,4,4,4,0,0,0,4,4,0,4,4,0,4,0,0,0,4,0,0,4,0,4,4,0,0,4,4,4,4,0,0,0,4,4,0,4,4,4,0,0,0,4,4,0,4,4,0,4,0,4,0,0,0,4,0,0,4,4,0,0,4,4,0]

Séquence de Synchronisation :

Le STANAG 4481 émet une séquence de synchronisation pour les données tous les 32 symboles :

[7, 4, 3, 0, 5, 1, 0, 2, 2, 1, 1, 5, 7, 4, 3, 5, 0, 2, 6, 2, 1, 6, 2, 0, 0, 5, 0, 5, 2, 6, 6]

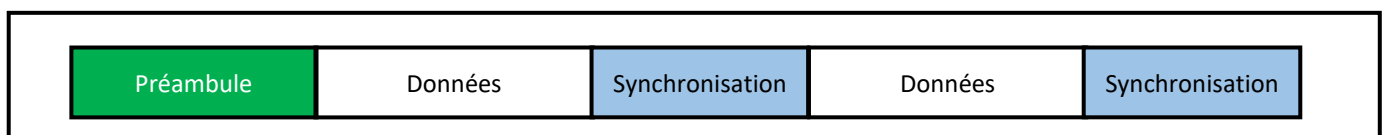


Figure 4-25 Structure d'une trame STANAG 4481

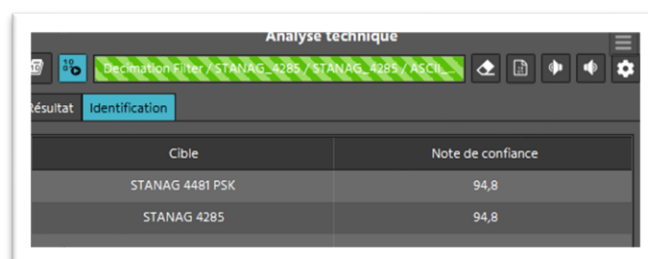


Figure 4-26 Vue sur l'analyse technique du STANAG 4481

- STANAG 4538 / PSK8 / 2400 Bd :

Il contient cinq types de formes d'ondes (BW0 à BW4) utilisées pour différents types de signalisation dans le système, toutes basées sur la modulation PSK8 à 2400 Bd.

Chaque forme d'onde est conçue pour répondre à des besoins spécifiques :

- **BW0** : Établissement de la connexion.
- **BW1** : Gestion du trafic.
- **BW2** : Protocole de haut débit (HDL).
- **BW3** : Protocole de bas débit (LDL).
- **BW4** : Accusé de réception pour le protocole LDL.

Chacune de ces formes d'onde est composée de trois blocs :

1. **Contrôle du niveau de transmission (TLC)** ²(non inclus dans BW3).
2. **Préambule** (non inclus dans BW4).
3. **Données**.

J'ai implémenté la séquence de garde (TLC) de BW0 et BW1 de 256 symboles :

2,6,1,6,	1,6,3,0,	6,0,1,1,	5,0,0,6,	2,6,2,1,	6,2,3,2,	7,6,4,3,	0,2,3,5,
2,7,5,1,	5,1,7,6,	1,7,1,5,	4,4,0,7,	2,2,6,2,	2,2,6,3,	3,3,7,7,	3,2,4,5,
0,7,4,7,	7,7,2,3,	1,6,7,6,	5,7,0,5,	1,0,7,6,	2,4,0,2,	7,5,5,4,	1,5,1,5,
6,7,3,0,	2,7,6,6,	4,0,7,4,	3,2,2,6,	6,7,4,7,	2,0,2,7,	2,1,5,4,	6,2,3,2,
1,6,0,7,	1,1,2,6,	2,2,0,2,	2,3,6,7,	1,7,1,7,	1,5,7,7,	2,2,2,0,	4,3,4,2,
0,6,7,6,	0,5,0,7,	1,7,4,1,	2,3,4,6,	7,2,2,0,	6,4,4,6,	6,4,2,2,	6,5,3,4,
2,3,5,7,	7,1,0,0,	0,3,1,2,	0,1,6,2,	7,4,4,3,	2,5,4,5,	6,4,2,5,	6,2,2,4,
7,0,6,2,	3,7,2,5,	4,2,4,1,	5,5,3,6,	1,1,3,2,	7,5,7,0,	7,3,5,0,	0,1,2,0

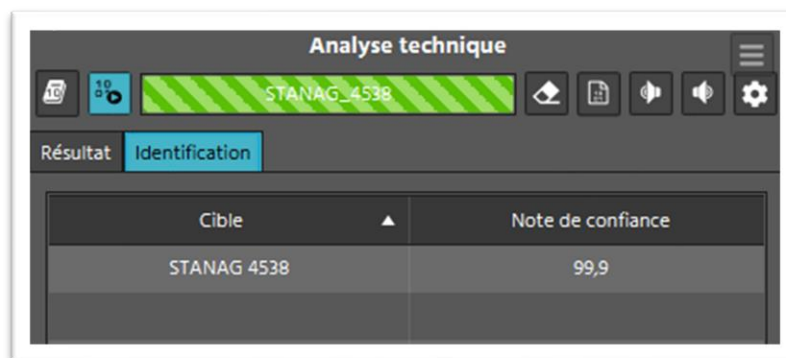


Figure 4-27 Vue sur l'analyse technique du STANAG 4538

² C'est un processus qui ajuste le niveau de puissance du signal émis pour s'assurer qu'il reste dans une plage appropriée, ni trop faible ni trop élevée.

- STANAG 4539, QAM 16, 2400 Bd :

J'ai utilisé le préambule ci-dessous en début de transmission :

[1, 5, 1, 3, 6, 1, 3, 1, 1, 6, 3, 7, 7, 3, 5, 4, 3, 6, 6, 4, 5, 4, 0, 2, 2, 2, 6, 0, 7, 5, 7, 4, 0, 7, 5, 7, 1, 6, 1, 0, 5, 2, 2, 6, 2, 3, 6, 0, 0, 5, 1, 4, 2, 2, 2, 3, 4, 0, 6, 2, 7, 4, 3, 3, 7, 2, 0, 2, 6, 4, 4, 1, 7, 6, 2, 0, 6, 2, 3, 6, 7, 4, 3, 6, 1, 3, 7, 4, 6, 5, 7, 2, 0, 1, 1, 1, 4, 4, 0, 0, 5, 7, 7, 4, 7, 3, 5, 4, 1, 6, 5, 6, 6, 4, 6, 3, 4, 3, 0, 7, 1, 3, 4, 7, 0, 1, 4, 3, 3, 3, 5, 1, 1, 1, 4, 6, 1, 0, 6, 0, 1, 3, 1, 4, 1, 7, 7, 6, 3, 0, 0, 7, 2, 7, 2, 0, 2, 6, 1, 1, 1, 2, 7, 7, 5, 3, 3, 6, 0, 5, 3, 3, 1, 0, 7, 1, 1, 0, 3, 0, 4, 0, 7, 3]

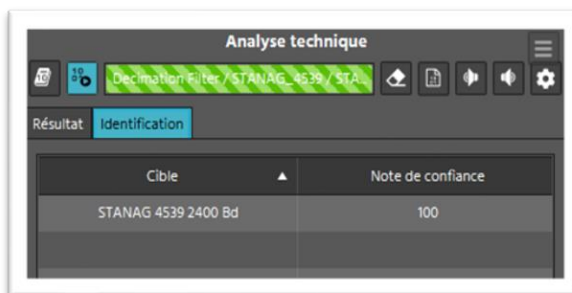


Figure 4-28 Vue sur l'analyse technique du STANAG 45539

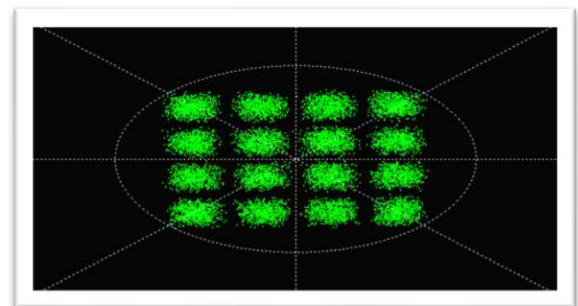


Figure 4-29 Constellation du STANAG 4539

Les tests ont montré que le signal modulé en QAM16 a été détecté avec une précision élevée avec une identification fiable du protocole STANAG 4539 avec une note de confiance de 100.

4.1.8 Conclusion du chapitre

Cible	Protocole	Recomodulation	Recocode
ARQ6 96 Bd 170 Hz	FAIT	OK	OK
ARQ6 200 Bd 400 Hz	FAIT	OK	OK
ARQ-E	FAIT	OK	OK
ARQ-M2-242	FAIT	OK	OK
ALF-RDS	NON FAIT	OK	OK
ALIS	FAIT	OK	OK
ALIS-2	FAIT	OK	OK
AX25 mode HF 600 Bd	FAIT	OK	OK
AX25 mode HF 300 Bd	FAIT	OK	OK
CIS 50-50	FAIT	OK	OK
CODAN 8580	FAIT	OK	OK
DUP ARQ	FAIT	OK	OK
MIL 188-110A	NON FAIT	OK	OK
MIL 188-141A	FAIT	OK	OK
PACTOR 1 100 Bd	FAIT	OK	OK
PACTOR III SL1	FAIT	OK	NOK
PACTOR III SL2	NON FAIT	OK	NOK
PSK-10	FAIT	OK	OK
PSK-125 BPSK	FAIT	OK	OK
PSK-125F	FAIT	OK	OK
PSK-220F	FAIT	OK	OK
PSK-250 QPSK	FAIT	OK	OK
PSK-31 QPSK	FAIT	OK	OK
PSK-31F	FAIT	OK	OK
PSK-63 QPSK	FAIT	OK	OK
PSK-63F	FAIT	OK	OK
RTTY5 50 Bd 450 Hz	FAIT	OK	OK
RTTY5 50 Bd 850 Hz	FAIT	OK	OK
RTTY5 75 Bd 850 Hz	FAIT	OK	OK
RTTY5 150 Bd 850 Hz	FAIT	OK	OK
SI-FEC mode 96 Bd	NON FAIT	OK	OK
STANAG 4415	FAIT	OK	OK
STANAG 4481 PSK	FAIT	OK	OK
STANAG 4529 1200 Bd	FAIT	OK	OK
STANAG 4538	FAIT	OK	OK
STANAG 4539 2400 Bd	FAIT	OK	OK

En résumé nous avons une bonne performance globale, avec une capacité élevée à traiter et reconnaître les divers protocoles de communication. Il y a quelques exceptions notables où la reconnaissance n'a pas été effectué correctement, notamment pour les protocoles PACTOR III SL1 et 2, nécessitant une attention supplémentaire. Tout comme les STANAG 4415, MIL 188-110A, CODAN 8580, ALIS-2 et ARQM où ces protocoles relèvent d'une certaine ambiguïté avec d'autres protocoles.

4.2 Ajout de nouvelles fonctionnalités pour les modulations

Ce chapitre se concentre sur les évolutions apportées aux fonctionnalités de l'outil de génération de signaux, en particulier les modulations CPM (Continuous Phase Modulation) et les chirps. L'objectif est de détailler les ajustements techniques réalisés.

4.2.1 Modulation CPM

4.2.1.1 Modification du paramètre de durée d'impulsion fréquentielle dans les CPM Rectangulaires

La première implémentation concerne la modulation CPM (Continuous Phase Modulation). Cette modulation se caractérise par une phase du signal qui évolue de manière continue, évitant ainsi les discontinuités de phase. En bande de base, elle est définie comme suit :

$$s(t) = Ae^{j2\pi h \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \alpha_i q(t-iT)}$$

Le paramètre h désigne l'indice de la modulation, α est la séquence de symboles transmise, et T est la période symbole. La fonction $q(t)$ est la réponse en phase obtenue à partir de l'impulsion en fréquence, $g(t)$ via cette relation :

$$q(t) = \int_{\tau=-\infty}^t g(\tau) d\tau \quad \int_{\tau=-\infty}^{+\infty} g(\tau) d\tau = \frac{1}{2}$$

$g(t)$ est appelé impulsion de mise en forme, celles qu'on va devoir utilisées sont illustrées ci-dessous:

Rectangulaire :
$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{2LT}, & 0 < t < LT \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Cosinus spectral surélevé :
$$g(x) = \begin{cases} \frac{\cos\left(\frac{2pBt}{T}\right)}{1-4\left(\frac{pBt}{T}\right)^2} * \frac{\sin\left(\frac{\pi Bt}{T}\right)}{\frac{\pi Bt}{T}}, & 0 < t < LT \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec $B = \frac{2}{L}$ et p le roll-off

La durée de l'impulsion est représentée par LT , où le paramètre L est un entier strictement positif correspondant à la longueur de l'impulsion en nombre de périodes symboles. Le premier changement que j'ai dû apporter a été de modifier le type de ce paramètre dans le code, permettant ainsi de lui attribuer des valeurs réelles. Cette modification permet d'obtenir de nouvelles propriétés spectrales souhaitables pour les CPM à impulsion rectangulaire.

La vérification a été effectuée en observant la phase instantanée d'un signal modulé en CPM rectangulaire avec une valeur de L à 0.5. Sur l'analyseur de signaux, on constate qu'un signal émis à 2400 bauds présente une phase monotone correspondant à un symbole d'une durée de 208 μ s. Cela est cohérent en comparant avec la durée d'un symbole pour L à 1, qui est de 416 μ s (2400 bauds / 1000 ms). En prenant le paramètre L à 0,5, on divise ce temps par 2.

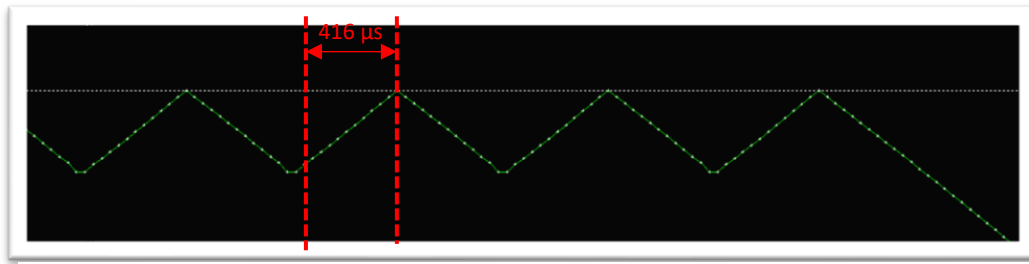


Figure 4-30 Phase instantanée d'un signal modulée par CPM avec L à 1

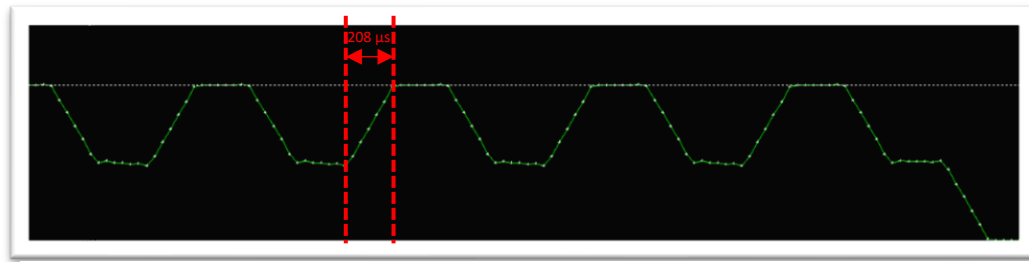


Figure 4-31 Phase instantané d'un signal modulé par CPM avec L à 0,5

4.2.1.2 Modulation SBPSK

La variation du paramètre L avec des valeurs réelles permet de modéliser des modulations spécifiques telles que **JCS SBPSK** et **D&H SBPSK**, Pour ce faire, nous nous baserons sur les méthodes décrites dans l'article "*Shaped BSPK and the 5kHz UHF SATCOM Channels [7]*". Ces modulations se distinguent par leur impulsion de mise en forme, illustrée ci-dessous. Dans l'exécutable, pour réaliser une modulation CPM avec une impulsion rectangulaire, l'impulsion est définie par :

$$g(t) = \frac{1}{2LT} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{LT}{2}}{LT}\right)$$

En ajustant le paramètre L , il est possible d'obtenir les caractéristiques de modulation souhaitées pour ces deux cas particuliers.

$$\begin{array}{ccc}
 & g(t) = \frac{1}{2LT} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{LT}{2}}{LT}\right) & \\
 \swarrow \text{JCS SBPSK} & & \searrow \text{H\&D SBPSK} \\
 \text{Pour } L = 0.5 & & \text{Pour } L < 1 \\
 g(t) = \frac{1}{T} \text{rect}\left(\frac{t - T/4}{T/2}\right) & & g(t) = \frac{1}{2\lambda T} \text{rect}\left(\frac{t - \lambda T/2}{\lambda T}\right)
 \end{array}$$

Pour les modulations JCS SBPSK, l'article indique que la densité spectrale du signal présente des raies espacées par le débit de symboles (ici 2400 Hz). Cette observation est également confirmée par l'analyse de la densité spectrale de puissance d'un signal généré dans des conditions similaires à celles décrites dans l'article. De plus, on note une correspondance dans le nombre de lobes secondaires observés.

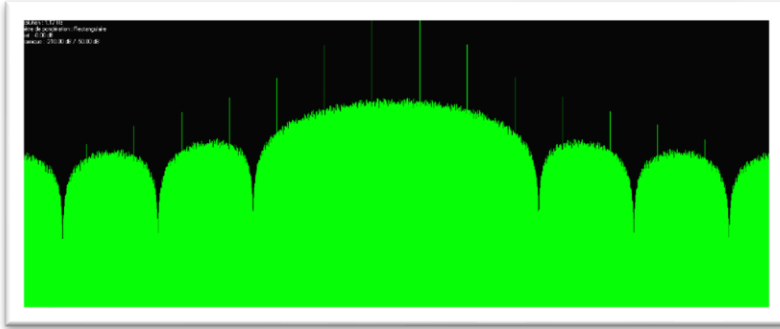


Figure 4-32 DSP d'un signal modulé en JCS SBPSK

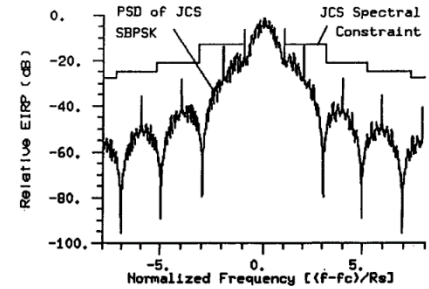


Figure 4-33 DSP d'un signal modulé de en JCS SBPSK de l'article

En utilisant le paramètre L à 0,25, on obtient une modulation correspondant à la D&H SBPSK, qui se caractérise par la suppression des raies dans le spectre. Cependant, sur le signal généré, les raies restent toujours visibles et les lobes secondaires doivent être beaucoup plus faibles en amplitude. Cela suggère que les paramètres doivent être ajustés ou plus probablement qu'il y a une mauvaise conception du filtre.

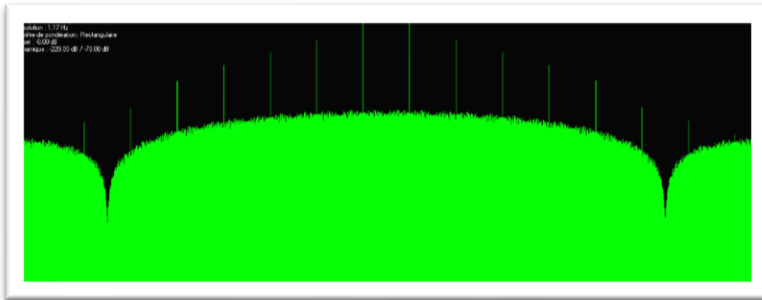


Figure 4-34 DSP d'un signal modulé en D&H SBPSK avec $L = 0.25$

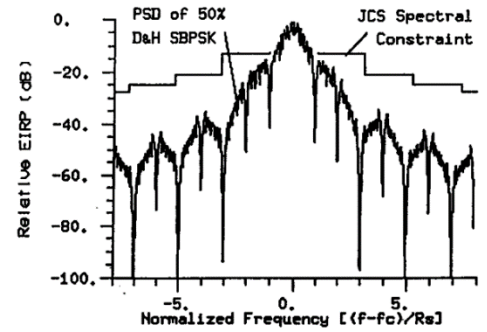


Figure 4-35 DSP d'un signal modulé de en D&H SBPSK avec $L=0.25$ (= 50 % de la periode symbole) de l'article

4.2.1.3 Pondérer $g(t)$ dans le cas des CPM SRC

L'objectif ici est de pondérer l'impulsion de mise en forme d'un cosinus spectral surélevé (SRC). Cela permet de tronquer la réponse impulsionnelle tout en lui donnant un support fini (une impulsion SRC est à énergie infini). La relation est donnée par :

$$g(t) = n(t) \cdot w(t)$$

Où $w(t)$ est notre fenêtre de pondération :

$$w(t) = \begin{cases} A & \text{si } \left| \frac{t}{T} \right| \leq T_1 \\ \frac{A}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{T_2} \left(\left| \frac{t}{T} \right| - T_1 \right) \right] \right\} & \text{si } T_1 \leq \left| \frac{t}{T} \right| \leq T_2 \\ 0 & \text{si } \left| \frac{t}{T} \right| \geq T_1 + T_2 \end{cases} \quad n(t) = \begin{cases} \frac{\cos\left(\frac{2pBt}{T}\right)}{1 - 4\left(\frac{pBt}{T}\right)^2} * \frac{\sin\left(\frac{\pi Bt}{T}\right)}{\frac{\pi Bt}{T}}, & 0 < t < LT = 2(T_1 + T_2) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

T1 et T2 définissent la longueur de la fenêtre $w(t)$, où T1 représente la largeur de la fenêtre et T2 le temps de montée et de descente de la fenêtre (voir graphique au-dessous). Pour les exemples et les cas générés, j'ai choisi une valeur de A (amplitude de la fenêtre) à 0,68, comme indiqué dans le document visuel qui m'a été fourni (voir graphique au-dessous). Cette valeur permet de satisfaire la condition $\int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) d\tau = \frac{1}{2}$.

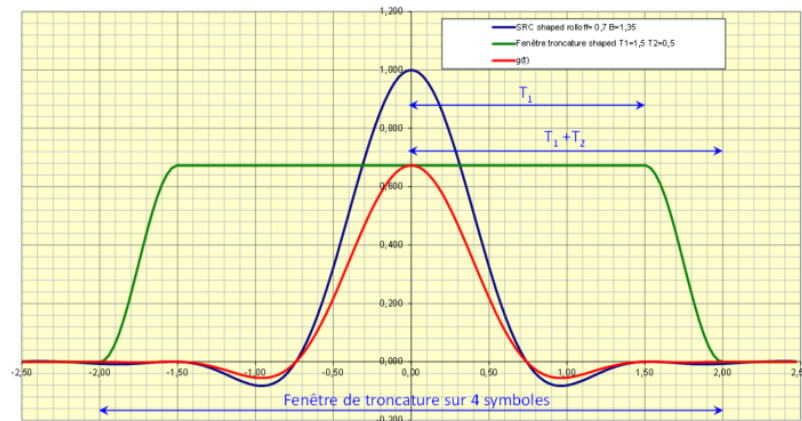


Figure 4-36 Comparaison de la Réponses en Fréquence tronqué et non tronque par la fenêtre de troncature

Voici la relation qui lie LT à T1 et T2 : $LT = 2(T1 + T2)$

4.2.1.4 Scénarios ajoutés

Les résultats suivants sont les scenarios ajoutés au logiciel de génération de signaux. Une fois que vous avez sélectionné la fenêtre LSRC, vous avez la possibilité d'appliquer la fenêtre $w(t)$. Si vous choisissez de le faire, vous devez définir les valeurs de T1 et T2 selon vos besoins spécifiques. Cette flexibilité vous permet d'ajuster précisément les caractéristiques de T1 et T2, qui n'étaient pas convenues au départ. J'aurai dû définir la durée de la fenêtre de pondération $w(t)$ avec le paramètre T1 en fonction de LT.

```

Nombre d'indices de modulation: [1] ?
indice numero 1 : [1.000000] ?
1 >> LREC (rectangulaire)
2 >> LRC (raised cosinus)
3 >> LSRC (spectral raised cosinus)
4 >> TFM (Tamed FM)
5 >> GMSK (gaussian shaped MSK)
type d'impulsion desiree [1] ? 3
longueur de la reponse (entier L) [1.379000] ?
longueur du support (entier) [4.000000] ?
Beta [1.000000] ?
Ponderer le filtre de mise en forme (o/n) [o] ? o
longueur de la fenetre de ponderation haute [2.800000] ?
longueur de la fenetre de ponderation basse [1.200000] ?

```

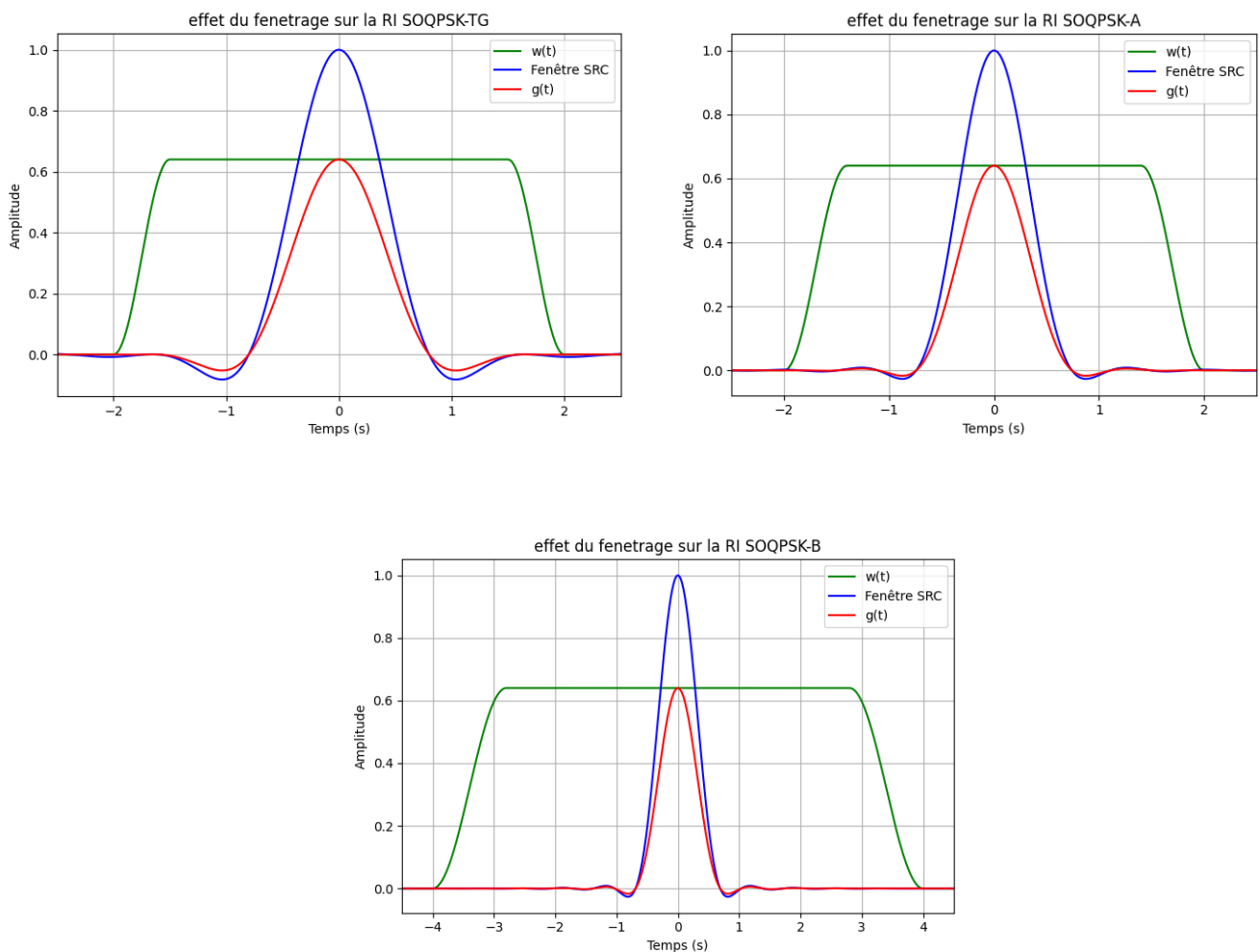
Figure 4-37 Ajustement des paramètres T1 et T2 pour la fenêtre de pondération

4.2.1.5 Modulation SOQPSK

Cet ajout de fenêtre nous permet de générer des SOQPSK-TG, SOQPSK-A et SOQPSK-B. Afin d'évaluer la fiabilité du code, nous allons produire des versions de ces modulations. Cela se joue sur des modifications mineures de la réponse impulsionnelle, notamment la durée totale de l'impulsion après application de la fenêtre en cosinus surélevé, avec $2(T_1 + T_2)$ qui est de huit périodes symboles pour SOQPSK-B et de quatre périodes symbole pour SOQPSK-A et SOQPSK-TG.

Paramètre	SOQPSK-TG	SOQPSK-A	SOQPSK-B
ρ	0.7	1	1
B	1,25	1,35	1,45
L	1,16	1,481	1,379
T1	1,5	1,4	2,8
T2	0,5	0,6	1,2

J'ai conçu quelques vues pour visualiser l'effet de la fenêtre de pondération sur la réponse fréquentielle d'un signal. L'objectif est de montrer comment différentes fenêtres de pondération influencent les caractéristiques fréquentielles d'un signal. Ici la période vaut 1 seconde.



L'effet de la modulation SOQPSK vise principalement à réduire les lobes secondaires du signal. Cependant, comme le montre la figure ci-dessous, l'ajout de cette fenêtre de pondération agit sur le signal, mais n'a pas complètement atteint son objectif de réduire les lobes secondaires. À droite de la figure, la fenêtre de pondération est appliquée dans le cas d'un SOQPSK-TG.

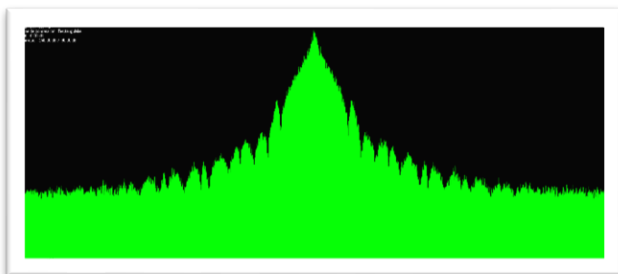


Figure 4-38 Densité spectral de puissance CPM, fenêtre SRC

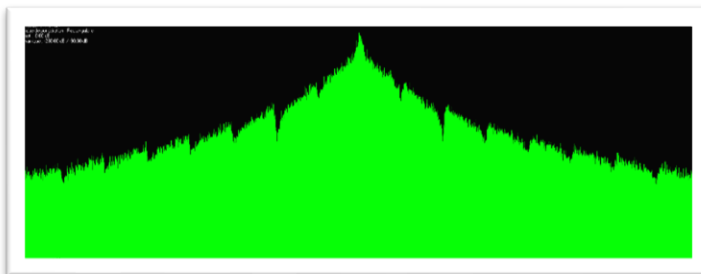


Figure 4-39 Densité spectral de puissance SOQPSK-TG

Pour la SOQPSK-A et la SOQPSK-B, la différence réside principalement dans la largeur de bande, qui se joue à quelques hertz près. La largeur de bande de la SOQPSK-A est légèrement plus petite, avec 6,75 kHz, tandis que celle de la SOQPSK-B est de 7 kHz.

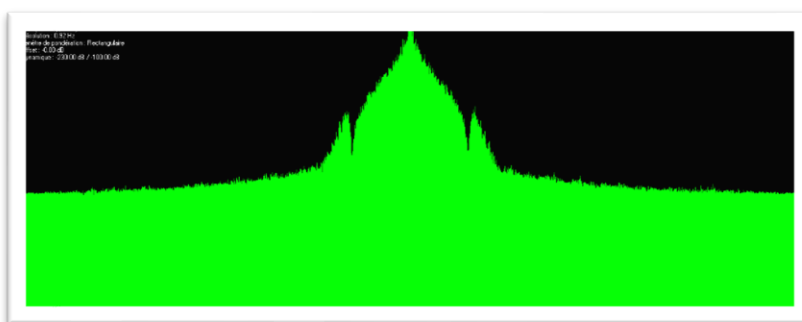


Figure 4-40 Densité spectral de puissance SOQPSK-A

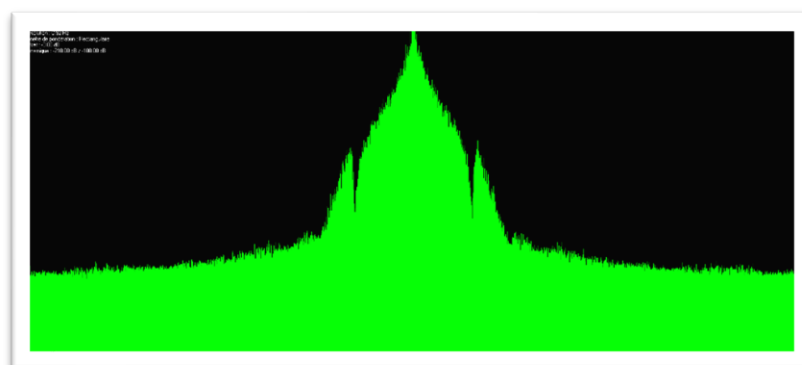


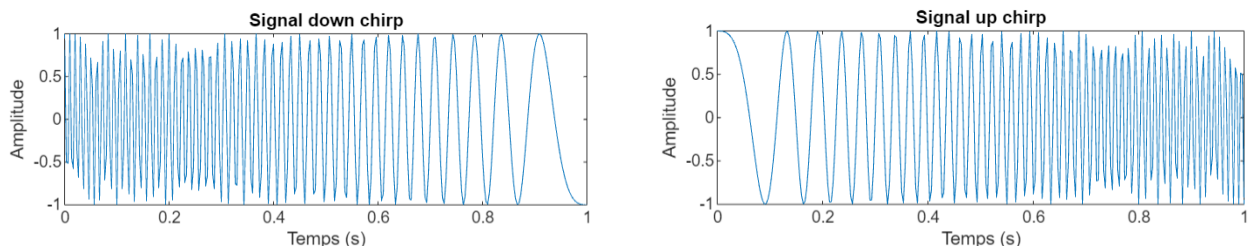
Figure 4-41 Densité spectral de puissance SOQPSK-B

En dépit des efforts déployés pour optimiser les modulations SOQPSK, les résultats obtenus ne répondent pas entièrement aux attentes. Bien que certaines améliorations aient été observées, les performances globales restent en dessous des objectifs fixés, suggérant que des ajustements supplémentaires ou l'exploration d'alternatives pourraient être nécessaires pour atteindre les résultats souhaités.

4.2.2 Modulation Chirp

Le signal chirp est un signal dont la fréquence varie de manière continue, que ce soit de façon linéaire ou non, au cours du temps. Le signal peut présenter deux types de variation : une augmentation progressive de basse à haute fréquence, connue sous le nom de up-chirp, ou une diminution de haute à basse fréquence, appelée down-chirp.

La forme et les caractéristiques de ces rampes sont directement liées au symbole d'entrée. Dans le cadre de notre étude, nous utilisons les signaux chirp pour moduler les données binaires. Nous représentons les symboles '1' par des chirps montants linéaire (upchirp) et les symboles '0' par des chirps descendants linéaire (downchirp).



Le logiciel permettait déjà de générer des signaux chirp, mais ne supportait pas encore l'association de ces signaux avec des fichiers de symboles. L'objectif initial a donc été d'associer chaque symbole à un type spécifique de chirp, afin de réaliser une modulation à deux états.

4.2.2.1 Première Solution : Utilisation de t pour gérer le temps

4.2.2.1.1 Principe :

Dans la première solution, nous utilisons une variable temporelle t pour suivre l'évolution du temps à travers les échantillons du signal. À chaque itération de la boucle qui parcourt les échantillons, la valeur de t est incrémentée par T_e , qui représente l'intervalle de temps entre deux échantillons. Lorsque t atteint la durée totale d'une rampe ($DureeRampe$), cela signifie que nous avons terminé un symbole. À ce moment, t est réinitialisé, et une nouvelle pente est sélectionnée pour moduler le symbole suivant.

4.2.2.1.2 Fonctionnement :

Initialisation : À chaque nouveau symbole (quand $t \geq DureeRampe$), on réinitialise t et choisit la pente (montante ou descendante) en fonction du symbole à moduler.

Évolution du signal : Le signal est calculé à chaque itération en fonction de la pente actuelle. t est ensuite mis à jour pour l'échantillon suivant.

4.2.2.1.3 Génération :

Les paramètres utilisés pour la génération du signal suivant comprend **une durée de 10 secondes**, une **durée de symbole de 1 seconde**, et une **excursion en fréquence de la rampe de 5 kHz**.

On observe sur la vue I que pour chaque intervalle de temps symbole, un chirp complet n'est pas atteint, le signal est interrompu après quelques millisecondes, ce qui donne un signal discontinu. Bien que la réinitialisation d'un symbole se produise après chaque période symbole et que nous obtenions ainsi 10 symboles en 10 secondes, les paramètres nécessaires à la génération d'un chirp sont réinitialisés après un certain temps.

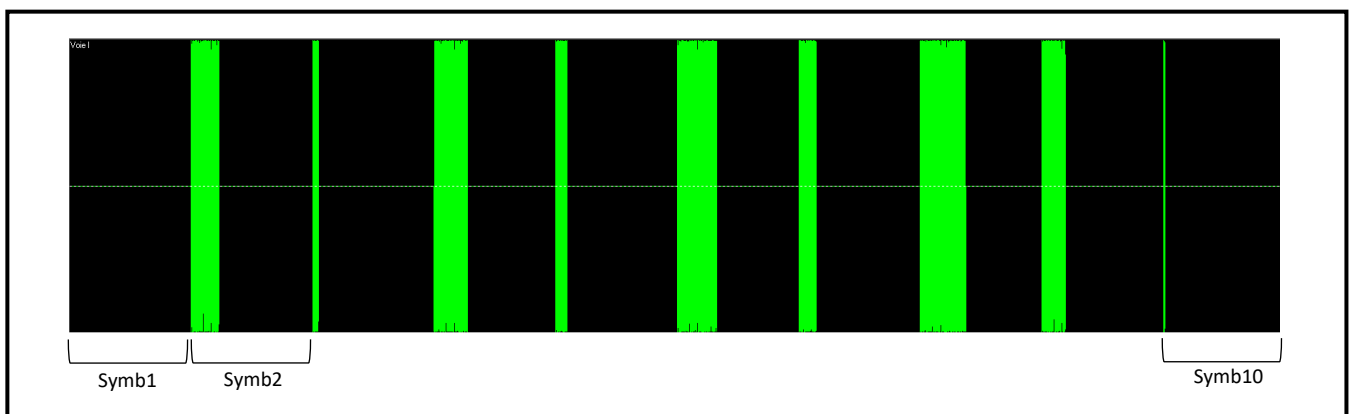


Figure 4-42 Vue de la voie I

En examinant la vue de la fréquence instantanée, on observe que les symboles sont également inversés. Les cinq premiers symboles générés et pouvant être décodés sont 10101, alors que le fichier de symboles associé contient 01010. Par ailleurs, les zones à forte amplitude visibles sur l'image représentent les fréquences instantanées d'un bruit, indiquant des variations rapides et imprévisibles dans le signal. À l'inverse, les zones linéaires très courtes correspondent à nos chirps. Le tracé rouge ci-dessous représente le résultat attendu.

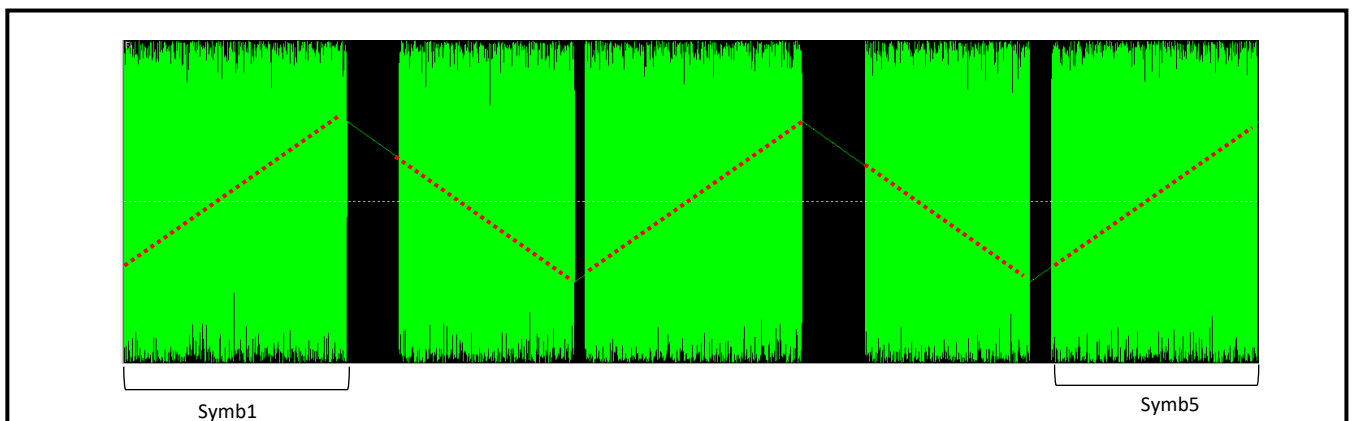


Figure 4-43 Fréquence instantanée sur une période de 5 secondes

Ce problème est en partie lié à la variable « t ». J'ai remarqué que lorsque la fréquence d'échantillonnage diminuait, la durée des symboles augmentait. Par conséquent, j'ai décidé de supprimer cette variable pour la génération des chirps.

4.2.2.2 Remplacement de t par l'indice n

4.2.2.2.1 Principe :

Dans la seconde solution, nous remplaçons l'utilisation de la variable temporelle t par l'indice de la boucle n , qui représente directement le numéro de l'échantillon du signal. Ici, l'idée est que la position temporelle relative dans la rampe peut être calculée directement à partir de n sans avoir besoin d'une variable supplémentaire.

4.2.2.2.2 Fonctionnement :

Calcul de la position dans la rampe : On utilise $\text{Index} = n \% \text{NombreEchantillonsParRampe}$ pour calculer la position dans la rampe. Lorsque Index est égal à 0, cela indique le début d'une nouvelle rampe, et on choisit la pente en fonction du nouveau symbole tiré.

4.2.2.2.3 Génération :

Les paramètres utilisés pour la génération du signal sont les mêmes que ceux de la solution précédente, excepté que la durée du signal dure 5 secondes au lieu de 10.

On constate qu'au lieu de générer les 5 symboles prévus pour une période symbolique de 1 seconde chacun, nous en avons produit 25, soit cinq fois plus que prévu, avec chaque symbole ayant une durée de 200 ms. La rampe, qui devait couvrir une largeur de bande de 5 kHz, n'en parcourt en réalité que 1 kHz. Bien que la largeur de bande soit correcte à 5 kHz, un saut de fréquence de 3 kHz ($5 \text{ kHz} - 1 \text{ kHz} - 1 \text{ kHz}$) se produit en raison de l'interruption du chirp à 1 kHz. Ce phénomène est illustré dans les graphiques temps-fréquence et fréquence instantanée ci-dessous.

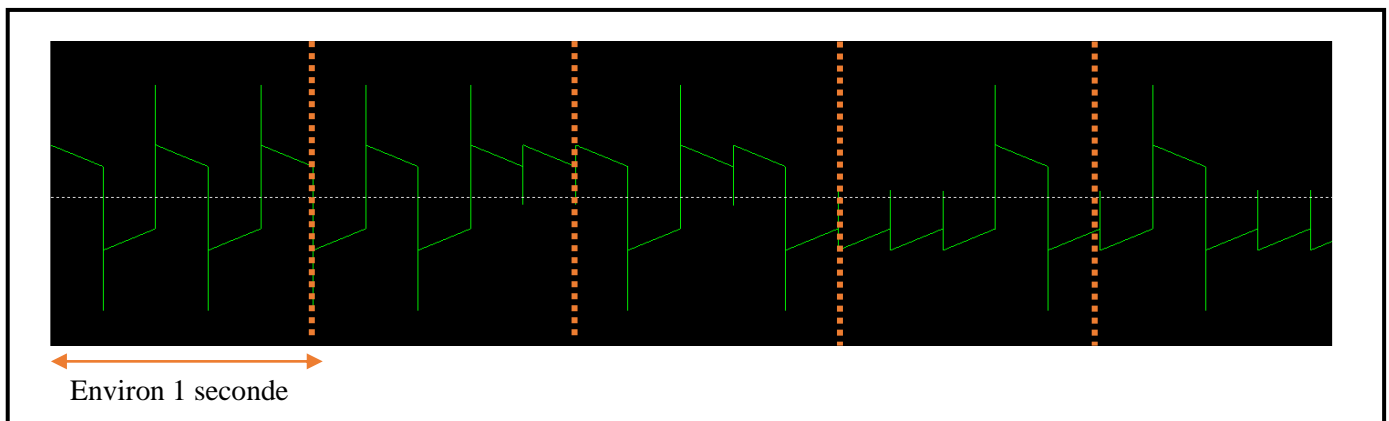


Figure 4-44 Fréquence instantanée montrant l'anomalie de génération de symboles

La figure ci-dessous illustre la différence entre l'excursion en fréquence théorique (5 kHz) et l'excursion observée (1 kHz). Ce décalage résulte de l'interruption prématurée du signal, visible dans la représentation temps-fréquence.

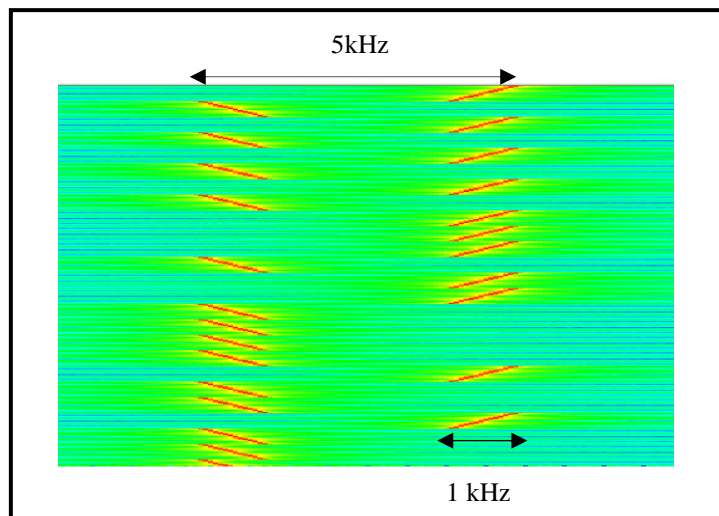


Figure 4-45 Vue temps-fréquence montrant l'excursion en fréquence observée

Lors de l'analyse de plusieurs générations de signal, on observe que le nombre de symboles était multiplié par cinq, ce qui entraînait une réduction correspondante de l'excursion en fréquence. Cette observation indique que le rapport de 5 entre le nombre de symboles et l'excursion en fréquence est souvent récurrent. En approfondissant, j'ai découvert que je ne tenais pas compte d'un paramètre crucial lors de la génération du signal : la taille du buffer.

Le buffer joue un rôle essentiel en tant que zone de stockage temporaire pour les échantillons de signal, permettant un traitement par blocs. Initialement, la taille du buffer était insuffisante, ce qui limitait la capacité de traitement du signal. Pour résoudre ce problème, j'ai donc augmenté la taille du buffer par défaut en la multipliant par 5, passant ainsi de 4096 à 20480 échantillons. Il est important de noter que ce choix n'est pas rigoureusement optimisé, car je ne dispose pas d'une méthode précise pour déterminer la taille optimale du buffer. Cette augmentation est donc une solution pragmatique.

Les résultats obtenus après ce changement montrent une amélioration notable dans la génération des signaux. Avec la nouvelle taille de buffer, nous avons observé les effets suivants :

Correction du Nombre de Symboles : Le nombre de symboles générés est maintenant exactement ce qu'on attendait, sans excès ni manque. Le rapport entre le nombre de symboles et l'excursion en fréquence est stable, et le problème de multiplication par cinq a été résolu.

Amélioration de l'Excursion en Fréquence : L'excursion en fréquence correspond désormais aux spécifications requises. La largeur de bande est correctement maintenue à 5 kHz, sans les sauts de fréquence que nous observions auparavant.

Stabilité du Signal : Le signal est beaucoup plus stable et conforme aux paramètres de génération. Les discontinuités entre les symboles, qui étaient un problème, ont été réduites, ce qui permet une représentation plus précise des signaux chirp.

Les images ci-dessous illustrent les résultats obtenus après les ajustements apportés. Contrairement aux résultats précédents où l'excursion en fréquence était réduite et le nombre de symboles incorrect, ces nouvelles simulations montrent un comportement conforme aux spécifications initiales. Avec les vues fréquentielles on voit que le signal chirp couvre désormais correctement toute la plage de fréquence prévue, de 0 Hz à 5 kHz, sans les interruptions observées précédemment.

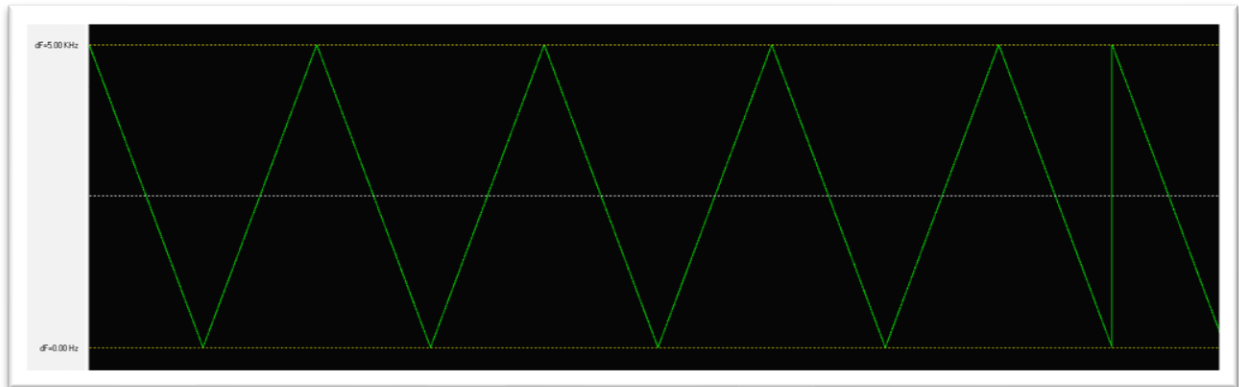


Figure 4-46 Fréquence instantané du signal chirp

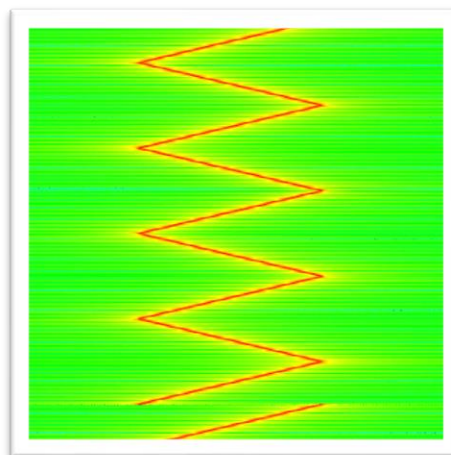


Figure 4-47 Vue temps/fréquence du signal chirp

Pour conclure cette deuxième partie de stage, concernant la modulation CPM, la majorité des objectifs fixés ont été atteints, avec une implémentation réussie des algorithmes et des paramètres requis pour garantir une transmission continue et efficace. Cependant, en ce qui concerne la modulation chirp, il reste encore quelques étapes à finaliser. Notamment, l'intégration de temps silence entre chaque symbole pour assurer une séparation claire et éviter toute interférence. De plus, il était convenu de développer des chirps adaptés à une modulation 4 états.

5 Conclusions

5.1 Conclusion générale

Au terme de mon stage chez Thales, j'ai eu l'opportunité de travailler sur plusieurs projets complets, touchant en particulier deux aspects du métier d'ingénieur en télécommunication avec une dominance en développement informatique et un côté de description et d'analyse signal.

Pendant la première phase de mon stage, j'ai travaillé sur l'extension des signaux et sur la génération permettant l'identification des systèmes de communication utilisés. Cette expérience m'a permis de développer des compétences en langage Python.

Le tableau récapitulatif des résultats obtenus montre qu'un grand nombre de signaux a été généré, ce qui pourra être pleinement exploité pour l'entraînement de l'intelligence artificielle (IA). Cet aspect de mon travail a mis en lumière l'importance de disposer d'une base de données de signaux diversifiés et bien caractérisés pour améliorer la performance des systèmes d'identification automatique.

Concernant la deuxième phase, elle a été particulièrement enrichissante car elle m'a permis de mettre en pratique des concepts théoriques de traitement du signal et de télécommunications tout en renforçant mes compétences en programmation en C. J'ai pu développer et affiner des solutions pour la modulation CPM et chirp, ce qui m'a offert une meilleure compréhension des défis techniques liés à ces technologies. Cette expérience m'a non seulement permis d'acquérir de nouvelles compétences, mais aussi de participer activement à la résolution de problématiques concrètes, me préparant ainsi à des responsabilités futures dans le domaine des télécommunications.

5.2 Bilan personnel

Ce stage a été un véritable enrichissement de ma formation d'ingénieur. Il m'a permis de confronter les connaissances et les méthodes de travail acquises durant mes études aux réalités concrètes du milieu professionnel. J'ai également pris conscience de certaines de mes faiblesses, notamment en matière de communication, un aspect essentiel dans le développement logiciel. J'ai réalisé que mon autonomie, bien que précieuse, limitait parfois mes compétences relationnelles. Pour y remédier, j'ai cherché à m'améliorer lors des différentes réunions en étant plus attentif et en affinant ma capacité d'écoute, afin de mieux comprendre et répondre aux besoins des parties prenantes des projets.

6 Bibliographie

- [1] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. (2014). Manual of Transmission Methods
- [2] WAVECOM Decoder Online Help 12.0.0,
<https://www.wavecom.ch/content/ext/DecoderOnlineHelp/>
- [3] Sigidwiki.com
- [4] Department of defense interface (MIL-STD-188-181A). (1997)
- [4] Department of defense interface. (2001). *Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio equipment*
- [5] Military standard. (1991). *Interoperability and performance standards for data modems (MIL-STD-188-110)*
- [6] Bradley A. Clark. (2004). *STANAG 4529 Conformance test procedures*
- [7] Michael E, F., & Michael W, M. (1999). *Shaped BPSK and the 5 kHz UHF SATCOM channels*
- [8] Terrance J. Hill. (1989). *A non-proprietary, constant envelope, variant of shaped offset QPSK (SOQPSK) for improved spectral containment and detection efficiency*

7 Annexes

ANNEXE 1 : Abstract

The rapid and precise detection of communication signals is crucial in the defense field, where quick identification can significantly improve the responsiveness of critical systems. This urgent need has led to the completion of this internship, aimed at enriching a library of signals capable of being generated computationally. The main objective is to model waveforms for various communication systems using specific technical parameters to allow their identifications. Once defined and generated in large quantities, these signals will be used to train an artificial intelligence (AI) model to detect the communication system used.

The methodology involved generating waveforms with the appropriate modulations for each type of transmission, followed by the precise definition of communication system identification protocols to obtain detailed signals. The relevance of the generated signals was carefully analyzed. The second phase of the project consisted of developing new features related to continuous phase modulations (CPM) and chirp signal in the software allowing signal generation.

The results show that the signal generation tool is effective for producing waveforms useful for training AI models, but it requires adjustments for some integrated features. The addition of modifications to the CPM modulations and Chirps represents a notable progress, but further improvements are needed to achieve full functionality.

ANNEXE 2 : Impacte écologique et social

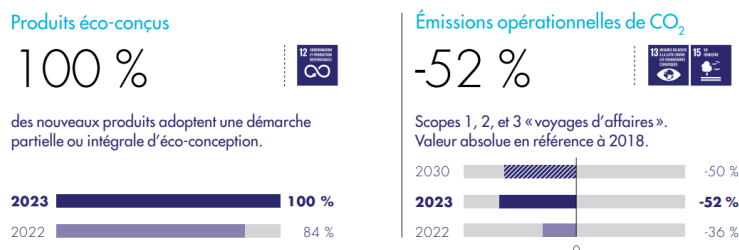
Votre entreprise ou structure d'accueil possède-t-elle un service Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) ou équivalent et si oui quels sont ses principaux objectifs affichés ?

En 2023, Thales a fait preuve d'un engagement RSE significatif. Ces objectifs couvrent quatre piliers principaux : la décarbonation, la diversité et l'inclusion, l'éthique et l'intégrité, ainsi que la santé et la sécurité au travail. Désormais placée au cœur de la stratégie du Groupe, la RSE se positionne comme l'un des leviers de performance pour les années à venir. L'année 2023 a été marquée par une reconnaissance accrue de la politique RSE de Thales par ses parties prenantes. Le Groupe a obtenu le niveau « Platine » (entreprises parmi les 1 % les plus performantes en matière de RSE) par EcoVadis³.

En 2023, Thales a ainsi atteint, voire dépassé, l'ensemble des objectifs de durabilité fixés. Le Groupe a également établi une nouvelle feuille de route RSE ayant un impact sur la société, la planète et les collaborateurs pour la période 2024-2030. Thales rehausse ainsi ses ambitions en matière de contribution sociétale et environnementale et entend devenir le leader du développement durable sur ses marchés à horizon 2030.

Votre entreprise ou structure d'accueil intègre-t-elle une démarche de soutenabilité écologique et si oui quelles actions concrètes a-t-elle mis en œuvre ?

En ce qui concerne le climat Thales est reconnu pour sa stratégie bas carbone. L'organisme indépendant Science Based Targets initiative (SBTi) a validé les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre de Thales à horizon 2030, attestant de leur compatibilité avec l'Accord de Paris. Thales a ainsi intégré l'indice CAC SBT 1.5 en octobre 2023 rejoignant ainsi les entreprises cotées les plus performantes en matière climatique. CDP (anciennement Carbon Disclosure Project) a également attribué la note « A » au Groupe, pour sa transparence et ses bonnes pratiques en matière de lutte contre le changement climatique en 2023. En effet avec une baisse de 52 % des émissions opérationnelles de CO₂ et une diminution de 13,6% de la consommation d'énergie entre 2018 et 2023, Thales a démontré son engagement et son efficacité dans la mise en œuvre de stratégies durables et respectueuses de l'environnement.



³ EcoVadis propose des évaluations RSE universelles, des produits d'intelligence RSE et des webinaires pour aider les entreprises à gérer la RSE

Votre entreprise ou structure d'accueil intègre-t-elle une politique sociale et si oui quelles actions concrètes a-t-elle mis en œuvre ?

Oui, Thales intègre une politique sociale dynamique et engageante, avec plusieurs actions concrètes mises en œuvre. En 2023, Thales a collaboré avec plus de 50 partenaires de l'économie sociale et solidaire pour promouvoir une société durable et inclusive. Aligné sur les nouvelles orientations stratégiques du Groupe, Thales Solidarity a désormais pour mission de stimuler l'intérêt du plus grand nombre aux sciences et technologies, en particulier parmi les jeunes générations. Notamment un environnement de travail sûr et sain.

Thales a mis en place plusieurs actions concrètes pour renforcer l'engagement et l'inclusion au sein de ses équipes. D'abord, le groupe a développé une démarche de **Smart Working**, qui a pour but d'améliorer la compétitivité et la performance collective tout en offrant plus de flexibilité quant au moment, au lieu, et à la manière de travailler. Cette approche vise également à équilibrer la vie professionnelle et la vie privée des collaborateurs, contribuant ainsi à un environnement de travail plus adapté aux besoins individuels.

En parallèle, Thales s'investit activement pour **soutenir la mixité femmes-hommes**. Le groupe aspire à augmenter la représentation des femmes dans les postes de responsabilité, avec un objectif d'atteindre 22,5 % de femmes à ces niveaux d'ici fin 2026. De plus, il prévoit que 75 % des Comités de direction comptent au moins 4 femmes d'ici fin 2026. Pour soutenir cette ambition, Thales a lancé en 2023 le programme WomenInspiringWomen, qui aide les générations actuelles et futures à s'engager dans les domaines des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques (STIM).

Annexe 4 : diagramme de GANTT

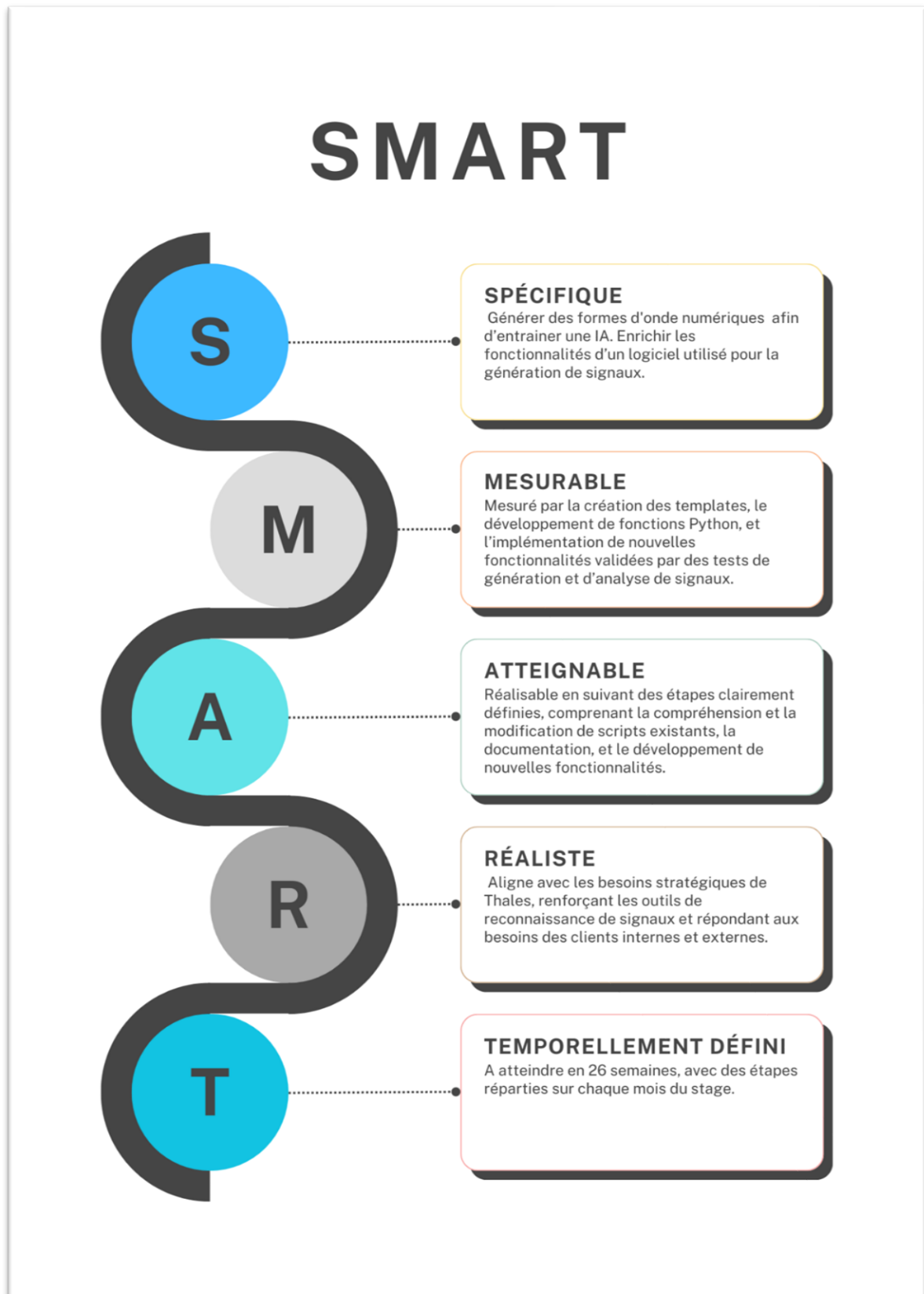
Nom du projet	Directeur de projet	Date démarrage	Date finale
Génération d'ondes	DEQUE Clément	19 /02/2024	16/08/2024

TACHES	%	En charge de	SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4	SEM 5	SEM 6	SEM 7	SEM 8	SEM 9	SEM 10	SEM 11	SEM 12	SEM 13	SEM 14	SEM 15
Conception et Lancement	100%	Installation de mon environnement de travail. Documentation sur le sujet de stage. Assimiler et réarranger du code															
Générations des modulations	100%	Réaliser seulement les modulations des différents protocoles en créant leurs templates associés															
Documentation sur les caractéristiques des protocoles puis les implémenter	92%	Implémenter les différentes caractéristiques des méthodes de transmission (Python)															
Lancement du deuxième projet	100%	Paramétrer mon environnement de travail et comprendre le code															

TACHES	% REALISE	En charge de	SEM 13	SEM 14	SEM 15	SEM 16	SEM 17	SEM 18	SEM 19	SEM 20	SEM 21	SEM 22	SEM 23	SEM 24	SE M 25	SE M 26
CPM rectangulaire	100%	Modification du paramètre L, permettant de définir des durées d'impulsion réelles pour les CPM rectangulaires														
CPM raised cosinus	80%	Pondérer l'impulsion de mise en forme d'un cosinus spectral surélevé (SRC)														
Chirp	33%	Associer chaque symbole à un type spécifique de chirp pour réaliser une modulation à deux états. Intégrer des temps de silence entre chaque symbole Développer des chirps adaptés à une modulation à quatre états														

 : Durée prévue

 : Durée dépassée



Annexe 5 : Acronymes

IA - Intelligence Artificielle

ACK – Acknowledgement

AM - Amplitude Modulation

ARQ - Automatic Repeat Request (ou Automatic Repetition Request)

CPM - Continuous Phase Modulation (Modulation à Phase Continue)

DSP – Densité Spectral de Puissance

FEC - Forward Error Correction

FM - Frequency Modulation

FSK - Frequency Shift Keying

FSK8 - Frequency Shift Keying à 8 niveaux

HF - High Frequency

ITA2 - International Telegraph Alphabet No. 2

NAK - Negative Acknowledgement

OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

PSK - Phase Shift Keying

QAM - Quadrature Amplitude Modulation

RSB - Rapport Signal sur Bruit (en anglais SNR - Signal-to-Noise Ratio)

SBPSK - Shaped Binary Phase Shift Keying

SOQPSK : Shaped Offset Quadrature Phase Shift Keying

SRC - Spectral Raised Cosine (Cosinus Spectral Élevé)

Annexe 6 : Table des figures

Figure 3-1 Performance et répartition géographique.....	6
Figure 3-2 Intercepteur tactique et radiogoniométrie.....	8
Figure 3-3 le système de protection électronique (brouilleur) Eclipse	8
Figure 3-4 LE SYSTÈME DE PROTECTION ÉLECTRONIQUE (BROUILLEUR) ECLIPSE DE THALES	8
Figure 3-5 INTERCETEUR TACTIQUE.....	8
Figure 4-1 Exemple d'un fichier de configuration GNT	11
Figure 4-2 Chaîne de transmission	11
Figure 4-3 Vu sur l'interface du générateur de signaux.....	11
Figure 5-1 Visualisation NAK-based ARQ	15
Figure 5-2 Visualisation Stop-and-wait ARQ	15
Figure 5-3 Densité spectrale de puissance ARQ 6-70.....	16
Figure 5-4 Vu temps/fréquence ARQ 6-70.....	16
Figure 5-5 Vue sur l'analyse technique	17
Figure 5-6 Vue sur le texte décodé	17
Figure 5-7 Procédure d'appel ALIS	18
Figure 5-8 Densité spectral de puissance ALIS	20
Figure 5-9 Densité spectrale de puissance ALIS 2	20
Figure 5-10 Vue temps/fréquence ALIS	20
Figure 5-11 Vue temps/fréquence ALIS 2	20
Figure 5-12 Vue sur l'analyse technique ALIS.....	21
Figure 5-13 Vue sur l'analyse technique ALIS 2.....	21
Figure 5-14 Vue sur le texte décodé	22
Figure 5-15 Vue sur l'analyse technique PSK 10.....	22
Figure 5-16 Vue sur l'analyse technique PSK 125F.....	23
Figure 5-17 Vue sur l'analyse technique PSK 125	23
Figure 5-18 identification RTTY5 50 Bd 450 Hz	24
Figure 5-19 identification RTTY5 50 Bd 850 Hz :	24
Figure 5-20 identification RTTY5 75 Bd 850 Hz	24
Figure 5-21 identification RTTY5 150 Bd 850Hz.....	24
Figure 5-22 Structure d'une trame STANAG 4415	25
Figure 5-23 Vue analyse technique du STANAG 4415.....	26
Figure 5-24 Constellation STANAG 4415	26
Figure 5-25 Structure d'une trame STANAG 4481	26
Figure 5-26 Vue sur l'analyse technique du STANAG 4481	26
Figure 5-27 Vue sur l'analyse technique du STANAG 4538.....	27
Figure 5-28 Vue sur l'analyse technique du STANAG 45539.....	28
Figure 5-29 Constellation du STANAG 4539.....	28
Figure 5-30 Phase instantanée d'un signal modulée par CPM avec L à 1	31
Figure 5-31 Phase instantané d'un signal modulé par CPM avec L à 0,5	31
Figure 5-32 DSP d'un signal modulé en JCS SBPSK	32
Figure 5-33 DSP d'un signal modulé de en JCS SBPSK de l'article	32
Figure 5-34 DSP d'un signal modulé en D&H SBPSK avec L = 0.25	32
Figure 5-35 DSP d'un signal modulé de en D&H SBPSK avec L=0.25 (= 50 % de la période symbole) de l'article	32
Figure 5-36 Comparaison de la Réponses en Fréquence tronqué et non tronque par la fenêtre de troncature .	33
Figure 5-37 Ajustement des paramètres T1 et T2 pour la fenêtre de pondération.....	33
Figure 5-38 Densité spectral de puissance CPM, fenêtre SRC	35
Figure 5-39 Densité spectral de puissance SOQPSK-TG	35
Figure 5-40 Densité spectral de puissance SOQPSK-A	35
Figure 5-41 Densité spectral de puissance SOQPSK-B	35
Figure 5-42 Vue de la voie I.....	37
Figure 5-43 Fréquence instantané sur une période de 5 secondes	37
Figure 5-44 Fréquence instantanée montrant l'anomalie de génération de symboles	38
Figure 5-45 Vue temps-fréquence montrant l'excursion en fréquence observée	39
Figure 5-46 Fréquence instantané du signal chirp	40
Figure 5-47 Vue temps/fréquence du signal chirp.....	40

