



HAL
open science

Analyse des effets électromagnétiques des décharges Corona sur des systèmes sol de communications aéronautiques

Guillaume Dehan

► **To cite this version:**

Guillaume Dehan. Analyse des effets électromagnétiques des décharges Corona sur des systèmes sol de communications aéronautiques. Physique [physics]. Université Toulouse 3 - Paul Sabatier, 2023. Français. NNT: . tel-04669026

HAL Id: tel-04669026

<https://enac.hal.science/tel-04669026>

Submitted on 7 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *Université Toulouse 3 - Paul Sabatier*

Présentée et soutenue le *15 Décembre 2023* par :

Guillaume DEHAN

**Analyse des Effets Électromagnétiques des Décharges Corona sur des
Systèmes Sol de Communications Aéronautiques**

JURY

FARHAD RACHIDI	Professeur	Rapporteur
CHRISTOPHE GUIFFAUT	Chargé de Recherche	Rapporteur
FRANÇOISE PALADIAN	Professeure	Examinatrice
OLIVIER PASCAL	Professeur	Examineur
ALEXANDRE CHABORY	Professeur	Directeur de thèse
HELENE GALIEGUE	Assistante professeure	Invité, Encadrant
FRANCOIS ISSAC	Ingénieur de recherche	Invité, Encadrant

École doctorale et spécialité :

GEETS - Génie Electrique Electronique, Télécommunications et Santé : du système au nanosystème, spécialité: Electromagnétisme et Systèmes Haute Fréquence

Unité de Recherche :

ENAC-LAB - Laboratoire de Recherche ENAC EMA et l'Office Nationale d'Etudes et de Recherches dans l'Aérospatiales (ONERA)

Directeur de Thèse :

Alexandre CHABORY

Rapporteurs :

Farhad RACHIDI et Christophe GUIFFAUT

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers mes encadrants, dont les réunions d’avancement ont marqué mes années de recherche. François ISSAC a été un soutien constant, offrant une aide inestimable tout au long de nos expérimentations, ce qui a instauré une rigueur exemplaire dans notre travail. De même, je suis profondément reconnaissant envers Hélène GALIEGUE pour ses conseils précieux, qui ont progressivement enrichi mes compétences en présentation, mes capacités rédactionnelles et, par conséquent, mon parcours académique. Enfin, je tiens à remercier Alexandre CHABORY, mon directeur de thèse, pour son suivi attentif et son aide déterminante dans la rédaction de ce manuscrit.

Par ailleurs, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers la Direction de la Technique et de l’Innovation pour avoir généreusement mis à notre disposition le pylône d’essai, un élément essentiel qui a permis la réalisation de nos mesures en environnement extérieur. Je suis particulièrement reconnaissant envers Jean-François SCHWERKOLT pour sa disponibilité constante afin de faciliter mon accès au local du pylône, ainsi qu’à Olivier TROUBET-LACOSTE pour son engagement dans plusieurs études fondamentales sur le sujet.

J’exprime pareillement ma gratitude envers François ROGIER pour le temps précieux qu’il m’a consacré, m’aidant à approfondir ma compréhension du fonctionnement du code COPAIER.

Mes remerciements vont également à Isabelle JUNQUA et Jean-Philippe PARMEN-TIER pour leur suivi assidu de l’avancement de ma thèse et leurs encouragements constants.

Je tiens également à reconnaître le soutien inestimable de ma famille et de mes amis, qui ont été et demeurent toujours présents à mes côtés en toutes circonstances.

L’aboutissement de ce travail de thèse a été rendu possible grâce à la collaboration et au soutien de ces personnes exceptionnelles, et je suis profondément reconnaissant envers chacune d’entre elles.

Table des matières

Introduction	9
1 État de l'art	13
1.1 Les communications aéronautiques	13
1.1.1 Les bandes de fréquences utilisées par les communications aéronautiques	14
1.1.2 Les liaisons analogiques et numériques en VHF	15
1.1.3 Les équipements d'une chaîne de communication VHF	16
1.1.3.1 Fonctionnement global de la chaîne de communication	16
1.1.3.2 Présentations des différents équipements placés au sol	17
1.1.4 Les interférences électromagnétiques dans les systèmes de communication aéronautique sol	19
1.1.4.1 Les interférences liées à d'autres systèmes radiofréquences	20
1.1.4.2 Les interférences liées aux décharges électrostatiques	20
1.1.5 Conclusion	21
1.2 Les conditions électrostatiques de l'atmosphère	22
1.2.1 Le champ électrostatique ambiant de la Terre	22
1.2.2 Modification du champ électrostatique en période orageuse	22
1.2.2.1 Formation d'un cumulonimbus	23
1.2.2.2 Électrification d'un cumulonimbus	23
1.2.3 Conclusion	24
1.3 Décharges hors équilibre	25
1.3.1 Décharges hors équilibre à basse pression	25
1.3.2 Décharges hors équilibre à pression atmosphérique	28
1.3.2.1 Les avalanches	28
1.3.2.2 Les avalanches successives	29
1.3.2.3 Streamers	29
1.3.3 Les décharges corona	31
1.3.3.1 Les décharges corona positives	31
1.3.3.2 Les décharges corona négatives	32
1.3.4 Conclusion	33
1.4 Compatibilité électromagnétique	33
1.5 Conclusion	34
2 Conception d'un système d'acquisition autonome sur un pylône d'essai	37
2.1 Présentation du pylône d'essai mis à disposition	38
2.2 Présentation des capteurs installés sur le pylône	41
2.2.1 Les sondes de courant	41
2.2.2 Le dipôle VHF avec amplification	46
2.2.3 Le moulin à champ AMEO340	48
2.2.4 Conclusion	51
2.3 Les méthodes de collecte des données et les outils informatiques associés	51
2.3.1 Description de l'acquisition de données en continu via le moulin à champ	52
2.3.2 Description de l'acquisition de données lors de dépassement de seuil	53
2.3.3 Conclusion	56
2.4 Calibration du système d'acquisition	56

2.4.1	Ajustement des plages dynamiques des capteurs en période de beau temps	56
2.4.2	Mesure de la répartition des courants à la base du pylône	57
2.4.3	Conclusion	59
2.5	La méthode d'observation des différentes mesures	60
2.6	Conclusion	62
3	Étude des événements électromagnétiques mesurés en environnement réel	63
3.1	Analyse macroscopique des différentes signatures observées	63
3.1.1	Analyse d'un exemple d'enregistrement	64
3.1.2	Analyse d'enregistrements sans présence d'événement électrostatique	65
3.1.3	Analyse de signatures isolées accompagnées de phénomènes électrostatiques de proximité et lointains	68
3.1.3.1	Analyse d'une signature en présence d'un phénomène électrostatique de proximité	68
3.1.3.2	Analyse d'une signature impulsionnelle en présence d'un phénomène électrostatique lointain	70
3.1.3.3	Analyse d'une autre signature en présence d'un phénomène électrostatique lointain	72
3.1.3.4	Conclusion	73
3.1.4	Les peignes d'impulsions au niveau du paratonnerre	74
3.1.5	Conclusion	76
3.2	Analyse des signatures de type bi-exponentiel	76
3.2.1	Analyse de décharges corona élémentaires	76
3.2.2	Analyse statistiques des décharges corona	78
3.2.2.1	Identification des impulsions dans les enregistrements	79
3.2.2.2	Étude des décharges corona positives	79
3.2.2.3	Étude des décharges corona négatives	86
3.2.2.4	Analyse comparative des décharges de polarité positive et négative	91
3.2.2.5	Conclusion	92
3.2.3	Analyse des autres voies de mesures lors d'apparition de décharges corona	92
3.2.3.1	Analyse d'un événement sans activité à la base du pylône	93
3.2.3.2	Analyse d'un événement avec activité à la base du pylône	95
3.2.3.3	Analyse d'un événement contenant uniquement des décharges négatives	98
3.2.3.4	Conclusion	99
3.2.4	Conclusion	99
3.3	Analyse d'impulsions présentant une résonance	100
3.3.1	Analyse d'une décharge élémentaire	100
3.3.2	Analyse statistique des caractéristiques des décharges mesurées	102
3.3.3	Analyse de la corrélation avec l'antenne	108
3.3.4	Analyse spectrale	110
3.3.5	Conclusion	113
3.4	Conclusion	114
4	Caractérisation des décharges corona en fonction des conditions expérimentales en laboratoire	115
4.1	Expérimentation de décharges corona sur une maquette de pylône	116
4.1.1	Description du dispositif expérimental en configuration pointe-plan	116
4.1.2	Choix des capteurs et de leurs emplacements	118
4.1.3	Les numériseurs utilisés	121
4.1.4	Conclusion	121
4.2	Étude des décharges corona sur une maquette de pylône	122
4.2.1	Analyse des décharges corona élémentaires	122
4.2.2	Analyse des caractéristiques des décharges corona obtenues avec différentes tensions	125
4.2.2.1	Les décharges négatives	125
4.2.2.2	Les décharges positives	128

4.2.2.3	Conclusion	132
4.2.3	Analyse de l'impact de la distances inter-électrodes sur les décharges corona	132
4.2.3.1	Analyse de l'impact sur les décharges négatives	132
4.2.3.2	Analyse de l'impact sur les décharges positives	134
4.2.4	Conclusion	137
4.3	Étude des couplages entre la décharge corona et la maquette de pylône	137
4.3.1	Analyse des mesures de courant corona à la base de la pointe	137
4.3.1.1	Étude des décharges négatives	137
4.3.1.2	Étude des décharges positives	139
4.3.2	Analyse comportementale des fréquences de résonance de la maquette du pylône	140
4.3.3	Analyse des courants mesurés à la base du pylône	143
4.3.3.1	Lien de causalité pointe base	144
4.3.3.2	Analyse du couplage entre la décharge et la maquette de pylône	145
4.3.4	Conclusion	149
4.4	Conclusion	149
5	Étude des niveaux de couplage entre les décharges corona et une antenne VHF par simulation	151
5.1	Présentation des deux approches permettant de modéliser les décharges corona	151
5.1.1	Présentation d'une méthode de simulation physique des décharges	152
5.1.2	Présentation d'une méthode de simulation radiofréquence	153
5.1.3	Conclusion sur l'approche adoptée	154
5.2	Modélisation de la décharge corona à l'aide d'un modèle électrique	155
5.2.1	Objectif du modèle électrique	155
5.2.2	Approximation du courant d'une décharge corona avec réponse aperiodique d'un circuit RLC	155
5.2.3	Présentation et implémentation du modèle de source proposé	157
5.2.4	Détermination des variables (E , R , L , C) du circuit et modélisation de la décharge	158
5.2.5	Conclusion	159
5.3	Étude comparative des courants obtenus sur le pylône de laboratoire	159
5.3.1	Réalisation du modèle 3D de la maquette de pylône	159
5.3.2	Analyse des courants au niveau du shunt	161
5.3.3	Analyse des courants à la base de la pointe	162
5.3.4	Analyse des courants à la base de la maquette	163
5.3.5	Conclusion	165
5.4	Étude du couplage entre la décharge corona sur le paratonnerre et une antenne VHF sur le pylône extérieur	166
5.4.1	Implémentation du modèle électrique sur la modélisation du pylône	166
5.4.2	Étude du couplage entre une décharge négative et les antennes VHF	168
5.4.2.1	Simulation de la décharge négative à la base du paratonnerre	168
5.4.2.2	Simulation de la décharge négative sur le paratonnerre seul	169
5.4.2.3	Étude des niveaux de couplages entre une décharge négative et les antennes VHF	171
5.4.3	Étude du couplage entre une décharge positive et les antennes VHF	173
5.4.3.1	Simulation de la décharge positive à la base du paratonnerre	173
5.4.3.2	Étude des niveaux de couplages entre une décharge positive et les antennes VHF	175
5.4.4	Comparaison des niveaux de couplages entre les deux polarités	177
5.4.5	Conclusion	179
5.5	Conclusion	179
	Conclusion	181
	Bibliographie	190

Introduction

Contexte

La sécurité des vols est une priorité pour l'aviation civile, et pour cela, les communications entre les pilotes d'avion et les contrôleurs aériens jouent un rôle essentiel. Ces communications se font via des systèmes de radiocommunication, principalement dans la bande aéronautique VHF [1]. Des stations au sol sont équipées d'antennes VHF qui permettent de recevoir et de transmettre les signaux radio utilisés dans les communications entre les pilotes et les contrôleurs aériens. Ces transmissions vocales sont principalement basées sur des signaux analogiques qui, en raison de leur nature continue, sont plus sensibles aux interférences électromagnétiques pouvant survenir lors de leur transmission. Ces interférences peuvent affecter la qualité du signal modulé et entraîner des perturbations ou des altérations du message vocal échangé entre les parties concernées.

Certaines stations au sol gérées par la direction de l'aviation civile française (DGAC) ont été confrontées à des interférences spécifiques qui peuvent perturber, voire interrompre occasionnellement, les communications entre pilotes et contrôleurs aériens. Ces perturbations peuvent entraîner une commutation sur une autre station sol, ou sur une autre bande de fréquence.

Ces incidents ont été signalés à plusieurs reprises, notamment à Champcueil [2, 3] près de Paris, sur un pylône situé au sommet de la Sainte-Baume [4, 5] à l'est de Marseille, ainsi que sur un pylône à Saint-Jean d'Illac [6], à l'ouest de Bordeaux. Ces perturbations ont été constatées tout au long de l'année, avec des épisodes en été à Champcueil et en hiver à la Sainte-Baume, pendant des périodes orageuses.

Des études ont été menées par l'équipe Telecom de l'ENAC [7, 8, 5, 6, 9, 10] pour comprendre l'origine de ces interférences qui a attribué ces perturbations à des décharges corona générées par un fort champ électrostatique local, lié aux conditions météorologiques [3]. Une modélisation de ces interférences a également été proposée dans le cadre de la thèse de Mingtian Wang [11] qui a été soutenue en 2014 et s'est également déroulée à l'ENAC.

Les décharges corona sont des phénomènes de décharges électrostatiques partiels qui se produisent généralement autour de bords pointus, de pointes acérées et de lignes fines. Elles peuvent survenir au sommet de pylônes ou de structures métalliques élevées, tels que les pylônes VHF de l'aviation civile ou les tours de lancement d'Ariane, où l'effet de pointe augmente considérablement le champ électrostatique local [12]. Ces décharges corona sont favorisées par des conditions climatiques défavorables, telles que les orages, où les nuages s'électrifient et perturbent localement le champ électrostatique ambiant. En temps normal, le champ électrostatique environnant est généralement d'environ 150

V/m en moyenne [13]. En présence de décharges corona, il peut atteindre des valeurs considérablement plus élevées, de l'ordre de plusieurs kV/m [14]. Un exemple bien connu de décharge corona est le "feu de Saint-Elme", qui se manifeste au sommet des mâts de navires pendant les orages.

Les interférences causées par les décharges corona ont été observées dans différents domaines, tels que les lignes de transmission à haute tension [15], les avions en vol [16] et pour la diffusion télévisuelle [17]. Comparativement aux décharges électrostatiques (ESD) et à la foudre, il y a moins de documentation sur les interférences corona. Les décharges corona génèrent des pertes de puissance et des interférences à large bande (de DC à VHF) sur les lignes de transmission à haute tension [18, 19]. Pour les avions en vol, des interférences sur les signaux de radiocommunication et de navigation ont été observées. Les décharges corona se produisent aux antennes à bord de l'avion et aux autres extrémités de celui-ci [20, 21, 22, 23]. Ces études ont conduit à l'invention des déperditifs d'électricité statique qui sont montés sur les avions pour réduire le niveau d'interférence [24].

Au sol, les pylônes subissent également des interférences dues aux décharges corona, perturbant la diffusion télévisée et la radio amateur. Des configurations spécifiques des pylônes et des antennes ont été proposées pour réduire ces interférences [25, 17, 26]. Les stations au sol des radiocommunications de l'aviation civile sont également sujettes aux décharges corona sur les pylônes, probablement causées par un fort champ électrostatique naturel. Comprendre les mécanismes de couplage des décharges corona permettrait de développer un outil d'analyse pour mieux comprendre l'origine de ces interférences et trouver des solutions pour les atténuer ou les éliminer.

Cette thèse, réalisée en collaboration entre l'axe de recherche Électromagnétisme et Antennes (EMA) de l'équipe TELECOM de l'ENAC et l'unité Compatibilité et Modélisation Électromagnétiques (CME) du département Électromagnétisme et Radar (DEMR) de l'ONERA, s'inscrit dans une démarche visant à mieux comprendre ces phénomènes et la façon dont ils se couplent avec les antennes. Cette thèse s'inscrit dans la continuité des recherches effectuées lors de la thèse de Mingtian Wang [11], réalisée à l'ENAC et finalisée en 2014. Son travail consistait à développer un modèle permettant de prédire quantitativement le niveau d'interférences induit par les décharges corona sur les antennes VHF. Ses résultats ont confirmé que l'origine des interférences était bien liée aux décharges corona. De plus, il a identifié les emplacements des décharges et a montré que seules celles se produisant sur les antennes étaient responsables d'un niveau de brouillage suffisant pour perturber les communications. Les conclusions tirées des études antérieures ont constitué une base solide pour la poursuite des travaux de cette thèse.

Objectif principale de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est d'approfondir la compréhension des décharges corona, en particulier leurs mécanismes d'apparition, d'entretien et de couplages avec des antennes VHF. Cela passe par la mesure de l'ensemble de l'activité électrique se produisant sur un pylone métallique de grande dimension. Ces mesures devront être réalisées à la fois en environnement extérieur en présence de conditions météorologiques variables, et en environnement contrôlé, c'est-à-dire en laboratoire. Cette meilleure compréhension vise à développer un outil d'analyse adapté pour évaluer les niveaux de couplage entre les décharges corona et les antennes VHF sur les pylônes extérieurs.

Démarche

La démarche adoptée dans cette thèse consiste à acquérir des mesures expérimentales de décharges corona sur un pylône, à la fois en environnement naturel et en laboratoire. Ces mesures visent à constituer une base de données d'événements se produisant sur un pylône en extérieur, permettant ainsi une comparaison avec les incidents signalés. Cette base de données, jusqu'alors inexistante, offre l'opportunité de mieux comprendre les comportements électromagnétiques du pylône, qui restent encore mal définis. Parallèlement, les mesures en laboratoire sont réalisées dans une configuration similaire à celle en extérieur. Cette approche permet d'étudier le comportement des décharges corona dans un contexte pointe-plan.

En utilisant les données expérimentales ainsi acquises, l'objectif est de concevoir un outil d'analyse basé sur des simulations électromagnétiques couvrant toute une plage de fréquences, contrairement à la thèse précédente qui se limitait à une seule fréquence. Cette approche permettra de reproduire de manière plus réaliste le spectre des décharges corona et de mieux évaluer leur impact sur les systèmes de communication.

Plan de la thèse

Cette thèse est divisée en cinq chapitres, chacun visant à atteindre les objectifs fixés.

Le **chapitre 1** sert d'introduction au travail en présentant les différents domaines abordés par la thèse. Ce chapitre commence par expliquer l'utilité et le fonctionnement des communications aéronautiques. Les systèmes sol de communication aéronautique en bande VHF sont également exposés, ainsi que les interférences électromagnétiques auxquelles ils peuvent être soumis. Une section est dédiée aux phénomènes électrostatiques ambiants, susceptibles de créer des perturbations électromagnétiques en période orageuse, notamment en expliquant la variation du champ électrostatique ambiant au niveau du sol. Une autre section propose une étude des décharges hors équilibre basse et haute pression afin de présenter les divers processus de déclenchement des décharges corona ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, les différents types de couplages électromagnétiques sont expliqués, permettant ainsi de mieux comprendre comment les décharges corona peuvent perturber les systèmes de communication ainsi que les moyens pour les étudier.

En utilisant les méthodes d'analyse de compatibilité électromagnétique, un système d'acquisition a été conçu afin de réaliser des mesures sur un pylône en environnement naturel et est présenté dans le **chapitre 2**. Ce chapitre commence par une présentation globale du pylône d'essai fourni par la DTI. Ensuite, les différents capteurs utilisés pour effectuer les mesures, tels que les sondes de courant, une antenne VHF et un moulin à champ, sont exposés. Les systèmes informatiques utilisés pour l'acquisition des données ainsi que les numériseurs sont également décrits. Par la suite, l'interface graphique, qui permet d'observer simultanément toutes les mesures en fonction des différentes échelles temporelles, est présentée. Enfin, la calibration du système d'acquisition est expliquée pour garantir la fiabilité des mesures.

Ce système d'acquisition a permis de mesurer de nombreux événements électromagnétiques en environnement naturel au niveau du pylône. Ces mesures sont analysées dans le **chapitre 3** qui, dans un premier temps, présente la variété des interactions et des phénomènes électromagnétiques qui peuvent se produire au niveau du pylône. Ensuite, une

analyse des impulsions suivant des lois bi-exponentielles est réalisée, en étudiant en parallèle les polarités positive et négative. Une analyse statistique approfondie de ces signatures est effectuée, ainsi qu'une étude de leur corrélation avec les autres voies de mesure. Enfin, une autre catégorie d'impulsions présentant un phénomène de résonance est examinée, en plus de leur signature de type bi-exponentielle.

Afin de compléter la base de données obtenus en environnement naturel, une expérimentation en laboratoire est réalisée et présentée dans le **chapitre 4**. L'objectif étant de reproduire et d'étudier des décharges corona dans un environnement contrôlé. Un dispositif expérimental spécifique est mis en place pour générer des décharges corona sur une structure métallique de type pylône, en configuration pointe-plan. Ce dispositif est décrit en détail, et des capteurs spécifiques reliés à des numériseurs adaptés sont utilisés pour l'analyse des décharges. Ensuite, une étude approfondie des caractéristiques des décharges corona, telles que la tension et la distance entre la pointe et le plan, est réalisée pour mieux comprendre les facteurs influençant leur formation et comportement dans un environnement contrôlé. Enfin, les mesures effectuées par les différents capteurs situés à la base de la pointe et à la base de la maquette sont étudiées pour mettre en évidence le couplage entre les décharges corona et la structure métallique, fournissant ainsi des informations précieuses sur les interactions entre les décharges et le pylône.

Les campagnes de mesures expérimentales ont fourni des informations essentielles sur les comportements des décharges corona, qui ont été utiles dans la conception d'un outil d'analyse présenté dans le **chapitre 5**. Cet outil a pour objectif d'évaluer les niveaux de couplage entre une décharge corona élémentaire au niveau du paratonnerre et une antenne VHF du pylône extérieur. Pour introduire ce chapitre, deux approches différentes pour modéliser les décharges corona sont présentées afin de déterminer la plus adaptée à notre problème. Ensuite, la modélisation de la décharge corona à l'aide d'un modèle électrique est détaillée. Les différentes composantes du modèle électrique sont expliquées, notamment l'utilisation d'un circuit RLC en régime apériodique pour reproduire les caractéristiques des décharges positives et négatives. Par la suite, des simulations sont réalisées pour confronter le modèle électrique aux mesures expérimentales effectuées en laboratoire. Enfin, les simulations effectuées sur le pylône extérieur sont présentées. Cette section examine également les niveaux de couplage observés sur l'antenne et les compare à ceux obtenus lors des mesures.

Chapitre 1

État de l'art

L'objectif principal de cette thèse consiste à approfondir notre compréhension de l'origine des bruits électrostatiques qui perturbent les communications vocales de la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile). Ces bruits sont attribués aux conditions météorologiques orageuses, qui engendrent des décharges électrostatiques partielles, connues sous le nom de décharges corona. Ainsi, cette thèse aborde différents domaines, tels que les systèmes de communication aéronautique, les phénomènes météorologiques, la physique des plasmas et la compatibilité électromagnétique.

Dans ce chapitre, l'idée est de présenter ces domaines en commençant par expliquer l'utilité et le fonctionnement des communications aéronautiques dans la section 1.1. Les systèmes sol de communication aéronautique en bande VHF ainsi que les interférences électromagnétiques auxquelles ils peuvent être soumis y sont également présentés. La section 1.2 traite du phénomène électrostatique ambiant, qui est susceptible de créer des perturbations électromagnétiques en période orageuse. L'explication comprend notamment la variation du champ électrostatique ambiant au niveau du sol. Dans la section 1.3, une analyse approfondie des décharges hors équilibre est présentée. Cette étude débute par les décharges à basse pression pour ensuite se concentrer sur les décharges à haute pression, notamment celles qui se produisent à pression atmosphérique, telles que les décharges corona. Enfin, la dernière section 1.4 aborde le concept de compatibilité électromagnétique et son importance pour les systèmes de communication. Elle met en évidence la susceptibilité de ces systèmes aux perturbations, notamment celles provoquées par les décharges corona.

1.1 Les communications aéronautiques

Dans cette section, les communications aéronautiques sont abordées afin de mieux comprendre le contexte dans lequel les contrôleurs aériens rencontrent des problèmes. Les bandes de fréquences utilisées par les communications aéronautiques sont présentées, suivies d'une analyse approfondie des liaisons de type analogiques et numériques en bande VHF. Ensuite, les différents équipements utilisés dans une chaîne de communication VHF sont examinés. Enfin, les différentes interférences électromagnétiques susceptibles de perturber les systèmes de communication aéronautique situés au sol sont discutées.

1.1.1 Les bandes de fréquences utilisées par les communications aéronautiques

Les communications aéronautiques jouent un rôle crucial dans le contrôle du trafic aérien et la sécurité des vols. Elles permettent la transmission de messages et de données entre les avions et les services au sol, tels que les contrôleurs aériens. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) réglemente les communications aéronautiques à l'échelle internationale, en établissant des normes et des pratiques recommandées. L'Annexe 10 - Aéronefs et services de navigation aérienne - Volume 3 - Systèmes de communication [1] de l'OACI contient les normes et les pratiques recommandées pour les systèmes de communication aéronautique, couvrant les équipements, les fréquences et les procédures de communication.

En France, les communications aéronautiques sont assurées par le Commandement de la Défense aérienne et des opérations aériennes (CDAOA) et la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Le CDAOA est un commandement militaire de l'Armée de l'Air française. Il est chargé de la défense de l'espace aérien national et de la conduite des opérations aériennes militaires. Dans le cadre de ses missions, le CDAOA assure également la coordination des communications aéronautiques militaires, notamment en ce qui concerne les échanges entre les pilotes militaires et les contrôleurs aériens militaires. La DGAC, quant à elle, est responsable de la réglementation et de la supervision de l'aviation civile en France. Elle assure la sécurité et l'efficacité des communications aéronautiques, en supervisant les échanges entre les pilotes et les contrôleurs aériens civils, ainsi que la gestion du trafic aérien pour assurer un flux sécurisé et ordonné.

Les communications aéronautiques utilisent différentes bandes de fréquences pour répondre aux besoins spécifiques de chaque situation. La bande VHF (Very High Frequency) est principalement utilisée pour les communications entre avions et contrôleurs aériens, permettant les échanges de contrôle du trafic aérien et la coordination des vols. En plus de la bande VHF, d'autres bandes de fréquences sont également utilisées dans les communications aéronautiques. La bande UHF (Ultra High Frequency) est utilisée pour les services de recherche et de sauvetage, ainsi que pour les communications entre pilotes, en complément des communications avec les contrôleurs aériens. Elle est également utilisée pour la réémission des communications pour les avions militaires qui ne sont pas équipés de systèmes de VHF. Enfin, la bande HF (High Frequency) est utilisée pour les communications à longue distance, notamment dans les vols transocéaniques. Elle permet des communications au-delà des limites de la portée VHF et UHF, mais nécessite des équipements plus complexes et une gestion plus délicate des fréquences.

Des projets sont en cours pour développer de futurs systèmes de communications aéronautiques plus robustes dans d'autres bandes de fréquences. Par exemple, le développement du système de communication L-DACS (L-band Digital Aeronautical Communications System) offre des perspectives prometteuses en tant que solution future [27, 28, 29]. C'est un système de communications aéronautiques numériques utilisant la bande L des fréquences radio. Cependant, la mise en place d'un tel système est très longue et se compte en dizaines d'années.

Cette thèse se concentre sur l'étude des perturbations électromagnétiques causées par les décharges corona sur les systèmes sol de communication aéronautique en bande VHF. La bande UHF étant dans une bande de fréquence trop élevée, elle n'est pas atteinte par ces perturbations. La bande HF, quant à elle, utilise des antennes différentes et placées à d'autres endroits : les perturbations sont alors limitées. Dans la partie suivante, les

équipements et les caractéristiques des systèmes sol de communication aéronautique en bande VHF sont présentés.

1.1.2 Les liaisons analogiques et numériques en VHF

La bande de fréquences VHF est la plage de fréquences radio allant de 30 MHz à 300 MHz, selon l'Union Internationale des Télécommunications (UIT). En France, les radiocommunications de l'aviation civile VHF se situent entre 118 MHz et 137 MHz. Cette bande de fréquences est divisée en canaux à bande étroite de 25 kHz ou de 8.33 kHz pour les signaux analogiques utilisés dans les communications. Cependant, il est important de noter que la division en canaux de 8.33 kHz est spécifique à la région européenne. Les différents canaux VHF sont illustrés sur la figure 1.1, présentant les spectres de porteuse pour chaque canal ainsi que leur bande passante respective.

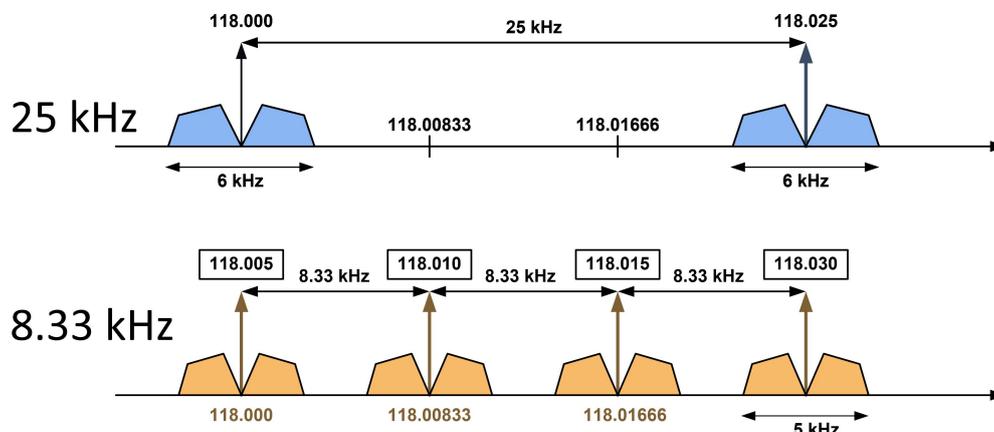


FIGURE 1.1 – Les deux types de canaux VHF et leur bandes passantes

Le VDL (VHF Data Link) est un système de communication numérique utilisé dans l'aviation pour transmettre des données entre les avions et les stations au sol. En France, le VDL Mode 2 (VDL-2) [1] est le mode de communication utilisé. Il utilise une modulation numérique D8PSK (Differential 8-Phase Shift Keying) qui permet de moduler les données numériques sur un signal porteuse. Il utilise un canal de 25 kHz et la fréquence porteuse spécifique utilisée en France est de 136.975 MHz. Le VDL-2 est utilisé pour les échanges de données de vol, les messages de contrôle du trafic aérien et les services de messagerie entre les avions et les opérateurs au sol. Il est important de noter que le débit de données du VDL-2 est limité par la taille du canal utilisé et que ce système de communication est finalement très peu utilisé.

Les signaux numériques présentent des avantages tels qu'une transmission plus précise et une meilleure robustesse face aux perturbations électromagnétiques. Cependant, l'adoption de ce type de signal pour les communications aéronautiques nécessite que tous les avions soient équipés des instruments compatibles, ce qui rend la transition vers le numérique complexe à réaliser. En effet, l'évolution des communications aéronautiques est un processus progressif en raison de divers facteurs tels que les considérations de sécurité liées à un changement global, ainsi que les contraintes financières impliquées. Par exemple, le passage des canaux de 25 kHz à des canaux de 8.33 kHz a nécessité des modifications des équipements à bord des avions pour pouvoir recevoir et transmettre des communications

VHF sur ces nouveaux canaux. Cependant, cette transition n'a pas été facile pour certaines compagnies aériennes, car cela impliquait des coûts importants liés à la modification des équipements à bord de leurs avions.

Les signaux analogiques dans les radiocommunications aéronautiques en bande VHF sont principalement utilisés pour les communications vocales entre les pilotes et les contrôleurs aériens. Ces communications analogiques sont généralement réalisées à l'aide de systèmes de communication tels que la radio VHF et utilisent une modulation analogique d'amplitude (AM). Cependant, les signaux analogiques sont plus sensibles aux interférences et à la dégradation de la qualité du signal par rapport aux signaux numériques.

En effet, les signaux analogiques sont plus sensibles aux interférences électromagnétiques, aux variations de la qualité du signal et à d'autres facteurs environnementaux en raison de leur nature continue. Lorsque ces signaux sont soumis à des interférences, cela peut entraîner une distorsion du signal, une dégradation de sa qualité, voire une perte totale de la transmission. Toute perturbation située dans la bande passante du spectre de la porteuse du signal, tel que montré sur la figure 1.1, peut entraîner des interférences et perturber le signal. Ces perturbations peuvent avoir un impact sur la clarté et la fiabilité des communications analogiques, rendant parfois difficile la compréhension des messages vocaux. En revanche, les signaux numériques, représentés par des valeurs discrètes, sont généralement plus résistants aux interférences et peuvent bénéficier de techniques de correction d'erreurs pour améliorer leur fiabilité.

Dans le cadre de cette thèse, une attention particulière est portée au système de transmission vocale des liaisons aéronautiques en bande VHF en modulation d'amplitude. Ce système fait face à des perturbations causées par des décharges électrostatiques au niveau du sol, ce qui peut entraîner des interférences et une dégradation de la qualité du signal. Pour mieux comprendre le fonctionnement et le rôle des équipements constituant la chaîne de communication aéronautique, une présentation détaillée est réalisée dans la section suivante.

1.1.3 Les équipements d'une chaîne de communication VHF

Dans cette sous-section, l'introduction aux équipements d'une chaîne de communication située au sol est abordée. Le fonctionnement global de la chaîne est expliqué, mettant en évidence les différentes étapes et processus impliqués. Ensuite, une présentation des équipements placés au sol est réalisée, couvrant les composants essentiels nécessaires à la communication.

1.1.3.1 Fonctionnement global de la chaîne de communication

En France, les communications radio VHF dans l'aviation civile utilisent la modulation d'amplitude. Ce processus de modulation implique les étapes résumées dans la figure 1.2.

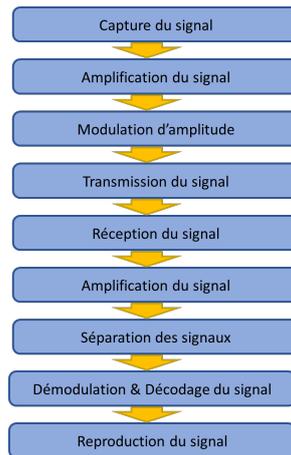


FIGURE 1.2 – Synoptique de la transmission de donnée

Lorsqu’une station sol est perturbée et ne peut pas fonctionner normalement, les communications doivent être redirigées vers une station de secours. Cela peut entraîner des régulations du trafic aérien qui peuvent engendrer des coûts supplémentaires, des retards et d’autres problèmes opérationnels.

Le fonctionnement global de la chaîne de communication située au sol a été présenté. Cette chaîne permet d’assurer la réception des signaux émis par les avions et de les traiter pour une utilisation ultérieure. Elle est composée de différents équipements qui jouent des rôles spécifiques dans le processus de réception et de traitement des signaux. Dans la section suivante, les équipements placés au sol qui constituent la partie réception de la chaîne de communication sont détaillés.

1.1.3.2 Présentations des différents équipements placés au sol

Dans ce contexte d’étude, l’attention se porte sur les équipements impliqués à partir du moment où le signal est capté par l’antenne VHF. Ces équipements sont situés au sol et comprennent l’antenne VHF elle-même, les câbles coaxiaux utilisés pour la connexion, un diplexeur, le récepteur VHF équipé de son démodulateur, ainsi que l’amplificateur RF.

Les antennes VHF : Les antennes VHF utilisées pour la communication aéronautique comprennent principalement des antennes dipôles demi-ondes. Cependant, d’autres types d’antennes sont également utilisés, tels que les antennes ground plane et les réseaux de dipôles. Chaque type d’antenne présente des caractéristiques spécifiques et des avantages adaptés à des applications particulières.

Il convient de souligner que les antennes utilisées dans l’aviation civile sont tenues de se conformer aux réglementations en matière d’utilisation des antennes, établies par la DGAC en France et par l’OACI [1] à l’échelle internationale. De plus, dans le domaine des télécommunications, la conformité est également requise en collaboration avec l’Agence Nationale des Fréquences (ANFR) en France et l’Union Internationale des Télécommunications (UIT) au niveau international. Les spécifications techniques varient selon les pays et les réglementations locales, mais voici quelques exemples de critères couramment pris en compte :

- Puissance rayonnée maximale : les antennes doivent respecter des limites de puissance d'émission afin d'éviter les interférences avec d'autres systèmes de communication et de garantir une utilisation efficace du spectre radioélectrique. Les stations sol de communication VHF émettent des puissances de l'ordre de 25-50 W.
- Directivité de l'antenne : dans notre contexte les antennes doivent avoir une couverture omnidirectionnelle dans le plan horizontal, c'est-à-dire qu'elles émettent de manière uniforme dans toutes les directions horizontales.
- Polarisation : les antennes ont une polarisation verticale.

Les antennes VHF sont spécialement conçues pour résister aux conditions météorologiques et sont montées sur des pylônes, des tours ou des mâts dans les aérodromes et les stations avancées. Les stations avancées sont des sites stratégiques utilisés pour les communications en route, et en raison de leur emplacement dans des zones exposées à des conditions météorologiques intenses comme les sommets de montagne ou les plaines dégagées, elles sont particulièrement sensibles aux décharges corona. Les choix de l'emplacement et de la hauteur du pylône sont importants pour assurer une couverture optimale et une réception/transmission de signal de qualité. Dans le but de protéger les pylônes contre la foudre, tous sont équipés d'un paratonnerre. En revanche, sur les aérodromes, les antennes sont soit placées sur la tour de contrôle, soit sur des pylônes de taille plus réduite. Elles sont donc moins sujettes à de telles perturbations.

L'amplificateur RF : Un amplificateur RF est utilisé pour augmenter l'intensité du signal électromagnétique capté par l'antenne. Cet amplificateur RF est spécifiquement conçu pour fonctionner dans la plage de fréquences de la VHF. Son rôle est d'amplifier le signal de manière linéaire, c'est-à-dire en augmentant l'amplitude du signal sans introduire de distorsion significative. L'amplification du signal après l'antenne VHF est essentielle car elle compense les pertes de signal qui peuvent survenir lors de la propagation à travers l'environnement ou les câbles de transmission.

Le diplexeur : Le diplexeur est un dispositif utilisé en télécommunications pour séparer ou combiner des signaux de différentes fréquences. En réception, il sépare les signaux provenant de différentes sources ou bandes de fréquences pour les diriger vers des voies de traitement distinctes. En transmission, il combine les signaux de différentes sources ou bandes de fréquences en un seul signal composite pour une transmission efficace à travers un canal commun. Le diplexeur utilise des filtres et des circuits de couplage pour réaliser la séparation ou la combinaison des signaux. Son rôle est d'éviter les interférences entre les signaux et d'optimiser la gestion des différentes fréquences.

Le récepteur VHF : Le récepteur VHF utilisé dans un centre de contrôle aérien est spécialement conçu pour recevoir le signal VHF reçu par l'antenne. Il est équipé d'un démodulateur qui extrait le signal audio de la porteuse modulée. Le récepteur VHF convertit le signal reçu en un signal audio compréhensible par les contrôleurs aériens. Un amplificateur peut être utilisé pour augmenter la puissance du signal audio extrait par le récepteur VHF. Il améliore la qualité et la force du signal avant de le transmettre aux haut-parleurs ou à d'autres dispositifs de sortie. La DGAC utilise principalement le récepteur multimode RE9000-2G comme récepteur VHF.

Les câbles coaxiaux : Les câbles coaxiaux sont largement utilisés pour connecter l'antenne VHF au récepteur VHF en raison de leur capacité à transmettre le signal avec peu de perte et d'interférence. Ils sont composés de plusieurs couches, comprenant un conducteur central, une couche isolante (diélectrique), un blindage conducteur et une gaine extérieure. Cependant, il est important de noter que l'utilisation de câbles coaxiaux peut entraîner un certain délai dans la transmission du signal. Ce délai est principalement dû à la vitesse de propagation du signal dans le câble. Pour les câbles utilisés en aviation civile, cette vitesse est d'environ 66% de la vitesse de la lumière dans le vide. En général, le délai introduit par les câbles coaxiaux est négligeable dans de nombreuses applications, se situant à quelques nanosecondes par mètre de câble. Cependant, dans des cas où une synchronisation précise est nécessaire, ce délai peut devenir significatif.

La figure 1.3 illustre un centre de réception d'une station sol.

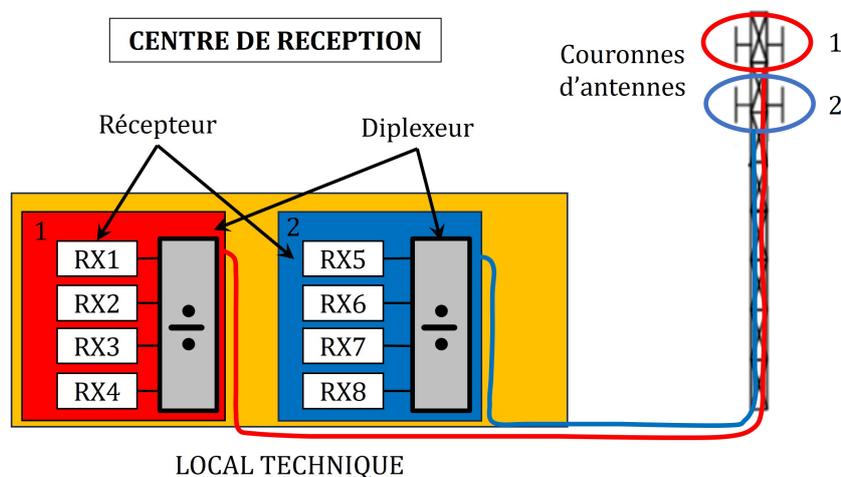


FIGURE 1.3 – Centre de réception d'une station sol

Ce schéma montre un centre de réception équipé de couronnes d'antennes, reliées à des diplexeurs, qui permettent de séparer les fréquences sur 8 récepteurs distincts. Ces récepteurs sont situés dans un local technique proche du pylône. Ainsi, si l'une des couronnes d'antennes est perturbée par un signal large bande, cela pourrait affecter toutes les fréquences à la fois.

Après avoir examiné le fonctionnement des équipements de communication aéronautique en bande VHF au niveau du sol, l'attention se porte maintenant sur un aspect critique de ces systèmes : les interférences électromagnétiques. Ces interférences peuvent perturber les communications entre les avions et les centres de contrôle, compromettant ainsi la fiabilité des échanges. La section suivante se concentre sur les interférences électromagnétiques qui affectent les systèmes de communication sol, dans le but de mieux comprendre leurs sources et leurs effets.

1.1.4 Les interférences électromagnétiques dans les systèmes de communication aéronautique sol

Dans cette sous-section, les différentes interférences électromagnétiques auxquelles les systèmes sol de communication aéronautique peuvent être confrontés sont présentées. Ces

interférences sont divisées en deux groupes distincts : les interférences non liées aux décharges électrostatiques, ou interférences radiofréquences (RFI) et celles qui y sont liées.

1.1.4.1 Les interférences liées à d'autres systèmes radiofréquences

Les RFI constituent une source majeure d'interférences dans les systèmes de communication sol. Elles se produisent lorsque d'autres appareils ou systèmes émettent des signaux radiofréquences dans la même plage de fréquences que les systèmes de communication sol. Les émetteurs non autorisés, les appareils électroniques mal blindés ou les interférences provenant d'autres services de communication peuvent tous contribuer aux interférences RFI.

La cohabitation radio entre différents émetteurs peut entraîner des problèmes de brouillage, tels que l'intermodulation, qui est un type d'interférence électromagnétique. L'intermodulation se produit lorsque les signaux de différentes fréquences se mélangent à cause des non linéarités de certains éléments des émetteurs et récepteurs et génèrent des fréquences indésirables, appelées produits d'intermodulation. Dans le contexte des systèmes de communication aéronautique sol, cela peut se produire lorsque les fréquences utilisées par un centre d'émission déporté sont proches de celles utilisées par un centre de réception déporté. Les signaux émis par le centre d'émission peuvent créer des produits d'intermodulation qui interfèrent avec les signaux reçus par le centre de réception, provoquant ainsi des interférences.

Les installations industrielles telles que les usines, les centrales électriques et les installations de traitement des eaux peuvent générer des interférences qui peuvent affecter les systèmes de communication sol situés à proximité. Ces interférences sont causées par l'émission de signaux indésirables provenant de ces installations. Pour réduire ces perturbations, il est important que les installations industrielles se conforment aux normes internationales de compatibilité électromagnétique et prennent des mesures appropriées pour minimiser les émissions de signaux indésirables. Ces normes sont définies par Le Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR)[30].

Le phénomène de conduit atmosphérique, ou propagation anormale, vient amplifier les RFI. Lors de conditions météorologiques particulières, les signaux peuvent se propager au-delà de l'horizon radio prévu, ce qui peut entraîner des interférences inattendues. Par exemple, un avion peut recevoir une transmission d'une autre station sur la même fréquence, normalement bloquée par l'horizon radio, en raison du phénomène de conduit atmosphérique. De même, une station au sol peut également recevoir des transmissions inattendues d'un avion éloigné. Pendant les phénomènes de conduit atmosphérique, il est possible de détecter des voix indésirables provenant d'autres personnes en démodulant le signal.

1.1.4.2 Les interférences liées aux décharges électrostatiques

Dans cette section, les interférences liées aux décharges électrostatiques, à la fois celles générées par des sources artificielles et celles générées par des sources naturelles sont examinées.

Un exemple d'interférence causée par des décharges électrostatiques d'origine artificielle sur les lignes de transmission haute tension est le phénomène connu sous le nom de "décharge électrostatique provoquée" (DEP). Les lignes de transmission ont un petit rayon

et un potentiel élevé pouvant atteindre quelques centaines de kilovolts. Ainsi, le champ électrique autour des lignes de transmission est assez élevé pour générer des décharges électriques. Ces décharges peuvent perturber les bandes de fréquences utilisées pour la diffusion radio [25] et la télévision [17, 26].

Deux types de sources sont principalement responsables de ces interférences. La première est constituée de décharges corona qui se produisent le long des lignes haute tension et du matériel de la tour. La seconde est constituée de décharges d'étincelles et de microétincelles entre les espaces du matériel de la ligne de transmission [19]. Ces décharges génèrent du bruit corona détecté à des fréquences allant jusqu'à 900 MHz, tandis que le bruit dû aux étincelles peut être détecté à des fréquences allant jusqu'à 8 GHz [18]. En plus des interférences, ce phénomène peut également entraîner des pertes de puissance transmise [31, 32].

Les décharges électrostatiques d'origine naturelle sont principalement associées aux phénomènes orageux. Lorsqu'un nuage chargé s'approche d'un pylône de communication, le champ électrostatique autour du pylône et des antennes peut augmenter, ce qui peut déclencher des décharges électrostatiques. En plus des décharges électrostatiques, des éclairs peuvent également se produire, générant ainsi du bruit dans une large gamme de fréquences, allant de quelques kilohertz (kHz) à plusieurs gigahertz (GHz) [33]. Même si les éclairs se forment à une distance relativement éloignée de la station, leurs signaux VHF peuvent être captés avec une amplitude significative par les antennes de la station en raison de leur puissance élevée et du faible niveau de sensibilité des récepteurs VHF. Bien que les éclairs et les décharges électrostatiques puissent potentiellement causer des interférences dans les systèmes de réception des avions, cette thèse se concentre principalement sur les systèmes sol de communication aéronautique.

Parfois, lorsque le champ électrostatique atteint un seuil critique mais ne suffit pas à provoquer la foudre, des décharges corona peuvent se produire. Ce phénomène est similaire aux feux de Saint-Elme observés sur les mâts de navires pendant les orages. Des études [2, 4] ont démontré que ces décharges corona peuvent causer des interférences dans la bande VHF, ce qui les positionne comme une source potentielle d'interférence. La thèse de Mingtian Wang [11] en 2014 se concentre sur l'effet électromagnétique de ces décharges corona et démontre leur capacité à perturber les systèmes de communication aéronautique.

Dans le cadre de notre étude, une attention particulière est portée aux effets électromagnétiques des décharges corona et à leur impact sur les communications aéronautiques. En étudiant ces effets, il est possible de mieux comprendre les mécanismes de perturbation et de développer des solutions pour atténuer ces interférences et assurer des communications aéronautiques fiables et sécurisées.

1.1.5 Conclusion

En conclusion de cette partie, les liaisons aéronautiques en bande VHF ont été examinées, soulignant leur importance dans les communications sol-air et air-air. Les différents équipements constituant une chaîne de communication VHF ont été présentés, mettant en évidence leur rôle essentiel dans la qualité des communications aéronautiques.

De plus, les interférences électromagnétiques dans les systèmes de communication aéronautique sol ont été abordées, identifiant deux catégories d'interférences : celles causées par des sources radiofréquences et celles causées par des phénomènes de décharge.

Dans la partie suivante, la compréhension des interférences électromagnétiques d'origine naturelle est approfondi en examinant de plus près le champ électrostatique ambiant et les phénomènes orageux.

1.2 Les conditions électrostatiques de l'atmosphère

Après avoir expliqué que les interférences électromagnétiques causées par les décharges corona peuvent perturber les systèmes de communication aéronautique, il est important de comprendre le comportement électrostatique de l'atmosphère pour connaître les niveaux de champ électrostatique mis en jeu. En effet, c'est ce champ électrostatique qui est à l'origine de la production de décharges corona. Par conséquent, il est essentiel de connaître les ordres de grandeur et la polarité de ce champ électrostatique afin de mieux appréhender les phénomènes de perturbation électromagnétique.

Dans cette section, nous allons d'abord présenter le champ électrostatique ambiant moyen de la terre, qui est généré par les charges électriques présentes dans l'atmosphère. Nous étudierons ensuite macroscopiquement la formation d'un nuage et son électrification, qui peut entraîner un fort champ électrostatique entre le nuage et le sol.

1.2.1 Le champ électrostatique ambiant de la Terre

Le champ électrostatique ambiant de la Terre est généré par les charges électriques présentes dans l'atmosphère. En l'absence de perturbations météorologiques, un champ électrique appelé "beau temps" est mesuré au niveau du sol, avec des fluctuations allant de 50 à 400 V/m en fonction des conditions locales telles que la latitude et la saison. En moyenne, le champ électrostatique est de 150 V/m. Ce champ est dirigé vers le sol et est donc considéré négatif selon la convention de la NASA [13].

Le champ électrique décroît exponentiellement avec l'altitude z , selon la formule de Gish [34], qui suggère la présence d'une charge d'espace positive dont la concentration augmente à mesure que l'on se rapproche du sol. Le potentiel par rapport à la Terre augmente jusqu'à une altitude d'environ 50 km, où l'air devient conducteur en raison de ses porteurs de charge, et atteint un potentiel de 300 kV. Ainsi, la Terre et l'ionosphère forment un condensateur sphérique, où l'atmosphère sert de diélectrique.

1.2.2 Modification du champ électrostatique en période orageuse

Lors de périodes orageuses, les conditions atmosphériques subissent des modifications significatives, notamment en ce qui concerne le champ électrostatique. Ces changements sont étroitement liés à la formation des cumulonimbus, qui sont les nuages caractéristiques des orages.

Dans cette section, nous abordons la formation d'un nuage orageux et le processus d'électrification qui lui est associé. Ces éléments sont essentiels pour appréhender les variations du champ électrostatique en période orageuse.

1.2.2.1 Formation d'un cumulonimbus

Le cumulonimbus se forme à partir d'un nuage de type cumulus qui se développe lorsque de l'air chaud et humide s'élève en altitude par convection en période de beau temps en formant des courants ascendants puissants. L'air chaud et humide se refroidit en s'élevant et en subissant une expansion adiabatique, c'est-à-dire sans échange de chaleur ou de matière avec l'extérieur. Si l'humidité relative dans les zones ascendantes atteint le point de saturation en eau, la vapeur d'eau se condense en gouttelettes qui forment le nuage visible. L'altitude à laquelle se produit cette condensation définit la base du nuage, qui augmente lorsque l'humidité relative au niveau du sol diminue [35].

Si les zones humides continuent de s'élever, elles peuvent former un cumulonimbus dans une atmosphère dite instable, où les zones ascendantes restent plus chaudes que l'air environnant et continuent de monter.

Au delà de l'isotherme de 0°C, les particules d'eau se transforment en glace, mais certaines restent sous forme liquide à des températures inférieures à 0°C, dans un état surfondu. Entre 0°C et -40°C, des gouttelettes d'eau liquide et des particules de glace coexistent, tandis qu'à des températures inférieures à -40°C, toutes les particules d'eau sont transformées en glace.

Les cumulonimbus ne se développent que dans la troposphère, car le gradient de température s'inverse dans la tropopause, puis devient positif dans la stratosphère, ce qui arrête la convection. La hauteur maximale des nuages dépend de la latitude à laquelle ils se forment, car l'altitude de la tropopause varie de 18 km environ dans les tropiques en été, à 8 km environ en hiver pour les régions de hautes latitudes. Les orages se produisent principalement dans les régions de basses latitudes, notamment les régions côtières, où l'air humide venant de la mer est propice à la convection verticale après le lever du soleil. Les régions montagneuses connaissent également une convection instable vers le haut, car les sommets sont chauffés par le soleil plus rapidement que les vallées.

1.2.2.2 Électrification d'un cumulonimbus

Les différents mécanismes d'électrification des cumulonimbus sont examinés par Saunders [14]. Lors des orages, une charge négative faible est maintenue à la surface du sol et la charge positive correspondante est présente dans l'atmosphère. Lors de leur formation, les cumulonimbus se chargent en électricité. Quatre mécanismes expliquent l'apparition de ces charges électriques :

- la division de gouttes d'eau en gouttelettes de tailles inégales, les plus grandes gouttes emportant une charge électrique positive en excès et les plus petites une charge négative ;
- le bombardement de la partie supérieure du nuage par les rayons cosmiques et la partie inférieure par la radioactivité terrestre naturelle ;
- la convection verticale du nuage, où les particules captent des charges d'espace positives à la base du nuage et les transportent vers le haut, laissant les parties basses du nuage chargées négativement ;
- la triboélectricité, où les collisions entre gouttelettes d'eau et particules de glace dans le nuage provoquent des transferts de charge électrique. Les particules de glace se chargent positivement et sont transportées vers le haut, tandis que les particules d'eau et les

amas d'eau surfondue et de glace se chargent négativement et descendent vers le bas par gravité.

Les deux derniers mécanismes sont les plus fréquents et sont détaillés dans [14]. Cette séparation des charges provoque une activité électrique dans le nuage et la production de micro-décharges entre les particules chargées [36].

Il est possible de simplifier l'approche en considérant le nuage comme un dipôle ou un tripôle comme le montre la figure 1.4 présentant la structure de charge de deux nuages d'orage. Dans cette approche, les gouttes de pluie chargées négativement se trouvent à la base du nuage, tandis que les particules de glace chargées positivement se trouvent dans la partie supérieure. Dans le cas du tripôle, les petites régions de charges positives qui subsistent à la base du nuage doivent également être pris en compte. La charge électrique de chaque ensemble peut être très importante, atteignant plusieurs dizaines de Coulombs [35].

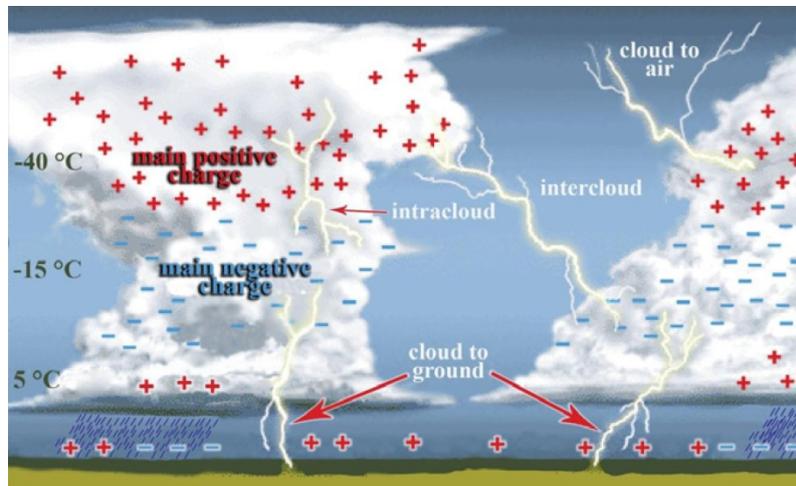


FIGURE 1.4 – La structure de charge de deux nuages d'orage isolés simples et certains des emplacements où la foudre peut se produire. Figure extraite de [37]

La formation de ces nuages apporte donc une grande quantité de charges qui va intensifier le champ électrique situé entre le sol et le nuage pour atteindre des valeurs de l'ordre de la dizaine de kilovolts. Ce champ peut être intensifié à proximité des structures métalliques au sol tels que les pylônes à cause de l'effet de pointe.

Cette intensification du champ peut alors créer des décharges qui vont venir perturber le comportement des communications aéronautiques. Les décharges hors équilibre résultant d'un fort champ électrique sont présentées dans la section suivante.

1.2.3 Conclusion

Dans cette section, les conditions électrostatiques de l'atmosphère ont été examinées, en commençant par la mise en lumière du champ électrostatique ambiant moyen de la Terre. Les modifications de ce champ, qui résultent de la formation et de l'électrification des nuages d'orage, ont également été abordées, notamment celles liées aux cumulonimbus. Cette compréhension des conditions électrostatiques de l'atmosphère est essentielle pour

expliquer la formation des décharges électrostatiques près des systèmes de communication sol. Les mécanismes de formation de ces décharges sont détaillés dans la section suivante.

1.3 Décharges hors équilibre

Le terme "décharge" tire son origine des phénomènes observés entre deux électrodes planes d'un condensateur immergé dans un gaz. Les travaux pionniers de John Sealy Townsend [38] ont contribué à notre compréhension des mécanismes d'initiation des décharges électriques. Lorsque la tension appliquée V dépasse un seuil, un courant électrique se forme par le déplacement des électrons générés par l'ionisation du gaz. Townsend a étudié en détail les mécanismes d'initiation de ces décharges, notamment entre des électrodes planes. La tension disruptive, nécessaire pour que le courant se manifeste, dépend principalement de la pression du gaz P et de la distance inter-électrodes d .

De nos jours, le terme "décharge" englobe tout phénomène d'ionisation d'un gaz sous l'influence d'un champ électrique ou électromagnétique externe. Il est communément admis qu'il existe deux types de décharges électriques en fonction du produit $P \times d$, exprimé en cm.torr. Les décharges à basse pression se produisent lorsque ce produit est inférieur à environ 200 cm.torr, tandis que les décharges à haute pression ont lieu lorsque ce produit dépasse cette valeur seuil. Bien que les décharges à basse pression aient été largement étudiées et puissent être décrites par la théorie de Townsend [12], les mécanismes régissant les décharges à haute pression sont plus complexes. Dans le cadre de la thèse, le gaz est à pression atmosphérique, ce qui est considéré comme une condition de haute pression pour les décharges hors équilibre.

Cette section présente les principaux mécanismes régissant les décharges électriques. Elle commence par un bref rappel sur les décharges à basse pression pour introduire les mécanismes communs à toutes les décharges, puis présente les mécanismes spécifiques aux décharges à haute pression, en particulier dans l'air.

1.3.1 Décharges hors équilibre à basse pression

Les premiers travaux de Townsend [12] ont porté sur la création d'un plasma entre deux électrodes planes dans une enceinte de basse pression, comme présenté dans la figure 1.5. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux bornes des électrodes, les électrons présents initialement dans l'enceinte se déplacent sous l'effet du champ électrique. Ce champ initial est appelé champ extérieur, car il n'y a pas encore de charge d'espace dans le domaine, l'ionisation ne s'étant pas encore produite. Les électrons sont à l'origine de deux réactions, à savoir l'ionisation qui favorise la croissance du nombre de charges, et l'attachement ou la recombinaison qui a l'effet contraire de l'ionisation.

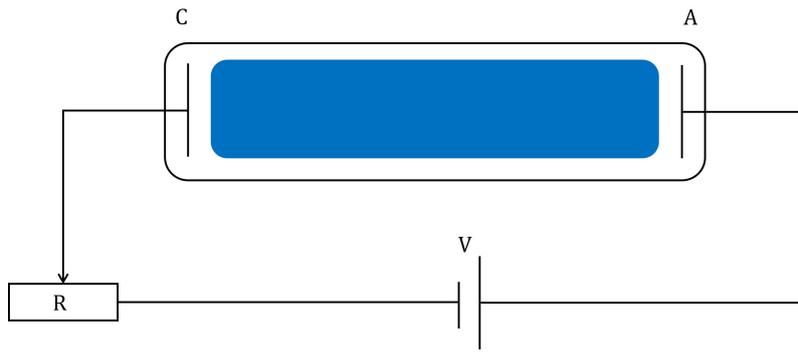


FIGURE 1.5 – Configuration pour l'étude des décharges basse pression

Les quatre régimes de décharges observés sont présentés dans la figure 1.6.

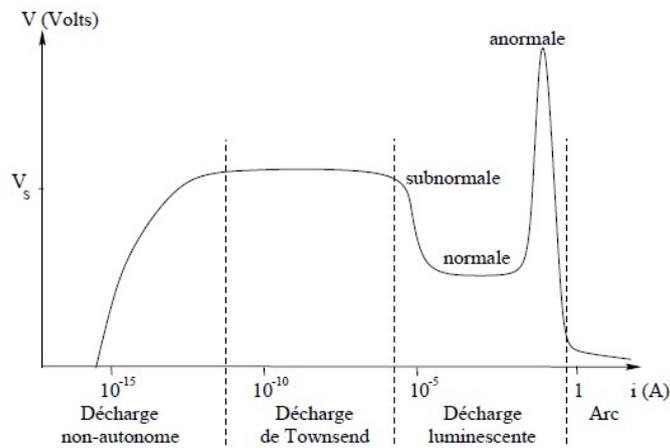


FIGURE 1.6 – Caractéristique courant-tension pour le dispositif de la figure 1.5

Ces quatre régimes sont :

1. Les décharges non-autonomes : elles sont définies par leur faible courant et leur besoin d'un apport externe d'électrons germes pour se maintenir. Cette contribution est souvent fournie par une source lumineuse, ce qui permet aux électrons de se multiplier sous l'influence du champ électrique et d'être collectés par l'anode.
2. Les décharges de Townsend : Ce deuxième régime est considéré comme un régime auto-entretenu (ou autonome), tout comme les régimes suivants, car il ne nécessite aucune source extérieure en plus de la tension appliquée. Le courant croît de manière exponentielle avec la tension appliquée. En plus de l'ionisation en volume ou impact électronique, illustré sur la figure 1.7, il y a une émission secondaire d'électrons due à l'impact des ions positifs et des photons sur la cathode.

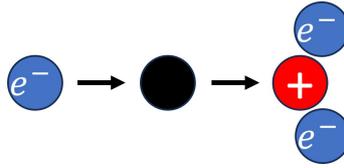


FIGURE 1.7 – Schéma d'un impact électronique

Townsend a démontré que le courant de décharge i à une distance x de la cathode est décrit par :

$$i(x) = i(0) \frac{e^{\alpha x}}{1 - \gamma(e^{\alpha x} - 1)} \quad (1.1)$$

où α est le coefficient d'ionisation en volume (par impact électron-neutre) et γ le coefficient d'émission secondaire d'électrons à la cathode. Lorsque le coefficient $m = \gamma(e^{\alpha x} - 1)$ se rapproche de 1 (c'est-à-dire lorsque les ions sont suffisamment accélérés à proximité de la paroi de la cathode), le courant de décharge croît très fortement, de manière sur-exponentielle. La relation $m = 1$ est la condition de passage au régime de Townsend. Elle est directement liée à la tension disruptive V_S décrivant les courbes de Paschen [39] dont une allure est donnée sur la figure 1.8.

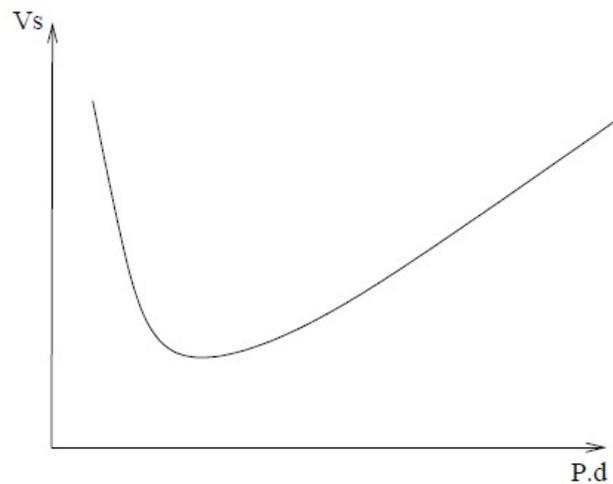


FIGURE 1.8 – Courbe de Paschen : tension disruptive en fonction du produit pression distance

V_S est fonction du produit $P \times d$. Aux basses pressions, les collisions entre les électrons et les ions sont peu fréquentes et l'ionisation s'en trouve pénalisée. Aux hautes pressions, les collisions sont tellement fréquentes que les électrons atteignent difficilement l'énergie nécessaire pour ioniser des neutres. Dans les deux cas, une tension suffisamment élevée doit être fournie pour établir une décharge. Il existe un point intermédiaire où la tension minimale est requise pour atteindre cet état de décharge.

3. Les décharges luminescentes : ce régime est également l'œuvre du mécanisme de Townsend, mais avec une différence importante : la création de charges d'espace importantes. Ces charges d'espace sont générées par la différence de mobilité entre les électrons et les ions. Dans les zones de champ fort, les électrons, étant plus rapides, laissent derrière

eux les ions. La décharge n'est donc plus principalement motivée par le champ électrique extérieur, mais plutôt par le champ de charge d'espace. Ce phénomène permet à la décharge de se maintenir par la présence des charges d'espace, même lorsque la tension appliquée diminue, comme observé sur la figure 1.6.

4. L'arc électrique : le régime d'arc se distingue des régimes précédents par une faible tension de maintien et un très fort courant de décharge, ainsi que par des températures très élevées, atteignant plusieurs milliers de Kelvin. Les mécanismes à l'origine de ce régime sont différents de ceux des régimes précédents, et incluent notamment l'effet thermo-ionique et l'émission par effet de champ, comme mentionné dans [40].

Les travaux de Townsend ont permis de distinguer différents régimes de décharges électriques dans les plasmas. Les décharges non-autonomes nécessitent un apport externe d'électrons, tandis que les décharges de Townsend sont auto-entretenues. Le mécanisme de Townsend est aussi présent dans les décharges luminescentes avec des charges d'espace importantes. Le régime d'arc est caractérisé par une faible tension de maintien, un fort courant de décharge et des températures très élevées. Les mécanismes mentionnés sont modifiés en cas de pression élevée, ce qui est abordé dans la section suivante.

1.3.2 Décharges hors équilibre à pression atmosphérique

La théorie des décharges à basse pression réalisée par Townsend n'est plus valable à la pression atmosphérique comme en témoignent les observations expérimentales rapportées dans [40]. Les décharges à pression atmosphérique se caractérisent par leur grande inhomogénéité spatiale, prenant souvent la forme de micro-décharges et ayant des temps de vie courts. De plus, l'effet du matériau sur la tension disruptive disparaît pour des valeurs de $P \times d$ supérieures à 50-300 torr.cm. Des pulses de courant se produisent même à des pressions basses sur des électrodes à faible rayon de courbure, connus sous le nom d'effet couronne. De plus, la durée des pulses est 100 fois plus courte que prévu par la théorie de Townsend. Les travaux de Loeb et Raether [12] ont identifié trois phénomènes à l'origine des décharges à pression atmosphérique : les avalanches, les avalanches successives et les streamers.

1.3.2.1 Les avalanches

Les avalanches électroniques se forment en raison de l'ionisation par impact d'électrons. Lorsqu'un électron présent dans le gaz est accéléré par un champ électrique avec la force de Lorentz, il peut arracher un électron à un atome neutre, cet électron est à son tour accéléré, ce qui favorise les réactions d'ionisation et empêche les réactions d'attachement électronique et de recombinaison. La progression de ces réactions dépend grandement du champ électrique réduit $\frac{E}{N}$, qui correspond au rapport entre le champ électrique et la densité du gaz. La figure 1.9 présente l'initialisation et le processus de l'avalanche électronique.

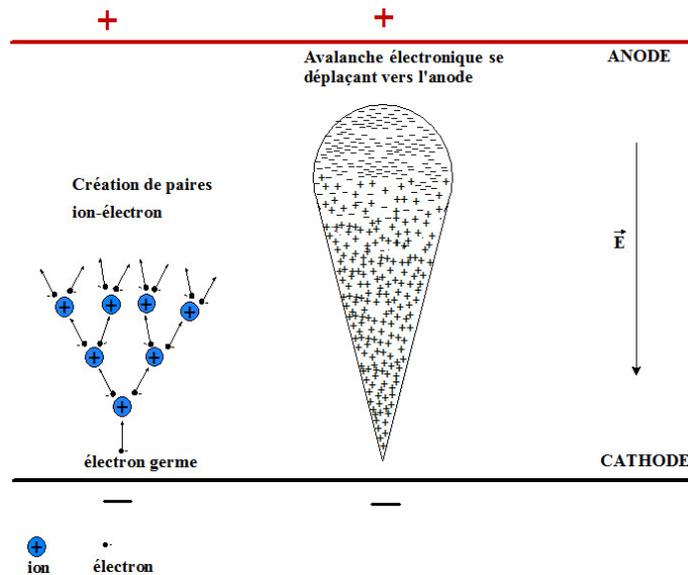


FIGURE 1.9 – Initialisation et processus de l’avalanche électronique [41]

Bien que l’avalanche soit la première étape de la formation d’un plasma, le milieu n’en est pas un car il n’est pas électriquement neutre à ce moment.

1.3.2.2 Les avalanches successives

Lorsque plusieurs avalanches successives ont lieu, cela peut entraîner des pics de courant conduisant potentiellement à un état stationnaire ou à la formation d’un arc électrique, en fonction du champ électrique réduit. Le phénomène de claquage se produit lorsque l’accumulation de charges d’espace devient significative. Cette accumulation de charges d’espace se forme après un certain temps en raison des avalanches successives. Étant donné que les électrons sont plus mobiles que les ions, une charge d’espace se développe entre les électrodes. Lorsque cette charge d’espace atteint un niveau critique, déterminé par le nombre de charges accumulées, le claquage se produit. Le niveau critique peut varier de quelques dizaines de picocoulombs à plusieurs microcoulombs en fonction des conditions. Cependant, le temps écoulé avant le claquage est en pratique beaucoup plus court que le temps nécessaire à la formation d’une importante charge d’espace par le processus des avalanches. Pour résoudre cette question, le mécanisme des streamers a été proposé.

1.3.2.3 Streamers

Par la suite, une autre théorie a été proposée pour expliquer les phénomènes observés à haute pression, connue sous le nom de mécanisme des streamers. Les streamers sont des ondes d’ionisation qui se propagent à travers des micro-canaux d’un diamètre de quelques microns. Le mécanisme à l’origine de la formation d’un streamer est une avalanche électronique appelée avalanche primaire. La différence de mobilité entre les électrons et les ions crée un déséquilibre de charge d’espace qui s’amplifie au fur et à mesure du développement de l’avalanche. Lorsque la charge d’espace atteint un certain seuil, le streamer se forme et se propage à travers le milieu. Ce processus est caractérisé par des phénomènes rapides et dynamiques, avec des gradients élevés de densité d’ions et d’électrons le long du front du streamer.

Lorsque la charge d'espace atteint un niveau suffisamment élevé, le champ ambipolaire, induit par cette charge d'espace, devient prédominant par rapport au champ extérieur. Cela conduit à l'apparition d'une onde d'ionisation qui n'est plus soumise au champ extérieur. Cette onde d'ionisation n'est plus soumise au champ extérieur et n'a pas de direction de propagation privilégiée. Ainsi, elle peut se déplacer aussi bien de l'anode vers la cathode que dans le sens inverse, donnant naissance à deux types de streamers : les streamers anodiques et les streamers cathodiques dont leur principe de fonctionnement est présenté par un schéma sur la figure 1.10.

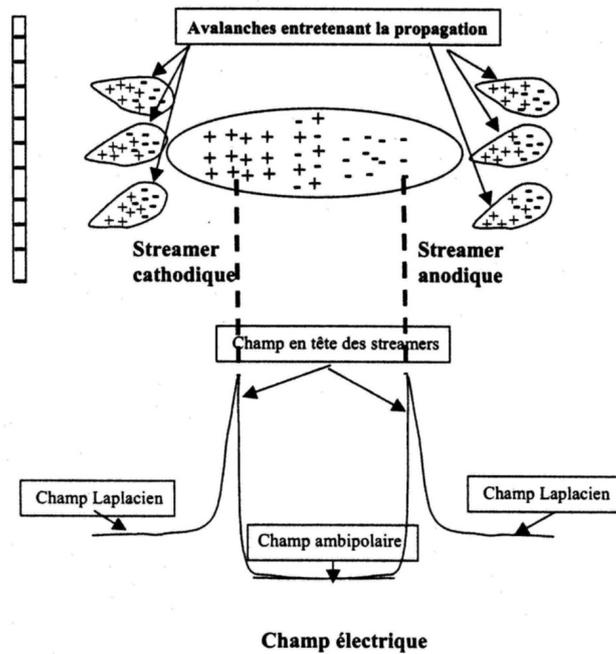


FIGURE 1.10 – Principe des streamers [40]

Le développement d'un streamer anodique se déroule comme suit : une avalanche primaire se forme, laissant derrière elle une forte charge positive. Cette charge attire les électrons environnants, déclenchant de nouvelles avalanches secondaires le long de leur trajet. Les électrons produits rejoignent la charge positive, formant ainsi un plasma et laissant un front de charge positive. Ce mécanisme peut se répéter, permettant une propagation rapide du plasma et potentiellement la création d'un canal fortement conducteur entre les deux électrodes.

Le développement d'un streamer cathodique fonctionne sur un principe similaire. Si le champ ambipolaire est suffisamment intense et si l'avalanche primaire n'a pas encore atteint la cathode, des avalanches secondaires se forment en avant de l'avalanche, laissant derrière elles une importante charge positive. Les électrons en tête de l'avalanche primaire rejoignent ces ions positifs pour former un plasma, étendant ainsi le micro-canal en direction de l'anode. Le front du canal plasma est alors composé d'électrons provenant des avalanches secondaires, et le processus se répète jusqu'à ce que l'anode soit atteinte ou jusqu'à ce que les électrons en amont du canal disparaissent.

1.3.3 Les décharges corona

Les décharges couronnes sont des décharges hors équilibres qui se produisent dans des environnements où le champ électrique est fortement non-uniforme. Ce type de champ peut être créé par un système d'électrodes asymétriques, où l'électrode active a un rayon de courbure très faible par rapport à la distance inter-électrode. Le champ électrique est extrêmement intense près de cette électrode et diminue rapidement à mesure que l'on s'éloigne. Trois configurations courantes de ces dispositifs sont étudiées : pointe-plan, fil-cylindre et fil-fil comme illustré dans la figure 1.11.

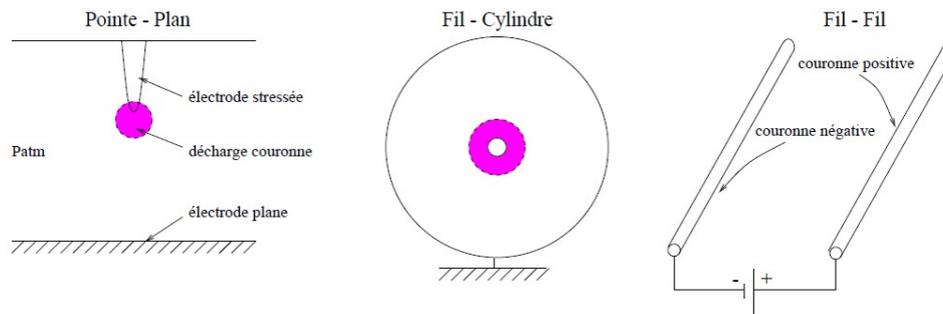


FIGURE 1.11 – Configurations typiques pour la formation de décharges couronnes [42]

La formation d'une décharge couronne est déterminée par la répartition du champ électrique, ce qui ne permet pas les avalanches électroniques nécessaires à l'initialisation de la décharge qu'à proximité de l'électrode active. Par conséquent, le déclenchement de la décharge dépend principalement de la valeur maximale du champ électrique près de l'électrode. Lorsque la différence de tension appliquée est insuffisante, un courant très faible est mesuré en raison de la présence de particules chargées naturelles dans le gaz. Cependant, lorsque la tension atteint un certain seuil, la décharge se produit et s'accompagne d'une émission lumineuse autour de l'électrode active, entraînant une augmentation du courant mesuré. L'émission lumineuse observée est due à l'excitation d'atomes neutres présents dans le gaz. Il est possible d'observer deux types de décharges : les décharges corona positives ou négatives, selon que l'électrode active joue le rôle d'anode ou de cathode. Les mécanismes de fonctionnement de ces deux types de décharges sont brièvement décrits dans les sections suivantes.

1.3.3.1 Les décharges corona positives

Dans ce contexte, l'électrode active est l'anode et trois régimes de décharge se manifestent en fonction de la tension appliquée.

Le premier régime, nommé "burst", est observé à basse tension et se caractérise par une suite de décharges étincelantes générant de faibles impulsions de courant dont l'intensité varie de 10 nA à 100 μ A. Une avalanche se déclenche près de l'anode et se propage en direction de la cathode. Les électrons sont expulsés rapidement, créant ainsi une charge positive qui augmente au fil du temps. Finalement, l'avalanche se transforme en "streamer" et le champ électrique devient trop faible pour maintenir la décharge. Les électrons sont alors absorbés par l'anode ou s'attachent aux particules neutres, tandis que les ions posi-

tifs se déplacent vers la cathode jusqu'à ce que la charge d'espace diminue suffisamment pour permettre l'apparition d'un nouveau pulse. Le régime "burst" se compose donc d'une succession d'avalanches ou de "streamers" se produisant à une fréquence déterminée par le temps requis pour évacuer les ions et pouvant atteindre quelques kHz.

Si la tension appliquée est plus élevée, l'avalanche initiale génère des streamers beaucoup plus puissants et le comportement observé diffère selon l'efficacité des processus d'attachement. Dans ce régime, le courant pendant les pulses est de l'ordre de 10 à 100 mA. Dans un gaz hautement électronégatif, qui a une forte affinité pour les électrons, les électrons produits par les avalanches vont s'associer aux molécules neutres et constituer ainsi un nuage d'ions négatifs à proximité de l'anode. Ce nuage se développe et le champ de charge devient finalement suffisamment intense pour neutraliser le champ électrostatique. Le nuage d'ions négatifs joue alors le rôle de cathode, entraînant une décharge de Townsend comme expliqué dans la section 1.3.1. Des processus photoioniques assurent l'apport d'électrons entre le nuage et l'anode, tandis que les pertes d'ions négatifs (causées par la dérive des ions positifs dans le nuage) sont compensées par les processus d'attachement. La décharge résultante est donc stable et auto-entretenu, et les résultats expérimentaux comme les simulations numériques montrent que ce régime est constitué de pulses de haute fréquence (de 0.1 à 1 MHz) [43, 44]. En revanche, lorsque le gaz n'est pas électronégatif ou l'est peu, les avalanches initiées près de l'anode se propagent et acquièrent une charge d'espace suffisamment importante pour générer une onde d'ionisation cathodique. Les streamers se propagent ensuite en direction de la cathode et s'éteignent avant d'y parvenir, permettant ainsi l'initialisation d'un nouveau cycle.

Pour les décharges couronnes positives, un troisième régime se manifeste à des tensions élevées. Les streamers produits près de l'anode sont alors assez puissants pour traverser l'espace inter-électrode et atteindre la cathode, provoquant ainsi une étincelle ou un arc. Ce phénomène est connu sous le nom d'onde de retour ou "return stroke". Avant l'onde de retour, un leader apparaît souvent, jouant un rôle crucial dans la création d'un canal conducteur pour la décharge principale. Cependant, dans cette thèse, l'attention est portée sur les décharges corona en tant que type spécifique de décharge partielle, dans des conditions de tensions moins élevées.

1.3.3.2 Les décharges corona négatives

De même que pour les décharges couronnes positives, les décharges couronnes négatives sont générées à partir d'une avalanche électronique qui commence près de l'électrode active. Les ions positifs produits par cette avalanche se déplacent rapidement vers la cathode, entraînant une émission secondaire importante d'électrons. Selon la tension appliquée, trois régimes de décharges peuvent être observés.

1. Le premier régime des décharges couronnes négatives se manifeste à basse tension et se caractérise par des pulses appelés "pulses de Trichel" [45]. Les électrons, éjectés de la cathode par bombardement ionique et amplifiés par l'avalanche électronique, se déplacent vers les zones à faible champ électrique. Certains de ces électrons se combinent avec des molécules neutres pour former des ions négatifs qui s'accumulent, créant une importante charge d'espace qui neutralise le champ électrique. Cela empêche toute ionisation supplémentaire, ce qui provoque une diminution des populations d'électrons et d'ions, jusqu'à ce qu'un nouveau pulse se déclenche. La fréquence des pulses est

déterminée par le temps de dérive des ions positifs et varie de quelques kHz à basse tension à quelques MHz à haute tension [46].

2. En augmentant la tension appliquée, l'ionisation se renforce et l'intervalle entre les pulses diminue. Une fois qu'une certaine fréquence de pulse est atteinte, la décharge évolue vers un régime luminescent stationnaire maintenu par un mécanisme de Townsend.
3. Si l'espace entre les électrodes est suffisamment grand, des streamers peuvent se former et une augmentation de la tension peut provoquer des étincelles ou même une transition vers l'état d'arc, similaire au comportement des décharges couronnes positives.

1.3.4 Conclusion

La compréhension des décharges hors équilibre implique la prise en compte à la fois des décharges à basse pression et des décharges à haute pression. Parmi celles-ci, les décharges corona sont un exemple courant de décharge hors équilibre. La compréhension de ces phénomènes permet d'appréhender les mécanismes clés et d'analyser les effets électromagnétiques qui peuvent leur être associés.

Dans la section suivante, la question de la compatibilité électromagnétique est abordée pour mettre en évidence les interférences potentielles entre les décharges et les systèmes de communication aéronautiques.

1.4 Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) est un domaine essentiel qui vise à garantir le bon fonctionnement des systèmes électroniques dans des environnements électromagnétiques complexes. Elle traite des interactions entre les équipements électriques et électroniques ainsi que des perturbations électromagnétiques susceptibles d'affecter leur fonctionnement.

Pour évaluer les contraintes auxquelles les appareils peuvent être soumis, il est important de caractériser l'environnement électromagnétique. Cette caractérisation passe par l'évaluation du champ électromagnétique ambiant ainsi que par l'évaluation des courants et les tensions perturbateurs sur les câbles d'interconnexion entre les équipements.

La CEM traite à la fois de l'émissivité et la susceptibilité d'un système. L'émissivité fait référence à la capacité d'un équipement à limiter les perturbations qu'il génère dans son environnement. La susceptibilité, quant à elle, se réfère à la capacité d'un équipement à fonctionner correctement en présence de perturbations électromagnétiques externes.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons spécifiquement à la susceptibilité d'un équipement vis-à-vis d'une agression électromagnétique externe. Les deux modes de couplage possibles qui sont la conduction et le rayonnement sont donc à analyser.

Cette thèse se concentre sur l'analyse du bruit dans un système de communication aéronautique sol exposé à un environnement ouvert. Ce système est soumis à différents phénomènes électromagnétiques complexes, d'origine humaine et naturelle. Bien que l'antenne de réception fonctionne dans une bande spectrale spécifique, elle agit comme un capteur électromagnétique pour l'environnement global. Les perturbations générées par les impulsions corona constituent une source de bruit large bande. Lorsqu'une décharge

corona se produit, elle génère un courant qui se couple plus ou moins avec l'antenne et les câbles d'interconnexion. Le courant de la décharge est large bande, son rayonnement perturbe directement l'antenne VHF ; de plus, le courant circulant sur le pylône engendre des perturbations sur le câblage du système. Ces deux voies de couplages peuvent induire la perturbation du système de réception. Un autre mode d'agression du système existe, c'est une décharge corona directement sur l'antenne.

Les méthodes d'analyse CEM supposent de connaître l'ambiance électromagnétique perturbatrice et ceci dans le but de définir les tests de susceptibilité sur les systèmes. Dans notre cas, où la connaissance des décharges qui se produisent sur un pylône en environnement naturel est limitée, il est nécessaire de réaliser des expérimentations pour mieux définir cet environnement. De plus, pour caractériser la susceptibilité des équipements aux perturbations conduites, il est courant de soumettre les appareils à des courants et des tensions injectées sur les câbles qui sont représentatifs des courants et des tensions mesurées dans le cas réel.

Dans le cadre de cette thèse, des mesures en conduction sont effectuées sur le pylône à la fois en environnement naturel et en laboratoire. L'objectif de ces mesures est d'analyser les perturbations électromagnétiques qui influent sur les systèmes sol de communication VHF. Ces mesures permettent d'identifier les sources de perturbations et de mieux définir les caractéristiques temporelles et fréquentielles des phénomènes naturels. Les mécanismes de couplage entre des décharges corona et le système de communication seront plus particulièrement regardés. Pour réaliser les mesures, différents équipements sont utilisés, tels que les analyseurs de spectre, les oscilloscopes, les sondes de courant et les antennes de mesure.

En parallèle des mesures, des simulations électromagnétiques sont également utilisées pour analyser le couplage entre des décharges corona sur le pylône et un équipement victime. Ces simulations consistent à modéliser d'un point de vue électromagnétique le pylône, les câbles, l'antenne de réception ainsi que l'environnement proche à l'aide de logiciels spécialisés. Les caractéristiques électriques des décharges corona sont prises en compte pour calculer les champs électromagnétiques sources. Ces simulations permettent d'analyser différentes configurations expérimentales et de comprendre les mécanismes de couplage en identifiant les zones sensibles et les voies de propagation prédominantes.

En combinant les résultats des simulations avec les mesures expérimentales réalisées en environnement naturel et en laboratoire, il est possible de comparer les comportements observés et de valider les modèles de simulation. Cela permet d'améliorer la compréhension des phénomènes électromagnétiques complexes liés aux décharges corona et d'élaborer des stratégies de protection et de conception plus efficaces pour les systèmes de communication aéronautique sol.

1.5 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, une présentation a été faite sur les différents aspects des communications aéronautiques, notamment sur les liaisons aéronautiques en bande VHF et les équipements nécessaires pour assurer leur bon fonctionnement. De plus, les interférences électromagnétiques dans les systèmes de communication aéronautique sol ont été abordées, en identifiant les sources d'interférences de type RFI et celles liées aux décharges électrostatiques. Ensuite, les conditions électrostatiques de l'atmosphère ont été

examinées, en s'intéressant au champ électrostatique ambiant de la Terre et à ses modifications survenant lors de la formation et de l'électrification des cumulonimbus. Par la suite, le chapitre a traité les décharges hors équilibre, en débutant par les décharges à basse pression, puis en se concentrant sur l'étude des décharges à haute pression, qui inclut les décharges à pression atmosphérique qui sont d'intérêt pour l'étude. Divers mécanismes, tels que les avalanches, les avalanches successives et les streamers, ont été examinés pour mieux comprendre ces décharges. Enfin, les décharges corona ont été discutées en raison de leur pertinence dans le contexte de la thèse. Enfin, le concept de compatibilité électromagnétique a été présenté, il met en évidence la susceptibilité des systèmes de communication aux perturbations, telles que les décharges corona. Il fournit des méthodes d'analyse pour comprendre les effets de ces perturbations et trouver des solutions appropriées.

Ce chapitre nous a permis d'acquérir une base solide de connaissances sur les différents phénomènes électromagnétiques et les défis associés aux communications aéronautiques. Le chapitre 2 présente un système d'acquisition autonome spécifiquement conçu pour collecter une base de données qui est ultérieurement analysée dans le chapitre 3.

Chapitre 2

Conception d'un système d'acquisition autonome sur un pylône d'essai

L'un des objectifs de cette thèse est de comprendre les mécanismes des décharges corona sur un pylône dans un environnement naturel, afin de mieux appréhender leurs effets sur les antennes VHF. En raison de la complexité des mesures à effectuer, il existe très peu de données sur le terrain à ce sujet [4, 2]. Afin de combler cette lacune, un système d'acquisition dédié a été mis en place sur un pylône d'essai fourni par la DTI.

Le schéma de ce système d'acquisition, présenté dans la figure 2.1, comprend des capteurs adaptés pour les contraintes de mesure en extérieur et dans un environnement électromagnétique complexe.

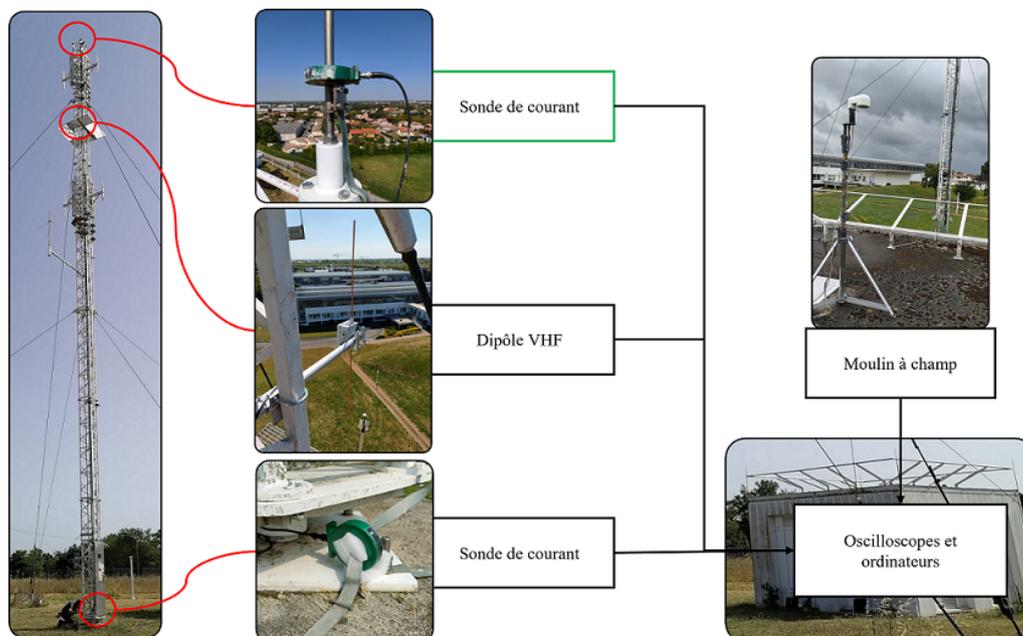


FIGURE 2.1 – Schéma du système d'acquisition : à gauche, le pylône ; au milieu, les 3 capteurs installés sur le pylône ; à droite, les appareils installés sur et dans le local technique du pylône pour la mesure de champ et l'acquisition de données

Ce chapitre permet de présenter toutes les caractéristiques du système d'acquisition. Il commence par la section 2.1 qui présente une vue d'ensemble du pylône d'essai mis à disposition par la DTI. Ensuite, la section 2.2 décrit les différents capteurs utilisés pour effectuer les mesures, tels que les sondes de courant, une antenne VHF et un moulin à champ. Les systèmes informatiques utilisés pour l'acquisition des données et les numériseurs sont présentés dans la section 2.3. Par la suite, la section 2.4 explique la calibration du système d'acquisition afin d'assurer la fiabilité des mesures. Enfin, l'interface graphique, qui permet l'observation toutes les mesures en parallèle en fonction des différentes échelles temporelles, est présentée dans la section 2.5.

2.1 Présentation du pylône d'essai mis à disposition

La DTI est basée à Basso Cambo, Toulouse. Elle est rattachée à la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DSNA) et à la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). La DTI a pour responsabilité de concevoir, faire réaliser, installer et maintenir les principaux systèmes de navigation aérienne, ainsi que de fournir une assistance au contrôle aérien pour le compte de la DSNA, qui est prestataire de services de gestion du trafic aérien, entre autres.

Dans le cadre de cette thèse, la DTI a mis à disposition un pylône d'essai de 25 m de hauteur. Ce pylône permet principalement de réaliser des tests antennaires émission-réception et n'est pas utilisé en opérationnel.

Le pylône est situé sur le site de la DTI, sur un terrain plat, loin de tout bâtiment d'une hauteur similaire. Le bâtiment le plus proche se trouve à une distance de 60 m et est d'une hauteur inférieure à 15 m. Il y a un arbre à proximité, à une distance de 20 m et quelques mètres de hauteur, et les autres arbres se trouvent à une distance minimale de 60 m. Cette configuration est illustrée sur la photo 2.2.



FIGURE 2.2 – Pylône d'essai et ses obstacles environnants [47]

La figure 2.3 représente le pylône ainsi que le local technique dédié à celui-ci, qui abrite les alimentations des antennes et leurs récepteurs. Ce local se trouve à une distance de 5 m du pylône.



FIGURE 2.3 – Pylône d'essai mis à disposition situé sur le site de la DTI

Le pylône est composé de 7 tronçons verticaux, chacun ayant une hauteur de 3.6 m et une base carrée de 50 cm de côté. Les tronçons sont vissés les uns aux autres et sont numérotés de bas en haut afin de les identifier plus simplement. La partie inférieure du pylône comprend un axe central placé au milieu de la base du pylône, qui repose sur une dalle en béton. Pour maintenir le pylône en position verticale, 8 haubans diélectriques sont utilisés, fixés au-dessus du 3e et du 6e tronçon. Ces haubans sont ancrés dans des blocs en béton.

Le pylône est équipé de 5 antennes, dont 2 paires d'antennes VHF avec réflecteurs numérotés 2 et 4 sur la figure 2.4. L'antenne numérotée 5 est une antenne "Ground Plane" qui fonctionne également en bande VHF et est fixée sur le 4e tronçon à une hauteur de 12.8 m. Les deux paires d'antennes VHF sont situées respectivement à 16.2 m et 23.4 m de hauteur. Une plateforme de découplage (3) est positionnée à égale distance entre chaque paire d'antennes. Enfin, un paratonnerre d'un mètre de long (1) est installé au sommet du pylône.

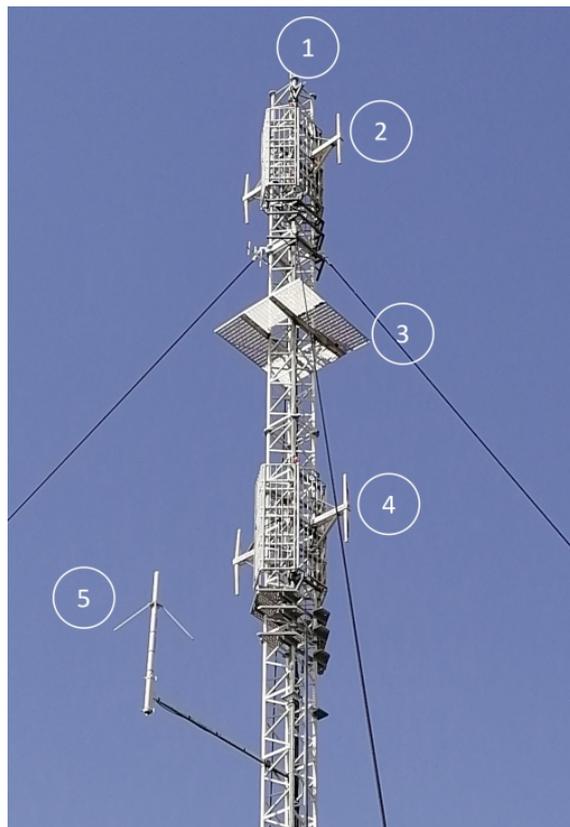


FIGURE 2.4 – Antennes installées sur le pylône

Les antennes mentionnées sont toutes reliées par des câbles coaxiaux à des équipements situés dans le local technique, tels que des récepteurs. Les câbles traversent le pylône puis passent par une goulotte située sur le côté du pylône et sous des plaques métalliques au sol pour arriver au local. Ces équipements ne sont pas en fonctionnement permanent, mais ils peuvent être testés sur des chaînes complètes puisque le local est équipé de récepteurs et de capteurs.

Pour assurer l'équipotentialité du pylône, un plat de cuivre de 25 mm de largeur est serti le long du pylône. Ce conducteur est relié à la base du pylône par le biais de deux prises de terre de type "patte d'oie". Les prises de terre "patte d'oie" permettent une mise à la terre complète du pylône à l'aide d'un circuit enfoui dans le sol. Ce circuit consiste en une boucle qui est enterrée à une profondeur suffisante pour disperser les courants dans le sol afin d'éviter tout courant à la surface.

Ce pylône présente une hauteur réduite, atteignant 25 m. En comparaison, les pylônes opérationnels, sur lesquels des problèmes de bruit en bande VHF ont été attribués aux décharges corona, mesurent généralement plus de 50 m de hauteur (par exemple, 66 m pour le pylône situé à Saint-Jean-d'Illac). Ces pylônes opérationnels sont utilisés principalement pour des communications aéronautiques "en route" et installés dans des zones isolées ou avancées, telles que des sommets de montagne ou des plaines dégagées, afin de couvrir de vastes zones de communication. Ils sont donc plus exposés à des perturbations météorologiques. Pour les communications avec les avions en approche, ou au roulage, les antennes sont situées sur des pylônes de tailles plus modestes ou directement placées sur la tour de contrôle.

Nous n'avons pas connaissance de la présence de décharges corona sur le pylône de la DTI, car aucune mesure spécifique n'a été réalisée à cet égard. Cependant, il est intéressant de noter que ce pylône présente une structure similaire aux pylônes en service, même s'il est plus petit, et qu'il est facilement accessible, ce qui en fait un bon choix pour mener nos expérimentations.

L'installation d'un système d'acquisition nécessite d'éteindre les équipements avant chaque intervention, ce qui n'est pas compatible avec une utilisation continue de ces instruments sur pylône opérationnel.

Le pylône est situé sur une plaine en périphérie urbaine de Toulouse, à la limite entre un climat océanique dégradé et méditerranéen. La saison estivale est la plus propice pour réunir les conditions météorologiques favorables à la production de décharges corona à Toulouse. Les campagnes de mesures sur ce pylône ont été réalisées entre mai et novembre 2021 et 2022.

Dans le cadre de cette thèse, compte tenu du nombre significatif d'événements orageux dans la région toulousaine, l'utilisation de ce pylône permet d'effectuer des mesures en conditions réelles et de constituer une base de données terrain précieuse pour la comparaison avec des simulations numériques et la théorie des décharges. À cette fin, divers capteurs ont été installés sur le pylône et sont présentés dans la section suivante.

2.2 Présentation des capteurs installés sur le pylône

Le système d'acquisition conçu vise à collecter des données pour mieux comprendre l'interaction entre les décharges corona et les antennes situées sur le pylône. Plusieurs capteurs sont utilisés pour cela.

Tout d'abord, des sondes de courant sont placées à différents endroits du pylône pour évaluer les courants aussi bien au niveau des antennes que sur la structure ou le paratonnerre. La première sonde est installée en haut du pylône, à la base du paratonnerre, tandis que les deux autres sondes sont placées à la base du pylône sur les conducteurs de liaison des prises de terre patte d'oie comme illustré sur la figure 2.1. Un dipôle spécifique permet de mesurer le champ électrique dans la bande VHF afin d'étudier le couplage entre les décharges sur le paratonnerre et les antennes VHF dans cette bande.

Les décharges corona sont des décharges électrostatiques qui se produisent pendant les orages, il est donc important de connaître l'amplitude et la polarité du champ électrostatique ambiant. Pour cela, un moulin à champ est placé sur la toiture du local technique pour suivre l'évolution du champ électrique. Ce capteur basse fréquence fonctionne avec son propre système d'acquisition, qui est indépendant des autres capteurs.

2.2.1 Les sondes de courant

Les décharges corona sont des impulsions de courant [12] allant de quelques mA à des centaines de mA, comme évoqué dans la sous-section 1.3.3. Afin d'analyser les effets électromagnétiques de ces décharges, il est nécessaire de mesurer le courant qui les accompagne.

Pour réaliser ces mesures, des transformateurs de courant, appelés transformateurs de courant d'instrumentation, sont utilisés. Dans cette partie, le choix de leur emplace-

ment ainsi que leur fonctionnement est expliqué. Les caractéristiques spécifiques de chaque emplacement sont également décrites.

La probabilité d'observer des décharges corona est plus forte aux extrémités en raison de l'effet de pointe [12]. Dans le cas du pylône, le paratonnerre, de par sa hauteur et sa géométrie pointue, est l'emplacement le plus susceptible au déclenchement de décharges corona. Le premier choix consiste à installer la sonde de courant à la base du paratonnerre, à environ un mètre de la pointe, conformément à ce qui est illustré sur la figure 2.5. Cette approche permet de minimiser l'impact sur la géométrie du paratonnerre et de s'assurer que la mesure n'est pas influencée par la structure du pylône. Les mesures sont déclenchées lorsque le courant sur le paratonnerre dépasse un seuil prédéfini lors des campagnes de mesure.



FIGURE 2.5 – Sonde de courant Pearson de conversion 0.5 V/A située sur le paratonnerre

Les décharges corona ne se produisent pas uniquement sur le paratonnerre : les antennes et les aspérités de la structure métallique du pylône peuvent également être des zones potentielles de décharge. Il est difficile de prédire tous les emplacements où peuvent avoir lieu les décharges corona car leur apparition va dépendre du champ électrostatique [11]. De plus, il n'est pas possible d'équiper le pylône de sondes sur chaque aspérité ou pointe, car cela nécessiterait un grand nombre de capteurs et pourrait altérer la géométrie du pylône.

Cependant, il est possible de mesurer l'activité radioélectrique globale du pylône en installant une sonde de courant à sa base. Cette mesure permet de déterminer si d'autres zones du pylône sont affectées par des décharges corona et d'évaluer le nombre d'emplacements susceptibles de perturber le fonctionnement des antennes. Lors de l'observation de ces courants, il est important de prendre en compte les fonctions de transfert induites par la structure du pylône, ainsi que les phénomènes de résonance qui peuvent se produire.

Les sondes utilisées pour mesurer les décharges corona doivent répondre à plusieurs critères :

- mesurer des courants d'intensité allant de quelques mA à des centaines de mA ;
- couvrir des fréquences basses afin de caractériser les réponses des systèmes ;
- couvrir des fréquences suffisamment hautes pour atteindre la bande de fréquences VHF ;
- être facilement installables ;

- être résistantes aux intempéries ;
- être passives, ne nécessitant pas d'alimentation électrique.

Afin de répondre à ces contraintes, il a été décidé d'utiliser des transformateurs de courant (TC), également appelés transformateurs d'instrumentation, pour effectuer les mesures de courant. Ils sont composés de noyaux ferromagnétiques à large bande. Les TC utilisés sont des produits commerciaux de la marque Pearson.

Un TC se compose d'un enroulement primaire avec N_1 spires et d'un enroulement secondaire qui entoure le noyau ferromagnétique avec N_2 spires. Lorsqu'un courant alternatif circule dans l'enroulement primaire, il crée un flux magnétique dans le noyau. Ce flux induit à son tour un courant dans l'enroulement secondaire. L'enroulement secondaire est connecté à une résistance R sur laquelle la tension V_s est mesurée, comme illustré dans la figure 2.6.

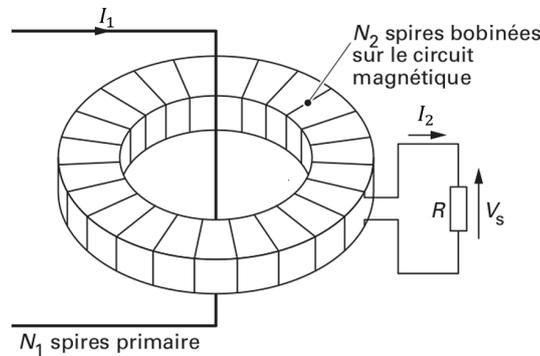


FIGURE 2.6 – Schéma du fonctionnement d'un transformateur de courant [48]

Dans le cas d'un transformateur idéal, aucun flux magnétique n'est perdu et les flux parcourant les deux enroulements sont égaux. Cela signifie que les enroulements sont parfaitement couplés, et la relation entre les courants sur les deux enroulements est donnée par l'équation suivante

$$I_1 N_1 = I_2 N_2, \quad (2.1)$$

où I_i représente le courant et N_i le nombre de spires de l'enroulement primaire $i = 1$ et secondaire $i = 2$.

En appliquant la loi d'Ohm, la tension mesurée V_s est donnée par l'expression

$$V_s = I_1 m \quad (2.2)$$

où m est défini comme $m = R \frac{N_1}{N_2}$, et R la résistance à laquelle la tension est mesurée.

En réalité, la fonction de conversion du transformateur de courant s'exprime sous la forme suivante

$$\frac{V_s}{I_1} = m \frac{j \frac{\omega}{\omega_c}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} \quad (2.3)$$

où Ω est la pulsation et

$$\omega_c = \frac{R}{L \mu} \quad (2.4)$$

représente la pulsation de coupure basse du transformateur. Cette pulsation dépend de la résistance R et de l'inductance magnétisante L_μ , propre au matériau ferromagnétique utilisé comme noyau.

Il convient de souligner que les fréquences élevées sont limitées par les fuites électromagnétiques entre les enroulements et les capacités parasites entre les composants. Ces pertes sont causées par des phénomènes tels que l'effet de peau [49], qui entraîne une redistribution du courant à travers la section transversale des conducteurs, ainsi que par les capacités parasites. Ces facteurs ont un impact significatif sur les performances du transformateur et doivent être pris en compte lors de sa conception. Les équations précises qui décrivent ces limitations dépendent des matériaux utilisés [50] et ne sont pas abordées dans cette étude.

Une sonde de courant Pearson 150 [51] est positionnée à la base du paratonnerre, comme illustré dans la figure 2.5. Cette sonde est conçue pour mesurer une tension avec une conversion de 0.5 V/A. De plus, elle est mise à la masse pour être au même potentiel que le pylône.

Le pylône est mis à la masse à l'aide d'une descente de terre qui se divise en deux pattes d'oie métalliques, comme expliqué dans la section 2.1. Une première sonde Pearson, le modèle 3525 [52], est utilisée pour s'accrocher autour d'une des pattes d'oie. La figure 2.7a illustre cette sonde installée à la base du pylône. Cette sonde a un coefficient de conversion de 0.1 V/A.



(a) Sonde Pearson de conversion 0.1 V/A



(b) Sonde Pearson de conversion 10 V/A

FIGURE 2.7 – Sondes de courant situées à la base du pylône

Durant la campagne de mesures 2022, une autre sonde de courant avec une conversion de 10 V/A est ajoutée au système pour améliorer la sensibilité des mesures. Elle est placée autour de la deuxième patte d'oie, qui peut être démontée plus facilement. Le transformateur utilisé dans cette sonde est visible dans la figure 2.7b, et il permet d'observer des courants plus faibles. Cependant, pour obtenir un gain de conversion élevé, il est nécessaire d'augmenter la valeur de la résistance. Selon l'équation (2.4), cela entraîne une augmentation de la fréquence de coupure basse, ce qui conduit à une atténuation des basses fréquences.

Dans la suite de l'analyse, les sondes de courant situées à la base sont désignées par les noms DT_1 et DT_2 . "DT" fait référence à "descente de terre", et les numéros "1" et "2" indiquent les différentes pattes d'oie utilisées.

Ces deux sondes de courant sont connectées à un oscilloscope à l'aide de câbles coaxiaux RG-214 et de connecteurs BNC. Des charges de 50Ω sont utilisées pour adapter les connexions. La vitesse de propagation dans ces câbles coaxiaux est de 66% de la vitesse de la lumière, d'après les données fournies par le fabricant [53]. Par conséquent, il y a un délai de 124.5 ns entre la sonde du paratonnerre et celle située à la base, en raison du temps de propagation à travers le câble coaxial le long du pylône. Ce délai est illustré par la figure 2.8, qui présente deux mesures de courant. La mesure du courant au niveau du paratonnerre est affichée en haut, tandis que la mesure à la base est affichée en bas.

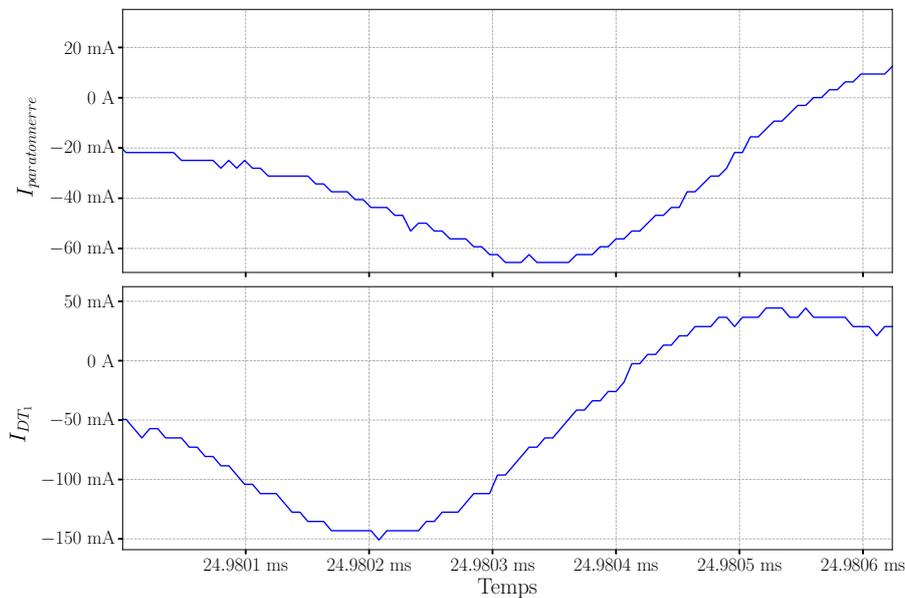


FIGURE 2.8 – Mesures de courants au niveau du paratonnerre et de la base du 9 septembre 2021 à 00h29

Dans ce contexte, le courant s'est d'abord manifesté à la base du pylône. Les deux graphiques mettent en évidence les pics de courant et montrent clairement le retard de 124,5 ns entre les deux signaux.

Ces 3 sondes sont placées de manière à ce que le courant soit considéré comme positif lorsque le flux d'électrons se dirige vers le sol. Cela permet par la suite de distinguer correctement les décharges positives et négatives.

Le tableau 2.1 récapitule les caractéristiques principales des trois sondes de courant utilisées. Il fournit les impédances de sortie des sondes ainsi que les fréquences de coupure à -3 dB correspondantes.

Emplacement	Paratonnerre	DT ₁	DT ₂
Sonde Pearson	150	3525	5753
Coefficient de conversion	0.5~V/A	0.1~V/A	10~V/A
Impédance de sortie	50	50	500
Coefficient de multiplication	4	20	2
Fréquence coupure basse	40 Hz	5 Hz	1000 Hz
Fréquence coupure haute	20 MHz	15 MHz	3 MHz

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques des 3 transformateurs de courant Pearson utilisés

Dans le cas de cette thèse, les sondes de courant utilisées ont une fréquence de coupure élevée mais qui n'atteint pas la bande VHF. Ce choix est motivé par notre intérêt pour l'étude de la phénoménologie des décharges, ce qui nécessite de couvrir les fréquences basses tout en cherchant à étendre la réponse en fréquence autant que possible compte tenu des contraintes dimensionnelles. En particulier, la mesure précise du courant autour d'un paratonnerre de plus de 2 cm de diamètre présente des défis techniques pour lesquels il est difficile de trouver des sondes adaptées. Dans les prochaines étapes de cette thèse, nous analyserons parfois des fréquences des courants mesurés par ces sondes qui dépassent les fréquences de coupure de ces sondes. Il faudra donc garder à l'esprit la précision limitée des mesures à de telles fréquences.

Dans cette section, les sondes de courant utilisées pour mesurer les courants circulant sur le pylône ont été présentées. La dynamique de fonctionnement des sondes de courant ne s'étend pas jusqu'en VHF, un capteur dédié à ces fréquences a été installé sa présentation est réalisée dans la section suivante.

2.2.2 Le dipôle VHF avec amplification

Une antenne dipolaire a été spécialement conçue et fabriquée dans le cadre de la thèse pour la bande VHF. Cette antenne a pour objectif de mesurer le bruit ambiant, d'observer les perturbations causées par les décharges électrostatiques, et de détecter tout couplage direct par rayonnement ou par conduction entre les décharges sur le paratonnerre et le dipôle.

Les doublets d'antennes VHF, présents sur le pylône, ne sont pas utilisés dans cette étude car ils sont conçus pour fonctionner dans une bande entre 108 et 137 MHz, ce qui ne permettrait pas de couvrir la large bande nécessaire pour mesurer la phénoménologie des décharges corona avec précision. Nous verrons que l'antenne rajoutée a une bande passante plus large.

Pour cette raison, un dipôle est utilisé et positionné entre les deux paires d'antennes VHF, au niveau de la plateforme expérimentale (voir figure 2.4). Cette configuration facilite la manipulation du dipôle et permet d'obtenir des mesures plus complètes sur une large gamme de fréquences.

Le dipôle, illustré dans la figure 2.9, est maintenu à une distance d'un mètre du pylône pour les mesures.



FIGURE 2.9 – Antenne dipolaire VHF fixée sur le pylône

Dans le dispositif d'acquisition, l'antenne dipolaire est équipée d'un amplificateur dédié qui permet de mesurer des niveaux de couplage électromagnétiques plus faibles.

Le système d'amplification de l'antenne dipolaire est intégré dans un boîtier fixé aux deux brins de l'antenne. Afin de vérifier l'efficacité de l'amplification, un test est réalisé en utilisant un analyseur de réseau et le montage présenté dans la figure 2.10.

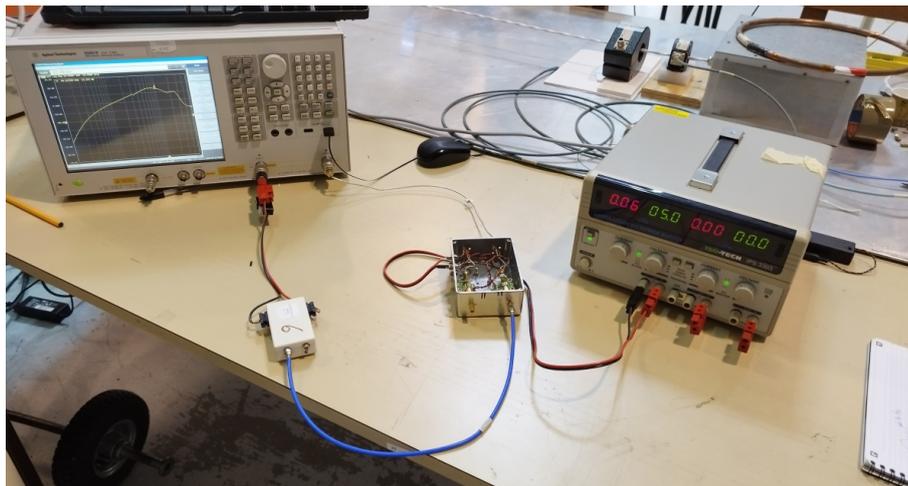


FIGURE 2.10 – Antenne dipolaire VHF fixée sur le pylône

La figure 2.11 présente la fonction de transfert mesurée par l'analyseur, mettant en évidence les performances de l'amplificateur. Les lignes rouges en pointillés indiquent la bande VHF, c'est-à-dire de 118 MHz à 137 MHz.

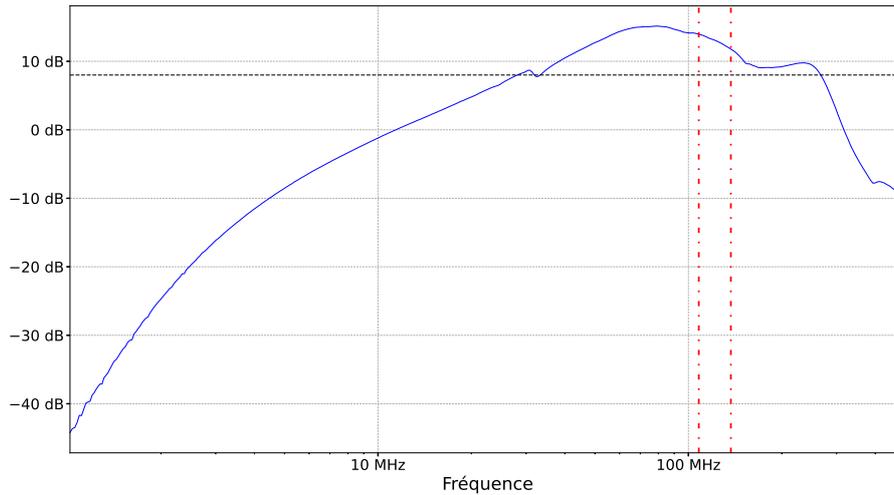


FIGURE 2.11 – Fonction de transfert de l’amplificateur

Le graphe montre une amplification d’environ 11 dB dans la bande VHF. La limite de 8 dB, représentée par la ligne horizontale noire en pointillés, indique que l’amplification est supérieure à 8 dB dans la plage de fréquences de 30 MHz à 250 MHz. Entre 1 MHz et 30 MHz, l’amplification augmente de plus de 45 dB, avec une première pente significative entre 1 et 3 MHz, suivie d’une pente plus douce de 20 dB/décade entre 3 et 30 MHz.

Au-delà de 250 MHz, l’amplification chute brusquement pour atteindre -10 dB.

Les brins de l’antenne ont une longueur de 60 cm, ce qui correspond à une fréquence de résonance centrée autour de 125 MHz pour un dipôle demi-onde.

Cette mesure complémentaire permet d’obtenir des informations précieuses sur les interactions électromagnétiques et le rayonnement du pylône dans cette gamme de fréquences.

2.2.3 Le moulin à champ AMEO340

Afin de compléter le système d’acquisition, il est important de quantifier l’intensité des phénomènes électriques, tels que les orages, et de connaître la polarité du champ électrostatique. Ces informations peuvent fournir des indications sur les phénomènes météorologiques et les corrélations entre le champ électrostatique et les événements enregistrés par les autres capteurs.

Pour mesurer le champ électrostatique, un moulin à champ (MAC) AMEO340 est utilisé. Ce dispositif est composé d’un rotor relié à la terre, qui masque et expose alternativement une électrode au champ électrostatique à mesurer. L’électrode se charge en fonction du champ électrostatique ambiant, et lorsqu’elle est masquée par le rotor, elle se décharge (voir schéma dans la figure 2.12). Le rotor induit un courant alternatif sur l’électrode, qui est directement proportionnel au champ électrostatique ambiant. Le moulin à champ convertit ensuite ce courant alternatif en une valeur de champ électrostatique en volts par mètre (V/m). La polarité du champ électrostatique est obtenue grâce à une technique de démodulation synchrone avec le rotor.

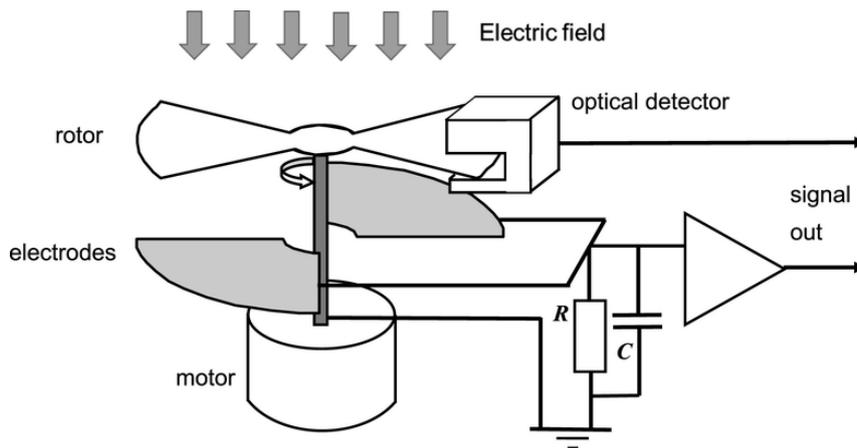


FIGURE 2.12 – Schéma de fonctionnement d'un MAC [54]

Pour réaliser cette mesure de champ électrostatique, le MAC (voir figure 2.14) est positionné sur le local situé à 5 m du pylône, sur un mât d'un mètre de hauteur. Cette position est choisie pour des raisons pratiques d'alimentation, même si elle n'est pas optimale. En effet, le manuel d'utilisation et d'installation recommande un angle de 60 degrés entre le sommet du bâtiment le plus proche et le MAC (voir figure 2.13). Cette recommandation stipule qu'il ne doit pas y avoir d'obstacles à moins de 15 m du MAC. Dans le cas présent, l'angle est d'environ 20 degrés et il n'y a pas d'autres obstacles que le pylône.

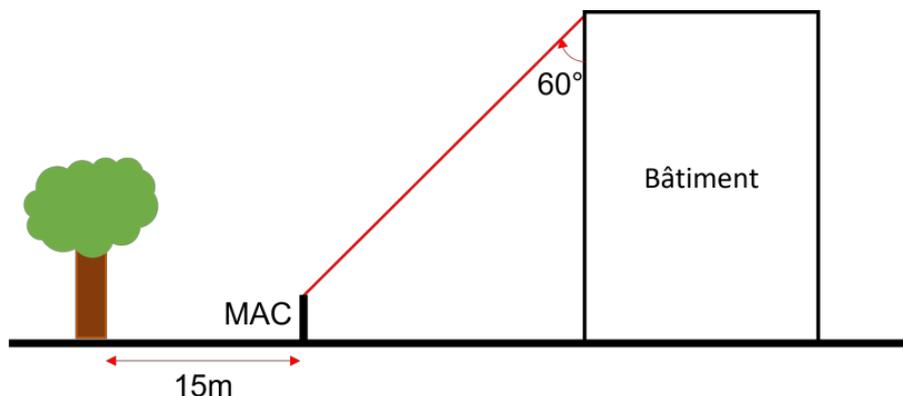


FIGURE 2.13 – Illustration des préconisations pour l'installation du MAC

La position non standard du moulin à champ ne devrait pas poser de problème car la valeur du champ est modifiée de manière linéaire avec un coefficient constant. Ainsi, cette position alternative permettra toujours de mesurer la durée, la polarité et l'intensité relative des événements électriques.



FIGURE 2.14 – Moulin à champ AMEO

De plus, le moulin à champ peut également détecter les événements de type coup de foudre. En effet, les décharges de foudre se caractérisent par des variations très rapides du champ électrique, résultant d'un déplacement important de charges (section 1.3). L'amplitude et la durée de ces variations indiquent la proximité de la foudre par rapport au moulin à champ : plus l'amplitude de la variation est grande, plus l'éclair est proche du capteur. Ainsi, ces mesures permettent d'indiquer les événements dus à la foudre enregistrés au niveau du paratonnerre.

Le graphe présenté dans la figure 2.15 illustre une mesure du champ électrostatique en kV/m en fonction du temps pendant un orage.

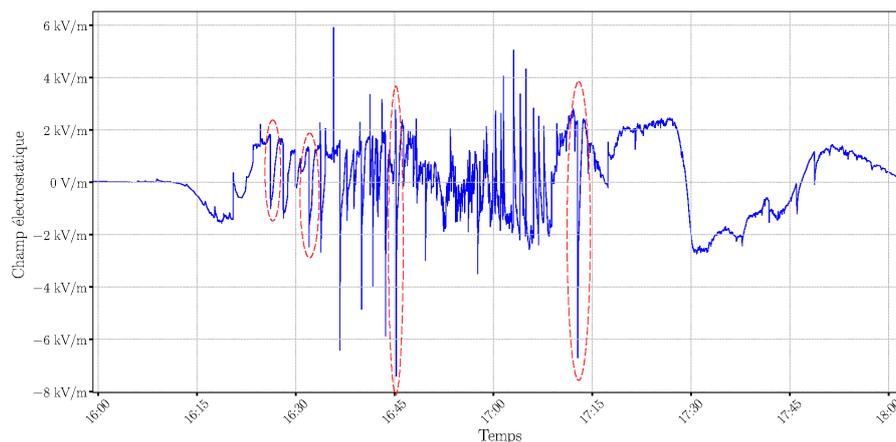


FIGURE 2.15 – Champ électrostatique en fonction du temps mesuré par le moulin à champ AMEO340 le 17 juin 2021

Le graphique montre des variations du champ électrostatique avec des changements de polarité. Les valeurs du champ électrostatique varient entre des valeurs positives allant jusqu'à 6 kV/m et des valeurs négatives allant jusqu'à -8 kV/m. Ces variations de polarité

se produisent à plusieurs reprises pendant la période enregistrée. Certaines des variations observées dans le champ électrostatique sont rapides, et parmi celles-ci, quatre ont été encadrées en rouge dans le graphique. Ces variations rapides sont généralement attribuables aux éclairs qui se produisent à proximité du capteur. D'autre part, d'autres variations sont plus lentes, ce qui suggère le passage du nuage au-dessus du site de mesure.

Ainsi, le moulin à champ permet de fournir des informations précieuses sur le champ électrostatique et de mettre en corrélation ces données avec les mesures des sondes de courant et l'antenne VHF, offrant ainsi une meilleure compréhension des conditions météorologiques et des interactions électromagnétiques.

2.2.4 Conclusion

Dans cette partie, les capteurs utilisés dans le système d'acquisition ont été présentés, ainsi que leur fonctionnement respectif. Ils permettent d'obtenir une variété d'enregistrements qui fournissent une multitude d'informations à analyser. L'analyse croisée de ces enregistrements est essentielle pour identifier d'éventuelles corrélations entre les différents phénomènes mesurés.

2.3 Les méthodes de collecte des données et les outils informatiques associés

Maintenant que les différents capteurs et leur positionnement ont été présentés, nous allons expliquer les méthodes d'acquisition des mesures.

Dans le cadre de l'acquisition des données, il est essentiel de prendre en compte des aspects tels que la fréquence d'échantillonnage, la quantification, la synchronisation et la calibration des capteurs. Le système d'acquisition se compose de deux groupes de capteurs distincts :

1. Enregistrements en continu : un boîtier d'acquisition dédié au MAC est utilisé. Il sera décrit comme dans la section 2.3.1. Ce boîtier est connecté à un ordinateur équipé du logiciel Winstorm, qui permet de programmer les seuils de modification de la période d'échantillonnage et de personnaliser les paramètres d'acquisition du moulin à champ ;
2. Enregistrements par niveau de déclenchement : l'enregistrement des mesures est déclenché lorsque le courant du paratonnerre dépasse un seuil prédéfini. Ces capteurs sont connectés à un ou plusieurs oscilloscopes à l'aide de câbles coaxiaux. Les données des oscilloscopes sont récupérées par un programme d'acquisition développé en Python, qui s'exécute sur un deuxième ordinateur situé dans le local. Les numériseurs sont connectés à cet ordinateur via une interface USB. Les détails sur le fonctionnement du programme d'acquisition et les performances du système seront présentés dans la partie 2.3.2.

Le schéma 2.16 illustre les deux groupes de capteurs utilisés dans le système d'acquisition, ainsi que les connexions entre eux. Cette configuration permet de collecter les données en vue d'une analyse ultérieure.

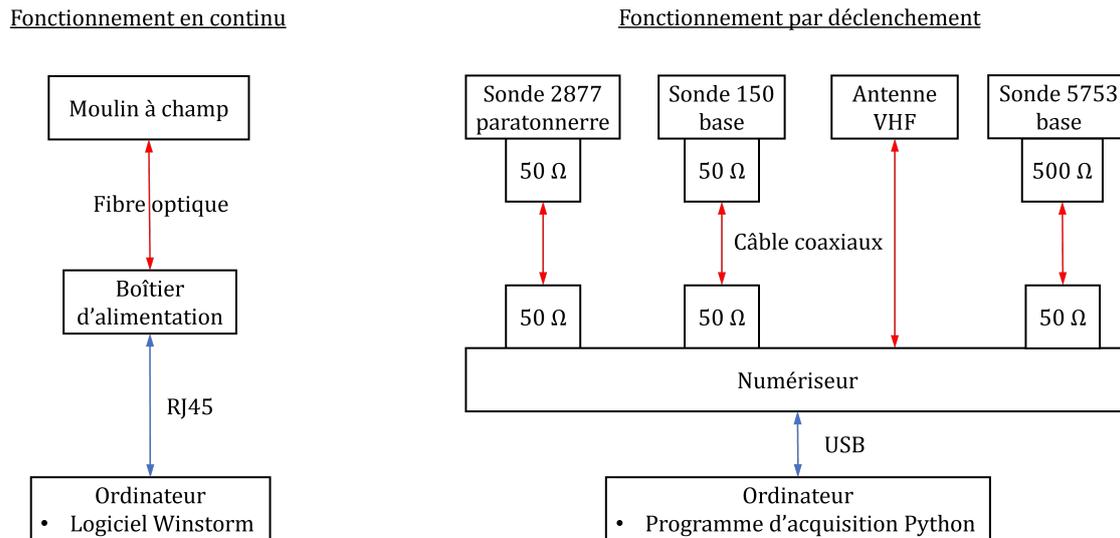


FIGURE 2.16 – Schéma du fonctionnement de l'acquisition de données

2.3.1 Description de l'acquisition de données en continu via le moulin à champ

Le moulin à champ AMEO340, présenté dans la partie 2.2.3, est utilisé pour mesurer le champ électrostatique. Il est alimenté par son propre boîtier d'alimentation, qui est connecté directement au moulin et placé dans le local. Ce boîtier fournit une tension de 24 V et permet également de récupérer les mesures via une liaison en fibre optique. Il est connecté à un ordinateur via un câble Ethernet.

Le moulin à champ est configuré avec une adresse IP sur un réseau local dédié au boîtier d'alimentation. Le logiciel Winstorm est utilisé pour contrôler le moulin à champ en se connectant à cette adresse IP. Lorsque le logiciel est ouvert, il enregistre en continu les mesures du champ électrostatique dans une base de données Open DataBase Connectivity (ODBC) [55]. Cette méthode de stockage offre une facilité d'accès et permet de générer des tables contenant toutes les valeurs mesurées.

Le logiciel Winstorm permet de régler divers paramètres du moulin à champ, notamment la période d'échantillonnage. En période de beau temps, lorsque le champ électrostatique ambiant atteint environ 150 V/m, la période d'échantillonnage est fixée à 10 secondes. Lorsque le champ électrostatique dépasse un seuil de ± 1 kV/m, la période d'échantillonnage est réduite à 1 seconde. Cette valeur seuil est choisie car elle indique une tendance orageuse, puisqu'elle est plus de 10 fois supérieure au champ en période de beau temps [13]. Cela indique une accumulation de charges dans l'atmosphère.

Lorsque le champ électrostatique revient en dessous du seuil de ± 1 kV/m, la période d'échantillonnage est maintenue à 1 seconde pendant 15 minutes. Cette période permet d'obtenir une observation plus détaillée des événements orageux, en évitant de manquer les variations rapides du champ électrostatique associées aux éclairs.

La figure 2.17 présente un zoom de la mesure du champ électrostatique qui a été précédemment illustrée dans la figure 2.15. Ce zoom permet d'observer plusieurs variations du champ électrostatique correspondant à des événements de type foudre. Les événements

de type foudre ont une durée variant entre 15 et 30 secondes, ce qui met en évidence l'importance d'avoir une période d'échantillonnage réduit à 1 seconde.

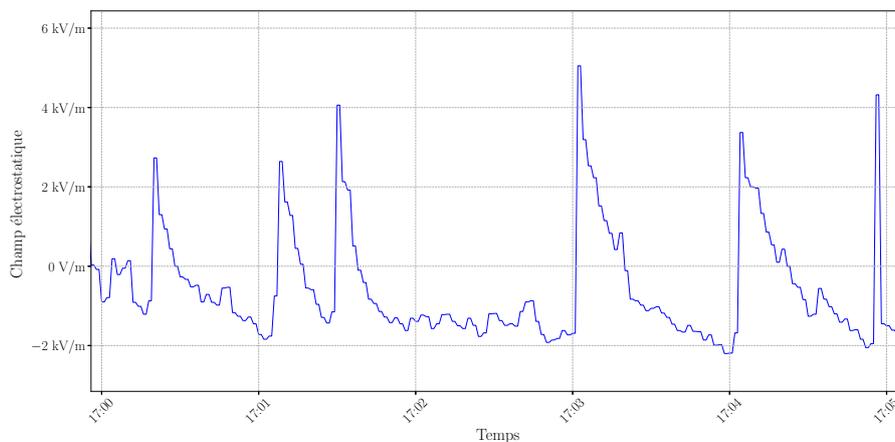


FIGURE 2.17 – Zoom de la mesure du champ électrostatique du 17 juin 2021 réalisé par le moulin à champ AMEO340

Le moulin à champ dispose d'une plage dynamique standard de ± 100 kV/m avec une résolution de 10 V/m, utilisant 2 octets pour la représentation des mesures. La polarité du champ électrostatique permet de déterminer la polarité des charges présentes à la base du nuage qui se situe au-dessus du moulin à champ. Un champ électrostatique positif indique que la base du nuage d'orage est chargée négativement, et vice versa.

L'acquisition de données en continu à l'aide du moulin à champ AMEO340 est essentielle pour mesurer le champ électrostatique ambiant au niveau du pylône. Grâce au logiciel Winstorm, les mesures sont enregistrées et accessibles de manière pratique. Cette approche permet la détection et l'analyse de divers événements, en particulier les décharges de type foudre.

2.3.2 Description de l'acquisition de données lors de dépassement de seuil

L'acquisition des données à partir des sondes de courant et de l'antenne est effectuée lorsque le courant mesuré au niveau du paratonnerre dépasse un seuil prédéfini. L'objectif est de détecter les décharges corona et d'analyser d'autres phénomènes électromagnétiques sur différentes parties du pylône. Pour ce faire, les sondes de courant et l'antenne doivent être connectées au même oscilloscope, qui doit satisfaire à des critères spécifiques. L'oscilloscope doit :

- être programmable pour permettre un fonctionnement autonome du système ;
- disposer de 4 voies pour connecter tous les capteurs ;
- couvrir une bande de fréquences supérieure à la bande VHF ;
- offrir une résolution verticale élevée pour mesurer de faibles intensités de courant.

Les numériseurs Picoscope peuvent être programmés dans différents langages informatiques, dont Python qui a été choisi. Les exemples de code fournis par Picotech sur GitHub [56] sont utilisés pour la programmation des oscilloscopes. Le schéma présenté dans la figure 2.18 illustre le fonctionnement du programme.

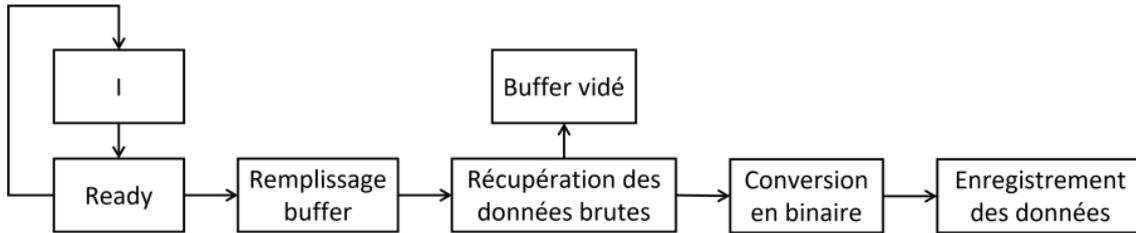


FIGURE 2.18 – Schéma du fonctionnement du programme d’acquisition

L’avantage d’avoir un programme d’acquisition en Python réside dans sa facilité de personnalisation et sa capacité à fonctionner de manière autonome. Cependant, le code fourni par Picotech pour l’acquisition de données ne permet pas une récupération directe des données binaires du Picoscope. Il est nécessaire de passer par des caractères ASCII, ce qui entraîne une volumétrie importante des données. Pour remédier à cela, les données sont réécrites en format binaire avant d’être enregistrées, ce qui permet de réduire considérablement l’espace de stockage.

La résolution verticale de l’oscilloscope dépend du nombre de bits utilisés pour convertir les grandeurs analogiques en valeurs numériques. Ce processus est basé sur la quantification du signal, introduisant ainsi un pas de quantification Q déterminé par l’équation

$$Q = \frac{U_{max}}{2^{n_{bits}}} \quad (2.5)$$

où U_{max} représente la plage de tension crête-à-crête utilisée et n_{bits} correspond au nombre de bits utilisés pour la conversion. Cette équation permet de calculer la résolution de quantification, c’est-à-dire la plus petite variation de tension détectable par l’oscilloscope, en fonction de la plage de tension et du nombre de bits utilisés.

Le choix de la plage de tension à utiliser dépend des mesures spécifiques à effectuer et vise à éviter toute saturation des enregistrements. Il est également important de prendre en compte les coefficients de conversion et d’adaptation d’impédance des sondes pour obtenir une mesure précise du courant.

Par exemple, pour la sonde utilisée avec le paratonnerre, sa conversion est de 0.5 V/A. La sonde de sortie est adaptée à une impédance de 50 Ω , ce qui correspond également à un coefficient d’adaptation de 0.5. Si l’oscilloscope utilise une résolution de 8 bits et une plage de tension de ± 50 mV, le pas de quantification en courant sera de 1.56 mA. Pour la sonde avec un coefficient de conversion de 0.1 V/A, le pas de quantification sera de 7.81 mA. Les courants dont l’intensité est de l’ordre de la dizaine de mA seront donc mêlés au bruit de quantification.

Parmi les oscilloscopes disponibles, deux modèles Picoscope de la série 5000 (5244D) et de la série 6000 (6402D) sont choisis. Le modèle 5244D [57] est réputé pour sa bonne résolution verticale car il peut avoir jusqu’à 16 bits de quantification, tandis que le modèle 6402D [58] offre une large bande de fréquences, allant jusqu’à 500 MHz. Ces deux numériseurs peuvent accueillir jusqu’à 4 voies. L’utilisation des 4 voies permet de connecter 4 capteurs à chaque voie du numériseur, ce qui permet d’enregistrer les mesures des 4 capteurs simultanément lors du déclenchement de l’oscilloscope.

Dans le cadre de cette thèse, deux campagnes de mesures ont été menées. La première campagne, qui a eu lieu en 2021, utilisait uniquement le numériseur 6402D. Étant donné

le manque de connaissances sur les types et la durée des événements électromagnétiques à enregistrer, des compromis ont dû être réalisés. la période d'échantillonnage a été fixée à 6.4 ns afin d'augmenter la durée d'enregistrement à 50 ms, ce qui correspond à 7812500 points. Chaque acquisition nécessite 45 secondes de traitement pour être numérisée et enregistrée. Ceci signifie que deux acquisitions successives sont séparées d'au moins 45 s.

Selon le critère de Nyquist, un échantillonnage de 6.4 ns permet de mesurer des fréquences allant jusqu'à 78.12 MHz, ce qui est inférieur aux fréquences VHF utilisées pour les communications aéronautiques. Par conséquent, les mesures effectuées en 2021 avec le numériseur 6402D couvrent une partie de la plage des fréquences VHF, mais ne parviennent pas à atteindre la bande VHF aéronautique, qui débute à 108 MHz.

La deuxième campagne, menée en 2022, a utilisé les deux numériseurs mentionnés précédemment. Les codes ont été exécutés en parallèle, ce qui a doublé le temps d'acquisition à 100 secondes, avec 6250000 points enregistrés par numériseur. Le numériseur 5244D a enregistré des données sur 150 ms avec une période d'échantillonnage de 24 ns, tandis que le Picoscope 6402D a enregistré des données sur 10 ms avec une période d'échantillonnage de 1.6 ns, ce qui permet d'aller au delà de la bande de fréquence VHF aéronautique. La durée d'enregistrement n'était pas un problème lors de cette campagne, car les deux enregistrements ont permis d'obtenir des informations sur la durée et les caractéristiques fréquentielles des événements.

Les caractéristiques des deux campagnes de mesures sont résumées dans le tableau présenté ci-dessous 2.2.

Année de la campagne de mesures	2021	2022	
	6402D	5244D	6402D
Picoscope	6402D	5244D	6402D
Temps d'échantillonnage	6.4 ns	24 ns	1.6 ns
Résolution verticale	8 bits	14 bits	8 bits
Fréquence maximale	78.12 MHz	20.8 MHz	416 MHz
Nombre de points	7812500	6250000	6250000
Temps d'enregistrement	50 ms	150 ms	10 ms
Durée de l'acquisition	~45 s	~100 s	

TABLEAU 2.2 – Caractéristiques des deux campagnes de mesures

Cette partie sur la description de l'acquisition de données lors du dépassement de seuil met en évidence l'utilisation de deux numériseurs, le 5244D et le 6402D, pour enregistrer les événements électromagnétiques sur le pylône. Des compromis ont été réalisés en termes de temps d'échantillonnage et de durée d'enregistrement pour obtenir des données pertinentes. Les caractéristiques des deux campagnes de mesures ont été présentées, mettant en avant les différences de temps d'échantillonnage et de durée d'enregistrement entre les numériseurs. Des mesures de calibration ont également été effectuées pour ajuster les paramètres d'acquisition et améliorer la connaissance du pylône. L'acquisition de données lors du dépassement de seuil constitue ainsi une approche complémentaire à l'acquisition en continu, permettant d'obtenir des informations spécifiques sur les événements électromagnétiques survenant sur le pylône.

2.3.3 Conclusion

Les deux méthodes d'acquisition de données présentées, à savoir l'acquisition en continu via le moulin à champ AMEO340 et l'acquisition par dépassement de seuil de courant au niveau du paratonnerre, offrent des informations complémentaires. L'acquisition en continu offre une vue globale du comportement électromagnétique du pylône sur une période prolongée, tandis que l'acquisition par dépassement de seuil se concentre sur des événements spécifiques pour une analyse détaillée. La prochaine section traite de la calibration du système d'acquisition, garantissant ainsi la fiabilité des mesures effectuées.

2.4 Calibration du système d'acquisition

Dans cette section, la calibration du système d'acquisition est présentée, mettant en évidence les choix effectués pour assurer des mesures précises et fiables. Les plages de valeurs dans lesquelles les mesures peuvent être effectuées sans saturation ni perte de précision seront également évaluées.

Deux aspects de la calibration du système d'acquisition seront abordés. Le premier aspect concerne l'ajustement des plages dynamiques des capteurs en période de beau temps, ce qui permet notamment de fixer les seuils de déclenchement des mesures. Le deuxième aspect porte sur la mesure de la répartition des courants à la base du pylône. Cette mesure est particulièrement importante étant donné que les sondes de courant sont positionnées sur les descentes de terre.

2.4.1 Ajustement des plages dynamiques des capteurs en période de beau temps

Il a été observé que les plages dynamiques et les seuils de déclenchement des mesures des capteurs doivent être ajustées pour déterminer les gammes de valeurs appropriées pour réaliser des mesures précises et éviter toute saturation. Il est essentiel d'obtenir une connaissance approfondie de l'environnement électromagnétique du pylône pendant des conditions de beau temps afin de pouvoir observer les différences lors d'un orage.

À cet effet, les niveaux de tension maximums sont mesurés pendant des périodes de beau temps, caractérisées par un ciel dégagé et l'absence de vent. Sur le graphique de la figure 2.19a, la mesure temporelle de tension sur une durée de 50 ms est représentée, enregistrée par le dipôle VHF. Le spectre correspondant est présenté sur la figure 2.19b avec une plage de fréquence de 250 MHz.

En ce qui concerne la plage dynamique, les niveaux maximums sont situés à environ ± 100 mV. Nous proposons de sélectionner une plage dynamique de ± 500 mV afin de capturer des signaux en sortie d'antenne d'une intensité jusqu'à 5 fois supérieure au niveau observé par beau temps. Il est important d'adapter cette plage dynamique au fur et à mesure que des événements orageux se produisent.

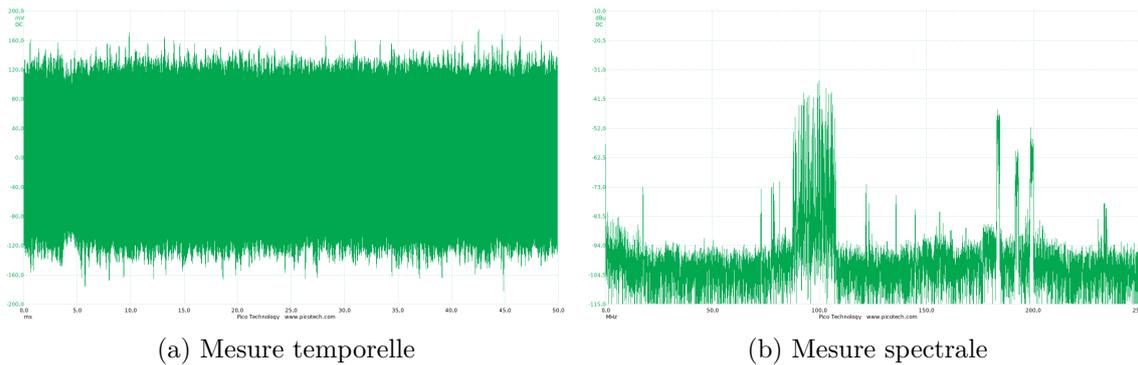


FIGURE 2.19 – Mesure de l'antenne en période de beau temps

La figure 2.19b illustre les raies d'émission dans la bande FM, ainsi que des raies situées aux environs de 170, 190 et 200 MHz. Ces fréquences pourraient être associées à des communications gouvernementales ou à des applications industrielles.

En conditions normales, il est possible d'observer le bruit provenant à la fois du récepteur et du numériseur, mesuré par les sondes de courant, sur l'oscilloscope. Ce bruit s'étale sur une plage qui correspond à deux fois le pas de quantification. Les décharges corona se situent dans une gamme de courant allant de quelques dizaines de milliampères à environ une centaine de milliampères d'après la littérature [11]. Par conséquent, il est important de choisir une plage dynamique qui ne s'arrête pas à 100 mA.

La sélection de la plage dynamique dépend des coefficients de conversion des sondes utilisées. Par exemple, pour la sonde de courant sur le paratonnerre, le coefficient de conversion est de 0.5 V/A. En prenant en compte l'adaptation de la sonde, le coefficient multiplicateur devient 4. Ainsi, pour mesurer des courants dépassant les 100 mA, une plage dynamique d'au moins ± 20 mV est nécessaire. Pour la sonde sur la patte d'oeie DT₁, le coefficient multiplicateur est de 20, ce qui requiert une plage dynamique d'environ ± 5 mV. Cependant, il est important de noter que la plage dynamique minimale du Picoscope 6402D est de ± 50 mV, ce qui signifie que cette valeur doit être utilisée comme limite inférieure pour les mesures. Nous remarquons qu'il peut y avoir une quantification trop importante pour la sonde DT₁, cependant cela est corrigé par l'autre sonde située à la base du pylône.

Le seuil de déclenchement est délibérément fixé à un niveau nettement supérieur au bruit de quantification. Par défaut, ce seuil est établi à ± 25 mA.

Dans la prochaine section, l'analyse se concentre sur la mesure à la base du pylône afin de quantifier le courant mesuré par la sonde à cet emplacement précis.

2.4.2 Mesure de la répartition des courants à la base du pylône

Les sondes de courant passives utilisées à la base du pylône ne peuvent pas mesurer l'intégralité des courants circulant à cet endroit. Leur taille limitée leur permet d'entourer uniquement l'une des descentes de terre, comme illustré précédemment dans la figure 2.7. Par conséquent, ces sondes permettent de mesurer le courant spécifique traversant cette descente de terre.

Cependant, il est important de noter qu'il existe d'autres courants qui circulent à travers les câbles d'alimentation et la base du pylône, en dehors de la descente de terre mesurée. Malgré cette limitation, en comprenant la répartition des courants à la base du

pylône, il est possible d'estimer approximativement l'intensité totale du courant en ne mesurant qu'une partie de celui-ci, à savoir celui qui passe par la descente de terre qui est mesurée dans notre cas.

Pour évaluer la répartition des courants à la base du pylône de manière contrôlée, une méthode consiste à utiliser un câble connecté au paratonnerre, qui est ensuite relié à un générateur d'impulsions de courant placé au sol. Ce générateur d'impulsions de courant est mis à la terre à l'aide de deux pieux enfoncés dans le sol. La figure 2.20 présente une image illustrant ces pieux en rouge.



FIGURE 2.20 – Photo de la mise à la masse du générateur réalisée avec 2 pieux

Plusieurs impulsions de courant sont déclenchées à l'aide du générateur qui fournit une tension de 2800 V. Ces courants sont mesurés à différents emplacements autour de la base du pylône :

- la base du paratonnerre,
- les 2 descentes de terre (DT_1 et DT_2),
- le pied du pylône,
- la goulotte et les câbles qu'elle contient.

Cette approche permet d'obtenir des mesures de courant à différents points clés de la base, ce qui permet d'évaluer la répartition du courant à travers les différentes parties du pylône.

Pour mesurer le courant à la base du paratonnerre, un transformateur de courant, présenté dans la section 2.2.1, est utilisé. Pour les autres emplacements, une sonde active de type Rogowski de la marque PEM est utilisée.

Ces sondes sont également des transformateurs de courant qui possèdent un noyau d'air, leur conférant ainsi un caractère dérivatif. Un intégrateur alimenté est nécessaire pour obtenir la mesure du courant, ce qui les rend actives.

En utilisant ces sondes, il est possible de quantifier la répartition des courants à la base du pylône en comparant l'amplitude maximale de chaque impulsion mesurée à celle de l'impulsion mesurée à la base du paratonnerre. Il est important de noter que la sonde doit être déplacée pour chaque élément de la base, ce qui implique la réalisation de plusieurs mesures.

Il convient de souligner que la répartition des courants n'est pas uniforme et que la mesure réalisée donne une estimation approximative plutôt qu'une mesure précise. De plus, l'amplitude maximale des impulsions générées et mesurées au niveau de la base du paratonnerre est en moyenne stable, avec une valeur de -4.3 A. Les résultats de ces mesures sont résumés dans le tableau 2.3. Le tableau présente l'amplitude maximale relevée à chaque emplacement de mesure.

Emplacement de mesure	Amplitude maximale (A)
Base du paratonnerre	-4.3
DT ₁	-0.58
DT ₂	-0.55
Pied du pylône	-2.1
Goulotte et les câbles	-1.58

TABLEAU 2.3 – Répartitions des courants à la base

Ce tableau permet de visualiser les variations d'amplitude maximale des impulsions en fonction de l'emplacement de mesure à la base du pylône.

La somme des amplitudes maximales des emplacements situés à la base du pylône est de -4.81 A, ce qui est supérieur à l'amplitude maximale mesurée à la base du paratonnerre. Cela peut être expliqué par le fait que plusieurs impulsions ont été réalisées et que la répartition des courants varie légèrement d'une impulsion à l'autre. En raison de la taille limitée de la sonde de Rogowski, il n'a pas été possible de vérifier si la valeur mesurée était proche de celle du paratonnerre, car la sonde ne peut entourer l'ensemble de la base du pylône. Une autre explication possible est que la précision des sondes peut être affectée lorsqu'il y a des courants qui circulent à proximité, entraînant un couplage électromagnétique.

Une mesure comprenant les deux descentes de terre et le pied du pylône a également été réalisée. Une amplitude de -3 A, correspondant à 70% de l'amplitude mesurée au niveau du paratonnerre, a été mesurée sur ces 3 composants, ce qui ramène la somme totale des amplitudes à -4.58 A, se rapprochant davantage de l'intensité mesurée au niveau du paratonnerre.

Ces mesures révèlent que plus des deux tiers des courants passent par le pied du pylône et les descentes de terre, tandis qu'un tiers passe par la goulotte et les câbles reliés aux antennes. Pour le système d'acquisition, les sondes de courant installées sur les descentes de terre mesureront un courant équivalent à environ 10 à 15% du courant total à la base du pylône. Ces mesures permettent de quantifier l'activité radioélectrique du pylône et la corréler avec les autres voies de mesure grâce à l'observation des variations de courant.

2.4.3 Conclusion

Dans cette section, il a été présenté l'importance de la calibration, notamment pour déterminer la plage dynamique minimale à paramétrer avec le numériseur et les seuils.

Les premières acquisitions permettent d'optimiser cette plage afin d'éviter la saturation des mesures. De plus, la répartition des courants à la base du pylône a été mesurée, ce qui fournit des informations importantes sur les mesures de courant au niveau des pattes d'oie. Il convient toutefois de noter que cette répartition est donnée à titre indicatif et peut varier en fonction des courants qui circulent sur le pylône.

L'observation simultanée des mesures obtenues à l'aide des deux méthodes d'acquisition de données présente un défi majeur en raison de la différence d'échelle de temps entre elles. Cependant, une méthode d'observation a été développée pour examiner et analyser ces données de manière globale, afin d'identifier d'éventuelles corrélations entre elles. Cette approche permet d'explorer les relations entre les différentes mesures et de mieux comprendre les phénomènes électromagnétiques étudiés. Cette méthode d'observation est discutée en détail dans la section suivante.

2.5 La méthode d'observation des différentes mesures

Les campagnes de mesures se sont étendues sur plusieurs mois, au cours desquels de nombreuses acquisitions ont été effectuées en raison de dépassements de seuil. La durée de ces événements varie de 10 ms à 150 ms, tandis que les événements météorologiques mesurés avec le MAC ont généralement une durée de quelques heures. Ces différentes échelles de temps rendent l'analyse des données complexe et la mise en évidence des corrélations entre les capteurs difficile.

Afin de faciliter cette analyse, une interface graphique a été conçue pour observer les mesures en parallèle. Cette interface permet de sélectionner un événement à partir d'une liste de fichiers classés par date, visible en haut à gauche de la figure 2.21 (capture de l'interface graphique). La liste des événements peut être affichée selon une sélection mensuelle, quotidienne ou horaire.

De plus, la liste des événements peut également être affichée en utilisant les mesures du MAC en sélectionnant une plage de dates (voir figure 2.21, en dessous de la fenêtre graphique du champ électrostatique) pour tracer le champ électrostatique entre ces deux dates. Cela permet d'avoir une vue d'ensemble des campagnes de mesure et d'observer les différents comportements du champ électrostatique par rapport aux enregistrements.

Le tableau central de l'interface (voir figure 2.21) fournit les informations suivantes sur l'événement :

- la date et l'heure de l'événement ;
- le nombre de voies disponible ;
- la durée de la mesure ;
- la période d'échantillonnage ;
- le nombre de points enregistrés ;
- et le type d'événement.

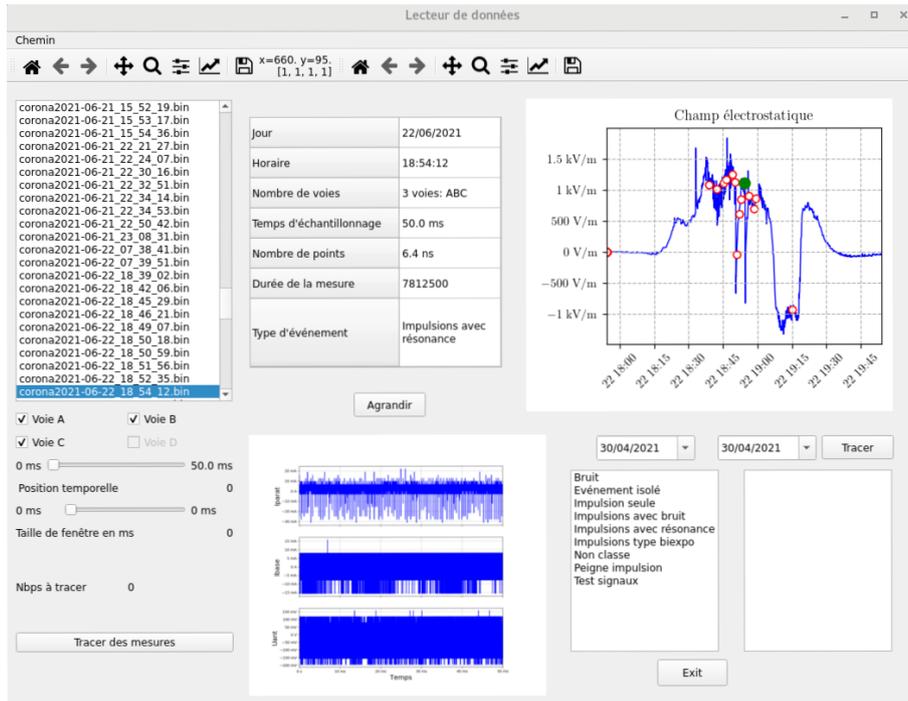


FIGURE 2.21 – Capture d'écran de l'interface graphique

L'interface graphique facilite la prévisualisation des graphiques afin d'améliorer l'efficacité de lecture des données et d'observer les événements dans leur intégralité. Elle offre également la possibilité de sélectionner les voies à afficher et de réduire le nombre de points tracés pour visualiser en détail les mesures obtenues à partir des sondes de courant et de l'antenne.

Le tableau 2.4 fournit les correspondances entre les voies et les capteurs.

Voie A	Sonde sur le paratonnerre
Voie B	Sonde autour de DT_1 , Coefficient 0.1 V/A
Voie C	Antenne VHF
Voie D	Sonde autour de DT_2 , Coefficient 10 V/A

TABLEAU 2.4 – Correspondances entre les capteurs et les voies du numériseur

Les données MAC sont présentées dans une plage horaire de plus ou moins une heure autour de l'événement sélectionné. Par exemple, sur la figure 2.21, les données du 22 juin 2021 sont affichées de 17h54 à 19h54 au format JJ HH :MM. Cette visualisation permet d'observer l'activité électrostatique associée à cet événement spécifique. L'événement sélectionné est mis en évidence en vert, tandis que les autres événements enregistrés dans cette plage horaire sont représentés par des points rouges.

Une première observation des données obtenues avec la première campagne de mesures a permis de définir et de répertorier différentes catégories d'événements qui seront définies à la fin de la section 3.1. L'interface permet de filtrer les événements par catégorie et de comparer leurs comportements ainsi que le champ électrostatique associé.

En conclusion l'interface graphique offre une vision globale des événements électrostatiques enregistrés pendant les campagnes de mesure. Elle permet de comparer les com-

portements des différents types d'événements mesurés, ce qui apporte des informations importantes sur leur impact. De plus, elle offre un accès rapide aux enregistrements, facilitant ainsi l'analyse des données.

2.6 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, la conception d'un système d'acquisition autonome sur un pylône d'essai a été présentée. Le pylône d'essai mis à disposition, ses caractéristiques et ses équipements, ainsi que les capteurs installés ont été décrits. Les méthodes de collecte de données ont été décrites, y compris les outils informatiques utilisés pour l'enregistrement et le stockage des données. Ensuite, la calibration du système d'acquisition a été abordée pour garantir la fiabilité des mesures. Enfin, La méthode d'observation des différentes mesures a également été expliquée, en détaillant l'interface graphique et les différents filtres disponibles pour faciliter la visualisation et l'analyse des données.

Dans le chapitre suivant, les mesures obtenues à l'aide du système d'acquisition autonome sur le pylône d'essai sont présentées. L'accent est mis sur le comportement du pylône dans un environnement électromagnétique, fournissant ainsi des informations précieuses sur différents paramètres, notamment les décharges corona observées sur le paratonnerre.

Chapitre 3

Étude des événements électromagnétiques mesurés en environnement réel

Le précédent chapitre a présenté le système d'acquisition développé spécifiquement pour cette thèse. Grâce à ce système, deux campagnes de mesures ont été réalisées et une grande diversité de signatures électromagnétiques a été enregistrée. Ces observations mettent en évidence la variété des phénomènes électromagnétiques qui se produisent au niveau du pylône.

Dans le présent chapitre, l'analyse des événements électromagnétiques mesurés dans un environnement réel au niveau du pylône est mise en avant, en mettant particulièrement l'accent sur les décharges corona. L'objectif principal de cette analyse approfondie est d'améliorer notre compréhension des différentes signatures observées et des phénomènes électromagnétiques qui y sont associés. Cette analyse va permettre d'identifier les caractéristiques spécifiques des événements de décharge corona et d'évaluer leur impact potentiel sur les systèmes sol de communication de l'aviation civile.

La section 3.1 se concentre sur la présentation détaillée des différents types de signatures afin de montrer la variété des interactions et des phénomènes électromagnétiques pouvant se produire au niveau du pylône. Ensuite, l'analyse d'impulsions suivant des lois bi-exponentielles est réalisée dans la section 3.2, en étudiant en parallèle les polarités positive et négative. Une analyse statistique approfondie de ces signatures est réalisée ainsi qu'une étude de la corrélation avec les autres voies de mesure. Enfin, dans la section 3.3, une autre catégorie d'impulsion est examinée de manière similaire. En plus d'une signature de type bi-exponentielle, ces impulsions sont caractérisées par un phénomène de résonance.

3.1 Analyse macroscopique des différentes signatures observées

Dans cette section, une présentation macroscopique des résultats obtenus à partir des enregistrements est réalisée afin d'avoir une vue d'ensemble des phénomènes électromagnétiques rencontrés. Les enregistrements sont analysés par rapport à la mesure de courant située sur le paratonnerre. Ils sont classés, dans un premier temps, en fonction de la

présence du champ électrostatique ambiant. Dans la suite de cette partie, les termes "événement électrostatique" ou "phénomène électrostatique" font référence à des événements de type orageux mesurés par le moulin à champ.

L'analyse débute par l'examen d'un exemple d'enregistrement, suivi de la présentation des signatures qui ne sont pas associées à des événements électrostatiques. Ensuite, les signatures isolées associées à des événements électrostatiques, qu'ils se produisent à proximité ou à distance, sont exposées. Enfin, deux exemples de peignes d'impulsions contenant des impulsions bi-exponentielles, observés au niveau du paratonnerre, sont présentés.

3.1.1 Analyse d'un exemple d'enregistrement

L'objectif de cette section est d'analyser un enregistrement afin de se familiariser avec les mesures obtenues et de mettre en évidence les principales caractéristiques des enregistrements présentés dans ce chapitre. L'étude de cet enregistrement permet également de rappeler certains critères permettant de déterminer la présence ou l'absence d'activité dans une mesure.

Un exemple d'enregistrement obtenu le 9 novembre 2021 à 00h41 avec le système d'acquisition présenté dans la chapitre 2 est montré sur la figure 3.1. Cette figure est composée de quatre graphiques, qui sont numérotés de haut en bas, représentant différentes variables :

1. $I_{paratonnerre}$: représente le courant à la base du paratonnerre ;
2. I_{DT_1} : représente le courant mesuré sur la descente de terre numéro 1 ;
3. $U_{antenne}$: représente la tension mesurée sur l'antenne ;
4. I_{DT_2} : représente le courant mesuré sur la descente de terre numéro 2.

Ces quatre mesures sont tracées en fonction du temps avec une période d'échantillonnage de 6.4 ns sur une durée de 50 ms. Le seuil de déclenchement est positionné autour de $|\pm 25|$ mA. Ces valeurs sont généralement applicables à la plupart des résultats présentés dans ce chapitre. Lorsqu'elles ne sont pas spécifiées, il est sous-entendu qu'elles correspondent à ces valeurs.

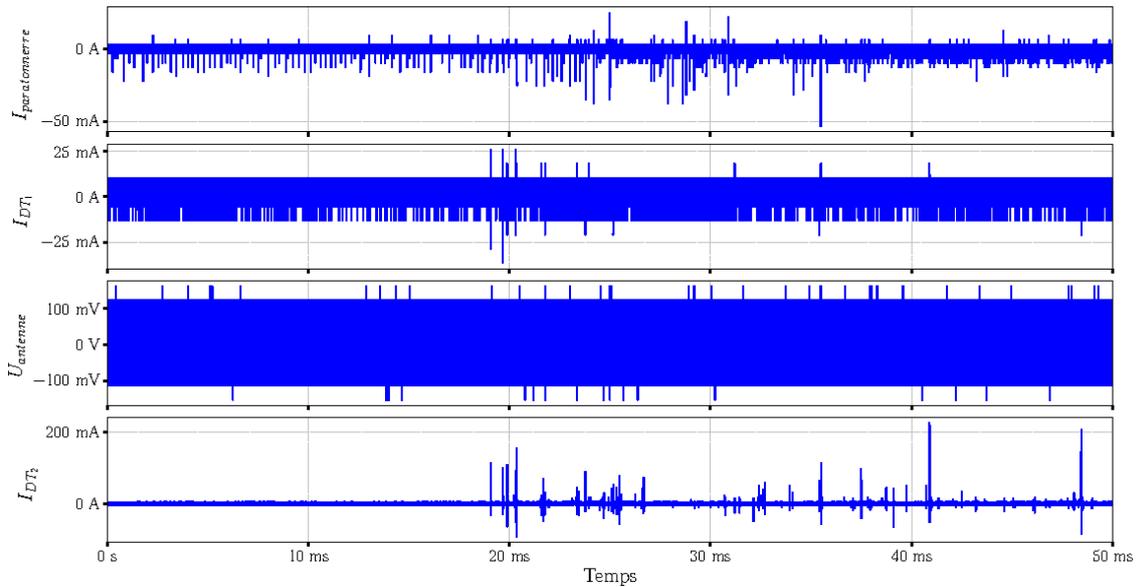


FIGURE 3.1 – Enregistrement des 4 voies des mesures du 9 novembre 2021 à 00h41

Sur le graphique du haut de la figure 3.1, le courant $I_{paratonnerre}$ montre une activité qui semble être un peigne d'impulsions avec des intensités allant de -10 mA jusqu'à -50 mA.

Une légère activité est observée sur la mesure de courant IDT_1 , sur le 2^e graphique, vers 20 ms avec des valeurs d'intensité allant jusqu'à 25 mA, tandis qu'une activité plus marquée est visible sur le 4^e graphique. Ce graphique illustre la mesure du courant IDT_2 , où l'on observe des intensités pouvant atteindre jusqu'à 200 mA.

Sur cet enregistrement, il n'y a aucune activité remarquable au niveau temporel sur le troisième graphique donnant la tension de l'antenne. En effet, la tension atteint les mêmes niveaux que dans la section 2.4 d'environ $|\pm 100|$ mV.

Ce résultat illustre l'un des types de résultats couramment observés lors de ces campagnes de mesure. Bien que cette figure ne permette pas une visualisation détaillée du comportement des mesures, elle offre une vue d'ensemble temporelle permettant de classer le courant du paratonnerre dans une catégorie donnée (impulsions type bi-exponentiel, impulsions avec résonance, impulsions avec bruit) et d'observer les corrélations entre les différentes voies de mesure. De plus, la présence du moulin à champ permet de détecter la présence d'événements électrostatiques.

3.1.2 Analyse d'enregistrements sans présence d'événement électrostatique

Dans cette section, l'accent est mis sur les enregistrements sans événement électrostatique qui sont classés comme "bruit". Ces enregistrements présentent des niveaux supérieurs au seuil de déclenchement de 25 mA, atteignant parfois jusqu'à 50 mA. Des acquisitions de ce type ont été observées pendant plusieurs heures, conduisant à la saturation de la mémoire et à l'arrêt du système. Deux types d'événements de "bruit" ont été identifiés :

- l'un est classé comme "bruit continu" puisque c'est un courant dont l'enveloppe est

quasi constante et supérieure à des niveaux allant de 30 à 60 mA qui dure au moins toute la durée de l'enregistrement, c'est-à-dire 50 ms ;

- l'autre est classé comme "bruit intermittent" lorsqu'il est d'une durée inférieure à 50 ms.

La figure 3.2 présente un exemple d'enregistrement contenant un bruit continu obtenu lors de la campagne de mesure de l'année 2021. Celui-ci a été enregistré le 12 juillet à 4h16.

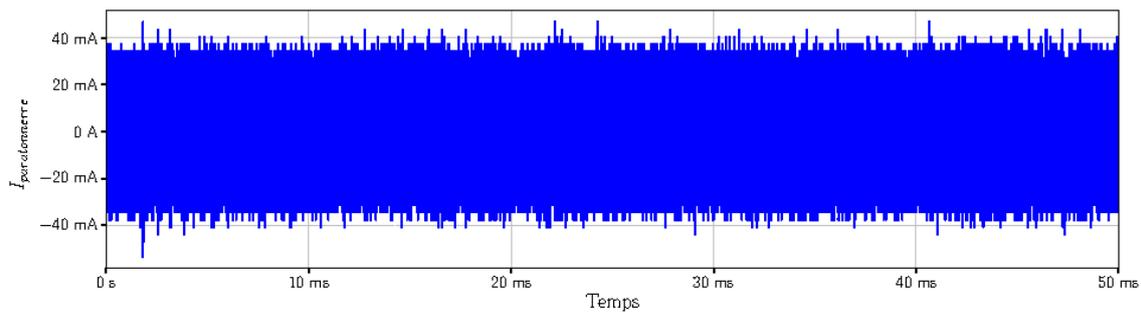


FIGURE 3.2 – Mesure de courant à la base du paratonnerre du 12 juillet 2021 à 4h16

L'allure du courant dans cet enregistrement montre une présence de bruit, avec des niveaux atteignant jusqu'à 40 mA. Cet enregistrement a été réalisé alors qu'il n'y avait aucun événement électrostatique. Comme le montre la figure 3.3, qui présente la mesure du champ électrostatique du 12 juillet 2021. Le point vert indique l'enregistrement de 4h16.

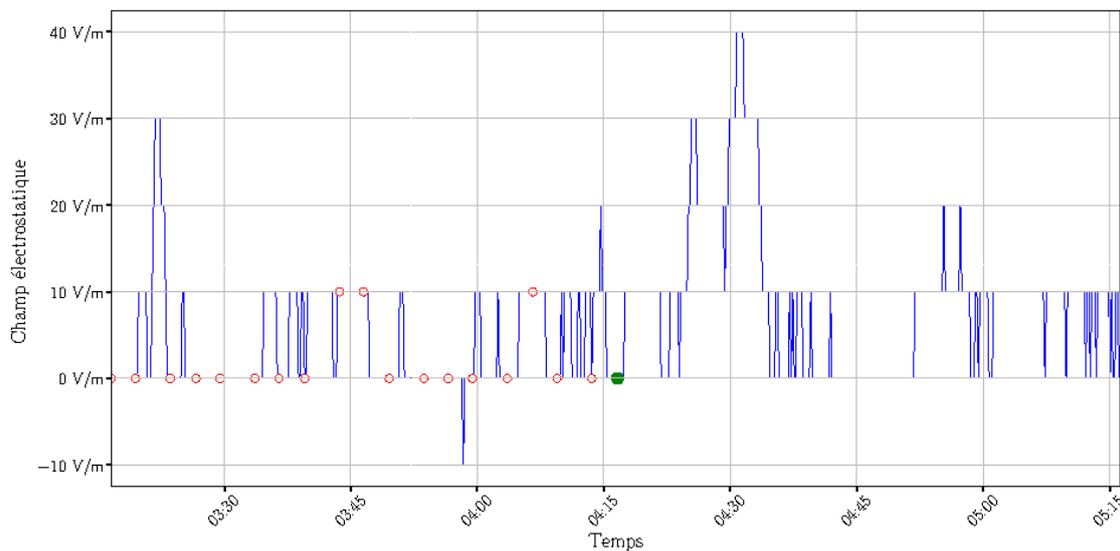


FIGURE 3.3 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 12 juillet 2021 entre 3h15 et 5h15

Ce graphique montre que le champ électrostatique a une faible amplitude, de l'ordre d'une dizaine de volt par mètre, et qu'il n'y a pas de valeur indiquant la présence d'un orage, à l'inverse de ce qui a été montré sur la figure 2.15.

La figure 3.4 présente un zoom de l'enregistrement sur une durée de $10 \mu\text{s}$ entre 25 ms et 25.01 ms.

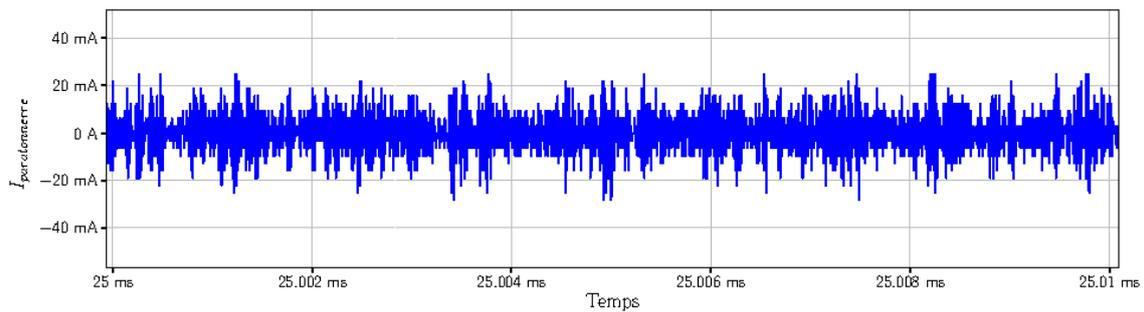


FIGURE 3.4 – Zoom de la mesure de courant à la base du paratonnerre du 12 juillet 2021

Cette mesure révèle des variations d'intensité allant de -25 à $+25$ mA, mais aucune signature temporelle spécifique n'est observée.

Il est possible que ces événements soient causés par des appareils situés à proximité du pylône, étant donné son emplacement en milieu péri-urbain.

Les événements de ce type ont été observés dans différentes conditions :

- Certains événements ont été observés à partir de 00h00, donnant l'impression qu'un appareil s'allume à ce moment-là.
- Plusieurs de ces événements se sont produits pendant des périodes de forte chaleur, lorsque le soleil était levé, suggérant une corrélation avec le fonctionnement de la climatisation dans le local technique.
- Certains événements de ce type ont également été enregistrés pendant des périodes plus froides, ce qui exclut une corrélation directe avec la température ambiante.

La figure 3.5 montre cette fois un événement avec un bruit intermittent. Aucun signal n'est observé à l'exception d'une activité autour de 25 ms.

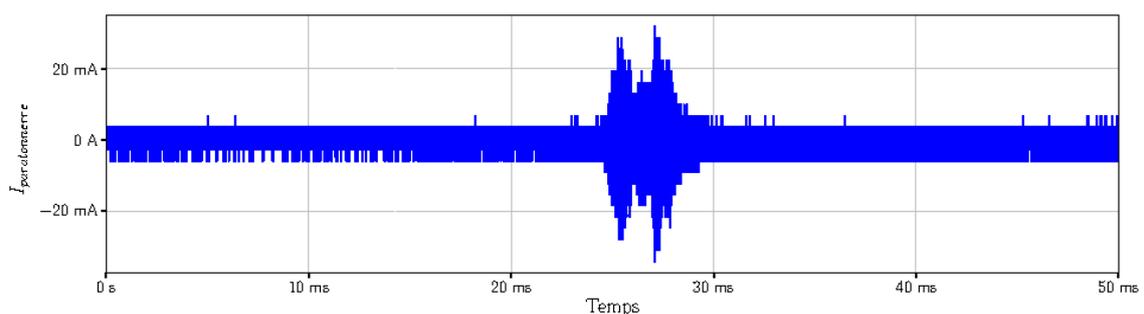


FIGURE 3.5 – Mesure de courant d'un bruit discontinu sur le paratonnerre du 12 juillet 2021

Parmi les enregistrements de ce type, plusieurs cas de figure ont été observés. Tout d'abord, les signaux présentent une durée variable pouvant aller de 5 ms à 40 ms. De plus, certains enregistrements montrent plusieurs occurrences de signaux similaires à celui présenté sur la figure 3.5, se produisant dans la fenêtre temporelle de 50 ms. Ces événements se caractérisent par un comportement assez aléatoire, sans schéma temporel ou compor-

tement prévisible. Ce type d'événement peut être attribué à des faux-contacts d'appareils ou le fonctionnement d'appareil, tel qu'une climatisation, un moteur ou autre.

Finalement, cette section a mis en évidence la classification des différents événements de la catégorie "bruit". Ces différents signaux mettent en évidence la complexité de la mesure des événements de faible intensité, car ce type d'événement peut rapidement saturer la mémoire et entraîner l'arrêt du système. Pour éviter cela, une solution a été mise en place consistant à transférer les données vers un autre disque dur en parallèle du fonctionnement du système, permettant ainsi de prévenir l'arrêt du système même en cas d'accumulation de grandes quantités de données.

3.1.3 Analyse de signatures isolées accompagnées de phénomènes électrostatiques de proximité et lointains

Dans cette section, plusieurs signatures de mesure sont présentées, mettant en évidence des enregistrements qui sont accompagnés de phénomènes électrostatiques de proximité ou lointain.

- Les phénomènes de proximité sont caractérisés par un champ électrostatique visible sur le moulin à champ lors de l'enregistrement,
- tandis que les phénomènes lointains (ou distants) se réfèrent à des événements électrostatiques déjà passés ou à venir sur le site, mais captés par le pylône.

Ainsi, l'acquisition des données peut avoir lieu même lorsque le champ électrostatique est faible, mais qu'un événement électrostatique est visible sur le moulin à champ avec un décalage de 30 minutes à 1 heure par rapport au moment de l'enregistrement.

3.1.3.1 Analyse d'une signature en présence d'un phénomène électrostatique de proximité

La figure 3.6 présente un enregistrement avec de l'activité sur les trois voies. Cet enregistrement a été réalisé le 21 juin 2021 à 22h24.

Dans cet enregistrement, une analyse chronologique révèle plusieurs observations intéressantes. Tout d'abord, il y a une activité continue mesurée par l'antenne, atteignant une amplitude maximale de 700 mV, tandis que les mesures de courant ne montrent aucune activité correspondante. Cette activité de l'antenne présente une décroissance au fil du temps.

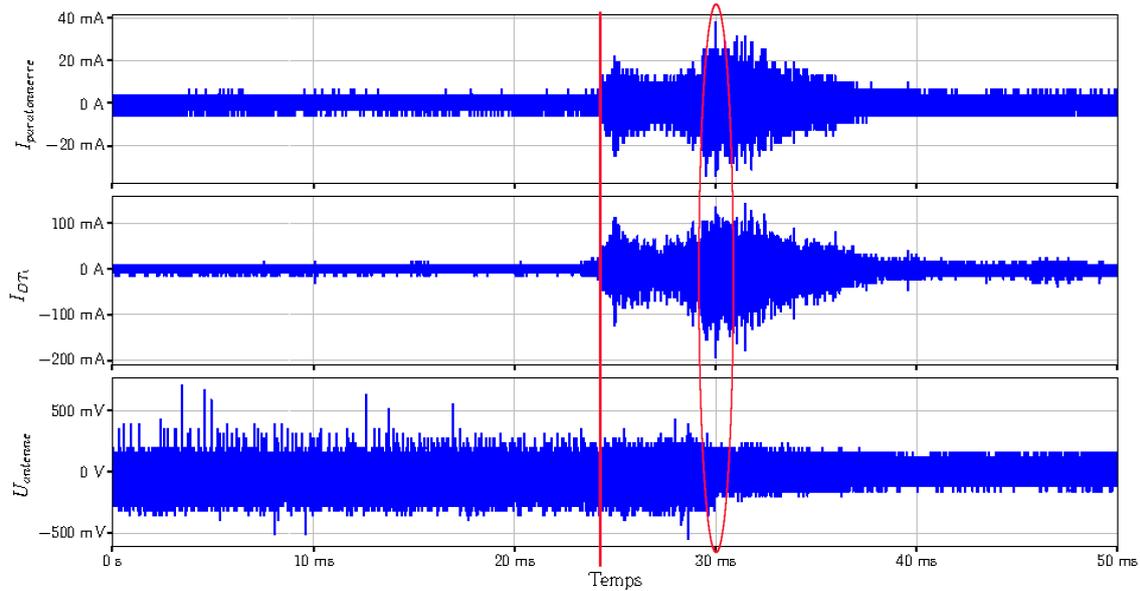


FIGURE 3.6 – Enregistrement de trois voies de mesures du 21 juin 2021 à 22h24

À partir de 25 ms, une première activité apparaît simultanément sur les mesures de courant, avec des amplitudes atteignant jusqu'à ± 20 mA, et une amplitude maximale de ± 100 mA pour le courant à la base du pylône¹. Une nouvelle activité de ce type se produit à 30 ms, avec des amplitudes plus élevées sur les mesures de courant. En revanche, à partir de ce moment, l'activité sur l'antenne, présentée sur le graphique du bas, diminue considérablement, voire disparaît quasiment.

Cette forte activité des mesures de courant peut être due à la détection d'un coup de foudre à proximité du pylône. De plus, il est possible que le coup de foudre ait créé un effet de blindage sur l'antenne, réduisant ainsi son activité détectée. Il se peut également que le phénomène soit lié à un départ de leader (voir section 1.3.3) à un endroit spécifique sur le pylône, autre que le paratonnerre.

La figure 3.7 présente la mesure du champ électrostatique effectuée le 21 juin 2021 entre 21h24 et 23h24. Les mesures de la figure 3.6 correspondent au cercle vert. Ce cercle est au voisinage de 2 variations fortes du champ électrostatique.

1. Pour rappel, le courant mesuré à la base du pylône ne représente qu'environ 10-15 % du courant total circulant sur le pylône.

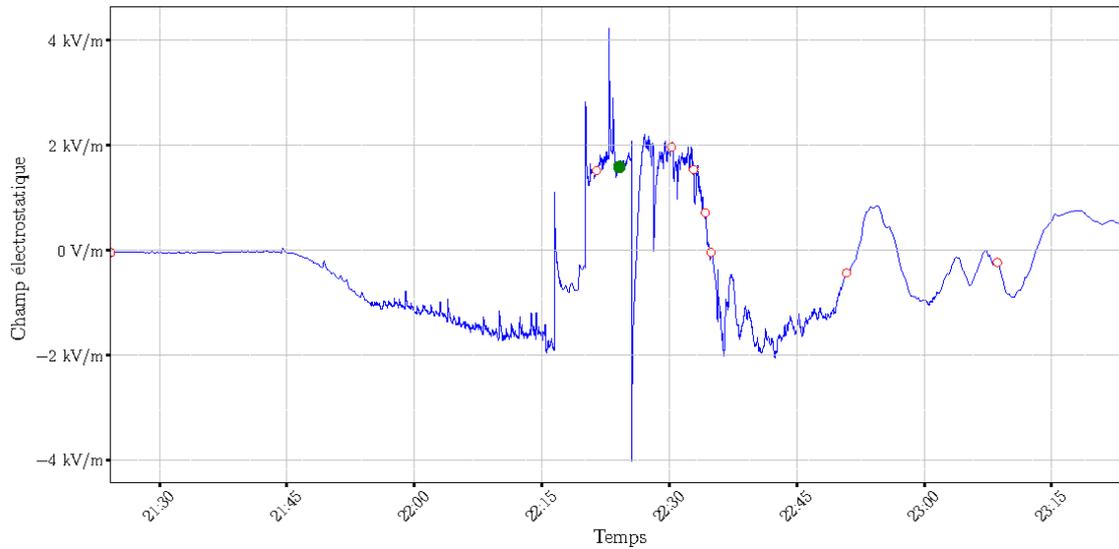


FIGURE 3.7 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 21 juin 2021 entre 21h24 de 23h24

Cela suggère la présence de coups de foudre à proximité du système d’acquisition. Cette observation renforce l’hypothèse selon laquelle l’événement enregistré est lié à une activité électrique intense, telle qu’un coup de foudre. L’enregistrement ne correspond pas exactement au moment d’un éclair, ce qui laisse supposer qu’un éclair ou sa formation a perturbé l’environnement électromagnétique du pylône.

3.1.3.2 Analyse d’une signature impulsionnelle en présence d’un phénomène électrostatique lointain

La figure 3.8 présente un zoom d’un enregistrement d’une durée de $20 \mu\text{s}$, obtenu le 9 septembre 2021 à 19h01. Dans cet enregistrement, une seule impulsion est observée, et elle est corrélée sur les quatre voies du numériseur.

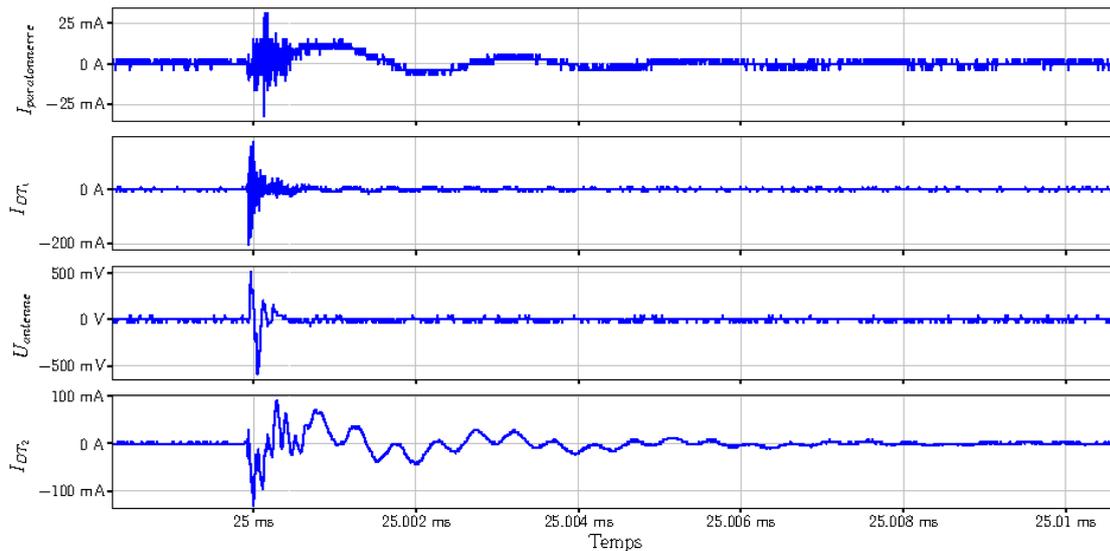


FIGURE 3.8 – Zoom de l'enregistrement des 4 voies mesures du 9 novembre à 19h01

Le courant mesuré présente une variation entre ± 200 mA pour la descente de terre 1, tandis que pour la descente de terre 2, il se situe entre ± 100 mA. Cette différence de répartition du courant suggère que les événements peuvent avoir des impacts différents sur les différentes descentes de terre. Par ailleurs, l'intensité maximale mesurée au niveau du paratonnerre est de seulement ± 25 mA, ce qui suggère que l'événement enregistré ne provient pas directement du paratonnerre lui-même. En ce qui concerne l'antenne, une tension de ± 500 mV est observée contre ± 100 mV en période de beau temps.

De plus, une corrélation des impulsions est observée entre chaque voie d'enregistrement. En outre, une résonance du courant est constatée au niveau du paratonnerre ($I_{paratonnerre}$) et au niveau de la descente de terre 2 (I_{DT2}). Toutefois, il est remarqué que l'intensité mesurée par les sondes de courant à la base du pylône est plus élevée que celle mesurée au niveau du paratonnerre. Cela suggère que l'événement enregistré pourrait être soit un coup de foudre lointain, soit un événement industriel qui a été capté par le pylône.

L'analyse du champ électrostatique mesuré lors de cet événement révèle la présence d'un orage passant au-dessus du pylône quelques heures plus tard, comme le montre la figure 3.9. Le point vert représente l'événement de 19h01 présenté ci-dessus. L'hypothèse d'un coup de foudre distant est donc potentiellement valide.

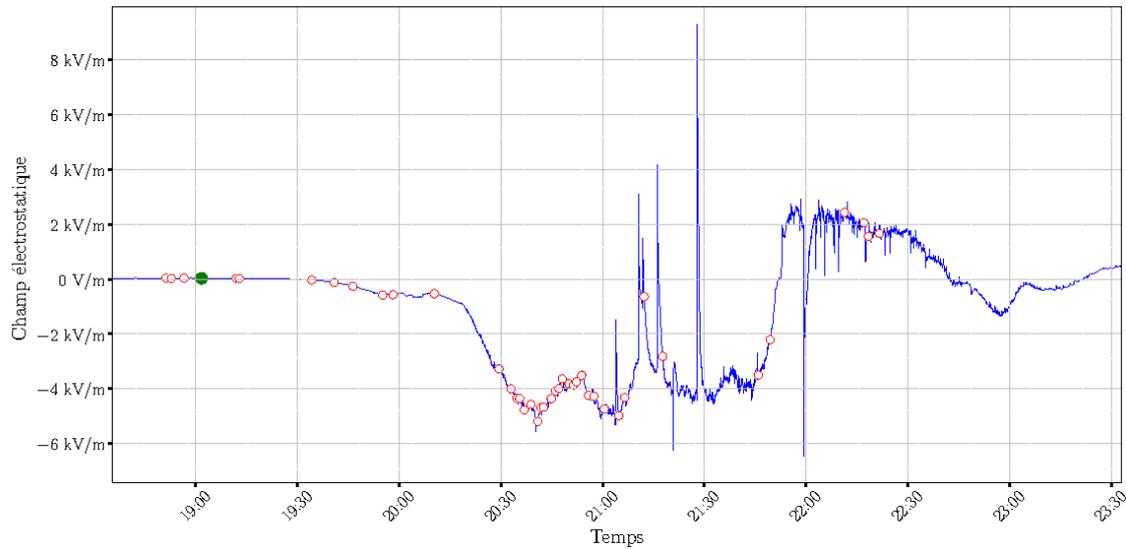


FIGURE 3.9 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 9 novembre 2021 entre 18h30 et 23h30

3.1.3.3 Analyse d'une autre signature en présence d'un phénomène électrostatique lointain

Un autre exemple est présenté sur la figure 3.10, qui correspond au zoom d'un enregistrement réalisé le 4 août à 14h00. Une corrélation entre les sondes de courant peut être observée, mais cette fois-ci le courant mesuré à la base du pylône atteint des niveaux beaucoup plus élevés, jusqu'à saturation à 500 mA.

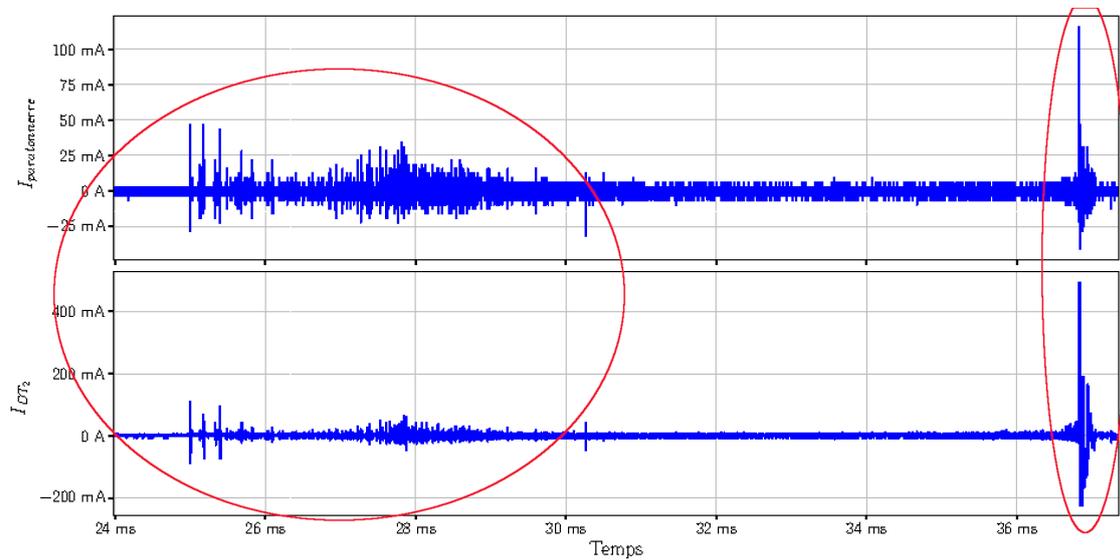


FIGURE 3.10 – Zoom de l'enregistrement des mesures de courant du 4 août à 14h00

Il n'y a pas d'activité détectée sur l'antenne pendant cet enregistrement. Il est possible que cela soit dû à un coup de foudre distant ou un autre phénomène distant qui a interagi différemment avec le pylône.

La figure 3.11 présente la mesure du champ électrostatique du 4 août 2021 entre 13h00 et 17h00.

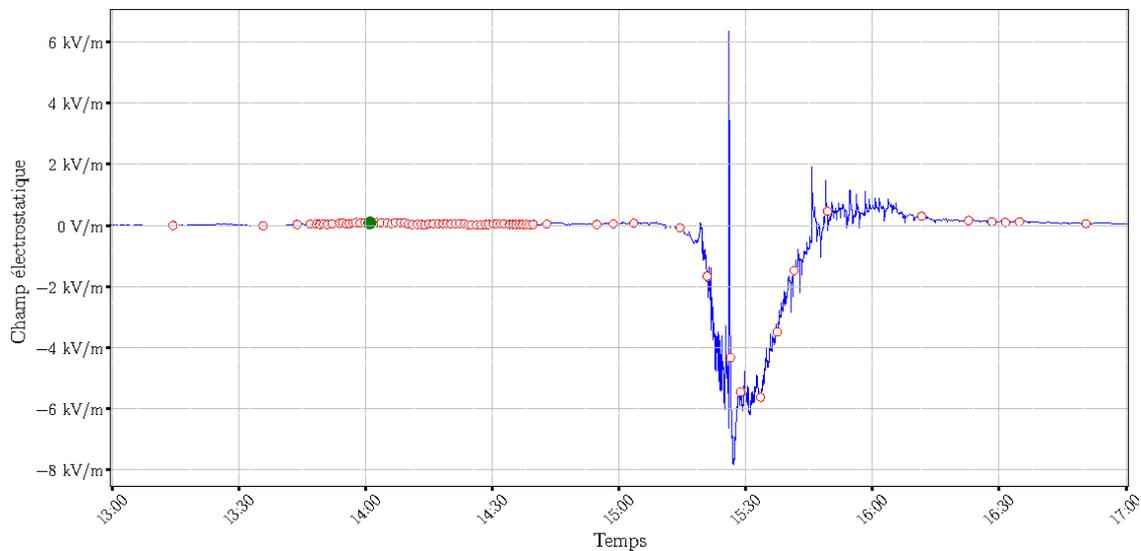


FIGURE 3.11 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 4 août entre 13h00 et 17h00

Cette mesure révèle qu'il y avait un champ électrostatique proche de 0 V/m lors de l'enregistrement. Cependant, un événement électrostatique s'est produit 1h30 plus tard, vers 15h30, avec des valeurs de champ atteignant ± 6 kV/m et un fort gradient, indiquant la présence d'un éclair. Cela suggère que l'événement enregistré est probablement associé à un coup de foudre distant puisqu'il y a eu une météo orageuse. Il a été observé qu'un nombre conséquent d'acquisitions a été déclenché durant cette période précédant l'arrivée d'un phénomène électrostatique. Les acquisitions ont pu être déclenchées par un orage très intense lorsqu'il était encore loin, et cet orage a diminué d'intensité lorsqu'il est arrivé sur le site.

Il est également intéressant de noter que les événements, marqués par des cercles rouges entre 15h00 et 16h00, ne présentent aucune signature particulière et alors qu'ils apparaissent pendant les moments où un événement électrostatique se produit.

3.1.3.4 Conclusion

Dans cette sous-section, ont été présentées trois signatures qui illustrent la diversité des phénomènes pouvant affecter un pylône dans un environnement péri-urbain. Ces phénomènes incluent les coups de foudre distants, les coups de foudre à proximité et d'autres événements locaux tels que les départs de leader.

Ces différentes signatures offrent un aperçu des types d'événements pouvant être détectés par le pylône. Cependant, une analyse plus approfondie des enregistrements est nécessaire pour déterminer précisément leur origine. L'objectif de cette étude se concentre sur l'analyse des peignes d'impulsions, qui sont présentés dans la sous-section suivante.

3.1.4 Les peignes d'impulsions au niveau du paratonnerre

Dans cette section, un enregistrement contenant un peigne d'impulsions, potentiellement associé à des décharges corona, est présenté. La figure 3.12 présente un exemple de ce type d'enregistrement obtenu à l'aide du système d'acquisition. Le graphique supérieur montre le courant mesuré à la base du paratonnerre à l'aide de la sonde de courant, tandis que le graphique inférieur représente la tension mesurée sur l'antenne.

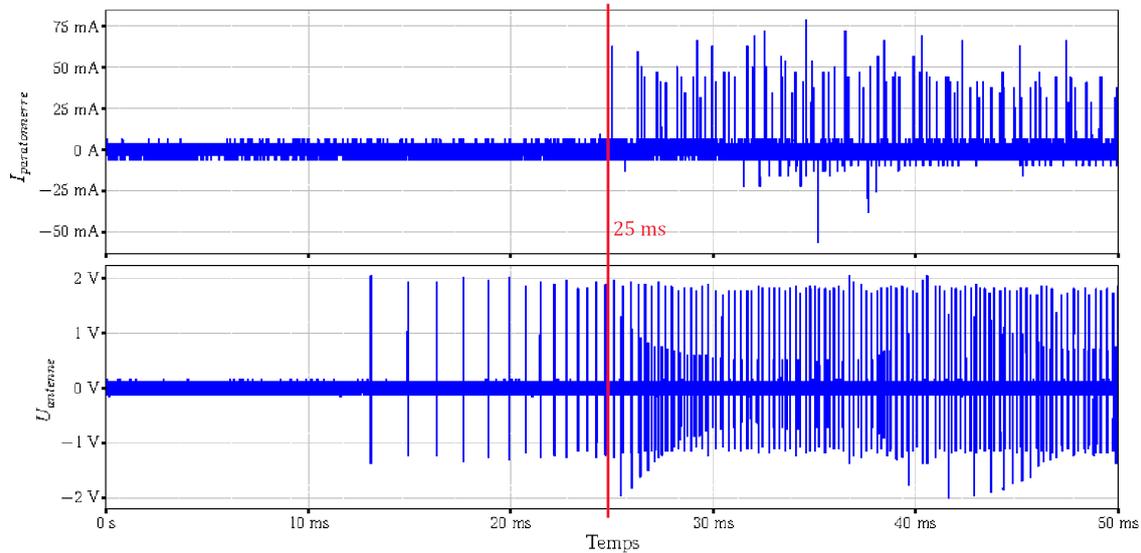


FIGURE 3.12 – Peigne d'impulsions enregistré le 26 juin 2021 à 22h06

Sur le courant mesuré au niveau du paratonnerre, un peigne d'impulsions positives est observé, débutant vers 25 ms, avec des impulsions atteignant jusqu'à 75 mA. Ces impulsions présentent une forme bi-exponentielle et sont étudiées en détail dans la section suivante consacrée à l'analyse des décharges corona (section 3.2).

Par rapport à la tension mesurée sur l'antenne, un peigne d'impulsions est également observé, débutant vers 12 ms et montrant une augmentation significative du nombre d'impulsions lors de l'apparition du peigne d'impulsions mesuré au niveau du paratonnerre.

Finalement, une activité avec des impulsions est observée sur l'antenne, et une corrélation est remarquée entre cette activité détectée au niveau du paratonnerre et celle mesurée sur l'antenne. Cependant, il est important de noter que ces activités ne sont pas directement synchronisées. Il s'agit de phénomènes locaux qui se produisent simultanément en raison des phénomènes électrostatiques qui affectent l'ensemble du pylône.

Il convient de souligner que certains enregistrements de peignes d'impulsions ont été affectés par du bruit. Comme le montre la figure 3.13, le niveau de bruit peut atteindre environ 40 mA.

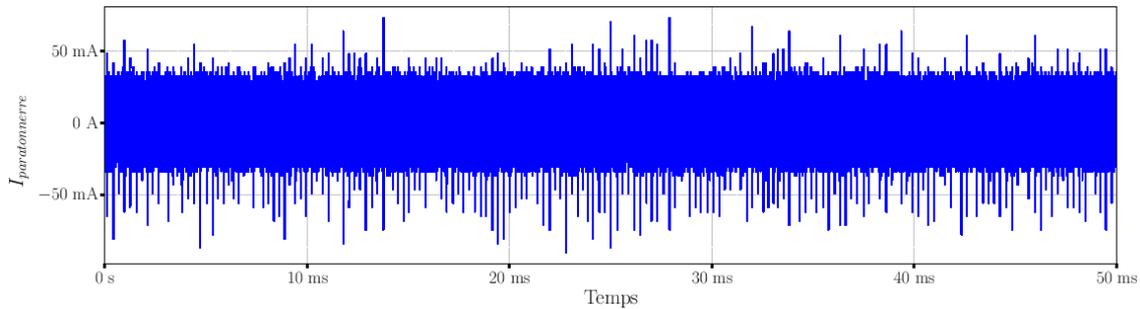


FIGURE 3.13 – Peigne d’impulsions avec présence de bruit enregistré le 11 mai 2021 à 14h46

Les impulsions qui se produisent sur ce peigne d’impulsions ont un comportement qui semble résonant comme le montre le zoom d’une des impulsions illustré sur la figure 3.14.

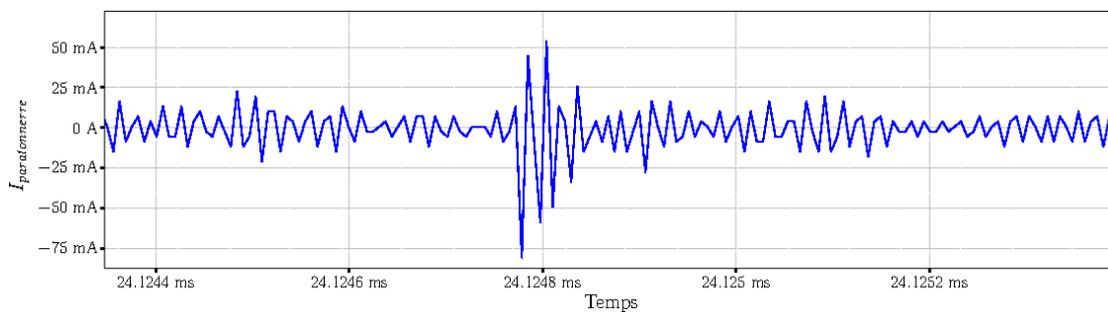


FIGURE 3.14 – Zoom d’une impulsion enregistré le 11 mai 2021 à 14h46

Cet enregistrement a été obtenu pendant un événement électrostatique d’intensité modérée, ce qui est illustré par le champ électrostatique associé à cet enregistrement, visible sur la figure 3.15.

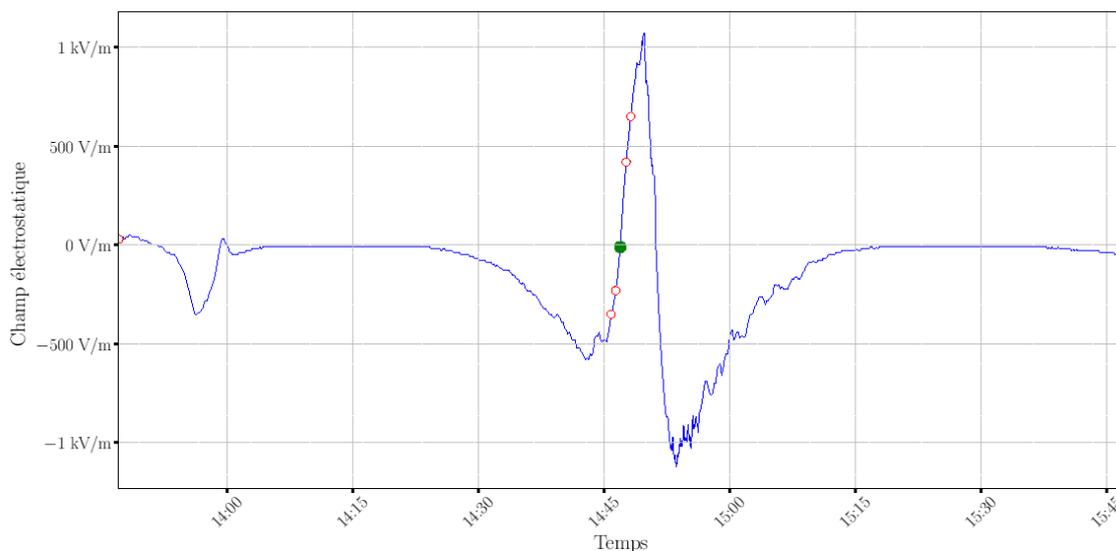


FIGURE 3.15 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 11 mai 2021 entre 12h46 et 14h46

La mesure du champ électrostatique révèle des variations allant de -1 kV à $+1$ kV pendant une durée de 30 minutes, ce qui n'indique pas la présence d'un orage d'intensité élevée.

D'autres enregistrements ont également été réalisés avec des peignes d'impulsions, mais cette fois-ci avec des intensités trop faibles qui, en raison du pas de quantification, sont difficilement exploitables. Ces résultats ont été exclus de l'analyse statistique, présentée dans la section 3.2.2 afin de garantir sa fiabilité.

3.1.5 Conclusion

Dans cette section, plusieurs catégories d'événements ont été présentées. Tout d'abord, les enregistrements qui ne présentaient pas de signatures particulières ont été classés comme bruit. Ensuite, des signatures isolées accompagnées de phénomènes électrostatiques de proximité et lointains ont été abordées, mettant en évidence des comportements associés à la foudre ainsi qu'à d'autres phénomènes électrostatiques sur le pylône. Enfin, des exemples de peignes d'impulsions ont été présentés, mettant en évidence la présence d'impulsions de type bi-exponentiel ainsi que des impulsions avec des phénomènes de résonance dans nos mesures. Ces différentes impulsions sont examinées en détails dans les deux sections suivantes.

3.2 Analyse des signatures de type bi-exponentiel

Dans cette section, une analyse approfondie des caractéristiques des impulsions bi-exponentielles, qui sont désignées comme des décharges de type corona en raison de leur forme spécifique, est présentée. Pour commencer, une analyse élémentaire est réalisée en examinant les décharges dans chaque polarité. Ensuite, l'analyse est étendue en réalisant une étude statistique en utilisant l'ensemble des enregistrements de la base de données pour chaque polarité. Enfin, une étude de la corrélation entre l'apparition de ces décharges sur le paratonnerre et les autres voies de mesure disponibles est réalisée.

3.2.1 Analyse de décharges corona élémentaires

Dans un premier temps, une analyse est effectuée sur une décharge corona positive élémentaire. La figure 3.16 présente le graphique du courant mesuré par la sonde du paratonnerre à la date du 17 août 2022 à 1h08 en fonction du temps. La mesure a été réalisée avec le Picoscope 6402D, avec une période d'échantillonnage de 1.2 ns et une quantification de 8 bits. La plage dynamique a été réglée pour mesurer des intensités allant jusqu'à 400 mA. Cette représentation graphique fournit un aperçu du comportement du courant d'une décharge corona mesurée à la base du paratonnerre.

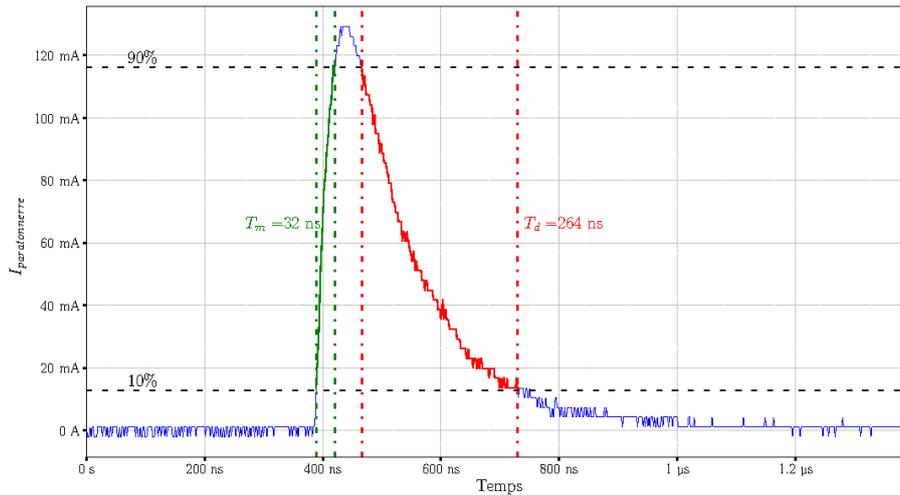


FIGURE 3.16 – Courant d'une impulsion positive mesurée par la sonde située sur le paratonnerre

Afin d'étudier ce type de décharge, il est important de définir les principales caractéristiques qui les distinguent. Parmi ces caractéristiques, nous utilisons notamment :

- L'amplitude maximale : il s'agit de la valeur maximale atteinte par le signal de décharge, mesurée en termes d'amplitude de courant.
- Le temps de montée : il correspond au temps nécessaire pour que le signal passe d'un niveau bas à un niveau élevé. Le temps de montée est défini comme le temps que met le courant pour passer de 10% à 90% de son amplitude maximale. Dans notre cas, si la valeur équivalente de 10% de l'amplitude maximale est inférieure au pas de quantification, ce critère est remplacé par le pas de quantification. Ce temps indique la rapidité avec laquelle la décharge se développe.
- Le temps de descente : cette caractéristique représente le temps nécessaire pour que le signal de décharge passe du niveau élevé au niveau bas. Il est mesuré entre les niveaux correspondant à 90% et 10% de l'amplitude maximale du signal.
- La quantité de charge transférée : C'est une mesure de la quantité d'électricité impliquée dans la décharge qui permet également d'évaluer l'intensité de la décharge. Selon la relation $I = \frac{dQ}{dt}$, où I représente le courant et Q la charge, l'intégrale du courant sur la durée de l'impulsion donne la quantité totale de charge transférée.

Ces paramètres et mesures permettent d'analyser et de caractériser les décharges corona observées, apportant ainsi des informations essentielles sur leur comportement et leur impact sur le système.

Voici un résumé des informations concernant la décharge de la figure 3.16 :

- un courant positif qui atteint une intensité maximale de 129 mA ;
- les droites horizontales noires indiquent les niveaux d'intensité correspondant à 10% et 90% de l'intensité maximale ;
- les droites verticales rouges et vertes marquent les instants auxquels ces niveaux d'intensité sont atteints ;
- le temps de montée, T_m , de l'impulsion est de 31.7 ns ;
- le temps de descente, T_d , de l'impulsion est de 235 ns ;

- la quantité de charge transférée par l'impulsion est de 22.5 nC.

La figure 3.17 illustre le courant d'une impulsion de courant négative enregistrée le 24 juin 2022 à 7h05. Les conditions d'acquisition sont identiques à celles de la mesure précédente.

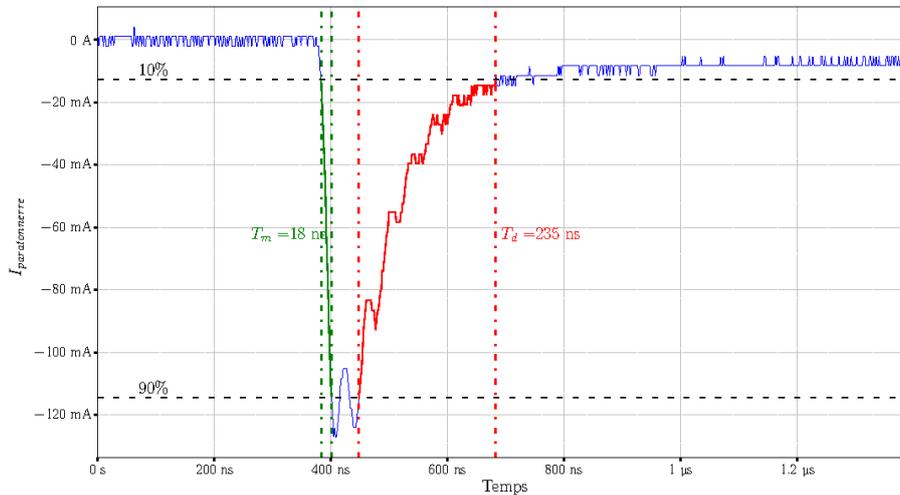


FIGURE 3.17 – Courant d'une impulsion négative mesurée par la sonde située sur le paratonnerre

Le courant de l'impulsion négative atteint un pic d'intensité de -127 mA en $t = 18.2$ ns. Il met $T_d = 235$ ns à redescendre et transfère une quantité de charge de -22.6 nC. Il convient de souligner qu'un offset d'environ 10 mA est maintenu par le courant, ce qui indique l'importance du critère de 10% pour les temps caractéristiques.

Par ailleurs, une résonance est observée dans le courant. Ce phénomène peut être attribué à une montée plus rapide de l'impulsion négative par rapport à l'impulsion positive, ce qui peut provoquer une excitation supplémentaire de modes résonants du paratonnerre ou d'autres éléments du pylône. Il est intéressant de noter que le critère de 90% est également significatif, car la résonance conduit à un dépassement du courant au-dessus de ce seuil. Le temps de descente avant la résonance est de 265 ns, ce qui indique que les mesures avec résonance sont plus difficiles à caractériser.

Cette section a mis en évidence la présence de décharges corona mesurées lors des campagnes d'acquisition, ainsi que des comportements différents en fonction de la polarité pour ces décharges. Les comportements des décharges sont analysés plus en détails dans la section suivante à travers une étude statistique portant sur l'ensemble des événements mesurés. Les résultats de cette analyse sont ensuite comparés à des valeurs théoriques, permettant ainsi de mieux comprendre et interpréter les observations expérimentales.

3.2.2 Analyse statistiques des décharges corona

Au total, une vingtaine d'enregistrements contenant des décharges positives et/ou négatives a été obtenue au cours des campagnes de mesures. Parmi ces enregistrements, un total de 3939 décharges a été détecté. Dans cette section, après avoir décrit la méthode utilisée pour identifier les impulsions dans les enregistrements, une analyse statistique approfondie des caractéristiques de ces décharges est effectuée. Une comparaison est ensuite

réalisée entre les décharges de polarité positive et négative, en les confrontant à des valeurs de référence issues de la littérature.

3.2.2.1 Identification des impulsions dans les enregistrements

Pour l'identification des impulsions dans les enregistrements, un traitement est appliqué pour obtenir des caractéristiques correspondant à une forme d'impulsion bi-exponentielle. Pour assurer la cohérence des caractéristiques, plusieurs critères de sélection sont appliqués :

- l'intensité de l'impulsion doit être supérieure à 18 mA pour tenir compte du pas de quantification ;
- l'impulsion doit conserver la même polarité ;
- la quantité de charge doit être positive pour les impulsions positives et inversement pour les impulsions négatives ;
- le temps de montée doit être inférieur à 150 ns ;
- le temps de descente doit être inférieur à 450 ns ;
- le temps de montée est inférieur au temps de descente.

Ces critères ont été établis de manière empirique, en se basant sur la théorie et après une observation minutieuse des courants présentant des comportements sensiblement différents de ceux attendus pour une décharge corona classique. Grâce à l'application de ces critères, seules les décharges présentant des caractéristiques de type bi-exponentiel similaires à celles des décharges corona ont été conservées pour une analyse plus approfondie.

La méthode utilisée pour analyser les décharges est similaire à celle décrite dans la partie 3.2.1. Elle est appliquée à toutes les décharges mesurées, permettant ainsi d'obtenir leurs différentes caractéristiques.

3.2.2.2 Étude des décharges corona positives

Dans le cadre de la campagne de mesures de 2022, un seul enregistrement contenant des décharges positives a été réalisé. Les analyses statistiques ne portent donc que sur les données de l'année 2021. Cette section se divise en plusieurs parties pour étudier les décharges électrostatiques de manière approfondie. Dans un premier temps, l'événement principal contenant la majorité des enregistrements concernés est présenté. Ensuite, une analyse temporelle des décharges est réalisée sur un enregistrement spécifique. Par la suite, une analyse statistique des caractéristiques des décharges est effectuée sur l'ensemble des enregistrements, suivie d'une étude du champ électrostatique ambiant relevé pour chaque enregistrement. Enfin, une analyse de la périodicité des décharges est réalisée.

Analyse de l'évènement orageux du 26 juin 2021 : Il convient de noter qu'une grande partie des événements étudiés se sont produits lors d'un orage le 26 juin 2021. Le champ électrostatique mesuré pendant cet orage est présenté sur la figure 3.18.

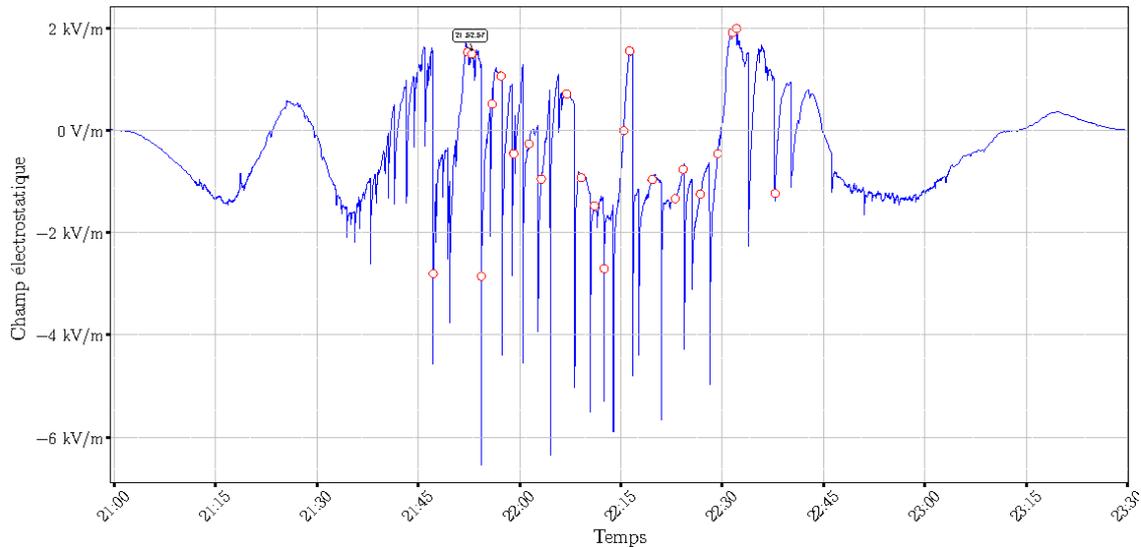


FIGURE 3.18 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 26 juin 2021 entre 21h00 et 23h30

Le champ électrostatique permet de voir une intense activité électrique avec de nombreux phénomènes de type foudre.

Analyse temporelle des décharges électrostatiques sur un enregistrement : Le traitement des décharges positives est illustré à travers un exemple basé sur un enregistrement du 26 juin 2021 à 22h06. La figure 3.19 représente la mesure de courant au niveau du paratonnerre. En bas de la figure, toutes les décharges positives de cet enregistrement peuvent être observées. La superposition est réalisée en alignant les décharges par rapport à leur intensité maximale avant filtrage. Les décharges sont ensuite triées en trois groupes en fonction de leur intensité :

- les décharges avec une intensité inférieure à 23 mA, en rouge ;
- Les décharges avec une intensité comprise entre 23 mA et 60 mA, en bleu ;
- les décharges avec une intensité supérieure à 60 mA, en vert.

Ces seuils d'intensité ont été déterminés après analyse des résultats afin d'améliorer la lisibilité des données. Les catégories d'intensité sont désignées respectivement comme type 1, type 2 et type 3.

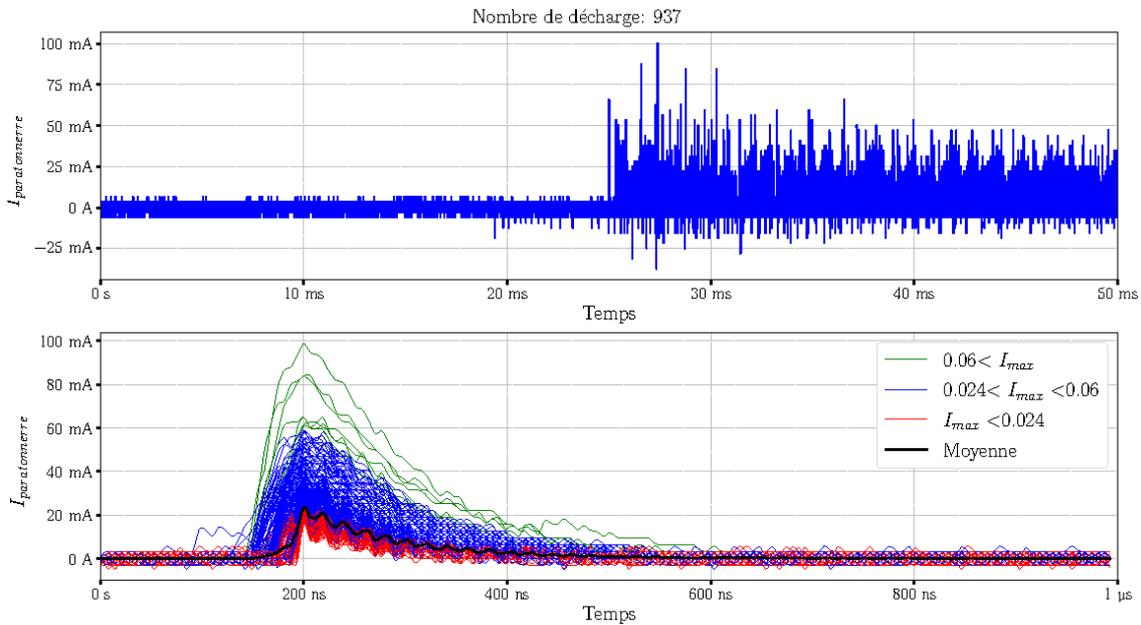


FIGURE 3.19 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 26 juin 2021. En bas : superposition des impulsions de courant positives de l’enregistrement.

Le traitement effectué met en évidence le profil bi-exponentiel des impulsions mesurées et la large gamme d’intensités qu’elles couvrent. Il est noté que les décharges d’intensité de type 3 sont moins fréquentes, ce qui est corroboré par l’intensité moyenne des décharges, représentée en noir sur la figure 3.19, qui atteint un maximum d’environ 20 mA.

Analyse statistique des caractéristiques des décharges électrostatiques sur tous les enregistrements : Le traitement des 20 enregistrements contenant des décharges positives de la campagne de mesures de 2021 permet de générer les histogrammes présentés dans la figure 3.20. Les décharges sont classées en fonction de leur intensité, de leur quantité de charge et de leurs temps caractéristiques. Les barres de l’histogramme sont colorées de la même façon que pour la figure 3.19. Les lignes verticales en pointillés représentent la médiane (en violet) et la moyenne (en orange) des distributions.

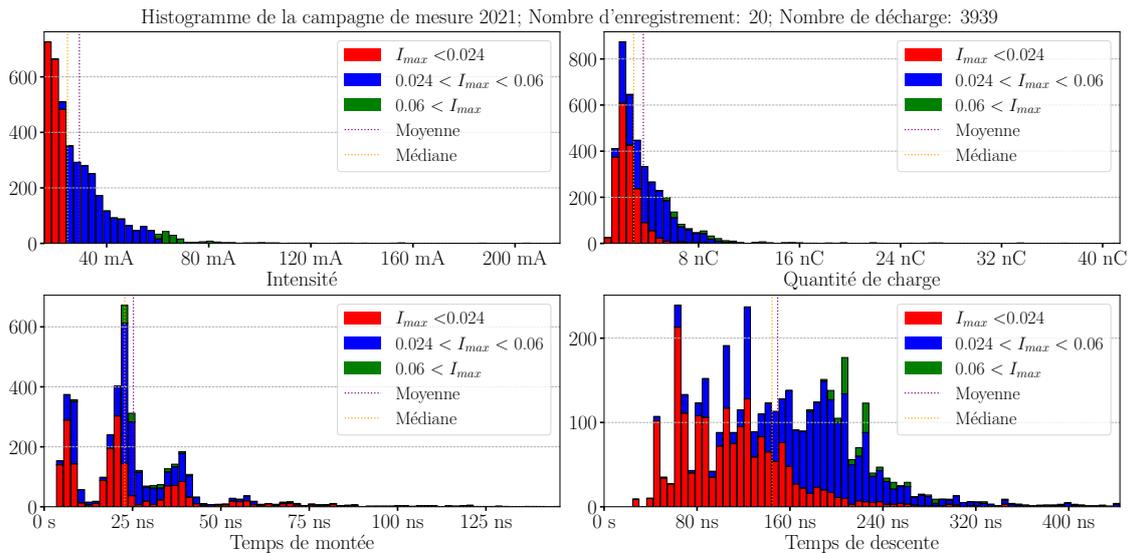


FIGURE 3.20 – Histogramme des caractéristiques des décharges positives mesurées pendant la campagne de mesure 2021. En haut, les intensités maximales et les quantités de charges. En bas, les temps de montée et de descente.

Dans l'histogramme des intensités, la majorité des décharges positives mesurées pendant la campagne de mesure de 2021 ont une intensité inférieure à 60 mA, avec une valeur moyenne d'environ 24 mA.

L'analyse de l'histogramme des temps de montée révèle la présence de trois groupes distincts de décharges, avec des temps de montée d'environ 10 ns, 20 ns et 27 ns. Il est intéressant de noter que ces groupes ne semblent pas être directement liés aux intensités des décharges. En d'autres termes, des décharges ayant des intensités différentes peuvent présenter des temps de montée similaires, et vice versa.

Les autres histogrammes montrent que l'intensité joue un rôle important sur ces caractéristiques des décharges. Les décharges avec des intensités plus élevées ont tendance à présenter des temps de descente plus longs et des quantités de charge plus élevées.

La superposition des décharges positives (figure 3.19) révèle une grande similarité et une homothétie dans leur forme. Cependant, cette homothétie est remise en question par les histogrammes des caractéristiques (figure 3.20), où l'on observe une variation des temps de montée qui ne sont pas reliés aux intensités des décharges. Ces résultats suggèrent que d'autres facteurs ou mécanismes peuvent influencer la forme et les caractéristiques des décharges positives, au-delà de leur intensité.

Le tableau 3.1 présente les valeurs statistiques des différentes caractéristiques des décharges corona positives mesurées lors de la campagne de mesure de 2021. Les valeurs maximales, minimales, moyennes et médianes ont été enregistrées pour chaque caractéristique. Ces valeurs sont comparés aux valeurs références de la thèse de Wang[11].

Caractéristique	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Valeurs référence
Intensité maximale (mA)	15.5	218	29.3	24.7	[2, 120]
Temps de montée (ns)	3.39	146	25.2	22.8	30
Temps de descente (ns)	24.3	444	149	145	200
Quantité de charge (nC)	0.522	41.4	3.62	2.86	

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques des 3939 décharges corona positives mesurées durant la campagne 2021

Il est important de noter que les valeurs statistiques montrent une grande variabilité dans les caractéristiques des décharges corona positives mesurées. Les valeurs maximales, notamment en termes d'intensité, de temps de montée et de descente, et de quantité de charge, peuvent être très éloignées des valeurs moyennes et médianes. Nous remarquons que les valeurs mesurées correspondent aux valeurs trouvées dans la littérature.

Analyse du champ électrostatique ambiant : Le champ électrostatique a été mesuré pendant 19 enregistrements, les valeurs positives et négatives sont analysées séparément. Les caractéristiques statistiques du champ électrostatique sont résumées dans le tableau 3.2, avec les proportions en fonction de la polarité.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Proportion
Champ électrostatique > 0 (kV/m)	0.46	2.63	1.23	0.91	7
Champ électrostatique < 0(kV/m)	-0.13	-2.7	-1.14	-0.955	12

TABLEAU 3.2 – Valeurs statistiques du champ électrostatiques en fonction de leur polarité

Parmi les enregistrements, 7 présentait un champ électrostatique positif et 12 présentait un champ électrostatique négatif. Il est important de souligner que ces mesures ont été effectuées pendant une période d'activité électrique intense, comme indiqué dans la figure 3.18. Cette observation confirme que l'activité électrique est un élément essentiel pour la génération des décharges corona.

L'analyse des valeurs du champ électrostatique en fonction de la polarité des décharges corona révèle des similitudes entre les deux polarités avec 7 valeurs de champ positives et 12 négatives. Les valeurs maximales des champs électrostatiques positifs et négatifs sont respectivement de 2.63 kV/m et -2.7 kV/m, ce qui met en évidence une symétrie entre les valeurs extrêmes des deux polarités. Cette analyse suggère un comportement inattendu : des décharges positives se produisent indépendamment de la polarité du champ électrostatique. De plus, les décharges ne nécessitent pas de valeurs de champ extrêmes, mais plutôt de l'ordre de quelques kV/m.

L'observation de la coexistence des décharges positives et négatives sur les mêmes enregistrements est aussi surprenante et soulève des questions sur les mécanismes physiques qui les sous-tendent. La polarité des décharges est directement liée au champ électrostatique à proximité du paratonnerre. Dans des conditions normales, on s'attendrait à ce que le champ électrostatique au niveau du paratonnerre soit généralement de polarité constante.

Une explication possible est que le champ électrostatique au niveau du paratonnerre est influencé par l'activité électrique globale qui se produit sur le pylône. Les décharges positives et négatives pourraient être le résultat de processus électriques complexes qui se produisent à différentes positions sur le pylône et qui modifient le champ électrostatique local.

Analyse de la périodicité des décharges : Nous quantifions ici la régularité avec laquelle les décharges apparaissent. Pour cela, le temps écoulé entre la décharge i et la décharge $i + 1$ est mesuré et est noté Δt_i . Ensuite, la moyenne μ et la médiane med de l'inverse de tous ces temps ont été calculées pour chaque enregistrement. L'écart-type σ a également été calculé. Cela permet d'obtenir le coefficient de variation en réalisant $CV = \frac{\sigma}{\mu}$. Ce coefficient de variation permet d'évaluer la dispersion des écarts entre les décharges et d'indiquer si elles présentent une certaine régularité ou non. L'analyse de la périodicité a également été réalisée en tenant compte des intensités des décharges afin de déterminer s'il existe une corrélation entre la fréquence de répétition, la régularité et l'intensité.

La figure 3.21 représente les coefficients de variation en fonction de la médiane des fréquences de répétition. Chaque marqueur sur le graphique correspond à un enregistrement et sa taille est ajustée en fonction du nombre de décharges dans cet enregistrement. Ainsi, les marqueurs plus grands indiquent un plus grand nombre de décharges. De plus, un gradient de couleur est utilisé pour représenter l'intensité moyenne des décharges dans chaque enregistrement. La couleur varie du bleu au rouge, où le bleu représente une intensité plus faible et le rouge une intensité plus élevée. Il convient de noter que seuls les points correspondant à des enregistrements avec au moins 3 décharges sont affichés sur le graphique, ce qui permet de filtrer les enregistrements avec un nombre trop faible de décharges pour une analyse significative.

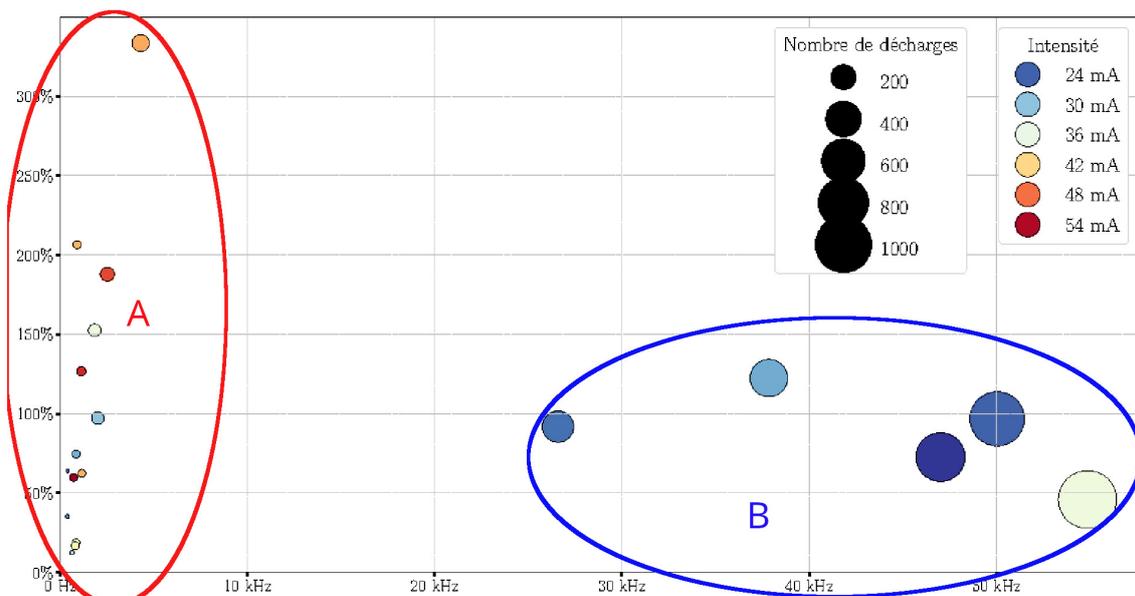


FIGURE 3.21 – Coefficient de variation de la fréquence de répétition et de l'intensité des décharges électrostatiques en fonction des fréquences médianes par enregistrement de décharges positives

Il est possible de distinguer deux groupes sur le graphique qui sont identifiés par les lettres A et B. Dans le groupe A, avec des fréquences médianes allant jusqu'à 4 kHz, une dispersion élevée de la fréquence de répétition des décharges est observée, avec un coefficient de variation allant de 20% à plus de 300%. Cela indique qu'il y a des événements avec des impulsions quasiment périodique, lorsque $CV < 30\%$, et qu'il y a des événements très peu périodiques. De plus, les intensités moyennes des décharges dans ce groupe sont

généralement supérieures à 30 mA. Ces enregistrements présentent un faible nombre de décharges, moins de 100 décharges par enregistrement.

Dans le groupe B, avec des fréquences médianes allant de 25 kHz à 54 kHz, les coefficients de variation sont situés entre 40% et 110%. Cela signifie que les impulsions sont moyennement périodiques pour ces enregistrements. Les intensités moyennes des décharges dans ce groupe se situent entre 24 mA et 36 mA. Ces enregistrements contiennent quant à eux un plus grand nombre de décharges, allant de 200 à plus de 1000 décharges par enregistrement.

Dans la thèse précédente, la plage de fréquences pour cette polarité avait été définie entre 100 Hz et 4 kHz. Cependant, les mesures actuelles révèlent des fréquences de répétitions plus fréquents pour le groupe B.

La figure 3.22 présente quatre graphiques qui permettent de comparer les caractéristiques des décharges électrostatiques pour les groupes A et B. La colonne de gauche représente le groupe A, tandis que la colonne de droite représente le groupe B. Les graphiques du haut reprennent le coefficient de variation de la fréquence de répétition et de l'intensité des décharges électrostatiques en fonction des fréquences médianes de répétition. Les graphiques du bas mettent en évidence la dispersion des intensités dans chaque enregistrement, avec les quartiles à 10%, 25%, 75% et 90% représentés par de petits carrés et la moyenne et la médiane indiquées par des points rouges et oranges respectivement.

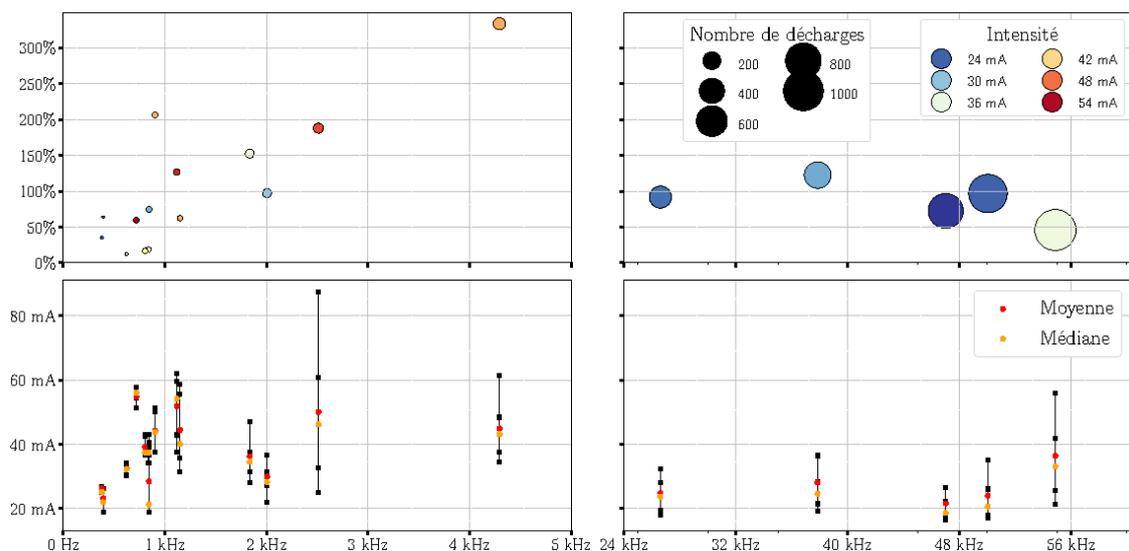


FIGURE 3.22 – Coefficient de variation de la fréquence de répétition et de l'intensité des décharges électrostatiques en fonction des fréquences médianes par enregistrement de décharges positives

Les graphiques présentés indiquent qu'il existe une corrélation entre l'intensité moyenne des décharges et la dispersion des intensités, indépendamment des autres paramètres. Lorsque l'intensité moyenne (échelle de couleur sur les graphiques du haut) des décharges est élevée, la dispersion des intensités augmente également. Cela suggère une plus grande variabilité dans les amplitudes des décharges lorsque l'intensité moyenne est plus élevée.

De plus, les quatre enregistrements du groupe à haute fréquence, avec une moyenne d'intensité variant entre 24 et 30 mA, présentent une dispersion relativement similaire. Cela

indique que ces enregistrements contiennent des décharges qui sont assez similaires entre elles en termes d'amplitude. La figure 3.23 présente un zoom d'un des 4 enregistrements obtenu le 6 juin 2021 à 22h12, montrant le courant au niveau du paratonnerre entre 42 ms et 44 ms.

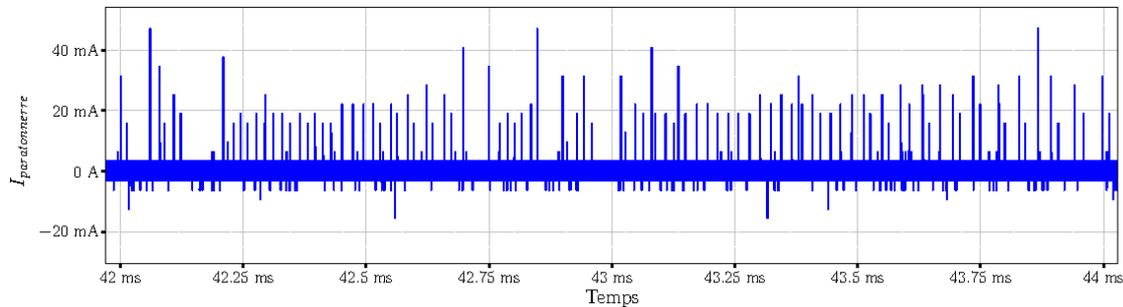


FIGURE 3.23 – Zoom de l'enregistrement de la mesure de courant sur le paratonnerre du 6 juin 2021 à 22h12

Un peigne d'impulsions de courant, avec la majorité des impulsions ayant une intensité d'environ 20 mA, est observé sur cette figure. Ces impulsions sont périodiques pendant de courts moments, ce qui explique le coefficient de variation se situant entre 50 % et 100 % en raison de l'irrégularité du peigne et de la dispersion des intensités des décharges.

Les graphiques montrent une tendance générale selon laquelle une augmentation de la médiane de la fréquence de répétition des décharges est associée à une stabilisation de la périodicité et de la dispersion de l'intensité des décharges à des niveaux modérés. Cela suggère qu'il peut exister une corrélation entre la fréquence de répétition des décharges et leur intensité. Cependant, il est important de noter que cette relation n'est pas systématique et qu'elle peut être influencée par d'autres facteurs.

Les graphiques mettent également en évidence une moins bonne périodicité lorsque la fréquence de répétition augmente dans les enregistrements avec un faible nombre de décharges. Il n'y a, en revanche, pas de relation simple entre la fréquence de répétition et l'intensité des décharges. Cette observation peut être attribuée au fait que lorsque le champ électrostatique n'atteint pas un niveau suffisamment élevé, les décharges peuvent être moins régulières et plus susceptibles de présenter des variations aléatoires.

Conclusion : L'analyse réalisée a permis de mettre en évidence la possibilité de subdiviser ces décharges en différents sous-groupes en fonction de leurs temps de montée, ainsi que des enregistrements présentant des fréquences de répétition plus élevées et une périodicité moyenne.

3.2.2.3 Étude des décharges corona négatives

Les mesures effectuées ont permis de détecter un total de 321 décharges négatives réparties sur 15 enregistrements. Cette section présente une méthodologie similaire à celle utilisée pour les décharges positives, comprenant une analyse temporelle des décharges sur un enregistrement spécifique, une analyse statistique des caractéristiques des décharges sur l'ensemble des enregistrements, une étude du champ électrostatique ambiant relevé pour chaque enregistrement, ainsi qu'une analyse de la périodicité des décharges.

Analyse temporelle des décharges électrostatiques sur un enregistrement : La figure 3.24 présente un exemple de superposition des décharges négatives. Cet enregistrement a été obtenu le 26 juin 2021 à 21h52. Les intensités des décharges négatives sont regroupées en trois catégories :

- les intensités supérieures à -23 mA, en rouge ;
- les intensités comprises entre -23 mA et -50 mA, en vert ;
- les intensités inférieures à -50 mA, en bleu.

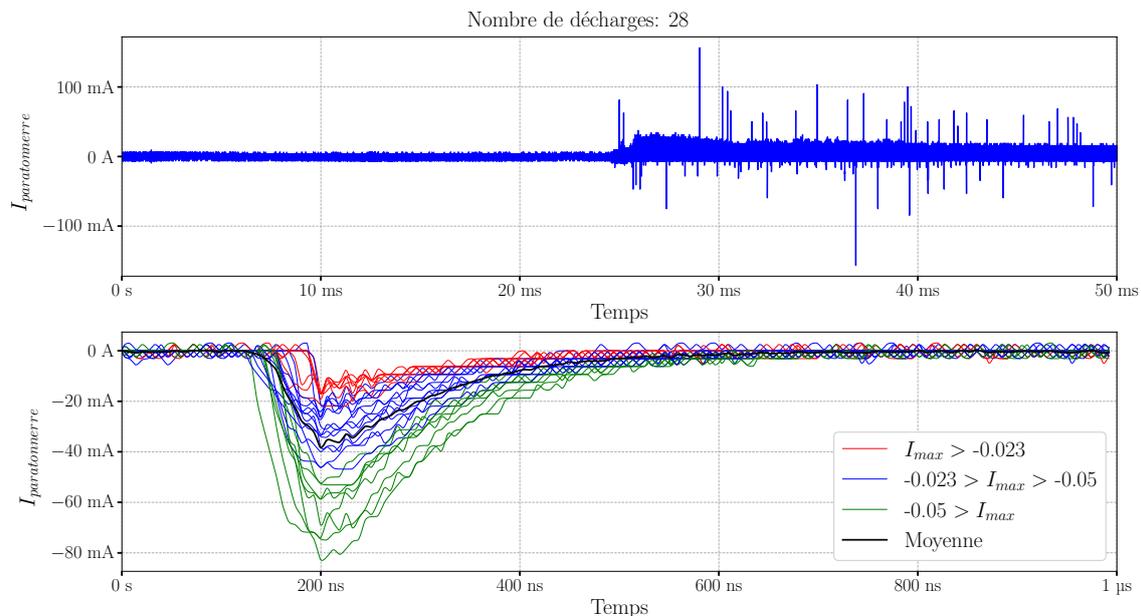


FIGURE 3.24 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 26 juin 2021. En bas : superposition des impulsions de courant négatives de l’enregistrement.

Au cours de cet enregistrement spécifique, un total de 28 décharges négatives a été détecté. Ces décharges présentaient une diversité d’amplitudes, ce qui suggère une variation significative dans le comportement des décharges négatives.

La comparaison entre les figures 3.19 et 3.24 met en évidence un comportement similaire lors de l’apparition des décharges, indépendamment de leur polarité. Dans les deux cas, aucune activité n’est observée pendant les 25 premières millisecondes, puis un peigne d’impulsions apparaît. Toutes les mesures contenant ce type de décharge ont été enregistrées selon ce schéma spécifique qui permet de capturer le début du peigne d’impulsions. Le temps minimum entre 2 acquisitions successives étant d’environ 45 secondes, aucun enregistrement ne peut être réalisé pendant cette période.

De plus, il est intéressant de noter que, de manière générale, les enregistrements contiennent moins de décharges négatives que de décharges positives.

Analyse statistique des caractéristiques des décharges électrostatiques sur tous les enregistrements : En réalisant le même type d’analyse statistique que pour la polarité positive, les 4 histogrammes présentés sur la figure 3.25 sont obtenus.

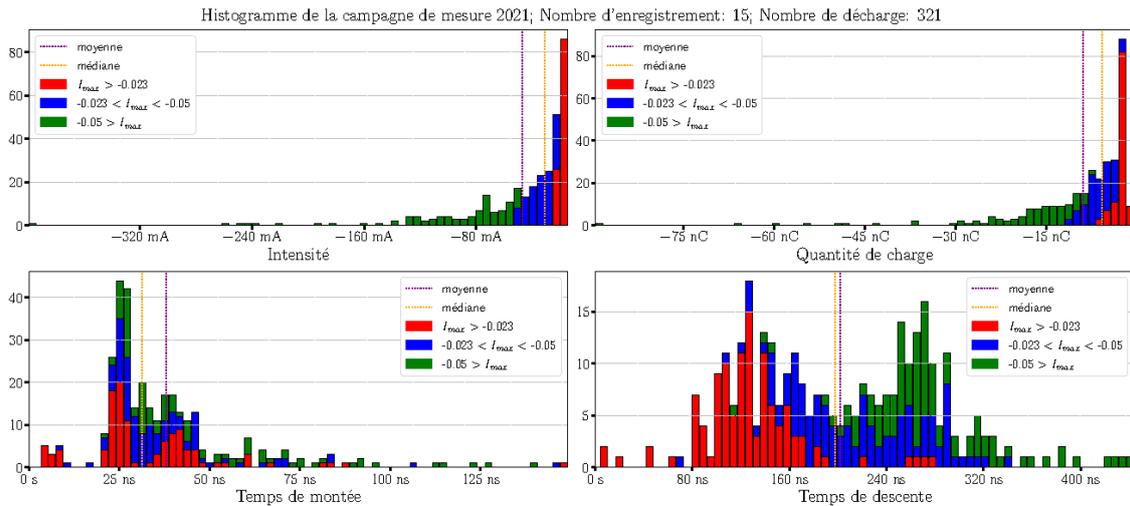


FIGURE 3.25 – Histogrammes des caractéristiques des décharges négatives mesurées au niveau du paratonnerre pendant la campagne de mesure 2021

Au total, 321 décharges négatives ont été détectées lors des 15 enregistrements effectués. Parmi ces décharges, la moitié présente une intensité inférieure à -30 mA. Cependant, il est important de noter que certaines décharges ont atteint des valeurs aussi basses que -400 mA.

Il est pertinent de noter une corrélation entre la quantité de charge et l'intensité des décharges, ce qui suggère une relation entre ces deux paramètres mesurés. De plus, une corrélation est observée entre les temps de descente et l'intensité des décharges, car ces temps augmentent avec l'intensité.

L'histogramme du temps de montée révèle une nouvelle fois que les temps de montée ne sont pas corrélés avec les intensités des décharges. Il y a quelques décharges de faible intensité avec un temps de montée au alentour de 10 ns. Ensuite la majorité des décharges ont un temps de montée allant de 23 ns à 50 ns quelle que soit l'intensité.

Une hypothèse plausible est que la quantité de charge impliquée dans la décharge reste relativement constante, mais que la création et la propagation du streamer peuvent être influencées par des conditions environnementales spécifiques à proximité de la pointe. L'humidité dans l'air ou la présence de gouttes d'eau à proximité de la pointe du dispositif de décharge peuvent modifier les propriétés électriques locales, telles que la conductivité et la permittivité de l'environnement. Ces variations locales peuvent influencer la vitesse de création du streamer et sa propagation le long du chemin conducteur.

Le tableau 3.3 présente les valeurs statistiques des caractéristiques des 321 décharges corona négatives mesurées lors de la campagne 2021 comme pour le tableau 3.1. Ces valeurs permettent d'avoir une vue d'ensemble des caractéristiques des décharges corona négatives observées.

Caractéristique	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Valeurs référence
Intensité maximale (mA)	-14.9	-399	-47.4	-31.0	[1,50]
Temps de montée (ns)	3.27	149	38.0	31.4	10
Temps de descente (ns)	3.87	444	201	197	70
Quantité de charge (nC)	-0.446	-89.6	-8.92	-5.80	

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques des 321 décharges corona négatives mesurées durant la campagne 2021

Les valeurs extrêmes observées dans le tableau, notamment une intensité maximale de -399 mA, soulignent la diversité des caractéristiques des décharges corona négatives. La moyenne de -47.4 mA pour l'intensité maximale indique que, en moyenne, les décharges corona négatives ont une intensité négative relativement élevée. Il est évident que les valeurs enregistrées dans la thèse de Wang [11] ne concordent pas avec les mesures relevées dans cette situation spécifique.

En lien avec les observations des histogrammes, ces valeurs de tableau confirment les tendances observées. Les différentes caractéristiques telles que les temps de montée, les temps de descente et les quantités de charge montrent une diversité et une variabilité significatives. Cela démontre la complexité des phénomènes de décharge corona.

Analyse du champ électrostatique ambiant : Les valeurs statistiques du champ électrostatique ambiant sont résumées dans le tableau 3.4.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Proportion
Champ électrostatique > 0 (kV/m)	0.72	2.63	1.46	1.5	5
Champ électrostatique < 0 (kV/m)	-0.45	-2.7	-1.40	-1.24	9

TABLEAU 3.4 – Valeurs statistiques du champ électrostatiques en fonction de leur polarité

Il est intéressant de noter que les observations faites au niveau du champ électrique des décharges négatives sont similaires à celles des décharges positives puisqu'elles apparaissent sur les mêmes enregistrements. Cela montre à nouveau que la polarité du champ n'affecte pas la polarité des décharges. De plus, il y a les 2 polarités de décharges dans un enregistrement.

Analyse de la périodicité des décharges : Dans la figure 3.26, le graphique du haut représente le coefficient de variation de la fréquence de répétition en fonction de la médiane des fréquences de répétition et de l'intensité moyenne des décharges électrostatiques pour chaque enregistrement. Le graphique du bas présente la dispersion des intensités en fonction de la médiane de la fréquence de répétition de chaque enregistrement. Les marqueurs utilisés sont les mêmes que ceux des décharges positives.

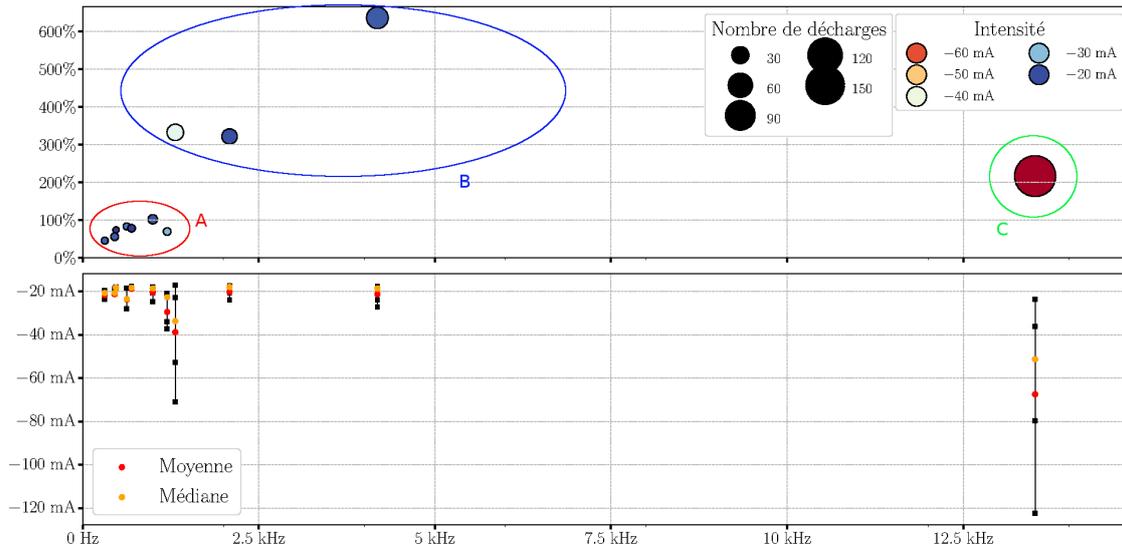


FIGURE 3.26 – En haut : coefficient de variation de la fréquence de répétition et de l’intensité des décharges électrostatiques en fonction des fréquences médianes par enregistrement de décharges négatives. En bas : dispersion des intensités par enregistrement de décharge négatives en fonction des fréquences

Les décharges négatives peuvent également être divisées en trois groupes distincts en fonction de leurs caractéristiques enregistrées. Dans le premier groupe, on observe des décharges périodiques avec moins de 30 occurrences enregistrées et des coefficients de variation inférieurs à 100%. Le deuxième groupe présente des impulsions non périodiques avec des coefficients de variation dépassant 300%. Ces deux groupes se caractérisent par une fréquence de répétition médiane inférieure à 5 kHz et contiennent moins de 60 décharges par enregistrement. Enfin, le troisième groupe est constitué d’un seul enregistrement contenant 130 décharges détectées, avec une fréquence de répétition de plus de 13 kHz et un coefficient de dispersion de 250%.

Dans la thèse de Wang [11], les fréquences de répétition rapportées dans la littérature étaient généralement comprises entre 1 kHz et 100 kHz, ce qui englobe bien les fréquences de répétition mesurées dans cette étude, même si leur régularité demeure limitée.

La tendance en termes d’intensité est inversée par rapport aux décharges positives, avec des valeurs plus élevées pour l’enregistrement à haute fréquence de répétition, autour de -60 mA, tandis que les autres enregistrements ont des intensités variant entre -40 mA et -20 mA, avec une majorité de valeurs basses.

Comme pour les décharges positives, une forte dispersion des intensités est observée pour les enregistrements avec des moyennes d’intensité élevées, tandis que la dispersion est faible pour les enregistrements ayant des intensités moyennes plus faibles. L’enregistrement à haute fréquence présente une dispersion particulièrement élevée.

Cet enregistrement spécifique correspond à celui réalisé le 11 mai 2021 à 1h56. Il est illustré sur la figure 3.27, où l’intensité d’activité est très élevée au moment de l’apparition de cet événement, suivie d’une diminution rapide de l’activité. Pendant cette période d’activité intense, de nombreuses décharges avec des intensités élevées se produisent avant que l’activité ne diminue.

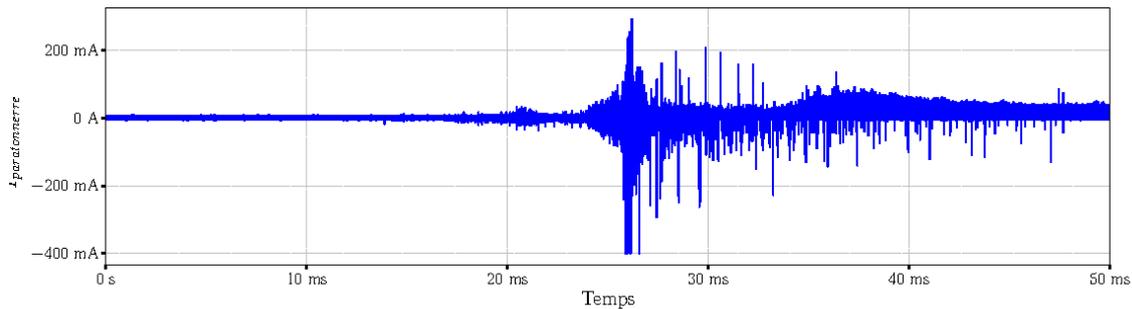


FIGURE 3.27 – Enregistrement de la mesure de courant sur le paratonnerre du 11 mai 2021 à 1h56

Finalement, cet enregistrement peut être divisé en deux parties distinctes. À partir de 35 ms, une diminution du nombre de décharges négatives est observée ainsi que l'apparition d'un peigne d'impulsions positives. Ces impulsions positives présentent une certaine régularité en termes d'intensités. Cet événement met en évidence la complexité des phénomènes qui se produisent lors de ce type de décharges. Il est difficile de l'expliquer en raison du grand nombre de phénomènes différents qui se produisent de manière soudaine.

Conclusion Pour étudier les décharges corona, diverses analyses ont été réalisées. Celles-ci incluent une analyse temporelle des enregistrements, une analyse statistique des caractéristiques des décharges, une évaluation du champ électrostatique ambiant, ainsi qu'une étude de la périodicité des décharges sur le pylône étudié.

3.2.2.4 Analyse comparative des décharges de polarité positive et négative

Les tableaux 3.1 et 3.3 montrent que l'ensemble des décharges mesurées présente des comportements assez similaires en fonction de leur polarité. Certaines décharges ont des valeurs extrêmes qui influencent les moyennes des caractéristiques. Il est également important de noter que les champs électrostatiques mesurés sont positifs et négatifs, indépendamment de la polarité des décharges. Étant donné que les décharges de polarités opposées se produisent simultanément dans les mêmes enregistrements, il est difficile de comparer directement les valeurs du champ électrostatique entre les polarités.

Après avoir analysé les décharges des deux polarités, les caractéristiques médianes sont résumées dans le tableau 3.5.

Polarité	Positive	Négative
Nombre de décharges	3939	321
Intensité maximale médiane (mA)	24.7	-31.0
Temps de montée médian (ns)	22.8	31.4
Temps de descente médian (ns)	145	197
Quantité de charge médiane (nC)	2.86	-5.80

TABLEAU 3.5 – Caractéristiques médianes des décharges corona positives et négatives mesurées durant la campagne 2021

Une première observation est que le nombre de décharges positives enregistrées lors

de la campagne de mesure de 2021 est beaucoup plus élevé que le nombre de décharges négatives. Un total de 3939 décharges positives ont été enregistrées, tandis que seulement 321 décharges négatives ont été détectées.

Ensuite, une différence notable entre les deux polarités est observée au niveau de l'intensité maximale médiane. Les décharges positives ont une intensité maximale médiane de 24.7 mA, tandis que les décharges négatives ont une intensité maximale médiane de -31 mA.

En ce qui concerne les temps de montée et de descente, les décharges négatives ont un temps de montée médian de 31.4 ns, qui est plus long que le temps de montée médian des décharges positives de 24.7 ns. En revanche, les décharges négatives ont un temps de descente médian de 197 ns, qui est plus court que le temps de descente médian des décharges positives de 145 ns.

Les différences entre les polarités se manifestent également dans la quantité de charge médiane transportée par les décharges. Les décharges positives ont une quantité de charge médiane de 2.86 nC, tandis que les décharges négatives ont une quantité de charge médiane de -5.8 nC. Cette différence peut être corrélée aux temps de montée et de descente ainsi qu'à l'intensité maximale, où les décharges positives ont des temps de montée et de descente plus courts et une intensité maximale médiane plus faible que les décharges négatives.

3.2.2.5 Conclusion

Après avoir effectué cette étude statistique, il est intéressant d'analyser le comportement des autres voies lors de l'apparition de ces décharges. Dans la sous section suivante, les résultats typiques, comprenant les décharges des deux polarités, sont présentés.

3.2.3 Analyse des autres voies de mesures lors d'apparition de décharges corona

Dans tous les enregistrements comportant des décharges positives et/ou des décharges négatives, une activité est observable sur l'antenne. Ces enregistrements peuvent être classés en trois catégories :

1. Pas d'activité à la base du pylône : Dans cette catégorie, aucun signe d'activité n'est détecté à la base du pylône. Cela suggère que les décharges enregistrées sont principalement dues à des phénomènes locaux ou d'autres sources non liées à une activité électrique intense. Un exemple d'enregistrement représentatif de cette catégorie est celui du 26 juin 2021 à 22h03.
2. Présence d'activité à la base, probablement d'origine foudre : Dans cette catégorie, une activité est observée à la base du pylône, et cette activité est plus intense. Cela suggère la présence d'un phénomène de type foudre à proximité de la zone de mesure. Un enregistrement représentatif de cette catégorie est celui du 4 juin 2021 à 13h13.
3. Enregistrement exclusivement de décharges négatives : Cette catégorie comprend un unique enregistrement où seules des décharges négatives ont été détectées. Un exemple d'enregistrement représentatif de cette catégorie est celui du 24 juin 2022 à 7h05.

Ces trois exemples d'enregistrements sont analysés individuellement dans cette section.

3.2.3.1 Analyse d'un événement sans activité à la base du pylône

Pour la première catégorie d'enregistrement, les graphiques enregistrés par le Picoscope 6402D, représentés sur la figure 3.28 sont analysés. Dans ce cas, la mesure de courant à la base ne présente aucune activité.

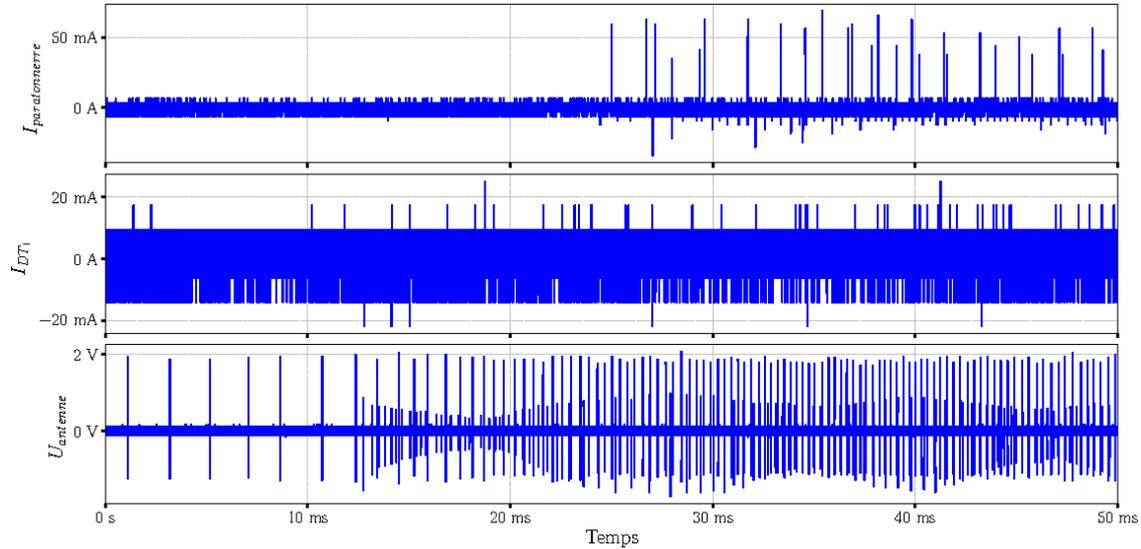


FIGURE 3.28 – Enregistrement d'une acquisition du 26 juin 2021 à 22h03

Les graphes présentent un peigne de 28 impulsions de courant sur le paratonnerre, commençant à partir de 25 ms, avec des décharges positives atteignant 60 mA. Des impulsions de courant négatif ont également été observées, avec une valeur maximale d'environ -30 mA. La mesure de tension sur l'antenne révèle une activité permanente pendant l'enregistrement, avec une intensification à partir de 12 ms. Le peigne d'impulsions de l'antenne montre des impulsions bipolaires variant de -1 V à $+2$ V.

Dans la période de temps de 0 à 25 ms, l'absence de décharges corona visibles sur le paratonnerre est remarquée, tandis qu'un peigne d'impulsions est détecté sur l'antenne. Le comportement bipolaire des impulsions sur l'antenne est observé dans le zoom présenté sur la figure 3.29.

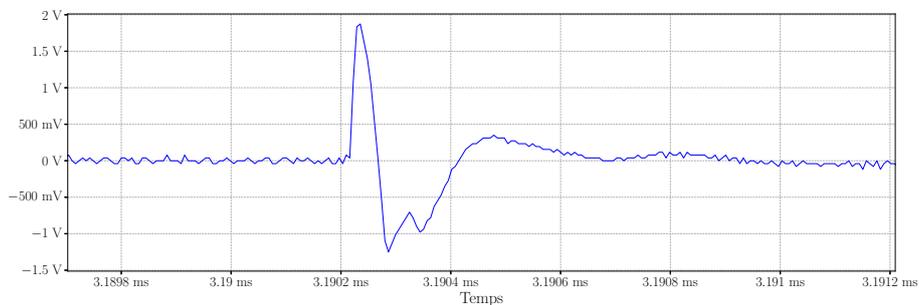


FIGURE 3.29 – Impulsion mesurée par l'antenne le 26 juin 2021 à 22h03

Le graphique présenté illustre un premier front positif suivi d'un changement de polarité, suggérant un comportement dérivatif caractéristique d'une loi biexponentielle. Le

deuxième changement de polarité peut indiquer un comportement oscillant sur une période plus longue. Il se peut donc que ces décharges se produisent directement sur l'antenne.

Il convient de noter que l'effet de pointe d'un pylône peut jouer un rôle dans la modification des conditions du champ électrostatique, ce qui peut favoriser le déclenchement de décharges en haut du pylône avant qu'elles se produisent sur l'antenne. D'autres facteurs, tels que les caractéristiques électriques du sol, et la présence d'autres objets conducteurs, influent également sur la distribution du champ électrostatique et la distribution de l'activité électrique.

Les enregistrements de cette catégorie ont tous été effectués pendant des périodes caractérisées par des conditions orageuses. Cette observation est confirmée par la figure 3.30, qui représente le champ électrostatique mesuré dans une plage horaire d'environ ± 1 heure autour de l'événement présenté sur la figure 3.28. L'événement orageux en question dure 2 heures. Cette fois-ci, les cercles de couleur rouge indiquent les autres enregistrements de la catégorie 1 qui se sont produits. Au cours de la campagne de mesures de 2021, seuls deux orages ont été enregistrés pendant lesquels des mesures de catégorie 1 ont été obtenues.

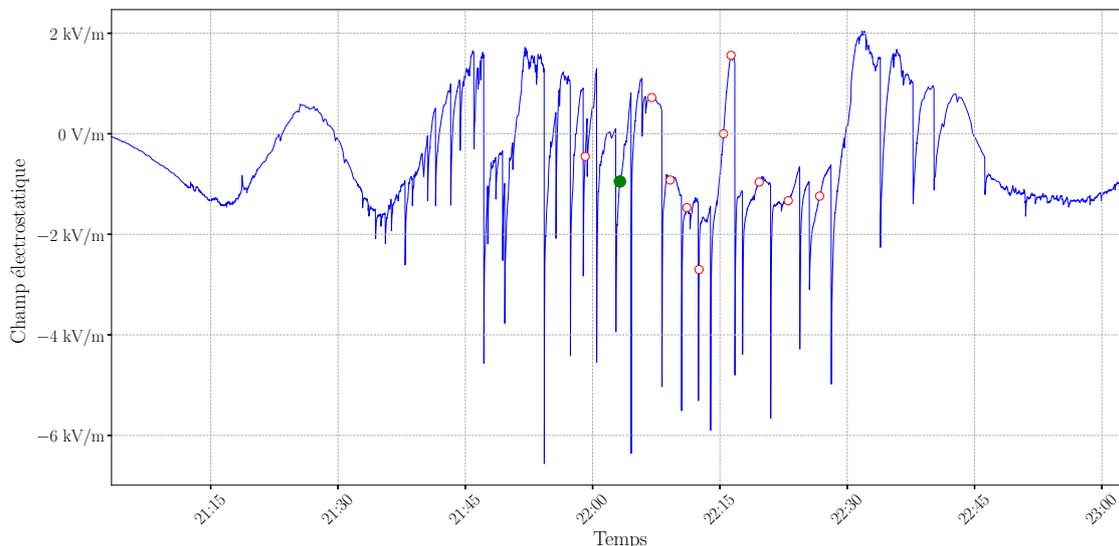


FIGURE 3.30 – Graphique du champ électrostatique mesuré le 26 juin 2021 entre 21h03 et 23h03

Cette mesure de champ électrostatique montre plus de 30 éclairs indiquant une intense activité orageuse. Les amplitudes des variations du champ électrostatique oscillent entre 3 kV et 5 kV, avec certaines variations plus intenses atteignant 7 kV. Ces mesures mettent en évidence l'importance de l'activité électrique pendant la période d'enregistrement, avec les enregistrements de catégorie 1 situés au cœur de l'orage et entourés d'éclairs.

Dans cette section, un événement caractérisé par un peigne d'impulsions à la fois au niveau de l'antenne et du paratonnerre a été présenté. Ce type d'événement met en évidence les limites de la mesure du courant à la base, qui peut ne pas être suffisamment sensible ou traduire des pertes de courant sur le pylône, ce qui empêche la détection de ce type de phénomène.

3.2.3.2 Analyse d'un événement avec activité à la base du pylône

La figure 3.31 montre un enregistrement effectué le 4 juin 2021 à 13h13, qui présente cette fois une activité à la base du pylône. Sur la mesure de courant du paratonnerre, il y a un peigne d'impulsions, avec une amplitude relativement faible, qui persiste tout au long de l'enregistrement. En moyenne, les impulsions ont une amplitude de 25 mA, mais on peut observer des valeurs allant jusqu'à 220 mA au milieu de l'enregistrement.

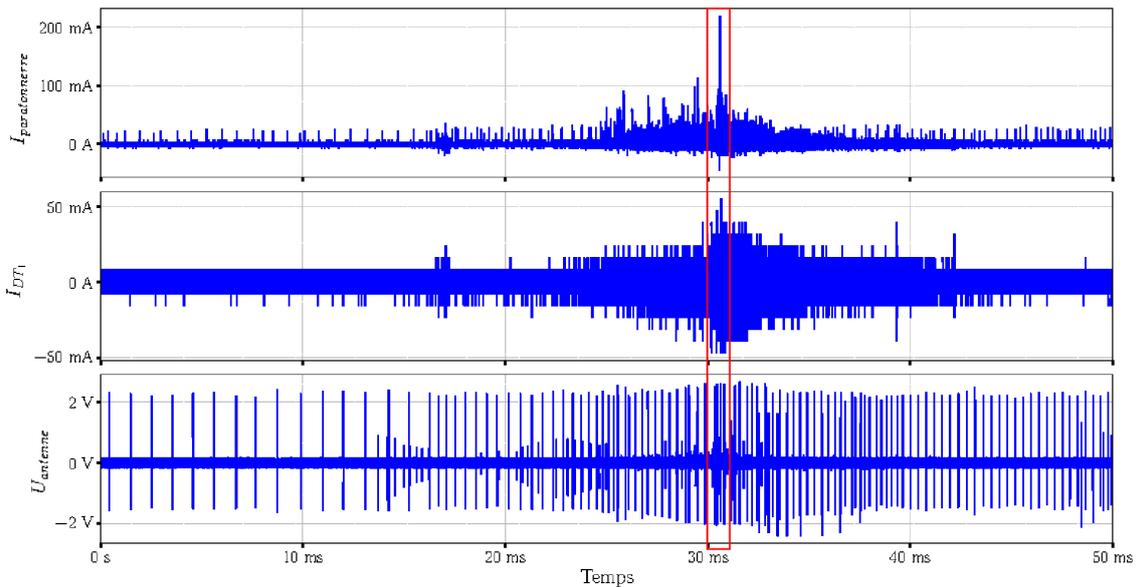


FIGURE 3.31 – Enregistrement d'une acquisition du 4 juin 2021

La sonde de courant à la base révèle une activité entre 27 ms et 37 ms, avec des valeurs atteignant ± 45 mA. L'antenne présente une activité régulière et constante en amplitude qui s'accélère à deux reprises, d'abord vers 18 ms, puis vers 25 ms. Cette augmentation de la fréquence de répétition d'impulsion est synchronisée avec l'intensification de l'activité sur le paratonnerre.

La figure 3.32 présente un zoom entre 30 ms et 31 ms de l'enregistrement qui est délimité par le rectangle rouge sur la figure précédente. Cette fenêtre temporelle montre l'activité la plus importante du courant mesuré.

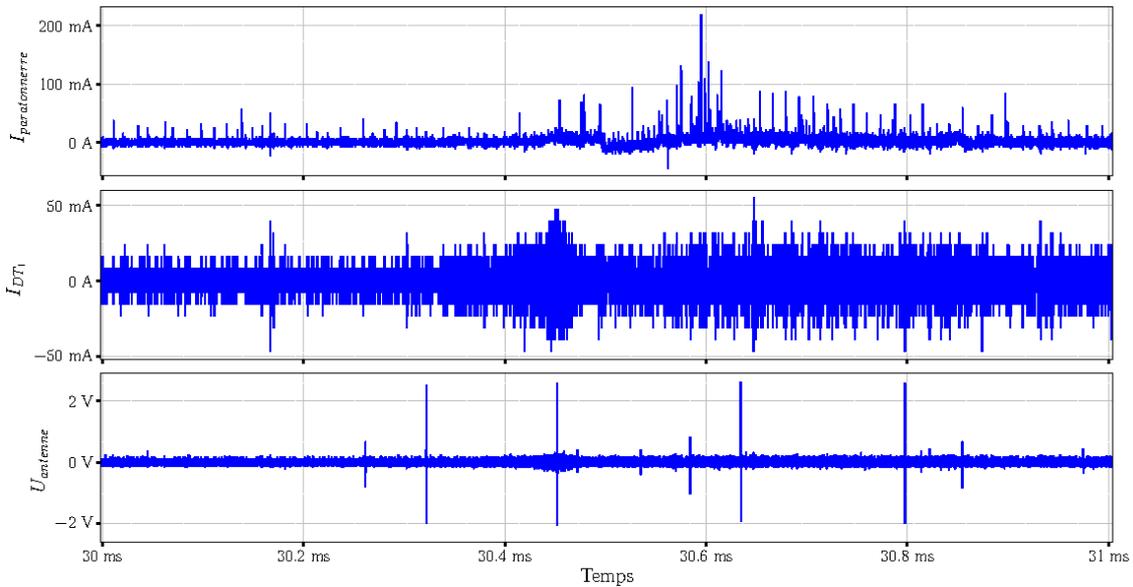


FIGURE 3.32 – Zoom de l’enregistrement du 4 juin 2021 à 13h08

Sur ce graphique, une activité bipolaire pouvant atteindre jusqu’à 40 mA est observée sur la base du pylône. De plus, aux instants de 30.4 ms et 30.8 ms, une augmentation de l’intensité du courant est observée sur le paratonnerre, en corrélation avec l’activité sur la base du pylône.

En observant le champ électrostatique à ± 1 heure de l’événement sur le graphe de la figure 3.33, une variation brusque du champ électrostatique de +1 kV à -7.5 kV est observée. Cette variation est caractéristique d’un coup de foudre, comme mentionné précédemment dans la section 2.2.3.

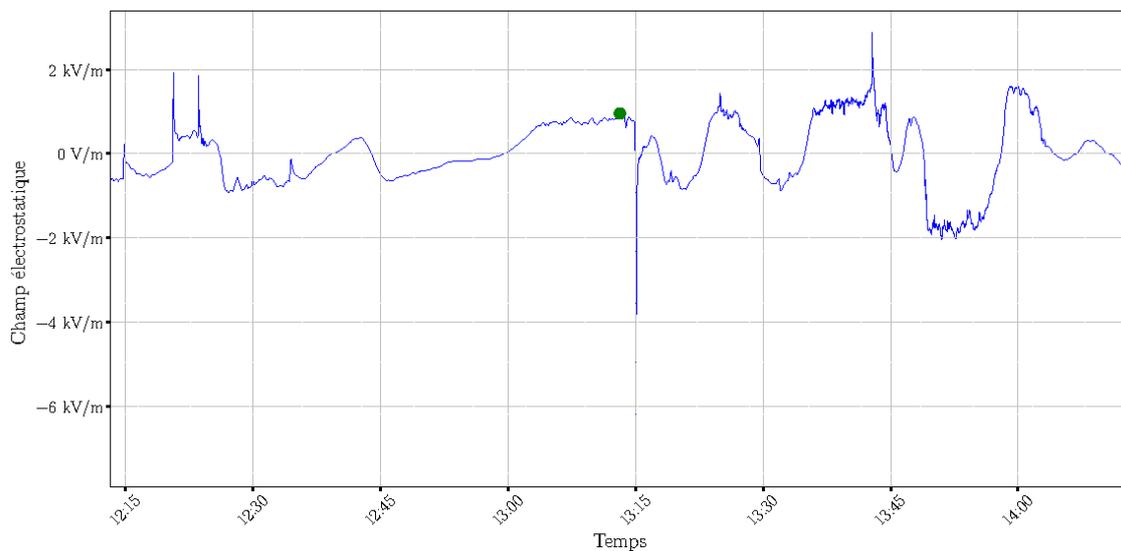


FIGURE 3.33 – Graphique du champ électrostatique mesuré 4 juin 2021 entre 12h13 et 14h13

Contrairement à la mesure de champ électrostatique de la figure 3.30, une activité électrique moins intense est observée lors de cet événement.

Les courants mesurés proviennent à la fois de phénomènes locaux, tels que les décharges visibles dans la figure 3.32, et de courants provenant de phénomènes externes ou du sol. Ce type de phénomène électrostatique semble être de courte durée, ne durant que quelques millisecondes.

La figure 3.34 présente deux graphiques où les décharges positives d'un événement de catégorie 2 enregistré le 4 juin 2021 sont superposées. Dans le graphique du bas, il s'agit de la superposition des tensions de sortie de l'antenne.

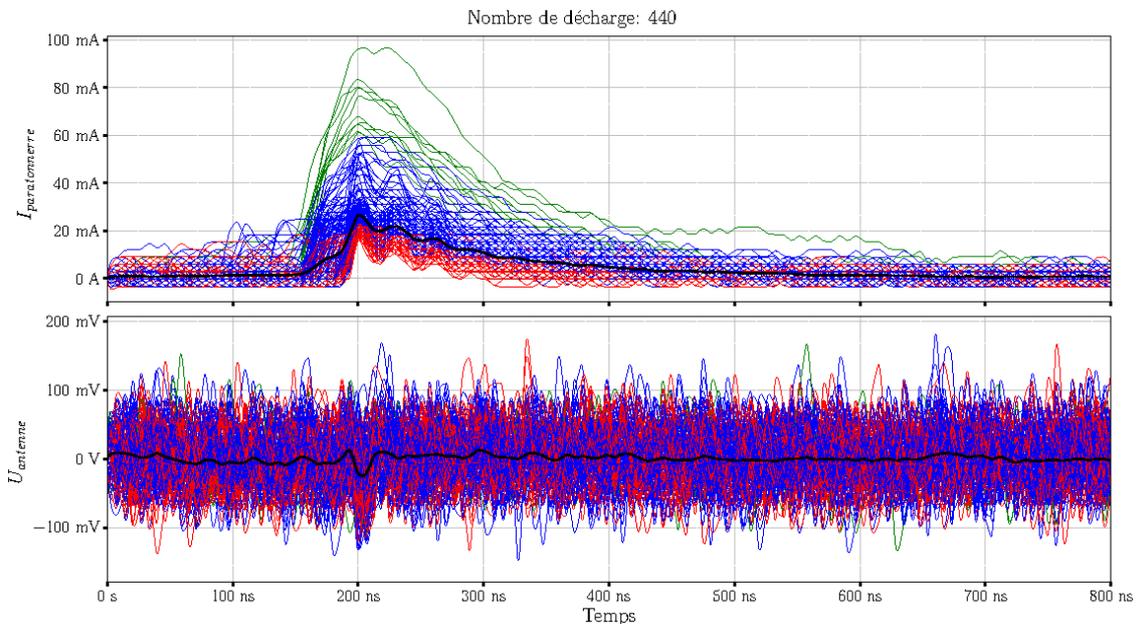


FIGURE 3.34 – Superposition des mesures de l'événement du 4 juin 2021. En haut : les impulsions de courant positif. En bas : les tensions de sortie de l'antenne.

Ces graphiques révèlent qu'il n'y a pas de lien évident entre les impulsions détectées sur l'antenne et celles observées sur le paratonnerre. Cependant, une légère augmentation de la tension, d'environ -150 mV, peut être observée sur la tension de l'antenne vers 200 ns, et cette augmentation semble être corrélée à l'apparition des décharges sur le paratonnerre. Cette augmentation de tension reste relativement faible par rapport aux impulsions max détectées par l'antenne, qui atteignent jusqu'à $+2$ V.

Dans cette partie, un exemple d'enregistrement montrant une activité à la fois au niveau de la base et de l'antenne a été examiné. Cela suggère la combinaison d'événements locaux tels que les décharges corona, ainsi que d'événements de proximité pouvant être des éclairs ou d'autres phénomènes électrostatique liés à un orage. Ces observations mettent en évidence la variété des sources potentielles d'interférences dans les enregistrements de décharges électrostatiques.

3.2.3.3 Analyse d'un événement contenant uniquement des décharges négatives

Enfin, une dernière catégorie d'événement a été enregistrée lors de ces campagnes contenant des décharges négatives seulement. Cette mesure a été enregistrée à l'aide des deux numériseurs le 24 juin 2022. L'enregistrement du Picoscope 6402D est affiché sur la figure 3.36 et le 5244D sur la figure 3.35.

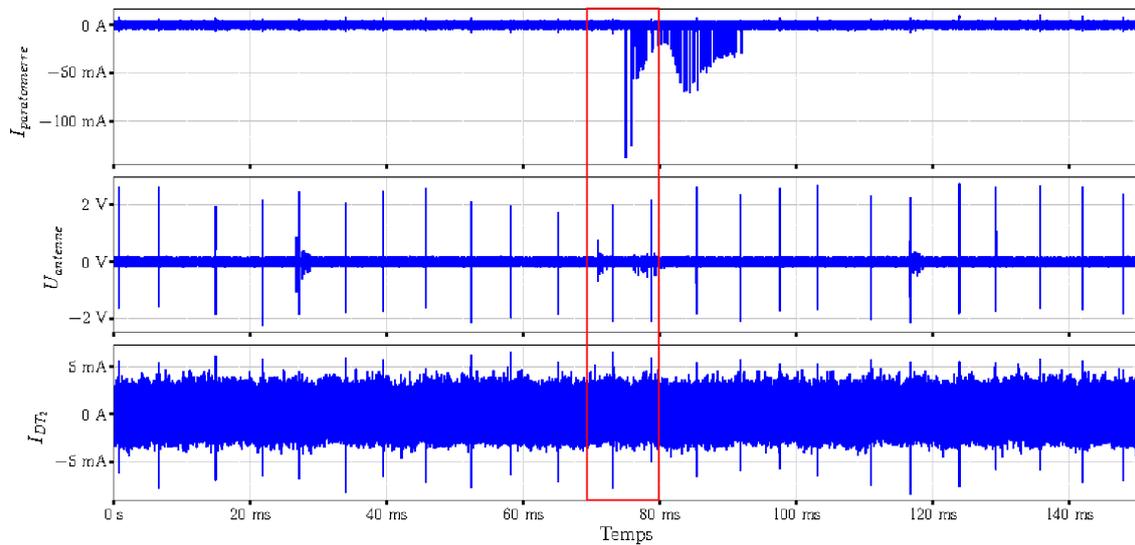


FIGURE 3.35 – Enregistrement d'une acquisition du 24 juin 2022 à 7h05 avec le Picoscope 5244D

Sur le paratonnerre, l'activité électrique contenant les décharges négatives est observée entre 70 et 90 ms. En ce qui concerne l'antenne, on observe un motif régulier de décharges sous forme d'un peigne d'impulsions. De plus, trois autres événements de faible intensité sont observés aux environs de 30 ms, 70 ms et 120 ms. Il est également intéressant de noter que toutes les impulsions de l'antenne sont détectées par la mesure à la base, DT₂.

Le zoom présenté sur la figure 3.36 montre une fenêtre de 10 ms correspondant au carré rouge dessiné sur la figure 3.35.

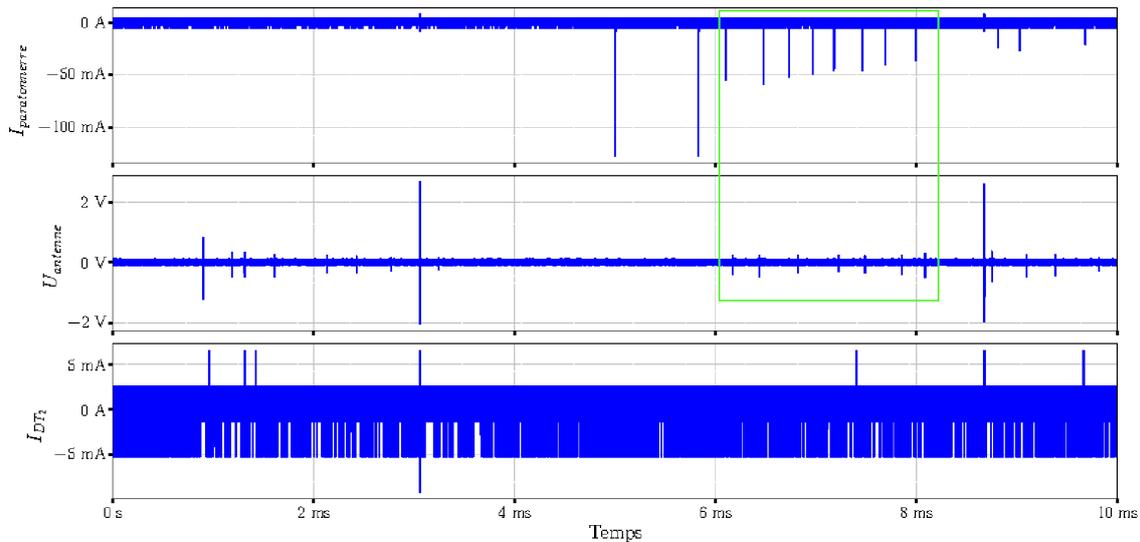


FIGURE 3.36 – Enregistrement d’une acquisition du 24 juin 2022 à 7h05 avec le Picoscope 6402D

Une corrélation directe entre les impulsions de courant enregistrées sur le paratonnerre et celles sur l’antenne est observée. Cette corrélation est valable uniquement pour les impulsions entourées en vert sur la figure.

Ces deux enregistrements de tailles différentes mettent en évidence une des difficultés à étudier ces événements. L’enregistrement de 10 ms permet de regarder en détails cet événement grâce à sa période d’échantillonnage de 1.2 ns, mais ne permet pas de couvrir entièrement ce qui se produit sur le paratonnerre. En revanche, l’enregistrement de 150 ms montre que ce type d’événement est bref et de courte durée. Cela souligne l’importance de réaliser des enregistrements de durée suffisamment longue pour capturer et analyser ces événements de manière adéquate.

Il est important de noter que ces corrélations ont été observées une seule fois parmi toutes les mesures réalisées et ne permettent pas de conclure sur l’origine de cet événement.

3.2.3.4 Conclusion

Cette sous-section a présenté différents types d’événements qui se sont produits lorsqu’il y avait des décharges biexponentielles sur le paratonnerre. Certains événements étaient locaux et n’interagissaient pas directement avec l’antenne, tandis que d’autres se sont produits en présence d’événements électrostatiques plus intenses, tels que des éclairs. Enfin, un dernier type d’événement enregistré avec les deux picoscopes a permis de montrer des événements locaux qui se sont couplés entre le paratonnerre et l’antenne.

3.2.4 Conclusion

Dans cette section, une analyse temporelle des décharges de type bi-exponentiel a été réalisée. Tout d’abord, une analyse élémentaire a été effectuée pour constater la forme bi-exponentielle de ces décharges. Ensuite, les caractéristiques et le comportement de ces décharges ont été étudiés statistiquement en se basant sur un échantillon de 3939 dé-

charges positives et 321 décharges négatives. Différents paramètres ont été mesurés, tels que la durée totale de la décharge, la durée de montée et la durée de décroissance, ainsi que l'amplitude maximale. Enfin, une étude de corrélation a été réalisée pour examiner les phénomènes électrostatiques apparaissant sur le pylône lors de l'occurrence de ces décharges.

D'autres impulsions présentant des caractéristiques de résonance ont été fréquemment observées et peuvent être associées à des décharges corona. Une étude détaillée de ces impulsions est présentée dans la section suivante.

3.3 Analyse d'impulsions présentant une résonance

Dans cette section, les décharges présentant des caractéristiques de résonance sont étudiées. Ces enregistrements constituent les observations les plus fréquentes au niveau du paratonnerre avec un total de 317 enregistrements. Pour analyser ce type de décharges, la méthodologie utilisée dans la partie 3.2.1 est appliquée. Une analyse d'une décharge élémentaire est réalisée, suivie d'une analyse statistique pour déterminer les caractéristiques spécifiques de ces décharges. En outre, une analyse spectrale est effectuée en comparant les signatures avec résonance avec les signatures bi-exponentielles, permettant d'identifier les différences dans les spectres de fréquence

3.3.1 Analyse d'une décharge élémentaire

Dans cette section, l'analyse d'une décharge élémentaire présentant une résonance est réalisée. À cet effet, la figure 3.37, qui illustre le courant mesuré au niveau du paratonnerre en fonction du temps, est analysée. Cette mesure a été enregistrée le 29 juillet 2022 à 8h22 à l'aide du oscilloscope 6402D, avec une période d'échantillonnage de 1.2 ns.

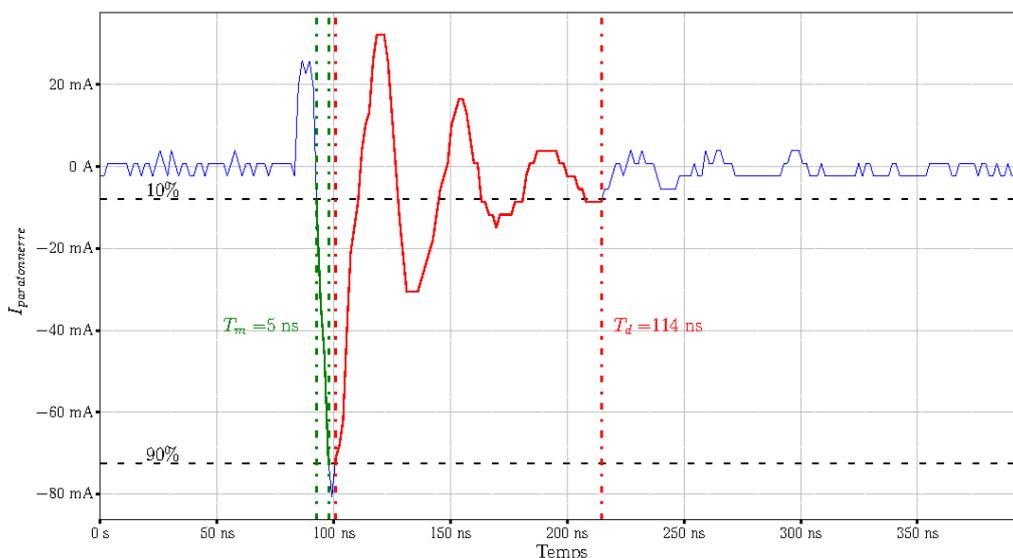


FIGURE 3.37 – Courant d'une impulsion négative mesurée par la sonde située sur le paratonnerre

La décharge se caractérise par un premier front positif suivi d'une descente jusqu'à

atteindre une intensité négative de -80.5 mA. Le temps de descente de la décharge est de 5 ns. La durée d'une période complète de l'oscillation est estimée à environ $30-40$ ns. Bien que les oscillations soient visibles jusqu'à 250 ns, le temps de descente est de 114 ns d'après le critère des 10% .

Il convient de noter que malgré le premier front positif, la décharge est qualifiée de négative en raison de son intensité négative et de sa quantité de charge de -1.13 nC. Dans la section précédente, les décharges présentaient des quantités de charge médianes de 2.86 nC et -5.80 nC. Cela indique que cette décharge particulière a une quantité de charge inférieure en comparaison. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la résonance entraîne des changements de signe du courant, ce qui signifie qu'il y a un transfert de charges dans les deux sens.

La figure 3.38 présente une décharge négative d'intensité similaire sans résonance enregistrée le 24 juin 2022 à 7h05 au niveau du paratonnerre. Les réglages utilisés pour cet enregistrement sont les mêmes que pour la décharge précédente.

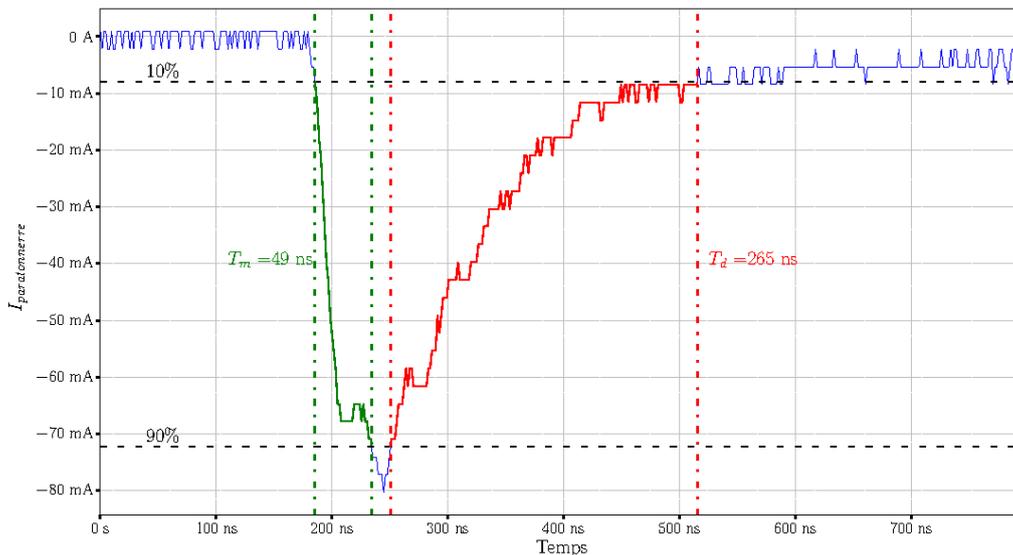


FIGURE 3.38 – Courant d'une impulsion négative mesurée par la sonde située sur le paratonnerre

La décharge avec une intensité de -80.2 mA présente une quantité de charge de -12.6 nC, ce qui est 10 fois plus élevé que la quantité de charge observée pour une décharge avec résonance. Cela est cohérent, car dans une décharge sans résonance, le courant conserve le même signe tout au long de l'événement, ce qui permet l'accumulation d'une quantité de charge de même polarité plus importante. De même, le temps de montée de cette décharge est également 10 fois plus long, s'élevant à 49 ns.

L'observation de la décharge élémentaire avec résonance a révélé des comportements distincts par rapport à la décharge présentant une signature bi-exponentielle sans résonance. Afin de mieux comprendre ces comportements, une analyse statistique approfondie est réalisée dans la section suivante.

3.3.2 Analyse statistique des caractéristiques des décharges mesurées

Dans cette section, on réalise une analyse statistique de ces décharges. On commence par regarder la figure 3.39 qui présente les 4 histogrammes des différentes caractéristiques des décharges. Ces histogrammes ont été générés à partir de l'analyse de 19 366 décharges réparties sur 317 enregistrements. Il est intéressant de noter que le nombre de décharges négatives avec résonance est cinq fois plus élevé que celui des décharges positives. Il est important de noter que toutes les décharges avec de la résonance sont négatives. Cette observation suggère que les décharges négatives avec résonance sont des événements plus fréquents et significatifs sur le pylône étudié.

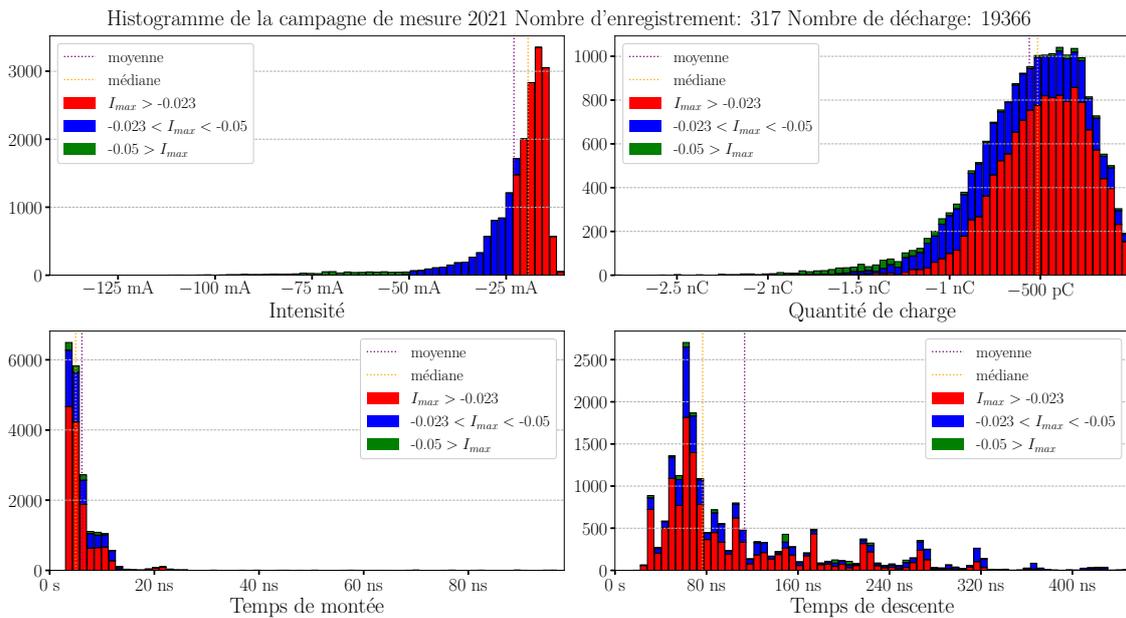


FIGURE 3.39 – Histogrammes des caractéristiques des décharges négatives avec résonance mesurées au niveau du paratonnerre pendant la campagne de mesure 2021

Les caractéristiques d'intensités maximales et de temps de montée montrent une distribution similaire avec de nombreuses décharges ayant les mêmes valeurs pour ces paramètres. Cela suggère une certaine régularité dans ces aspects des décharges corona négatives avec résonance.

En ce qui concerne la quantité de charge, la distribution s'étend d'une centaine de pC à quelques nC, avec une concentration plus importante autour de 500 pC. Cela indique que la majorité des décharges corona négatives avec résonance transportent une quantité de charge similaire. Il est intéressant de noter que les décharges d'intensité situées entre -23 mA et -50 mA ont les mêmes caractéristiques que les décharges d'intensité inférieure.

Pour évaluer les temps de descente, une méthode consistant à récupérer l'indice correspondant au moment où la valeur absolue du courant reste inférieure à 10% de l'amplitude maximale pendant une durée de 50 ns a été utilisée. L'historgramme montre une grande variété de ces temps indépendamment de leur intensité. Cela suggère plusieurs groupes de décharges. Plusieurs exemples de décharges sont illustrés plus tard dans la section.

Le tableau 3.6 présente les caractéristiques des décharges corona négatives avec ré-

sonance mesurées durant la campagne de 2021. Ce tableau donne un aperçu des valeurs extrêmes, ainsi que des valeurs moyennes et médianes, pour chaque caractéristique étudiée.

Caractéristique	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane
Intensité maximale (mA)	-10.0	-142.6	-23.0	-19.4
Temps de montée (ns)	1.6	98.3	6.14	4.96
Temps de descente (ns)	15.7	449.9	113.3	76.6
Quantité de charge (nC)	-0.01	-2.84	-0.561	-0.515

TABLEAU 3.6 – Caractéristiques des 19366 décharges corona négatives avec résonance mesurées durant la campagne 2021

Les décharges corona négatives avec résonance présentent une variation significative de l'intensité maximale, avec des valeurs allant de -10.0 mA à -142.6 mA. Comparées aux décharges biexponentielles sans résonance, les décharges corona négatives avec résonance ont une intensité médiane légèrement inférieure.

En analysant les caractéristiques temporelles des décharges corona négatives avec résonance, on observe que les temps de montée présentent une moyenne de l'ordre de 5 ns, avec une médiane légèrement inférieure. Cette valeur indique une montée très rapide de l'intensité des décharges impliquant la présence de composantes de plus haute fréquence, qui sont à l'origine de la résonance. En revanche, les temps de descente ont une moyenne plus élevée, aux alentours de 113.9 ns, avec une médiane plus faible. Le rapport entre le temps de montée et le temps de descente, qui est supérieur à 15 pour les impulsions avec résonance contre 7 pour les décharges biexponentielles ont un rapport de 7. Cela suggèrent un retour plus lent à une intensité basse après le pic de la décharge avec résonance.

La quantité de charge mesurée pour les décharges corona négatives avec résonance est inférieure à celle des décharges biexponentielles sans résonance, avec une moyenne d'environ -0.561 nC et une médiane d'environ -0.515 nC. Comme mentionné précédemment, la différence de quantité de charge entre les décharges corona avec résonance et celles sans résonance peut être attribuée en partie aux changements de sens du courant observés. Cependant, il convient également de noter que les mécanismes de déclenchement des décharges peuvent varier en fonction de leur polarité, comme décrit dans la partie 1.3.3. Ces différences de mécanismes peuvent également contribuer à expliquer les variations de quantité de charge mesurées.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Proportion
Champ électrostatique > 0 (kV/m)	0.01	7.49	1.13	0.87	193
Champ électrostatique < 0 (kV/m)	-0.01	-5.9	-1.60	-0.66	61

TABLEAU 3.7 – Valeurs statistiques du champ électrostatiques en fonction de leur polarité

Les mesures des champs électrostatiques ont révélé des valeurs extrêmes de 7.49 kV/m pour les champs électrostatiques positifs et de -5.9 kV/m pour les champs électrostatiques négatifs. Ces valeurs élevées suggèrent que ce type d'événements de décharges est susceptible de se produire en présence de champs électrostatiques intenses. Une observation surprenante est que malgré la présence de champs électrostatiques de polarités opposées, les décharges détectées sont toutes de polarité négative.

Différentes allures de décharges avec résonances ont été enregistrés, ce qui a été observé notamment sur l'histogramme des temps de descente. Trois enregistrements sont présentés

pour illustrer ces diverses formes. Les figures comprennent les mesures de courant au niveau du paratonnerre dans la partie supérieure, ainsi que la superposition des décharges dans la partie inférieure.

Dans la première figure 3.40, enregistrée le 17 juin 2021 à 16h25, on peut observer un peigne d'impulsions avec 88 décharges atteignant des valeurs proches de -40 mA.

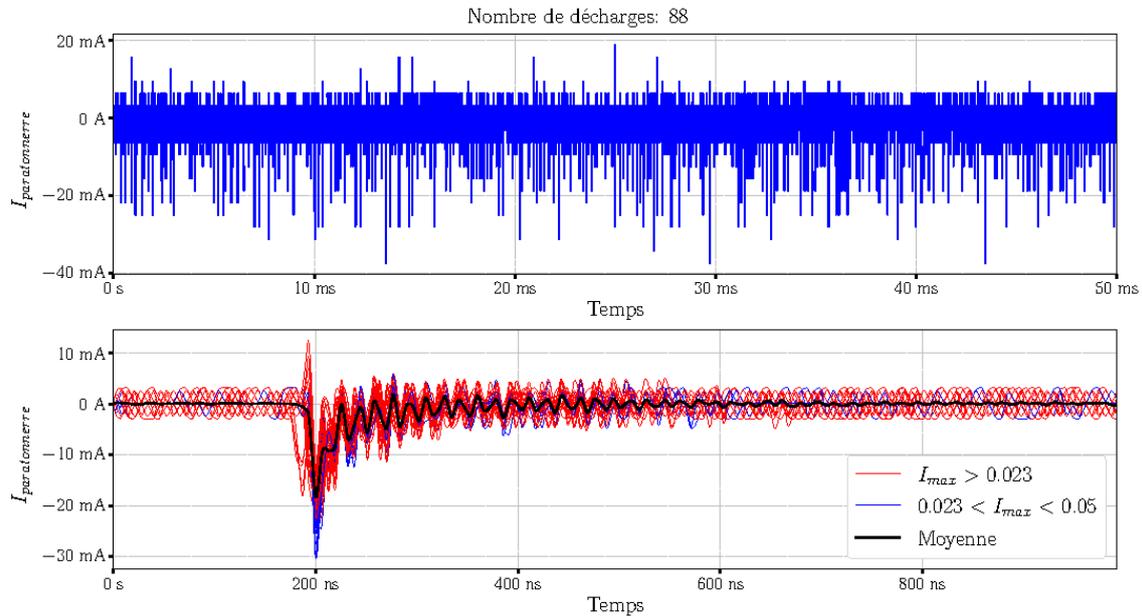


FIGURE 3.40 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 17 juin 2021 à 16h25. En bas : superposition des impulsions de courant positives de l'enregistrement.

Lors de la superposition des décharges, certaines d'entre elles présentent un premier front positif, tandis que d'autres ne présentent pas cette caractéristique.

De plus, une oscillation est perceptible lors de la descente de la décharge, mais sans changement de signe. Cette observation indique que la résonance associée à ces décharges n'est pas très prononcée.

La deuxième figure 3.41, enregistrée le 9 mai 2021 à 20h20, présente un peigne d'impulsions avec 120 impulsions alternant entre des valeurs positives et négatives. Les impulsions oscillent dans une plage allant jusqu'à environ $+50$ mA et -70 mA.

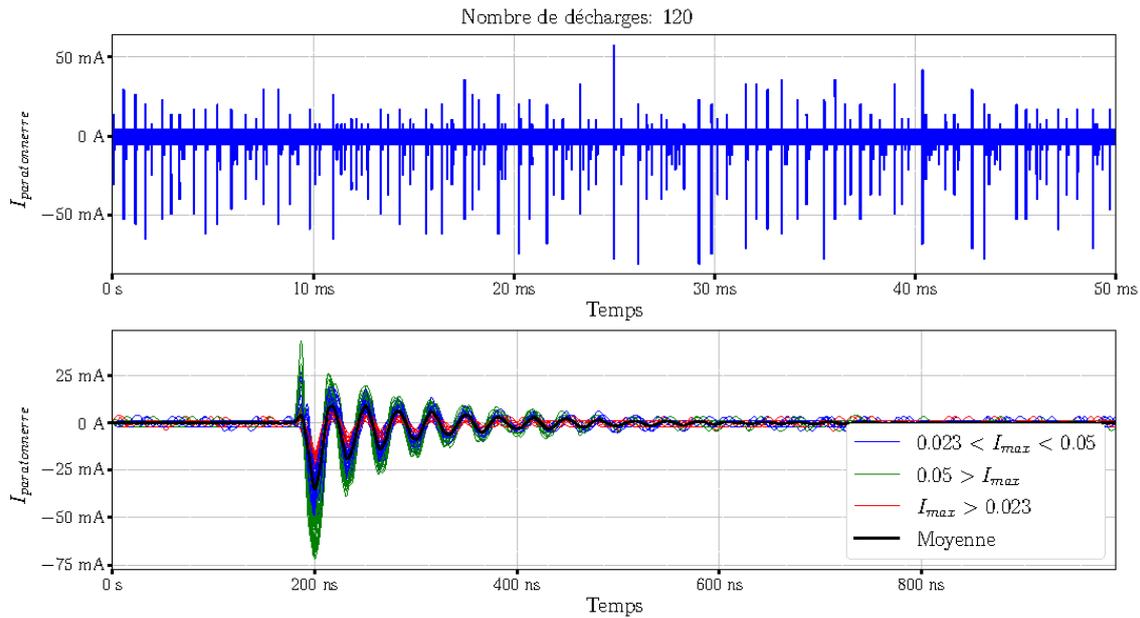


FIGURE 3.41 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 9 mai 2021 à 20h20. En bas : superposition des impulsions de courant positives de l'enregistrement.

Lorsque les impulsions sont superposées, un front positif est visible pour les décharges. Ce front positif peut être dû à des facteurs tels que l'accumulation de charge ou des phénomènes de résonance dans le système. De plus, l'oscillation de l'amplitude présente dans cette superposition est plus marquée et a une période plus longue par rapport à la première figure.

Il est logique de constater que les décharges présentant une résonance plus prononcée sont celles avec un temps de montée très court, ce qui permet une excitation plus importante du pylône. En effet, un temps de montée plus court indique une augmentation rapide du courant et de l'énergie transférée lors de la décharge. Cette concentration d'énergie peut potentiellement exciter certaines parties du pylône.

La troisième figure 3.42, enregistrée le 7 mai 2021 à 1h58, montre 82 impulsions à nouveau avec des valeurs positives et négatives. La résonance semble plus rapide, similaire au premier type de décharges présenté dans la première figure.

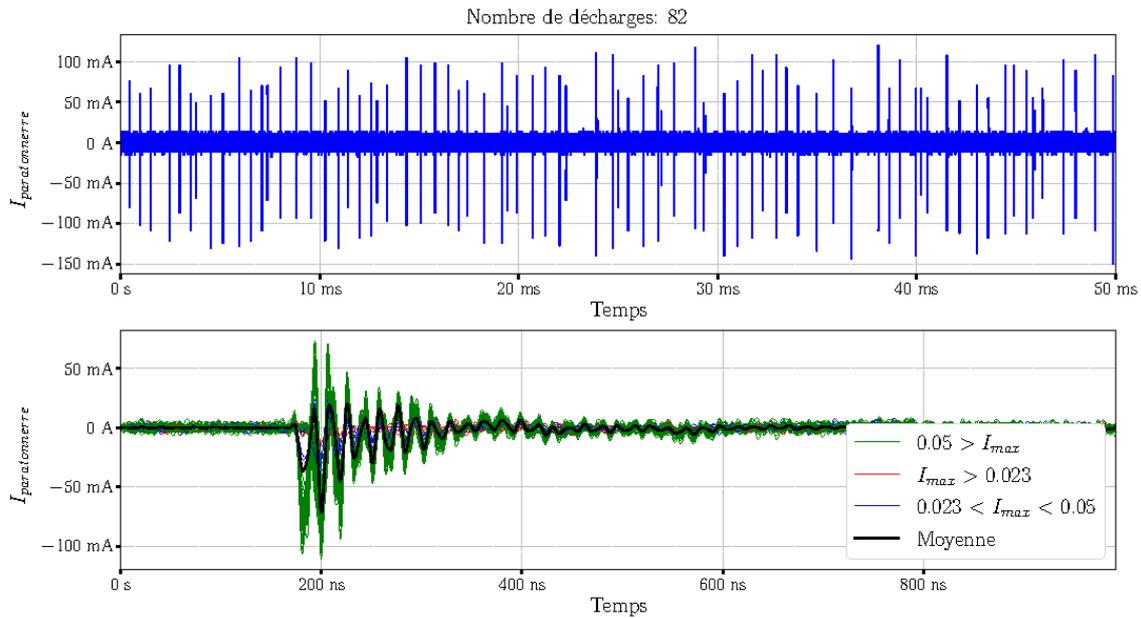
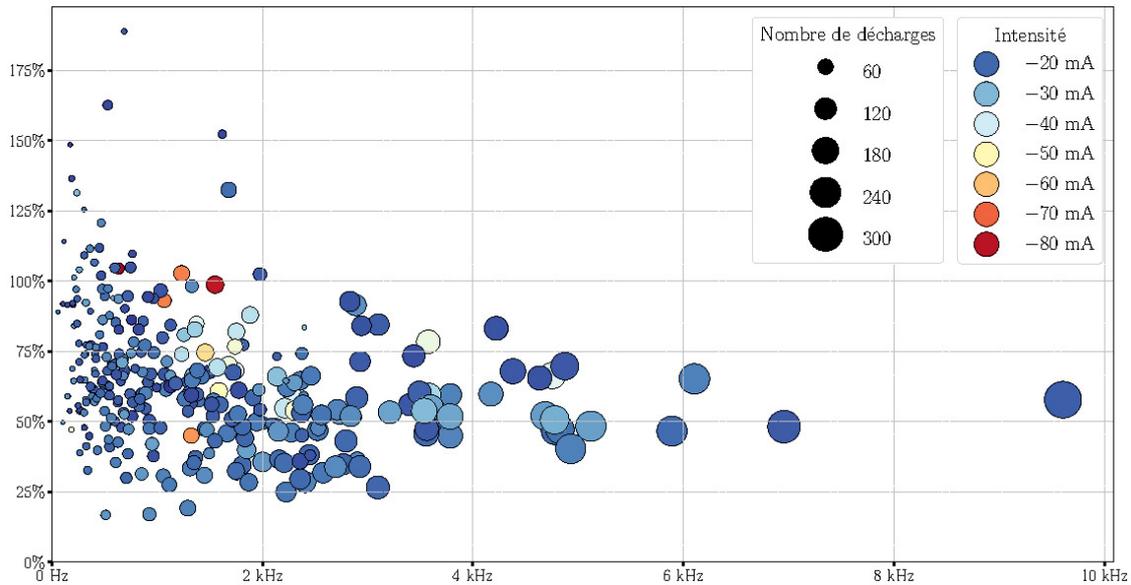


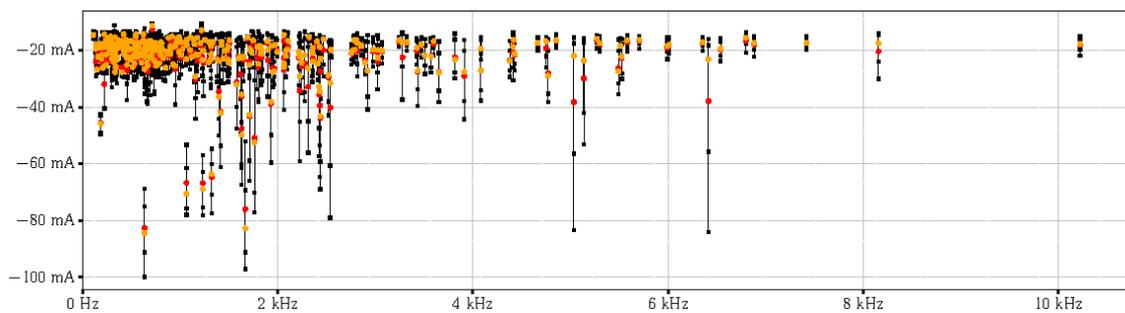
FIGURE 3.42 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 7 mai 2021 à 1h58. En bas : superposition des impulsions de courant positives de l’enregistrement.

Les trois figures présentent des décharges avec des allures distinctes. Néanmoins, une observation commune est que toutes ces décharges présentent des peignes d’impulsions relativement périodiques, avec des intensités qui varient peu d’une décharge à l’autre.

La figure 3.43a présente le coefficient de variation de la fréquence de répétition et de l’intensité des décharges électrostatiques en fonction des fréquences médianes par enregistrement de décharges négatives.



(a) Coefficient de variation de la fréquence de répétition et de l'intensité des décharges électrostatiques en fonction des fréquences médianes par enregistrement de décharges négatives



(b) Dispersion des intensités par enregistrement de décharge négatives en fonction des fréquences

FIGURE 3.43 – Comparaison entre l'intensité des décharges et les tensions appliquées en fonction de la distance inter-électrode

Sur cette figure, il est observable que la plupart des événements présentent une intensité moyenne des décharges située entre -20 mA et -30 mA. De plus, on peut remarquer une périodicité nettement plus élevée que celle des décharges biexponentielles, avec des coefficients de variation variant entre 20 % et 100 %. Il est également intéressant de noter que plus il y a de décharges, plus la fréquence de répétition augmente. Dans ce cas de décharge, il est observé qu'il n'est pas possible de diviser les enregistrements en deux groupes distincts. Au contraire, il existe une continuité entre les phénomènes se produisant à basse fréquence et ceux à haute fréquence. Cela suggère que le comportement des décharges ne présente pas de transition nette entre les deux régimes, mais plutôt une évolution progressive.

Avec ces 317 enregistrements, la moyenne des fréquences de répétition est de 1.94 kHz, la médiane est de 1.27 kHz, le minimum est de 0.148 kHz et le maximum est de 11.9 kHz. Dans la suite de la thèse ces décharges sont désignées comme les décharges négatives, car elles présentent des similitudes théoriques avec les décharges corona négatives de type "pulses de Tichel" [45], avec leur périodicité relativement élevée.

Dans le tableau 3.8, les moyennes des intensités, des temps caractéristiques et de la

fréquence de répétition obtenues avec cette étude statistique sont comparées aux valeurs relevées par la thèse de Wang Mingtian [11].

	Valeur moyenne mesurée	Valeur référence
Intensité maximale (mA)	-23.0	[1,50]
Temps de montée (ns)	6.14	10
Temps de descente (ns)	113.3	70
Fréquence de répétition (kHz)	1.94	[1,100]

TABLEAU 3.8 – Comparaison entre les valeurs mesurées et celle relevées par la thèse de Wang Mingtian

Le tableau comparatif entre les valeurs mesurées et celles relevées par la thèse de Wang Mingtian montre que les valeurs moyennes mesurées se situent dans l'intervalle relevé par Wang pour l'intensité maximale et la fréquence de répétition. Cependant, les temps caractéristiques diffèrent des mesures de laboratoires relevées par Wang. Ce qui pourrait être expliqué par le fait qu'aucune des valeurs issues de sa thèse n'est issue de mesures sur un pylône en environnement extérieur.

3.3.3 Analyse de la corrélation avec l'antenne

Dans cette section, l'étude de la corrélation entre les peignes d'impulsions avec résonance et les autres voies est entreprise. L'observation macroscopique des enregistrements contenant les décharges avec résonance ne permet de voir aucune activité significative sur les autres voies.

Pour évaluer la corrélation avec l'antenne, la superposition des décharges observées sur le paratonnerre est comparée aux tensions mesurées au niveau de l'antenne. Cette analyse est réalisée pour les trois types de décharges observés dans la partie précédente. Les figures 3.44, 3.45 et 3.46 présentent respectivement la superposition des décharges en haut et les tensions mesurées au niveau de l'antenne en bas.

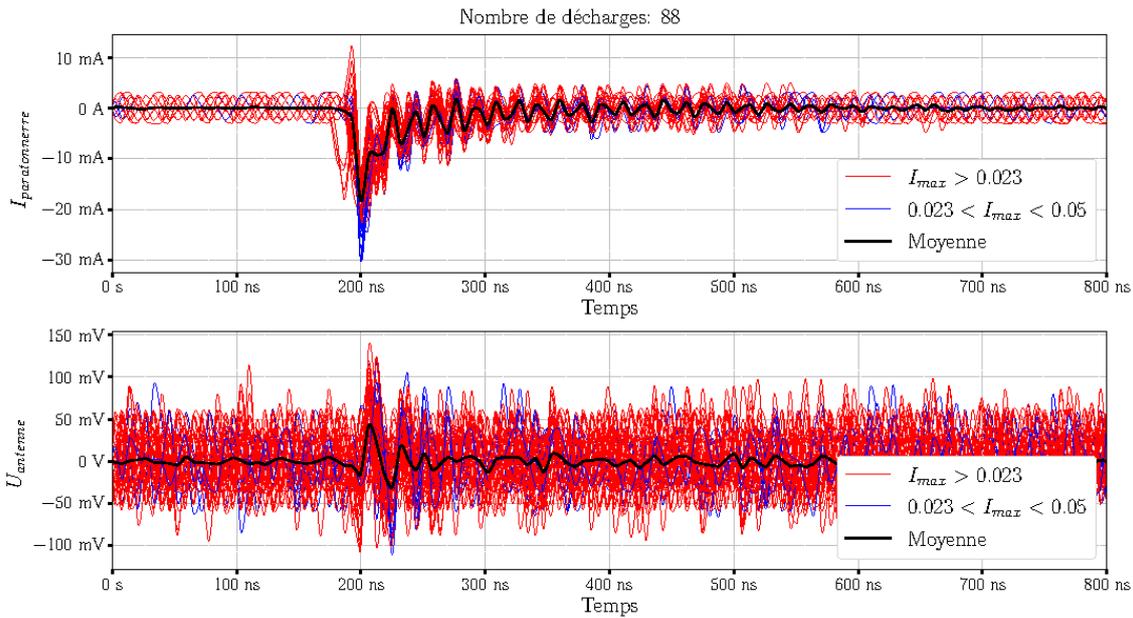


FIGURE 3.44 – En haut : Superposition des impulsions de courant mesuré sur le paratonnerre le 17 juin 2021 à 16h25. En bas : Superposition des tensions mesurées par l’antenne.

Dans le cas des décharges de la figure 3.44, une légère variation d’environ 140 mV est observée au moment de l’impulsion. Cette variation n’est pas aussi prononcée que les impulsions présentées dans la partie 3.2.3.1 et illustrées dans la figure 3.29, mais elle reste perceptible. La moyenne de cette perturbation se situe autour de 50 mV et les décharges responsables de cette perturbation sur l’antenne ont une intensité d’environ -20 mA.

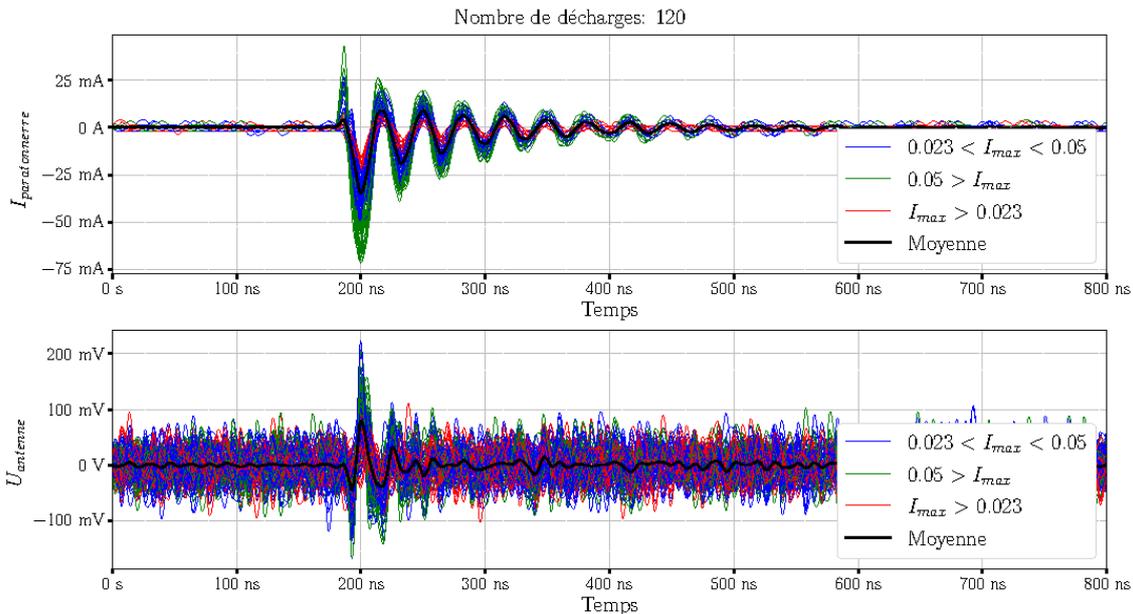


FIGURE 3.45 – En haut : Superposition des impulsions de courant mesuré sur le paratonnerre le 9 mai 2021 à 20h20. En bas : Superposition des tensions mesurées par l’antenne.

Sur la figure 3.45, les intensités des décharges varient, atteignant des valeurs allant jusqu'à -75 mA. La courbe moyenne des décharges indique une intensité maximale d'environ -30 mA. En ce qui concerne l'antenne, une variation de tension atteignant 200 mV est observée au niveau des impulsions. Cette variation maximale est représentée par une courbe bleue, indiquant qu'il s'agit d'une décharge avec une intensité comprise entre -23 et -50 mA. Cela démontre que ces décharges avec résonance ont un impact sur l'antenne, et que l'impact ne dépend pas uniquement de l'intensité de la décharge.

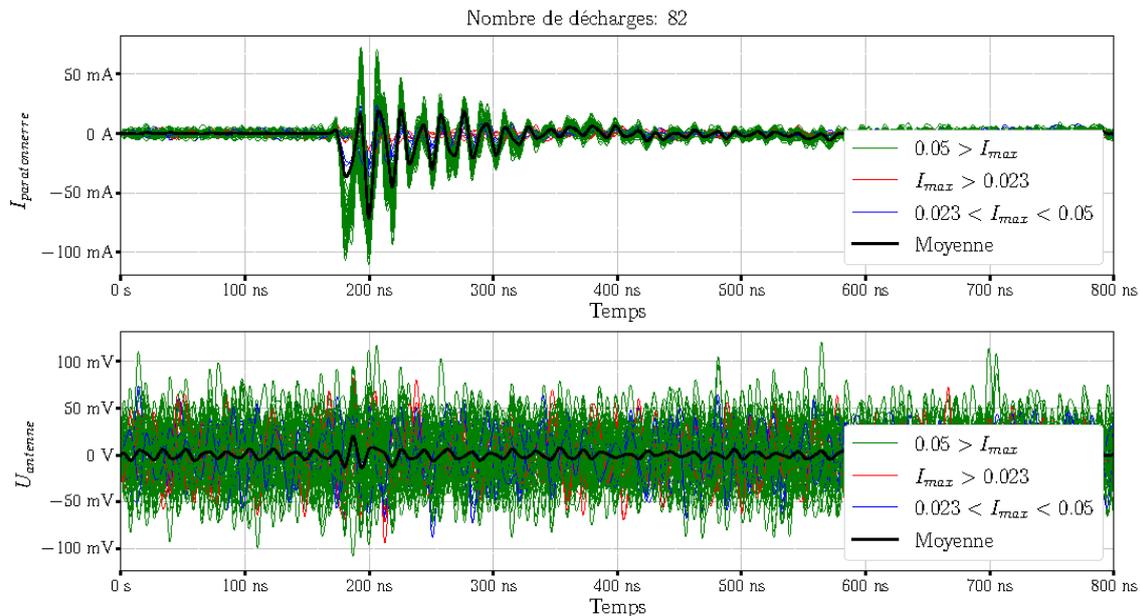


FIGURE 3.46 – En haut : Superposition des impulsions de courant mesuré sur le paratonnerre le 5 mai 2021 à 1h58. En bas : Superposition des tensions mesurées par l'antenne.

Pour le type de décharge présenté sur la figure 3.46, on observe que l'activité visuelle sur l'antenne est peu significative. Malgré cela, les décharges atteignent des impulsions jusqu'à -100 mA. Cependant, elles présentent un comportement distinct, notamment au niveau de la première montée, ce qui suggère l'implication de mécanismes différents.

Il est possible que les décharges des figures 3.44 et 3.45 génèrent des fréquences qui se situent dans la bande de fréquence de fonctionnement de l'antenne.

Dans cette partie, il est constaté que les décharges avec résonance ont un impact sur l'antenne, même si elles se produisent sur le paratonnerre. Cela peut s'expliquer par un temps de montée plus court des décharges avec résonance, ce qui entraîne une plus grande richesse spectrale et une plus grande capacité à générer des signaux détectables par l'antenne. Dans la partie suivante, une analyse spectrale des décharges est réalisée.

3.3.4 Analyse spectrale

Dans cette section, l'accent est mis sur l'analyse spectrale des décharges négatives avec résonance. Les spectres de la superposition des trois types de décharges étudiées sont examinés. Pour cela, les figures 3.47, 3.48 et 3.49 présentent en haut la superposition des impulsions temporelles, tandis qu'en bas, la représentation spectrale de chaque impulsion est affichée.

Avant toute analyse, il est essentiel de rappeler que la sonde de courant située à la base du paratonnerre présente une fréquence de coupure à 20 MHz à -3 dB, ce qui induit des niveaux légèrement différents de la réalité. De plus, l'interpolation effectuée conduit à un spectre de fréquences qui s'étend au-delà des 78 MHz. Cependant, il convient de rappeler que les valeurs au-delà de cette fréquence ne respectent pas le critère de Nyquist et ne peuvent donc pas être exploitées.

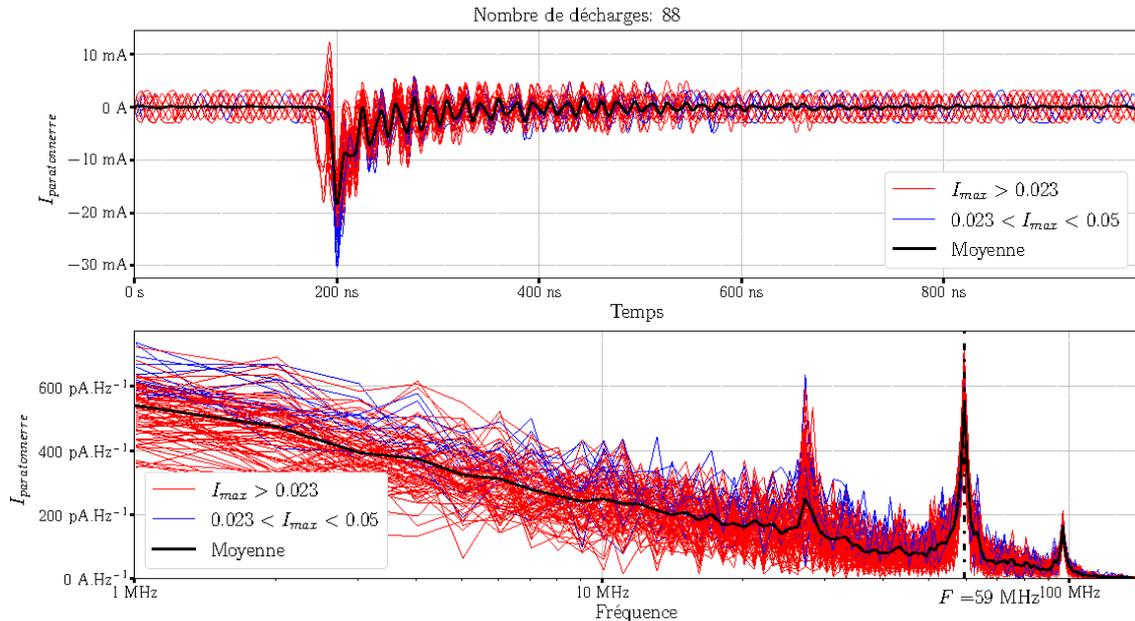


FIGURE 3.47 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 17 juin 2021 à 16h25. En bas : Superposition des spectres de courant.

La figure présentée illustre la réponse spectrale des décharges, mesurée dans la plage de fréquence de 1 MHz à 78 MHz, pour des décharges atteignant des valeurs d'environ -20 mA. Il est possible d'observer que la réponse spectrale se situe à un niveau de l'ordre de la centaine de $\text{pA} \cdot \text{Hz}^{-1}$. Plusieurs fréquences de résonance sont identifiables, avec la principale fréquence de résonance à 59 MHz. Toutes les décharges présentent cette fréquence de résonance. Enfin, une autre fréquence de résonance est présente vers 19 MHz. Il est important de noter que toutes les décharges ne possèdent pas nécessairement cette dernière fréquence de résonance.

Il est intéressant de noter que la fréquence de résonance observée, à savoir 59 MHz, est spécifique au pylône de la DTI étudié. Cela signifie que toutes les décharges sur ce pylône ont cette même fréquence de résonance. Il est possible que sur d'autres pylônes, la fréquence de résonance soit différente, et elle pourrait éventuellement se situer dans la gamme de la VHF aéronautique. Ce pourrait donc être l'explication des brouillages observés sur les communications sol bord qui sont à l'origine de ces travaux de recherche.

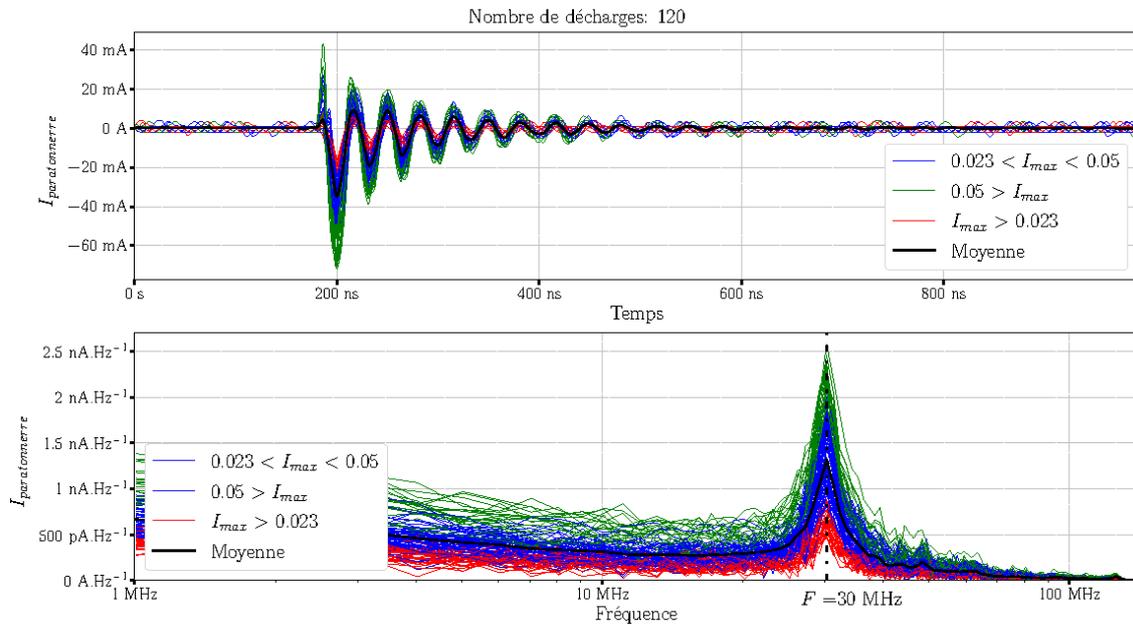


FIGURE 3.48 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 9 mai 2021 à 20h20. En bas : Superposition des spectres de courant.

Dans cette figure, les décharges présentent des intensités plus élevées, atteignant jusqu'à -60 mA , ce qui se traduit par des niveaux spectraux de l'ordre du $\text{nA} \cdot \text{Hz}^{-1}$. Une caractéristique distincte de ce type de décharge est une résonance particulière à une fréquence de 30 MHz . Cette observation met en évidence un comportement significativement différent des autres décharges, suggérant des propriétés distinctes de cette catégorie spécifique de décharges. Il est possible que ces décharges aient un temps de montée plus lent et n'excitent pas la fréquence 60 MHz ou que ces décharges se produisent à un endroit différent par rapport aux autres décharges et excite un autre mode résonant du pylône.

Il est intéressant de noter que lorsqu'un type de décharge négative avec résonance se produit, elle peut persister pendant une durée prolongée, allant de quelques minutes à plusieurs heures. Dans certains cas, le déclenchement de ces décharges peut même durer plusieurs heures, avec des moments de calme intermédiaires. La durée moyenne de ces événements est généralement de 10 à 20 minutes. Pendant cette période, la décharge négative avec résonance persiste sans interruption notable. Pendant cette période, il n'y a qu'un type de décharge qui se produit, l'allure de la décharge n'est pas modifiée et conserve la même allure caractéristique.

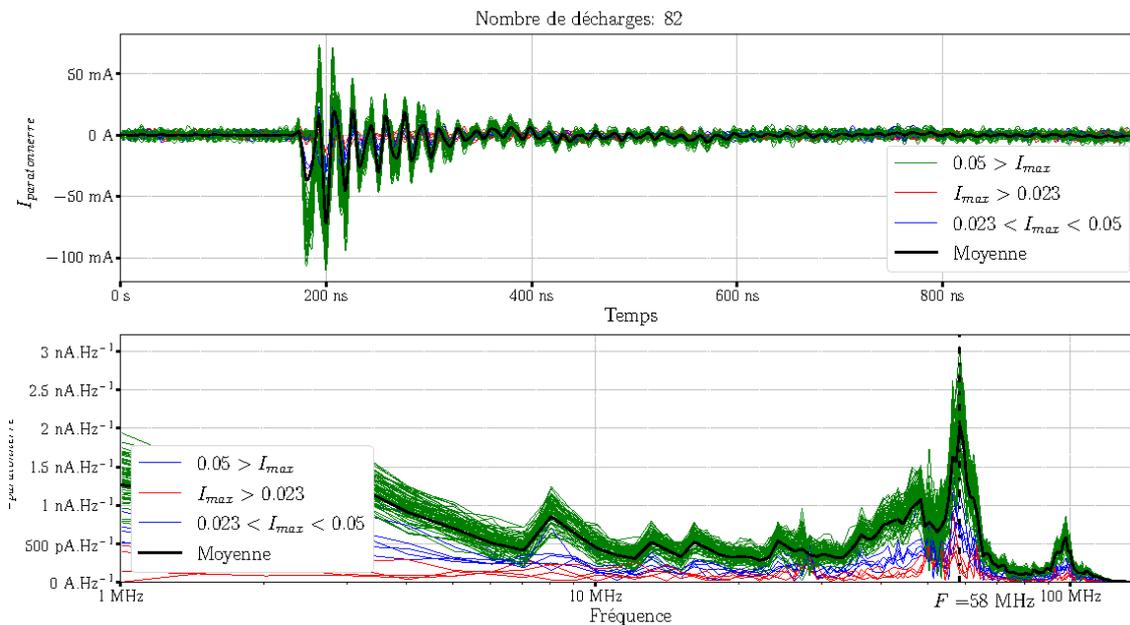


FIGURE 3.49 – En haut : courant mesuré sur le paratonnerre le 5 mai 2021 à 1h58. En bas : Superposition des spectres de courant.

. Ces figures présentent en haut la superposition des impulsions temporelles, en bas, c'est la représentation spectrale de chaque impulsion.

Dans cette dernière figure, il est observé le troisième type de décharge qui présente un comportement distinct. Les niveaux spectraux sont de l'ordre du nA.Hz^{-1} , avec des intensités de décharge atteignant jusqu'à -100 mA . On retrouve la fréquence de résonance observée dans le premier type de décharge, à 58 MHz . La bande de résonance est plus large, suggérant une réponse étendue en fréquence. De plus, on peut observer d'autres pics de niveau à $3, 8, 13, 16, 24$ et 48 MHz , indiquant la présence de phénomènes supplémentaires dans ce type de décharge.

L'analyse effectuée met en évidence les différences de comportement entre les types de décharges. En particulier, la décharge ayant un impact significatif sur l'antenne est caractérisée par une fréquence de résonance particulière à 30 MHz . Un autre type d'impulsions, bien que de faible niveau, présente une fréquence de résonance d'environ 60 MHz . Cette fréquence de résonance est également observée dans le dernier type de décharge, bien que son impact sur l'antenne soit moindre. Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte les caractéristiques fréquentielles des décharges pour comprendre leur effet sur les systèmes sol de communication aéronautique.

3.3.5 Conclusion

Dans cette section, une analyse détaillée de la décharge élémentaire avec résonance a été réalisée pour comprendre ses caractéristiques temporelles. Une analyse statistique a permis de classer les décharges en différents types et d'identifier une certaine périodicité. Une corrélation avec l'antenne a été étudiée pour déterminer les décharges ayant un impact direct sur ses performances. Enfin, une analyse spectrale a révélé des fréquences de résonance spécifiques associées à certains types de décharges. Ces décharges avec ré-

sonance pourraient expliquer les brouillages sur les communications sol-bord, notamment car les fréquences de résonances sont proches de la bande VHF aéronautique

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude approfondie des événements électromagnétiques mesurés en environnement réel a été réalisée, en se concentrant sur différentes signatures observées. Une analyse macroscopique des enregistrements a été effectuée en les classifiant en plusieurs catégories : enregistrements sans présence d'événement électrostatique, enregistrements accompagnés de phénomènes électrostatiques de proximité et lointain, ainsi que des enregistrements présentant des peignes d'impulsions, qui sont d'intérêt dans cette thèse.

Ensuite, une attention particulière a été portée aux signatures de type bi-exponentiel. Les décharges corona élémentaires ont été examinées en détail, et des analyses statistiques de leurs caractéristiques ont été réalisées pour mieux comprendre leur comportement. De plus, une étude des autres voies de mesure lors de l'apparition de décharges corona a été réalisée pour évaluer les couplages entre les décharges et les éléments du pylône. Les résultats ont révélé que ces couplages étaient de faible intensité en comparaison aux intensités importantes des décharges observées de type bi-exponentielles sans résonance.

Une partie importante de l'analyse a été consacrée à l'étude des impulsions présentant une résonance, étant donné leur fréquence d'apparition élevée. Nous avons analysé une décharge élémentaire et effectué une analyse statistique sur les caractéristiques des décharges mesurées, ce qui a permis de les regrouper en trois catégories distinctes. De plus, nous avons étudié leur corrélation avec l'antenne, révélant des niveaux de couplage significatifs et nous permettant d'émettre une hypothèse sur l'origine du brouillage en bande VHF. Enfin, une analyse spectrale a été réalisée, révélant des fréquences de résonance spécifiques pour chaque groupe de décharges, illustrant leur couplage différencié avec le pylône. Parmi ces décharges, certaines présentent des fréquences de résonance proches de la bande VHF aéronautique, ce qui pourrait expliquer les interférences sur les communications sol-bord.

Dans le chapitre suivant, une expérimentation est réalisée en laboratoire afin de reproduire des décharges corona dans un environnement contrôlé. L'objectif est d'étudier leur comportement et de mieux comprendre les mécanismes de déclenchement de ces décharges.

Chapitre 4

Caractérisation des décharges corona en fonction des conditions expérimentales en laboratoire

Dans le chapitre précédent, des analyses détaillées ont été réalisées sur les données acquises à l'aide du système d'acquisition conçu. Ces analyses ont principalement porté sur les décharges corona observées sur le pylône. Elles ont permis de déterminer les caractéristiques des décharges. De plus, des comportements spécifiques ont été identifiés en fonction du type de décharge. Cependant, les conditions exactes dans lesquelles ces décharges se produisent demeurent mal définies. Les mesures du champ électrostatique ont révélé la complexité des conditions électrostatiques environnantes, ce qui rend difficile l'établissement de relations simples entre ces conditions et les caractéristiques des décharges.

L'objectif de ce chapitre est de reproduire et d'étudier des décharges corona dans un environnement contrôlé. Cette approche permet de mieux comprendre les conditions dans lesquelles ces décharges se produisent et les comportements observés. Les expériences sont réalisées dans une configuration similaire à celle des expérimentations en extérieur, ce qui permet d'obtenir une estimation des conditions nécessaires pour la production de décharges corona.

Dans le cadre de cette étude, un dispositif expérimental a été mis en place pour générer des décharges corona sur une structure métallique de type pylône, en configuration pointe-plan. Ce dispositif est décrit en détail dans la section 4.1. Il est équipé de capteurs spécifiques reliés à des numériseurs adaptés à l'analyse des décharges. Par la suite, une étude approfondie des caractéristiques des décharges corona, telles que la tension et la distance entre la pointe et le plan, est réalisée dans la section 4.2. Cette analyse permet de mieux comprendre les facteurs influençant la formation et le comportement des décharges corona dans un environnement contrôlé. Enfin, les mesures effectuées par les différents capteurs situés à la base de la pointe et à la base de la maquette sont étudiées dans la section 4.3. Cette étude met en évidence le couplage entre les décharges corona et la structure métallique, fournissant ainsi des informations précieuses sur les interactions entre les décharges et le pylône.

4.1 Expérimentation de décharges corona sur une maquette de pylône

Dans cette section, l'expérimentation réalisée en laboratoire pour générer des décharges corona est présentée. Le dispositif expérimental utilisé est décrit, mettant en évidence sa conception spécifique pour générer des décharges en configuration pointe-plan. Les capteurs intégrés à ce dispositif, permettant la mesure des différentes caractéristiques des décharges produites, sont également examinés. De plus, les mesures sont effectuées à l'aide de numériseurs couvrant les différentes échelles temporelles des décharges. Cette approche expérimentale permet d'obtenir des données précises et détaillées sur les décharges corona en laboratoire.

4.1.1 Description du dispositif expérimental en configuration pointe-plan

La configuration expérimentale utilisée pour obtenir une configuration pointe-plan est décrite dans cette section.

Pour se rapprocher des conditions réelles, une maquette de pylône métallique d'une hauteur de 1.44 m a été construite par l'équipe technique de l'ENAC. Cette maquette, visible sur la figure 4.1, est composée de deux tronçons de 70 cm de base triangulaire, reliés par des plaques métalliques soudées aux extrémités. Elle est placée sur une plaque isolante, qui repose à son tour sur une plateforme élévatrice. Cette plateforme n'est pas toujours utilisée dans les mesures présentées dans ce chapitre. Afin de fournir une mise à la terre, le système est positionné sur une plaque métallique servant de masse.

Afin de regrouper tous les courants circulant à la base du pylône en un seul endroit, un câble de 50 cm de longueur est utilisé pour relier le pylône à la plaque métallique. Ainsi, en mesurant le courant au niveau de ce câble, il est possible de récupérer l'intégralité du courant circulant à la base du pylône. Cette configuration permet d'obtenir des mesures précises du courant au niveau de la base du pylône lors des décharges corona.

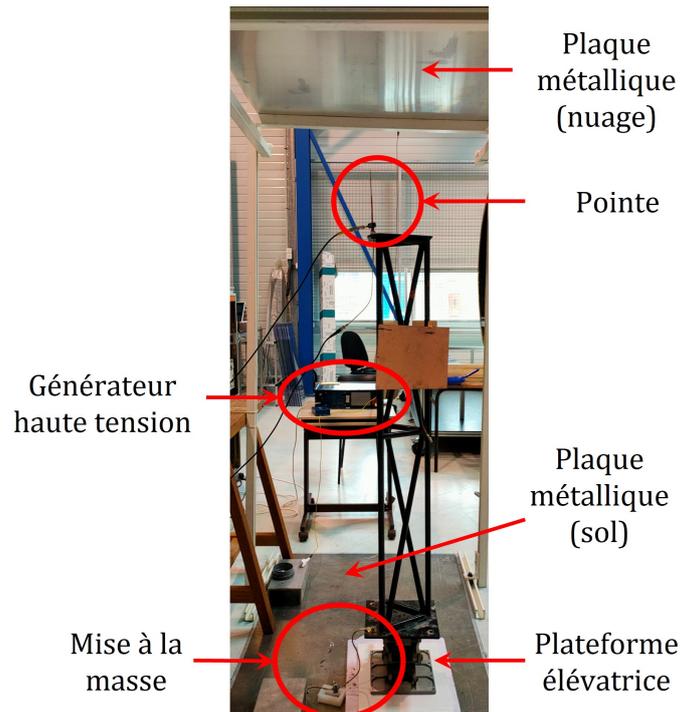


FIGURE 4.1 – Photo du montage expérimental

Au sommet du pylône, une pointe de 23.5 cm est fixée sur la maquette, remplissant le rôle du paratonnerre. Dans le cadre de la configuration pointe-plan, une plaque métallique carrée de 1 mètre de côté est positionnée au-dessus de cette pointe. Cette plaque constitue l'électrode plan et permet de simuler la présence d'un nuage chargé électriquement. Pour maintenir la plaque en place, une structure en PVC composée de 4 montants verticaux et 4 barres horizontales est utilisée. L'objectif de cette structure est d'isoler les deux plaques métalliques, sinon l'ensemble serait au même potentiel et il n'y aurait pas de décharges.

Afin de distinguer les deux plaques, elles sont nommées comme suit : la plaque située au-dessus du pylône est appelée "plaque nuage", tandis que celle posée sur le sol est appelée "plaque sol".

Pour générer des décharges à la fois en polarité positive et négative, un générateur haute tension bipolaire capable de fournir une tension pouvant atteindre ± 30 kV est utilisé. De plus, un autre générateur de tension négative qui peut atteindre jusqu'à -70 kV est également utilisé. Ces générateurs sont connectés à la plaque nuage par le biais d'un câble en cuivre, tandis qu'ils sont mis à la masse via un autre câble en cuivre relié à la plaque sol. Il est important de préciser que la polarité du générateur détermine la polarité inverse de la décharge. Cela signifie que lorsque le générateur est configuré en polarité positive, l'électrode stressée (la pointe) est de polarité négative, et vice versa.

Cette section a introduit le dispositif expérimental, comprenant une maquette de pylône métallique, qui est utilisé pour réaliser les expériences de décharges corona. Ce dispositif reproduit les conditions de terrain et permet d'étudier les caractéristiques des décharges corona dans un environnement contrôlé. Cependant, il est important de noter qu'une limitation du dispositif concerne la distance entre la plaque métallique et la pointe du pylône. Dans la prochaine section, les capteurs utilisés pour effectuer les mesures ainsi que leur emplacement sur le dispositif expérimental sont détaillés.

4.1.2 Choix des capteurs et de leurs emplacements

Dans le cadre de l'expérimentation visant à mesurer les comportements des décharges corona, la mesure du courant est essentielle. Cette section se concentre sur les deux capteurs de courant utilisés, y compris un shunt de mesure spécialement conçu pour cette expérimentation. De plus, l'emplacement de ces capteurs sur le dispositif expérimental est présenté en détail.

Dans le cadre de cette expérimentation, les transformateurs de courant utilisés sont des sondes Pearson 2877, similaires à celles utilisées dans les mesures expérimentales sur site et présentées dans le chapitre 2. Ces transformateurs de courant ont un coefficient de conversion de 1 V/A et une fréquence de coupure haute fréquence allant jusqu'à 200 MHz. Ces capteurs ne pouvaient pas être utilisés sur le pylône extérieur en raison de leur petite taille. Comme dans l'instrumentation du pylône en conditions réelles, le courant mesuré est considéré positif lorsque les électrons se déplacent vers le sol. Les sondes sont positionnées aux mêmes endroits que précédemment, c'est-à-dire à la base de la pointe et à la base de la maquette. Le pylône étant mis à la masse avec un seul câble, comme l'illustre la figure 4.2, la sonde de courant à la base de la maquette va mesurer tous les courants circulant à la base du pylône.

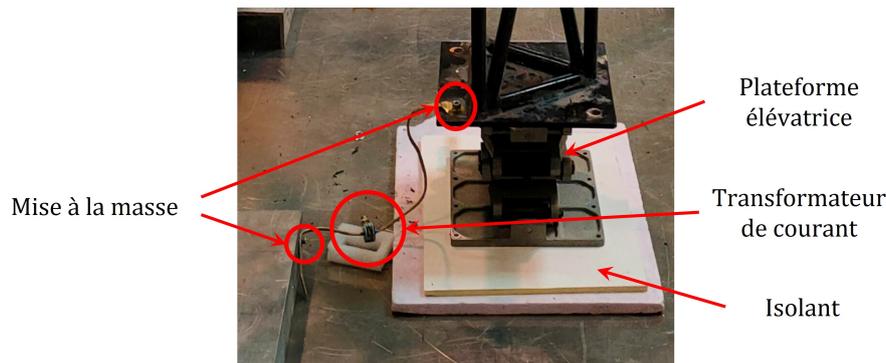


FIGURE 4.2 – Photo de la mise à la masse de la maquette de pylône

En complément des mesures du courant réalisées à l'aide des transformateurs de courant, un shunt de mesure est également utilisé. Ce shunt de mesure est positionné à 4 cm en-dessous du sommet de la pointe du paratonnerre, comme illustré dans la figure 4.3. L'objectif de cette mesure avec le shunt de mesure est de capturer le courant au plus près de la pointe, là où les décharges corona se produisent. En plaçant le shunt de mesure à proximité de la pointe, des mesures précises du courant peuvent être obtenues sans perturber le déclenchement des décharges corona ni le champ électrostatique environnant.

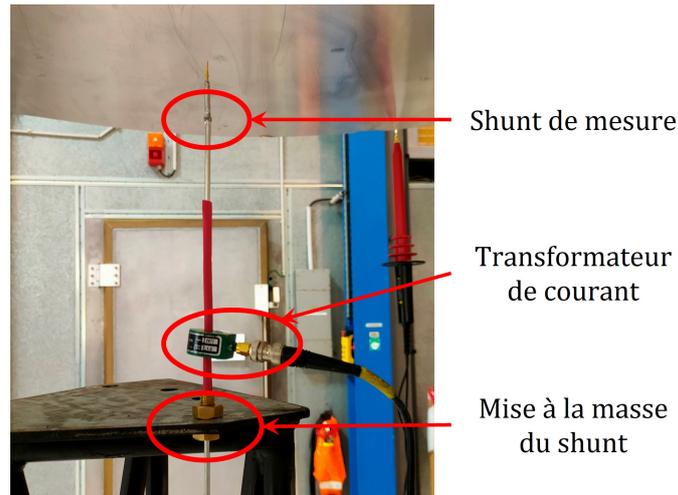


FIGURE 4.3 – Photo de la pointe avec le shunt de mesure et le transformateur de courant

Le shunt est une méthode de mesure qui implique de faire passer le courant à travers une résistance d'impédance connue et relativement faible. En mesurant la tension aux bornes de cette résistance, la loi d'Ohm peut être utilisée pour déterminer le courant. Cette méthode est simple à mettre en place et offre une bonne précision à basse fréquence, de l'ordre de quelques centaines de Hz. Sa fréquence de coupure dans le cas de structures coaxiales peut atteindre 100 MHz.

Pour réaliser le shunt, un câble coaxial semi-rigide RG-402 est utilisé. La gaine en cuivre de ce câble est sectionnée à 4 cm de la pointe afin de permettre le placement des résistances, comme illustré dans le schéma du shunt présenté dans la figure 4.4. Cette figure montre un schéma du shunt de mesure installé au niveau de la pointe ainsi que le schéma électronique équivalent du shunt indiquant la tension mesurée avec l'oscilloscope.

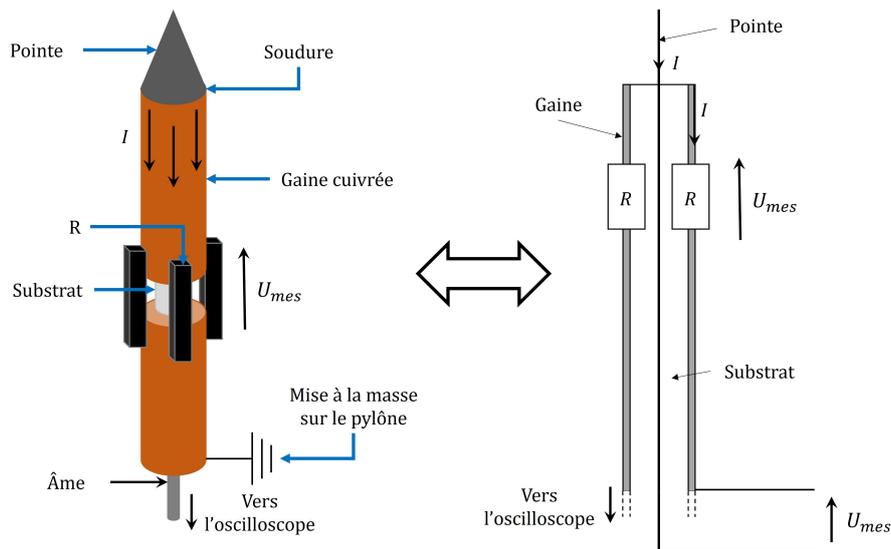


FIGURE 4.4 – Schéma 3D et équivalent de la pointe avec le shunt de mesure

Dans cette configuration, le shunt est constitué de quatre résistances de $R = 4 \Omega$ placées en parallèle, positionnées à une distance de 4 cm de la pointe. Chacune de ces

résistances a une valeur de 4Ω , ce qui permet d'obtenir une résistance équivalente de $R_{eq} = 1 \Omega$.

L'extrémité du câble coaxial est mise à la masse, ce qui permet d'effectuer une mesure de tension en parallèle avec la résistance. Finalement, le shunt de mesure donne $U = R_{eq}I$. Le shunt de mesure fournit une tension positive lorsque le courant est dirigé vers le sol, ou quand les électrons se dirige vers le ciel. Ceci est opposé au courant mesuré par la sonde de courant Pearson, et donc opposé à la polarité des décharges. Ainsi, le signe de cette mesure est inversé dans le cadre de cette étude.

Une pointe est fixée à l'extrémité de l'âme du câble coaxial, comme indiqué dans le détail de la figure 4.5.



FIGURE 4.5 – Photo de la pointe avec le shunt de mesure

Dans la figure présentée, le shunt de mesure est clairement visible, positionné à une distance de 4 cm de l'extrémité de la pointe. L'extrémité de la pointe est en réalité la pinoche centrale d'un connecteur BNC mâle d'une longueur totale d'un centimètre, utilisé couramment pour la connexion de câbles coaxiaux. Le rayon de courbure en bout de pointe est estimé à moins de 0.5 mm, bien que sa valeur exacte ne soit pas nécessaire pour l'étude. Durant les mesures, la pointe n'est pas dégradée car les tensions de claquage ne sont pas atteintes.

Dans cette section, les différentes méthodes de mesure de courant utilisées dans le dispositif expérimental ont été présentées. Parmi ces méthodes, un shunt de mesure spécialement conçu a été incorporé afin de permettre une mesure précise du courant des décharges corona. Cette mesure est essentielle pour mener une étude approfondie sur les caractéristiques et le comportement de ces décharges. Dans la prochaine section, les numériseurs utilisés pour enregistrer les mesures de courant sur des échelles de temps différentes sont présentés.

4.1.3 Les numériseurs utilisés

Dans cette section, les deux numériseurs utilisés pour observer les comportements des décharges corona sont présentés. L'utilisation de ces deux numériseurs complémentaires permet d'obtenir une vision globale des caractéristiques et des comportements des décharges corona, en fournissant des informations détaillées à différentes échelles de temps et ainsi de comparer les résultats sur les décharges corona obtenus en environnement naturel et ceux en laboratoire.

Le premier numériseur est utilisé pour observer les décharges corona au niveau élémentaire. Il s'agit de l'oscilloscope Lecroy 640 Zi, qui offre une capacité d'échantillonnage allant jusqu'à 50 ps. Cet oscilloscope permet de capturer les signaux avec une haute résolution temporelle, ce qui permet d'analyser finement les caractéristiques des décharges et leur évolution dans le temps. Il est possible de moyennner le signal sur plusieurs acquisitions, pour obtenir un comportement moyen des décharges. Le seuil de déclenchement des acquisitions est choisi pour être supérieur au bruit et inférieur à l'amplitude minimale des décharges, généralement de quelques milliampères. Le numériseur de cet oscilloscope quantifie sur 8 bits.

Le deuxième numériseur utilisé est le picoscope 5244D, qui est utilisé pour observer le train d'impulsions des décharges corona. Ce numériseur est utilisé en conjonction avec le logiciel Picoscope6, ce qui permet d'acquérir des enregistrements de longue durée qui peuvent être facilement et rapidement traités. Il est particulièrement adapté pour mesurer la fréquence de répétition des décharges corona, qui peut varier de quelques kHz à quelques MHz [59].

Les principales performances des numériseurs utilisées pour les mesures sont résumées dans le tableau 4.1.

Numériseur	Lecroy 640 Zi	Picoscope 5244D
Temps d'échantillonnage	50 ps	8 ns
Résolution verticale	8 bits	14 bits
Fréquence maximale	500 MHz	200 MHz

TABLEAU 4.1 – Performances des numériseurs utilisés pour l'expérimentation

L'utilisation de ces deux numériseurs complémentaires autorise une analyse complète des décharges corona en couvrant différentes échelles de temps. Cette approche offre une vision détaillée des caractéristiques et des comportements des décharges, permettant ainsi de mieux comprendre leur dynamique.

4.1.4 Conclusion

En conclusion, la présentation du dispositif expérimental, des capteurs de courant et des numériseurs a permis de mettre en évidence une approche complète et précise pour l'étude des décharges corona. La maquette de pylône, en configuration pointe-plan, reproduit les conditions de terrain et permet de générer des décharges corona similaires à celles observées en environnement naturel. Les capteurs de courant, tels que les transformateurs de courant et le shunt de mesure, offrent des mesures précises des décharges corona. Cette approche globale facilite la comparaison des résultats obtenus en laboratoire avec ceux observés sur le terrain, ce qui contribue à une meilleure compréhension des décharges corona.

Dans la section suivante, les courants des décharges corona produits à l'aide du dispositif expérimental sont examinés.

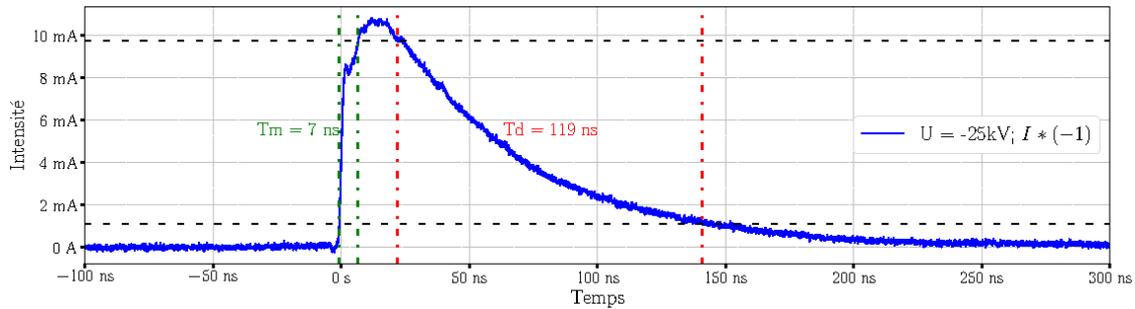
4.2 Étude des décharges corona sur une maquette de pylône

Dans cette section, notre objectif est de présenter les courants de décharges corona obtenus à l'aide de notre dispositif expérimental, et de les comparer aux mesures réalisées en environnement extérieur. Pour cela, une analyse de la décharge corona élémentaire dans les deux polarités est effectuée en utilisant les mesures réalisées avec le shunt. Cette étude est similaire à celle présentée dans le chapitre 3. Ensuite, deux analyses paramétriques sont menées afin d'étudier l'impact des conditions expérimentales. La première analyse se concentre sur la différence de potentiel entre les deux électrodes, tandis que la seconde se concentre sur la distance inter-électrode.

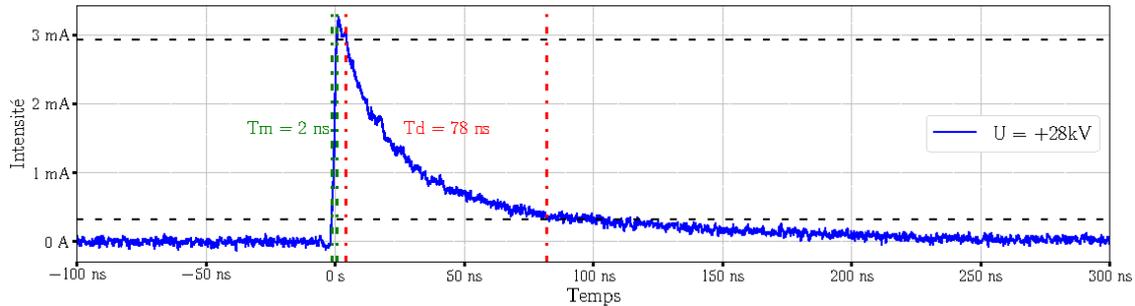
4.2.1 Analyse des décharges corona élémentaires

Dans cette partie, les caractéristiques d'une décharge corona sont examinées à l'aide du shunt de mesure dans chaque polarité dans une configuration donnée. La configuration expérimentale utilisée pour cette analyse consiste en une distance fixe de 52 cm entre les deux électrodes, il n'y a pas la plateforme élévatrice pour cette configuration. Les décharges sont produites et observées à l'aide du générateur haute tension bipolaire et de l'oscilloscope Lecroy, avec un temps d'échantillonnage de 50 ps. Les courants mesurés sont ensuite moyennés sur 100 acquisitions ce qui permet d'avoir directement une moyenne sur les caractéristiques des décharges corona.

La figure 4.6 présente les courants moyens mesurés avec le shunt pour les tensions négatives et positives. La partie supérieure de la figure 4.6a montre la moyenne des décharges positives obtenues avec une tension de -25 kV. En utilisant un modèle condensateur plan, ceci correspond à un champ électrostatique ambiant de $+11.3$ kV/m. La partie inférieure 4.6b présente la moyenne des décharges négatives obtenues avec une tension de $+28$ kV, donnant un champ électrostatique ambiant de $+12.7$ kV/m. Seule l'amplitude du courant $|I|$ est représentée afin de faciliter la comparaison des deux types de décharges. Les tensions utilisées par le générateur sont les valeurs minimales nécessaires pour générer des décharges dans cette configuration expérimentale.



(a) Positive



(b) Négative

FIGURE 4.6 – Mesure de courant de décharges corona positive et négative

Les deux graphiques illustrent les décharges corona qui suivent une loi bi-exponentielle, l'un pour la polarité positive et l'autre pour la polarité négative. Les mesures effectuées à l'aide du shunt permettent d'obtenir des courants de décharge corona bien définis, sans résonance ni oscillation.

La décharge corona positive atteint une intensité maximale de 11 mA, avec un temps de montée de 7 ns et un temps de descente de 119 ns. Par contre, la décharge corona négative atteint une intensité plus faible, environ 3.2 mA, avec des temps caractéristiques de montée et de descente de 2 ns et 78 ns respectivement.

Un comportement différent entre les deux types de décharges corona peut être observé. Il est intéressant de noter que la décharge négative présente une descente plus rapide et plus courte que la décharge positive, qui, elle, présente un plateau d'environ 11 mA pendant environ 10 ns.

De plus, l'étude d'un zoom sur la partie la plus pentue de la montée des deux décharges au cours des premières nanosecondes est réalisée à l'aide de la figure 4.7, qui met en évidence la deuxième partie de la montée de la décharge positive. Cette partie est spécifiquement affichée dans la figure 4.7a. Les lignes en pointillés rouges représentent le critère à 90% du premier maximum de la décharge positive, qui est situé à 8.6 mA et atteint vers 3.1 ns.

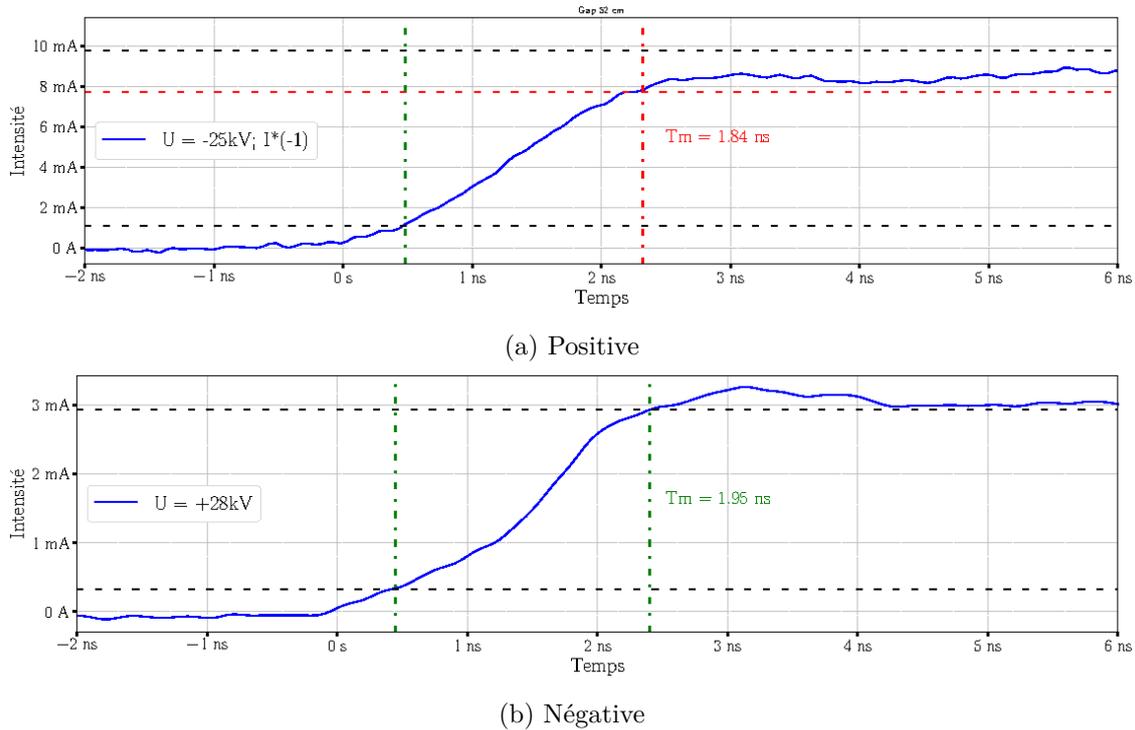


FIGURE 4.7 – Mesure de courant de décharges corona positive et négative

Les temps de montée associés à la partie la plus pentue mesurés pour les décharges corona sont de 1.84 ns pour atteindre une intensité de 7.7 mA pour la décharge positive, et de 1.95 ns pour atteindre 2.9 mA pour la décharge négative. Ces résultats confirment la différence de mécanisme entre les deux polarités et indiquent qu'il existe un premier phénomène très rapide se produisant lors de la décharge positive.

Le tableau 4.2 présente les caractéristiques des décharges corona mesurées en laboratoire, ainsi que celles obtenues en environnement naturel. Les médianes des échantillons ont été utilisées pour éviter les valeurs extrêmes qui pourraient résulter d'erreurs de tri ou de décharges atteignant des intensités très élevées, qui pourraient potentiellement sortir du cadre des décharges corona.

Polarité de l'impulsion	Laboratoire		Environnement naturel	
	Positive	Négative	Positive	Négative
Amplitude de la décharge (mA)	11	-3.2	24.7	-19.4
Temps de montée (ns)	7	2	22.8	4.96
Temps de descente (ns)	119	78	145	76.6
Quantité de charge (nC)	0.777	-0.125	2.86	-0.515

TABLEAU 4.2 – Caractéristiques des décharges corona expérimentales en environnement naturel et en laboratoire pour une configuration

Les décharges corona positives mesurées en environnement naturel ont une amplitude moyenne de 24.7 mA, ce qui représente plus du double de l'amplitude moyenne mesurée en laboratoire (11 mA). De plus, le temps de montée en environnement naturel est plus long, avec une valeur de 22.8 ns, tandis qu'en laboratoire, il est de 7 ns. Le temps de descente est également légèrement plus long en environnement naturel, atteignant 145 ns,

par rapport à 119 ns en laboratoire. En termes de quantité de charge, le rapport entre les mesures en environnement naturel et en laboratoire est de 4, avec des valeurs de 2.86 nC et 0.777 nC respectivement.

Pour la polarité négative, l'amplitude moyenne de la décharge corona en environnement naturel est significativement plus faible que celle mesurée en laboratoire. En effet, l'amplitude moyenne en laboratoire est de -3.2 mA, tandis qu'environnement naturel, elle atteint -19.4 mA, soit environ 6 fois plus élevée. En laboratoire, le temps de montée est de 2 ns, soit deux fois plus court que celui observé en environnement naturel qui est de 4.96 ns. Cependant, le temps de descente des décharges est du même ordre de grandeur pour les deux cas est de 78 ns en laboratoire et de 76.6 ns en environnement naturel. En ce qui concerne les quantités de charge, en laboratoire elle est de -0.125 nC, tandis qu'environnement naturel, elle est de -0.515 nC, soit une augmentation d'environ 4 fois.

Ces comparaisons mettent en évidence la non-linéarité du phénomène de décharge corona, ainsi que les intensités plus élevées atteintes dans le cadre du pylône. Cependant, il est important de noter que les pas de quantification utilisés dans le dispositif expérimental ne permettaient pas de mesurer des décharges d'intensité très faible. De plus, les statistiques ont été basées sur un seuil minimum de 17 mA pour le traitement des données. Cela pourrait donc expliquer les différences entre les valeurs obtenues.

La pointe utilisée en laboratoire a un rayon de courbure beaucoup plus faible que le paratonnerre, ce qui facilite la formation des décharges en raison d'une intensification très élevée du champ électrique [60]. Cependant, lorsqu'une pointe a un faible rayon de courbure, l'intensification du champ diminue rapidement, ce qui pourrait expliquer pourquoi les décharges sont moins intenses et plus rapides en laboratoire.

Dans cette section, les mesures de courant obtenues avec le shunt pour une configuration spécifique ont été présentées. Les caractéristiques des décharges corona ont été comparées avec les mesures en environnement naturel, révélant des intensités plus élevées pour le pylône d'essai. Dans les sections suivantes, d'autres configurations sont testées en faisant varier la tension appliquée ainsi que la distance inter-électrodes.

4.2.2 Analyse des caractéristiques des décharges corona obtenues avec différentes tensions

Dans cette section, l'effet de la variation de la tension appliquée sur les caractéristiques des décharges corona est examiné, tout en maintenant une distance inter-électrodes fixe pour chaque polarité. Pour cela, une analyse est réalisée pour comprendre l'effet de la tension sur une décharge élémentaire. De plus, la variation de la fréquence de répétition des décharges est également étudiée pour mieux comprendre la dynamique temporelle du phénomène.

En raison des différences de mécanismes entre les décharges corona positives et négatives, les analyses sont réalisées séparément pour chaque polarité. Nous commençons par étudier les décharges négatives.

4.2.2.1 Les décharges négatives

Dans le cadre de l'étude des décharges négatives, des expérimentations sont menées en générant des décharges avec des tensions variant de +19 kV (correspondant à la condition

d'apparition des décharges) jusqu'à +30 kV (limite du générateur). La distance entre la pointe et le plan métallique est maintenue à 20 cm à l'aide de la plateforme élévatrice. Il convient de noter que dans ces conditions, aucun arc électrique ne se forme. Dans ce cas, la distance entre la plaque "sol" et la plaque "nuage" est de 2.87 m.

Analyse des décharges élémentaire : La figure 4.8 présente les mesures de courant du shunt pour des tensions de +19 kV en noir, de +25 kV en bleu et de +30 kV en rouge, générant respectivement des champs électrostatiques ambiants de 6.6 kV/m, 8.7 kV/m et 10.4 kV/m.

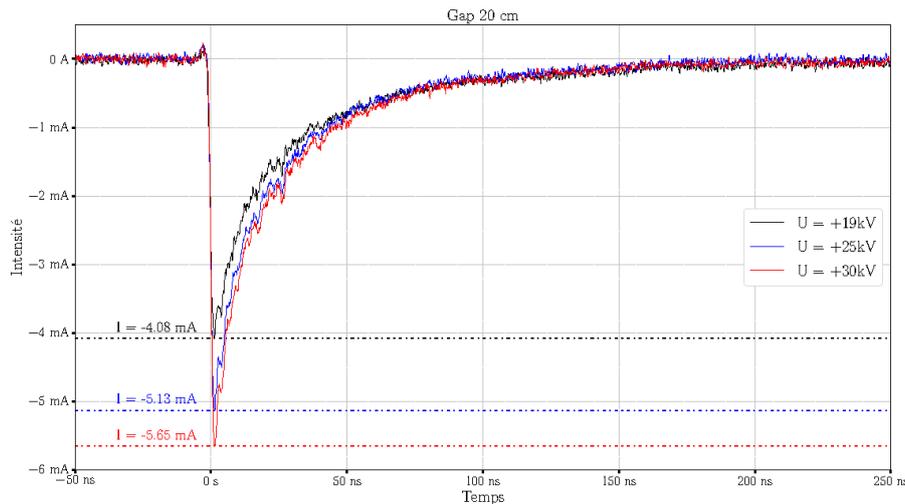


FIGURE 4.8 – Mesures de courant de décharges corona négatives pour plusieurs tensions appliquées pour un gap de 20 cm

Ces graphiques montrent 3 mesures de courant de décharges corona avec allures similaires, on voit que les intensités augmentent en variant de -4.08 mA, pour une tension de +19 kV, à -5.65 mA, pour une tension de +30 kV. Cela met en évidence que l'amplitude maximale des impulsions augmente avec l'augmentation de la tension.

Le tableau 4.3 présente les caractéristiques des décharges en fonction des tensions appliquées et confirme cette tendance pour l'amplitude. Ce tableau indique également que les temps caractéristiques sont très similaires. Cela démontre que l'augmentation de la tension produit des décharges homothétiques.

Tension appliquée	Amplitude de la décharge	Temps de montée	Temps de descente	Quantité de charge
19 kV	-4.08 mA	1.75 ns	74.75 ns	-144 pC
25 kV	-5.13 mA	1.5 ns	65.1 ns	-143 pC
30 kV	-5.65 mA	1.5 ns	64.8 ns	-164 pC

TABLEAU 4.3 – Caractéristiques des décharges négative en fonction de la tension appliquée

Les résultats montrent une augmentation de l'amplitude moyenne de la décharge à mesure que la tension appliquée augmente. À une tension de 19 kV, l'amplitude de la dé-

charge est de -4.08 mA, tandis qu'à 25 kV et 30 kV, elle atteint respectivement -5.13 mA et -5.65 mA.

En ce qui concerne les temps de montée et de descente, ils sont relativement similaires pour toutes les tensions testées, avec des valeurs autour de 1.5 ns pour le temps de montée et entre 64.8 ns et 74.75 ns pour le temps de descente. Cela suggère que la variation de tension n'a pas d'impact significatif sur ces temps caractéristiques.

La quantité de charge transportée par la décharge, mesurée en pC, varie également avec la tension appliquée. Une augmentation de la quantité de charge est observée à mesure que la tension augmente, passant de -144 pC à 19 kV à -164 pC à 30 kV.

Analyse du comportement des trains d'impulsions : Dans cette section, les caractéristiques des trains d'impulsions sont analysées à l'aide du Picoscope 5244D. Les enregistrements ont une durée de 200 ms et un temps d'échantillonnage de 8 ns. Le logiciel Picoscope est utilisé pour effectuer ces enregistrements.

Les données enregistrées sont soumises au même traitement que celui utilisé dans les sections 3.2.2 et 3.3.2. La Figure 4.9 présente en haut le coefficient de variation de la fréquence de répétition en fonction de la médiane des fréquences et de l'amplitude des décharges, tandis que le graphique du bas montre la dispersion des intensités en fonction des fréquences médianes. Les tensions étudiées sont +18 kV, +20 kV, +25 kV et +30 kV, avec une distance inter-électrode de 20 cm.

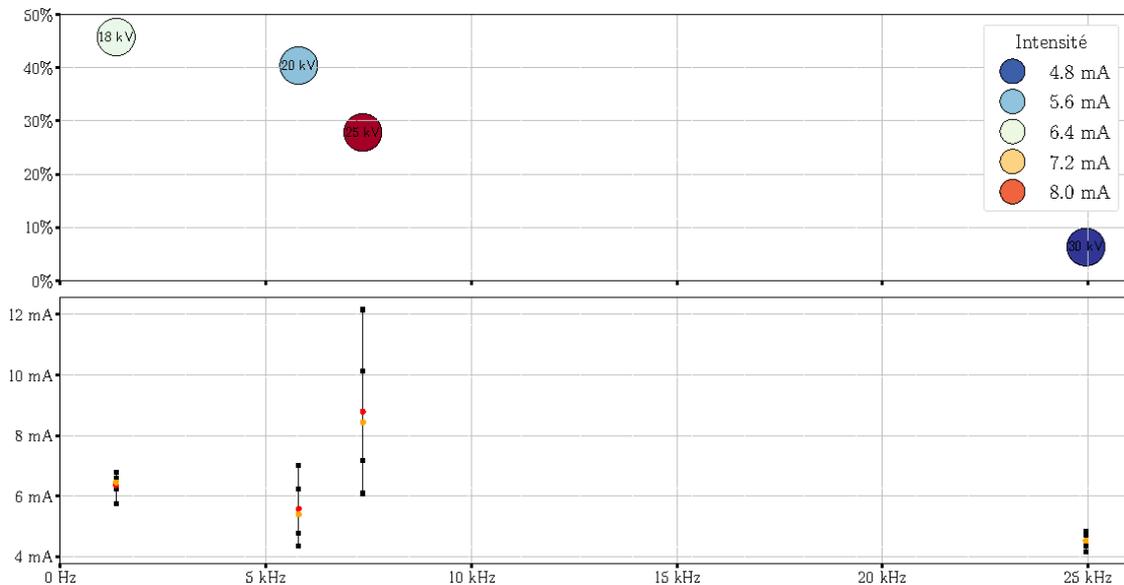


FIGURE 4.9 – Variabilité de la fréquence et de l'intensité des décharges négatives en fonction de la tension appliquée. En haut : Coefficient de variation de la fréquence de répétition des décharges négatives en fonction de la fréquence médiane, des intensités moyennes et de la tension appliquée; en bas : Dispersion des intensités des décharges en fonction de la fréquence médiane de répétition.

Les mesures montrent une augmentation significative de la fréquence des décharges corona avec l'augmentation de la tension appliquée. Les fréquences varient de 1.44 kHz à

25 kHz pour les tensions de 18 kV à 30 kV respectivement. Cette tendance suggère un lien direct entre la tension appliquée et la fréquence des décharges.

De plus, les coefficients de variation diminuent avec la tension appliquée, ce qui indique une plus grande régularité des décharges à mesure que la tension augmente. Cela peut être attribué à une meilleure stabilité du processus de décharge à des tensions plus élevées.

Il est intéressant de noter que l'augmentation de la fréquence des décharges n'est pas linéaire par rapport à la tension. Cela peut être dû à des interactions complexes entre les variables du système et à des phénomènes non linéaires qui influencent la fréquence des décharges corona.

Le graphique montre que la moyenne des amplitudes des décharges corona augmente avec la tension appliquée. En ce qui concerne la dispersion des amplitudes, une tendance générale d'augmentation de la dispersion avec la tension est observée, ce qui peut être attribué à un plus grand nombre de décharges enregistrées. Plus il y a de décharges, plus il est probable d'observer des variations importantes dans les amplitudes comme le montre les mesures à 18 kV, 20 kV et 25 kV.

Pour le cas de la tension la plus élevée, à 30 kV, la dispersion est très faible, la moyenne et l'écart-type des amplitudes sont également relativement faibles. Cela peut s'expliquer par le fait que l'enregistrement correspondant à cette tension n'a été réalisé que sur une durée de 2 ms, ce qui limite la quantité d'informations disponibles. Il est possible que des décharges de plus grande amplitude aient été manquées dans cet enregistrement court.

Pour une compréhension plus approfondie du comportement des trains d'impulsions, il serait nécessaire de réaliser une étude statistique sur plusieurs enregistrements pour chaque tension. Cela permettrait de prendre en compte les variations temporelles et d'obtenir une estimation plus précise de la fréquence de répétition et des intensités pour chaque tension spécifique. Ici, cette analyse n'a pas été réalisée car elle ne constitue pas l'objectif principal de cette étude. Les résultats présentés offrent tout de même des indications intéressantes sur le comportement général des décharges corona en fonction de la tension appliquée.

L'analyse des fréquences des décharges négatives confirme leur étroite corrélation avec le champ électrostatique au niveau de la pointe. De plus, cette étude révèle que, pour une même variation du champ électrostatique, les variations de fréquence des décharges sont plus significatives que les caractéristiques individuelles d'une décharge corona élémentaire. Ainsi, la fréquence de répétition des décharges se révèle être un indicateur sensible et précis pour évaluer les fluctuations du champ électrostatique ambiant et les conditions environnementales.

De plus, il est important de souligner que les mesures en laboratoire montrent une périodicité des décharges plus élevée que sur le pylône extérieur. Ceci n'est pas surprenant car les conditions de mesure en laboratoire sont plus stables en comparaison avec l'environnement naturel. En laboratoire, le champ électrostatique ambiant est maîtrisé, il n'y a pas de vent ni de gouttes d'eau qui pourraient influencer les décharges. Cela explique donc les différences observées dans la périodicité des décharges entre les deux environnements de mesure.

4.2.2.2 Les décharges positives

Lorsqu'il s'agit des décharges corona positives, il est plus difficile de faire varier la tension de la même manière que pour les décharges négatives. En effet, à partir d'une

certaine tension, un phénomène de blindage se produit, ce qui empêche l'apparition de décharges corona sans passer par la formation d'un arc électrique. Le blindage se produit en raison de l'accumulation de charges positives à la surface de la pointe, ce qui réduit le champ électrostatique et empêche la formation de décharges. Ce blindage limite la plage de tensions applicables pour étudier les décharges corona positives de manière contrôlée.

Avec un espacement de 20 cm, la plage de tension pour produire des décharges corona est limitée à un kilovolt seulement. Par conséquent, il est difficile d'observer l'effet de la tension sur ces décharges. Pour élargir la plage de tensions étudiées, la distance inter-électrodes est augmentée afin de comparer plusieurs cas. La distance entre les 2 électrodes est de 119 cm pour les prochaines mesures, c'est la distance maximale qui a pu être réalisée. Pour obtenir cette distance, la plateforme élévatrice a été retirée. Le générateur de tension utilisé pour cette expérience peut atteindre des tensions allant jusqu'à -70 kV.

Analyse des décharges élémentaire : La figure 4.10 présente les mesures de courant obtenues avec les tensions de -50 kV, -55 kV et -60 kV, correspondant à des champs électrostatiques ambiants de 17.4 kV/m, 19.2 kV/m et 20.9 kV/m respectivement. La tension de -50 kV est la condition d'apparition limite des impulsions.

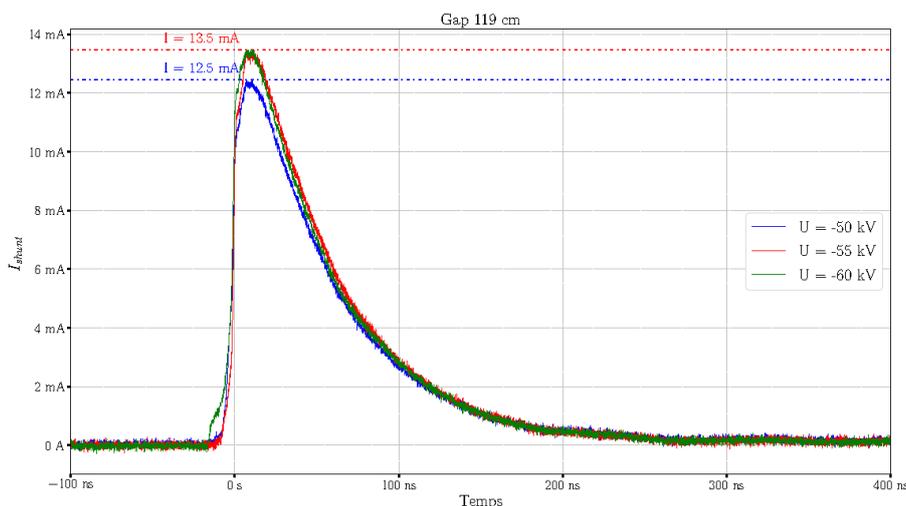


FIGURE 4.10 – Mesures de courant de décharges corona positives pour plusieurs tensions appliquées pour un gap de 119 cm

Ces impulsions de courant sont obtenues en moyennant les mesures sur 100 décharges élémentaires ayant le même seuil de déclenchement. Le graphique montre une augmentation linéaire de l'amplitude du courant entre les paliers de -50 kV et -55 kV. Cependant, l'amplitude stagne à -60 kV, indiquant que la moyenne des amplitudes n'augmente plus avec la tension. La figure 4.11 présente les amplitudes maximales des décharges en fonction des tensions de -50 kV et -55 kV.

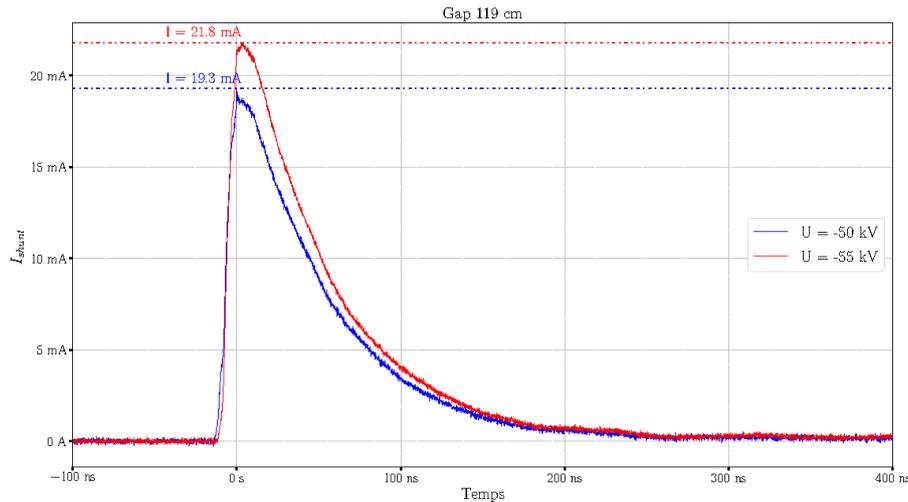


FIGURE 4.11 – Mesures de courant de décharges corona positives pour plusieurs tensions appliquées pour un gap de 119 cm

Les amplitudes des décharges corona dépassent les 19 mA pour les deux tensions testées, tandis que la moyenne des amplitudes est de 12.5 mA. Ce graphique met en évidence la tendance de l'amplitude des décharges à augmenter avec la tension appliquée par le générateur, et donc avec l'intensité du champ électrostatique. Cela confirme que l'amplitude des décharges est influencée par la tension de déclenchement et l'intensité du champ électrostatique dans la zone de décharge corona.

Ces deux graphiques montrent que les peignes d'impulsions sont constitués d'impulsions d'amplitudes variées. Comme pour les décharges négatives, les caractéristiques des décharges élémentaires sont affectées par les changements de tensions.

Analyse du comportement des trains d'impulsions : Dans cette étude, plusieurs enregistrements d'une durée de 500 ms ont été réalisés, deux à une tension de -55 kV et trois à -60 kV. Les résultats ont été analysés pour étudier le comportement des trains d'impulsions.

La figure 4.12 présente les résultats, avec le coefficient de variation de la fréquence de répétition en fonction de la fréquence médiane. Le code couleur représente l'amplitude moyenne des décharges, et la taille des points indique le nombre de décharges dans les enregistrements. Le graphique inférieur montre la dispersion des intensités.

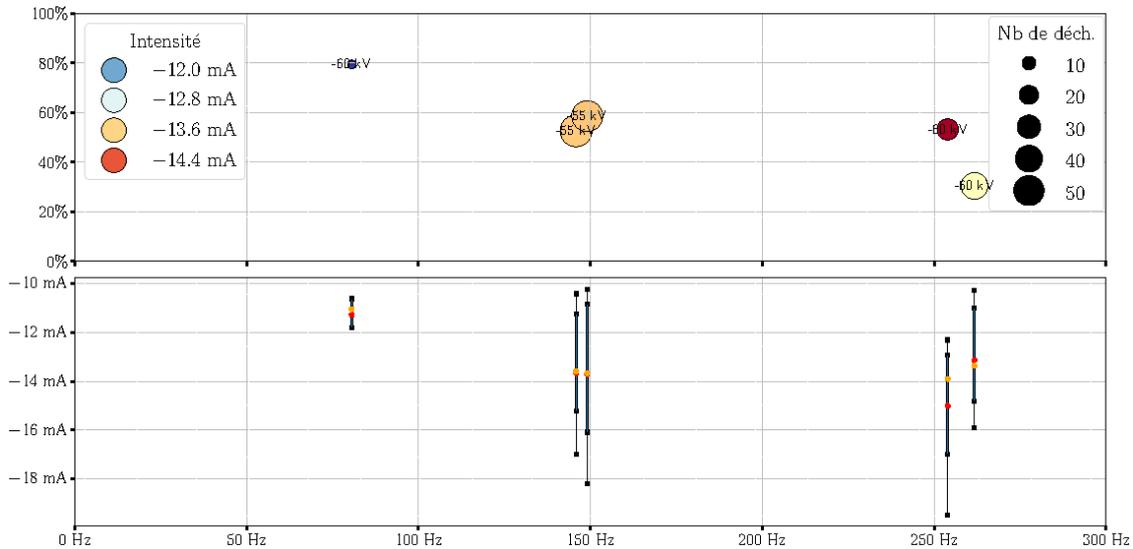


FIGURE 4.12 – Variabilité de la fréquence et de l'intensité des décharges négatives en fonction de la tension appliquée. En haut : Coefficient de variation de la fréquence de répétition des décharges positives en fonction de la fréquence médiane, des intensités moyennes et de la tension appliquée. En bas : Dispersion des intensités des décharges en fonction de la fréquence médiane de répétition.

Le graphique du haut met en évidence des taux de répétitions faibles pour tous les enregistrements. De plus, ils contiennent un nombre relativement faible de décharges par rapport à la durée totale des enregistrements, avec des valeurs allant de 5 à 60 décharges. La périodicité des décharges est plus stable à mesure que la fréquence médiane des décharges augmente. Cela suggère qu'il y a une relation inverse entre la fréquence des décharges et la régularité de la période de répétition. En revanche, il n'y a pas de relation directe évidente entre la tension appliquée et la médiane des fréquences de répétitions des décharges. Les variations de tension ne semblent pas avoir un effet linéaire sur la fréquence des décharges.

En ce qui concerne l'amplitude moyenne des décharges, il n'y a pas de relation simple et directe observée. Cependant, il est intéressant de noter que la dispersion des amplitudes des décharges est importante dans les cas où la moyenne est inférieure à -13 mA. Cela suggère que ces décharges suivent un schéma de "burst", où elles se produisent par paquets avec des amplitudes variables.

Dans la section 3.2.2.2, les décharges positives bi-exponentielles sans résonance ont été étudiées. Certaines décharges ont été regroupées sous le nom de groupe A en fonction de leur périodicité. Ces décharges présentent un comportement similaire à celui des décharges corona réalisée en laboratoire, caractérisé par un état "burst". Cela se traduit par une faible fréquence de répétition des décharges. Dans le cas du groupe B, les décharges corona présentent des caractéristiques particulières, telles qu'une fréquence de répétition élevée et une intensité significative. Il est possible que ce soit la distance inter-électrode qui ne nous permettent pas de reproduire ce type de train d'impulsions. En effet, lorsque la tension atteint un certain seuil, un canal ionisé se forme entre les deux électrodes, ce qui rend impossible la production de décharges supplémentaires.

L'analyse des décharges positives révèle des caractéristiques et des comportements assez aléatoires lors de la variation de la tension. Une grande variabilité est observée au niveau de l'amplitude, de la périodicité et de la fréquence des décharges. Cependant,

on remarque une tendance générale d'augmentation de l'intensité maximale atteinte par certaines décharges avec l'augmentation de la tension.

4.2.2.3 Conclusion

Dans cette section, les caractéristiques et les comportements des décharges corona ont été examinés en fonction de la tension appliquée. L'analyse des décharges corona négatives a permis de retrouver le comportement régulier des impulsions de Trichel, largement documenté dans la littérature, qui s'intensifie avec le champ électrostatique. En revanche, l'étude des décharges corona positives a mis en évidence les différents mécanismes existant entre les deux polarités et a révélé une complexité dans la prédiction de leurs comportements. Il est important de noter que notre dispositif expérimental présente certaines limites pour reproduire fidèlement ce qui est observé en environnement naturel, principalement en raison de la distance inter-électrodes qui est limitée. Ainsi, nous avons décidé d'explorer l'impact de la distance inter-électrodes sur les décharges dans la section suivante.

4.2.3 Analyse de l'impact de la distances inter-électrodes sur les décharges corona

Un phénomène de blindage se produit pour les décharges positives lorsque la tension dépasse un certain seuil en laboratoire, ce qui met en évidence une des limites de l'expérimentation lorsqu'il s'agit de comparer les mesures effectuées en environnement naturel. Dans cette partie, la distance entre les électrodes est modifiée afin d'étudier l'effet sur les décharges corona dans les deux polarités en commençant par les décharges négatives.

4.2.3.1 Analyse de l'impact sur les décharges négatives

Des décharges ont été produites pour quatre espacements différents : 10 cm, 20 cm, 30 cm et 37 cm. Dans chaque configuration expérimentale, la tension a été progressivement augmentée pour chaque espacement afin d'obtenir des décharges corona. La première tension appliquée correspondait à celle permettant d'initier les décharges pour chaque espacement donné. La figure 4.13 présente les mesures de courant pour une décharge corona à la tension minimale requise pour déclencher les décharges, en fonction de chaque espacement inter-électrodes.

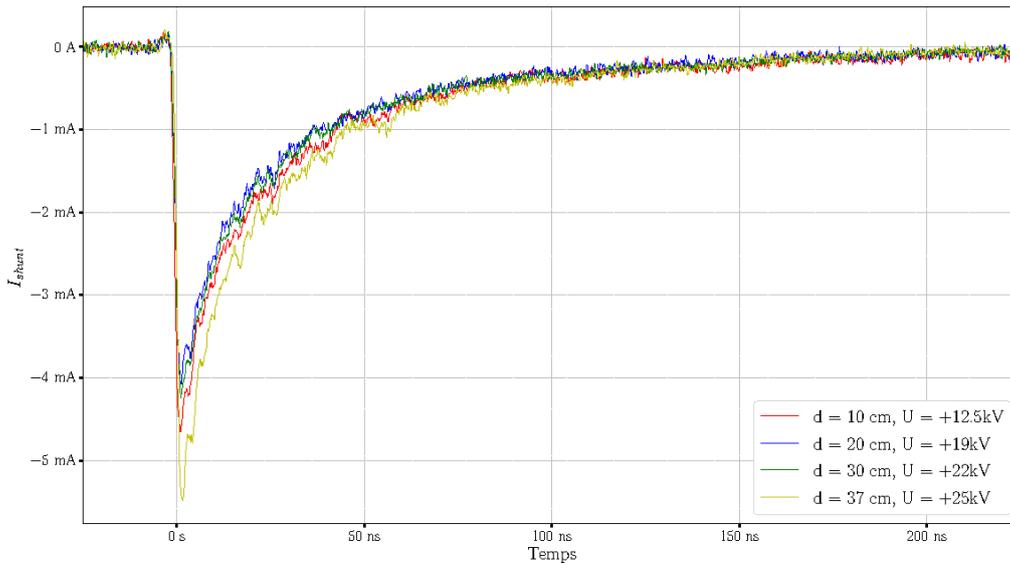


FIGURE 4.13 – Mesures de courant de décharges corona négatives pour différentes distance inter-électrode

Les intensités mesurées varient de -4 mA à -5.3 mA et augmentent avec l'augmentation de l'espacement inter-électrodes. Malgré cette variation, les décharges corona présentent des caractéristiques similaires.

Pour chaque espacement, la tension a été augmentée jusqu'à $+30$ kV afin d'étendre l'étude à plusieurs cas. Toutes les décharges corona mesurées pour les quatre espacements sont visibles sur la figure 4.14, présentant quatre graphes correspondant à chaque espacement. Dans chaque graphe, les courants corona mesurés sont représentés en fonction des tensions appliquées.

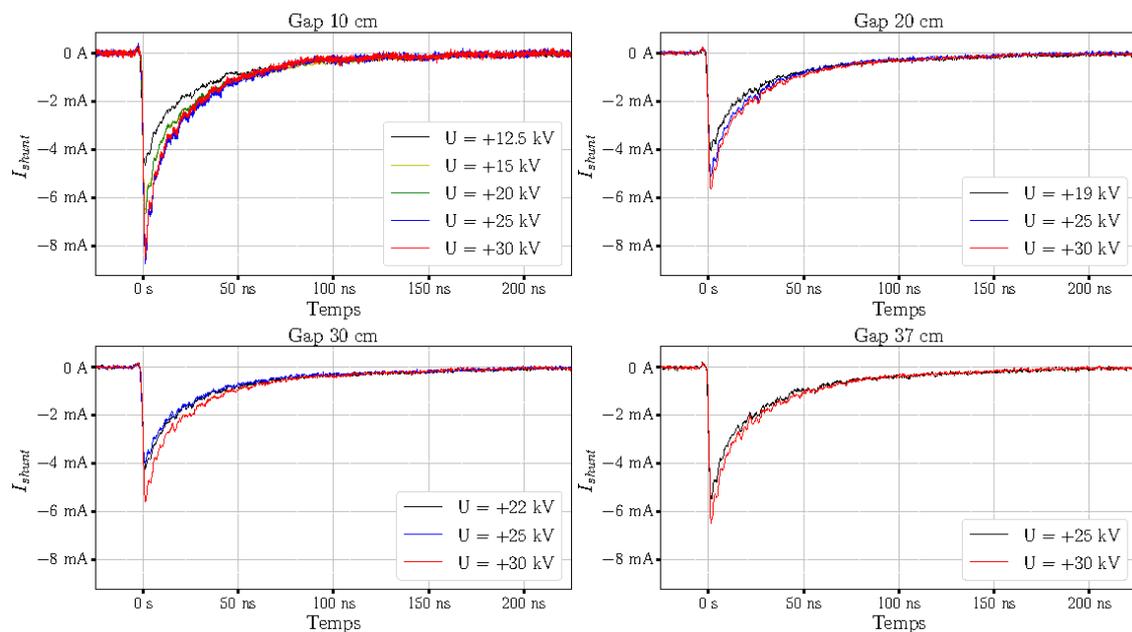


FIGURE 4.14 – Mesures de courant de décharges corona négatives pour différentes distance inter-électrode

Pour les espacements de 20 cm, 30 cm et 37 cm, les impulsions présentent des caractéristiques similaires avec des courants se situant dans une plage étroite, à quelques mA près. Cependant, pour l'espacement de 10 cm, des impulsions avec des courants plus élevés sont observées, atteignant jusqu'à 8 mA pour des tensions de +25 kV et +30 kV. Cette augmentation de l'intensité peut être expliquée par un rapprochement des conditions nécessaires à la création d'un arc électrique ou à la tension de claquage. En effet, le champ électrostatique est plus élevé dans ce cas, ce qui peut favoriser l'apparition d'un arc électrique et entraîner des courants plus importants.

L'étude de la fréquence des décharges pour les différents espacements a été réalisée et est présentée dans la figure 4.15. Cette figure met en évidence les fréquences des décharges en fonction de la tension appliquée et de la taille de l'espacement. Dans ce cas, nous nous concentrons directement sur les fréquences, car, comme nous l'avons observé précédemment, ce type de décharges présente une périodicité suffisante, avec des coefficients de variation inférieurs à 45%.

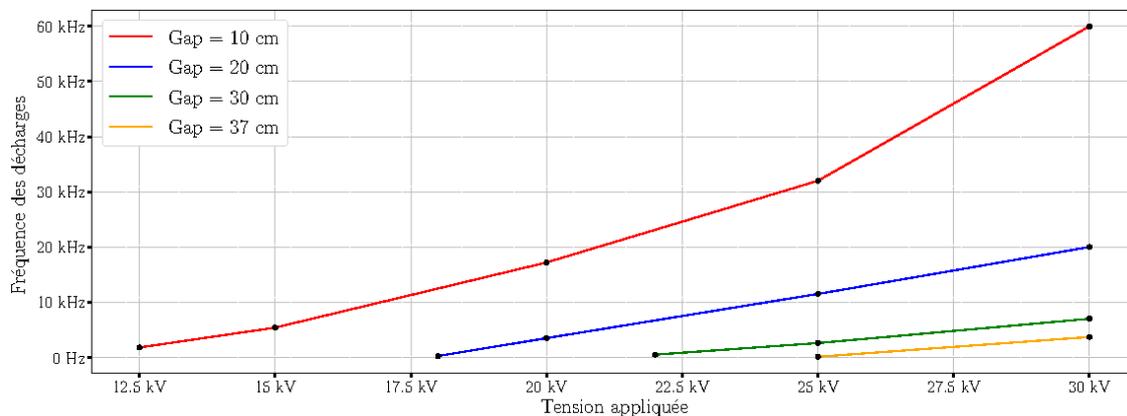


FIGURE 4.15 – Fréquences des décharges en fonction des tensions appliquées et des distance inter-électrodes

L'analyse de la fréquence de répétition des décharges en fonction de la tension appliquée et de la distance inter-électrode confirme que la fréquence augmente avec le champ électrostatique, indépendamment de la distance entre les électrodes. Cette observation est cohérente avec ce qui a été précédemment discuté.

Il est intéressant de noter que pour l'espacement de 10 cm et une tension de 30 kV, la fréquence de répétition atteint 60 kHz. Cela indique une augmentation plus rapide de la fréquence, ce qui suggère une transition vers un autre état de décharge. Il pourrait être intéressant d'analyser l'effet de la distance inter-électrode tout en maintenant un champ électrostatique constant et équivalent ou supérieur à l'espacement de 10 cm et à la tension de 30 kV. Cela permettrait de comprendre comment la distance entre les électrodes influence les caractéristiques des décharges corona dans ces conditions spécifiques. Cette étude n'est pas réalisée ici.

4.2.3.2 Analyse de l'impact sur les décharges positives

Les mêmes types de mesures ont été réalisés pour les décharges corona positives et sont présentés sur la figure 4.16. Ces décharges surviennent dans un intervalle de tension limité.

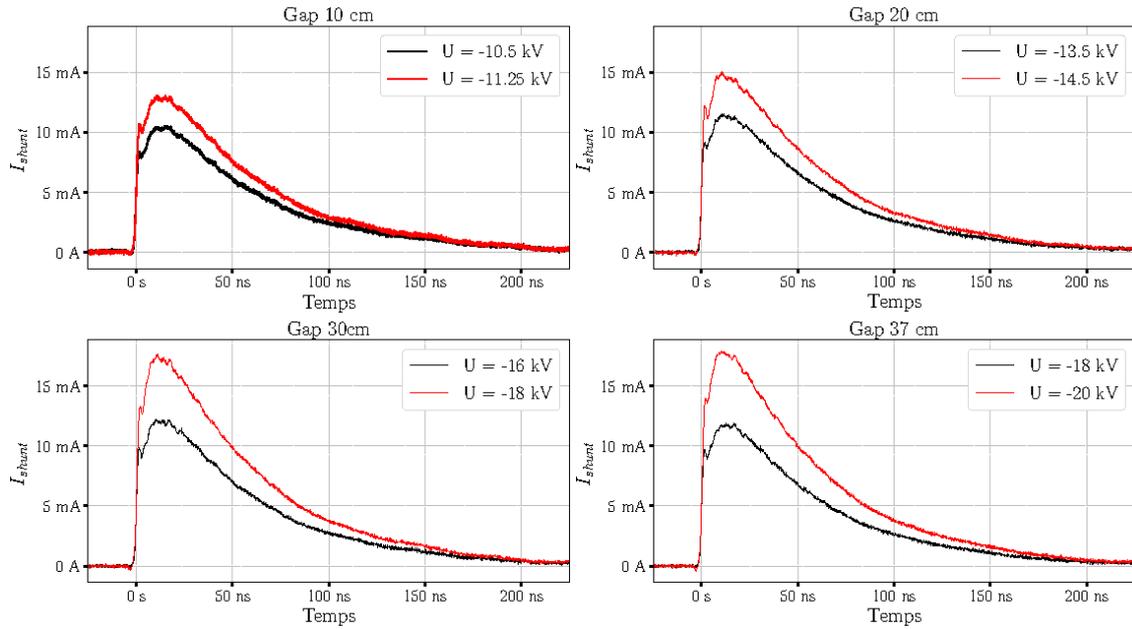
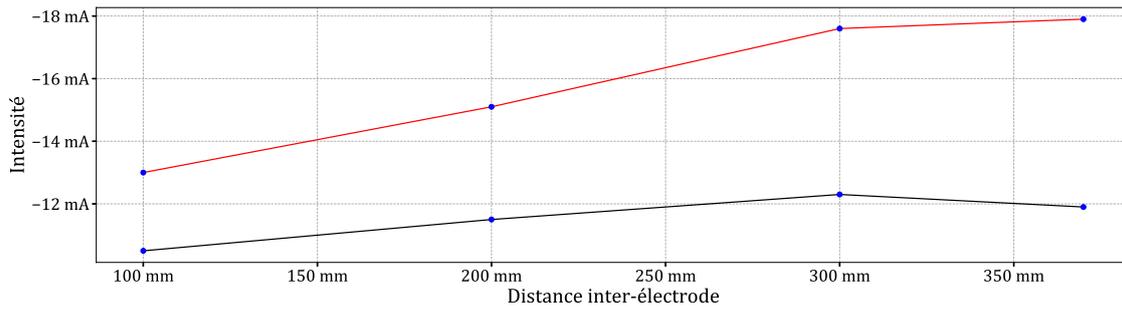


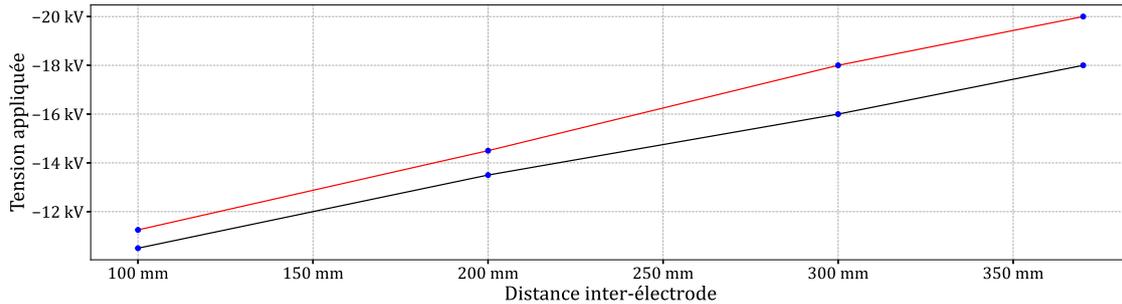
FIGURE 4.16 – Mesures de courant de décharges corona positives pour différentes distances inter-électrode

Dans le cas des décharges positives, les graphes montrent qu'il y a une augmentation de la tension lorsque la taille de l'espace est augmentée pour la tension correspondant à la condition limite supérieure d'apparition des décharges. L'intensité des décharges à la tension basse est équivalente pour chaque espacement.

Les figures 4.17a et 4.17b présentent les intensités des décharges et les tensions appliquées en fonction des décharges. La limite basse de la tension est représentée en noir, tandis que la limite haute est en rouge.



(a) Intensités des décharges en fonction de la distance inter-électrode



(b) Tensions limites pour initier des décharges en fonction de la distance inter-électrode

FIGURE 4.17 – Comparaison entre l’intensité des décharges et les tensions appliquées en fonction de la distance inter-électrode

L’analyse des graphiques montre une augmentation de l’amplitude des décharges corona avec l’augmentation de la distance inter-électrode.

Cette augmentation de l’intensité des décharges corona avec l’augmentation de la distance inter-électrode suggère que dans des environnements extérieurs où il n’y a pas de limite stricte de distance, il est possible d’observer des comportements bien plus intenses.

Dans cette partie, l’analyse de l’impact de la distance inter-électrode a révélé que, pour la polarité négative, cette distance n’avait pas d’effet significatif sur les décharges. Cela s’explique par le fait que les décharges négatives sont principalement déterminées par le champ électrostatique, et non par des conditions spécifiques liées à la distance inter-électrode. Ainsi, tant que le champ électrostatique atteint un seuil suffisant, les décharges peuvent se produire indépendamment de la distance entre les électrodes. En revanche, pour la polarité positive, des limites de tension ont été observées pour que les décharges puissent se produire. Cela indique qu’il existe des conditions spécifiques qui doivent être remplies pour l’amorçage des décharges positives. De plus, il a été constaté que plus la distance inter-électrode est grande, plus les intensités des décharges augmentent. Cela suggère que la distance inter-électrode peut jouer un rôle dans l’amplitude des décharges positives. Une autre limite de l’expérimentation est que les conditions qui se produisent dans le laboratoire sont plus stables que celles de l’environnement extérieur, qui peut faire face à des facteurs tels que la pluie et des variations du champ électrostatique en permanence.

4.2.4 Conclusion

L'étude expérimentale des décharges corona en laboratoire, en utilisant un shunt de mesure, a permis d'observer les décharges positives et négatives. L'analyse de l'effet de la tension appliquée a révélé un comportement homothétique de la décharge négative, tandis que la décharge positive a montré un comportement moins linéaire, confirmé par l'étude de la variation de la distance inter-électrode.

4.3 Étude des couplages entre la décharge corona et la maquette de pylône

Dans cette partie, l'analyse se concentre sur les couplages entre la décharge corona et la maquette de pylône. Les mesures de courant à la base de la pointe sont examinées et comparées à celles obtenues avec un shunt. Le courant mesuré à la base du pylône est également analysé pour étudier les interactions entre la décharge et la structure du pylône.

4.3.1 Analyse des mesures de courant corona à la base de la pointe

Cette partie a pour objectif d'analyser le courant corona mesuré à la base du paratonnerre. Pour cela, le courant mesuré à la base de la pointe est comparé avec celui mesuré à l'aide du shunt, afin d'analyser la présence éventuelle de comportements oscillatoires au niveau de la pointe, similaires à ceux observés dans les mesures effectuées sur le pylône extérieur. Ensuite, une analyse spectrale de ces courants est réalisée. Dans un premier temps, les décharges de polarité négative sont étudiées. Ensuite, les décharges de polarité positive sont étudiées de la même manière avec une comparaison entre les 2 polarités.

4.3.1.1 Étude des décharges négatives

Ici, la comparaison entre le courant mesuré par le shunt et par la sonde de courant à la base de la pointe est réalisée pour les décharges négatives en reprenant les conditions de la mesure présentée dans la section 4.2.1. La figure 4.18 présente, en bleu, la mesure obtenue avec le shunt et, en rouge, la mesure de la sonde Pearson, placée à la base de la pointe.

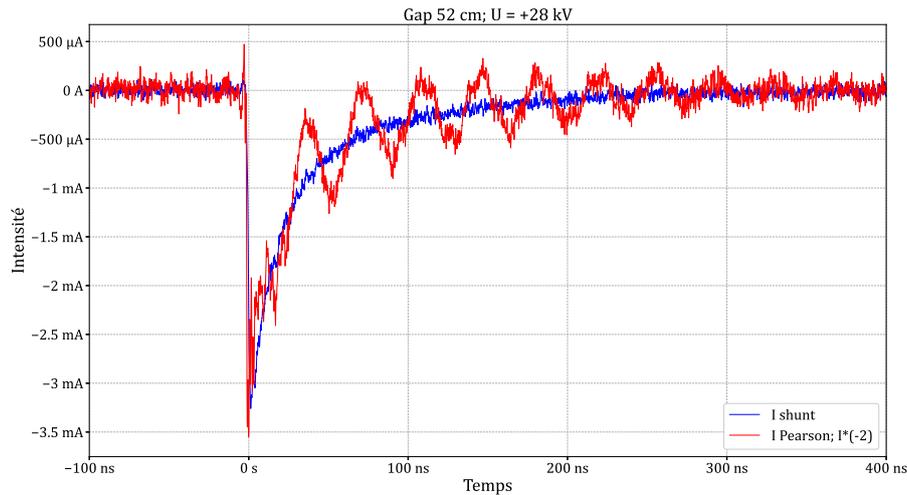


FIGURE 4.18 – Mesure de courant de décharge corona négative

Le courant à la base de la pointe mesuré lors de ces décharges négatives atteint environ -3.5 mA et présente une oscillation. Ce comportement a été observé en environnement naturel lors de décharges négatives avec résonance.

Dans le but d'étudier la fréquence de résonance excitée par la décharge, le spectre de la décharge élémentaire est représenté sur la figure 4.19. Ce graphique présente le module du spectre des courants mesurés à l'aide du shunt et ceux mesurés à l'aide de la sonde Pearson.

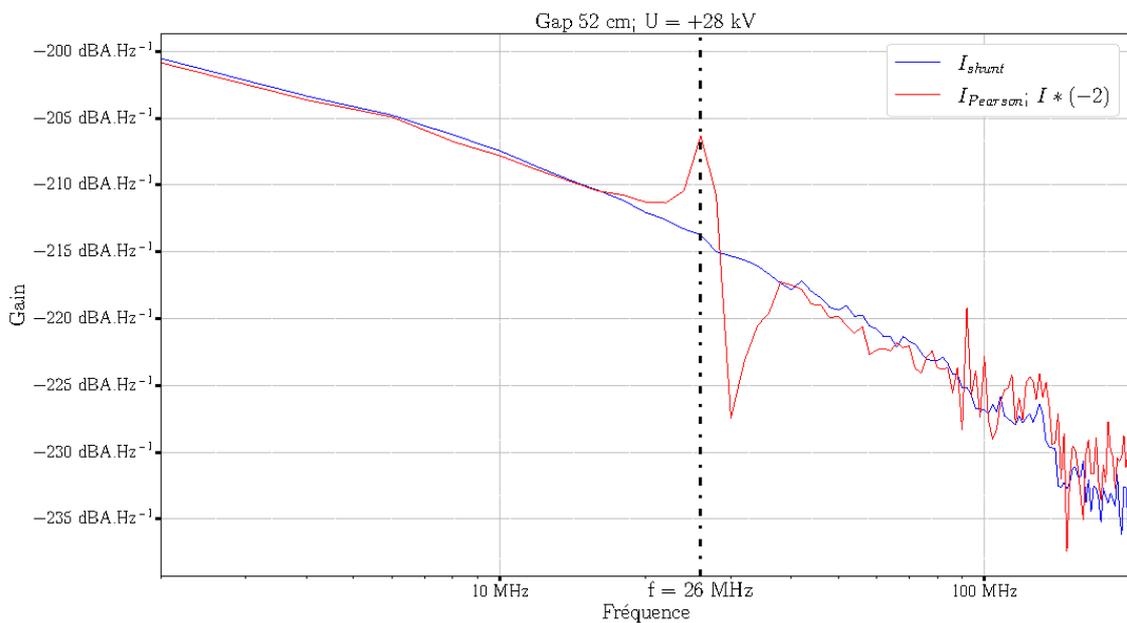


FIGURE 4.19 – Module du spectre du courant d'une décharge corona négative

La courbe montre une fréquence de résonance à 26 MHz, correspondant à une période de 38 ns, ce qui correspond bien à l'oscillation visible sur la figure 4.18.

Cela peut correspondre à une résonance quart d'onde d'un système d'une taille d'en-

viron 2.90 m. Le système entier, comprenant la pointe, la maquette de pylône et la tresse reliant le pylône à la masse, mesure au total 2,10 m. Cette dimension étant du même ordre de grandeur, cela montre que cette fréquence de résonance peut correspondre au système tout entier. Il est également possible que l'environnement du laboratoire impacte la mesure, car la salle dans laquelle se situe l'expérimentation est de l'ordre de grandeur de quelques longueurs d'onde.

4.3.1.2 Étude des décharges positives

L'étude de la décharge corona positive montre également une oscillation à la base de la pointe, comme le montre la mesure de courant de la sonde Pearson présentée sur la figure 4.20.

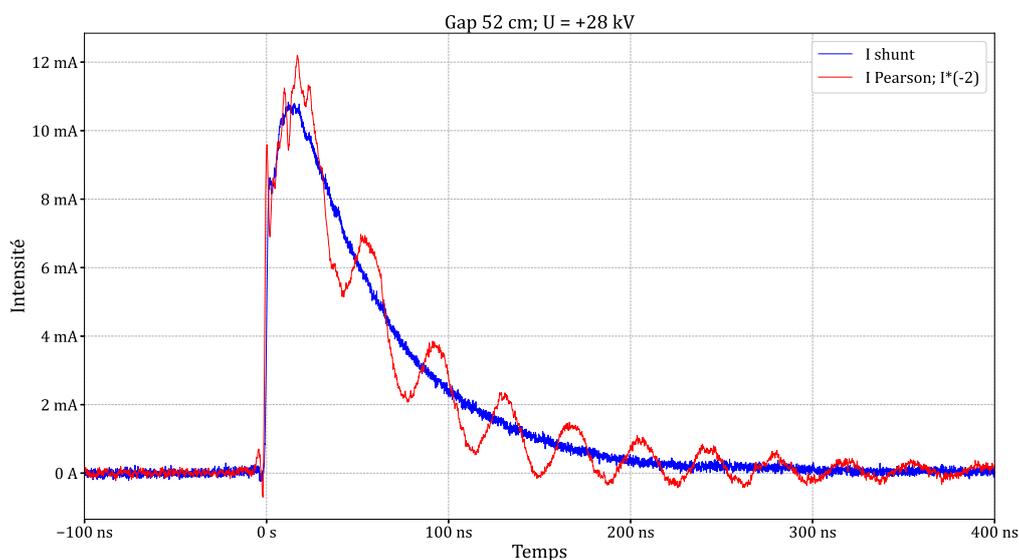


FIGURE 4.20 – Mesure de courant de décharge corona positive

Le courant à la base atteint une intensité de 12 mA et de nouveau, il y a une oscillation qui dure pendant toute la descente du courant de la décharge. Une oscillation du même type a d'ailleurs été observé dans le cas du pylône extérieur dans le cas de décharge avec des front de montée rapide.

Les spectres de la décharge négative en rouge et la décharge positive en bleu sont comparés sur la figure 4.21.

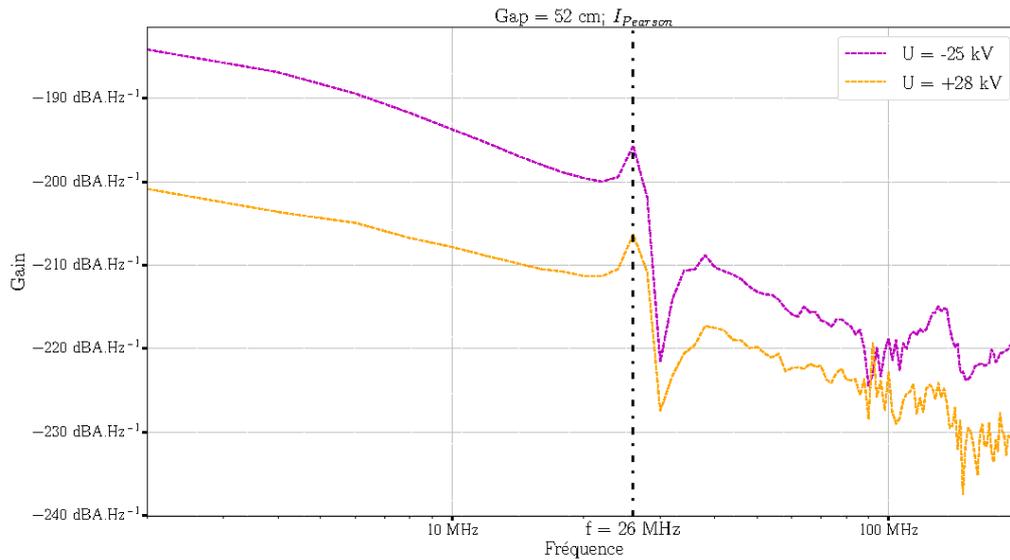


FIGURE 4.21 – Spectre des modules des courants mesurés à la base de la pointe

Ce graphique permet de voir que les 2 décharges ont la même fréquence de résonance de $f = 26$ MHz. Cette résonance ne dépend donc pas de la polarité de l'impulsion.

En se plaçant à la base de la pointe, à 23 cm, le courant subit un comportement résonnant provenant du système entier. Dans le cas du pylône extérieur, les fréquences de résonance observées se rapprochaient plus de la longueur du paratonnerre. Néanmoins, cela montre que les décharges se couplent facilement avec la structure ou des parties de la structure du pylône.

Dans cette section, les décharges mesurées à la base de la pointe ont été analysées pour les deux polarités. L'analyse a révélé la présence de résonances au niveau de la pointe, suggérant une excitation du système dans son ensemble. Dans la partie suivante, l'attention est portée sur le comportement résonnant du pylône afin de déterminer les fréquences de résonance qui lui sont associées.

4.3.2 Analyse comportementale des fréquences de résonance de la maquette du pylône

Dans cette section, une analyse comportementale des fréquences de résonance du pylône est réalisée afin de comparer celle-ci avec les mesures de courant à la base. Pour ce faire, l'utilisation de l'analyseur de réseaux E5061B ENA Vector Network Analyzer permet d'obtenir la matrice S du pylône, permettant de décrire le comportement électrique du pylône. Deux transformateurs de courant sont placés autour du câble de masse qui va être considéré comme les ports 1 et 2 du pylône, comme illustré dans la figure 4.22.



FIGURE 4.22 – Photo des transformateurs de courants utilisés pour mesurer la matrice S du pylône

Le transformateur de courant noir est utilisé comme source de tension au niveau du port 1, en effet l'analyseur de réseau injecte un courant dans ce transformateur, qui est ensuite converti en tension. Cette source de tension fait résonner le pylône et l'autre transformateur de courant est utilisé pour mesurer le courant à la base de la maquette au niveau du port 2. Si l'un des transformateurs avait été positionné au niveau de la source des décharges, c'est-à-dire sur la pointe, cela aurait généré une boucle qui aurait introduit des perturbations dans la mesure.

Pour connaître le comportement résonant de la maquette de pylône, il est nécessaire de mesurer le paramètre S_{21} correspondant au coefficient de transmission direct lorsque la sortie est adaptée. En mesurant S_{21} , l'amplitude et la phase du signal transmis à travers le pylône sont évalués à différentes fréquences. Cela permet de visualiser les variations de la transmission du signal en fonction de la fréquence et d'identifier les fréquences de résonance du pylône, où la transmission est maximale ou présente des pics particuliers.

La figure 4.23 présente les S_{21} de la maquette pour trois positions de la plateforme élévatrice. La position basse, où le pylône est à 17 cm du sol, est représentée en bleu, la position haute à 38 cm du sol est représentée en rouge, et la position intermédiaire est représentée en vert.

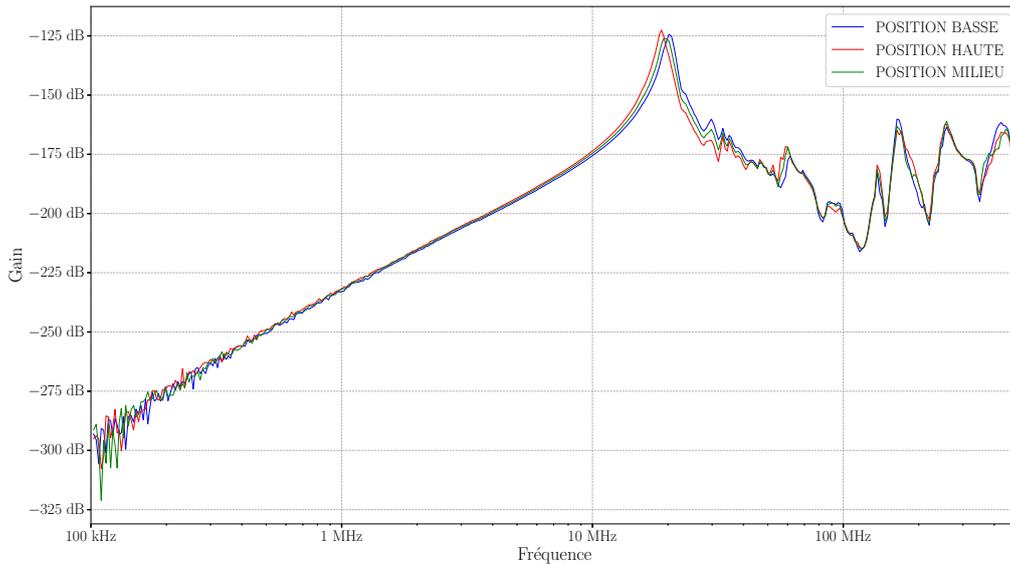


FIGURE 4.23 – S_{21} de la maquette de pylône pour 3 positions verticales de la plate-forme élévatrice

Une observation importante est la présence d’une fréquence de résonance d’environ 20 MHz. Cette fréquence correspond à la résonance de la maquette de pylône et de la plate-forme élévatrice. La fréquence de résonance observée à la base du pylône diffère de celle présente sur la figure 4.21, car la mesure est effectuée à la base du paratonnerre lorsque la maquette est directement posée sur le sol. Le graphique présenté sur la figure 4.24 est un zoom du graphique précédent, focalisé sur la fréquence de résonance.

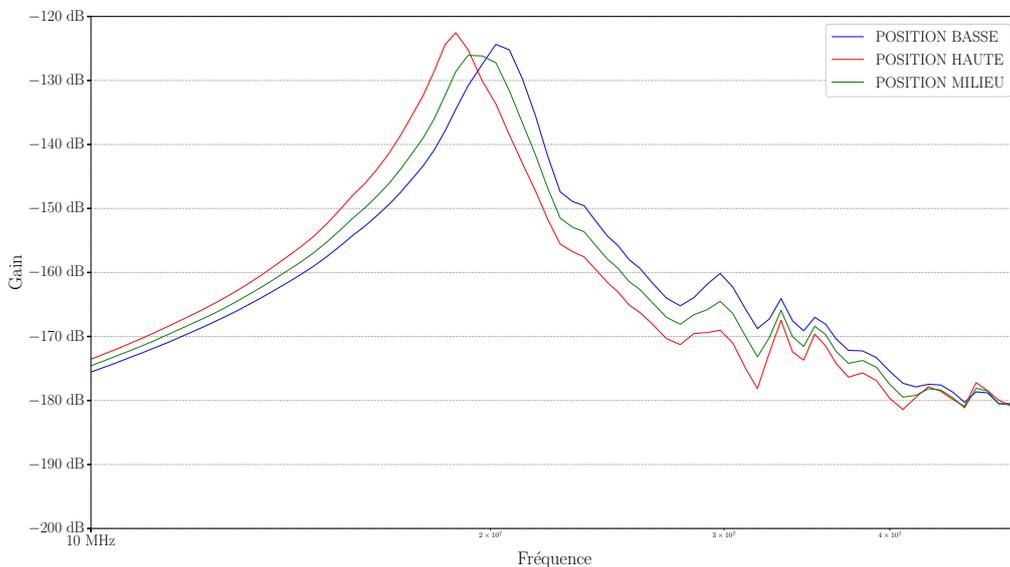


FIGURE 4.24 – Zoom sur les mesures de S_{21} de la maquette de pylône

La fréquence de résonance varie entre 18 MHz et 21 MHz pour les différentes positions de la plateforme. Ces résultats mettent en évidence une fréquence de résonance du système entier, comprenant la maquette, la plateforme et le câble de masse. Cette fréquence de résonance se rapproche de celle observée sur la figure 4.21. De plus, l’analyse des différentes

positions de la plateforme met en évidence un effet de celle-ci sur la fréquence de résonance. En effet, la fréquence de résonance varie de quelques MHz en fonction de la position de la plateforme.

La figure 4.25 présente les S_{21} de la maquette en position basse avec la pointe (en bleu) et sans la pointe (en rouge).

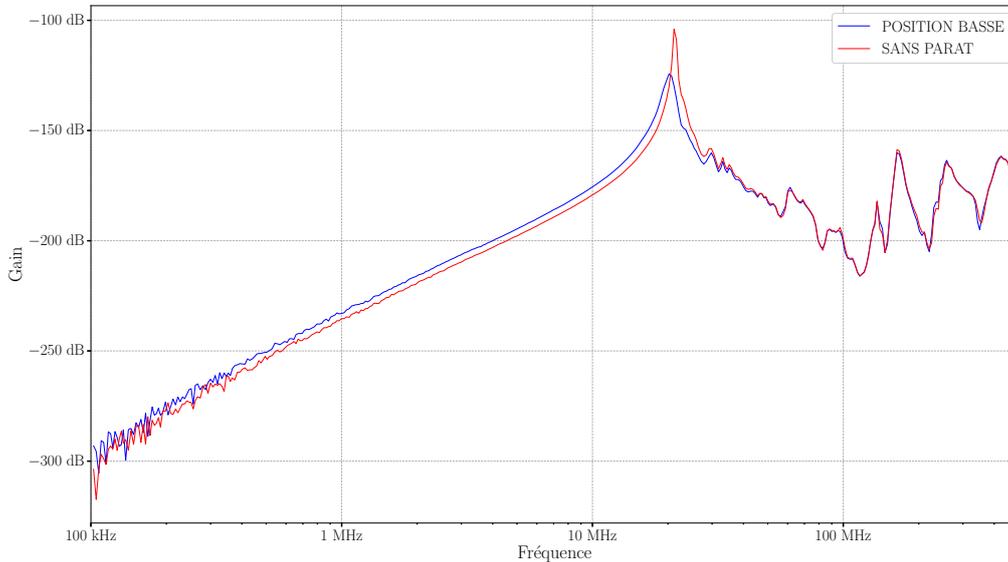


FIGURE 4.25 – S_{21} de la maquette de pylône avec ou sans pointe

Cette comparaison met en évidence l’effet de la présence de la pointe sur la fréquence de résonance du système. Un décalage d’environ 3 MHz vers des fréquences plus élevées est observé pour la maquette sans pointe par rapport à celle avec la pointe. De plus, le niveau de gain est également plus élevé pour la maquette sans pointe, avec une valeur de -105 dB, tandis qu’il est de -121 dB pour la maquette avec pointe. Ces observations suggèrent que la présence de la pointe modifie les caractéristiques de résonance du système, tant au niveau de la fréquence que du niveau de gain.

Dans cette section, le S_{21} de la maquette de pylône a été mesuré en prenant en compte la plateforme élévatrice et le câble de masse dans plusieurs cas. Cette mesure permet d’évaluer le comportement résonant du système dans son ensemble, en tenant compte des interactions entre les différents éléments. Dans la section suivante, l’analyse des courants mesurés à la base de la maquette lors de décharges corona produites à la pointe est effectuée.

4.3.3 Analyse des courants mesurés à la base du pylône

Dans cette partie, l’étude porte sur les courants mesurés à la base du pylône, permettant ainsi de mettre en évidence le lien de causalité entre le courant corona au niveau du paratonnerre et le courant à la base du pylône. Cette mesure permet également d’analyser les couplages entre les décharges corona et la structure du pylône.

4.3.3.1 Lien de causalité pointe base

Dans cette section, l'objectif est de montrer que toutes les décharges corona se produisant sur le pylône peuvent être observées grâce à la mesure de courant à la base de la maquette.

Pour cette étude, deux pointes sont placées en concurrence en haut du pylône, comme le montre la figure 4.26. L'une des pointes est équipée du shunt de mesure pour enregistrer le courant, tandis que l'autre pointe est placée sans shunt.



FIGURE 4.26 – Photo des pointes en concurrence

La taille de la pointe qui n'a pas le shunt est plus grande pour obtenir des décharges différentes, afin de pouvoir les distinguer à la base. De plus, la distance entre les pointes est suffisamment grande pour que l'effet de pointe soit conservé pour chaque pointe.

La figure 4.27 présente en haut le courant mesuré au niveau du shunt et en bas le courant mesuré à la base de la maquette.

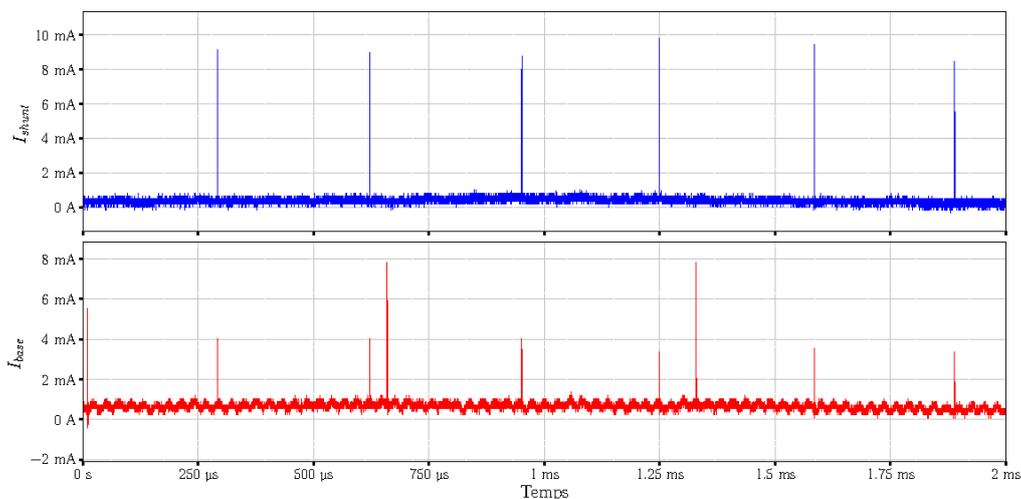


FIGURE 4.27 – Mesures de courant de train d'impulsions ; en haut : au niveau de la pointe ; en bas : à la base de la maquette

Le graphique à la base permet de distinguer deux catégories d'impulsions, l'une à 8 mA et l'autre à 4 mA. Les impulsions d'une amplitude de 4 mA sont bien corrélées avec la mesure réalisée par le shunt. Les autres impulsions correspondent aux impulsions de courant qui se produisent sur l'autre pointe. En effet, il a été observé que lorsque la deuxième pointe était retirée, les impulsions d'une amplitude de 8 mA disparaissaient.

Il est également possible de remarquer que la fréquence d'apparition des décharges n'est pas la même, elle est plus lente pour les impulsions ayant une intensité de 8 mA. Cela montre également que le comportement des décharges dépend bien de la pointe utilisée.

Dans cette section, il a été constaté que toutes les impulsions de courant générées sur le pylône sont bien captées par la mesure de courant effectuée à la base. La section suivante s'intéresse alors au couplage entre la décharge corona et la maquette de pylône.

4.3.3.2 Analyse du couplage entre la décharge et la maquette de pylône

Dans cette section, le comportement du courant à la base de la maquette face à une décharge corona déclenchée sur la pointe est étudié. Cela permet de déterminer les niveaux de couplage entre la décharge et la structure.

La décharge corona, avec son spectre large bande, peut se coupler avec des éléments du système. Dans le chapitre 3, une mesure a été réalisée à la base du pylône pour évaluer l'activité radioélectrique, mais cette mesure n'a pas pris en compte l'ensemble des courants circulant à la base, comme cela a été expliqué dans la section 2.4. Pour l'expérimentation en laboratoire, la maquette est reliée à la masse au moyen d'un câble métallique instrumenté avec une sonde, permettant ainsi de mesurer l'ensemble des courants à la base du pylône.

Dans un premier temps, une mesure de courant est effectuée pour une tension négative de -25 kV dans les mêmes conditions que dans la section 4.2.1. Les mesures de courant du shunt et de la sonde placée à la base sont présentées sur la figure 4.28. Les deux mesures sont synchronisées au niveau temporel pour pouvoir comparer leurs caractéristiques visuellement.

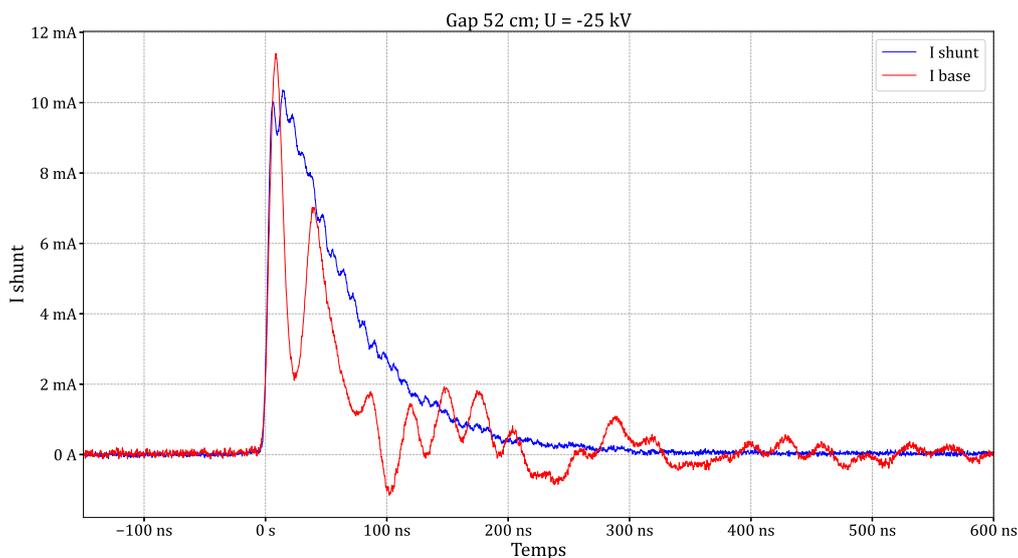


FIGURE 4.28 – Mesures de courant d'une décharge positive

Le courant à la base atteint une intensité maximale de 11.4 mA, tandis que la mesure de courant au niveau du shunt est de 10.3 mA. Des oscillations sont observées sur le courant à la base, toutefois, les temps de montée et de descente restent similaires à la mesure. Cette différence d'intensité est probablement liée à ces oscillations. La durée de l'événement à la base est également plus longue en raison des oscillations.

La réponse fréquentielle présentée sur la figure 4.29 montre les modules des spectres de tous les courants mesurés afin de les comparer. Le spectre du courant à la base est plus faible que les autres courants pour les fréquences allant jusqu'à 5 MHz. Cela signifie que l'intensité mesurée au niveau de la base est globalement inférieure à celle mesurée à la pointe.

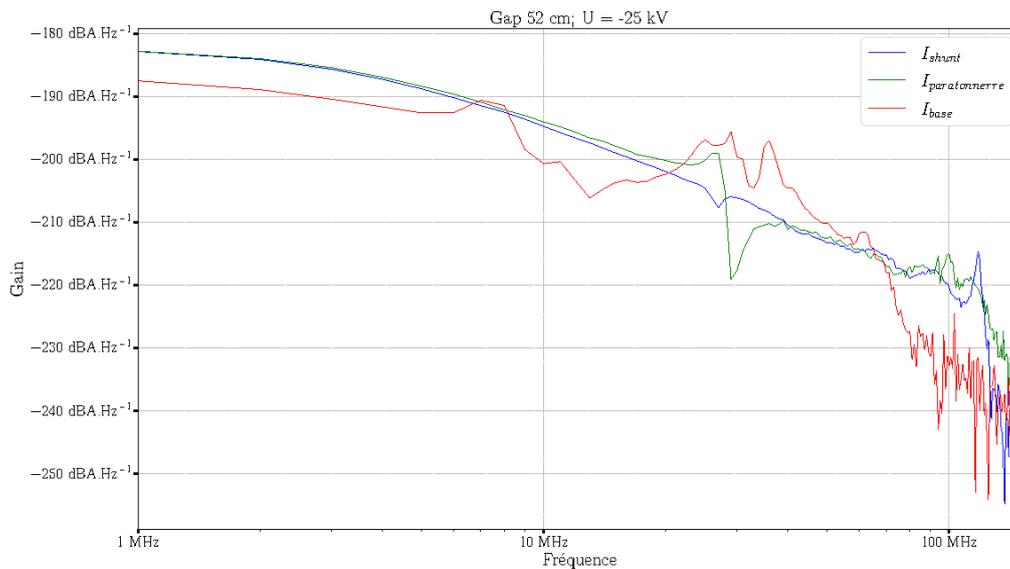


FIGURE 4.29 – Spectre des modules des courants d'une décharge positive

Les spectres fréquentiels du graphique indiquent des fréquences de résonance à environ 7 MHz, 26 MHz et 35 MHz. La fréquence à 26 MHz est commune avec la fréquence de résonance à la base de la pointe et représente la résonance du pylône et de la pointe. Le module du courant est atténué à partir de 70 MHz.

La même étude est réalisée pour la décharge corona négative avec une tension de +30 kV dans des conditions similaires. Les mesures de courant réalisées par le shunt de mesure et la sonde placée à la base du pylône sont présentées sur la figure 4.30.

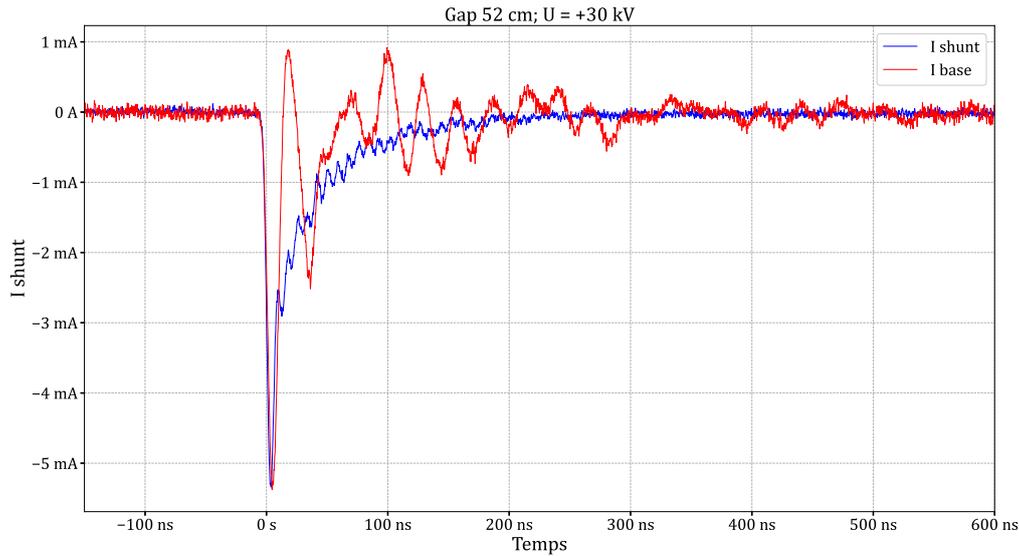


FIGURE 4.30 – Mesures de courant d'une décharge négative

Le courant à la base du pylône présente à nouveau de fortes oscillations, avec une première période d'oscillation qui change la polarité du courant, comme cela a été observé lors de certaines mesures en environnement naturel. Le comportement du courant à la base lors d'une décharge négative est similaire à celui observé pour une décharge positive, comme indiqué sur la figure 4.28.

Les comportements des courants étant assez similaires, leurs spectres sont comparés comme pour la section 4.3.1. Les réponses fréquentielles des modules des courants mesurés à la base pour les tensions de -25 kV et $+30$ kV sont présentées sur la figure 4.31.

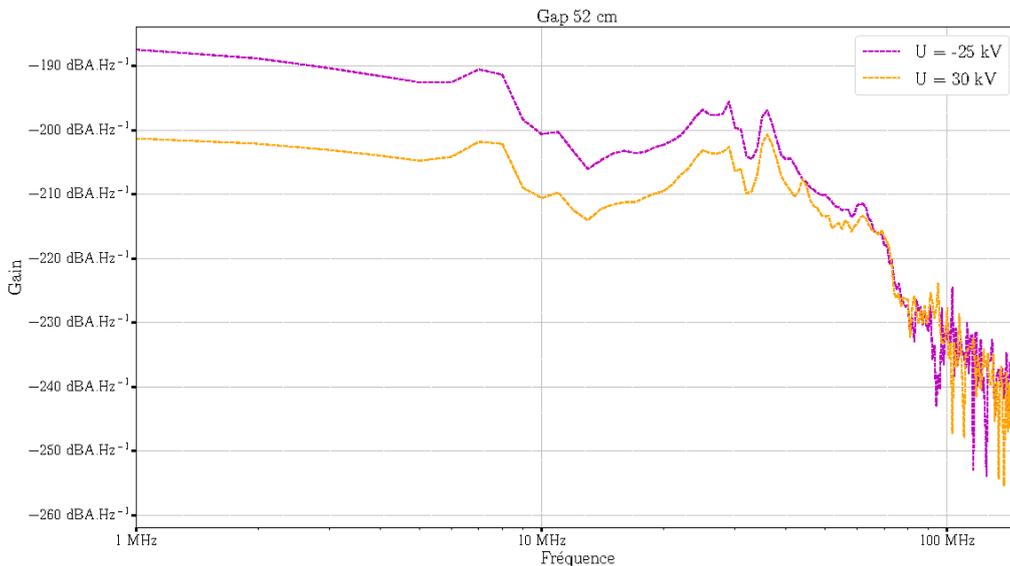


FIGURE 4.31 – Spectre des modules des courant à la base du pylône pour les 2 polarités de décharges

Une différence de plus de 10 dB est observée entre les 2 polarités, correspondant à la

différence d'intensité. Cependant, il est constaté que les mêmes fréquences de résonance sont retrouvées pour les deux polarités.

Ces mesures montrent qu'il existe une fonction de transfert pour l'ensemble du système lorsque le courant est mesuré à la base. Cette fonction de transfert est obtenue en divisant la sortie par l'entrée, c'est-à-dire la mesure au niveau du shunt. La figure 4.32 présente la fonction de transfert obtenue avec une décharge positive et une décharge négative.

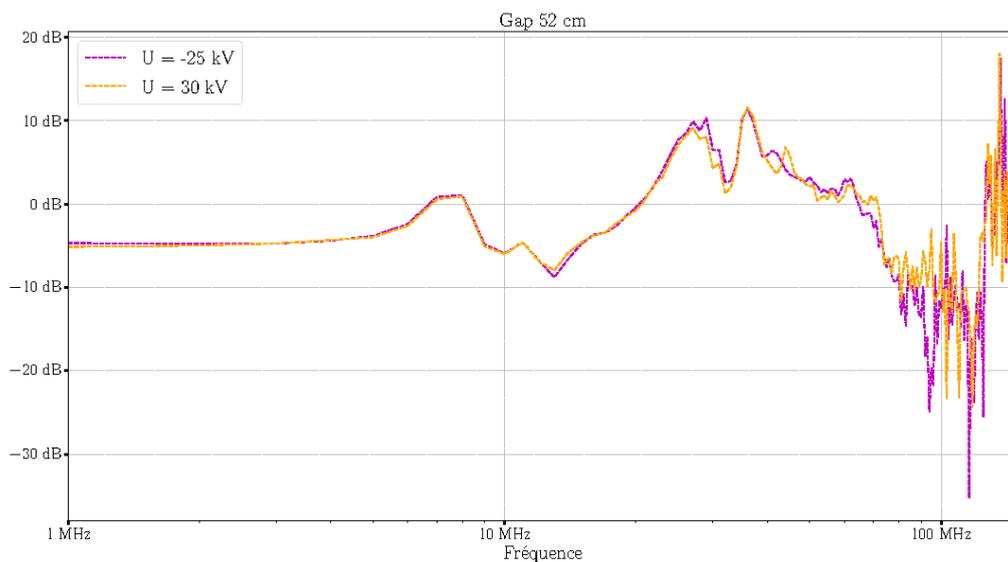


FIGURE 4.32 – Spectre des modules des courants à la base du pylône pour les 2 polarités de décharges

Les graphiques montrent que les fonctions de transfert sont similaires pour la plupart des fréquences. Les différences les plus importantes apparaissent entre 80 et 120 MHz. Cependant, à ces fréquences, le signal est bruité, probablement en raison de l'environnement de mesure, ce qui ne permet pas de comparer les deux mesures de manière fiable.

La figure 4.32 met en évidence trois résonances distinctes : une entre 7 et 8 MHz, une vers 26 MHz (correspondant probablement à la résonance observée dans la figure 4.23) et une autre à 35 MHz. Ces résonances indiquent que la décharge corona excite d'autres modes de résonance de la maquette de pylône.

La mesure effectuée à la base du pylône fournit des informations sur son activité radio-électrique en quantifiant les décharges qui s'y produisent à travers toutes les impulsions mesurées. Le courant qui circule à travers la structure du pylône est soumis à une fonction de transfert qui peut être déterminée à partir du spectre des décharges. Cependant, il est important de noter que le courant mesuré à la base du pylône présente une diminution de 3 dB par rapport à la mesure shunt, ce qui montre qu'il y a une différence de niveau significative entre la base et le sommet de la structure.

Dans cette partie, l'analyse du courant à la base de la maquette du pylône a révélé plusieurs comportements résonants, en plus de celui observé au niveau de la pointe. Cela suggère que la décharge excite d'autres parties du pylône, en plus de la pointe elle-même.

4.3.4 Conclusion

Dans cette section, une analyse du courant à la pointe a révélé un comportement résonant de l'ensemble du système, qui était commun pour les deux polarités de décharge. Une analyse des fréquences de résonance de la maquette a ensuite été réalisée montrant que le comportement résonant correspondait à l'excitation de la fréquence de résonance du pylône. Ensuite, une analyse du courant à la base de la maquette a révélé d'autres fréquences de résonance excitées par la décharge, démontrant ainsi que la décharge peut exciter différentes fréquences. Ces résultats sont en accord avec ce qui a été observé dans la section 3.3.4 concernant l'analyse spectrale des décharges avec résonance.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'expérimentation a été réalisée pour produire des décharges corona dans une configuration pointe-plan, et les instruments de mesure, dont un shunt pour mesurer le courant au plus proche de l'extrémité de la pointe, ont été présentés. Cette expérimentation a permis de mettre en évidence les différents comportements des décharges corona en fonction de plusieurs paramètres, notamment la fréquence de répétition, qui est un indicateur fort pour déterminer si le champ électrostatique est élevé pour les décharges négatives.

Ce chapitre a également montré les limites de l'expérimentation, notamment la distance inter-électrode, ainsi que la difficulté de reproduire les conditions extérieures affectées par la pluie, le vent et les variations du champ électrostatique.

Une étude de couplage de la décharge a également mis en évidence des couplages de la décharge avec le système au niveau de la base de la pointe. Enfin, après avoir montré le lien de causalité entre les décharges sur la maquette et le courant à la base, il a été constaté qu'il y avait d'autres comportements résonants indépendants de la polarité, indiquant que la décharge excitait d'autres éléments du pylône, tels que les barreaux horizontaux ou autres.

Dans le chapitre suivant, les résultats obtenus dans les deux derniers chapitres seront utilisés pour réaliser des simulations électromagnétiques afin de concevoir un outil d'analyse des couplages entre les décharges corona et les antennes VHF.

Chapitre 5

Étude des niveaux de couplage entre les décharges corona et une antenne VHF par simulation

Les deux précédents chapitres ont présenté des données importantes sur les décharges corona, tant en laboratoire qu'en environnement naturel. Les niveaux de couplage ont été observés dans le cas de l'étude en environnement naturel qui pose des défis particuliers en raison des dimensions du pylône en question.

Ce chapitre se concentre sur l'évaluation des niveaux de couplage entre une décharge corona élémentaire au niveau du paratonnerre et une antenne VHF du pylône extérieur. L'objectif est de déterminer si une décharge corona se produisant à distance peut perturber le fonctionnement de l'antenne.

Dans la première section 5.1, deux approches différentes pour modéliser les décharges corona sont étudiées, afin de déterminer laquelle est la plus adaptée à notre problème. Ensuite, la deuxième section 5.2 de ce chapitre détaille la modélisation de la décharge corona à l'aide d'un modèle électrique. Les différentes composantes du modèle électrique sont expliquées, notamment l'utilisation d'un circuit RLC en régime apériodique pour reproduire les caractéristiques des décharges positives et négatives. Puis, les simulations sont réalisées dans la section 5.3 afin de confronter le modèle électrique aux mesures expérimentales effectuées en laboratoire. Enfin, la section 5.4 présente les simulations réalisées sur le pylône extérieur et examine également les niveaux de couplage observés sur l'antenne en simulation et les compare à ceux obtenus avec les expérimentations.

5.1 Présentation des deux approches permettant de modéliser les décharges corona

Dans cette section, deux approches sont présentées pour modéliser le problème. La première approche consiste à utiliser un outil de simulation physique des décharges qui permet de représenter la décharge corona en détail en prenant en compte les mécanismes complexes qui se produisent lors de la décharge. La seconde approche consiste à utiliser un outil de simulation radiofréquence qui permet de calculer le champ électromagnétique

rayonné et d'étudier les couplages avec des structures environnantes, mais qui ne dispose pas d'une source propre permettant de modéliser la décharge corona.

L'objectif de cette section est de souligner que notre problème, de nature multiphysique, implique des phénomènes physiques complexes et interconnectés. En conséquence, il est nécessaire de faire des choix appropriés pour sélectionner les outils de modélisation adaptés à notre problème spécifique.

5.1.1 Présentation d'une méthode de simulation physique des décharges

Dans cette section, la méthode présentée permet de simuler la physique des décharges. La simulation utilise une méthode qui résout numériquement l'équation de Poisson, une équation aux dérivées partielles qui lie le champ électrique à la distribution spatiale de la charge électrique. Cette méthode est capable de simuler le comportement des plasmas, en prenant en compte l'ionisation, la recombinaison et d'autres processus pertinents. Elle prend en considération la différence de mobilité entre les ions et les électrons, où un pas de temps pour les ions équivaut à 10 pas de temps pour les électrons ce qui permet de résoudre efficacement l'évolution des plasmas en tenant compte des mouvements de chaque espèce de particules.

Pour réaliser cette résolution, nous avons à notre disposition le code COPAIER [61] conçu par l'ONERA. Il peut être utilisé pour déterminer la distribution spatio-temporelle de la densité d'électrons et d'ions, ainsi que l'évolution de la température électronique. Il permet également d'examiner l'intensification du champ électrique entre les électrodes, de comprendre l'impact de la décharge corona sur le champ électrique et d'analyser comment celui-ci peut être amplifié près des électrodes en résolvant l'équation de Poisson. Le code permet également de calculer la charge locale créée par le plasma et les potentiels appliqués aux électrodes.

Un exemple de calcul du module du champ électrostatique ainsi que la charge local est illustré sur les figures 5.1a et 5.1b.

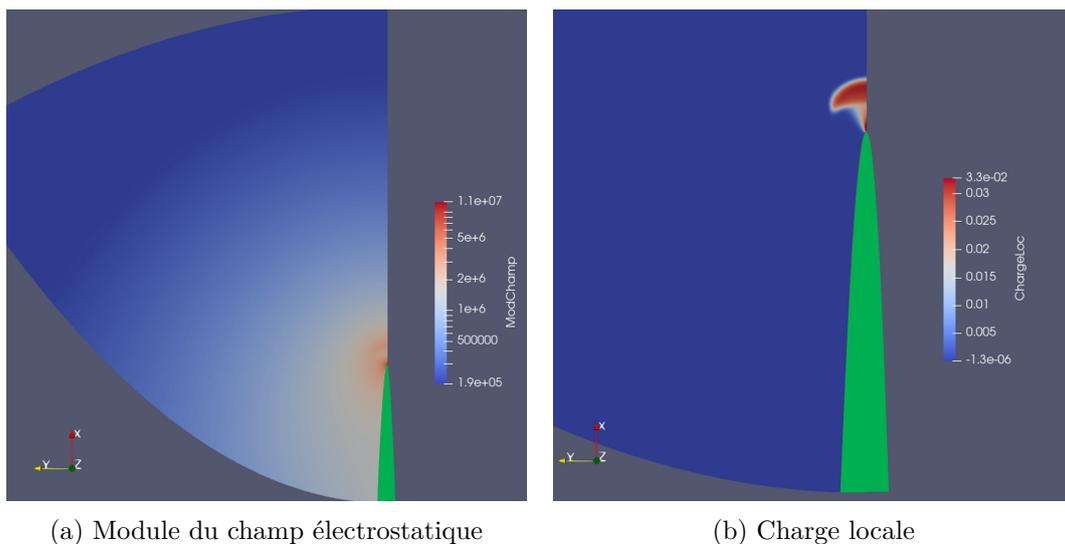


FIGURE 5.1 – Module et charge locale d'une simulation réalisée avec le code COPAIER

Ces exemples ont été obtenus à l'instant $t = 2.25 \mu\text{s}$ obtenu par simulation sur une

pointe elliptique de demi axe $a = 25$ m et $b = 0.03$ m, colorée en vert sur la figure, pour un potentiel de $+18$ kV au niveau de l'électrode active. Le champ électrostatique permet de voir l'effet de pointe et la charge locale permet de voir le début de l'avalanche électronique dans la zone où la présence de charge est élevée.

Une des limitations du code COPAIER pour résoudre le problème des interférences générées par les décharges corona sur les systèmes sol de communication aéronautique réside dans la taille des mailles utilisées dans les simulations. En effet, il est nécessaire d'utiliser des mailles de l'ordre du micromètre en raison de la faible longueur de Debye qui a un ordre de grandeur de $10 \mu\text{m}$ pour les plasmas de décharges [62]. La figure 5.2 illustre le maillage utilisé pour simuler des décharges à proximité d'une pointe. Ce maillage représente le milieu entre deux électrodes, où l'une d'entre elles est une pointe et l'autre est une ellipse qui sert de ligne de champ équipotentielle.

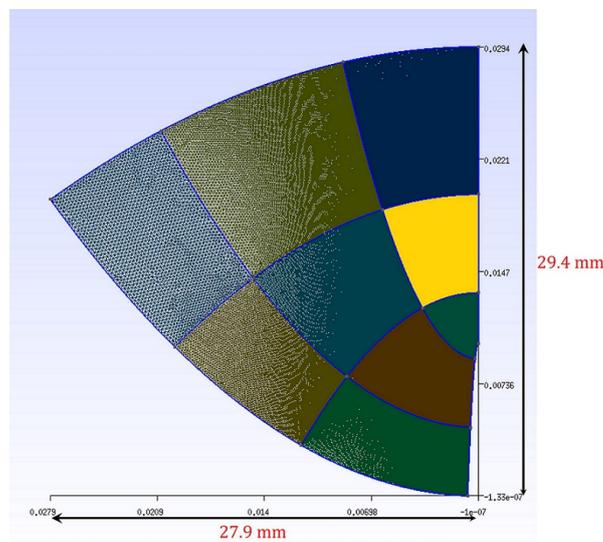


FIGURE 5.2 – Maillage d'un milieu entre 2 électrodes

Le maillage lui-même mesure 3×3 cm et est composé de 450000 mailles. Il est divisé en plusieurs parties afin de permettre un maillage plus fin dans l'axe de la pointe, là où la décharge va se développer.

Le code de simulation physique des décharges corona présenté dans cette section peut offrir de nombreuses informations sur les caractéristiques des décharges. Cependant, dans le contexte des interférences générées par les décharges corona sur les systèmes sol de communication aéronautique, les dimensions des structures et des phénomènes d'intérêt sont beaucoup plus grandes. Par exemple, les pylônes et les antennes des systèmes de communication aéronautique ont des dimensions supérieures à un mètre, ce qui nécessite une approche différente. Dans la section suivante, une méthode de simulation radiofréquence est présenté à son tour.

5.1.2 Présentation d'une méthode de simulation radiofréquence

Cette section présente la Méthode des Moments (MoM) utilisée en régime harmonique pour résoudre les équations intégrales, ce qui permet d'obtenir une résolution numériques des équations de Maxwell. Bien que la décharge corona soit principalement un phénomène

temporel et que la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [63, 64] soit généralement utilisée pour modéliser les décharges dans le domaine temporel, elle présente des limites en ce qui concerne la modélisation des interactions à grande échelle.

La MoM offre une approche plus adaptée pour calculer les niveaux de couplage entre différentes parties d'un système. De plus, la MoM permet l'utilisation d'éléments filaires qui sont utilisés pour modéliser la structure du pylône et de ses composants, ce qui accélère considérablement la simulation par rapport à la méthode FDTD. Ainsi, la MoM se révèle être une solution plus performante pour appréhender les interactions complexes liées à la décharge corona et à ses effets sur les systèmes de communication et a d'ailleurs déjà été utilisé durant la thèse de Wang [11].

Le logiciel de calcul utilisé à cette fin est un code de calcul tridimensionnel développé par l'ONERA, appelé ELSEM3D [65]. Ce code permet de modéliser des objets constitués de plusieurs domaines, qu'ils soient disjoints ou non. Cela signifie que différents matériaux ou structures peuvent être présents dans l'objet étudié, et le code ELSEM3D est capable de prendre en compte ces différentes zones et leurs propriétés électromagnétiques spécifiques.

Le code ELSEM3D offre plusieurs possibilités d'excitations pour étudier le champ électromagnétique diffracté par un objet. Les excitations possibles sont les suivantes :

- Onde plane : Cette excitation consiste en une onde électromagnétique plane qui se propage dans une direction donnée.
- Onde sphérique : Onde sphérique : Cette excitation simule une onde électromagnétique émise à partir d'une source ponctuelle et se propageant sous forme d'une onde sphérique.
- Générateur de tension localisé sur un segment : Cette excitation consiste à appliquer une tension électrique sur un segment spécifique de l'objet.
- Distribution de champ sur une interface : Cette excitation permet de spécifier une distribution de champ électromagnétique sur une interface de l'objet.

Dans le cadre de cette approche, bien que l'outil de simulation radiofréquence ne possède pas de source spécifique pour modéliser directement une décharge corona, il offre la possibilité de créer des excitations personnalisées. En utilisant différentes excitations, il est possible de modéliser une décharge de courant de manière spécifique en termes d'amplitude et de localisation. L'utilisation d'un générateur de tension localisé sur un segment peut être une option appropriée puisque cela va permettre de simuler une source rayonnante au niveau du paratonnerre du pylône.

Cette section a exposé deux outils de simulation distincts, l'un en régime temporel et l'autre en régime harmonique. Pour obtenir les niveaux de couplage, c'est l'outil utilisant la méthode des moments en régime harmonique qui est employé, car il est mieux adapté à ce type de problème.

5.1.3 Conclusion sur l'approche adoptée

Cette section a présenté deux approches distinctes, chacune ayant ses avantages et limitations. Le code de simulation des décharges offre un outil précieux pour modéliser les plasmas et les décharges corona, mais il n'est pas totalement adapté à la résolution complète du problème de décharge corona sur le pylône. En revanche, la méthode de simulation radiofréquence permet une modélisation globale du problème, incluant les simulations de couplage entre les éléments. La méthode de simulation radiofréquence est donc choisie pour cette thèse. Plus spécifiquement, il s'agit d'un outil qui utilise la méthode des moments

en régime harmonique, laquelle sera employée pour tenter de résoudre ce problème. Cette méthode est particulièrement adaptée pour obtenir les niveaux de couplage entre une antenne et une décharge corona. Toutefois, il nécessite un travail d'adaptation pour pouvoir modéliser la décharge corona à l'aide d'une source disponible.

Dans la partie suivante, un type de générateur de tension localisé sur un segment est examiné comme option appropriée pour simuler l'effet d'une décharge corona au niveau du paratonnerre du pylône.

5.2 Modélisation de la décharge corona à l'aide d'un modèle électrique

Cette section présente l'approche adoptée pour modéliser la décharge corona à l'aide d'une source disponible dans le code de simulation radiofréquence. Le courant de la décharge corona est approximé au moyen d'un circuit RLC et d'un générateur E. Ensuite, nous décrivons comment cette source est intégrée dans le code de simulation. Enfin, nous détaillons la détermination des variables ainsi que la modélisation de la décharge.

5.2.1 Objectif du modèle électrique

Cette section a pour but d'introduire l'intérêt du modèle électrique qui sera utilisé pour modéliser la décharge corona. Dans la thèse de Wang [11], la méthode des moments (MoM) avait déjà été employée pour modéliser le rayonnement de la décharge. Dans cette perspective, un dipôle élémentaire avait été utilisé pour représenter la décharge corona, et pour chaque fréquence, la caractéristique $I\delta l$ du dipôle avait été calculée.

Cependant, dans notre approche, nous souhaitons avoir une source ayant une réponse temporelle similaire à la décharge corona. Pour ce faire, nous élaborons une source capable de simuler la décharge corona pour différentes fréquences, simplifiant ainsi le modèle. L'objectif est de parvenir à une représentation plus efficace et réaliste de la décharge corona et de ses interactions avec les systèmes de communication. La source utilisée qui a une réponse temporelle similaire à la décharge corona est présentée dans la section suivante.

5.2.2 Approximation du courant d'une décharge corona avec réponse apériodique d'un circuit RLC

Dans cette partie, l'approche utilisée consiste à approximer le courant de la décharge corona en utilisant une source de type circuit RLC en régime apériodique ou critique.

Le régime apériodique caractérise un comportement où un système ne présente pas d'oscillations périodiques après une perturbation initiale. Dans ce régime, l'énergie est progressivement dissipée, ce qui conduit à une décroissance continue de l'amplitude des oscillations. Cette dissipation d'énergie entraîne finalement le retour du système à son état d'équilibre initial.

De manière similaire, dans le processus de décharge corona, une perturbation initiale, telle qu'un champ électrostatique élevé, provoque la libération d'électrons à partir d'une électrode pointue. Ces électrons ionisent le gaz environnant, créant des ions positifs et

négatifs. Les charges ainsi formées se déplacent sous l'influence du champ électrique, créant un courant électrique. Pendant ce processus, de l'énergie est utilisée pour l'ionisation du gaz et pour le déplacement des charges. Cette énergie est dissipée sous forme de chaleur et de lumière, et le processus de décharge se termine lorsque l'énergie est suffisamment dissipée et que les charges atteignent les électrodes.

Le courant d'une décharge corona peut être approximé par une loi bi-exponentielle comme le montre des études réalisées sur les décharges. Ces courants ont également été mesurés et présentés dans les chapitre 3 et 4. Afin de modéliser la décharge corona, il faut donc pouvoir la remplacer par une source de courant qui suit une loi bi-exponentielle dont l'équation est

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}). \quad (5.1)$$

Dans le cas d'un circuit RLC en régime aperiodique en série, l'équation du régime libre de la tension au borne du condensateur est

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0, \quad (5.2)$$

avec u_C la tension au borne du condensateur.

La résolution de cette équation se fait en résolvant l'équation du polynôme du second degré qui a pour discriminant

$$\Delta = \nu^2 - \omega_0^2 \quad (5.3)$$

avec $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ et $\nu = \frac{R}{2L}$.

Dans le cas d'un régime aperiodique, la condition $\Delta > 0$ est respectée, c'est-à-dire $R > \sqrt{\frac{L}{C}}$. Dans cette situation, la solution de l'équation (5.2) pour la tension s'écrit alors

$$u(t) = Ae^{at} + Be^{bt} \quad (5.4)$$

avec

$$a = -\nu + \sqrt{\nu^2 - \omega_0^2} \text{ et } b = -\nu - \sqrt{\nu^2 - \omega_0^2} \quad (5.5)$$

Les conditions initiales imposées sont $u_C(t=0) = E$ avec E la tension du générateur de tension pour avoir une source de tension constante quelle que soit la fréquence et $i(t=0) = 0$ car il n'y a pas de courant qui circule avant la décharge.

Comme $i(t) = C \frac{du_C}{dt}$, le courant s'écrit

$$i(t) = \frac{abEC}{b-a}(e^{at} - e^{bt}). \quad (5.6)$$

Finalement, par identification, on a

$$I_0 = \frac{abEC}{b-a}, \alpha = -a \text{ et } \beta = -b. \quad (5.7)$$

Le circuit RLC en régime aperiodique est capable de représenter les caractéristiques principales de la décharge, notamment la résistance et la capacitance. Il est important de

souligner que dans la réalité, la décharge corona est caractérisée par une résistance variable en fonction du temps plutôt que par une inductance. Cependant, dans notre modélisation, nous choisissons de simplifier le problème en incluant une inductance dans le circuit.

Cette section a présenté une approche simple pour approximer le courant d'une décharge corona en utilisant une source de type circuit RLC. La section suivante présente le modèle de source proposé.

5.2.3 Présentation et implémentation du modèle de source proposé

Cette section présente le modèle de source, ainsi que l'explication de son intégration dans le code. Nous décrivons comment le modèle électrique est implémenté dans le code pour obtenir un circuit RLC équivalent qui représente efficacement une décharge corona.

L'objectif est de produire des courants de décharges corona qui reproduisent les mesures réalisées lors des campagnes de mesures en extérieur et en laboratoire. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons un élément qui modélise la charge d'espace de la décharge. Cet élément se charge à partir du générateur. Cette méthode de simulation va permettre de réaliser la simulation sur chacune des fréquences de la source contrairement à ce qui a été fait dans le passé dans la thèse de Wang [11] qui utilise un dipôle élémentaire pour modéliser la décharge corona. Cela permet de réaliser une simulation pour la fréquence à laquelle le dipôle était dimensionné, ce qui implique de devoir réaliser une source par fréquence.

Pour modéliser la charge d'espace au-dessus du paratonnerre, un bout de fil métallique est utilisé. Ensuite, pour obtenir un circuit RLC équivalent au niveau de l'élément rayonnant, une source doit être connectée entre le paratonnerre et l'élément rayonnant. Cette source est modélisée avec une tension E , une résistance R et une inductance L qui sont déterminées en amont. La capacitance dépendra de l'élément rayonnant, car celui-ci possède sa propre capacitance vis-à-vis du système. La taille de l'élément peut être ajustée pour obtenir la valeur de capacitance souhaitée. Les paramètres R , L et C façonnent la forme et les propriétés temporelles de l'impulsion générée. En parallèle, la tension E contrôle l'intensité de cette impulsion de décharge corona.

La figure 5.3 illustre un schéma du circuit RLC équivalent au niveau du paratonnerre.

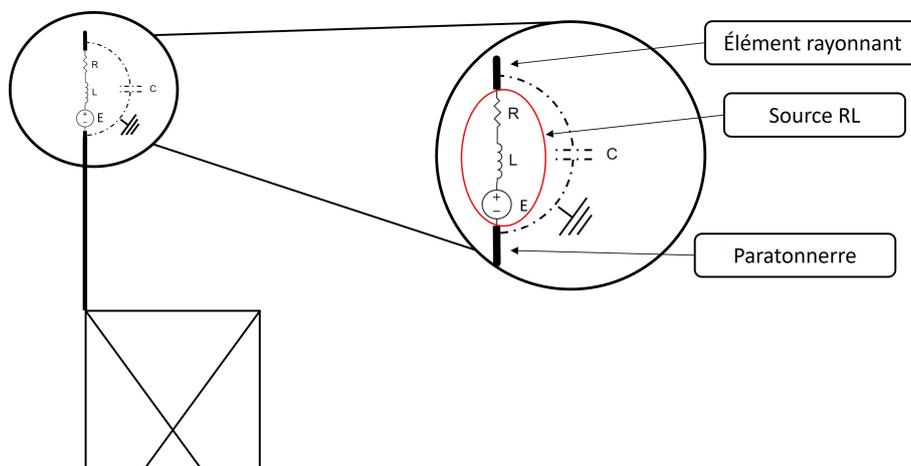


FIGURE 5.3 – Schéma du circuit RLC équivalent au niveau du paratonnerre

Pour déterminer la capacitance de l'élément rayonnant, il suffit de réaliser une simulation en utilisant une source avec une résistance et une inductance nulles, et une tension de $E = 1$. La fonction de transfert du système en basse fréquence évolue en $jC\omega$. Grâce à cette équation, il est donc relativement simple de déterminer la valeur de la capacité équivalente du circuit puisque le comportement du courant est linéaire par rapport aux fréquences.

Dans cette section, nous avons introduit notre modèle électrique de source qui sera utilisé dans nos simulations, ainsi que sa mise en œuvre dans le code. Cela nous permet d'attribuer une capacité à l'élément rayonnant. Dans la section suivante, nous détaillons comment les autres variables sont déterminées et comment obtenir la réponse temporelle.

5.2.4 Détermination des variables (E, R, L, C) du circuit et modélisation de la décharge

Pour déterminer les valeurs appropriées des variables (E, R, L, C) pour le système, nous nous appuyons d'abord sur des mesures de courant réalisées en laboratoire sur la maquette de pylône à l'aide d'un shunt. Cette expérimentation nous permet de valider le modèle pour des mesures de courant en environnement contrôlé. Ensuite, nous utilisons des mesures de courant réalisées en environnement naturel à l'aide d'une sonde de courant positionnée à la base du paratonnerre.

Pour déterminer la capacité, on utilise le comportement basse fréquence comme indiqué dans la section précédente. Pour les valeurs restantes, un algorithme d'optimisation utilisant la méthode Nelder-Mead [66] est employé. Cet algorithme minimise la distance vectorielle entre le courant $i(t)$ et le courant mesuré i_m . Cette méthode est simple à mettre en œuvre et ne requiert pas d'information sur la dérivée de la fonction. Toutefois, elle peut être bloquée par des optima locaux et nécessite un point de départ judicieusement choisi pour l'algorithme. Par conséquent, il peut être nécessaire de redémarrer l'algorithme plusieurs fois avec différents points de départ afin de trouver une solution appropriée. La figure 5.4 illustre un exemple d'un résultat obtenu en utilisant l'algorithme de Nelder-Mead avec en rouge le courant mesuré au niveau du shunt présenté sur la figure 4.6a et en noir la mesure de courant analytique obtenue avec la formule (5.6).

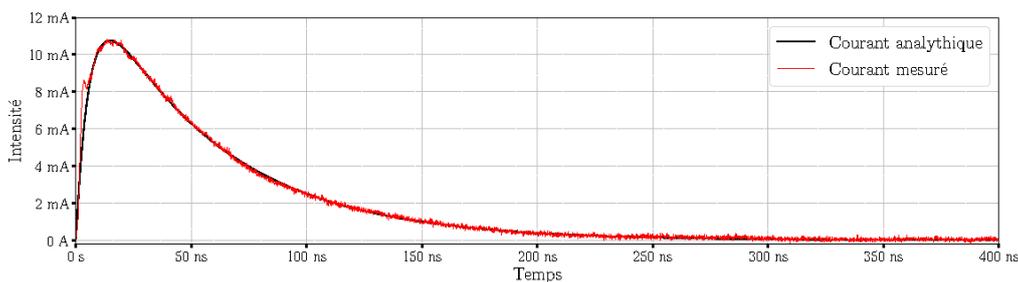


FIGURE 5.4 – Comparaison du courant analytique obtenu avec l'algorithme et une mesure réalisée en laboratoire

Dans ce graphique, le courant analytique présente une allure très similaire à la mesure, à l'exception de la montée où il y a un palier. Cette différence s'explique par le fait qu'un circuit RLC a un fonctionnement plus simple par rapport à la décharge corona, qui possède des mécanismes moins prévisibles.

Une fois que tous les composants sont déterminés, la source (E, R, L) est placée en dessous de l'élément rayonnant. Nous réalisons une simulation en régime harmonique pour une large bande de fréquence. Pour obtenir la réponse temporelle, nous appliquons la transformée de Fourier inverse à la réponse fréquentielle obtenue par simulation afin de passer dans le régime temporel. Ensuite, nous réalisons une convolution avec la fonction d'Heaviside pour obtenir la réponse indicielle, qui modélise la charge de l'élément rayonnant dans le domaine temporel.

Il est important de noter que bien que ce modèle puisse générer des courants similaires à ceux produits par une décharge corona, il introduit un comportement inductif qui n'est pas caractéristique des décharges réelles. En effet, lorsqu'une décharge se produit, c'est la résistance de l'espace qui varie en fonction du courant au fil du temps.

Cette section a présenté un algorithme d'optimisation permettant de déterminer les valeurs des composants du circuit ainsi que la manière dont la charge de l'élément est modélisée.

5.2.5 Conclusion

L'approximation du courant de la décharge corona à l'aide d'un circuit RLC en régime a périodique a été présenté ainsi que la manière dont ce modèle électrique est intégré lors des simulations avec le code radiofréquence. Cette méthode permet d'avoir une source qui intègre la variation de la fréquence de la décharge, contrairement à la thèse de Wang [11] où chaque fréquence avait une source différente.

La section suivante présente les résultats des simulations obtenues avec ce modèle qui sont ensuite comparés aux expérimentations en laboratoire et en environnement extérieur, dans le but de valider notre modèle et d'étudier l'impact des décharges corona sur les antennes VHF.

5.3 Étude comparative des courants obtenus sur le pylône de laboratoire

L'objectif de cette étape est d'évaluer la validité du modèle en comparant ses résultats aux données récoltées lors des expérimentations.

Dans cette partie, les courants mesurés en laboratoire sont comparés avec ceux obtenus par simulation. Dans un premier temps, le modèle 3D obtenu avec GiD est présenté avec la capacité équivalente du circuit obtenu avec le bout de fil. Ensuite, il est vérifié que le modèle permet de retrouver le courant mesuré au niveau du shunt. Puis, les courants simulés à la base de la pointe et du pylône sont examinés afin de vérifier la présence des différentes résonances. Les 2 polarités des décharges sont modélisées et comparées tout au long de la section.

5.3.1 Réalisation du modèle 3D de la maquette de pylône

Dans cette section, la maquette de pylône conçue à l'aide du logiciel de modélisation 3D GiD est présentée, celle-ci est visible sur la figure 5.5. Elle se compose de deux plaques

situées aux extrémités du pylône, dont les dimensions correspondent à celles du pylône en laboratoire.

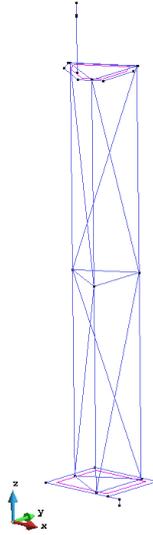


FIGURE 5.5 – Modélisation 3D de la maquette de pylône sur GiD

Dans cette configuration de simulation, le câble de masse est représenté avec une longueur de 10 cm. Le sol est considéré comme un parfait conducteur électrique (PEC) dans la simulation. Pour éviter que le pylône ne soit en contact direct avec le sol, il est légèrement surélevé et relié au sol par un fil, permettant ainsi de retrouver la mesure de courant à la base de la maquette. La plaque isolante n'est pas modélisée afin de simplifier le problème. La pointe du pylône est modélisée avec la même longueur que la maquette, et le shunt est représenté par un fil d'une longueur de 1 cm. La résistance du shunt est bien prise en compte lors de la simulation.

La simulation du courant au niveau de la source de la maquette avec une source de tension de $E = 1$, quelle que soit la fréquence, donne la fonction de transfert visible sur la figure 5.6.

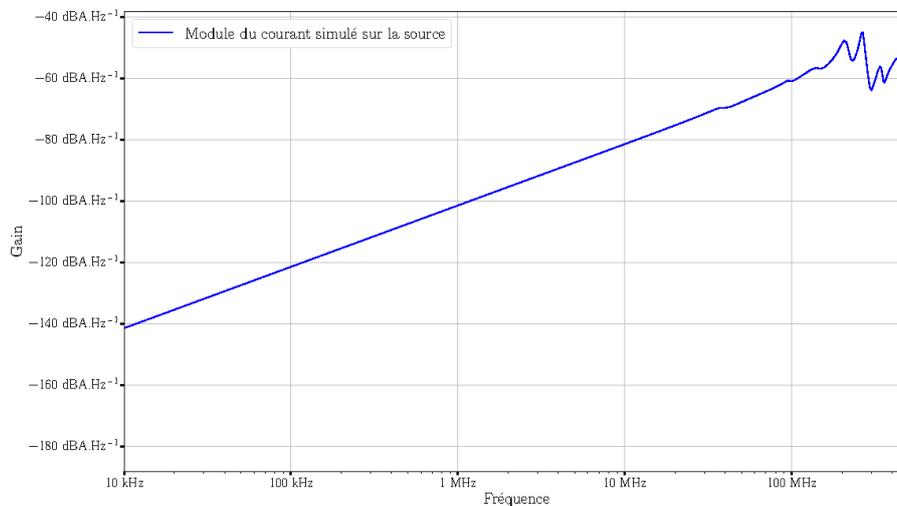


FIGURE 5.6 – Fonction de transfert pour une source de tension $E = 1V$

Le comportement linéaire de la fonction de transfert avec une pente de 20 dB/décade est observé ici. Cela nous permet de déterminer la capacité de l'élément situé au-dessus de la maquette, qui est de 1.35 pF.

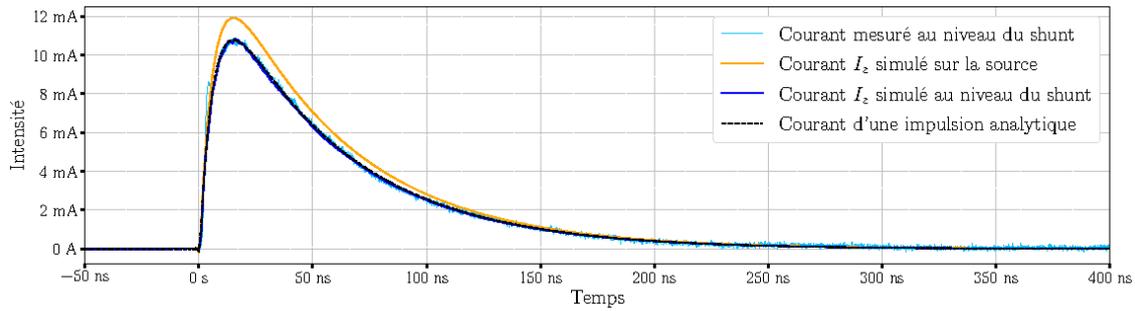
Dans cette section, la maquette modélisée sur GiD a été présentée, ainsi que la simulation permettant de déterminer la capacitance équivalente du circuit.

5.3.2 Analyse des courants au niveau du shunt

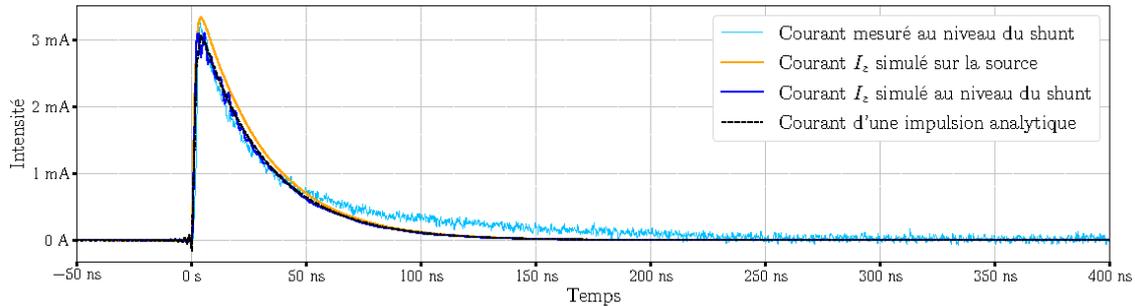
Dans cette partie, une comparaison est effectuée entre une décharge élémentaire obtenue en laboratoire et le courant d'une décharge simulée à l'aide du code ELSEM3D. Le courant de la décharge élémentaire mesuré au niveau du shunt est choisi pour la simulation, car cela permet d'être plus fidèle à la modélisation 3D réalisée sur GiD.

Après avoir déterminé la capacité de l'élément rayonnant, l'algorithme Nelder-Mead est utilisé pour trouver les coefficients restants en fonction des mesures présentées dans la partie précédente. Une simulation est ensuite réalisée pour évaluer le niveau de courant simulé au niveau du shunt. Un facteur correcteur $corr = \frac{I_{source}}{I_{shunt}}$ est appliqué à la tension appliquée afin de tenir compte de la différence d'emplacement des décharges et l'emplacement du shunt.

Les figures 5.7a et 5.7b présentent respectivement les mesures de courant pour une décharge positive et une décharge négative dont le courant a été mis en positif. Sur chacune de ces figures, les mesures de courant obtenues lors de l'expérimentation en laboratoire sont représentées en pointillé bleu, tandis que le courant analytique, obtenu en utilisant les coefficients avec l'algorithme et la loi biexponentielle (5.1), est représenté en pointillé noir. De plus, les réponses temporelles obtenues par simulation au niveau de la source et au niveau du shunt sont également affichées en orange et en bleu. Pour obtenir les réponses temporelles, la transformée de fourier inverse est appliquée à la réponse fréquentielle du système. Ensuite, ce résultat est convolué avec un échelon temporel de tension 1 V. Les courbes ont été obtenues pour $(E, R, L, C) = (571 \text{ V}, 44901 \Omega, 239.4 \mu\text{H}, 1.35 \text{ pF})$ pour la décharge positive et $(E, R, L, C) = (73.2 \text{ V}, 22142 \Omega, 23.55 \mu\text{H}, 1.35 \text{ pF})$ pour la décharge négative.



(a) Positive



(b) Négative

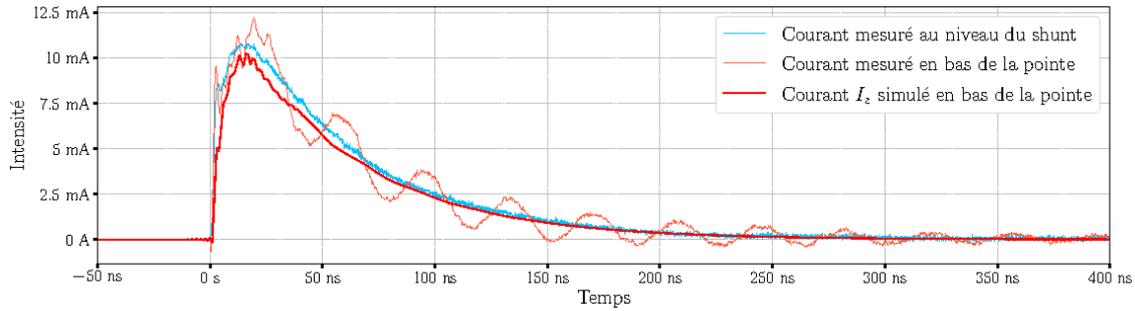
FIGURE 5.7 – Réponse temporelle de la fonction de transfert face à un échelon

Dans les deux polarités, une différence d'amplitude est observée au niveau de la source par rapport à la mesure du shunt, de 1.5 mA pour la décharge positive et de 0.3 mA pour la décharge négative. Cela indique qu'une partie du courant est rayonné entre l'emplacement des décharges et le shunt. Les courbes analytiques et simulées au niveau du shunt se superposent, confirmant ainsi la validité du modèle électrique par rapport au courant de décharge. Pour la décharge positive, la montée de la décharge ne correspond pas exactement à la mesure réalisée en laboratoire. Cela est notamment dû à la montée en deux temps observée dans la section 4.2.1. En revanche, la descente du courant correspond bien au modèle analytique. Pour la décharge négative, le modèle analytique reproduit bien la montée de la décharge, mais il y a une légère différence de comportement lors de la descente, particulièrement pour les courants inférieurs à 0.5 mA.

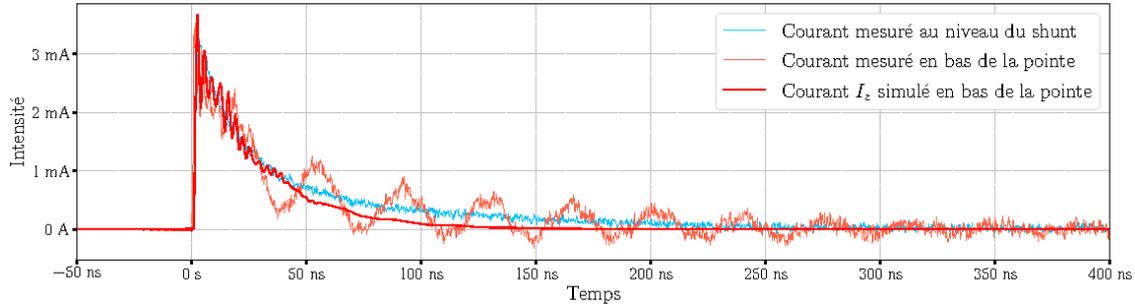
5.3.3 Analyse des courants à la base de la pointe

Dans cette partie, une comparaison est effectuée entre le courant mesuré à la base de la pointe et le courant simulé à l'aide du modèle électrique. L'objectif est de déterminer si les résonances observées dans les mesures sont également reproduites dans les simulations, ce qui indiquerait que le modèle électrique est adapté à nos mesures. Il est important de garder à l'esprit que notre modèle est une simplification du système réel et qu'il ne prend pas en compte certains éléments de l'environnement de mesure, comme la plaque métallique "nuage" utilisée comme source pour nos expérimentations ou encore la pièce dans laquelle se situe le pylône.

Les figures 5.8a et 5.8b présentent les courants mesurés et simulés pour les deux polarités de décharge.



(a) Positive



(b) Négative

FIGURE 5.8 – Comparaison du courant mesuré au niveau du paratonnerre avec celui simulé

Pour la polarité positive, une différence d'environ 1 mA est observée entre le courant simulé et le courant mesuré au niveau du shunt. Il est également remarqué la présence d'un palier à 5 mA durant la montée dans le courant simulé, ainsi que de légères oscillations au moment de l'amplitude maximale. Ces oscillations de courant sont également présentes dans la mesure à des amplitudes plus élevées. Cependant, les oscillations observées à partir de 30 ns dans la mesure réalisée à la base de la pointe ne sont pas retrouvées dans la simulation.

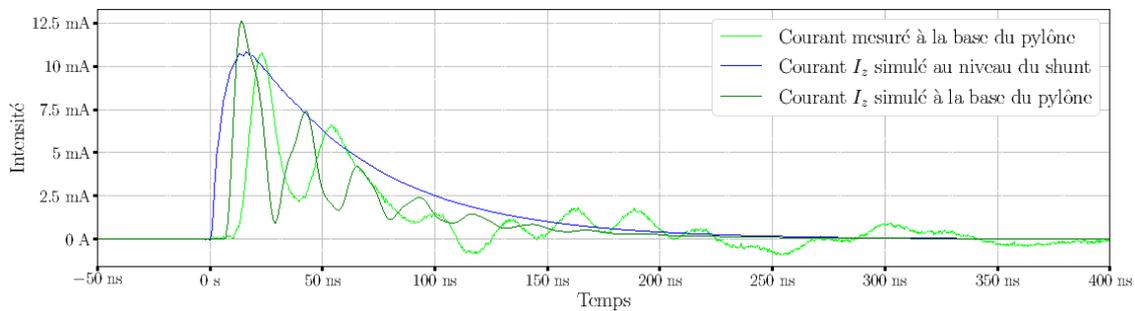
Pour la polarité négative, des variations jusqu'à $t = 25$ ns sont observées dans le courant simulé à la base de la pointe, et ces variations sont également présentes dans la mesure correspondante. Cependant, les oscillations qui suivent cette période dans la mesure ne sont pas retrouvées dans la simulation.

Finalement, le modèle électrique permet de simuler correctement les courants au niveau de la base de la pointe. Cependant, il est constaté que l'oscillation attribuée précédemment à la résonance du système global dans la partie 4.3.1 n'est pas reproduite dans la simulation. Cela suggère qu'il peut y avoir un problème au niveau de la mesure expérimentale ou dans le modèle. Pour analyser cela, la mesure à la base de la maquette est comparée au courant simulé à cet emplacement dans la section suivante.

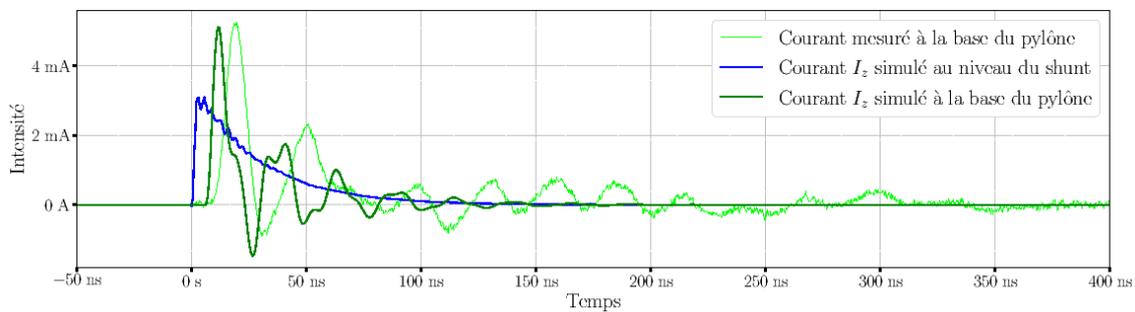
5.3.4 Analyse des courants à la base de la maquette

Dans cette partie, une comparaison est réalisée entre le courant simulé au niveau de la base de la maquette et le courant mesuré. L'objectif étant toujours de vérifier si le modèle est conforme aux mesures.

Les figures 5.9a et 5.9b présentent respectivement les courants mesurés et simulés pour les deux polarités.



(a) Positive



(b) Négative

FIGURE 5.9 – Comparaison du courant mesuré à la base du pylône avec celui simulé

Pour les deux polarités, des oscillations d’amplitudes et de périodes similaires sont observées entre les simulations et les mesures. Le courant de la décharge corona négative à la base de la maquette est près de deux fois plus élevé que le courant mesuré au niveau du shunt, ce qui suggère un meilleur couplage de la décharge négative avec la maquette ou un coefficient de qualité plus élevé.

La comparaison entre le courant simulé au niveau du shunt et à la base de la maquette révèlent un délai entre les deux. Ce délai est expliqué par la distance physique entre la pointe et la base de la maquette, qui correspond à un retard de près de 5 ns. De plus, il existe également un délai entre le courant simulé et le courant mesuré, dû à la longueur des câbles de mesure.

Enfin, les mesures réalisées à la base de la maquette présentent une oscillation basse fréquence, qui est visible vers $t = 300$ ns, qui n’est pas présente dans la simulation. Cela peut indiquer la présence de perturbations ou d’effets non pris en compte dans le modèle électrique.

La figure 5.10 présente les réponses fréquentielles au niveau du shunt en bleu et à la base du pylône en vert. Les deux polarités sont affichées, avec la décharge positive en trait plein et la décharge négative en pointillé.

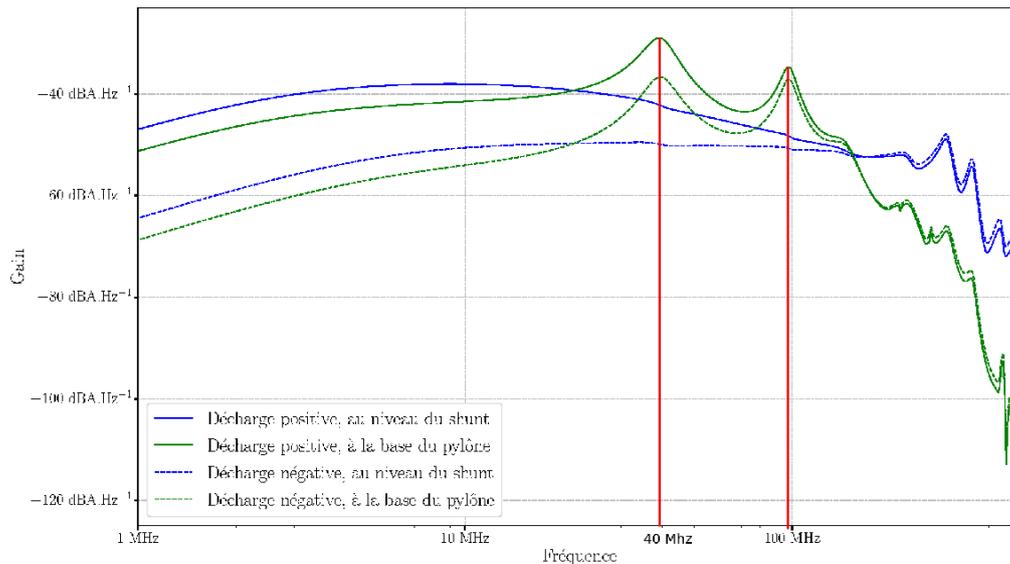


FIGURE 5.10 – Réponse fréquentielle des courants simulés au niveau du shunt et de la base

Ce graphique montre des fréquences de résonance à 40 MHz et 100 MHz, qui sont plus élevées que celles observées avec les mesures expérimentales, qui étaient d'environ 26 MHz. De plus, les modules de courant sont atténués après 70 MHz. Cette différence peut être attribuée aux différences d'environnement entre la simulation et les mesures expérimentales.

L'analyse du courant à la base de la maquette a été présentée, montrant que le modèle électrique reproduit des oscillations similaires à celles mesurées en laboratoire. Néanmoins, les courants mesurés montrent des fréquences de résonances qui ne sont pas reproduites par le modèle, démontrant ainsi les limites de celui-ci.

5.3.5 Conclusion

Dans cette section, le modèle 3D de la maquette de pylône utilisé en laboratoire a été présenté, ainsi que la capacité équivalente de l'élément rayonnant utilisé pour modéliser le circuit RLC. Les courants simulés au niveau du shunt ont été comparés avec les mesures, puis les courants au niveau de la base de la pointe ont été analysés. Enfin, les courants simulés à la base de la maquette ont été confrontés aux mesures. Ces comparaisons ont démontré que les simulations étaient en accord avec les mesures, à l'exception d'une résonance observée dans les mesures mais moins marquée par le modèle électrique. Cette différence peut être attribuée aux facteurs expérimentaux ou à des aspects non pris en compte par le modèle. Dans la section suivante, l'attention se porte sur la réalisation des simulations sur le pylône extérieur.

5.4 Étude du couplage entre la décharge corona sur le pylônerre et une antenne VHF sur le pylône extérieur

Dans cette section, la modélisation 3D du pylône est présentée, incluant la capacité de son élément rayonnant, réalisée à l'aide du logiciel GiD. Ensuite, l'étude du couplage entre chaque polarité de décharge corona et les antennes VHF est effectuée. Les niveaux de couplages obtenus pour les deux polarités sont ensuite comparés .

5.4.1 Implémentation du modèle électrique sur la modélisation du pylône

Dans le but d'étudier les couplages entre une décharge corona et les antennes, il est nécessaire de modéliser l'ensemble du problème. Pour cela, nous utilisons le logiciel GiD, un logiciel de modélisation 3D, pour construire le maillage du pylône.

Dans le cadre de cette étude, l'approche retenue consiste à réaliser des simulations sur un pylône simplifié pour vérifier le bon fonctionnement du modèle électrique et analyser les niveaux de couplage. La construction du pylône est simplifiée en utilisant des fils de rayons paramétrables. La figure 5.11a présente la modélisation 3D du pylône réalisée avec GiD, montrant la reproduction de tous les tronçons et barres métalliques.

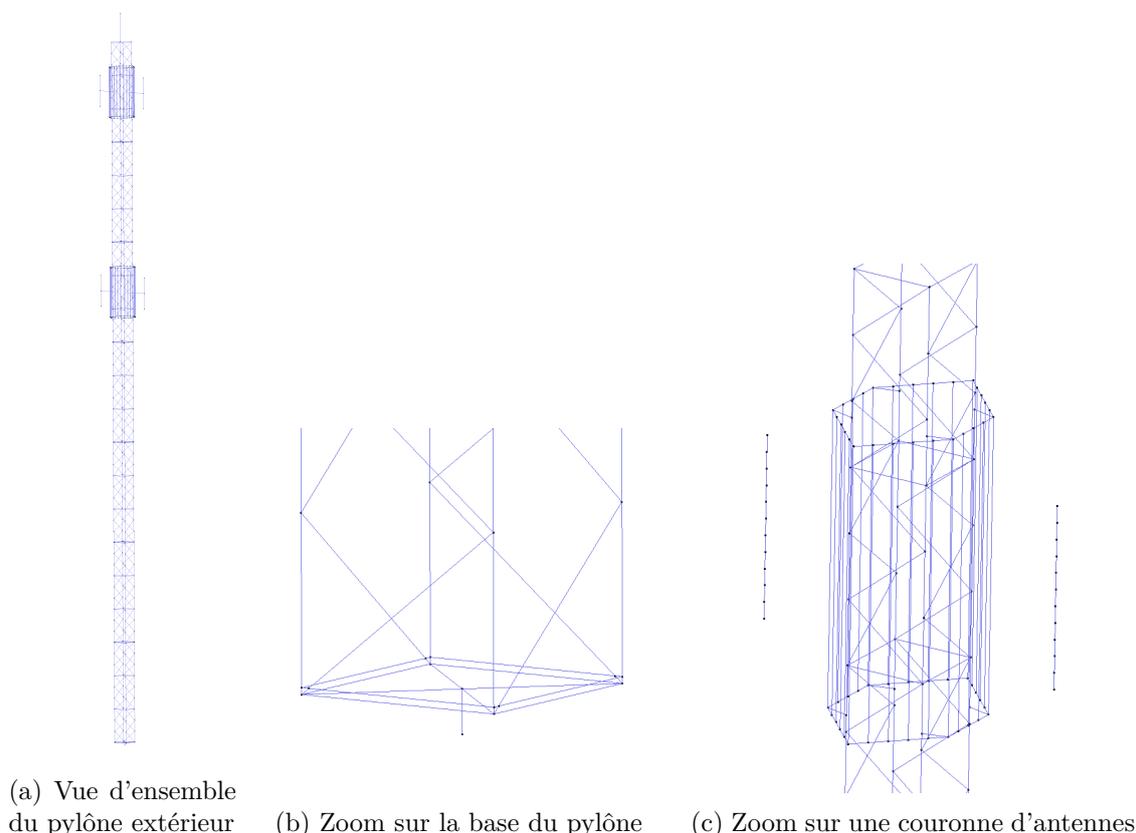


FIGURE 5.11 – Modélisations 3D de GiD

Les figures 5.11b et 5.11c fournissent des zooms sur la base du pylône et une couronne d'antennes VHF, mettant en évidence les deux dipôles et les réflecteurs. Les brins formant

le balun ne sont pas modéliser. Le sol est considéré comme un PEC. Le pylône est relié au sol par le fil constituant sa base.

Pour une modélisation plus complète du pylône, il est nécessaire de prendre en compte la plateforme de découplage, l'antenne GPLB et toute la partie de câblage. Cependant, il convient de noter que la plateforme de découplage nécessite une surface pour être représentée, mais celle-ci n'a pas été prise en compte dans la modélisation en raison des contraintes de temps de calcul. De même, l'antenne GPLB est suffisamment basse pour ne pas être prise en compte dans la modélisation actuelle.

Le fil utilisé comme élément rayonnant est présenté sur la figure 5.12, qui montre un zoom du modèle 3D au niveau du paratonnerre.

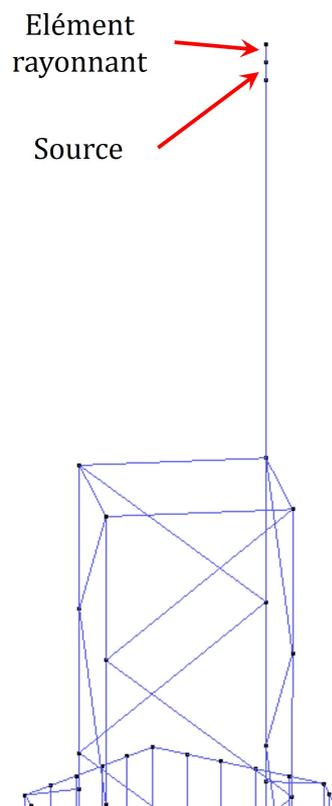


FIGURE 5.12 – Zoom sur le paratonnerre du pylône extérieur

Dans cette simulation, un fil de hauteur de 5 cm et de rayon de 5 mm est utilisé comme élément rayonnant. La figure 5.13 présente les réponses fréquentielles des courants simulés au niveau de la source (en bleu) et au niveau de la base du paratonnerre (en rouge), ainsi que celle du courant analytique avec une capacité de 7 pF (représenté en noir) pour une source de tension $E = 1$ V quelle que soit la fréquence.

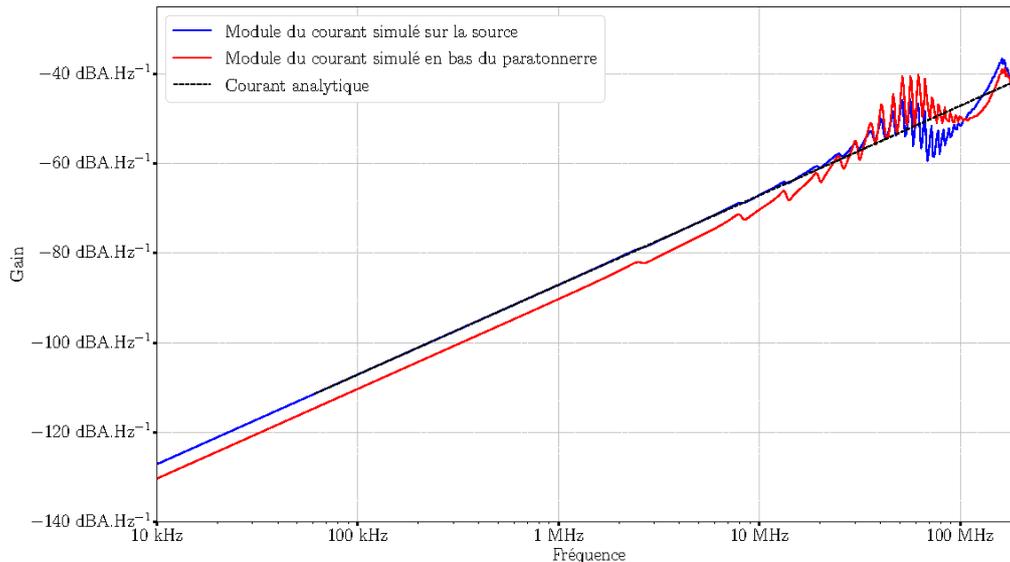


FIGURE 5.13 – Réponse fréquentielle des courants simulés avec la source $E = 1 \text{ V}$

Il est observé que le courant analytique et celui de la simulation ont une réponse fréquentielle identique en basse fréquence, indiquant ainsi que la capacité de l'élément rayonnant est également de 7 pF , validant ainsi le modèle électrique. Le courant à la base du paratonnerre a la même pente que les autres courants avec une amplitude plus faible. Cela est expliqué par la distance entre la base et la pointe du paratonnerre, comme il a été vu expérimentalement entre le shunt de mesure et la mesure à la base de la pointe. Afin de retrouver la même amplitude pour le courant simulé que le courant mesuré au niveau de la base du paratonnerre, il faut appliquer un facteur correcteur qui se calcule en réalisant le ratio $corr = \frac{I_{source}}{I_{paratonnerre}}$ de la même manière que la section 5.3.2.

Dans cette section, nous avons présenté la modélisation du pylône extérieur, ainsi que la capacité équivalente du circuit. Dans la section suivante, nous réalisons des simulations pour examiner les niveaux de couplage entre les décharges corona et les antennes VHF pour chaque polarité en commençant par la polarité négative.

5.4.2 Étude du couplage entre une décharge négative et les antennes VHF

Dans cette section, l'une des décharges négatives qui ont été mesurées sur le pylône extérieur est sélectionnée et elle est modélisée à l'aide du modèle électrique. L'objectif est de vérifier si le modèle est capable de reproduire les courants mesurés par simulation. Ensuite, une simulation est réalisée uniquement sur le paratonnerre afin de confirmer si l'une des fréquences de résonance observées est spécifiquement due au paratonnerre lui-même. Enfin, les tensions simulées sur les antennes supérieures et inférieures sont présentées et comparées à celles mesurées en environnement naturel pour comparer les niveaux de couplages.

5.4.2.1 Simulation de la décharge négative à la base du paratonnerre

Dans cette section, nous comparons le courant obtenu par simulation d'une décharge négative au niveau du paratonnerre avec les mesures expérimentales.

La figure 5.14 présente le courant simulé en utilisant les caractéristiques du circuit RLC suivantes : $E = -93 \text{ V}$, $R = 3100 \Omega$, et $L = 1.7 \times 10^{-5} \text{ H}$, obtenues à l'aide de la méthode de Nelder-Mead. Une capacité de $C = 7 \text{ pF}$ a été choisie afin de ne pas modifier la taille de l'élément rayonnant tout en permettant d'obtenir des courants proches de ceux observés lors de la décharge. Ce courant simulé est ensuite comparé au courant analytique et à la mesure de la décharge négative utilisée.

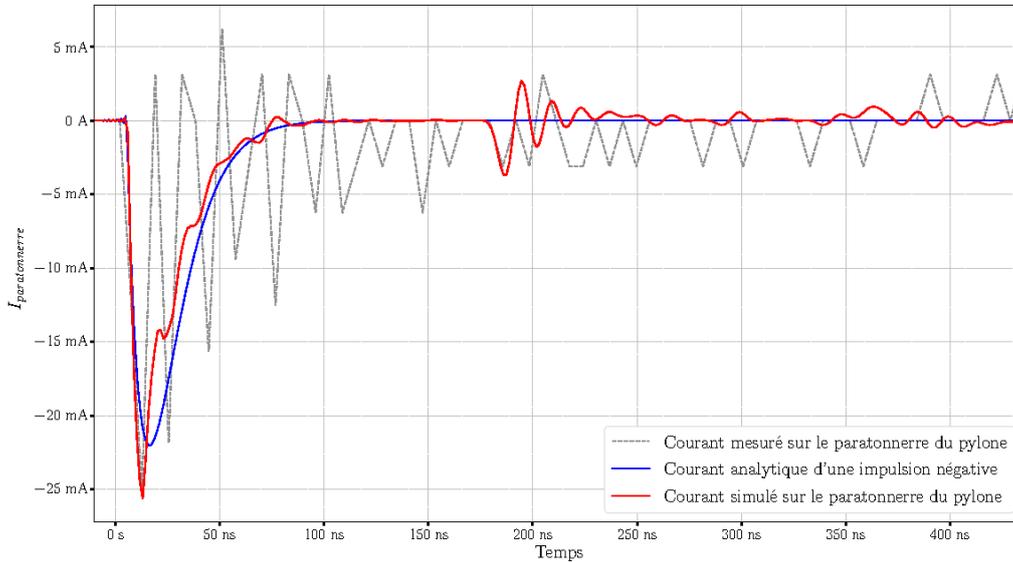


FIGURE 5.14 – Courants d'une décharge négative en fonction du temps sur le pylône extérieur

Sur le pylône extérieur, nous n'avons pas accès au courant source comme c'était le cas grâce au shunt sur le pylône de laboratoire. L'algorithme pour retrouver les paramètres du circuit RLC est donc appliqué sur les courants mesurés à la base du paratonnerre. Or ces courants sont impactés par une résonance. Afin d'obtenir une meilleure correspondance, les paramètres du circuit RLC donnés par l'algorithme ont été ajustés pour obtenir une montée similaire à celle mesurée et une descente se terminant approximativement au même moment.

Le courant simulé présente des oscillations pendant la descente de la décharge, qui semblent avoir une fréquence de résonance similaire à la mesure, correspondant à celle du paratonnerre. De plus, la résonance à environ 175 ns correspond au courant réfléchi par le sol et se propageant à la vitesse de la lumière.

Dans la prochaine section, une simulation avec seulement le paratonnerre permettant de vérifier si la fréquence de résonance correspond à celle du paratonnerre.

5.4.2.2 Simulation de la décharge négative sur le paratonnerre seul

Des investigations ont été menées afin de comprendre pourquoi les oscillations n'ont pas le même niveau. La résonance observée sur l'impulsion négative semble être associée à celle du paratonnerre. Pour vérifier cette hypothèse, une simulation a été réalisée uniquement sur le paratonnerre et est présentée dans cette section.

Le courant simulé sur le paratonnerre uniquement est présenté sur la figure 5.15.

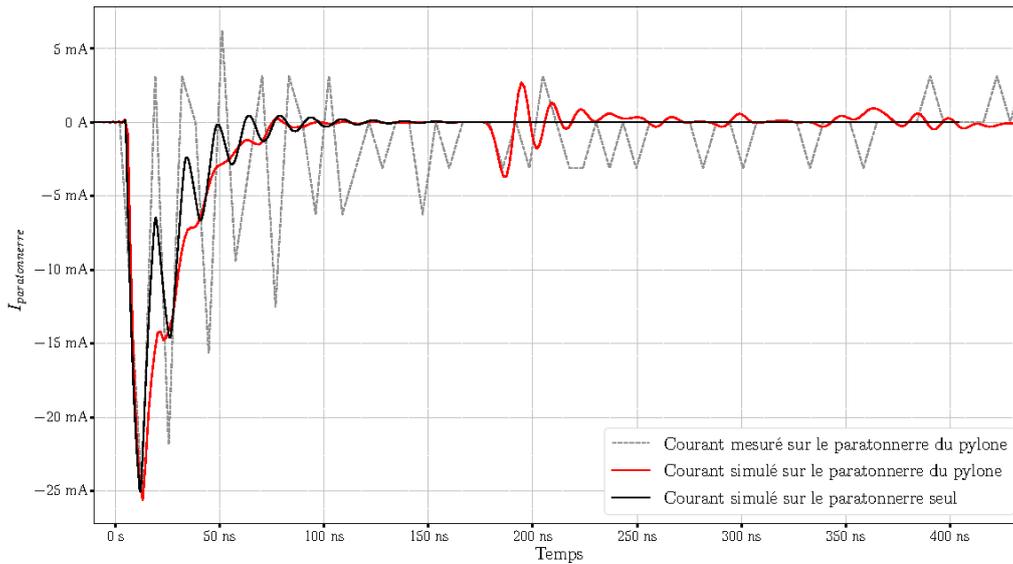


FIGURE 5.15 – Courants d'une décharge négative en fonction du temps sur le pylône extérieur et sur un paratonnerre uniquement

Ce graphique montre une augmentation de l'amplitude des oscillations ainsi qu'une concordance entre les résonances indiquant ainsi que la résonance provient du paratonnerre. En fonction du paratonnerre, une décharge peut donc avoir tendance à se coupler ou non avec. L'explication la plus probable est que le couplage entre le paratonnerre et le pylône n'est pas le même en simulation et en mesure. En simulation, la présence du pylône atténue la résonance du paratonnerre, tandis qu'en mesure, elle l'accroît. Cela peut être dû à des différences dans les conditions réelles d'environnement et de géométrie entre la maquette de simulation et le pylône extérieur.

L'amplitude des oscillations du courant simulé sur le paratonnerre seul demeure nettement inférieure à celle mesurée sur le pylône extérieur. Il est possible qu'en raison de la période d'échantillonnage trop faible, le temps de montée reproduit par l'algorithme qui donne le circuit RLC soit trop lent pour exciter suffisamment le paratonnerre à ce niveau.

La réponse fréquentielle de cette simulation est présentée dans la figure 5.16, où une comparaison est effectuée entre les modules du courant analytique simulé sur le pylône et celui simulé sur le paratonnerre seul.

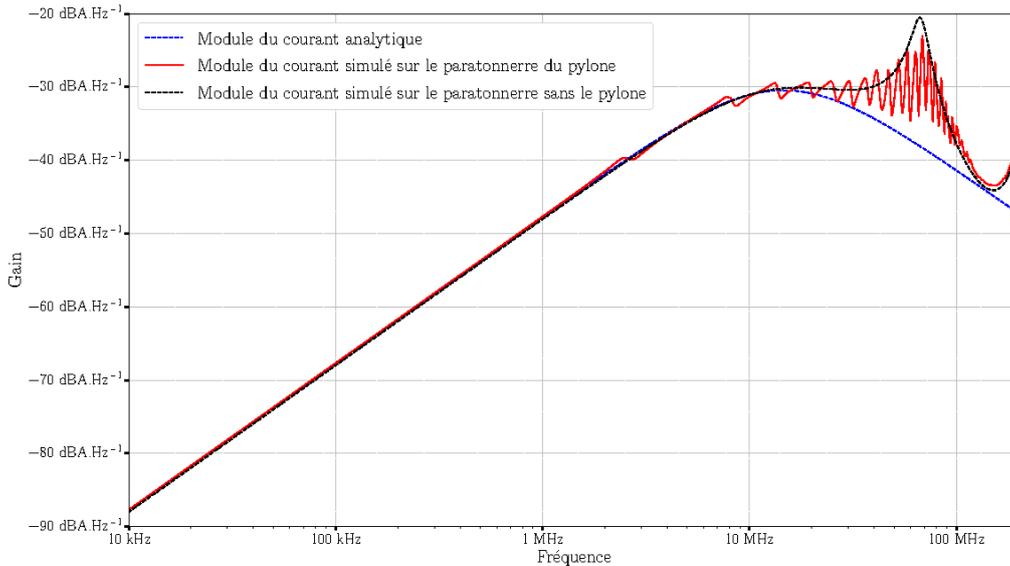


FIGURE 5.16 – Réponse fréquentielle du courant face à une décharge négative

Ce graphique permet de confirmer à nouveau que la fréquence de résonance excitée par la décharge correspond bien au paratonnerre.

Cette réflexion met en avant que le modèle peut être amélioré. Cependant, le temps d'échantillonnage de la mesure doit être amélioré et une mesure de type shunt peut également aider à s'affranchir de la résonance pour avoir une source plus proche de la réalité. Il se peut également que le problème vienne du modèle simplifié ou encore du couplage paratonnerre pylône.

Cette observation suggère que les décharges se couplent avec des éléments du pylône et peuvent potentiellement perturber les antennes VHF. Dans la section suivante, nous nous intéressons au niveau de couplage entre une décharge négative et les antennes VHF.

5.4.2.3 Étude des niveaux de couplages entre une décharge négative et les antennes VHF

Les tensions de sortie simulées sur les antennes VHF sont présentées sur la figure 5.17, avec l'antenne numérotée 2 en rouge et l'antenne numérotée 4 en bleu.

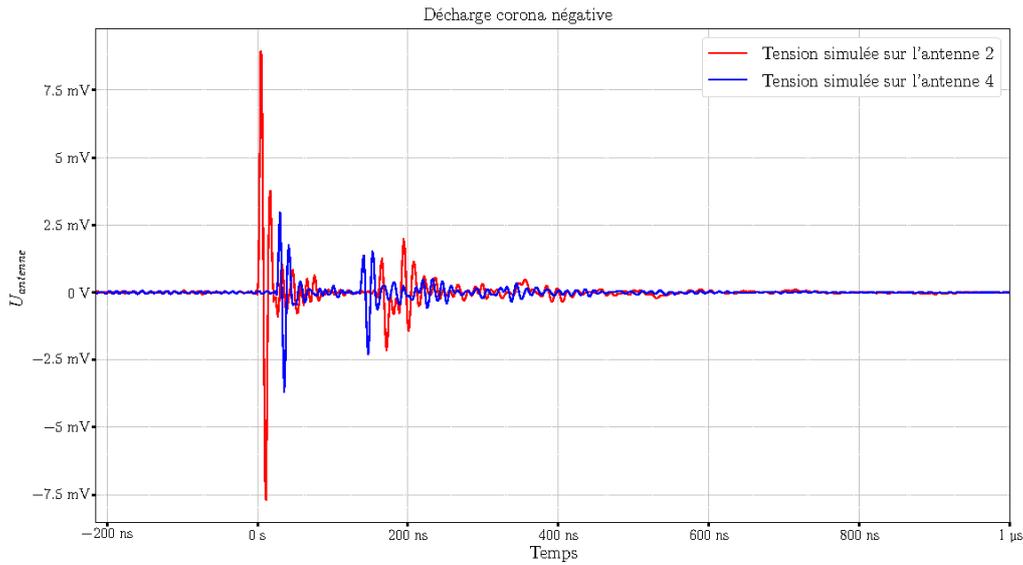


FIGURE 5.17 – Tension au niveau des antennes VHF

Cette figure montre qu’une impulsion négative ayant une résonance se couple avec les antennes 2 et 4 à des tensions s’élevant respectivement à 8 mV et 2.5 mV.

Le niveau de couplage entre la décharge mesurée et utilisée pour nos simulations et l’antenne du système d’acquisition est analysé à l’aide de la figure 5.18. En haut de la figure, on présente la mesure du courant de la décharge, et en bas, on montre la tension de sortie de l’antenne obtenue par notre dipôle VHF.

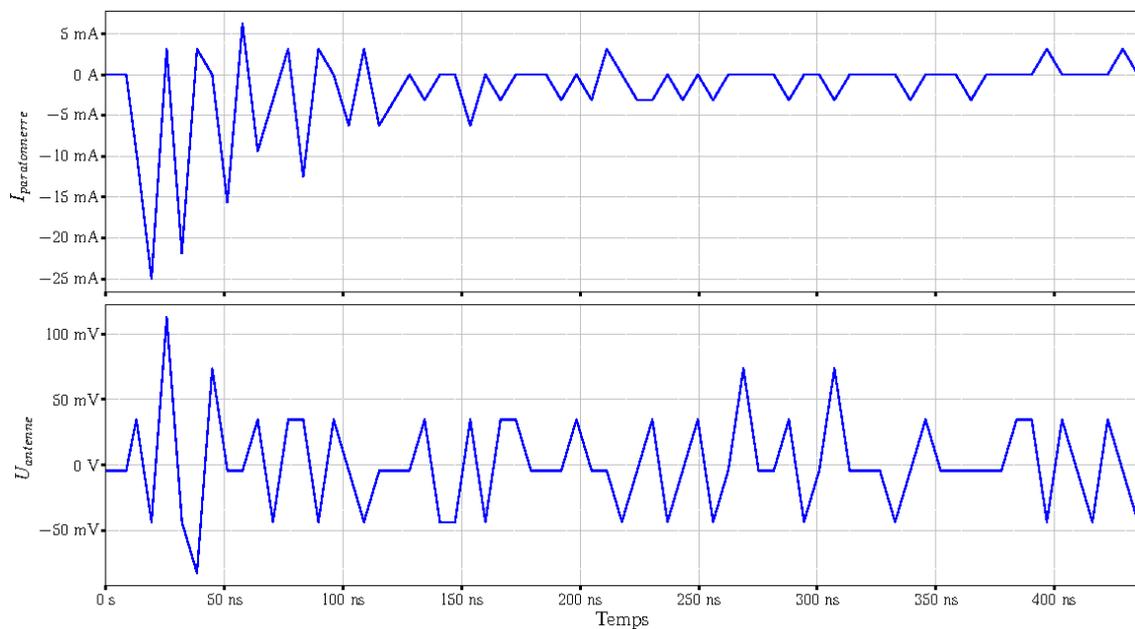


FIGURE 5.18 – En haut : décharge corona positive mesurée à la base du paratonnerre. En bas : tension du dipôle VHF du système d’acquisition

Dans cette configuration, il est possible de remarquer une éventuelle perturbation de

l'antenne sur la mesure. Cependant, la limitation de la quantification rend difficile la confirmation définitive de la perturbation de l'antenne par la décharge.

En supposant que le signal vu sur l'antenne est dû à la décharge, cela représente au maximum 110 mV. Avec une amplification d'environ 10 dB, la tension observée par le dipôle serait d'environ 30 mV. En simulation, la tension atteint 8 mV. Cette différence d'un facteur 3 peut s'expliquer par le fait que le capteur utilisé pour les mesures filtre les hautes fréquences, ce qui ne permet pas de reproduire correctement le front de montée rapide de la décharge.

Les mesures réalisées jusqu'à présent indiquent qu'il pourrait y avoir un certain couplage entre une décharge élémentaire et l'antenne, mais des mesures plus précises seraient nécessaires pour confirmer ce couplage.

Cependant, la sous-section 3.3.3 a montré que grâce à la superposition des décharges et au calcul de la moyenne des tensions sur l'antenne, les décharges avaient un impact visible sur les antennes. De plus, dans la section 3.3, différents types de décharges ont été identifiés, présentant des comportements spectraux variés, notamment dans la sous-section 3.3.4. Cela montre qu'il faudrait faire un modèle de source RLC par type de décharge observé.

Dans la section suivante, nous nous intéressons aux décharges positives qui ont un comportement bi-exponentiel.

5.4.3 Étude du couplage entre une décharge positive et les antennes VHF

De la même manière que dans la section précédente, une décharge positive qui a été mesurée sur le pylône extérieur est sélectionnée pour être modélisée afin de vérifier si le modèle électrique permet de reproduire cette décharge en simulation. Les tensions simulées sur les antennes sont ensuite présentées et comparées à celles mesurées sur le dipôle VHF du pylône extérieur pour comparer les niveaux de couplages.

5.4.3.1 Simulation de la décharge positive à la base du paratonnerre

Dans cette section, une décharge mesurée le 26 juin 2021 à 22h12 est utilisée, et les résultats de la simulation avec l'algorithme de Nelder-Mead donnant le quadruplet $(E, R, L, C) = (878 \text{ V}, 14385 \text{ } \Omega, 228.4 \text{ } \mu\text{H}, 7.14 \text{ pF})$ sont présentés.

La figure 5.19 permet de comparer différents courants, dont le courant simulé d'une impulsion positive.

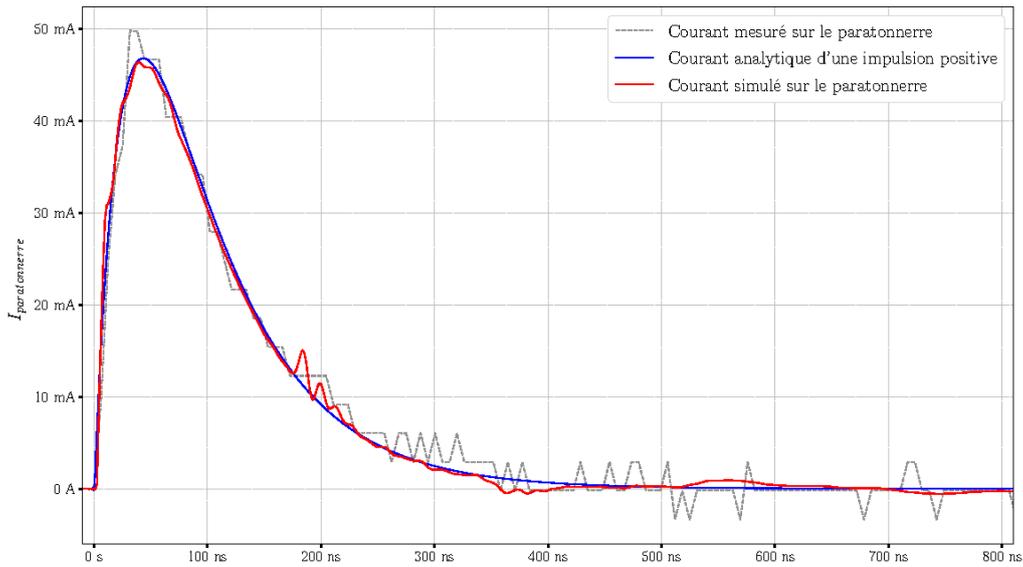


FIGURE 5.19 – Comparaisons des courants analytique, et des courants mesurés et simulés sur le paratonnerre pour une impulsion positive

Cette figure confirme que les trois courants (mesuré, courant analytique et courant simulé) sont similaires pour cette décharge, ce qui montre que le modèle est capable de bien reproduire la décharge. De plus, la présence de la réflexion du sol à environ 175 ns est observable sur le courant simulé, ce qui était également visible sur la figure 5.14. Cette résonance est due au courant faisant un aller-retour à cause du sol considéré en PEC.

La réponse fréquentielle montrée sur la figure 5.20 donne le module du courant simulé au niveau de la source, correspondant au courant simulé sur le fil connecté à l'élément rayonnant, à la base du paratonnerre et le module du courant analytique en fonction de leur fréquence.

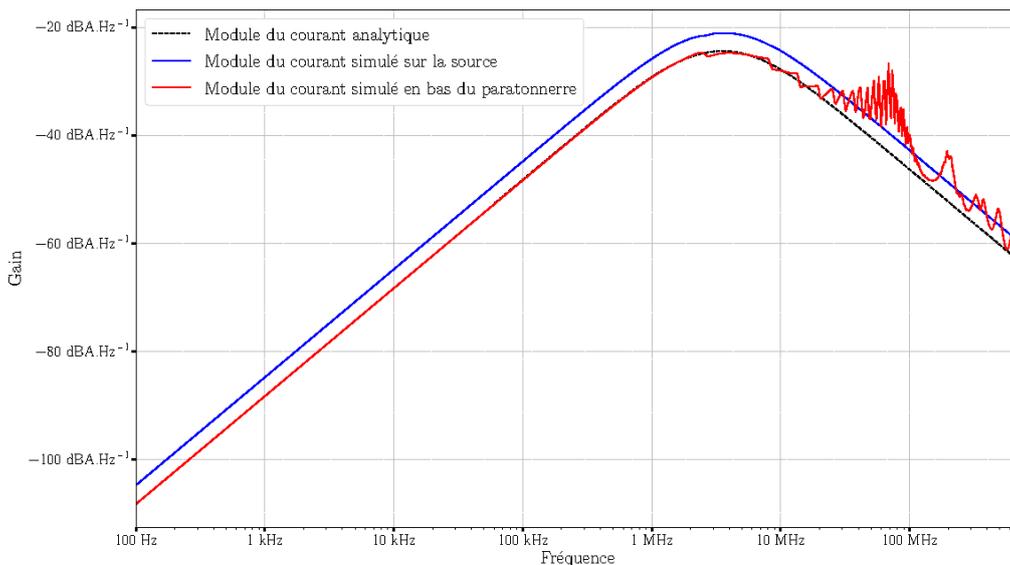


FIGURE 5.20 – Réponse fréquentielle du modèle électrique pour une décharge positive

Le spectre du courant simulé à la base du paratonnerre montre effectivement des fréquences de résonance qui interviennent après la fréquence propre du circuit RLC, proche de 3.5 MHz. Outre cette résonance, d'autres fréquences de résonance sont également visibles. Parmi elles, on retrouve la fréquence de résonance de 40 MHz mentionnée dans la section 5.4.2, qui correspond à la résonance du paratonnerre. En plus de cette résonance du paratonnerre, d'autres résonances apparaissent à des fréquences supérieures à 100 MHz. Ces résonances pourraient être causées par les barreaux horizontaux et/ou diagonaux du pylône. Cependant, les mesures de décharges positives ont rarement montré de telles résonances, ce qui suggère que le modèle surestime peut-être cette résonance.

De telles résonances pourraient potentiellement expliquer les phénomènes observés en bande VHF, à condition que les courants se couplent effectivement avec les antennes. Dans la section suivante, les niveaux de couplage sont examinés pour cette polarité de décharge afin d'évaluer leur impact sur les antennes VHF.

5.4.3.2 Étude des niveaux de couplages entre une décharge positive et les antennes VHF

Dans cette section, le couplage entre une décharge positive avec les antennes VHF est étudié puis comparé avec les mesures sur le pylône extérieur.

La figure 5.21 présente la tension de sortie au niveau des antennes VHF : en rouge, l'antenne supérieure et en bleu, l'antenne inférieure situé à 7.2 m en dessous de l'autre (2 tronçons).

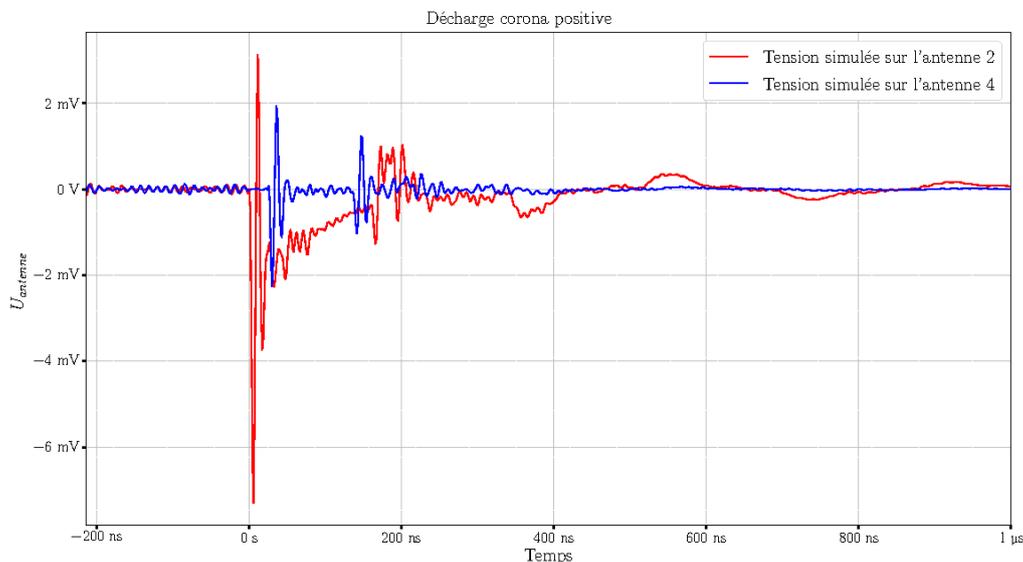


FIGURE 5.21 – Tensions simulées au niveau des antennes VHF pour une décharge corona positive

Ce graphique illustre le couplage de la décharge corona avec les antennes VHF. L'antenne numérotée 2 dans le chapitre 2 sur la figure 2.4 récupère une tension dont le niveau max correspond à -7 mV, tandis que l'antenne n°4 reçoit une tension dont le niveau max correspond à -2 mV. Cette différence pourrait être due à la distance entre les antennes mais ce n'est pas une certitude, les couplages antennes pylônes étant complexes.

Par ailleurs, un décalage temporel d'environ 26 ns est observé entre les impulsions relevées sur les antennes. Pour une propagation à la vitesse de la lumière, cela correspond à un écart de 7.6 m, ce qui est cohérent avec la distance entre les antennes.

La figure 5.22 présente le courant mesuré à la base du paratonnerre lors de la décharge positive utilisée pour les simulations (en haut), ainsi que la tension de sortie du dipôle VHF du système d'acquisition à ce même moment (en bas).

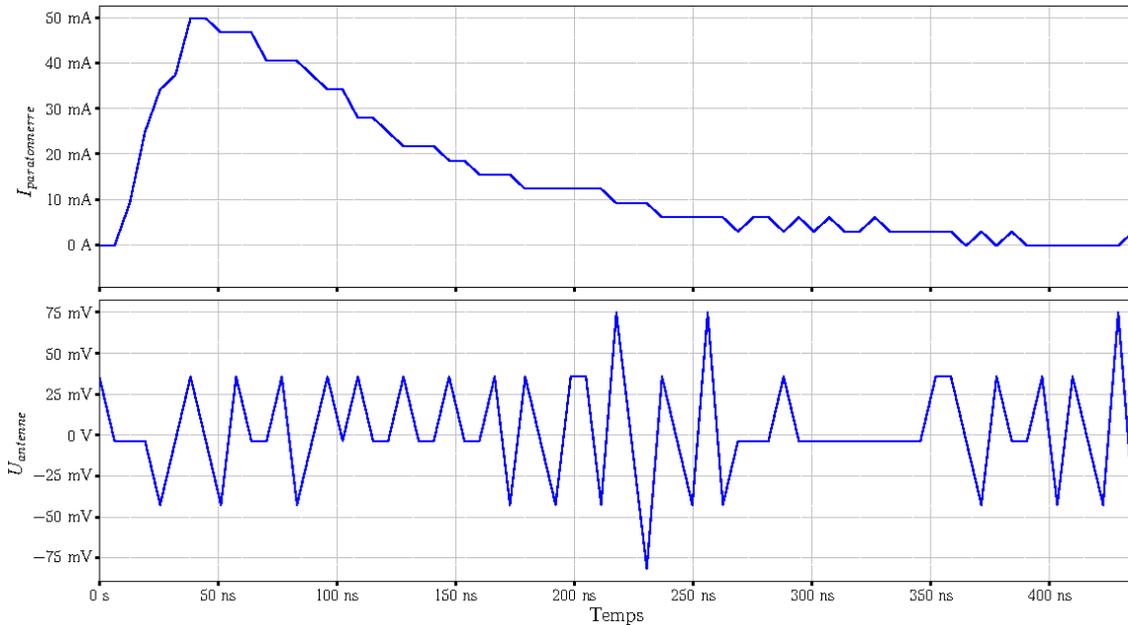


FIGURE 5.22 – En haut : décharge corona positive mesurée à la base du paratonnerre. En bas : tension du dipôle VHF du système d'acquisition

Le graphique présentant la tension de l'antenne montre un faible signal en sortie qui ne permet pas de déterminer si l'antenne s'est couplée avec la décharge élémentaire. Si un tel couplage existe, il semble être de faible niveau et n'affecte probablement pas le fonctionnement de l'antenne.

Cependant, en superposant toutes les décharges enregistrées pendant l'enregistrement du 26 juin 2021 à 22h12 sur la figure 5.23, il est possible d'observer si des tendances communes ou des variations significatives se manifestent, ce qui pourrait indiquer un potentiel couplage entre la décharge et l'antenne.

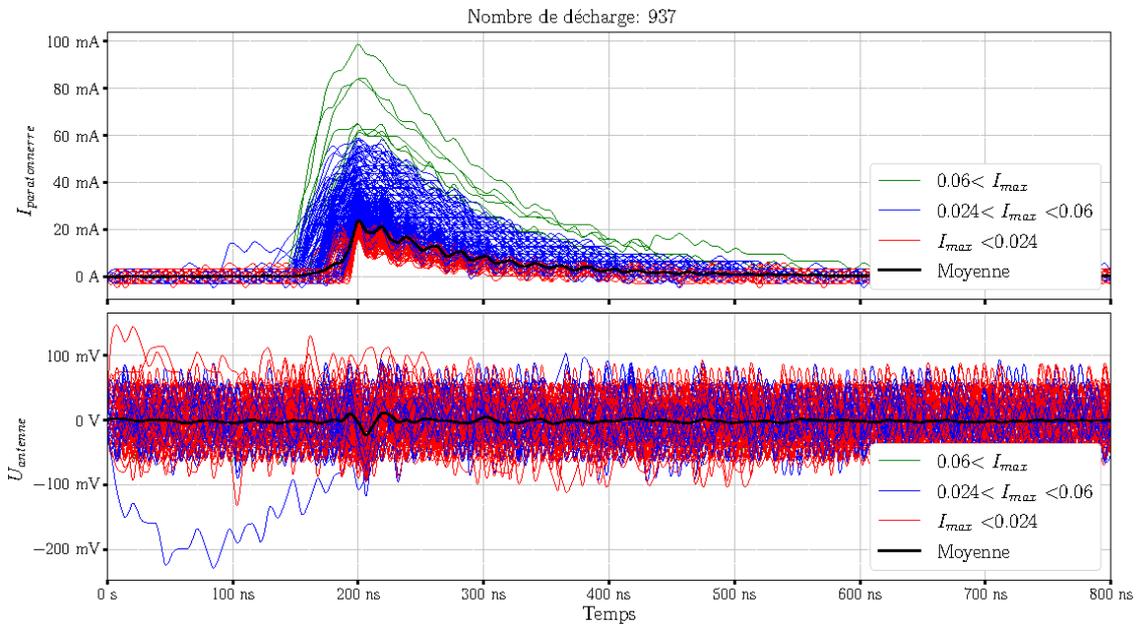


FIGURE 5.23 – En haut : décharge corona positive mesurée à la base du paratonnerre. En bas : tension du dipôle VHF du système d’acquisition

Effectivement, la moyenne indique que certaines décharges se sont couplées avec le dipôle VHF, mais à un niveau relativement faible. Il est important de noter que l’antenne est amplifiée d’un niveau supérieur à 10 dB dans la bande VHF, ce qui peut amplifier le signal provenant des décharges. Malgré cela, on constate qu’il n’y a pas de décharges ayant des amplitudes en dehors de l’intervalle de -100 mV à 100 mV, correspondant au niveau le plus faible de l’antenne.

Cela suggère que les décharges corona positives n’ont pas un impact significatif sur l’antenne VHF dans cet environnement spécifique. Cependant, il est important de prendre en compte que ces résultats sont spécifiques à cette configuration et à ces conditions d’expérimentation. Sur d’autres pylônes ou avec d’autres types d’antennes, les niveaux de couplage pourraient être différents.

Dans la section suivante, une comparaison des niveaux de couplages entre les deux polarités est réalisée afin de vérifier ce qui a été vu avec les mesures expérimentales.

5.4.4 Comparaison des niveaux de couplages entre les deux polarités

Dans cette section, les niveaux de couplage entre les décharges corona de polarités positive et négative sont comparés afin d’évaluer leur impact sur les antennes VHF. L’objectif est de déterminer quelle polarité est susceptible d’avoir des effets significatifs sur les antennes et de perturber leur fonctionnement.

La figure 5.24 présente une comparaison des courants simulés des décharges positive (en rouge) et négative (en bleu).

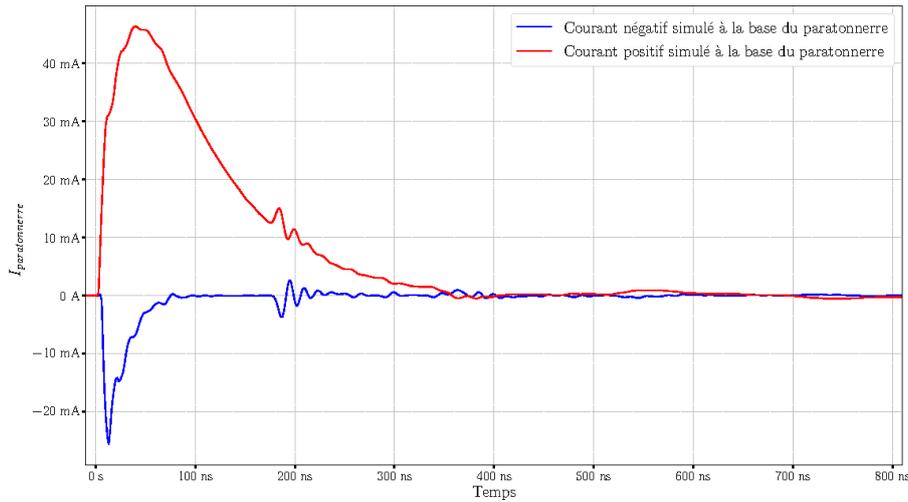


FIGURE 5.24 – Courant simulé des décharges corona positive et négative

L'impulsion positive présente une intensité maximale de 50 mA avec un temps de montée d'environ 50 ns et un temps de descente de 250 ns. Quant à l'impulsion négative, elle se caractérise par un temps de montée inférieur à 10 ns, atteignant une intensité maximale de -24 mA, et redescendant en seulement 70 ns.

Les niveaux de couplage simulés sur l'antenne n°2 en fonction des impulsions générées sont présentés sur la figure 5.25, où la courbe rouge représente le niveau de couplage pour la décharge positive et la courbe bleue pour la décharge négative.

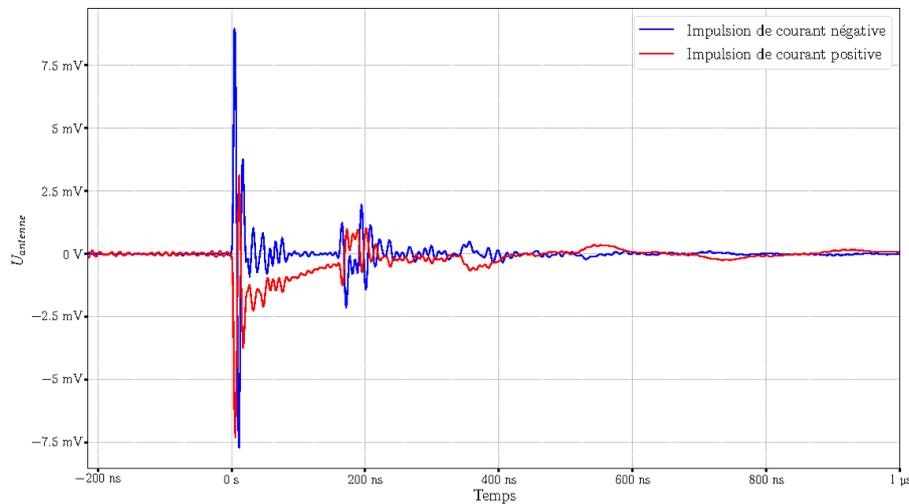


FIGURE 5.25 – Tensions sur une des antennes VHF n°2 (supérieure) pour les 2 polarités de décharges

L'observation de la figure 5.25 met en évidence une différence intéressante entre les décharges positives et négatives. Malgré une intensité deux fois inférieure pour la décharge négative par rapport à la décharge positive, l'antenne récupère une tension légèrement supérieure dans le cas de la décharge négative.

Cela suggère que l'intensité des décharges n'est pas le paramètre principal qui influence

le plus le niveau de couplage avec l'antenne. En revanche, le caractère rapide de la décharge négative lui confère un comportement plus élevé en fréquence. Ainsi, cette impulsion peut plus facilement perturber une antenne VHF, même avec une intensité moindre, en raison de sa capacité à générer des hautes fréquences qui peuvent être captées par l'antenne, ainsi que de son couplage avec des modes résonants du paratonnerre et des éléments du pylône.

Cette section a permis de comparer les niveaux de couplages entre les deux polarités et a montré que les décharges négatives avec de la résonance sont plus susceptibles de perturber les antennes VHF sur les pylônes de communications présents sur des stations avancées.

5.4.5 Conclusion

Dans cette section, le modèle électrique simplifié a été intégré à la modélisation du pylône extérieur afin d'étudier le couplage entre la décharge corona et les antennes VHF. Les décharges positives et négatives ont été étudiées séparément pour valider le modèle. Cependant, des limitations du modèle ont été observées, notamment son incapacité à reproduire les oscillations présentes dans les décharges négatives.

Les tensions mesurées sur les antennes VHF lors de l'occurrence des décharges de chaque polarité ont ensuite été examinées et comparées aux mesures expérimentales réalisées dans un environnement naturel. Les résultats ont révélé une différence d'un facteur 3 pour les décharges négatives entre les simulations et les mesures, tandis que le dipôle utilisé ne permettait pas de détecter les perturbations pour les décharges positives.

Enfin, les tensions simulées sur les antennes pour chaque polarité ont été comparées, confirmant ainsi que les décharges négatives présentaient un meilleur couplage avec les antennes, pouvant potentiellement entraîner des perturbations pour certaines VHF.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'étude des niveaux de couplage entre les décharges corona et une antenne VHF par simulation. Deux approches de modélisation ont été présentées, l'une basée sur la simulation de la physique de la décharge à l'aide d'un code plasma, et l'autre utilisant un code de simulation radiofréquence, plus adapté à notre problème et qui a donc été retenue.

Un modèle électrique basé sur un circuit RLC en régime apériodique a été conçu et implémenté dans l'outil de simulation radiofréquence pour étudier les courants de décharge sur un pylône de laboratoire. Les résultats des simulations ont été comparés aux mesures expérimentales, et une bonne correspondance a été observée, validant ainsi l'efficacité de notre modèle.

Ensuite, l'intérêt s'est porté sur l'étude du couplage entre la décharge corona présente sur le paratonnerre et une antenne VHF située sur le pylône extérieur. Des simulations ont été réalisées en intégrant le modèle électrique sur le pylône extérieur, et les tensions simulées ont été comparées aux mesures expérimentales effectuées dans un environnement naturel. Les résultats ont révélé que les décharges négatives présentaient un niveau de couplage plus élevé avec les antennes VHF que les décharges positives.

Conclusion

Rappel de l'objectif

Cette thèse avait pour objectif d'analyser les effets électromagnétiques des décharges corona sur les systèmes sol de communications aéronautiques, en se concentrant sur la compréhension des mécanismes de couplage entre les décharges et les antennes ou autres éléments présents sur les pylônes. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé des campagnes de mesures en environnement extérieur, ce qui nous a permis de construire une base de données terrain inédite. Parallèlement, nous avons mené des expérimentations en laboratoire pour étudier le comportement des décharges dans des conditions contrôlées et pour pouvoir les comparer avec les mesures effectuées en extérieur. Enfin, pour compléter notre analyse, nous avons réalisé des simulations en utilisant un modèle électrique de la décharge, en tenant compte des mesures expérimentales, et nous avons comparé les niveaux de couplage obtenus.

Résumé des travaux réalisés

Dans le **chapitre 1**, nous avons abordé divers aspects des communications aéronautiques, en mettant l'accent sur les liaisons en bande VHF et les équipements essentiels pour leur bon fonctionnement. Nous avons également examiné les interférences électromagnétiques dans les systèmes de communication sol aéronautique. Ensuite, nous nous sommes penchés sur les conditions électrostatiques de l'atmosphère, en étudiant le champ électrostatique ambiant de la Terre et ses variations lors de la formation et de l'électrification des cumulonimbus. Le chapitre a abordé les décharges hors équilibre en commençant par les décharges à basse pression, puis en se concentrant sur les décharges à haute pression, notamment les décharges à pression atmosphérique qui sont d'intérêt pour cette étude. Différents mécanismes tels que les avalanches, les avalanches successives et les streamers ont été examinés pour mieux comprendre ces décharges. Enfin, une discussion sur les décharges corona a été présentée en raison de leur pertinence dans le contexte de cette thèse. Par ailleurs, nous avons abordé le concept de compatibilité électromagnétique, mettant en évidence la susceptibilité des systèmes de communication aux perturbations telles que les décharges corona. Nous avons également présenté des méthodes d'analyse pour comprendre les effets de ces perturbations et trouver des solutions appropriées.

Le **chapitre 2** a été consacré à la conception d'un système d'acquisition autonome installé sur un pylône d'essai. Nous avons présenté en détail le pylône d'essai qui nous a été mis à disposition, en mettant en évidence ses caractéristiques et ses équipements. Nous avons également décrit les différents capteurs installés sur le pylône pour mesurer les différentes grandeurs électriques et électromagnétiques. Nous avons ensuite expliqué

les méthodes de collecte des données utilisées, en décrivant les outils informatiques et logiciels employés pour l'enregistrement et le stockage des données. Nous avons également présenté la méthode d'observation des différentes mesures, en mettant en avant l'interface graphique conçue pour faciliter la visualisation et l'analyse des données. Enfin, une attention particulière a été accordée à la calibration du système d'acquisition, étape cruciale pour garantir la fiabilité et la précision des mesures effectuées.

Dans le **chapitre 3**, nous avons réalisé une étude approfondie des événements électromagnétiques mesurés en environnement réel, en nous concentrant sur différentes signatures observées. Nous avons classifié les enregistrements en plusieurs catégories, notamment ceux sans présence d'événement électrostatique, c'est-à-dire des événements de type orageux mesurés par le moulin à champ, ceux accompagnés de phénomènes électrostatiques à proximité et à distance, ainsi que ceux présentant des peignes d'impulsions, qui revêtent une importance particulière dans cette thèse. Une attention particulière a été portée aux signatures de type bi-exponentiel. Nous avons minutieusement étudié les décharges corona élémentaires et effectué des analyses statistiques de leurs caractéristiques pour mieux comprendre leur comportement. De plus, nous avons réalisé une étude des autres voies de mesure lors de l'apparition de décharges corona afin d'évaluer les couplages entre les décharges et le dipôle installé. Les résultats ont montré que ces couplages étaient de faibles intensités en comparaison avec les intensités élevées des décharges observées et considérées comme sans résonance. Une part importante de l'analyse s'est concentrée sur l'étude des impulsions présentant une résonance, compte tenu de leur fréquence d'apparition élevée. Nous avons effectué une analyse approfondie d'une décharge élémentaire et réalisé une analyse statistique des caractéristiques des décharges mesurées. De plus, nous avons étudié leur corrélation avec l'antenne, révélant des niveaux de couplage significatifs et nous permettant de formuler l'hypothèse selon laquelle l'origine du brouillage en bande VHF pourrait être attribuée aux décharges avec résonance. Enfin, la réalisation d'une analyse spectrale a mis en évidence des fréquences de résonance propres à chaque groupe de décharges, mettant en lumière leur interaction différenciée avec le pylône. Parmi ces décharges, certaines ont des fréquences de résonance proches de la bande VHF aéronautique, suggérant qu'elles pourraient être responsables des interférences sur les communications sol-bord.

Dans le **chapitre 4**, nous avons réalisé une expérimentation visant à générer des décharges corona dans une configuration pointe-plan, en concevant divers instruments de mesure, notamment un shunt permettant de mesurer le courant à proximité de l'extrémité de la pointe. Cette expérimentation nous a permis de mettre en évidence les différents comportements des décharges corona en fonction de plusieurs paramètres, notamment la fréquence de répétition, qui est un indicateur important pour évaluer l'intensité du champ électrostatique pour les décharges négatives. Nous avons également identifié certaines limites de l'expérimentation, notamment la distance inter-électrode, ainsi que les difficultés de reproduction des conditions extérieures, telles que l'impact de la pluie, du vent et des variations du champ électrostatique. De plus, nous avons effectué une étude sur le couplage de la décharge, qui a révélé des interactions avec le système au niveau de la base de la pointe. Nous avons établi un lien de causalité entre les décharges sur la maquette et le courant à la base, mais nous avons également constaté l'existence d'autres comportements résonants indépendants de la polarité, indiquant que la décharge excitait d'autres éléments du pylône, tels que les barreaux horizontaux ou autres.

Enfin, le **chapitre 5** a été consacré à l'étude des niveaux de couplage entre les décharges corona et les antennes VHF, en utilisant des simulations. Deux approches de modélisation

ont été présentées : l'une basée sur la simulation de la physique de la décharge à l'aide d'un code plasma, et l'autre utilisant un code de simulation radiofréquence mieux adapté à notre problématique et qui a donc été retenue. Nous avons d'abord conçu un modèle électrique basé sur un circuit RLC en régime aperiodique, intégré dans l'outil de simulation radiofréquence pour étudier les courants de décharge sur un pylône de laboratoire. Les résultats des simulations ont été comparés aux mesures expérimentales, montrant une bonne concordance et validant ainsi notre modèle. Ensuite, nous nous sommes intéressés au couplage entre la décharge corona du paratonnerre et une antenne VHF sur le pylône extérieur. En intégrant le modèle électrique sur le pylône extérieur, nous avons simulé les tensions et les avons comparées aux mesures expérimentales réalisées en environnement naturel. Nous avons constaté que les décharges négatives présentaient un couplage plus élevé avec les antennes VHF que les décharges positives.

Perspectives et travaux futurs

Les perspectives de cette thèse sont nombreuses. L'objectif principal des mesures réalisées sur le pylône extérieur était d'étudier la phénoménologie des décharges corona. Pour cela, des mesures à la base du pylône ont été effectuées dans le but de quantifier les décharges corona et d'évaluer la présence de décharges à d'autres emplacements que le paratonnerre. Cependant, les résultats de ces mesures n'ont pas été concluants. Il serait donc judicieux de placer une sonde de courant couvrant toute la base du pylône afin d'améliorer cette mesure. Par ailleurs, il a été constaté que la quantification des numériseurs constituait une limite pour les faibles intensités des décharges. Une amélioration de la dynamique de mesure pourrait donc être intéressante afin d'explorer la possibilité de décharges de plus faible intensité. Actuellement, les mesures se limitent à des intensités minimales d'environ 15 mA, mais une meilleure dynamique de mesure permettrait d'identifier d'éventuelles décharges de plus faible intensité qui permettraient de compléter les analyses statistiques déjà réalisées.

En outre, certaines décharges mesurées ont excité des fréquences de résonance situées au delà de la bande de fréquences de la sonde de courant utilisée. Afin d'obtenir des informations plus détaillées sur ces décharges ayant une résonance, l'utilisation de sondes de courant avec une bande passante plus élevée serait intéressante. Ces sondes permettraient également d'obtenir des informations plus précises sur les fronts de montée des décharges et d'obtenir un spectre plus riche en données.

Il a également été constaté que la durée de certains trains d'impulsions de décharges dépassait celle des enregistrements effectués, et le temps entre deux mesures était relativement long (environ 45 secondes pour la campagne de mesure en 2021 et près de 100 secondes pour la campagne de 2022). Une amélioration bénéfique serait de diminuer le temps entre deux enregistrements en utilisant un autre système qui conserve les données en format binaire, sans les convertir en ASCII. Cette approche permettrait de capturer un maximum de trains d'impulsions des décharges, ce qui fournirait des informations plus précises sur la fréquence de répétition de ces décharges. En effet, la fréquence de répétition des décharges semble être un indicateur clé pour évaluer la force du champ électrostatique au niveau de la pointe. Cette information pourrait être confirmée en réalisant une analyse statistique des fréquences de répétition en laboratoire.

En ce qui concerne les décharges corona négatives présentant une résonance, plusieurs types de décharges ont été identifiés, chacun étant associé à des fréquences de résonance

différentes et à des phénomènes météorologiques spécifiques. Les seuls paramètres variables entre ces décharges sont l'humidité, la température, la pression et le champ électrostatique. Afin de mieux comprendre l'influence de ces paramètres sur les décharges, il serait pertinent d'ajouter des capteurs mesurant ces caractéristiques environnementales. De plus, une approche complémentaire serait de réaliser des simulations électromagnétiques pour chacune de ces décharges, permettant de comparer les niveaux de couplage entre chacune d'entre elles et les antennes. Cette analyse permettrait de mieux appréhender l'origine des interférences et d'obtenir des indications supplémentaires sur les mécanismes de couplage.

Une approche complémentaire pour mieux comprendre les interférences en bande VHF causées par les décharges corona serait de mener des expérimentations directement sur des pylônes présents sur des stations avancées. Cela permettrait d'observer en temps réel les fréquences de résonance excitées par les décharges corona et d'identifier plus précisément les éléments du pylône qui sont responsables de ces interférences. L'analyse des résultats pourrait conduire à des solutions potentielles, comme ajuster la taille des éléments du pylône pour éliminer les résonances indésirables en bande VHF. Cependant, ces modifications seraient difficile à mettre en œuvre, nécessitant des modifications complètes des pylônes et interrompant leur fonctionnement crucial pour les communications.

Il serait pertinent d'explorer la possibilité de contrôler les décharges corona (leur nombre, intensité, fréquence et fréquence de résonance excitée) en modifiant la configuration du paratonnerre, tout en préservant son efficacité en tant que dispositif de protection contre la foudre. Des paramètres tels que le rayon de courbure et les dimensions du paratonnerre pourraient être optimisés dans le but d'éviter l'émergence de résonances indésirables, parmi d'autres considérations.

En parallèle, des simulations électromagnétiques sur des pylônes de différentes tailles pourraient être réalisées afin d'évaluer l'impact des dimensions sur les phénomènes de résonance. En complexifiant les modèles en intégrant les câbles, le sol, et d'autres éléments présents sur le pylône, il serait possible de mieux appréhender les interactions entre les décharges corona et les différents composants. De plus, en plaçant des décharges à des emplacements variés sur le pylône, il serait possible d'identifier les zones les plus sensibles aux interférences électromagnétiques. En ajustant les paramètres des simulations, il deviendrait possible d'anticiper et de prévenir ces phénomènes de résonance, contribuant ainsi à la conception de pylônes mieux adaptés pour minimiser les interférences électromagnétiques. Ces approches permettraient d'assurer la sécurité et la fiabilité des systèmes de communication aéronautique tout en optimisant les performances des pylônes dans des environnements exposés aux décharges corona.

Ces simulations électromagnétiques pourraient bénéficier d'une amélioration en utilisant un outil de modélisation de la physique des décharges. En intégrant cet outil, le modèle électrique pourrait être enrichi en confirmant les temps caractéristiques des décharges et en fournissant des informations sur leurs dimensions.

D'autre part, toutes les décharges mesurées ont été triées manuellement et de manière empirique. Une automatisation de ce tri serait bénéfique pour améliorer sa rapidité et son efficacité. De plus, en ajoutant de nouveaux capteurs et en utilisant une classification plus précise des décharges, il serait possible d'étudier séparément chaque type de décharge. Cela permettrait de déterminer leur potentiel de perturbation des systèmes VHF et d'identifier les conditions météorologiques les plus favorables à leur occurrence. L'utilisation de techniques d'apprentissage automatique pour classer directement les décharges en dif-

férents sous-groupes pourrait grandement contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents à ces décharges.

Bibliographie

- [1] International Civil Aviation Organization, “Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Aeronautical Telecommunications, Volume III : Communication Systems,” Juillet 2007.
- [2] A. Azoulay, “Etude des brouillages sur le site DGAC de Champcueil, rapport no.4 simulation de brouillage par décharge électrostatiques,” Septembre 2006.
- [3] B. Souny, “Test d’un moulin à champ type Previstorm bruit émis dans la gamme VHF,” 2007.
- [4] DGAC-DSNA, “Station principale de la Sainte Baume Brouillage large bande Synthèse des mesures post décembre 2014,” Janvier 2015.
- [5] H. Galiègue and A. Chabory, “Rapport d’étude de bruit VHF sur l’antenne de réception VHF des stations Sainte-Baume 2017,” 2017.
- [6] H. Galiègue and A. Chabory, “Rapport d’étude de bruit VHF sur l’antenne de réception UHF-VHF de la station Saint-Jean-D’Illac,” 2017.
- [7] B. Souny, “Problème de bruit sur les antennes VHF de la Sainte-Baume,” Février 2014.
- [8] DGAC-DSNA-DTI-CVL, “Station Principale de Saint Jean d’Illac - Bruit large bande Compte-rendu de mesures,” 2017.
- [9] M. Wang, A. Chabory, and J.-P. Boeuf, “Simulation of the Noise Induced by Corona Discharges on a Ground VHF Antenna,” in *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, (Taipei, Taiwan), Mars 2013.
- [10] M. Wang and A. Chabory, “Radiation of corona discharges in the VHF aeronautical band,” in *International Conference on Lightning & Static Electricity (ICOLSE 2015)*, 2015.
- [11] M. Wang, *Study of corona discharges on VHF antennas caused by a natural electrostatic field*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2014.
- [12] Y. Raizer, V. Kisin, and J. Allen, *Gas Discharge Physics*. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [13] K. Holmes, *The Earth’s Electrical Environment*. National Aeronautics and Space Administration, 1998.
- [14] C. Saunders, “Charge Generation and Separation,” *Space Science Reviews*, vol. 137, pp. 355–368, 2008.
- [15] S. Phaiboon, V. Vivek, and S. Somkuarnpanit, “Analysis and measurement of radio-frequency interference due to the corona from 500 kV transmission lines,” in *2000 TENCON Proceedings. Intelligent Systems and Technologies for the New Millennium*, vol. 1, pp. 88–91, 2000.
- [16] H.-Z. Fu, Y.-J. Xie, and J. Zhang, “Analysis of Corona Discharge Interference on Antennas on Composite Airplanes,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 4, pp. 822–827, 2008.

- [17] K. Arai, W. Janischewskyj, and N. Miguchi, "Micro-gap discharge phenomena and television interference," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, pp. 220–232, 1985.
- [18] R. Olsen and B. Stimson, "Predicting VHF/UHF electromagnetic noise from corona on power-line conductors," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, pp. 13–22, Février 1988.
- [19] A. J. Otto and H. Reader, "Wideband and narrowband HVDC conductor corona test methods for radio noise prediction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2950–2957, Octobre 2010.
- [20] H.-Z. Fu, Y.-J. Xie, and J. Zhang, "Analysis of Corona Discharge Interference on Antennas on Composite Airplanes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 4, pp. 822–827, 2008.
- [21] R. Tanner and J. Nanevicz, "An analysis of corona-generated interference in aircraft," *Proceedings of the IEEE*, vol. 52, pp. 44–52, 1964.
- [22] R. Stimmel, E. Rogers, F. Waterfall, and R. Gunn, "Army-navy precipitation-static project : Part III-Electrification of Aircraft Flying in Precipitation Areas," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 4, pp. 167–177, 1946.
- [23] R. L. Tanner and J. E. Nanevicz, "Radio noise generated on aircraft surfaces," Septembre 1956.
- [24] G. Kinzer and J. McGee, "Army-Navy Precipitation-Static Project : Part IV- Investigations of Methods for Reducing Precipitation-Static Radio Interference," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 234–240, 1946.
- [25] H. Page and D. Whythe, "Corona and precipitation interference in VHF television reception," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 114, pp. 566–576, 1967.
- [26] C. F. Clark and M. Loftness, "Some observations of foul weather EHV television interference," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 1157–1168, 1970.
- [27] P. Fantappiè, "L-DACS Spectral Efficiency," in *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pp. 1–5, 2019.
- [28] N. Mäurer, T. Gräupl, and C. Schmitt, "L-band Digital Aeronautical Communications System (LDACS)." Workgroup : RAW.
- [29] LDACS, "Publications and Links."
- [30] Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR), "CISPR 16-1-4 :2019," 2019. Consulté le 4 juillet 2023.
- [31] C. Helstrom, "The spectrum of corona noise near a power transmission line," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III : Power Apparatus and Systems*, vol. 80, pp. 831–835, Avril 1961.
- [32] M. Abdel-Salam and E. Abdel-Aziz, "Improved calculation for corona loss on three-phase power transmission lines," in *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1994 IEEE*, pp. 708–715, IEEE, 1994.
- [33] S. A. S. Baharin, M. R. Ahmad, D. Periannan, M. H. M. Sabri, B. Y. Seah, M. Z. A. A. Aziz, M. M. Ismail, *et al.*, "Wavelet analysis of the onset of VHF and microwave radiation emitted by lightning," in *2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, pp. 297–300, IEEE, 2018.
- [34] O. Gish, "Evaluation and interpretation of the columnar resistance of the atmosphere," *Journal of Geophysical Research*, vol. 49, pp. 45–51, 1944.

- [35] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning : physics and effects*. Cambridge university press, 2003.
- [36] N. Renn’o, A.-S. Wong, S. Atreya, I. Pater, and M. Roos-Serote, “Electrical discharges and broadband radio emission by martian dust devils and dust storms,” *Science*, vol. 306, pp. 1769–1772, 2004.
- [37] J. R. Dwyer and M. A. Uman, “The physics of lightning,” *Physics Reports*, vol. 534, no. 4, pp. 147–241, 2014.
- [38] J. S. E. Townsend, *Electricity in Gases*. Clarendon Press, 1915.
- [39] E. Wagenaars, *Plasma breakdown of low-pressure gas discharges*. PhD thesis, Applied Physics and Science Education, 2006.
- [40] F. Massines and S. Mottin, *Plasmas froids. Génération, caractérisation et technologies*. MRCT-CNRS, 2004.
- [41] K. Ouya, *Élimination des polluants par plasmas froids et association à la catalyse : acétaldéhyde et phénol*. PhD thesis, Université Paris Sud - Paris XI, 2015.
- [42] J.-C. Matéo-Vélez, *Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronnées et de son interaction avec l’aérodynamique*. PhD thesis, École nationale supérieure de l’aéronautique et de l’espace (Toulouse), 2006.
- [43] R. Morrow and J. L. Lowke, “Streamer propagation in air,” *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 30, pp. 614–627, 1997.
- [44] R. Morrow, “The theory of positive glow corona,” *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 30, pp. 3099–3114, 1997.
- [45] G. W. Trichel, “The Mechanism of the Negative Point to Plane Corona Near Onset,” *Physical Review*, vol. 54, p. 1078, 1938.
- [46] Y. Zhang, L.-J. Liu, J.-S. Miao, Z.-L. Peng, and J.-T. Ouyang, “Trichel Pulse in Negative DC Corona discharge and Its Electromagnetic Radiations,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, pp. 1174–1180, 2015.
- [47] “Géoportail.” Online.
- [48] F. Costa and P. Poulichet, *Sondes pour la mesure de courant en électronique de puissance*. Ed. Techniques Ingénieur, 2005.
- [49] P. L. Dowell, “Effects of eddy currents in transformer windings,” *Proc Inst. Elect. Eng*, vol. 113, Août 1966.
- [50] W. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*. CRC Press, 3rd ed., 1996.
- [51] Pearson Electronics, Inc., “Current monitor model 150.” <https://pearsonelectronics.com/pdf/150.pdf>, 2023.
- [52] Pearson Electronics, Inc., “Current monitor model 3525.” <https://pearsonelectronics.com/pdf/3525.pdf>, 2023.
- [53] Transfer Multisort Elektronik, “RG Coaxial Cables Datasheet.” https://www.tme.eu/Document/151b7fc68e82e16d70ee1f3bf3c18100/M_004-005-006-007_RG-coaxial_cables.pdf, 2023.
- [54] R. G. Harrison and G. J. Marlton, “Fair weather electric field meter for atmospheric science platforms,” *Journal of Electrostatics*, vol. 107, p. 103489, 2020.
- [55] Microsoft, “Microsoft Open Database Connectivity (ODBC).” <https://learn.microsoft.com/fr-fr/sql/odbc/microsoft-open-database-connectivity-odbc>, 2023.
- [56] Pico Technology, “picosdk-python-wrappers Repository.” <https://github.com/picotech/picosdk-python-wrappers>, 2023.

- [57] Pico Technology, “Picoscope 5000D Series Data Sheet.” <https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope-5000d-series-data-sheet.pdf>, 2023.
- [58] Pico Technology, “PicoScope 6000CD Series Data Sheet.” <https://www.picotech.com/download/datasheets/PicoScope6000CDSeriesDataSheet.pdf>, 2023.
- [59] T. N. Giau and J. Jordan, “Trichel streamers and their transition into the pulseless glow discharge,” *Journal of applied physics*, vol. 41, no. 10, pp. 3991–3999, 1970.
- [60] C. Moore, G. Aulich, and W. Rison, “The case for using blunt-tipped lightning rods as strike receptors,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 42, no. 7, pp. 984–993, 2003.
- [61] G. Dufour and F. Rogier, “Numerical modeling of dielectric barrier discharge based plasma actuators for flow control : the copaier/cedre example,” *Aerospace Lab*, no. 10, 2015.
- [62] J. A. Bittencourt, *Fundamentals of plasma physics*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [63] T. Volpert, E. Bachelier, S. Bertuol, and I. Junqua, *ALICE parallèle V2.6 manuel d'utilisation*, 2021.
- [64] D. Prost, F. Issac, T. Volpert, W. Quenum, and J.-P. Parmantier, “Lightning-Induced Current Simulation Using RL Equivalent Circuit : Application to an Aircraft Subsystem Design,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 2, pp. 378–384, 2013.
- [65] V. Gobin, “PAME document utilisateur d’Else3D,” 2002.
- [66] J. A. Nelder and R. Mead, “A Simplex Method for Function Minimization,” *Comput. J.*, vol. 7, pp. 308–313, 1965.