

UNIVERSITÉ DON BOSCO DE LUBUMBASHI

Faculté des Sciences Informatiques

Département Réseaux

Lubumbashi

www.udbl.ac.cd



TITRE DE VOTRE TRAVAIL
(cas de MMG et de l'ARPTC)

*Travail présenté et défendu en vue de l'obtention
du grade d'ingénieur technicien en Informatique*

Présenté par : **MUTOKE MUSULE André**

Filière : **Réseaux et Télécommunications**

Août 2025

UNIVERSITÉ DON BOSCO DE LUBUMBASHI

Faculté des Sciences Informatiques

Département Réseaux

Lubumbashi

www.udbl.ac.cd



TITRE DE VOTRE TRAVAIL
(cas de MMG et de l'ARPTC)

*Travail présenté et défendu en vue de l'obtention
du grade d'ingénieur technicien en Informatique*

Présenté par : **MUTOKE MUSULE André**

Filière : **Réseaux et Télécommunications**

Directeur : **Msc Ir KAPULULA Dubois**

Co-directeur : **Msc Ir KABALA Larry**

Août 2025

ÉPIGRAPHE

Le premier principe est que vous ne devez pas vous duper vous-même – et vous êtes la personne la plus facile à duper.

— Richard Feynman

DÉDICACE

La dédicace d'un travail scientifique est une courte inscription placée au début de l'ouvrage (souvent après la table des matières) pour rendre hommage à une ou plusieurs personnes (famille, amis, mentors) qui ont apporté un soutien moral ou intellectuel crucial, tout en étant différente des remerciements plus formels qui gratifient l'ensemble des collaborateurs académiques et professionnels, marquant ainsi la dimension humaine derrière le projet scientifique.

En quoi consiste-t-elle ?

- Un hommage personnel : C'est un espace pour exprimer gratitude et affection à ceux qui vous ont soutenu (parents, conjoint, amis) durant les longs mois de recherche, apportant ainsi une touche personnelle et chaleureuse à l'œuvre.
- Une inscription succincte : Elle doit être brève, souvent écrite en italique et placée en haut à droite de la page, selon des conventions de mise en page spécifiques.
- Un acte symbolique : Elle matérialise le lien entre l'auteur et son œuvre, attestant de sa présence et de son parcours, et se distingue des remerciements qui listent les contributions techniques et professionnelles.

REMERCIEMENT

Ce travail de fin de cycle n'aurait pu être mené à terme sans l'apport précieux et le soutien de nombreuses personnes et institutions. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à :

L'Université Don Bosco de Lubumbashi, pour le cadre académique stimulant et les ressources mises à notre disposition, qui ont été essentiels à la réalisation de cette recherche.

Notre directeur, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et sa disponibilité constante, qui ont grandement contribué à la structuration et à la qualité de ce mémoire.

Notre co-directeur, pour son expertise technique, ses orientations pertinentes et son soutien indéfectible tout au long de ce projet.

Nos collègues et amis du département de Réseaux et Télécommunications, pour leur collaboration, leurs échanges enrichissants et leur encouragements qui ont embelli cette aventure académique. Que chacun trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

L'auteur

LISTE DES FIGURES

2.1	Diagramme des exigences	11
2.2	Diagramme des cas d'utilisation	16
2.3	Diagramme d'activité du processus de demande d'homologation	18
2.4	Diagramme d'activité du processus d'homologation	23
3.1	Forme de matériau pyramidal absorbant	27
3.2	Phénomène d'absorption d'onde électromagnétique	27
3.3	Chambre anéchoïque	30
3.4	Chambre anéchoïques avec antenne biconnique	30
3.5	Schéma bloc du système de mesure RF	31
3.6	Schéma bloc du mélangeur des signaux	32
3.7	Schéma bloc du mélangeur des signaux avec filtre passe bas	33
3.8	Schéma interne du LTC5510[13]	34
3.9	Le module LTC5510	34
3.10	Le module ADF4351	35
3.11	Ampli logarithmique	36
3.12	Étude de l'ampli logarithmique	36
3.13	Ampli logarithmique avec élément semi conducteur	38
3.14	Circuit de l'amplificateur logarithme AD8317[14]	39
3.15	Circuit complet du système d'homologation	40
3.16	Qt Creator	41
3.17	Application d'homologation	42

3.18	Trame UART	43
4.1	Antenne en zone de test	45
4.2	Fréquence de fonctionnement de l'antenne	46
4.3	Signal test	47
4.4	Diagramme de rayonnement de l'EUT	47
4.5	Diagramme de rayonnement en mode Puissance mètre	48
4.6	Interface de paramétrage pour test CEM	48
4.7	Interface de paramétrage pour test CEM	49
4.8	Puissance rayonnée durant le test CEM	49
4.9	VSWR durant le test CEM	50
4.10	Niveaux d'émission durant le test CEM	51

LISTE DES TABLEAUX

LISTE D'ACRONYMES

ARPTC Autorité de Régulation de la Poste et des Télécommunications au Congo

CE Conformité européenne

CEM Compatibilité électromagnétique

GUI Graphical User Interface

CMC China Minmetals Corporation

CMN China Minmetals Non-ferrous Metals Co. Ltd

ETSI European Telecommunications Standards Institute

CISPR Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques

FCC Federal Communications Commission

GPS Global Positioning System

IEC International Electrotechnical Commission

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IHM Interface Homme Machine

InSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar

LRU Least Recently Used

MBD Model Based Design

MMG Minerals and Metals Group

PABX Private Automatic Branch exchange

PIRE Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente

PMR Professional Mobile Radio

RADAR RAdio Detection And Ranging

RDC République Démocratique du Congo

RF Radio Frequency

SAR Synthetic Aperture Radar

UIT Union internationale des télécommunications

VoIP Voice over Internet Protocol

HIRF High Intensity Radiated Field

RSSI Received Signal Strength Indicator

VNA Vectorial Network Analyser

FFT Fast Fourier Transform

VCO Voltage-Controlled Oscillator

TABLE DES MATIÈRES

ÉPIGRAPHE	I
DÉDICACE	II
REMERCIEMENT	III
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE D'ACRONYMES	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
AVANT PROPOS	XIII
0 INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
0.1 Contexte du travail	1
0.2 Problématique	1
0.3 Hypothèse	1
0.4 Choix et intérêt du sujet	1
0.5 Méthodologies et techniques	2
0.5.1 Méthodologies	2
0.5.2 Techniques	2
0.6 État de l'art	3
0.7 Délimitation du travail	3

0.8	Subdivision du travail	4
0.9	Logiciels et équipements utilisés	4
1	ÉTUDE DE L'EXISTANT ET GÉNÉRALITÉ DES CONCEPTS	5
1.1	Introduction partielle	5
1.2	Étude de l'existant & Généralité des concepts	5
1.2.1	Présentation de l'entreprise XXXXX	5
	Cadre historique	5
	Cadre géographique	5
	Cadre organisationnel	5
1.2.2	Étude de l'existant	5
1.2.3	Critique de l'existant	6
	Points forts	6
	Points faibles	6
1.2.4	Besoins fonctionnels & non fonctionnels	6
	Besoins fonctionnels	6
	Besoins non fonctionnels	6
1.3	Conclusion partielle	6
2	CONCEPTION DE L'OUTIL	7
2.1	Introduction partielle	7
2.2	Conception générale	7
2.2.1	Le V-Shape Model	8
2.2.2	L'approche Model Based Design (MBD)	8
2.2.3	Analyse des besoins	8
	Définition des besoins fonctionnels	8
	Définition des besoins non fonctionnels	9

2.2.4	Analyse des contraintes à l'homologation des équipements RA-DAR pour entreprises minière	10
	Contrainte technique	10
	Contraintes juridiques et politique	10
	Contrainte Budgétaire	10
	Contrainte d'exploitation	10
2.2.5	Diagramme des exigences du système	10
2.3	Conception détaillée	11
2.3.1	Conception logique du système : Cas d'utilisation	11
	Acteurs	11
	Cas d'utilisations	12
	Diagramme des cas d'utilisations	15
2.3.2	Conception logique du système : Activité	15
2.3.3	Interface Homme Machine	17
2.4	Conclusion partielle	22
3	IMPLÉMENTATION DU SYSTÈME	24
3.1	Introduction partielle	24
3.2	Matériels d'essais	24
3.3	Description de l'installation	25
3.3.1	La chambre anéchoïque	25
3.3.2	Types de chambre anéchoïque	25
3.3.3	Dimensionnement de la chambre anéchoïque	26
	Définition des dièdres absorbants	26
	chambre d'essai de la compatibilité électromagnétique CEM	29
3.3.4	Analyseur des réseaux vectoriels	29
	Récepteur des signaux RF	31

Transposition des fréquences	32
Réception en mode puissance-mètre	35
3.3.5 Application de l'homologation (partie logiciel)	38
3.4 Conclusion partielle	43
4 TESTS & INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DU SYSTÈME	45
4.1 Introduction partielle	45
4.2 Test d'homologation	45
4.3 Interprétation du diagramme de test CEM	47
Types de mesures	47
Sources potentielles d'interférences	48
Niveaux d'émission de l'équipement	49
4.3.1 Analyse des niveaux d'émission	49
4.4 Rapport d'analyse	50
4.5 Aspect Budgétaire	52
4.5.1 Coûts Initiaux et d'Investissement (Infrastructure et Équipement)	52
4.5.2 Coûts des Licences Logicielles	52
4.5.3 Coûts de Formation et de Compétence	53
4.5.4 Coûts Opérationnels et de Maintenance Annuels	53
4.5.5 Récapitulatif Global (Estimations Larges en USD)	54
4.6 Conclusion partielle	54
CONCLUSION GENERALE	54
BIBLIOGRAPHIE	59
ANNEXES	62

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire, intitulé « DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À L'HOMOLOGATION DES SYSTÈMES RADARS EXPLOITÉS DANS LES SITES MINIERS », est le fruit de nos efforts pour répondre aux exigences du programme national de l'enseignement supérieur et universitaire en République Démocratique du Congo. Il est présenté en vue de l'obtention de la licence d'ingénieur technicien en Télécommunication et Réseaux à l'Université Don Bosco de Lubumbashi.

Ce travail s'inscrit dans une démarche visant à apporter une contribution significative et concrète à la sécurité des opérations minières, en proposant une solution aux défis de la conformité des systèmes radars. Il est le résultat de recherches approfondies, d'une analyse rigoureuse des besoins sur le terrain, et d'une volonté d'innover pour la protection des vies humaines et des biens. Nous espérons que les développements et les conclusions présentés ici serviront de base solide pour de futures avancées dans ce domaine crucial.

CHAP 0 INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 . Contexte du travail

Etablir le contexte de votre travail de recherche est essentiel pour situer votre étude dans son environnement académique, scientifique et pratique. Il s'agit de présenter les circonstances, les motivations et les enjeux qui ont conduit à la réalisation de ce travail. Le contexte doit inclure une revue succincte de la littérature existante, les lacunes identifiées, ainsi que les besoins spécifiques auxquels votre recherche vise à répondre. En définissant clairement le contexte, vous permettez au lecteur de comprendre l'importance et la pertinence de votre travail dans le domaine étudié.

0.2 . Problématique

La problématique d'un travail scientifique est une question centrale qui guide la recherche. Elle identifie un problème spécifique ou un défi dans le domaine d'étude, en soulignant son importance et ses implications. La problématique doit être formulée de manière claire et concise, en mettant en évidence les lacunes dans les connaissances actuelles ou les besoins non satisfaits. Elle sert de fondement à la définition des objectifs de la recherche et oriente la méthodologie employée pour y répondre.

0.3 . Hypothèse

Les hypothèses dans un travail scientifique sont des propositions ou des suppositions formulées avant la réalisation de la recherche. Elles servent de points de départ pour l'investigation et guident la collecte et l'analyse des données. Les hypothèses doivent être claires, testables et basées sur une compréhension préalable du sujet. Elles permettent de structurer la recherche en définissant ce que l'on s'attend à découvrir ou à démontrer, et elles sont essentielles pour évaluer les résultats obtenus.

0.4 . Choix et intérêt du sujet

Justifier le choix et l'intérêt du sujet de votre travail scientifique est crucial pour démontrer sa pertinence et son impact potentiel. Il s'agit d'expliquer pourquoi ce sujet a été sélectionné, en mettant en avant son importance dans le domaine d'étude, les lacunes qu'il vise à combler, et les bénéfices attendus de la recherche

0.5 . Méthodologies et techniques

0.5.1 . Méthodologies

Enumérer et décrire les méthodologies que vous avez adoptées pour mener à bien votre travail scientifique est essentiel pour assurer la rigueur et la crédibilité de votre recherche. Voici quelques méthodologies couramment utilisées dans les travaux scientifiques :

- **Méthode expérimentale** : Implique la manipulation de variables pour observer leurs effets, souvent utilisée dans les sciences naturelles et l'ingénierie.
- **Méthode descriptive** : Consiste à collecter des données pour décrire un phénomène ou une situation sans intervenir, couramment utilisée en sciences sociales.
- **Méthode comparative** : Compare différents groupes ou conditions pour identifier des différences ou des similitudes, utile dans diverses disciplines.
- **Méthode analytique** : Décompose un problème complexe en ses éléments constitutifs pour mieux le comprendre, souvent utilisée en mathématiques et en informatique.
- **Méthode qualitative** : Se concentre sur la compréhension des phénomènes à travers des données non numériques, telles que les entretiens et les observations.
- **Méthode quantitative** : Utilise des données numériques et des analyses statistiques pour tester des hypothèses et mesurer des variables.
- **Méthode mixte** : Combine des approches qualitatives et quantitatives pour bénéficier des avantages des deux méthodologies.

0.5.2 . Techniques

Enumérer et décrire les techniques spécifiques que vous avez utilisées pour collecter, analyser et interpréter les données dans votre travail scientifique est crucial pour assurer la transparence et la reproductibilité de votre recherche. Voici quelques techniques couramment employées dans les travaux scientifiques :

- **Enquêtes et questionnaires** : Utilisés pour collecter des données auprès d'un large échantillon de participants.

- **Entretiens** : Permettent d'obtenir des informations détaillées et qualitatives en interrogeant des individus ou des groupes.
- **Observation participante** : Implique l'immersion dans un environnement pour observer les comportements et les interactions.
- **Analyse statistique** : Utilisée pour traiter et interpréter des données quantitatives à l'aide de logiciels statistiques.
- **Modélisation informatique** : Permet de simuler des phénomènes complexes à l'aide de modèles mathématiques et informatiques.
- **Expérimentation en laboratoire** : Implique la réalisation d'expériences contrôlées pour tester des hypothèses spécifiques.
- **Analyse de contenu** : Technique qualitative utilisée pour analyser des documents, des textes ou des médias afin d'identifier des thèmes ou des patterns.
- **Techniques de visualisation des données** : Utilisées pour représenter graphiquement les données afin de faciliter leur interprétation.

0.6 . État de l'art

Nous ne pouvons pas prétendre être le premier à faire des investigations dans ce domaine. Cependant, UDBL nous recommande de repertorié les travaux de fin d'étude qui ont été réalisés dans le même domaine que le vôtre. Ces travaux font référence aux étudiants qui vous ont précédé à UDBL/ESIS

0.7 . Délimitation du travail

Pour qu'un travail scientifique aboutisse et qu'il réponde à la demande de la société, il doit être projeté dans le temps et dans l'espace

- **Limites temporelles** : C'est le temps imparti pour la réalisation de ce travail, qui est généralement de six (6) mois, là que vous aurez planifié les différentes étapes de votre recherche, y compris la collecte de données, l'analyse, la conception, l'implémentation et la rédaction du rapport final.
- **Limite spatiale** : C'est le lieu où se déroule notre étude. Par exemple, si votre travail porte sur l'homologation des systèmes radars dans les sites miniers, vous pouvez spécifier que votre étude se concentre sur une région géographique particulière ou sur un type spécifique de site minier.

0.8 . Subdivision du travail

Subdiviser le travail scientifique en chapitres clairs et logiques est essentiel pour structurer la présentation de la recherche.

0.9 . Logiciels et équipements utilisés

Pour pouvoir élaborer notre travail, nous avons utilisé les outils suivants :

- **Latex** : Pour produire les documents annexes ainsi que les documents d'homologation
- **Microsoft Office Excel** : pour produire les graphiques
- **Draw IO** : le logiciel de représentation nous permettant de faire des architectures et des organigrammes.
- **Visual Studio Code** : Un éditeur de texte.

CHAP 1 ÉTUDE DE L'EXISTANT ET GÉNÉRALITÉ DES CONCEPTS

1.1 . Introduction partielle

Ce chapitre inaugural plonge au cœur de notre étude en dressant un état des lieux complet des systèmes existants et en posant les bases conceptuelles essentielles à la compréhension de notre travail

Nous débuterons par une présentation détaillée de l'entreprise, etc.

1.2 . Étude de l'existant & Généralité des concepts

1.2.1 . Présentation de l'entreprise XXXXX

Cadre historique

Une présentation d'un point de vue historique de l'entreprise(ou des entreprises).

Cadre géographique

Une présentation d'un point de vue géographique de l'entreprise(ou des entreprises).

Cadre organisationnel

Une présentation d'un point de vue organisationnel de l'entreprise(ou des entreprises).

1.2.2 . Étude de l'existant

L'étude de l'existant dans un travail scientifique consiste à faire un état des lieux détaillé du domaine d'étude avant d'entreprendre une nouvelle recherche, afin de comprendre le contexte, identifier les forces et faiblesses du système actuel, recenser les objectifs existants et les contraintes, et ainsi délimiter clairement le champ de l'investigation pour définir les besoins et éviter les doublons, utilisant des méthodes comme l'interview ou l'enquête.

1.2.3 . Critique de l'existant

Points forts

Les points forts du système existants.

Points faibles

Les points faibles du système existants.

1.2.4 . Besoins fonctionnels & non fonctionnels

Besoins fonctionnels

Les besoins dont vous avez trouvez fonctionnels au sein de l'entreprise

Besoins non fonctionnels

Les besoins dont vous avez trouvez non fonctionnels au sein de l'entreprise.

1.3 . Conclusion partielle

Une conclusion partielle de ce chapitre, suivie d'une transition vers le chapitre suivant.

CHAP 2 CONCEPTION DE L'OUTIL

2.1 . Introduction partielle

Ce chapitre se consacre à la conception détaillée de notre outil d'aide à l'homologation, s'appuyant sur les besoins et les critiques identifiés dans l'étude de l'existant. Nous y décrirons les méthodologies de conception adoptées, notamment le modèle en V et l'approche Model Based Design (MBD), avant de traduire les exigences en une architecture logique et fonctionnelle, incluant les diagrammes d'exigences, de cas d'utilisation, d'activités et l'interface homme-machine qui sera notre Graphical User Interface (GUI).

2.2 . Conception générale

Dans un processus classique de conception des systèmes ; entre autres le processus Least Recently Used (LRU); les ingénieurs recueillent des spécifications à partir de plusieurs sources et les combinent afin d'élaborer un cahier des charges sur papier, qui aidera à produire une conception détaillée. Une série des concepts différents seront analysées par le biais de prototypes des simulateurs ou des maquettes, la conformité à ces spécifications sera aussi contrôlée, apportant ainsi les modifications appropriées[7]. Après avoir mis au point une conception acceptable, les tests de vérification et de validation seront exécutés, puis de conformité si le produit doit respecter certaines normes spécifiques[7].

Comme les tests se déroulent à la fin d'un processus en plusieurs étapes faisant appel à des équipes différentes, les erreurs introduites en phase de conception ne sont souvent détectées que bien plus tard[7].

Leur correction onéreuse oblige la direction à prendre des décisions budgétaires difficiles[7].

Pour tenir compte de la contrainte temporel, nous allons utiliser le modèle de conception en V et le modèle de conception MBD.

2.2.1 . Le V-Shape Model

Le cycle en V (V model ou V-Shape model en anglais) est un modèle d'organisation des activités d'un projet qui se caractérise par un flux d'activité descendant qui détaille le produit jusqu'à sa réalisation, et un flux ascendant, qui assemble le produit en vérifiant sa qualité. Ce modèle est issu du modèle en cascade dont il reprend l'approche séquentielle et linéaire de phases[23].

2.2.2 . L'approche MBD

Le Model-Based Design (MBD) est une méthode de gestion de projet qui permet d'améliorer le développement d'un système. Alors qu'un développement classique est basé sur le cycle en V, l'approche MBD consiste à modéliser le système au plus tôt pour tester les choix stratégiques & techniques (Check) dès le design du système (Plan) tout en structurant et en enrichissant la communication entre les différentes équipes chargées du développement. Le coût de la modélisation est compensé par le gain en temps de développement, la convergence plus rapide de la solution et la réutilisation des modèles créés (parfois d'un facteur 101)[25].

2.2.3 . Analyse des besoins

L'analyse des besoins se traduit par la réalisation du cahier de charge fonctionnel. Un cahier des charges fonctionnel est un document rassemblant l'ensemble des éléments liés à un projet. Le besoin, les prestations attendues et les objectifs y sont détaillés, ainsi que les différentes contraintes (techniques, juridiques ou budgétaires)[30].

Dans le but de développer un outil qui aidera à réaliser l'homologation des équipements de télécommunications, plus particulièrement les équipements RADAR utilisés par les entreprises minières, tout en se focalisant sur le point faible de l'évolution des technologies comme point faible à améliorer, nous devons faire ressortir les différents besoins de notre système.

Définition des besoins fonctionnels

Les besoins fonctionnels sont les exigences essentielles qui décrivent ce que le système doit faire, comme les fonctionnalités ou service à fournir. Après études, nous pouvons énumérer les besoins suivants

1. Le système doit tester les performances techniques :Ici, il sera question de :
 - la portée, précision, résolution angulaire, vitesse de rafraîchissement, etc.
 - Immunité aux brouillages et aux interférences.
 - Fiabilité et disponibilité.
2. Le système doit offrir la possibilité de soumettre des demandes d'homologation en ligne.
3. Le système doit permettre la gestion des documents nécessaires à l'homologation
4. Le système doit tester la sécurité : ici, il s'agira de :
 - Conformité aux normes de sécurité (émissions électromagnétiques, protection contre les interférences, etc.).
 - Absence de risques pour les personnes et les biens.
5. Le système doit vérifier la Compatibilité électromagnétique (CEM) : ici, il s'agira de veiller au respect des normes CEM pour éviter les interférences avec d'autres systèmes. Pour notre travail, nous avons opté pour la norme Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR), plus précisément la norme CISPR 25.
6. Le système doit s'assurer de la sécurité de fonctionnement : ici, il s'agira de veiller aux mécanismes de sécurité pour prévenir les accidents et les dysfonctionnements du système.

Définition des besoins non fonctionnels

Les besoins non fonctionnels concernent les critères de performance, la sécurité ou l'ergonomie du système[30]. Nous pouvons citer :

- Le système doit être conforme aux normes de sécurité des données (Norme IEEE)
- Le système doit comporter une interface intuitive et accessible
- Les tests devront se réaliser dans une chambre anéchoïque.

2.2.4 . Analyse des contraintes à l'homologation des équipements RADAR pour entreprises minière

Les contraintes sont des fonctions qui impliquent des limitations quant à la conception d'un système. De ce fait, l'analyse des contraintes consiste à identifier les limitations ou restrictions qui pourraient affecter le projet. Nous devons prendre en compte ces contraintes pour mieux planifier le travail.

Contrainte technique

Les contraintes techniques sont les contraintes liées à la technologie. Il nous faudra s'assurer de la compatibilité entre les parties électroniques, électriques et informatiques du système.

Contraintes juridiques et politique

Les contraintes juridiques sont les restrictions imposées par l'État congolais. Pour un bon fonctionnement, il faut s'acquitter des droits et des devoirs auprès de l'autorité de régulation des postes et des télécommunications du Congo ARPTC et du ministère des télécommunications et des nouvelles technologies de l'information et de la communication PT&NTIC[10]. Les droits et les obligations, c'est le fait de s'acquitter en payant les titres d'exploitation et être en ordre fiscal.

Contrainte Budgétaire

Tout projet, aussi grand soit-il, possède des limites financière. Les contraintes budgétaires dictent combien on peut dépenser.

Contrainte d'exploitation

Les contraintes d'exploitation sont liées à l'utilisation du système. Elles englobent la maintenance, la fiabilité et la facilité d'utilisation du système.

2.2.5 . Diagramme des exigences du système

Une fois les exigences énumérées, le diagramme des exigences présenté dans la figure 2.1 vient résumer ce qui a été dit ci-haut.

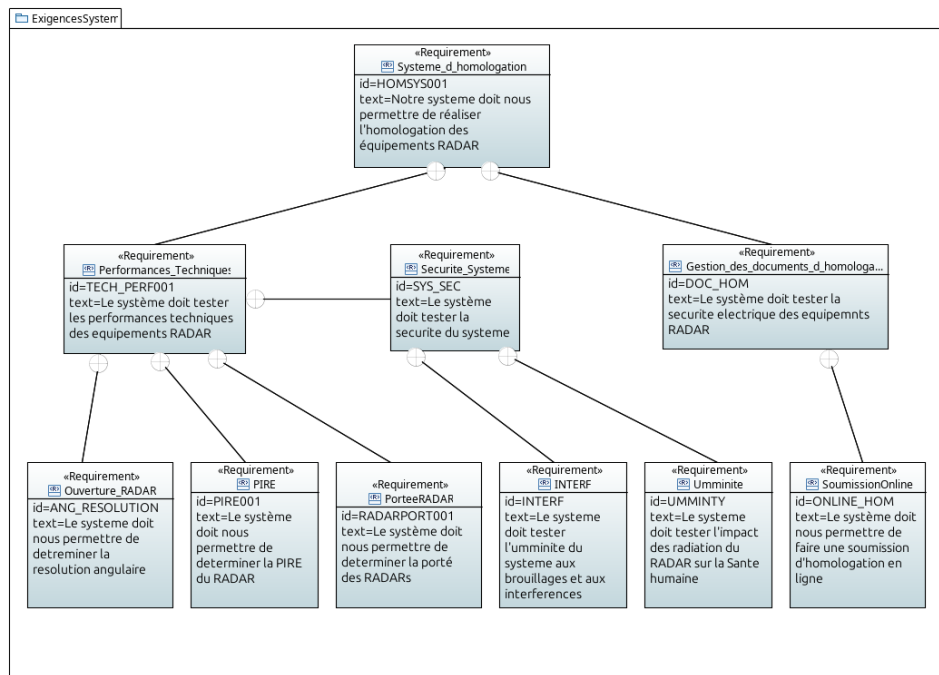


Figure 2.1: Diagramme des exigences

2.3 . Conception détaillée

2.3.1 . Conception logique du système : Cas d'utilisation

Après avoir conçu le diagramme des exigences résumant les spécifications fonctionnelles du système, nous allons maintenant passer à la conception logique. Ici, il sera question de définir premièrement les acteurs intervenant dans le système. Un diagramme de cas d'utilisation capture le comportement d'un système, d'un sous-système, tel qu'un utilisateur extérieur le voit. Il scinde la fonctionnalité du système en unités cohérentes, les cas d'utilisation, ayant un sens pour les acteurs.

Les cas d'utilisation permettent d'exprimer le besoin des utilisateurs d'un système, ils sont donc une vision orientée utilisateur de ce besoin au contraire d'une vision informatique.

Acteurs

Pour notre système, nous aurons comme acteurs :

- Utilisateur : L'utilisateur est un humain, qui va solliciter les différentes fonctionnalités du système. L'utilisateur généralise deux sous-catégories :

- L'autorité de Régulation
- L'entreprise cherchant homologation de ses équipements RADAR
- Le système lui-même : Il intègre les cas d'utilisations favorisant l'interaction action avec l'utilisateur
- L'équipement à homologuer.

Cas d'utilisations

Un cas d'utilisation décrit une fonction qu'un système exécute pour atteindre l'objectif de l'utilisateur. Un cas d'utilisation doit renvoyer un résultat observable qui est utile pour l'utilisateur du système.

Il s'agira principalement pour notre système de :

- Homologuer l'équipement : L'homologation est la compilation générale survenue lors des différents tests de conformité
 - Objectif : Réaliser l'homologation de l'équipement RADAR
 - Acteur principal : L'utilisateur
 - Acteur secondaire : Le système, l'équipement RADAR
 - Préconditions :
 - * Avoir au préalable soumis une demande d'homologation
 - * Avoir Placer l'équipement à homologuer dans une chambre anéchoïque
 - Scénario :
 - * Ouvrir l'application
 - * Lancer l'homologation
 - * Insérer les informations
 - Alternatif : Ne pas homologuer
 - Exception : Ne pas homologuer si la base des données est saturée.
 - Postcondition : Générer le document d'homologation.
- Tester la conformité Radioélectrique : Tout en se basant sur l'arrêté ministériel ainsi que sur les réglementations techniques spécifiées par l'UIT et IEC, il sera question ici de vérifier les performances techniques du RADAR testé. En d'autres termes, il s'agit de s'assurer que l'appareil :

- Utilise les fréquences autorisées et dans les limites de puissance définies.
 - N’interfère pas avec d’autres services radio
 - Objectif : Tester la conformité Radioélectrique
 - Acteur principal : L’utilisateur
 - Acteur secondaire : Le système, l’équipement RADAR
 - Préconditions :
 - * Avoir Placer l’équipement à homologuer dans une chambre anéchoïque
 - Scénario :
 - * Ouvrir l’application
 - * Lancer l’homologation ou tester les performances radio
 - * Tester la PIRE
 - * Tester la fréquence
 - * Tester la portée
 - * Tester le diagramme de rayonnement
 - Alternatif : Ne pas réaliser le teste
 - Exception : Réessayer plus tard.
 - Postcondition : Passer au test de compatibilité, générer un rapport du test.
- Tester la compatibilité Électromagnétique : Ce dernier vise à vérifier qu’un appareil électronique ne perturbe pas son environnement électromagnétique et qu’il peut fonctionner correctement dans cet environnement sans subir d’interférences.
 - Objectif : Tester la compatibilité électromagnétique
 - Acteur principal : L’utilisateur
 - Acteur secondaire : Le système, l’équipement RADAR
 - Préconditions :
 - * Avoir Placer l’équipement à homologuer dans une chambre anéchoïque
 - Scénario :
 - * Ouvrir l’application
 - * Lancer l’homologation ou tester les performances radio

- * Tester la norme IEC
 - * Tester la performance sur terrain.
 - Alternatif : Ne pas réaliser le teste
 - Exception : Réessayer plus tard.
 - Postcondition : Passer au test de sécurité électrique et immunité sanitaire ; générer un rapport test.
- Tester la sécurité électrique et immunité sanitaire : visent à s’assurer que ces appareils ne présentent aucun danger pour l’utilisateur ou son environnement. Ils sont essentiels pour garantir la conformité aux normes de sécurité et protéger les personnes contre les risques d’électrocution, d’incendie ou d’autres accidents liés à l’électricité.
 - Objectif : Tester la compatibilité électromagnétique
 - Acteur principal : L’utilisateur
 - Acteur secondaire : Le système, l’équipement RADAR
 - Préconditions :
 - * Avoir Placer l’équipement à homologuer dans une chambre anéchoïque
 - Scénario :
 - * Ouvrir l’application
 - * Lancer l’homologation ou tester les performances radio
 - * Tester la norme IEC
 - * Tester la performance sur terrain.
 - Alternatif : Ne pas réaliser le teste
 - Exception : Réessayer plus tard.
 - Postcondition : Passer au test de sécurité électrique et immunité sanitaire ; générer un rapport teste.
- Soumettre demande d’homologation : L’utilisateur, autre que l’autorité de Régulation, devra avoir la possibilité de soumettre la demande d’homologation et de l’envoyer à qui de droit.
 - Objectif : Soumettre demande d’homologation
 - Acteur principal : L’utilisateur
 - Acteur secondaire : Le système

- Préconditions : —
 - Scénario : Envoyer le mail
 - Alternatif : Ne pas soumettre
 - Exception : Réessayer plus tard.
 - Postcondition : En attente d'une réponse.
- Générer Document d'homologation : Une fois les différents testes réalisées, un document devra être généré.
 - Objectif : Générer le document de l'homologation
 - Acteur principal : L'utilisateur
 - Acteur secondaire : Le système
 - Préconditions : Avoir déjà réalisé l'homologation
 - Scénario : Générer document
 - Alternatif : Ne pas générer
 - Exception : Réessayer plus tard.
 - Postcondition : —

Diagramme des cas d'utilisations

Une fois les acteurs ainsi que les cas d'utilisations recensés, nous pouvons résumer le tout à travers le diagramme des cas d'utilisation.

2.3.2 . Conception logique du système : Activité

Le diagramme d'activité permet de vérifier la complétude d'un processus. Dans notre cas, nous allons nous focaliser sur le processus de demande d'homologation ainsi que le processus général de l'homologation de nos équipements radar.

Suivant le flux de traitement du signal et de la communication, l'activité comprend :

- AMPLI LOG (Amplificateur Logarithmique) : C'est la première étape de la chaîne de réception du signal. Il reçoit le "Signal RF" (Radio Fréquence) de l'équipement à tester. Sa fonction est de "Déterminer la puissance du signal"

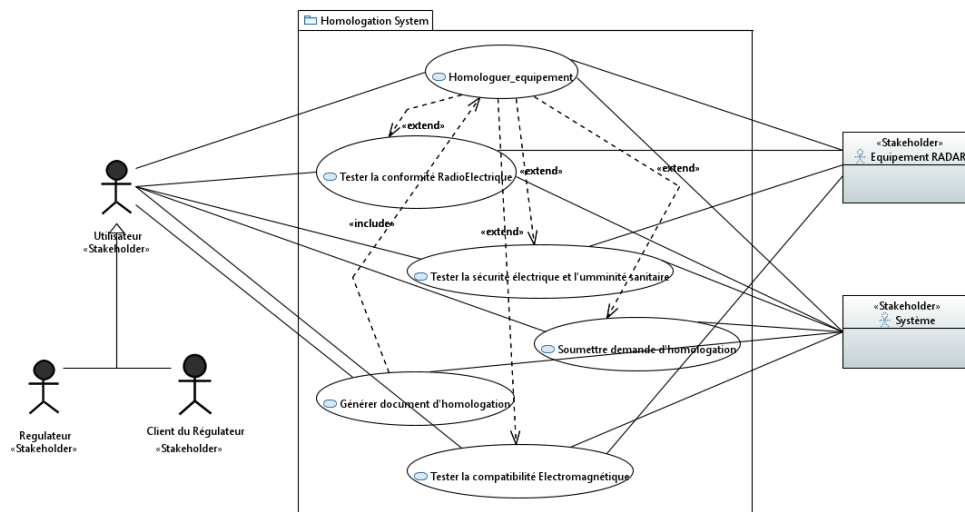


Figure 2.2: Diagramme des cas d'utilisation

en convertissant le signal RF en une tension proportionnelle au logarithme de la puissance d'entrée. Cela permet de mesurer une large plage de puissances. Le signal traité est ensuite transmis au "Downconverter".

- **DOWNCONVERTER** (Convertisseur Abaisseur de Fréquence) : Ce module est responsable de la "Transposition de fréquence intermédiaire". Il reçoit le signal de l'Ampli Log et un signal d'un "VCO" (Voltage-Controlled Oscillator - Oscillateur Commandé en Tension) pour effectuer un mélange de signaux. L'objectif est de ramener la fréquence du signal RF (qui peut être très élevée, comme les GHz pour les radars) à une "Fréquence intermédiaire" plus basse, plus facile à traiter par les composants numériques. Un "Filtre passe-bas" est appliqué après le mélange pour isoler la composante de basse fréquence (la fréquence intermédiaire) et éliminer les fréquences indésirables.
- **VCO** (Oscillateur Commandé en Tension) : Ce couloir représente le module qui "Génère une fréquence de 2.4 GHz". Cette fréquence est utilisée par le Downconverter comme fréquence locale pour le mélange. Le VCO est "Configuré via UART" (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), ce qui signifie que son fonctionnement (notamment la fréquence de sortie) est contrôlé par des commandes série venant de la partie logicielle.
- **CONTRÔLEUR CENTRAL** : Ce couloir gère la communication globale entre les différentes parties du système, particulièrement la communication série. Il est responsable de l'Initialisation de la communication UART (9600 bauds)". Cela établit le canal de communication entre le PC et les modules matériels.

Il reçoit les "Données de mesure" des modules matériels (après conversion analogique-numérique). Il envoie des "Commandes UART" pour configurer et contrôler les modules matériels, comme le VCO.

- PC (Ordinateur Personnel) : C'est l'interface utilisateur et le centre de traitement des données. Le processus démarre par l'"Envoi de la commande de mesure vers les signaux" depuis le PC. Le PC "Récupère les données" via la communication UART. Il y a une décision "Fréquency mode" :
 - OUI : Si le mode fréquence est activé, une "FFT" (Fast Fourier Transform - Transformée de Fourier Rapide) est appliquée aux données pour analyser le spectre de fréquence du signal.
 - NON : Si ce n'est pas le mode fréquence, le traitement continue.

Le PC est responsable de l'"Affichage des signaux" sur une interface graphique, permettant à l'utilisateur de visualiser les résultats des mesures. Le processus se termine (cercle noir avec un contour rouge).

L'utilisateur lance une commande de mesure depuis le PC. Cette commande est transmise via UART pour initialiser la communication et configurer le VCO pour générer la fréquence nécessaire. Le signal RF de l'équipement testé est d'abord amplifié de manière logarithmique pour mesurer sa puissance. Ensuite, le signal est envoyé au Downconverter, qui utilise la fréquence du VCO pour transposer le signal RF vers une fréquence intermédiaire plus basse. Les données de mesure sont ensuite envoyées du module de communication vers le PC. Sur le PC, les données sont traitées : une FFT peut être appliquée si le mode fréquence est sélectionné, puis les résultats sont affichés graphiquement.

La figure 2.3 nous présente le processus de demande d'homologation, tandis que la figure 2.4, nous présente le processus de mesure pour arriver à homologuer les systèmes radar.

2.3.3 . Interface Homme Machine

Partant de l'analyse des besoins, nous allons Réaliser un logiciel dont sa fonction principale est de faciliter l'homologation. De ce fait, ce dernier sera réaliser avec le framework Qt.

- **Classes principales et leur rôle :**

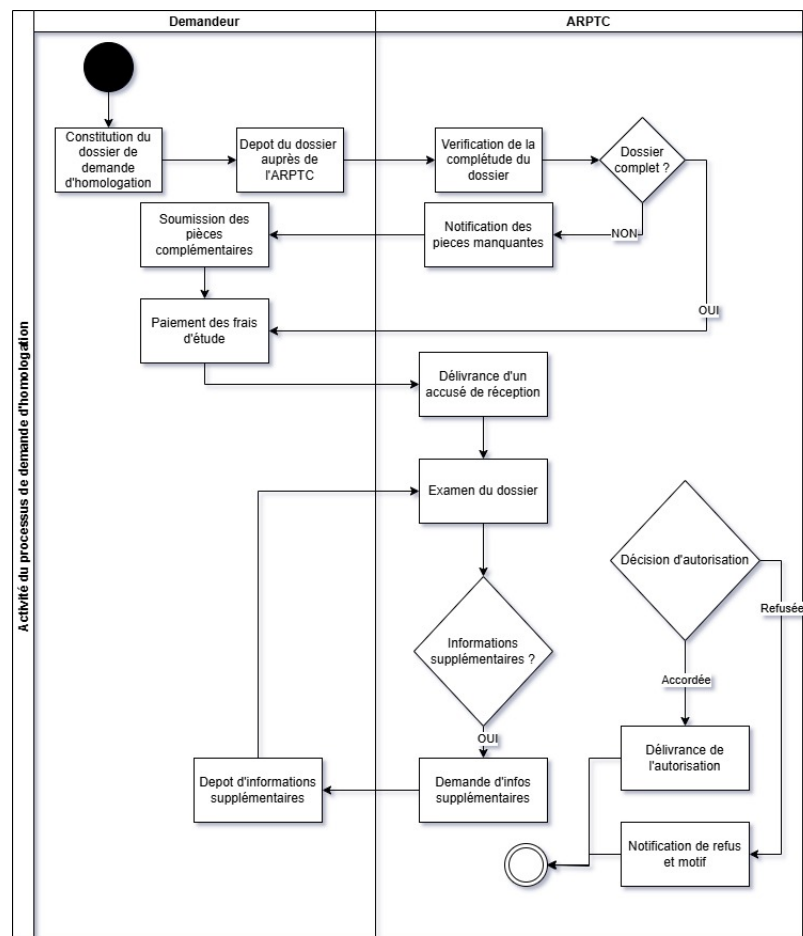


Figure 2.3: Diagramme d'activité du processus de demande d'homologation

1. KernelSystem :

- Role : Gère la logique fondamentale de l'application, les modes de fonctionnement (Powermeter, Fréquence, Temporel) et l'interaction en mode console (bien que la partie console soit minimale dans le code actuel).
- Membre clés :
 - * *m_myModeSys* : MODE (énumération) : Mode de fonctionnement actuel.
 - * *m_enableConsolePrinting*: bool : Active/désactive l'impression console.
 - * *m_choice*: int : Choix de l'utilisateur en console.
 - * *bufferSerialData*: std::stringstream* Buffer pour les données série (simplifié).
- Méthodes Clés :

- * `KernelSystem()`: Constructeur.
- * `runningSystem()`: Exécute la logique principale.
- * `allowCLPrint(bool cmd)`: Active/désactive l'impression console.
- * `changeMode(int mode)`: Change le mode de fonctionnement.
- * `getMyMode()`: Retourne le mode actuel.

2. Graphique :

- Role : Gère l'affichage des différents types de graphiques (spectre, rayonnement, temporel) en utilisant QtCharts. C'est le composant visuel principal pour les données.
- Hérite de: `QChartView`
- Membre clés :
 - * `m_spectrumChart`: `QChart*` : Graphique cartésien pour le spectre.
 - * `m_spectrumSeries`: `QLineSeries*` : Série de données pour le spectre.
 - * `m_spectrumAxisX`, `m_spectrumAxisY`: `QValueAxis*` : Axes pour le spectre.
 - * `m_radiationChart`: `QPolarChart*` : Graphique polaire pour le rayonnement.
 - * `m_radiationSeries`: `QLineSeries*` : Série de données pour le rayonnement.
 - * `m_radiationRadialAxis`, `m_radiationAngularAxis`: `QValueAxis*`, `QCategoryAxis*` : Axes pour le rayonnement.
 - * `m_spectrumChartT`: `QChart*` : Graphique cartésien pour le mode temporel.
 - * `m_spectrumSeriesT`: `QLineSeries*` - Série de données pour le mode temporel.
 - * `m_spectrumAxisXT`, `m_spectrumAxisYT`: `QValueAxis*` : Axes pour le mode temporel.
 - * `myDataMap`: `std::map<double, double>` : (Note : à retirer, utilisé pour la simulation interne).
 - * `m_dataTimer`: `QTimer*` : (Note : à retirer, utilisé pour la simulation interne).
 - * `m_currentX`: `double` : (Note : à retirer, utilisé pour la simulation interne).

- Méthodes Clés (Slots):
 - * `updateSpectrumPlot(const QVector<QPointF> data)`: Met à jour le graphique de spectre.
 - * `updateRadiationPlot(const QVector<QPointF> data)`: Met à jour le graphique de rayonnement.
 - * `updateTemporalPlot(const QVector<QPointF> data)`: Met à jour le graphique temporel.
 - * `showSpectrumMode()`: Active le mode spectre.
 - * `showRadiationMode()`: Active le mode rayonnement.
 - * `showTemporalMode()`: Active le mode temporel.
- Méthodes Clés (Privées):
 - * `initSpectrumChart()`: Initialise le graphique de spectre.
 - * `initRadiationChart()`: Initialise le graphique de rayonnement.
 - * `initTemporalChart()`: Initialise le graphique temporel.
- Signaux :
 - * `signalToUpdateRadiationMode()`
 - * `signalToUpdateSpectrumMode()`
 - * `signalToUpdateTemporalMode()`

3. BarreOutils :

- Role : Représente la barre d'outils principale de l'application, contenant des actions configurables.
- Hérite de: `QToolBar`
- Méthodes clés :
 - * `BarreOutils(const QString &title, QWidget *parent = nullptr)`: Constructeur.
- Méthodes Clés (Slots privés):
 - * `onDisplayTriggered()`, `onMarkerTriggered()`, `onStimulusTriggered()`, `onCalibrateTriggered()`, `onRecallTriggered()`, `onConfigTriggered()`, `onPauseTriggered()`: Gèrent les clics sur les actions et émettent des signaux.
- Signaux :
 - * `markerOptionTriggered()`
 - * `displayOptionTriggered()`
 - * `stimulusOptionTriggered()`

- * `calibrateOptionTriggered()`
- * `configOptionTriggered()`

4. **MainWindow :**

- Role : La fenêtre principale de l'application. Elle assemble tous les composants de l'interface utilisateur, gère les interactions entre eux et contient la logique de simulation des données.
- Hérite de: `QMainWindow`
- Membre clés :
 - * *m_myKernel*: `KernelSystem*` : Instance du système Kernel.
 - * *dispalyButtonsContainer*, *markerButtonsContainer*, *stimulusButtonsContainer*, *calibrateButtonsContainer*, *configButtonsContainer*: `QWidget*` : Conteneurs pour les boutons spécifiques à chaque section de la barre d'outils.
 - * *centralWidget*: `QWidget*` : Widget central de la fenêtre.
 - * *mainLayout*: `QHBoxLayout*` : Layout principal.
 - * *myGraphic*: `Graphique*` : Instance du graphique.
 - * *toolBar*: `BarreOutils*` : Instance de la barre d'outils.
 - * *m_menuBar*: `QMenuBar*` : Barre de menu.
 - * *fileMenu*, *editMenu*, *viewMenu*, *runMenu*, *settingMenu*, *helpMenu*: `QMenu*` : Menus individuels.
 - * *m_simulationTimer*: `QTimer*` : Timer pour la simulation de données.
 - * *m_displayTemporalFFTInSpectrumMode*: `bool` : Drapeau pour la FFT du temporel.
- Méthodes Clés (Slots):
 - * `updateSpectrumPlot(const QVector<QPointF> data)`: Met à jour le graphique de spectre.
 - * `updateRadiationPlot(const QVector<QPointF> data)`: Met à jour le graphique de rayonnement.
 - * `updateTemporalPlot(const QVector<QPointF> data)`: Met à jour le graphique temporel.
 - * `showSpectrumMode()`: Active le mode spectre.
 - * `showRadiationMode()`: Active le mode rayonnement.
 - * `showTemporalMode()`: Active le mode temporel.

- Méthodes Clés (Privées):
 - * `initSpectrumChart()`: Initialise le graphique de spectre.
 - * `initRadiationChart()`: Initialise le graphique de rayonnement.
 - * `initTemporalChart()`: Initialise le graphique temporel.
- Signaux :
 - * `signalToUpdateRadiationMode()`
 - * `signalToUpdateSpectrumMode()`
 - * `signalToUpdateTemporalMode()`

2.4 . Conclusion partielle

Ce chapitre a structuré l'élaboration de notre solution en présentant une conception robuste et méthodique. Nous avons défini les besoins fonctionnels et non fonctionnels, analysé les contraintes techniques, juridiques, budgétaires et d'exploitation, et traduit ces éléments en des diagrammes UML clairs et précis (exigences, cas d'utilisation, activités). La proposition d'une interface homme-machine intuitive complète cette phase de conception, fournissant une feuille de route détaillée pour l'implémentation de notre système, étape que nous aborderons dans le prochain chapitre.

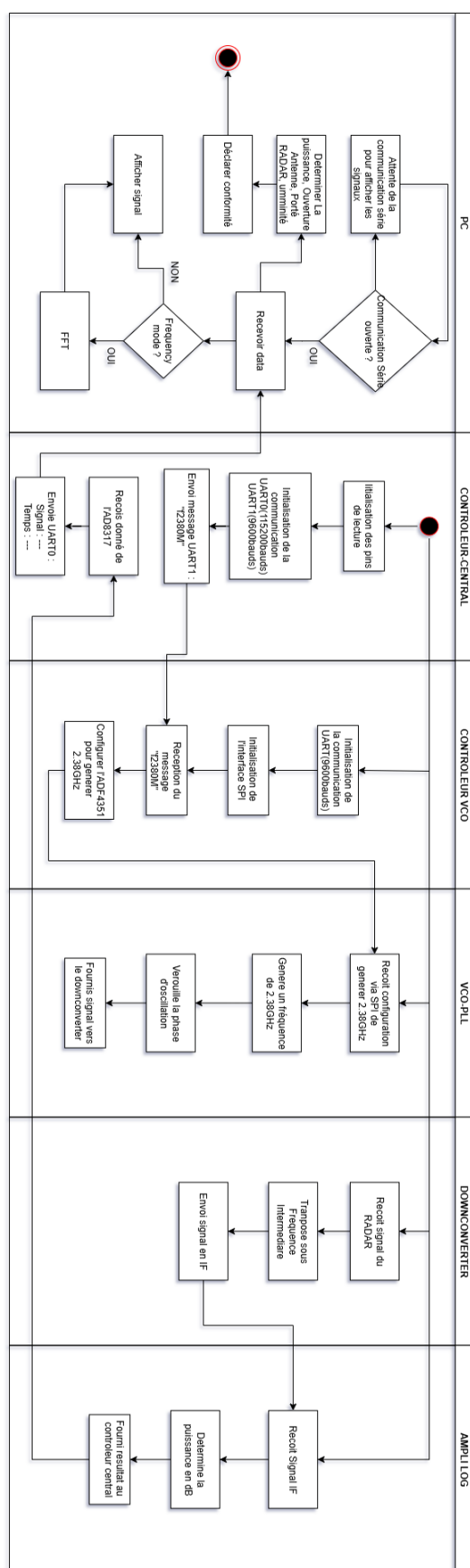


Figure 2.4: Diagramme d'activité du processus d'homologation

CHAP 3 IMPLÉMENTATION DU SYSTÈME

3.1 . Introduction partielle

Ce chapitre détaille la mise en œuvre pratique de notre système d'aide à l'homologation des systèmes radars, en s'appuyant sur les spécifications et la conception élaborées précédemment. Nous y explorerons les choix matériels et logiciels fondamentaux, depuis la conception de la chambre anéchoïque jusqu'à la mise en place du circuit d'acquisition des signaux RF et le développement de l'interface logicielle, en passant par les simulations nécessaires à la validation de notre approche.

3.2 . Matériels d'essais

Il est impératif, pour mieux réaliser notre homologation d'un équipement non répertorié, de faire usage des matériels suivants :

- **Chambre anéchoïque** : Cette dernière sera d'une taille adéquate pour permettre de maintenir un champ uniforme de dimensions suffisantes par rapport au matériel à l'équipement RADAR. Des absorbants supplémentaires doivent être utilisés pour atténuer les réflexions dans les chambres qui ne sont pas entièrement revêtues de matériau absorbant[28].
- **Circuit de contrôle pour générer les signaux RF** : Afin de commander l'équipement qui sera mis dans la chambre anéchoïque[28].
- **Des sondes de champ isotopique** dont les amplificateurs de tête et l'opto-électronique présentent une immunité correcte aux champs à mesurer, et une liaison à fibre optique avec l'indicateur situé à l'extérieur de la chambre. Il est également possible d'utiliser une liaison correctement filtrée. En effet, ces sondes doivent aussi subir un étalonnage[28].
- **Matériels associés** : pour enregistrer les niveaux de puissance nécessaires à la valeur du champ requis et pour contrôler la génération de ce signal pour les essais. Des précautions doivent être prises pour que les matériels auxiliaires présentent une immunité suffisante[28].

3.3 . Description de l'installation

3.3.1 . La chambre anéchoïque

L'homologation des équipements RADAR, bien évidemment sur la partie qui consiste à tester les performances techniques, définit en effet ; des méthodes d'essais pour évaluer l'incidence des rayonnements électromagnétiques sur le matériel concerné[31].

La plupart des matériaux électroniques sont, dans une certaine mesure, perturbée par les rayonnements électromagnétiques. Cela est dû au fait qu'il existe plusieurs sources de champs électromagnétiques.

Afin de mieux effectuer nos tests, la norme IEC 6000-4-3 prévoit l'installation d'une chambre anéchoïque d'ondes radiofréquences[28].

3.3.2 . Types de chambre anéchoïque

Il existe trois types de chambre anéchoïque :

- **Chambre d'essai de la compatibilité électromagnétique CEM** : Une chambre d'essai CEM est un environnement intérieur spécialisé conçu spécifiquement pour mesurer avec précision les émissions électromagnétiques produites par les appareils électroniques. Ces chambres anéchoïques sont conçues pour répondre aux normes et exigences CEM[31].

La compatibilité électromagnétique (CEM) est définie par la capacité d'un appareil électrique/électronique à fonctionner nominalement dans l'environnement électromagnétique pour lequel il est conçu. Tout fabricant de matériel électronique doit qualifier ou faire qualifier ses matériaux préalablement à leur mise sur le marché[27].

Diverses réglementations fixent les seuils à respecter par les équipements électroniques. Les essais d'émission et d'immunité rayonnés s'effectuent dans ce type de chambre anéchoïque[27].

Différents modèles de chambres, semi ou complètement anéchoïques, répondent aux exigences normatives :

1. Pour des tests de préqualification ou de qualification,
2. Pour des tests en champ rayonné de forte puissance High Intensity Radiated Field (HIRF).

- **Chambres anéchoïques pour les mesures d'antennes** : Pour caractériser une antenne (diagramme de rayonnement par exemple, de type Radio/Télécom, Radar ...), il faut des conditions de transmission reproduisant au mieux l'espace libre. En théorie, il s'agit d'un environnement de mesure en champ lointain, sans réflexion ni pollution électromagnétique[27].

Ces chambres anéchoïques procurent une *zone tranquille* dans laquelle les conditions de mesures (champ électrique, homogénéité ...) sont maîtrisées.

- **Minichambres anéchoïques** : Les minichambres anéchoïques permettent de tester des petits dispositifs IoT, RF/micro-ondes, cartes électroniques ... Elles représentent la solution idéale pour les tests R&D, prototypes ou contrôle de production de ces produits[27]. Comme une chambre anéchoïque grandeur nature, elles créent un environnement électromagnétique répétitif et isolent l'équipement à tester.

L'homologation consiste en trois types de test : le test CEM, le test radioélectrique ainsi que le test de sécurité électrique. Pour réaliser le test de compatibilité électromagnétique, nous devons concevoir une **chambre d'essai de la compatibilité électromagnétique CEM**. Pour réaliser le test radioélectrique, nous devons concevoir une **chambre anéchoïque pour les mesures d'antennes**. [3]

3.3.3 . Dimensionnement de la chambre anéchoïque

Une chambre anéchoïque est constituée d'une cage de Faraday couverte d'absorbants électromagnétiques. Ces chambres sont essentielles pour réaliser des essais de compatibilité électromagnétique et de mesures d'antennes en conditions de champ libre[3].

La cage de Faraday isole le matériel sous tests des ondes électromagnétiques polluantes extérieures, les absorbants absorbent les ondes électromagnétiques et empêchent toute réverbération.

Que ce soit au niveau de la chambre d'essais CEM ou de celle pour les mesures d'antennes, il nous faudra définir les propriétés des matériaux devant constituer nos chambres.

Définition des dièdres absorbants

La matière absorbante des ondes devra avoir une forme adéquate pour pouvoir annuler au mieux les réverbérations d'ondes électromagnétiques.[31] De ce fait la

forme la plus appropriée est celle qui se rapproche au dièdre, entre autres, la pyramide. Ce matériau possède les caractéristiques suivantes :

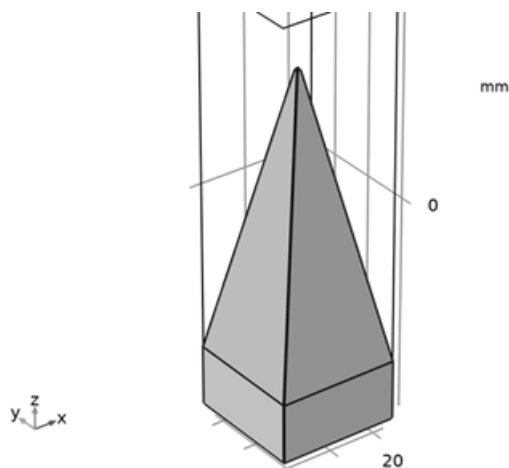


Figure 3.1: Forme de matériau pyramidal absorbant

- Permittivité relative : 1
- Perméabilité relative : 1
- Conductivité électrique : $0.5S/m$

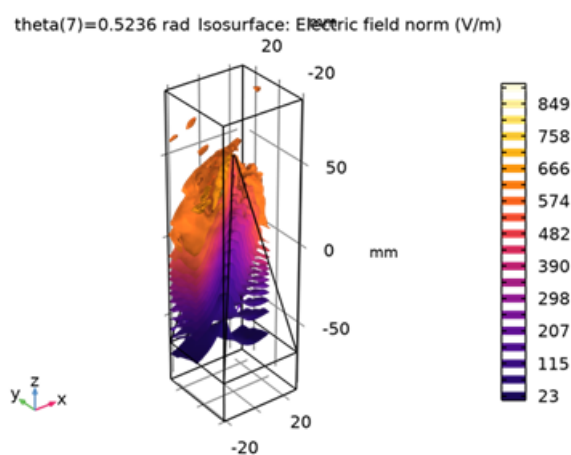


Figure 3.2: Phénomène d'absorption d'onde électromagnétique

Le matériau nécessaire est un absorbeur RF Ohmique. Les paramètres clés d'un absorbeur RF sont les suivantes :

- **La Fréquence** : la gamme de fréquences dans laquelle nous souhaitons effectuer des mesures. Dans notre cas, nous travaillons avec des micro-ondes

- **La réflexivité** : La quantité du signal RF entrant qui sera réfléchi. Plus la réflexivité est faible, plus l'absorption est importante.
- **Les dimensions** : Afin d'adapter l'absorbeur à la surface de notre chambre anéchoïque.
- **La forme** : Dans notre cas, nous optons pour une forme pyramidale
- **Le type de matériau** : définit les paramètres de performance, de qualité et de réflectivité.

Pour sa capacité à être absorbant dans toutes les directions, nous choisissons le model pyramidal *Coating Microwave Polyurethane Pyramidal Absorbers(TSA-PI series)* de l'entreprise TESTUPS qui possède les caractéristiques suivantes[31] :

- Fréquence : 80Mhz à 40Ghz; les équipements radars fonctionnent à 1GHz, donc c'est passable.
- Matériaux : Mousse de polyuréthane; cette dernière possède les propriétés suivantes :
 - Légèreté : Elle est très légère, ce qui facilite l'installation des absorbeurs dans les chambres anéchoïques.
 - Capacité d'absorption : Grâce à sa structure poreuse et à la possibilité d'y incorporer des charges carbonées (qui sont les vrais éléments absorbants les ondes électromagnétiques), la mousse de polyuréthane constitue un support idéal pour les absorbeurs. Les ondes RF pénètrent la structure de la mousse et sont dissipées sous forme de chaleur, réduisant ainsi les réflexions.
 - Facilité de formage : Elle peut être moulée facilement en formes pyramidales, essentielles pour la performance des absorbeurs RF.

•

Pour notre cas nous avons choisit le model *Coating Microwave Polyurethane Pyramidal Absorbers TSA-200PI* qui possède les caractéristiques suivantes[31] :

- Matériaux : Polyuréthane
- Température : $[-50^{\circ}C, 80^{\circ}C]$

- Bandwidth : 500MHz - 40Ghz
- Hauteur : $6.3Kg/m^2$
- Poids : 200mm
- Réflectivité : $[-15dB, -28dB]$
- Size : 500mm×500mm
- Couleur Standard : Bleu
- Espérance de vie : > 10ans
- RoHS : 2011/65/EU(EU)2015/863

chambre d'essai de la compatibilité électromagnétique CEM

Il existe les chambres semi-anéchoïques et totalement anéchoïques. Dans notre cas, pour réaliser les tests de compatibilité RF, nous aurons besoins d'une chambre totalement anéchoïques. Cette dernière possèdera les dièdres absorbants TSA-PI. Une superficie de $7 \times 7m^2$ sera amplement suffisante. Pour déterminer la quantité de nos dièdres absorbant on fera :

$$N_{dièdre} = \frac{S_{chambre}}{Size_{dièdre}} * 2 \quad (3.1)$$

$$N_{dièdre} = \frac{14m^2}{250000m^2} * 2 = 52$$

En guise de marge d'erreur nous augmentons 10%. ce qui nous donne 58 TSA-200PI(de 500mm×500mm).

Ceci étant fait, nous pouvons implémenter un Vectorial Network Analyser (VNA) dédié.

3.3.4 . Analyseur des réseaux vectoriels

Un VNA est un appareil de mesure couramment utilisé pour[12] :

- Caractériser des composants RF, des câbles et les antennes,
- Caractériser des matériaux (solides et liquides),

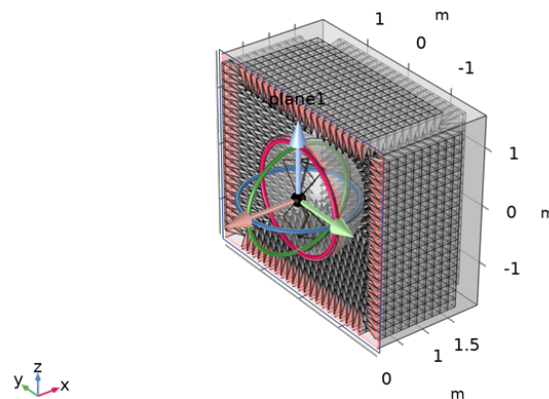


Figure 3.3: Chambre anéchoïque

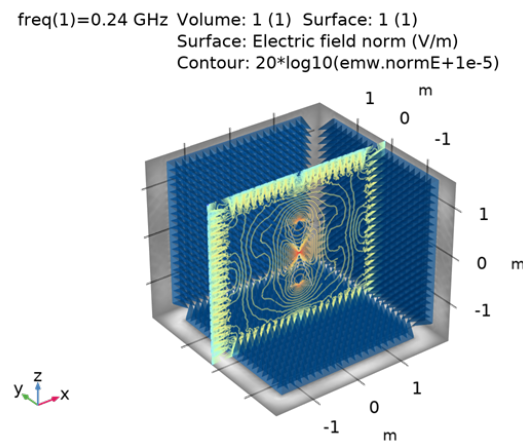


Figure 3.4: Chambre anéchoïques avec antenne biconnique

- Tester la conformité de dispositifs électroniques aux normes réglementaires, comme les tests CEM,
- Caractériser les dispositifs électro-optique, opto-électrique ou optique,
- Vérifier le déphasage en fonction de la fréquence : gain d'amplificateur sur une bande passante donnée,
- Sur un câble, mesurer des paramètres de transmission, de diaphonie et de localiser les défauts,
- Mesurer la directivité d'une antenne sur une bande de fréquence donnée,
- Mesurer la transmission, le coefficient de réflexion, le gain, le diagramme de rayonnement, la bande passante et l'impédance tout au long des processus de conception et de production

Le circuit du VNA sera constitué :

- Une partie logique : Un logiciel qui se chargera d'être une interface homme machine et fournir a son utilisateur différentes fonctionnalités
- Une partie physique (électronique) : Tout ce qui concernant le traitement des signaux, la récolte des données, sera réaliser par cette dernière.

Nous nous baserons sur le schéma bloc de la figure 3.5 pour réaliser nos système de mesures RF afin de mieux homologuer nos systèmes RADAR

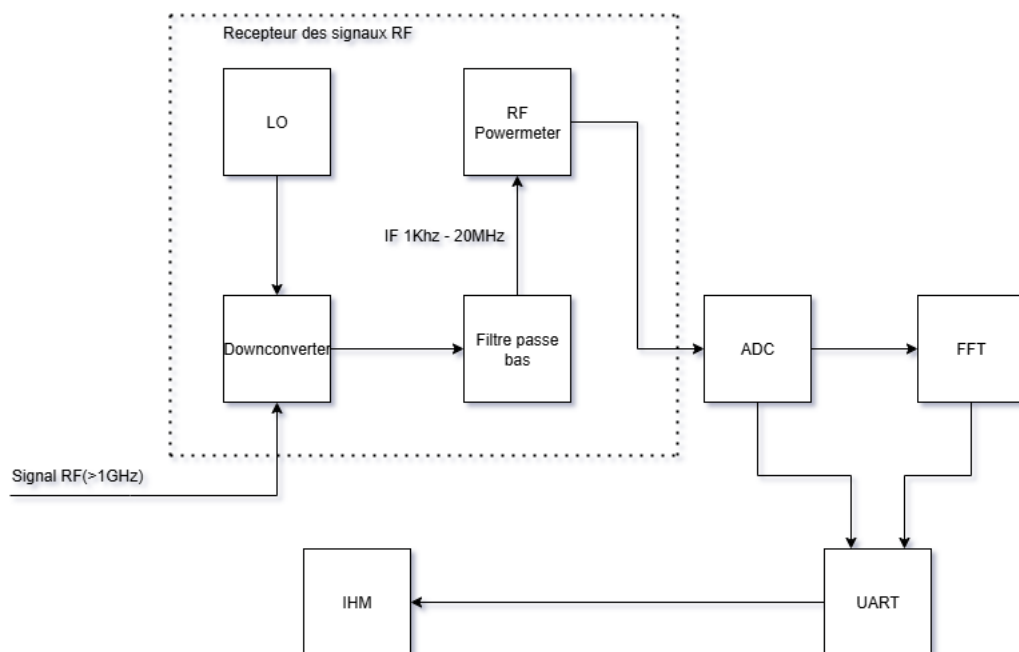


Figure 3.5: Schéma bloc du système de mesure RF

Récepteur des signaux RF

Le système de réception des signaux RF est divisé en deux grande partie :

- La réception en mode Puissance mètre : Ce mode de réception consiste à traiter le signal reçu et fournir un signal qui sera le logarithme du signal d'entrée. Partant de ce signal nous pouvons déterminer le Received Signal Strength Indicator (RSSI) du signal reçu.
- La réception en mode temporel : En mode temporel, ici nous recuperons le signal en bande RF, on le remet en bande de base pour au final être numérisé. et des traitement postérieur seront exécutés par la suite.

Avant de commencer tout processus, il est important de travailler en bande de base, pour les raisons suivantes :

- les composants devant effectuer le traitement du signal sont limités en terme de fréquence de travail.
- Le microcontrôleur chargé de réaliser le prétraitement des données possède une fréquence limite échantillonnage (40MHz maximum).

Pour y parvenir, nous devons réaliser ce qu'on appelle, **la transposition de fréquence**, en utilisant un mélangeur des signaux downconverter.

Transposition des fréquences

La transposition de fréquence consiste à transposer un signal dont le spectre est centré sur une fréquence initiale vers une autre fréquence sans altération de la bande passante[26].

Pour ce faire nous aurons besoin des éléments ci-dessous présentés dans la figure 3.6 :

- Un oscillateur local
- Un multiplieur des signaux(ou comparateur de phase)

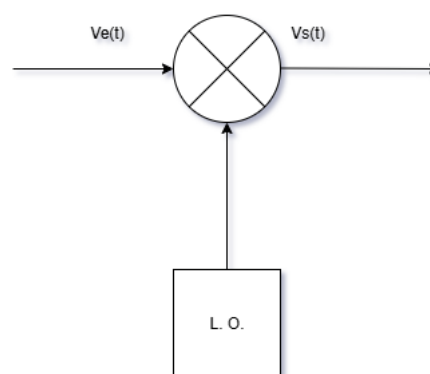


Figure 3.6: Schéma bloc du mélangeur des signaux

Au niveau de l'oscillateur local, nous avons un signal V_{LO} comme décrit l'équation 3.2

$$V_{LO}(t) = |V_{LO}| \sin(\Omega_e t + \Phi_{LO}(t)) \quad (3.2)$$

$$V_s(t) = K * V_e(t) * V_{LO}(t) \quad (3.3)$$

Ce qui nous mène à conclure que le signal $V_s(t)$ sera donné par l'équation 3.4

$$V_s(t) = \frac{K \cdot |V_e(t)| \cdot |V_{LO}(t)|}{2} [\cos(2\Omega_e t + \Phi_e(t) + \Phi_{LO}(t)) + \cos(\Phi_e(t) - \Phi_{LO}(t))] \quad (3.4)$$

avec $\frac{K \cdot |V_e(t)| \cdot |V_{LO}(t)|}{2}$ la transmittance statique ou sensibilité du comparateur de phase.

En associant ce circuit à un filtre passe bas, obtenons un mélangeur des signaux downconverter comme décrit la figure 3.7

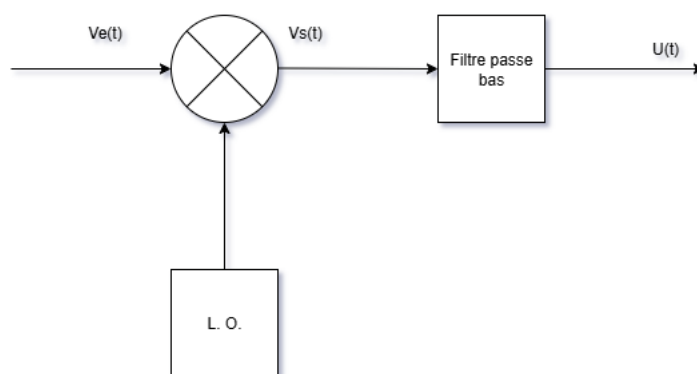


Figure 3.7: Schéma bloc du mélangeur des signaux avec filtre passe bas

De manière pratique nous nous sommes proposés d'utiliser le module LTC5510 (voir figure 3.9). Les raisons principales de notre choix sont les suivantes:

- Fonction principale : Mélangeur actif large bande haute linéarité (Up-converter ou Down-converter).
- Plage de fréquences :
- Fréquence d'entrée/LO : 1 MHz à 6 GHz.
- Fréquence de sortie (FI) : Peut varier, par exemple, 10 MHz à 1,3 GHz pour des applications basse fréquence, ou 1,2 GHz à 2,1 GHz pour des applications haute fréquence.
- Gain de conversion : Typiquement 1,5 dB.
- Facteur de bruit (Noise Figure - NF) : Typiquement 11,6 dB (ou 11,8 dB selon les conditions de test).

- Niveau de pilotage de l'oscillateur local (LO Drive Level) : Nécessite seulement 0 dBm, ce qui simplifie les exigences du circuit de pilotage externe.
- Tension d'alimentation : 5V ou 3.3V.

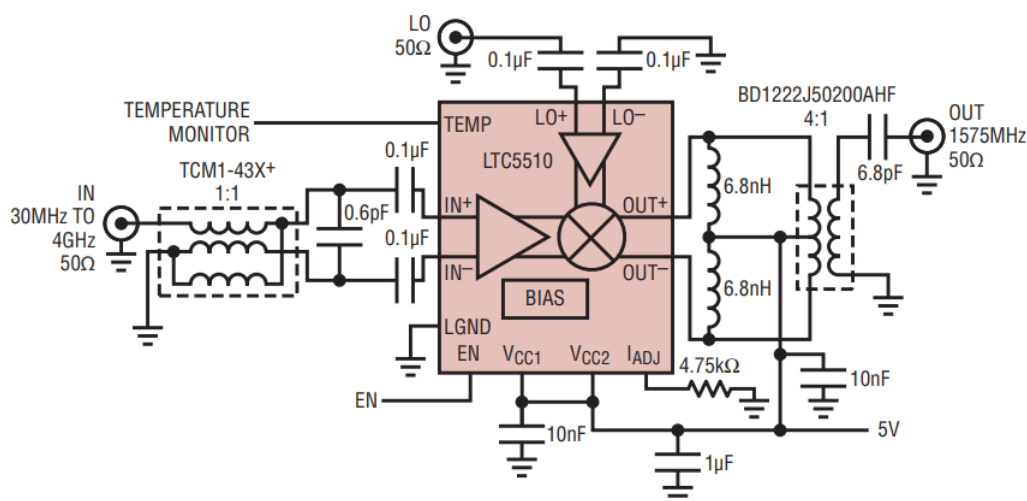


Figure 3.8: Schéma interne du LTC5510[13]

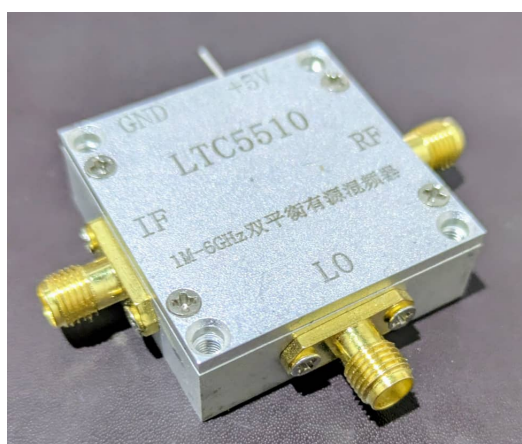


Figure 3.9: Le module LTC5510

Pour réaliser le rôle de l'oscillateur local, nous nous sommes penché sur le circuit ADF4351 (voir la figure 3.10), qui est un synthétiseur des fréquence à larges bande avec boucle à verrouillage de phase et possède les caractéristiques suivantes :

- Gamme de fréquences: 35 MHz à 4.4 GHz.
- Type de synthétiseur: Fractionnaire-N et entier-N.
- VCO: Intégré, avec une fréquence de sortie fondamentale de 2200 MHz à 4400 MHz.

- Prédiviseurs: Diviseurs par 1, 2, 4, 8, 16, 32 et 64 pour générer des fréquences plus basses.
- Interface de contrôle: Bus série à trois fils.
- Détecteur RMS: Détecteur RMS sélectif en fréquence.
- Plage dynamique: 90 dB.

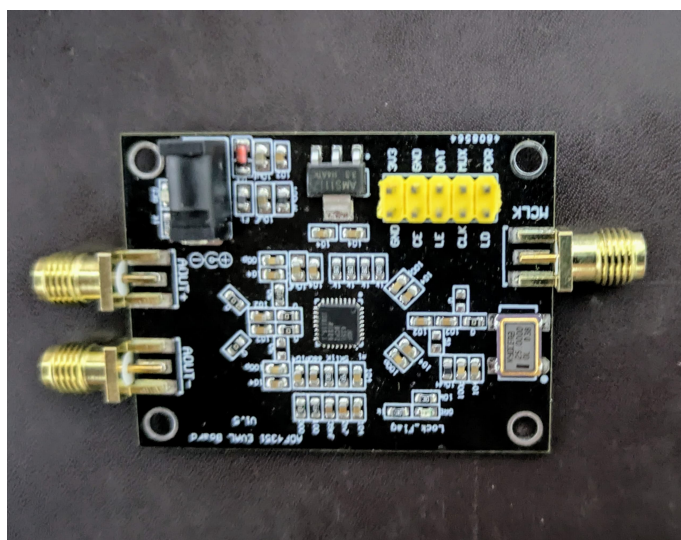


Figure 3.10: Le module ADF4351

Réception en mode puissance-mètre

L'outil de mesure doit être très précis et très fiable. Dans le cas de l'instrumentation pour l'homologation de nos système RADAR, il est nécessaire que la tension de sortie V_S de nos amplificateur soit une fonction concave du courant i_e ; une phase étendue de niveaux du signal d'entrée et ainsi transformée en gamme compatible avec les possibilités du système de numérisation et d'enregistrement[26].

La figure 3.11 possède les avantages d'un faible temps de réponse et d'une impédance de sortie réduite.

- R_s : est la résistance d'isolement du capteur RF, ici dans notre cas de l'antenne.
- R_f : est la résistance d'isolement de la chaîne directe de l'amplificateur
- G : est le gain de l'amplificateur
- i_e : représente le courant d'entrée de la chaîne directe

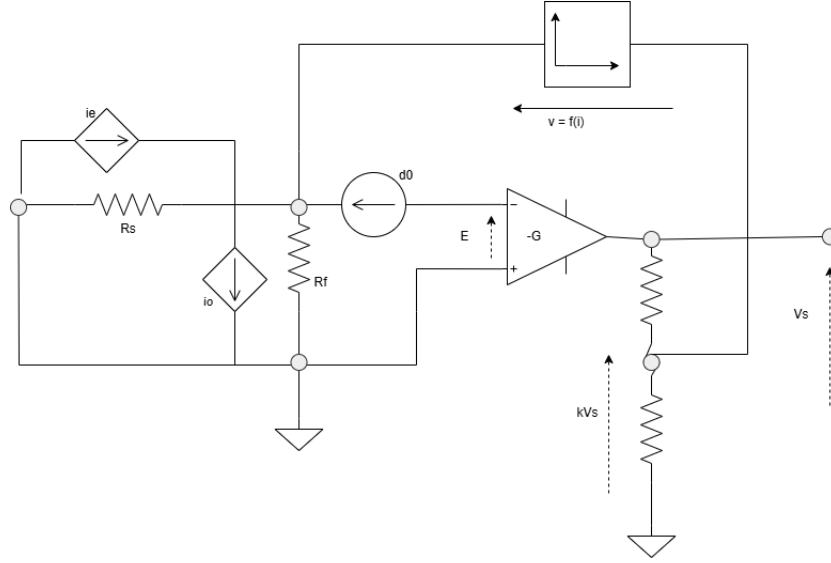


Figure 3.11: Ampli logarithmique

- d_0 : est la source de tension équivalente aux dérivées de la chaîne directe.

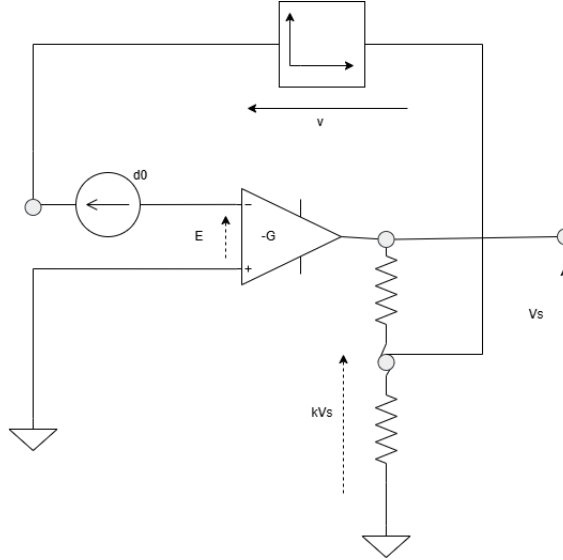


Figure 3.12: Étude de l'ampli logarithmique

Le fonctionnement en régime continu du circuit est alors décrit comme suite :

$$kV_s + V - d_0 - \epsilon = 0$$

$$\Rightarrow kV_s \left(1 + \frac{1}{kG}\right) - d_0 + f \left(i_e - i_0 + \frac{V_s}{G} \left[\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_s} \right] - d_0 \left[\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_s} \right] \right) = 0 \quad (3.5)$$

Dans le cas idéal ou l'amplificateur de la chaîne directe est supposé sans dérivé,

sans courant d'entrée et de Gain infini alors :

$$kV_s \left(1 + \frac{1}{kG}\right) - d_0 + f(i_e) = 0 \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow kV_s + f(i_e) = 0$$

$$\Rightarrow V_s = -\frac{1}{k}f(i_e) \quad (3.7)$$

En particulier, la caractéristique de l'élément de contre réaction est $V = a + b \log i$. En pratique, cependant, la relation 3.6 souligne le rôle fondamental joué par i_0 , d_0 et R_f même quand G est infini. On aura en effet :

$$kV_s - d_0 = -f\left(i_e - i_o - d_0 \left[\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_f}\right]\right) \quad (3.8)$$

Dans l'équation 3.8; on voit apparaître une erreur de lecture d_0 et une erreur de mesure $i_0 + d_0 \left[\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_f}\right]$

Le circuit de contre réaction est simplement un élément à semi-conducteur. Dans notre exemple un transistor.

$$I_c = I_{c1} \left[e^{V_{be}/U_T} - 1\right]$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{I_c}{I_{c1}} + 1\right) = \frac{V_{be}}{U_T}$$

$$\Rightarrow V_{be} = U_T [\ln(I_c) - \ln(I_{c1})] \quad (3.9)$$

Pour raison d'expérimentation, nous nous sommes permis d'utiliser une carte de développement contenant le circuit de la figure 3.14. Le système RADAR rencontré fonctionnait dans la gamme des micro-ondes. De ce fait nous disposons d'un amplificateur logarithmique AD8317 possédant les spécifications suivantes :

- Bande de fréquence : 1MHz - 10GHz
- Haute précision : $\pm 1dB$ au dessus de la Temperature de travail.
- Stabilité au dessus de la Temperature de travail : $\pm 0.5dB$
- Temps de réponse impulsionnelle : 6 ns/10 ns

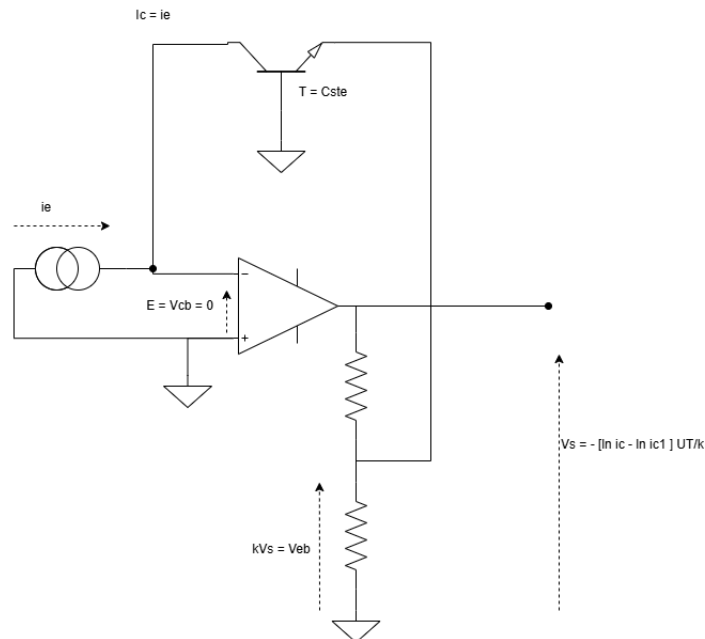


Figure 3.13: Ampli logarithmique avec élément semi conducteur

- Impédance d'entrée : 55Ω (avec une erreur inférieure à ± 3 dB)
- Tension d'alimentation : 3.0 V à 5.5 V
- Consommation de courant : $22mA$ et diminue à $200\mu A$ lorsque l'appareil est désactivé

L'AD8317 est un amplificateur logarithmique démodulateur, capable de convertir avec précision un signal d'entrée RF en un signal de sortie correspondant, échelonné en décibels. Il utilise la technique de compression progressive sur une chaîne d'amplification en cascade, chaque étage étant équipé d'une cellule de détection. L'AD8317 présente un temps de réponse de 6 ns/10 ns Ce dispositif offre une stabilité d'interception logarithmique sans précédent à température ambiante. [14].

Le schéma sur la figure 3.15 nous présente les différentes connexions entre nos différents modules.

3.3.5 . Application de l'homologation (partie logiciel)

Notre application sera implémenter au moyen du framework Qt Creator(voir figure 3.16), au moyen du langage de programmation C++. Le code ci dessous décrit les lignes de code principaux du système.

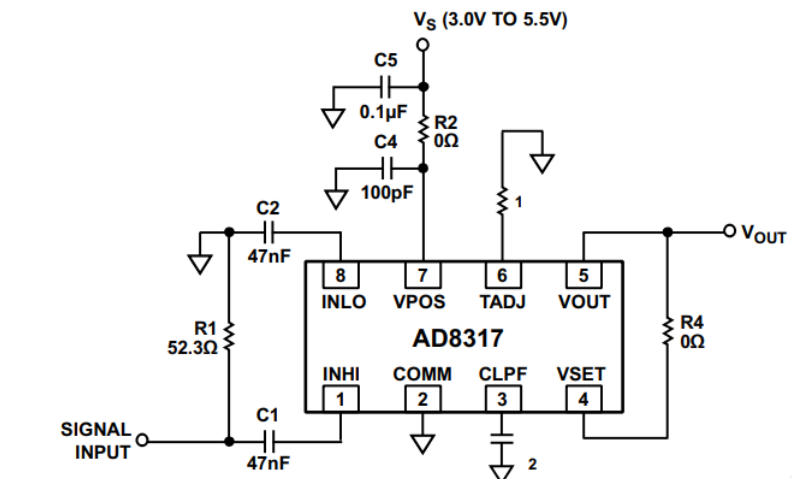


Figure 3.14: Circuit de l'amplificateur logarithme AD8317[14]

```

1 #include "mainwindow.h"
2
3 #include <QApplication>
4 #include <QIcon>
5
6
7 /// @brief Classe principale du systeme
8 int main(int argc, char *argv[])
9 {
10     QApplication a(argc, argv);
11     // 1. Creer un objet QIcon a partir d'une ressource
12     QIcon myIcon("F:/TFC_2025/mesDiagrammes/img/arptclogo2.png");
13     MainWindow w;
14     w.setWindowIcon(myIcon);
15     w.show();
16     return a.exec();
17 }

```

Listing 3.1: Code principal

La fonction Fast Fourier Transform (FFT) sera implémenter par notre application, comme le décrit les lignes de code qui suivent :

Par défaut lorsque l'application est lancé, c'est le mode puissance mètre (voir figure 3.17) qui est affiché. L'utilisateur a la possibilité de changer des modes en selectionnant l'option paramètres offre à il s'affichera trois option :

- Puissance mètre

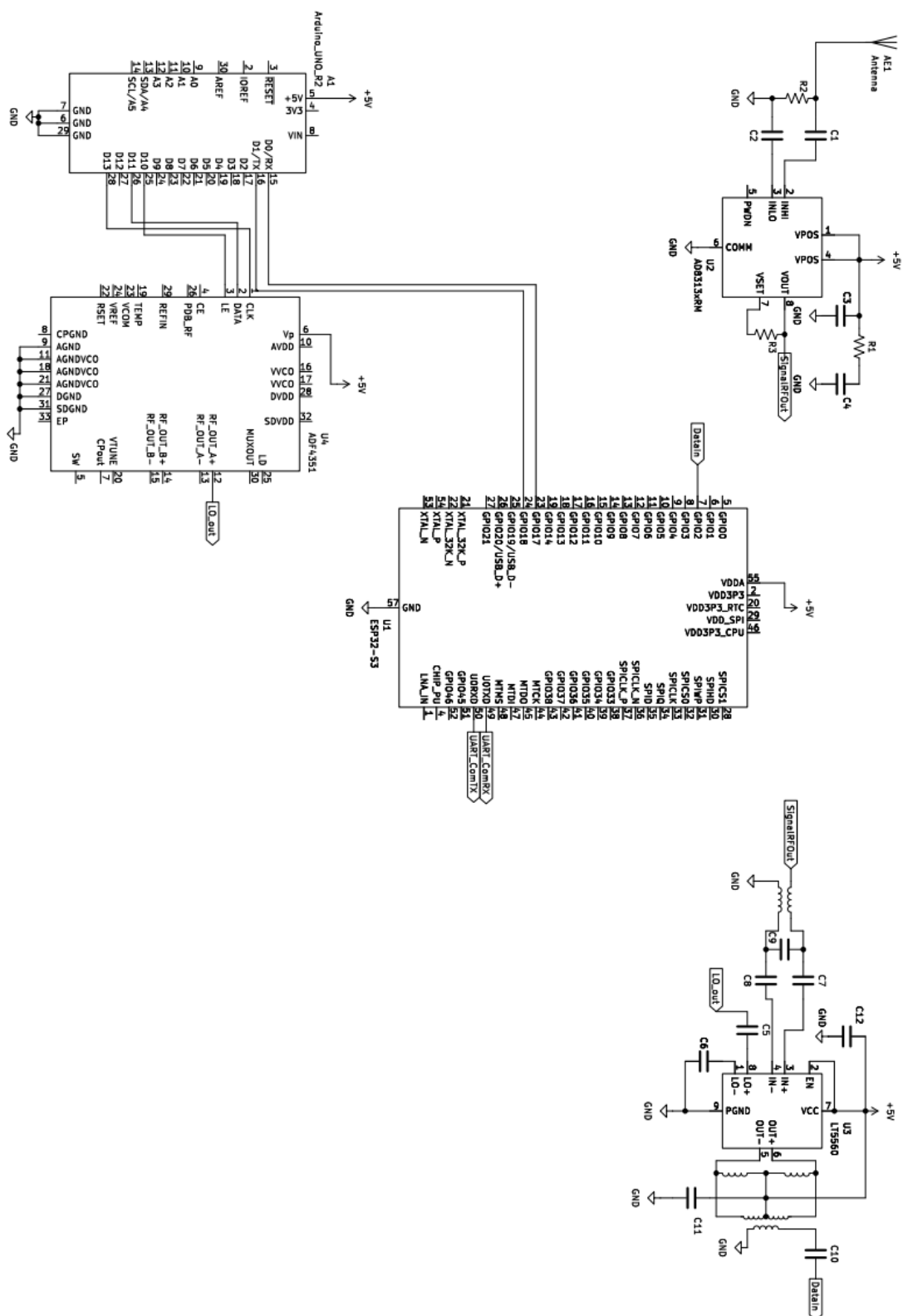


Figure 3.15: Circuit complet du système d'homologation

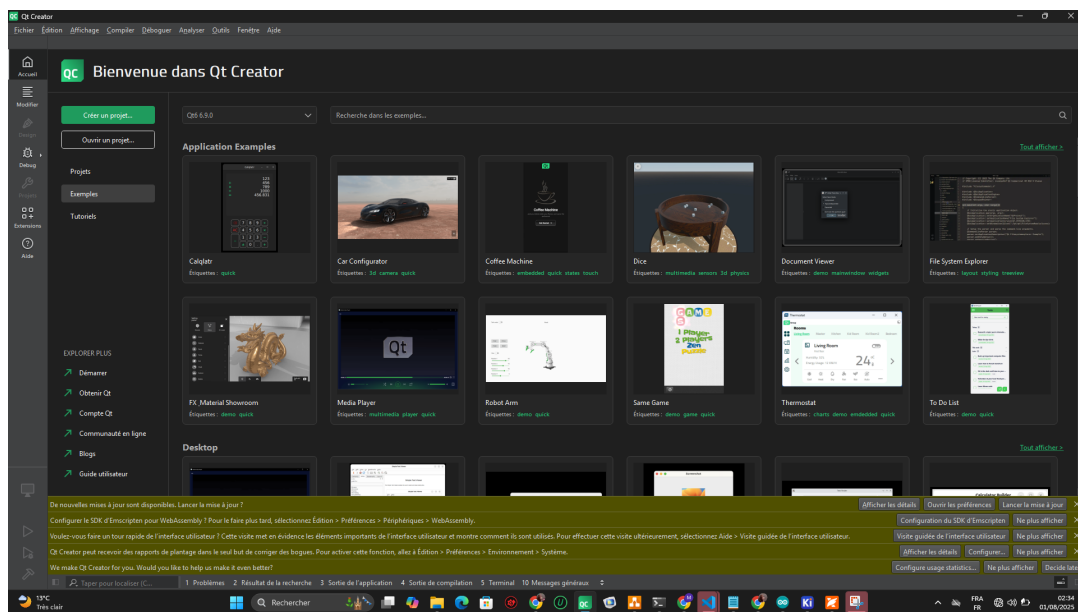


Figure 3.16: Qt Creator

- Domaine spectral
- Domaine temporel

Pour établir une communication série avec les équipements de mesures, l'utilisateur doit appuyer sur la barre d'outil **Config** et il devra configurer la communication série et sélectionner le port de communication. Les options à spécifier sont :

- Le port série,
- le débit en bauds (par défaut 9600 bauds),
- le nombre des bits des données(par défaut 8 bits),
- le bit de parité(par défaut aucun),
- le bit d'arrêt(par défaut le niveau logique 1),
- le contrôle de flux(Par défaut)

La communication série est établie via le protocole UART. Le protocole UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) se distingue par sa nature asynchrone. Contrairement aux protocoles synchrones qui partagent un signal d'horloge commun pour la synchronisation, l'UART s'appuie sur une synchronisation indépendante entre l'émetteur et le récepteur. Cette synchronisation est rendue possible grâce à des informations de cadencement contenues directement dans la trame de données.

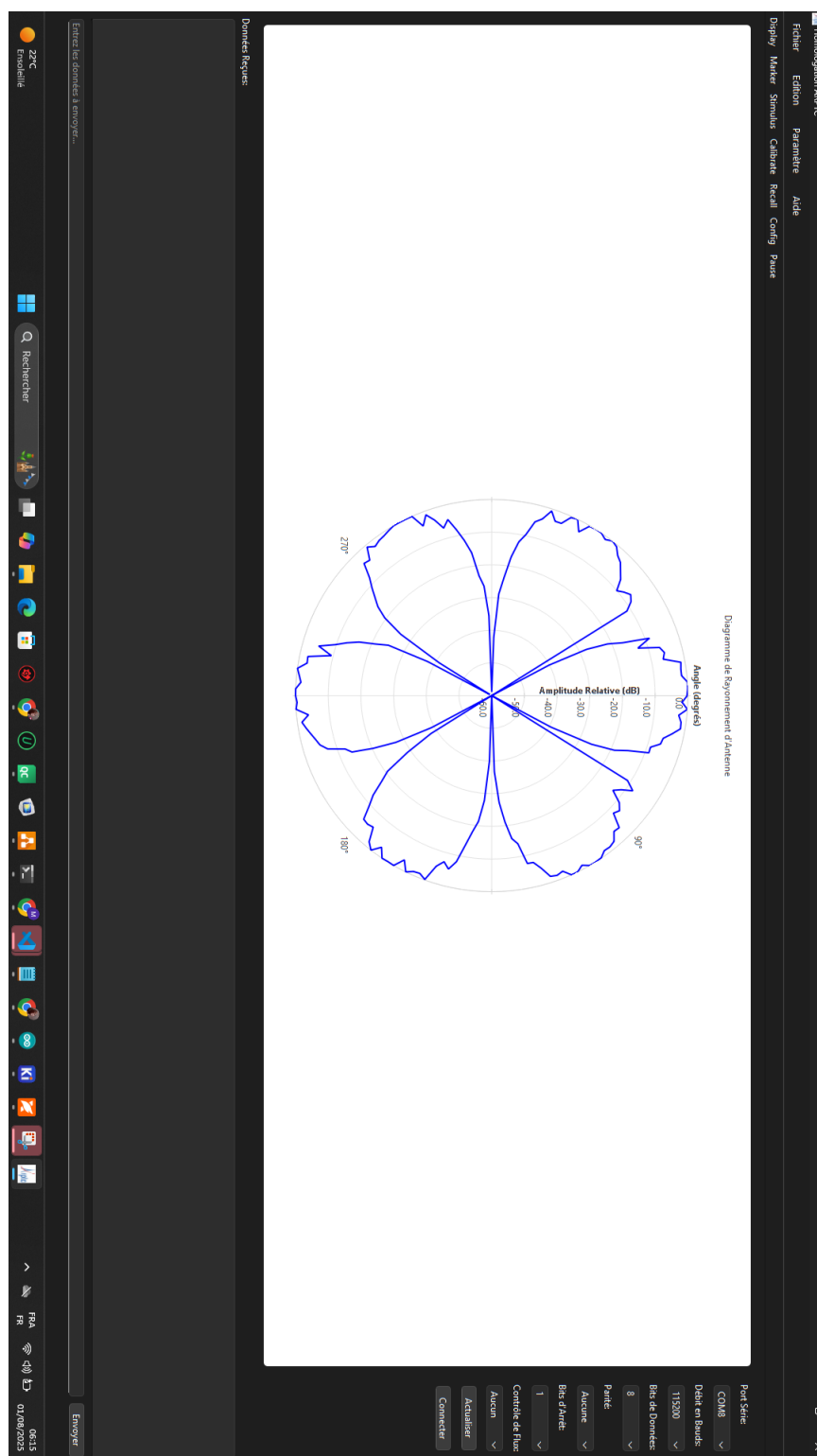


Figure 3.17: Application d'homologation

Le débit de données ou Baud Rate est un paramètre critique qui définit la vitesse à laquelle les bits sont transmis. Il est exprimé en bits par seconde (bps). Afin que la communication soit établie, l'émetteur et le récepteur doivent impérativement être

configurés avec le même débit. Des débits courants incluent 9600 bps, 19200 bps et 115200 bps. Si ce paramètre est mal configuré, le récepteur ne pourra pas interpréter correctement les bits reçus, ce qui entraînera une communication erronée.

Une communication UART est organisée en trames de données (ou Data Frames). Une trame est un paquet de bits qui encapsule les données utiles avec des bits de contrôle. La structure d'une trame standard est la suivante :

- Bit de Start : Il s'agit d'un bit de valeur 0 qui marque le début de la trame. Il sert de signal au récepteur pour lancer sa propre horloge de synchronisation afin de lire les bits suivants.
- Bits de données : Ce sont les bits qui transportent l'information utile. Le nombre de bits de données est généralement de 8, mais il peut aussi être de 7.
- Bit de parité (optionnel) : Ce bit est utilisé pour la détection d'erreurs simples. Le bit est défini de manière à ce que le nombre total de bits à 1 dans la trame (y compris le bit de parité) soit pair (parité paire) ou impair (parité impaire).
- Bit(s) de Stop : Ce sont un ou deux bits de valeur 1 qui signalent la fin de la trame. Ils permettent de remettre la ligne à son état de repos.

La figure 3.18 une représentation schématique d'une trame de données UART :

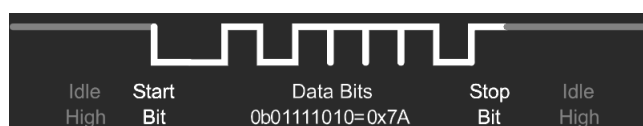


Figure 3.18: Trame UART

La ligne de communication, au repos, est maintenue à un niveau logique haut (1). La trame commence par un changement d'état vers le bas (0), ce qui active le récepteur.

En associant le tout, nous obtenons un analyseur des réseaux vectoriel (ARV) dédié, en anglais Vectorial Network Analyser(VNA) pour l'homologation des systèmes RADAR.

3.4 . Conclusion partielle

Ce chapitre détaille la mise en œuvre pratique de notre système d'aide à l'homologation des systèmes radars, en s'appuyant sur les spécifications et la conception élaborées

précédemment. Nous y explorerons les choix matériels et logiciels fondamentaux, depuis la conception de la chambre anéchoïque jusqu'à la mise en place du circuit d'acquisition des signaux RF et le développement de l'interface logicielle, en passant par les simulations nécessaires à la validation de notre approche.

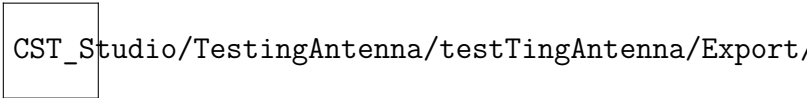
CHAP 4 TESTS & INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DU SYSTÈME

4.1 . Introduction partielle

Ce chapitre est dédié à la validation de notre système d'homologation à travers une série de tests rigoureux. Nous y présenterons les procédures de mesure RF effectuées au sein de la chambre anéchoïque, notamment l'acquisition des diagrammes de rayonnement et l'analyse de la compatibilité électromagnétique (CEM) conformément à la norme CISPR 25. L'interprétation des résultats obtenus permettra d'évaluer la performance et la conformité de l'équipement sous test, fournissant ainsi une validation concrète de l'outil développé.

4.2 . Test d'homologation

Nous allons commencer par récupérer des mesures RF. De ce fait, nous utiliserons le logiciel CST Studio comme simulateur d'Antenne. Dans notre cas de figure l'antenne sera notre équipement sous test, en anglais **Équipement Under Test (EUT)**[28]. L'antenne devra être placé dans la chambre anéchoïque et se verra générer un signal de test. Le signal de test est représenté dans la figure 4.3



CST_Studio/TestingAntenna/testTingAntenna/Export

Figure 4.1: Antenne en zone de test

Au sein du logiciel CST Studio, nous allons placer une antenne cornet(voir figure 4.1), car le dispositifs radar vu sur terrain était constitué de deux antennes cornets, un jouant le role d'émetteur et l'autre jouant le rôle de récepteur.

Au tout debut, nous aurons à spécifier la fréquence de fonctionnement de l'antenne, comme nous spécifie la figure 4.2.

La gamme de fréquence utilisée environne les 10GHz(spécifique aux recommanda-tion de l'UIT sur l'utilisation des ondes radio comme onde de détection radar), dans

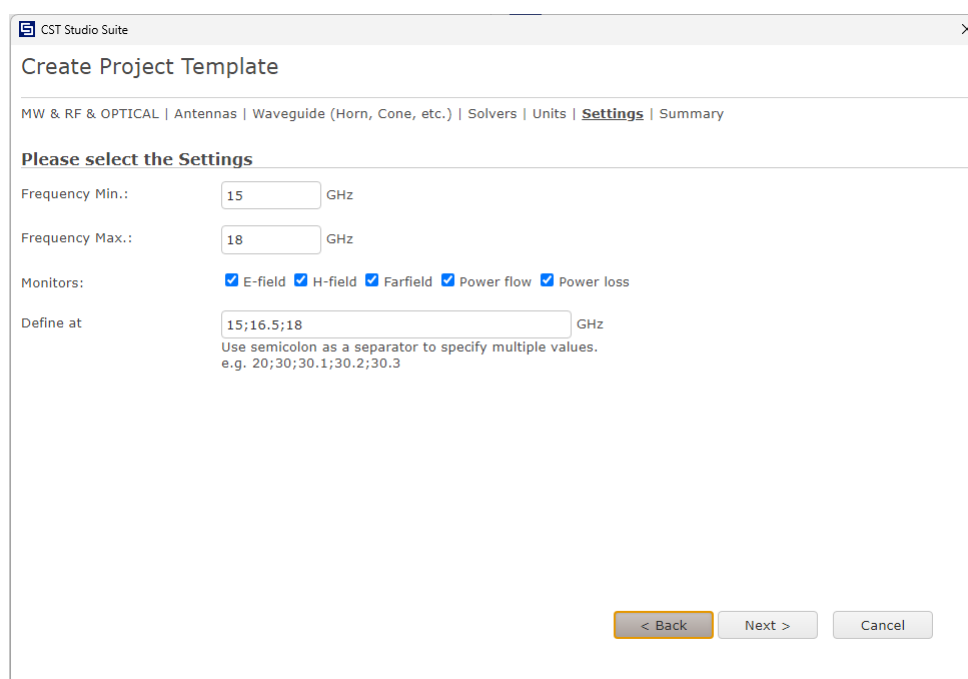


Figure 4.2: Fréquence de fonctionnement de l'antenne

notre cas nous sommes entre 15GHz et 18GHz comme le spécifie le tableau ???. Nous pouvons visualiser le signal en 3D dans CST Studio comme nous montre la figure 4.4

Nous allons de ce fait récupérer les données du diagramme de rayonnement de l'EUT dans un fichier et fournir ce dernier à notre logiciel d'homologation.

Ceci étant fait, nous lançons notre application et sélectionnons, à l'onglet *Paramètres*, l'option *Puissance mètre*. Nous obtenons l'image décrite par la figure 4.5.

Avec le logiciel CST Studio, il est possible de réaliser le test CEM, de ce fait nous irons dans l'onglet Post-processing, dans la barre d'outils, nous choisirons EMC Workflow dans l'option EMC Standard Limits. Nous serons sur une boîte de dialogue suivante :

Nous choisissons la norme CISPR 25 RE TEM, qui est la norme appropriée pour les équipements radars, et la classe 1.

Une fois lancé la simulation, nous avons le diagramme suivant décrit par la figure 4.7. Ce diagramme est un graphique de mesures de compatibilité électromagnétique (CEM), très probablement lié à des tests d'émissions ou d'immunité radiofréquence. Il permet d'analyser le comportement d'un équipement sur différentes bandes de fréquences.

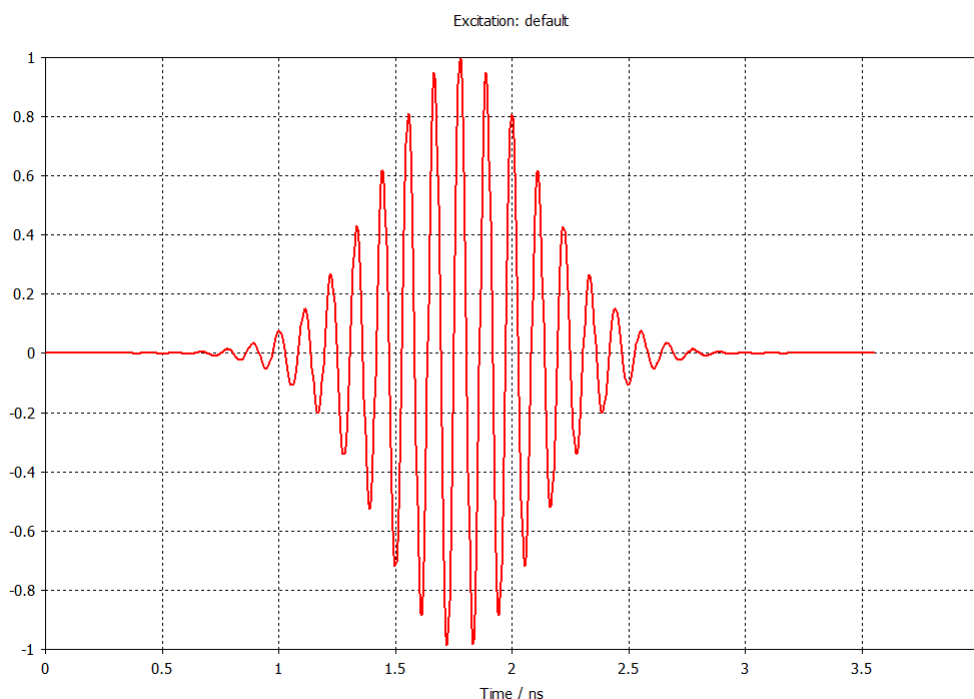


Figure 4.3: Signal test

CST_Studio/TestingAntenna/testTingAntenna/Export/

Figure 4.4: Diagramme de rayonnement de l'EUT

4.3 . Interprétation du diagramme de test CEM

Après tests nous avons procéder à récolter les mesures suivantes

Types de mesures

- AVG-Band (Average Band) : Représente les mesures de valeur moyenne.
- Peak-Band (Peak Band) : Représente les mesures de valeur de crête (le maximum instantané).
- QP-Band (Quasi-Peak Band) : Représente les mesures de quasi-crête, qui sont souvent utilisées dans les normes CEM pour évaluer l'impact des interférences sur les récepteurs humains (elles sont moins sensibles aux bruits impulsifs que les mesures de crête pures).

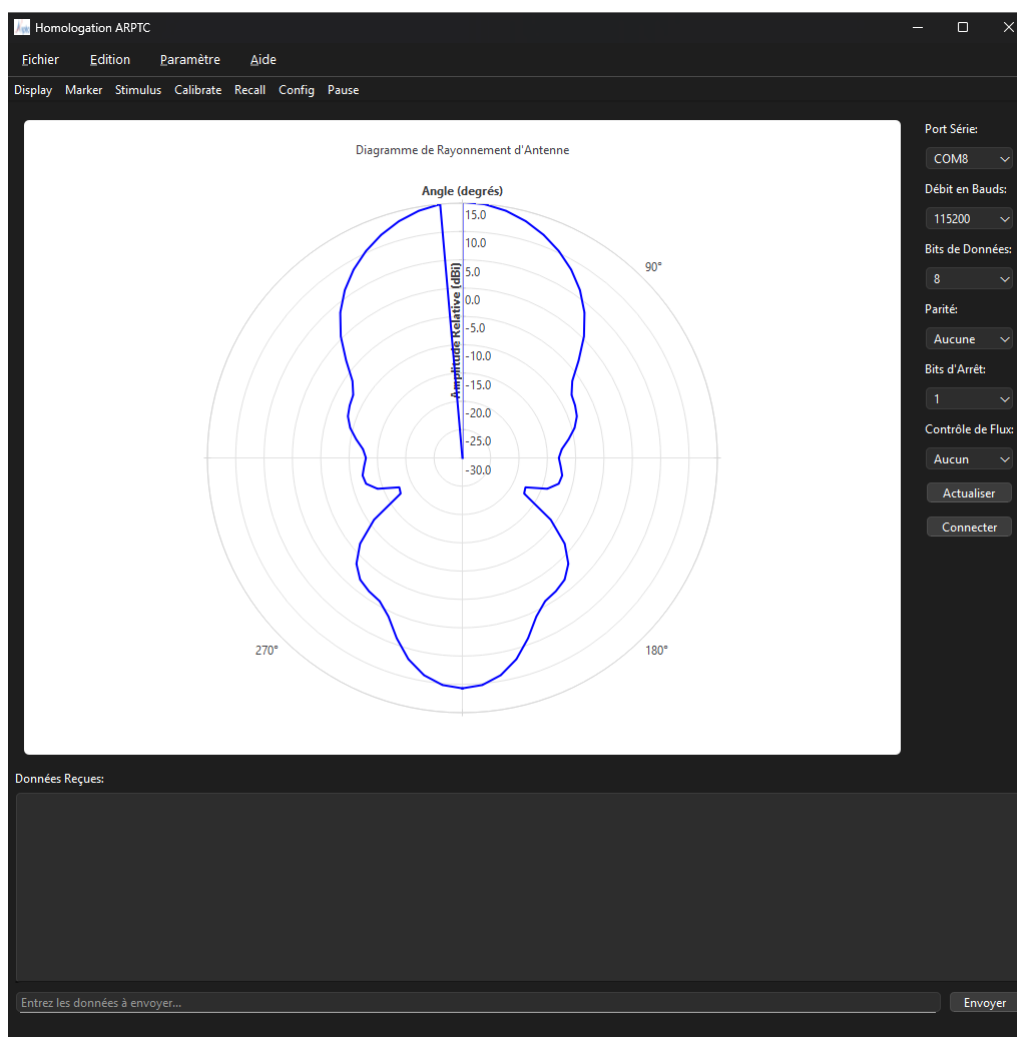


Figure 4.5: Diagramme de rayonnement en mode Puissance mètre

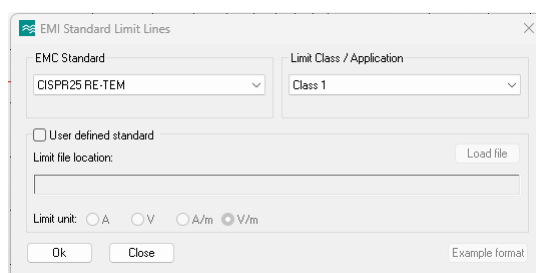


Figure 4.6: Interface de paramétrage pour test CEM

Sources potentielles d'interférences

Les sources potentielles d'interférences sont les bandes de fréquences où les niveaux de magnitude (dB(V/m)) sont les plus élevés, en particulier pour les mesures "Peak" (crête) et "QP" (quasi-crête), car ce sont souvent ces valeurs qui sont comparées aux limites réglementaires.

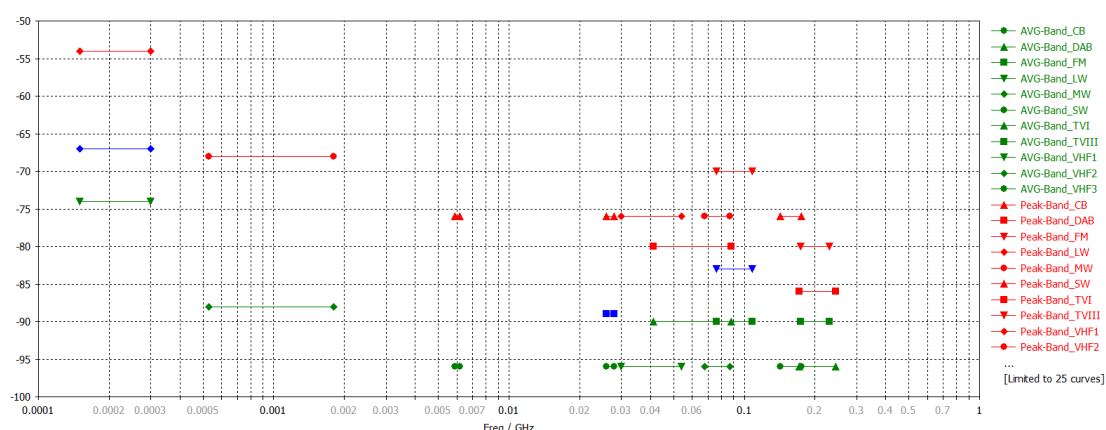


Figure 4.7: Interface de paramétrage pour test CEM

Niveaux d'émission de l'équipement

Les niveaux d'émission sont la magnitude du champ électromagnétique mesurée en dB(V/m) pour chaque bande et chaque type de détection. Voici une synthèse des niveaux observés dans le graphique :

4.3.1 . Analyse des niveaux d'émission

Nous allons commencer par analyser la puissance rayonnée par l'équipement, comme nous le présente la figure 4.8.

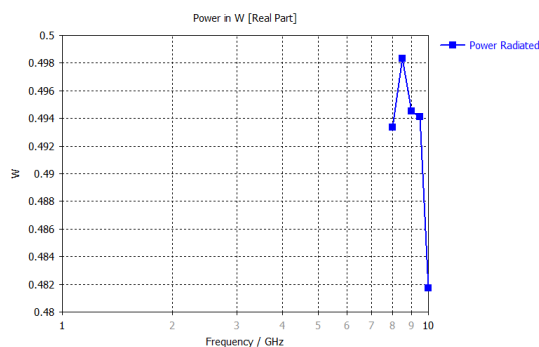


Figure 4.8: Puissance rayonnée durant le test CEM

Ce graphique de la figure 4.8 illustre la puissance rayonnée (en Watts, partie réelle) en fonction de la fréquence (en GHz). Il montre que la puissance rayonnée est relativement stable autour de 0.493 W sur une large gamme de fréquences (de 1 GHz à environ 8 GHz). Un pic d'émission très net est observé juste en dessous de 9 GHz, où la puissance atteint près de 0.498 W. Après ce pic, la puissance diminue

brusquement. Ce graphique indique les fréquences d'opération principales de l'EUT (le radar lui-même).

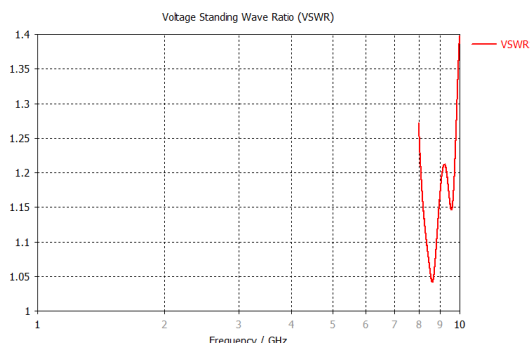


Figure 4.9: VSWR durant le test CEM

La figure 4.9 quand à elle illustre le rapport d'onde stationnaire de tension (VSWR) durant le test CEM. Il montre que le VSWR reste généralement en dessous de 2:1 sur la plupart des bandes de fréquence, ce qui est considéré comme acceptable pour une bonne adaptation d'impédance. Cependant, des pics occasionnels au-dessus de 2:1 sont observés, en particulier autour de 9 GHz, ce qui pourrait indiquer des problèmes d'adaptation d'impédance à ces fréquences.

Les graphiques de la figure 4.10 montrent les niveaux d'émission pour trois types de mesures : moyenne (AVG), crête (Peak) et quasi-peak (QP). Le niveau d'émission moyen stable d'environ -74 dB(V/m) entre 0.0001 GHz (100 kHz) et 0.0003 GHz (300 kHz). et le niveau de crête de l'émission dans cette même bande est plus élevé, atteignant environ -54 dB(V/m). La différence significative entre les valeurs moyennes et de crête peut suggérer la présence de signaux impulsifs ou de bruit importants dans cette bande. Le niveau quasi-peak est légèrement plus bas que le niveau de crête, mais reste supérieur au niveau moyen, ce qui est typique pour les mesures CEM.

4.4 . Rapport d'analyse

Le rapport d'analyse présente une évaluation détaillée des résultats des tests de rayonnement et de compatibilité électromagnétique (CEM) effectués sur l'équipement radar. Les données recueillies ont été analysées pour déterminer la conformité de l'équipement aux normes en vigueur.

Les graphiques et tableaux inclus dans ce rapport fournissent une vue d'ensemble des performances de l'équipement, mettant en évidence les points forts et les domaines nécessitant des améliorations. Les résultats montrent que l'équipement fonctionne

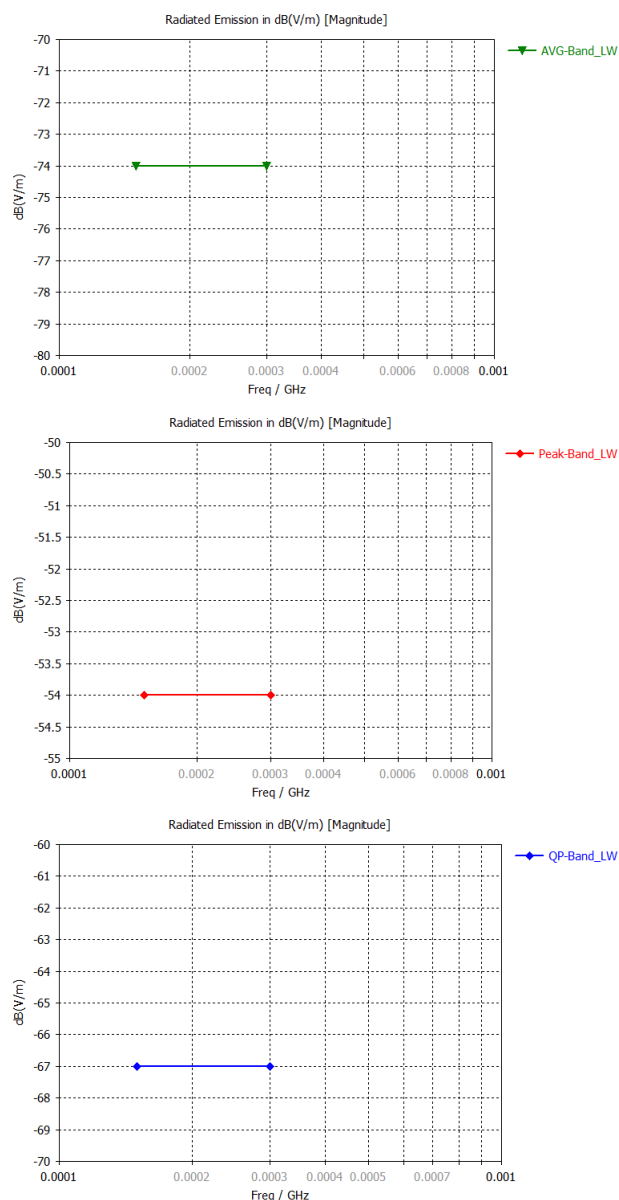


Figure 4.10: Niveaux d'émission durant le test CEM

dans les limites acceptables pour la plupart des bandes de fréquence, bien que des pics d'émission aient été observés à certaines fréquences.

En effet l'annexe 2 présente le modèle de rapport après test, qui peut être utilisé comme référence pour les futurs tests de conformité.

L'annexe 3 fournit le modèle de rapport que le technicien de l'ARPTC devra remplir et fournir au demandeur.

L'annexe 4 présente le modèle de rapport que le demandeur devra remplir et fournir à l'ARPTC.

4.5 . Aspect Budgétaire

4.5.1 . Coûts Initiaux et d'Investissement (Infrastructure et Équipement)

- Chambre Anéchoïque (pour tests CEM et RF) : La construction et l'installation d'une chambre anéchoïque de petite à moyenne taille (environ $7 \times 7 \text{m}^2$) représentent un investissement majeur.

Estimation : 108000 à 1080000 USD (ou plus pour des installations très sophistiquées). Ce coût inclut la cage de Faraday, les matériaux absorbants (dièdres pyramidaux), l'installation et l'intégration.

Les matériaux absorbants seuls (nos 58 panneaux TSA-200PI).

Estimation des matériaux seuls : 32400 à 108000 USD.

- Équipements de Mesure RF (Composants du VNA dédié) :

Les modules électroniques de base :

- Module LTC5510 (mélangeur RF) : Environ 54 à 216 USD par unité.
- Module ADF4351 (synthétiseur de fréquence) : Environ 32 à 162 USD par unité.
- Amplificateur logarithmique AD8317 : Environ 11 à 54 USD par unité.

Si l'ARPTC optait pour un Analyseur de Réseau Vectoriel (VNA) professionnel tout-en-un du marché, les prix sont bien plus élevés :

Estimation VNA professionnel : 10800 (entrée de gamme) à 540000 USD ou plus (haut de gamme/laboratoire).

Estimation VNA professionnel : 10800 (entrée de gamme) à 540000 USD ou plus (haut de gamme/laboratoire).

4.5.2 . Coûts des Licences Logicielles

Les logiciels spécialisés sont souvent soumis à des licences coûteuses, surtout pour un usage professionnel.

- Qt Creator (licence commerciale) : Estimation : De quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de dollars USD par développeur/poste par an. (Ex: 5000 à 30000 USD).

- CST Studio Suite (pour simulation RF/CEM) : Estimation : 32400 à 108000 USD ou plus par an pour une suite complète.
- COMSOL Multiphysics (pour modélisation de chambre anéchoïque) : Estimation : 10800 à 54000 USD par an (selon les modules).
- Antenna Magnus : Estimation de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de dollars USD. (Ex: 2000 à 20000 USD).
- KiCAD : Généralement gratuit (logiciel open-source).
- Total estimé pour l'acquisition initiale de licences logicielles (pour plusieurs postes/modules) : 108000 à 540000 USD et au-delà.

4.5.3 . Coûts de Formation et de Compétence

- Formation des ingénieurs et techniciens :
Estimation : 2160 à 10800 USD par personne pour des formations spécialisées et certifiantes (ex: CST, COMSOL, Qt).
- Formation continue et mise à jour des compétences :
Estimation : 1080 à 5400 USD par an par personne.

4.5.4 . Coûts Opérationnels et de Maintenance Annuels

- Maintenance de la chambre anéchoïque :
Estimation : 5400 à 21600 USD par an (nettoyage, recalibrage, remplacement de matériaux absorbants).
- Maintenance des équipements de mesure RF :
Estimation : 5400 à 32400 USD par an (calibration, réparations, mises à jour logicielles).
- Coûts des licences logicielles (renouvellement) :
Estimation : 32400 à 108000 USD par an.
- Coûts de fonctionnement divers (énergie, espace, etc.) :
Estimation : 5400 à 21600 USD par an.

4.5.5 . Récapitulatif Global (Estimations Larges en USD)

- Investissement Initial Total (hors R&D interne) :

Entre 216000 et 2160000 USD (voire plus), selon l'ampleur et le niveau de sophistication des installations et des équipements achetés.

- Coûts Annuels d'Opération et de Maintien :

Entre 43200 et 162000 USD (voire plus), principalement pour la maintenance, la calibration et les licences logicielles.

Ces estimations en dollars américains confirment que l'investissement nécessaire est conséquent, mais qu'il est justifié par les retombées positives en termes de sécurité, de productivité et de conformité réglementaire pour un secteur économique aussi vital que l'exploitation minière en RDC.

4.6 . Conclusion partielle

Pour conclure, ce chapitre a démontré la capacité opérationnelle de notre système d'homologation en présentant les résultats des tests de rayonnement et de compatibilité électromagnétique (CEM). Les diagrammes générés et leur interprétation ont permis de confirmer le respect des normes, mettant en évidence les performances de l'équipement radar sous test. Ces résultats valident l'efficacité de l'outil développé, soulignant son potentiel à assister l'ARPTC dans le processus d'homologation des systèmes radars miniers et à garantir leur conformité.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a abordé une problématique cruciale pour la République Démocratique du Congo : l'absence d'un outil d'aide à l'homologation des systèmes radars spécifiquement exploités dans les sites miniers par l'Autorité de Régulation de la Poste et des Télécommunications au Congo (ARPTC). Face aux risques d'accidents liés aux mouvements de terrain dans les exploitations minières et à la nécessité de garantir la conformité et la sécurité des équipements radars utilisés, notre étude a proposé une solution concrète et innovante.

Nous avons débuté par une étude approfondie de l'existant, en présentant les cadres opérationnels de l'entreprise minière MMG Kinsevere et de l'ARPTC, tout en analysant les défis actuels du processus d'homologation. Cette phase a permis de spécifier les besoins fonctionnels et non fonctionnels de notre futur système, jetant ainsi les bases de sa conception.

La conception de l'outil d'homologation s'est appuyée sur des méthodologies robustes, telles que le modèle en V et l'approche Model Based Design (MBD), pour traduire ces besoins en une architecture détaillée. Nous avons défini les diagrammes d'exigences, de cas d'utilisation et d'activités, et conçu une interface homme-machine intuitive, préparant ainsi le terrain pour la phase d'implémentation.

L'implémentation du système a été minutieusement décrite, couvrant les aspects matériels et logiciels. La conception et la simulation d'une chambre anéchoïque adaptée, ainsi que le développement d'un analyseur de réseaux vectoriel (VNA) dédié, intégrant des composants clés tels que les mélangeurs de fréquences, les oscillateurs locaux et les amplificateurs logarithmiques, ont constitué le cœur de cette réalisation technique. L'application logicielle, développée avec Qt Creator, assure l'acquisition, le traitement et la visualisation des données, notamment via la mise en œuvre de la transformée de Fourier rapide (FFT) et la gestion de la communication UART.

Enfin, les tests et l'interprétation des résultats ont démontré la capacité opérationnelle de notre outil. En simulant des mesures RF et des tests de compatibilité électromagnétique (CEM) selon la norme CISPR 25, nous avons validé la pertinence des données obtenues (émissions rayonnées en ondes longues, moyennes, courtes,

énergie du champ, puissance rayonnée) et leur interprétation au regard des critères de performance (A, B, C, D). Ces essais confirment que l'outil développé est apte à évaluer la conformité et les performances radiofréquences des équipements radars, contribuant ainsi à la sécurité des opérations minières.

Ce travail ouvre des perspectives significatives pour l'ARPTC, en lui fournissant un cadre méthodologique et un outil pratique pour l'homologation des systèmes radars, garantissant le respect des normes nationales et internationales. Comme perspectives d'avenir, nous envisageons

- Développement et Validation d'un Prototype Physique Robuste La première et la plus cruciale des perspectives serait de passer de la simulation à la réalisation concrète d'un prototype physique de l'analyseur de réseaux vectoriel (VNA) dédié et de la chambre anéchoïque.
 - Tests en conditions réelles : Soumettre le prototype à des tests exhaustifs non seulement en laboratoire, mais aussi dans des environnements contrôlés qui simulent les conditions minières (température, humidité, vibrations, poussière).
 - Fiabilité et durabilité : Optimiser la conception matérielle pour garantir une robustesse et une fiabilité à long terme, essentielles pour un outil destiné à un usage industriel et réglementaire.
 - Calibration avancée : Développer des procédures de calibration plus poussées et potentiellement des mécanismes d'auto-calibration pour maintenir la précision des mesures sur le temps.
- Amélioration de l'Expérience Utilisateur et de l'Intelligence de l'Interface (IHM) L'interface logicielle développée avec Qt Creator est une base solide. Les perspectives ici se concentrent sur la rendre encore plus accessible et "intelligente" :
 - Simplification des rapports : Intégrer des modules de génération de rapports qui traduisent les données techniques complexes en des résumés clairs et des indicateurs visuels de conformité pour les non-experts (décideurs, exploitants miniers).
 - Aide à la décision intégrée : Ajouter des fonctionnalités d'analyse automatique des résultats, qui pourraient par exemple mettre en évidence les points de non-conformité, suggérer des actions correctives ou générer des alertes spécifiques.

- Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique : Explorer l'intégration de l'IA pour l'identification automatique des signatures d'interférences, la prédiction des défaillances d'équipements, ou même l'optimisation des procédures de test basées sur les données historiques.
- Gestion Avancée des Données et Intégration Systèmes Pour une traçabilité et une utilisation optimale des données, il serait essentiel de :
 - Déploiement d'une base de données sécurisée : Mettre en place un système de gestion de base de données robuste pour archiver toutes les données d'homologation (rapports, mesures brutes, historique des équipements) de manière sécurisée et accessible.
 - Intégration avec les systèmes de l'ARPTC : Développer des API ou des connecteurs pour que l'outil d'homologation puisse s'intégrer fluidement avec d'autres systèmes de l'ARPTC (gestion des licences, suivi des réglementations, etc.).
 - Tableaux de bord et statistiques : Créer des tableaux de bord interactifs pour l'ARPTC, permettant de visualiser les tendances d'homologation, les types de non-conformité les plus fréquents, ou l'état général du parc d'équipements radars.
- Extension de la Portée Réglementaire et Technologique Le travail se concentre sur les radars miniers, mais il pourrait être élargi :
 - Tests de sécurité électrique approfondis : Comme mentionné en conclusion, l'implémentation complète des tests de sécurité électrique est une perspective directe pour offrir une solution d'homologation exhaustive.
 - Autres équipements radioélectriques miniers : Adapter l'outil pour l'homologation d'autres systèmes de communication critiques utilisés dans les mines (radios PMR, systèmes IoT, etc.).
 - Harmonisation Internationale : Poursuivre les efforts pour s'assurer que les méthodes et les normes d'homologation utilisées par l'ARPTC sont non seulement conformes aux normes nationales, mais aussi en phase avec les meilleures pratiques et réglementations internationales (UIT, ETSI, FCC), facilitant ainsi le commerce et l'adoption de technologies.
- Modèle Économique et Partenariats Stratégiques Au-delà des coûts, les perspectives incluent la valorisation économique du projet :

- Partenariats Public-Privé : L'ARPTC pourrait envisager des partenariats avec des entreprises spécialisées dans la fabrication d'équipements de test ou des instituts de recherche pour la production et la maintenance de l'outil.
- Services d'expertise : Le centre d'homologation de l'ARPTC pourrait proposer ses services à d'autres pays ou régions confrontés à des défis similaires, devenant un pôle d'expertise en Afrique.

Ce projet constitue également une référence pour les entreprises minières et les futurs chercheurs, soulignant l'importance de la rigueur scientifique et de l'innovation technologique pour la sécurité et le développement durable du secteur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R&S®PR100 Portable Receiver.
- [2] Ieee recommended practice for radio-frequency (rf) absorber evaluation in the range of 30 mhz to 5 ghz. *IEEE Std 1128-1998*, pages 1–68, 1998.
- [3] *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Part 1-4, Radio disturbance and immunity measuring apparatus: antennas and test sites for radiated disturbance measurements*. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, edition 3.2 edition, 2017. OCLC: 1039712715.
- [4] *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Part 1-4, Radio disturbance and immunity measuring apparatus: antennas and test sites for radiated disturbance measurements*. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, edition 3.2 edition, 2017. OCLC: 1039712715.
- [5] ZITOUNI Ahmed. Destiné aux étudiants de la 1ère Master en Télécommunications Spécialité : Systèmes des Télécommunications.
- [6] Renishaw Apply innovation. Explication de l’interférométrie. <https://www.renishaw.com/fr/explication-de-linterferometrie-7854>, 2010.
- [7] Younes Ben Mazzianea, Sara Aloufa, Giovanni Negliaa, and Daniel S. Menascheb. Ttl model for an lru-based similarity caching policy. *BASIC EMC PUBLICATION*, 4-3(02), 2006.
- [8] Eric Bernuchon. Optimisation de diodes Schottky pour les applications THz.
- [9] Rodolphe Boudot. OSCILLATEURS MICRO-ONDES A HAUTE PURETE SPECTRALE.
- [10] République Démocratique du Congo Cabinet du Président de la République. Loi n°015/2002 du 16 octobre 2002 portant sur le code du travail. *JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO*, 43(15), 2002.

-
- [11] République Démocratique du Congo Cabinet du Président de la République. Loi n°20/017 du 25 novembre 2020 relative aux télécommunications et aux technologies de l'information et de la communication. *JOURNAL OFFICEL DE LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO*, 17(20), 2021.
 - [12] Saliha Chetouani. Développement d'une approche méthodologique de gestion de l'obsolescence des composants pour la CEM.
 - [13] Analog Device. Downconverter rf.
 - [14] Analog Device. logarithmic amplifier.
 - [15] Analog Device. Voltage controlled oscillator.
 - [16] Anne-Sophie Bonnet-Ben Dhia and Éric Lunéville. Propagation dans les guides d'ondes.
 - [17] G Ferroux and L Barbillion. Les moteurs à courant continu.
 - [18] IDS GeoRadar. Cours de formation des utilisateurs d'ibis pour ibis fm.
 - [19] Dominic Grenier. Antennes et Propagation radio.
 - [20] MMG Kinsevere. Company overview. "<https://www.mmg.com/our-business/kinsevere/>", 2022.
 - [21] François LEMAITRE, Jean-Claude POUSSIERE, Jean-Paul DURANTHON, and Laurent EFFENDIANTZ. Utilisation du radar sol pour la surveillance des mouvements de terrain. *BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 249(4437), 2004.
 - [22] Alain Liégeois. Amplificateurs logarithmiques à transistors M.O.S. pour instrumentation spatiale. *Rev. Phys. Appl. (Paris)*, 2(2):145–152, 1967.
 - [23] ManagerGo. Cycle en v en gestion de projet. "<https://www.manager-go.com/gestion-de-projet/cycle-en-v.htm>", 2022.
 - [24] Nancy MASANGU MANDA. Gestion des dispositifs iot dans les réseaux électriques intelligents avec powershell. 2024.
 - [25] PTC. Définition basée sur le modèle. "<https://www.ptc.com/fr/technologies/cad/model-based-definition>", 2022.

- [26] Masoud Roodaki-Lavasani-Fard, Reza Faraji-Dana, Karim Mohammadpour-Aghdam, and Guy A. E. Vandenbosch. Radiation-based figure of merit for environmental sensitivity analysis of mobile phone antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 66(2):35–42, 2024.
- [27] Siepel. *Chambre d’essai*.
- [28] International STANDARD. Iec 61000-4-3 : Electromagnetic compatibility (emc) – part 4-3: Testing and measurement techniques – radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. *BASIC EMC PUBLICATION*, 4-3(02), 2006.
- [29] Ryszard G. Struzak. CISPR Quasi-Peak Measuring Channels with Extended Dynamic Range. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, EMC-20(3):361–367, August 1978.
- [30] SysML. Utilisation de sysml pour la modélisation des réseaux de capteurs. "<https://www.sysml.org/>", 2022.
- [31] TESTUPS. Broadband microwave polyurethane pyramidal absorber-tsa. "<https://www.testups.com/fr/absorbeurs-rf/>", 2010.
- [32] Damien VIVET. Perception de l’environnement par radar hyperfréquence. application à la localisation et la cartographie simultanées, à la détection et au suivi d’objets mobiles en milieu extérieur. Master’s thesis, UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II, 2011.
- [33] Zacharie WAMBULA BIMPA. Cas de force majeure dans le secteur minier congolais: Risques, responsabilite des acteurs et approche d’évaluation. Master’s thesis, Université Senghor, 2021.

ANNEXES

Annexe 2

Rapport de Test de Compatibilité Électromagnétique
(CEM)

Nom de l'organisme de test

10 août 2025

Table des matières

1 Informations Générales 1

1.1 Équipement Sous Test (EUT) 1

1.2 Détails du Test 1

2 Test de Performance en Radiation 2

2.1 Méthode de test 2

2.2 Équipement de mesure 2

2.3 Résultats de la puissance rayonnée 2

2.4 Résultats du VSWR et des paramètres S 3

2.5 Conclusion du test de radiation 3

3 Test de Compatibilité Électromagnétique (CEM) 3

3.1 Test d'émission rayonnée (Norme CISPR 25) 3

3.2 Test d'immunité aux champs électromagnétiques (Norme IEC 61000-4-3) 4

3.3 Conclusion du test CEM 4

4 Conclusion Générale 4

1 Informations Générales

1.1 Équipement Sous Test (EUT)

- Nom de l'EUT :
- Modèle :
- Numéro de série :
- Fabricant :
- Version du logiciel/firmware :

1.2 Détails du Test

- Date des tests :
- Lieu des tests :

- Normes appliquées : IEC 61000-4-3, CISPR 25, [Autres normes si applicable]
- Environnement de test :

2 Test de Performance en Radiation

2.1 Méthode de test

Ce test évalue la puissance rayonnée et d'autres paramètres de performance de l'EUT, tels que le VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) et les paramètres S, sur une gamme de fréquences. La configuration du test est conforme aux exigences de la norme **CISPR 25** (dans la plage de fréquences pertinente) et aux spécifications du fabricant.

2.2 Équipement de mesure

- Nom de l'équipement :
- Modèle :
- Numéro de série :
- Date de calibration :

2.3 Résultats de la puissance rayonnée

La puissance rayonnée de l'EUT a été mesurée dans la bande de fréquences **1 GHz à 10 GHz**. Le graphique ci-dessous illustre les résultats. Un pic de puissance rayonnée d'environ 0.498 W a été observé autour de **8.5 GHz**.

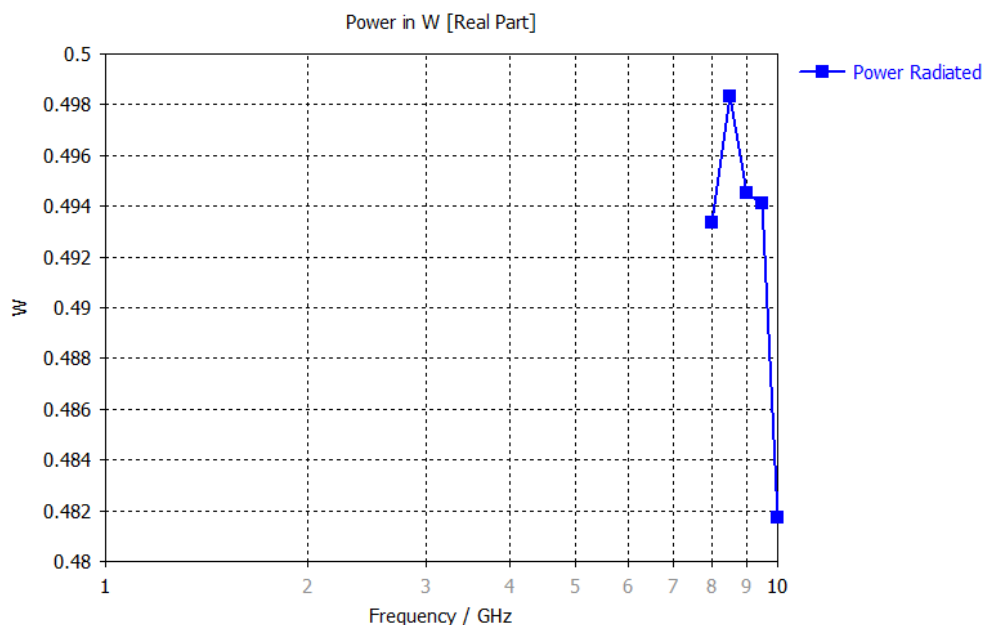
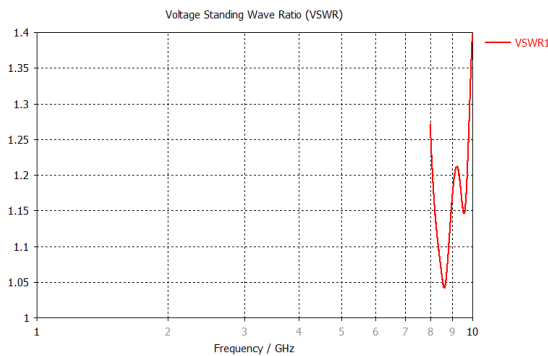


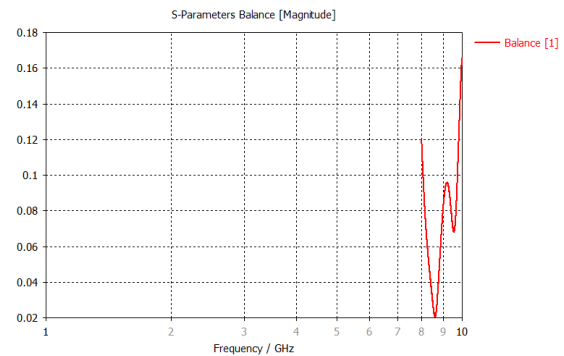
FIGURE 1 – Puissance rayonnée de l'EUT en fonction de la fréquence.

2.4 Résultats du VSWR et des paramètres S

Le **VSWR** et le **Balance S-Parameters** ont été mesurés afin d'évaluer l'adaptation d'impédance et la performance de l'EUT. Un VSWR faible est souhaitable pour une transmission de puissance efficace. Le VSWR minimum observé est d'environ **1.04**, ce qui indique une excellente adaptation d'impédance à la fréquence de résonance de l'EUT, qui est située à environ **8.5 GHz**.



(a) Voltage Standing Wave Ratio (VSWR)



(b) Balance des paramètres S

FIGURE 2 – Résultats des mesures de VSWR et de la balance des paramètres S de l'EUT.

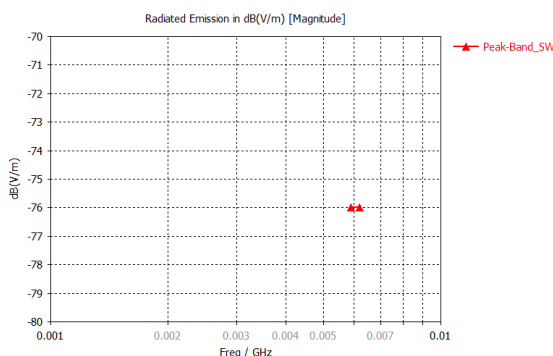
2.5 Conclusion du test de radiation

L'EUT démontre une performance de radiation optimale autour de **8.5 GHz**, avec un pic de puissance et une adaptation d'impédance (VSWR et S-Parameters) favorable.

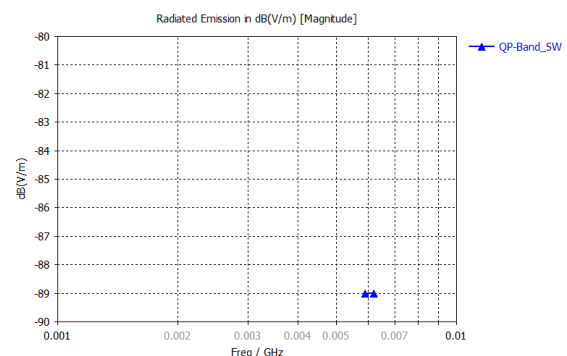
3 Test de Compatibilité Électromagnétique (CEM)

3.1 Test d'émission rayonnée (Norme CISPR 25)

Ce test mesure les émissions rayonnées de l'EUT, crucial pour les applications automobiles. Les mesures ont été réalisées conformément à la norme ****CISPR 25****. Les graphiques ci-dessous montrent les niveaux d'émissions mesurés en mode ****Peak****, ****Quasi-Peak (QP)**** et ****Moyenne (AVG)**** dans la bande de fréquences de **0.001 GHz à 0.01 GHz**.



(a) Émission en mode Peak



(b) Émission en mode Quasi-Peak

FIGURE 3 – Résultats des émissions rayonnées selon la norme CISPR 25.

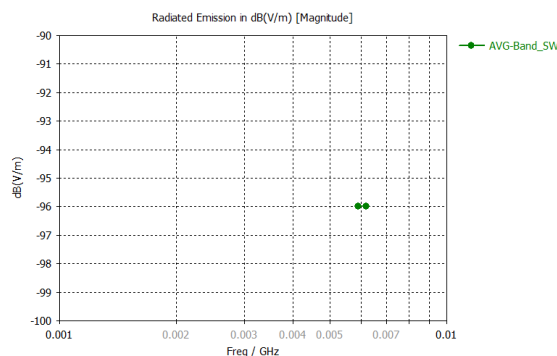


FIGURE 4 – Émission en mode moyenne (AVG) selon la norme CISPR 25.

Les valeurs d'émissions mesurées sont les suivantes :

- **Peak** : Environ **-76 dB(V/m)**
- **Quasi-Peak (QP)** : Environ **-89 dB(V/m)**
- **Moyenne (AVG)** : Environ **-96 dB(V/m)**

Ces valeurs sont considérablement inférieures aux limites typiques de la norme CISPR 25, ce qui indique une bonne performance de l'EUT en matière de compatibilité électromagnétique.

3.2 Test d'immunité aux champs électromagnétiques (Norme IEC 61000-4-3)

Ce test évalue l'immunité de l'EUT aux champs électromagnétiques rayonnés. Les tests ont été menés selon la norme **IEC 61000-4-3**.

TABLE 1 – Résultats des tests d'immunité CEM (IEC 61000-4-3)

Fréquence (MHz)	Critère de performance	Observation	Résultat (Pass/Fail)
80 - 1000	A	Aucun dysfonctionnement observé	Pass
...

3.3 Conclusion du test CEM

L'EUT **a passé/n'a pas passé** le test de compatibilité électromagnétique selon les normes IEC 61000-4-3 et CISPR 25. Le critère de performance **A, B, C** a été respecté/non respecté.

4 Conclusion Générale

L'EUT, **[nom de l'EUT]**, a été testé pour sa performance en matière de radiation et d'immunité CEM. Les résultats des tests indiquent que l'EUT est conforme aux exigences des normes spécifiées, notamment la **CISPR 25** pour les émissions rayonnées.

Rédigé par :
 Approuvé par :

Annexe 3

Formulaire de Demande et de Rapport

d'Homologation d'Équipement

Radar Minier - Conformité IEC 61000-4-3

Autorité d'Homologation / ARPTC

10 août 2025

Résumé

Ce document constitue un formulaire de demande et de rapport d'homologation pour un équipement radar minier, en se basant sur les exigences d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques de la norme IEC 61000-4-3 :2010. Il couvre les spécifications de l'équipement, les niveaux et gammes de fréquences d'essai, les configurations et procédures d'essai, ainsi que l'évaluation des résultats, dans le but d'assurer la conformité électromagnétique de l'équipement dans son environnement d'exploitation.

Table des matières

1 Informations Générales sur la Demande	2
2 Informations sur le Demandeur	2
3 Identification de l'Équipement (EST - Équipement Sous Test)	2
4 Spécifications Techniques de l'Équipement	2
4.1 Alimentation Électrique	2
4.2 Interfaces et Connexions	2
4.3 Caractéristiques Radar Spécifiques	2
5 Essais d'Immunité aux Champs Électromagnétiques Rayonnés (IEC 61000-4-3)	3
5.1 Niveaux d'Essai Appliqués et Gammes de Fréquences	3
5.2 Équipement de Test et Configuration	3
5.3 Procédure d'Essai	3
6 Résultats de l'Essai et Évaluation de la Performance	4
6.1 Tableau des Résultats Détaillés par Face et Polarisation	4
6.2 Conclusion des Essais	4
7 Signature et Validation	4

1 Informations Générales sur la Demande

- ☐ **Type de Demande :** Homologation Initiale ☐ Renouvellement ☐ Modification d'Homologation
☐ **Numéro d'Homologation Antérieur (si applicable) :**
☐ **Date de Réception du Dossier :**

2 Informations sur le Demandeur

- **Nom de la Société / Demandeur :**
- **Adresse :**
- **Téléphone :** **Fax :**
- **E-mail :**
- **Personne Responsable du Dossier :**
- **Contact Téléphone :** **Contact E-mail :**

3 Identification de l'Équipement (EST - Équipement Sous Test)

- **Type d'Équipement :** Radar Minier
- **Marque :**
- **Modèle :**
- **Numéro de Série :**
- **Description Fonctionnelle Sommaire :**
- **Environnement d'Installation Prévu (selon Annexe E IEC 61000-4-3) :**
 - Classe 1 (Environnement à rayonnement électromagnétique faible) ☐
 - Classe 2 (Environnement à rayonnement électromagnétique modéré) ☐
 - Classe 3 (Environnement à rayonnement électromagnétique sévère) ☐
 - Classe 4 (Émetteurs-récepteurs portables à moins de 1 m) ☐
 - Classe X (Conditions particulières) :

4 Spécifications Techniques de l'Équipement

4.1 Alimentation Électrique

- **Type d'Alimentation :** CA ☐ DC ☐ Batterie ☐ Autre :
- **Tension Nominale :** V **Fréquence (CA) :** Hz
- **Courant Nominal Max :** A

4.2 Interfaces et Connexions

- **Interfaces d'Alimentation :**
- **Interfaces de Données/Communication :** (ex : Ethernet, RS-485, Fibre Optique)
- **Interfaces de Commande :**
- **Type de Câbles utilisés :** (ex : Blindés, non blindés, paires torsadées, longueur)

4.3 Caractéristiques Radar Spécifiques

- **Fréquence d'Émission du Radar :** MHz / GHz
- **Puissance d'Émission Apparente Rayonnée (PAR) du Radar :** dBm / W
- **Type d'Antenne du Radar :** Intégrée ☐ Externe ☐ (Type :)
- **Autre(s) caractéristique(s) spécifique(s) :**

5 Essais d'Immunité aux Champs Électromagnétiques Rayonnés (IEC 61000-4-3)

5.1 Niveaux d'Essai Appliqués et Gammes de Fréquences

Conformément à l'Article 5 et au Tableau 1 de l'IEC 61000-4-3, les niveaux d'essai suivants ont été sélectionnés et appliqués.

Gamme de Fréquences	Niveau d'Essai (V/m)	Modulation	Notes Spécifiques
80 MHz - 1 000 MHz	.. (Niveau 1, 3, 10, 30, ou X)	80% AM, 1 kHz sinusoïdal	.....
800 MHz - 960 MHz	.....	80% AM, 1 kHz sinusoïdal	.....
1.4 GHz - 6.0 GHz	.....	80% AM, 1 kHz sinusoïdal	.....
Justification des Niveaux d'Essai et Gammes de Fréquences (si déviation par rapport aux classes standards ou spécificités radar) :			
.....			

5.2 Équipement de Test et Configuration

- **Installation d'Essai** : Chambre anéchoïque ☐ Semi-anéchoïque ☐ Autre :
- **Générateur de Signaux RF** : Marque :, Modèle :, S/N :
- **Amplificateur de Puissance RF** : Marque :, Modèle :, S/N :
- **Antenne Émettrice de Champ (selon Annexe B)** :
 - Type : Biconique ☐ Log-périodique ☐ Cornet ☐ Autre :
 - Dernière Calibr. : (Cert. N° :) (.....)
 - Distance Antenne-EST : m (Typiquement 3m, ou 1m pour 1GHz avec méthode des fenêtres)
- **Sonde de Champ Isotropique (selon Annexe I)** : Marque :, Modèle :, S/N :
- **Zone de Champ Uniforme (UFA) (selon 6.2 et Tableau 2)** :
 - Taille de l'UFA : m × m (ex : 1.5m x 1.5m, min 0.5m x 0.5m)
 - Hauteur bord inférieur de l'UFA : 0.8 m
 - Uniformité du champ (points dans ± 6 dB) : % (min. 75% ou 100% pour 0.5x0.5m)
 - Illumination : Globale ☐ Partielle ☐ Méthode des fenêtres indépendantes (1GHz) ☐
- **Disposition du Câblage** : Décrite en Annexe ☐ Longueur des câbles exposés :m

5.3 Procédure d'Essai

- **Conditions Climatiques du Laboratoire** : Température : °C, Humidité Relative : %
- **Conditions Électromagnétiques** : Satisfaisantes ☐ Non Satisfaisantes ☐ (Détails :)
- **Orientation de l'EST durant l'Essai** : (Chaque face exposée, orientations Verticale/Horizontale de l'antenne)
- **Faces de l'EST exposées** : Avant ☐ Arrière ☐ Gauche ☐ Droite ☐ Dessus ☐ Dessous ☐
- **Polarisation de l'Antenne** : Verticale ☐ Horizontale ☐ (Testé pour chaque face)
- **Mode de Fonctionnement de l'EST durant l'Essai** : (ex : En fonctionnement normal, en veille, avec communication active radar)
- **Pas de Fréquence (incrémentiel)** : % de la fréquence précédente (max 1%)
- **Temps de Palier (Dwell time) par Fréquence** : s (min 0.5 s)

6 Résultats de l'Essai et Évaluation de la Performance

Critères de Performance (selon Section 9 IEC 61000-4-3) :

- **A** : Fonctionnement normal sans dégradation.
- **B** : Perte temporaire de fonction ou dégradation, cessant après la perturbation et rétablissement automatique.
- **C** : Perte temporaire de fonction ou dégradation, nécessitant l'intervention d'un opérateur pour le rétablissement.
- **D** : Perte de fonction ou dégradation non récupérable (dommage matériel/logiciel, perte de données).

6.1 Tableau des Résultats Détaillés par Face et Polarisation

Face Testée	Polarisation	Gamme Fréq.	Niveau (V/m)	Résultat (Critère) et Observations/Effets Constatés
Avant	Verticale	.....	.....	.....
	Horizontale	.....	.....	.....
Arrière	Verticale	.....	.....	.....
	Horizontale	.....	.....	.....
Gauche	Verticale	.....	.....	.....
	Horizontale	.....	.....	.....
Droite	Verticale	.....	.....	.....
	Horizontale	.....	.....	.....
Autres Remarques sur l'Évaluation ou Effets sur Fonctionnement Radar Spécifique :				

6.2 Conclusion des Essais

- **Conformité Générale** : L'équipement est conforme aux exigences d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés de l'IEC 61000-4-3 pour les niveaux et conditions spécifiés. ☐ Oui ☐ Non
- **Justification de la Décision (Réussite/Échec)** :
- **Équipement Devenu Dangereux/Dangereux à l'Issue des Tests?** ☐ Oui ☐ Non
- **Conditions Spécifiques d'Utilisation Requises pour la Conformité (si applicable)** :

7 Signature et Validation

- **Nom de l'Organisme / Laboratoire de Test** :
- **Nom du Responsable des Essais** :
- **Signature** :
- **Date** :

Annexe : Photos de la Configuration d'Essai (si disponible)

Figure 1 : Vue d'ensemble de l'EST et des équipements de test

Figure 2 : Détail de la Zone de Champ Uniforme (UFA) et de la sonde

Annexe 4
Formulaire de demande d'homologation d'un équipement RADAR minier

Réceptionné le : _____

Païement frais d'étude du dossier : _____ oui _____ non

Renvoi pour complément d'information le : _____

Nom de l'agent : _____

Demande d'homologation de type d'un équipement RADAR minier

I. Nature de la demande / Purpose of application

- | | |
|---|---|
| (1) Homologation / Approval
Approval | Homologation antérieure / Previous of
Approval |
| (2) Admission temporaire / Temporary approval (AT)
Purpose of Approval : _____ | (3) Finalité de l'AT /
_____ |

I. Informations générales / General informations

- (1) Demandeur / Applicant : _____
- (2) Adresse / Address : _____
- (3) Tél : _____ (7) Fax : _____
- (4) Email : _____
- (5) Personne chargée du dossier : _____
- (6) Tél : _____ (12) E-mail : _____

I. Identification de l'équipement / Equipment ID

- (1) Équipement terminal / Terminal installation
Radioelectric installation
Mixte / Both installation _____ installation radioélectrique /

- (2) Type / Type : _____ (15) N SÉRIE / SN : _____
- (3) Marque / Make : _____
- (4) Modèle / Model : _____
- (5) Constructeur / Manufacturer : _____
- (6) Marquage / Approval label : _____ (18) Pays / Country :

- (7) Homologation du pays d'origine et / ou autres pays / Country of origin approval and / or other
country : _____

I. Caractéristiques de l'équipement / Equipment specifications

- (1) Technologie numérique / Digital technology _____ Technologie analogique / Analog Technology _____
- (2) Fréquence d'émission / Transmit frequency : _____
- (3) Fréquence de réception / Receive frequency : _____
- (4) Largeur de bande des canaux / Channel bandwidth : _____
- (5) Sensibilité : _____
- (6) Programmabilité canaux : _____
- (7) Antenne / Antenna _____ Intégrée / integrated _____ Externe / external _____
- (8) Puissance apparente rayonnée effective / effective radiated power : _____
- (9) Puissance isotropique rayonnée équivalent / equivalent isotropically radiated power : _____
- (10) Puissance de l'émetteur / Transmitter Power : _____

I. Conformité de l'équipement / Compliance of equipment to standard

- (1) Interfaces soumises à l'homologation / Interfaces subject to approval
Spécifications techniques applicables :
(31) Aspect télécommunications : _____
(32) Exigences de compatibilité électromagnétique : _____
(33) Exigences de sécurité électrique : _____

VI. Autres Informations / More Informations

Pays de fabrication de l'équipement et nom du propriétaire de la marque / Country of manufacturing and not the country of the owner of the make : _____

Marquage de conformité à une norme donnée / Approval Label or compliant to given norm : _____

Interface radio ou filaire / radio interface or wire : _____

Normes applicables déclarées de l'équipement / to comply with : _____