

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
IMMACULÉE HOUNASSÈ NASSOU

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PERTURBATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES  
EN AÉRONAUTIQUE

OCTOBRE 2017

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Programme offert par l'Université du Québec à Trois-Rivières

## MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PERTURBATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES EN AÉRONAUTIQUE

PAR

IMMACULÉE HOUNASSÈ NASSOU

---

Professeur Adam Skorek, directeur de recherche      Université du Québec à Trois-Rivières

---

Professeur Yves Dubé, évaluateur      Université du Québec à Trois-Rivières

---

M. Fidele Moupfouma, évaluateur      Bombardier

## Résumé

De nombreuses recherches concernant l'impact de la foudre sur l'avion ont été faites. Mais la première problématique que l'on rencontre est le désir constant de limiter les dégâts, d'assurer et d'améliorer la sécurité des passagers. De par sa conception, le radôme (nez de l'avion) qui représente la partie avant, la première partie bombée qu'on aperçoit en se mettant face à l'avion est la partie la plus vulnérable. Petrov & Waters, considèrent l'avion comme un ellipsoïde conducteur sur laquelle ils viennent appliquer un champ électrique.

L'onde électromagnétique, est formée du champ magnétique et du champ électrique qui sont des paramètres qui varient avec le temps. Cette onde est initiée par des charges en mouvement est caractérisée par une longueur d'onde  $\lambda$ , une fréquence et une vitesse de propagation qui est égale à la célérité de la lumière.

Tout champ électrique n'est pas forcément nuisible à un avion, un avion peut supporter un champ électrique jusqu'à un seuil critique. C'est au-delà de ce seuil que sont observés les effets du champ électrique sur l'avion.

Ce mémoire présente les effets directs auxquels est soumis un avion lorsqu'il est frappé par la foudre. Sur la base de calcul et d'hypothèses, des méthodes de simulations ont été utilisées afin de modéliser la structure du fuselage de l'avion ainsi que des circuits afin de créer des générateurs de haute tension et de courant.

## Remerciements

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie M. Adam Skorek, professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières. En tant que Directeur de mémoire, il m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Je remercie aussi M. Fidele Moupfouma, de l'entreprise Bombardier qui a accepté suivre mon travail et me prodiguer des conseils pour ma correction.

Mes remerciements vont aussi à M. James Agbégavi Directeur du Département Génie Chimique à l'Université du Québec à Trois-Rivières pour les conseils et sa présence.

Un grand merci à mes parents pour votre soutien sans faille et pour les valeurs que vous m'avez transmises.

# Table des matières

Résumé.....	iii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures .....	ix
Liste des symboles .....	x
Chapitre 1 - Les phénomènes électromagnétiques en aéronautique .....	1
1.1 Introduction .....	1
1.1 Aimantation .....	2
1.2 Champ magnétique.....	2
1.3 Induction magnétique .....	4
1.4 La force électrique.....	4
1.5 Champ magnétique et champ électrique.....	5
1.6 La nature du milieu concerné .....	6
1.6.1 Émission d'une onde électromagnétique .....	7
1.6.2 Propagation .....	7
1.7 Les effets troposphériques.....	8
1.8 Caractéristiques de la variabilité des phénomènes de propagations.....	9

1.8.1	Propagation troposphérique ou propagation transhorizon .....	9
1.8.2	Propagation superficielle .....	10
1.8.3	Propagation ionosphérique.....	10
1.8.4	Diffraction troposphérique.....	11
<b>Chapitre 2</b>	<b>- La foudre .....</b>	<b>12</b>
2.1	Naissance d'un orage.....	12
2.2	Cumulonimbus .....	15
2.3	Effets de la foudre .....	16
2.3.1	Effet thermique .....	16
2.3.2	Effets électrodynamiques.....	17
2.3.3	Effets électromagnétiques.....	18
2.3.4	Effets directe et indirecte de la foudre sur un avion .....	18
2.4	Processus d'accrochage de la foudre sur un avion .....	19
2.5	Compatibilité électromagnétique.....	20
2.6	Types de perturbations .....	21
2.7	Les sources de perturbations et les mesures à prendre .....	22
2.8	Effets du rayonnement cosmique et Biochamps .....	23
<b>Chapitre 3</b>	<b>- Description et modélisation mathématique.....</b>	<b>24</b>
3.1	Introduction .....	24

3.2	Description des systèmes.....	24
3.2.1	Finite Difference Time Domain (FDTD) .....	25
3.2.2	Les équations de Maxwell avec FDTD.....	25
3.3	Description du système et modèle choisi .....	27
3.4	Les générateurs de haute tension.....	29
3.4.1	Les trois types de tensions conventionnelles .....	29
3.4.2	Générateur électrostatique ou générateur de Van de Graff.....	31
3.4.3	Générateur de Marx .....	32
3.4.4	Les différents chocs obtenus et leurs applications. ....	33
3.5	Réflexion et guidage des ondes électromagnétique dans un conducteur parfait	34
<b>Chapitre 4 - Modélisation numérique du modèle choisit.....</b>		<b>36</b>
4.1	Modélisation numérique.....	36
4.2	Le câblage électrique dans un avion.....	36
4.3	Modélisation avec les outils choisi.....	37
4.3.1	Modélisation du câblage .....	39
4.4	Résultats .....	44
<b>Chapitre 5 - Conclusion .....</b>		<b>55</b>
Bibliographie (ou Références) .....		57
Annexe A – Programmation 1 .....		59



## Liste des tableaux

Tableau 1-1 Comparaison entre le champ magnétique et le Champ électrique.....	6
Tableau 2-1 Types de perturbations et leurs origines .....	21
Tableau 2-2 Source de perturbations et mesures à prendre.....	22
Tableau 4-1 Les paramètres à considérer[25] .....	38
Tableau 4-2 Descriptif des paramètres pour la modélisation d'un avion.....	39
Tableau 4-3 Paramètres des câbles[11].....	43
Tableau 4-4 Température maximale de conduction en fonction des blindages .....	53
Tableau 4-5 Résistance par matériaux en fonction de la température .....	53



## Liste des symboles

FDTD	Finite Difference Time Domain
CEM	La compatibilité électromagnétique
$n$	Indice de réfraction
$Q$	Charge
$B$	champ d'induction
$W$	Énergie
$Z$	Impédance
$E$	Champ électrique
$E_{cr}$	Champ électrique critique
km	Kilomètres
°C	Celsius
$U$	Tension
$I$	Intensité

$P_j$	Puissance volumique dissipée par effet joule (j est l'indice)
$\vec{E}$	Champ intérieure à un conducteur parfait
$\gamma$	Conductivité
$\vec{j}$	Densité de courant volumique de conduction
$\text{mm}^3$	Millimètre cube
$\text{mm}$	Millimètre
$\epsilon$	Permittivité
$\mu$	Perméabilité
$\rho$	La densité de la charge
$\sigma$	Conductivité électrique

# Introduction générale

Le fonctionnement d'un avion peut sembler très complexe pour certaines personnes et simple pour celles dans le domaine. Mais pour la majorité des personnes qui ne font pas de la conception aéronautique, la première question qu'on se pose est de savoir comment un engin aussi lourd peut s'envoler et planer dans les airs sans tomber sous la loi de la gravitation que nous connaissons tous.


Sous quelle loi alors l'avion s'envole-t-il alors qu'il pèse en moyenne 150 tonnes à vide et son poids pourrait atteindre même les 380 tonnes après chargement des bagages et embarquement des passagers. Le vecteur d'accélération qui est la dérivée de la vitesse par rapport au temps est un des facteurs parmi tant d'autres qui permettra d'expliquer ce phénomène. En effet lors du décollage, l'avion prend des vitesses différentes par rapport au temps pour atteindre une vitesse maximale donc il existe une accélération. Lors de cette accélération, l'air se déplace à toute vitesse au-dessus et en dessous des ailes de l'avion. De par sa forme bombée vers le bas il implique que l'air qui passe au-dessus des ailes est plus rapide que celui qui passe en dessous car à une distance plus longue à parcourir.

L'avion s'élève dans les airs donc parce qu'une dépression naît au-dessus de l'avion et l'air qui passe en dessous des ailes pousse l'avion vers le haut. L'avion est aspiré par l'air vers le haut ce qui fait qu'il s'élève dans les airs. Toute la vitesse et l'accélération gagnées par l'avion sont dues à la force des moteurs il va donc de soi qu'il faut que les avions soient dotés de moteurs puissants et performants qui puissent en même temps résister aux intempéries de toutes sortes qui pourraient surgir car la force d'un avion lui vient tout droit de ses moteurs.


Un avion peut être fait sur une base d'alliage de métaux ou de matériaux composites ainsi que de nombreux circuits électriques. De ce fait il n'est donc pas à l'abri de perturbations électromagnétique celles-ci pouvant provenir de n'importe où soit de l'extérieur de l'appareil soit de l'intérieure.

Étant donné que le voyage aérien est le plus rapide et le plus utilisé de nos jours pour relier de très longues distances, il est donc du devoir du concepteur de minimiser le plus possible les risques pour protéger et sauver les vies des passagers car chaque vie est inestimable. De plus le souhait de l'industrie aéronautique étant de concevoir des appareils les plus fiables possibles tout en éradiquant définitivement les risques d'accidents qui pourraient provenir d'une mauvaise conception ou d'une défaillance mécanique ou électrique.


Pour ce travail de maitrise le travail est réparti comme suit :

 Le premier chapitre qui traitera des phénomènes électromagnétiques en aéronautique.

Le but de ce chapitre est de répertorier les phénomènes et toutes les intempéries qui peuvent de près ou de loin causer des perturbations électromagnétiques qui a leurs tours peuvent affecter le bon fonctionnement d'un avion.

 Un deuxième traitera de la foudre

On abordera les processus qui rentrent dans la naissance de la foudre, les effets que peut avoir la foudre sur un avion de près ou de loin, et comment se passe le processus d'accrochage de la foudre sur un avion.

 Un troisième chapitre, qui parlera de la description et modélisation mathématique.

On exposera la description du système, les différentes méthodes de résolutions ainsi que tous les paramètres qui rentrent dans la conception du système.

✚ Un quatrième chapitre présentera la modélisation numérique du modèle choisi, les résultats obtenus ainsi que leur description.

✚ Un cinquième chapitre sera la conclusion du document.

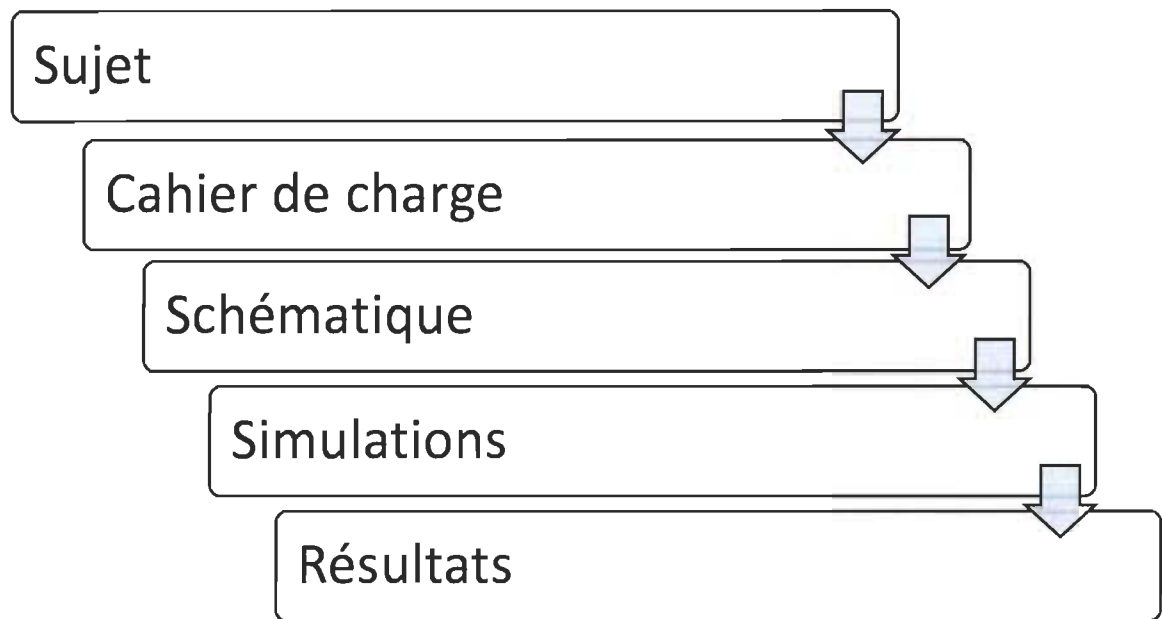


Figure 1-1 Diagramme de la méthodologie du travail



# Chapitre 1 - Les phénomènes électromagnétiques en aéronautique

## 1.1 Introduction

Le principe du magnétisme pourrait se traduire comme le transport de l'énergie dans un milieu. Ce transport se faisant d'un point à un autre suivant certaines règles physiques et ceci dépend beaucoup du milieu de propagation pour ainsi dire du milieu dans lequel on se trouve. Parler de magnétisme reviendrait à parler de l'aimantation, du moment magnétique, d'induction électromagnétique, champ magnétique et de force magnétique. Les corps pouvant subir des actions magnétiques importantes sont les substances ferromagnétiques qui sont par exemple : le fer, le cobalt, le nickel et leurs alliages.

On entend par alliage la combinaison d'un métal avec un ou plusieurs autres métaux dans le but d'obtenir une certaine matière avec des caractéristiques précis.

Qu'un avion soit conçu sur base d'alliage ou de matériaux composite, certaines des substances ferromagnétiques se retrouvent dans cette composition initiant ainsi l'existence d'un champ magnétique. Les actions d'un champ magnétique consistent principalement à des effets d'attraction ou de répulsion.

## 1.1 Aimantation

Peu de corps réagissent aux effets magnétiques. Cela est déterminé par l'orientation des électrons dans un corps. Si deux électrons se regroupent et prennent des orientations opposées alors l'aimantation est annulée. L'aimantation désigne une grandeur vectorielle qui permet de caractériser le comportement magnétique d'une matière [1]. Il existe des aimants naturels comme la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Tous les matériaux riches en fer et nickel peuvent subir de très importantes attractions. En aéronautique, l'utilisation des différents matériaux est multiple. De l'aluminium à l'acier en passant par la fibre de verre et même le plastique ou le bois. D'où l'apparition des matériaux composite qui sont introduits dans le but d'améliorer la perte de poids et ainsi augmenter la vitesse des appareils et aussi surtout augmenter la ténacité vis à vis des intempéries. Mais il existe d'autres répercussions auxquelles il faut penser en introduisant les matériaux composites dans la conception des avions. Comme par exemple l'évacuation des décharges électrique lorsque l'avion est frappé par la foudre par exemple. L'aimantation, se produit quand les électrons d'un matériau s'alignent tous dans la direction des lignes magnétiques en présence d'un aimant permanent. Il y a donc attraction par induction. La présence d'un aimant permanent provoque une aimantation dite induite chez les autres matériaux dits "aimantables" qui ne sont pas des aimants permanents et les transforment en aimant[1][2][3].

## 1.2 Champ magnétique

Le champ magnétique est une région ou un corps qui est soumis à une force magnétique créée par un aimant. Ce champ magnétique est caractérisé par son vecteur champ magnétique  $H$  et possède, une direction, un sens et une intensité.

Expérience :

Les hauts parleurs contiennent des aimants. Quand nous approchons trop près un haut-parleur d'une télévision allumée, il se produit une déformation des images et des couleurs. Pourquoi, il apparaît des images sur l'écran de la télévision parce que des électrons viennent percuter l'écran à des endroits précis et ainsi il se forme des images. La présence d'un haut-parleur, d'un aimant, ou d'un quelconque appareil contenant un aimant viendrait altérer la trajectoire de ces électrons, ce qui produirait une malformation des images et la mauvaise qualité des couleurs[3].

Les électrons d'un matériau en présence d'un aimant changent de trajectoire sans toutefois changer de vitesse. Cette trajectoire est modifiée par la présence du champ magnétique de l'aimant. Et la force exercée sur les électrons est la force magnétique. Tous les câbles électriques même les plus petits fils qui se trouvent dans les maisons créent un champ magnétique lorsqu'ils sont traversés par le courant électrique. Dans un avion se retrouvent plusieurs milliers de kilomètres de câbles acheminant chacun des informations différentes et aussi des aimants permanents contenu dans les moteurs. Dans un avion se trouve donc les deux sources de champ magnétique : les courants et les aimants auxquels il faut ajouter les sources imprévues et naturelles comme la foudre.

Autour de la terre existe un champ magnétique nommé bouclier terrestre qui fait partie de la magnétosphère destinée à protéger la terre des rayons cosmiques. Le champ magnétique terrestre est comparable à un aimant droit dont le pôle magnétique sud se trouve à proximité du pôle géographique nord et le pôle magnétique nord à proximité du pôle géographique sud. C'est à partir du principe du champ magnétique terrestre que les boussoles virent le jour car

il a été observé que tous les composants terrestres contenant de la magnétite ont tous tendance à s'aligner dans la même direction qui correspond aux pôles de la terre [4][5]

### **1.3 Induction magnétique**

Un métal est conducteur car il possède des électrons libres qui peuvent se déplacer et permettre la circulation du courant électrique. Comme dit au paragraphe 1.2, le champ magnétique alterne la trajectoire des électrons. Quand un fil métallique se retrouve dans un champ magnétique, les électrons libres suivent une nouvelle trajectoire mais ne quittent pas le métal, sous l'effet du champ magnétique, les électrons tournent dans le fil et ainsi se crée un courant électrique induit. L'induction magnétique est l'apparition d'un courant électrique dans un matériau qui se retrouve sous l'influence d'un champ magnétique externe. C'est sur ce principe que fonctionne les alternateurs, dynamos, les microphones pour produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique. Lorsqu'on fait tourner une grosse bobine en présence d'un gros aimant donc dans un champ magnétique, il se crée un courant induit produit par la bobine. Par exemple un barrage hydroélectrique ou la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique comme pour les haut-parleurs ou les moteurs électriques.

### **1.4 La force électrique**

La force électrique est cette force d'attraction ou de répulsion que peut exercer un corps chargé électriquement sur un autre corps. L'espace dans lequel cette force agit est le champ électrique. Pour la force gravitationnelle, la force dépend du poids de l'objet mais dans notre cas elle dépend de la charge de l'objet et de la distance qui sépare deux objets. On se base

sur la loi de Coulomb pour calculer l'intensité de la force entre deux objets chargés électriquement et immobiles.[6][7]

“La **loi de Coulomb** exprime la force de l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement et immobiles. Elle stipule que cette force est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les charges et directement proportionnelle au produit des charges”[8]

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-1)$$

### 1.5 Champ magnétique et champ électrique

Le champ magnétique et le champ électrique sont liés car ils prennent tous deux leurs origines dans l'utilisation de l'électricité. Il existe plusieurs sources de champ magnétique sur terre, partant des téléphones cellulaires aux antennes satellites. Elles sont partout. Pareil pour le champ électrique car tout courant électrique circulant d'une base à destination d'un appareil crée aussi des champs auxquels nous sommes exposés. [6][7]

Tableau1-1 Comparaison entre le champ magnétique et le champ électrique

	Origine	Phénomène	Source	Unité de mesure	Impact pour le corps humain
Champ magnétique	Courant électrique	Invisible	Engendré par le courant électrique (A)	Tesla	Le corps humain ne peut le percevoir par la peau (le sentir)
Champ électrique	Courant électrique	Invisible	Engendré par la tension électrique (V)	V/m	Le corps humain peut le percevoir par la peau (le sentir)

### 1.6 La nature du milieu concerné

Parler du milieu concerné reviendrait à faire des études sur l'endroit où on se trouve et comment se passe la propagation des ondes électromagnétique dans ce milieu étant donné que les ondes se déplacent dans le vide dépendamment de la nature du milieu.

Une onde serait une perturbation qui se propage tout en transportant de l'énergie et non de la matière c'est par exemple les ondes lumineuses, les rayons x, les ondes radios. Dans une onde électromagnétique, le champ électrique se propage dans un axe et perpendiculairement à cet axe nous retrouvons le champ magnétique. On se sert de l'onde électromagnétique pour exprimer le rayonnement électromagnétique.

### *1.6.1 Émission d'une onde électromagnétique*

Les ondes électromagnétiques, se déplacent dans le vide c'est-à-dire même en l'absence d'un milieu matériel et elles se propagent à grande vitesse. Sachant qu'une onde en générale se caractérise par sa fréquence et son amplitude, les ondes électromagnétiques quant à elles se caractérisent par des fréquences plus élevées que celles du son car celles du son sont des ondes électromagnétiques avec la fréquence la plus petite. Les ondes sonores ont une fréquence entre 87,5 à 108 MHz. Prenons l'exemple d'une radio FM qui donne son adresse en donnant sa fréquence, 120.9 mégahertz (un mégahertz est un million d'hertz).

### *1.6.2 Propagation*

Une onde électromagnétique au départ est une vibration étant simultanément un champ électrique et magnétique cela a conféré le nom champ électromagnétique. Le champ électromagnétique est invisible et immatériel. La propagation se fait lorsqu'il y a changement des valeurs des différents champs. Ce qui implique qu'un point du champ électrique est conjointement associé à un point du champ magnétique. Le changement de position ou de valeur d'un point du champ électrique implique directement le changement de la valeur du point du champ électromagnétique associé à ce dernier. La succession de changement aboutit à la modification complète du champ électrique et du champ magnétique. Ces changements créent des vibrations qui transportent le signal, le message. Une onde électromagnétique n'est donc pas quelque chose d'anodin car transporte souvent un message ou un signal grâce au champ électrique. La propagation se fait par le biais des propriétés des ondes électromagnétique : réfraction, réflexion, diffusion, diffraction, absorption [9]

## 1.7 Les effets troposphériques

Les propagations des ondes électromagnétiques dépendent de deux facteurs :

- Les phénomènes optiques comme la : réfraction, réflexion, diffusion, diffraction, absorption.
- Et le milieu de propagation.

La majorité des vols d'avions se font dans la troposphère et c'est aussi la couche atmosphérique dans laquelle se retrouvent les êtres vivants. Elle s'étend entre 6 et 20 km, la tropopause est la couche qui sépare la troposphère de la stratosphère on y enregistre des températures pouvant aller jusqu'à  $-56^{\circ}\text{C}$ . C'est au niveau de cette couche que se forment les nuages car étant la couche qui est en contact avec la surface terrestre, elle est donc affectée par les phénomènes d'évaporation, photosynthèse et toutes les activités des êtres vivants qui ont rapport avec l'atmosphère[10] [9] [10].



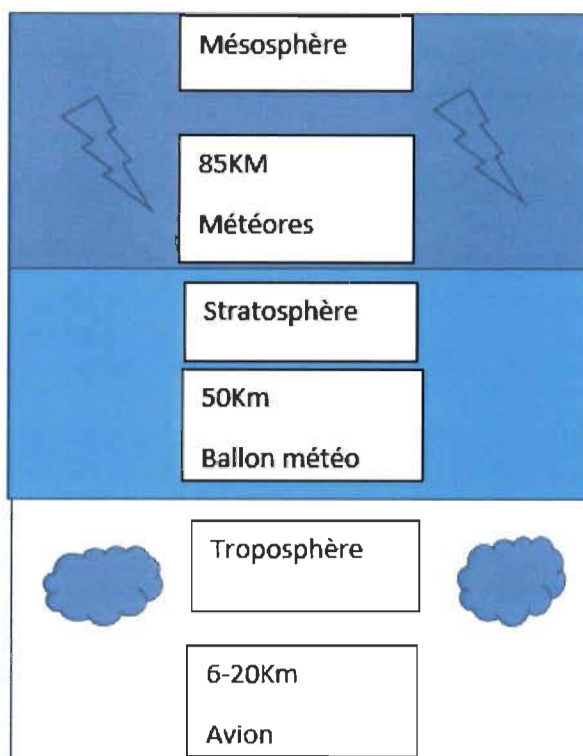


Figure 1-1 Proposition de schéma des couches de l'atmosphère

## 1.8 Caractéristiques de la variabilité des phénomènes de propagations

### 1.8.1 Propagation troposphérique ou propagation transhorizon

Un avion en plein vol se comporte comme une antenne d'émission et de réception. On parle de propagation troposphérique dans le cas d'une propagation en ligne. Cette propagation se fait en ligne droite quand le milieu dans lequel l'onde se propage est homogène. Et cette propagation se fait dans la couche la plus basse de la troposphère donc très près du sol et subit l'influence des anomalies climatiques et géographique comme le brouillard et les montagnes, mur en béton [11][12].

### 1.8.2 Propagation superficielle

Ce sont les ondes qui se propagent à la surface du sol, la densité de l'air étant un facteur de propagation des ondes, alors plus on s'élève en altitude plus les ondes se propagent plus facilement. L'onde reste parallèle au sol et se déplace suivant le relief de ce sol, le champ électrique comprendra une composante horizontale et une composante perpendiculaire au sol. En rapport avec la conductivité du sol et la fréquence de l'onde, il se produit un déplacement des charges vers ce sol à travers la composante horizontale, à la fin il en résulte une composante horizontale complètement ou fortement atténuée seul donc se maintient la composante verticale [12].

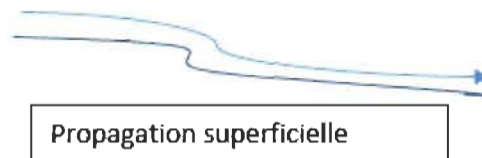


Figure1-2 Proposition du schéma de la propagation superficielle d'une onde

### 1.8.3 Propagation ionosphérique

Le phénomène d'ionisation d'un atome intervient dans la propagation ionosphérique. Un atome qui perd un électron trouve ses liaisons covalentes rompu avec les autres atomes et devient un ion. La particule ayant perdu un électron lors de sa traversé arrache des électrons aussi à d'autres atomes qui deviennent aussi à leur tour des ions on dit donc que cette particule a ionisé la matière et son énergie se retrouve sous forme de radiation électromagnétique ou de la chaleur. Ces particules ionisées forment les quatre couches de l'ionosphère. La réflexion de cette couche émane du fait que les particules ionisées se comporte comme un miroir et modifie l'indice de réfraction de cette couche qui se calcul par la formule [12].

Formule de calcul de l'indice de réfraction de la couche ionosphérique

$$n = \sqrt{1 - \frac{81.N}{F^2}} \quad (1-2)$$

#### *1.8.4 Diffraction troposphérique*

Une onde qui se propage dans la troposphère est baptisée de propagation troposphérique. Lorsque cette onde vient à être diffractée par les particules qui se trouvent dans l'atmosphère alors là on parle de diffraction troposphérique. C'est ce phénomène qui est à l'origine de l'affaiblissement et la perte des signaux souvent émis. Dans le cas des antennes il arrive que le signal envoyé arrive à l'autre antenne tellement faible qu'il faut utiliser des émetteurs très puissants et des récepteurs qui sont doté d'une grande sensibilité afin de pouvoir détecter et capter les signaux [12].

## Chapitre 2 - La foudre

Dans le but de prévoir après calculs et analyses quelles pourraient être les conséquences directes et indirectes de la foudre sur un câblage d'avion il nous revient à étudier et cerner tous les paramètres qui pourraient entrer en jeux dans la formation d'un orage. Considéré dans le temps comme la colère des dieux, la foudre n'est rien d'autre qu'un phénomène de décharge électrostatique.

### 2.1 Naissance d'un orage

Entre 6000 m et 15000 m d'altitude il y a d'abord de simples nuages tels que les cirrus qui s'étendent sur des kilomètres, en dessous des 6000 m les nuages sont plus dense comme par exemple les altocumulus et les altostratus qui rendent le ciel gris, en dessous de 2000 m on parle de nuage bas.

Tout commence par un nuage constitué de gouttelettes d'eau, les courants ascendants et les courants descendants sont des courants qu'on retrouve au sein d'un orage. Pendant tous les mouvements de ces différents courants les gouttelettes d'eau qui constituent les nuages s'entrechoquent et s'arrachent donc des électrons soit positivement soit négativement. La configuration du nuage se fait donc tel que les charges négatives se concentrent à la base du nuage et les charge positive tout en haut du nuage, le nuage est donc chargé comme une pile. Le plus gros nuage peut mesurer plusieurs kilomètres de large et surtout plusieurs kilomètres de haut variant entre 12 et 14 kilomètres en moyenne. Mais en dessous de l'équateur le plus gros nuage qui s'appelle cumulo-nimbus peut atteindre jusqu'à 18 kilomètres[11].

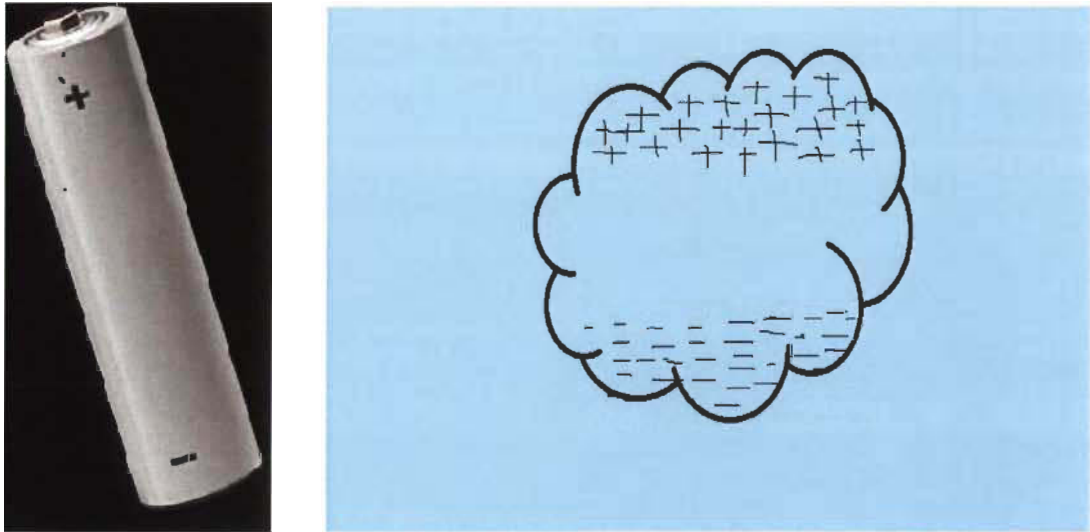


Figure 2-1 Proposition d'un comparatif de la configuration d'une pile et d'un nuage

Avec une accumulation des charges positives au sommet et des charges négatives à la base du nuage, les charges positives au sol sont donc attirées par les charges négatives à la base du nuage selon la loi d'attraction. La tension augmente donc jusqu'à un seuil où il va se produire une décharge électrique entre le nuage et le sol : c'est un éclair.

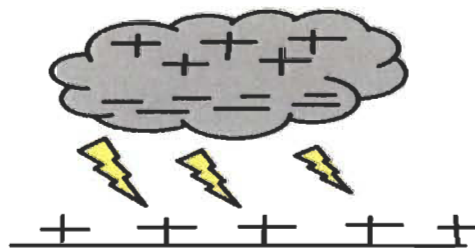


Figure 2-2 Proposition de schéma d'une décharge électrique entre un nuage et le sol

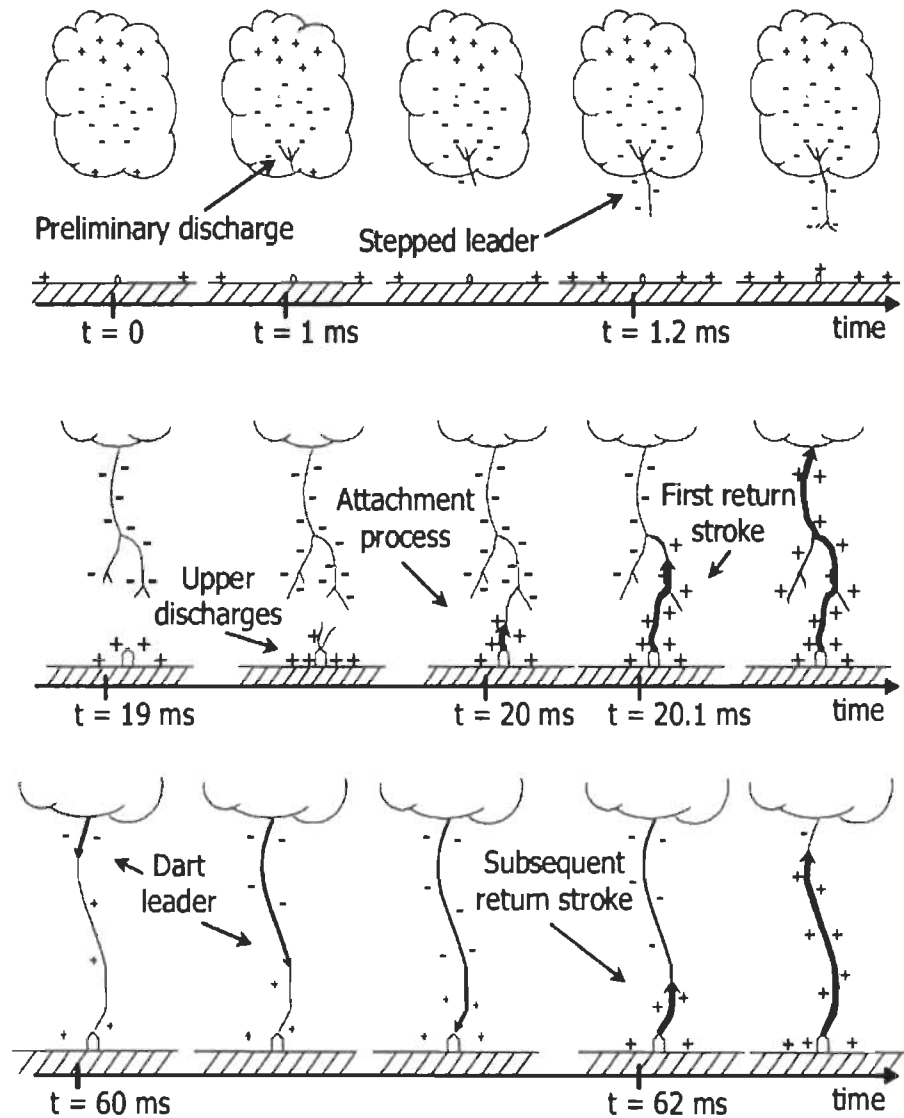


Figure 2-3 Étapes lors du déclenchement d'une décharge [11]

Lors de la libération de l'éclair il se produit une libération considérable d'énergie qui produit de la lumière et qui fait littéralement exploser l'air par lequel passe le canal de foudre. Nous savons que l'air chauffé se dilate et s'élève contrairement à l'air froid qui s'écrase. Avec cette énorme explosion la température qui se forme est tellement importante que l'air au lieu de se dilater explose et crée ainsi le tonnerre. L'éclair et le tonnerre se produisent au même moment mais comme la lumière voyage à une vitesse plus élevée que le son alors le

phénomène de la lumière atteint d'abord le sol puis ensuite nous parvient le « boum ». Le bruit nous arrive avec un décalage car la lumière se déplace 874030 fois plus vite que le son.

## 2.2 Cumulonimbus

Un cumulonimbus peut se développer sur plus de 10000 m de hauteur. Quand ils atteignent le plafond de la troposphère zone dans laquelle se développent les nuages ils s'étalent d'où vient la forme d'une enclume. Dans le cumulonimbus on a de l'eau sous toutes les formes, liquide, gazeuse, solide.

L'air contient de l'eau sous forme de vapeur en fonction de la température et de la pression, plus il fait chaud plus l'air contient de la vapeur d'eau et plus il fait froid moins l'air tolère de la vapeur d'eau. En passant de l'état gazeux à l'état liquide, l'eau libère de l'énergie sous forme de chaleur. A cause de cette source de chaleur, un cumulonimbus qui contient beaucoup d'humidité (gazeux à solide ou liquide) va se refroidir moins vite que l'air ambiant car il perd  $6^{\circ}$  à  $7^{\circ}$  à tous les millimètres. Le cumulonimbus n'en perd que  $4^{\circ}$  à  $5^{\circ}$ , pour cette raison le cumulonimbus va continuer à se développer et à prendre de l'altitude à l'intérieur du nuage. Les courants ascendants et descendants peuvent atteindre les 150 km/h. Les plus gros peuvent attirer jusqu'à 9000 tonnes de vapeur d'eau ce qui va retomber sous forme de pluie.

Entre  $0^{\circ}$  et  $-20^{\circ}$  les gouttes d'eau fondent et entrent en contact avec les cristaux qui se congèlent instantanément et forment des grains de grésil ; ces grains prennent du volume et lorsqu'ils sont trop lourds ils tombent dans leurs chutes ils percutent d'autres grains de grésil mais aussi de simples cristaux. Lors de ces chocs les grains de grésil se chargent donc négativement et les cristaux deviennent positifs. Les grains de grésil tombent alors que les

cristaux eux sont entraînés par les courants ascendants, alors la base du cumulonimbus devient négative et le sommet positif. Un excès de charge à la base et un déficit au sommet sont tous les deux séparé par une couche d'air isolante. Quand la différence de potentiel devient trop importante un courant se crée entre les deux pôles et crée ainsi un éclair[12].

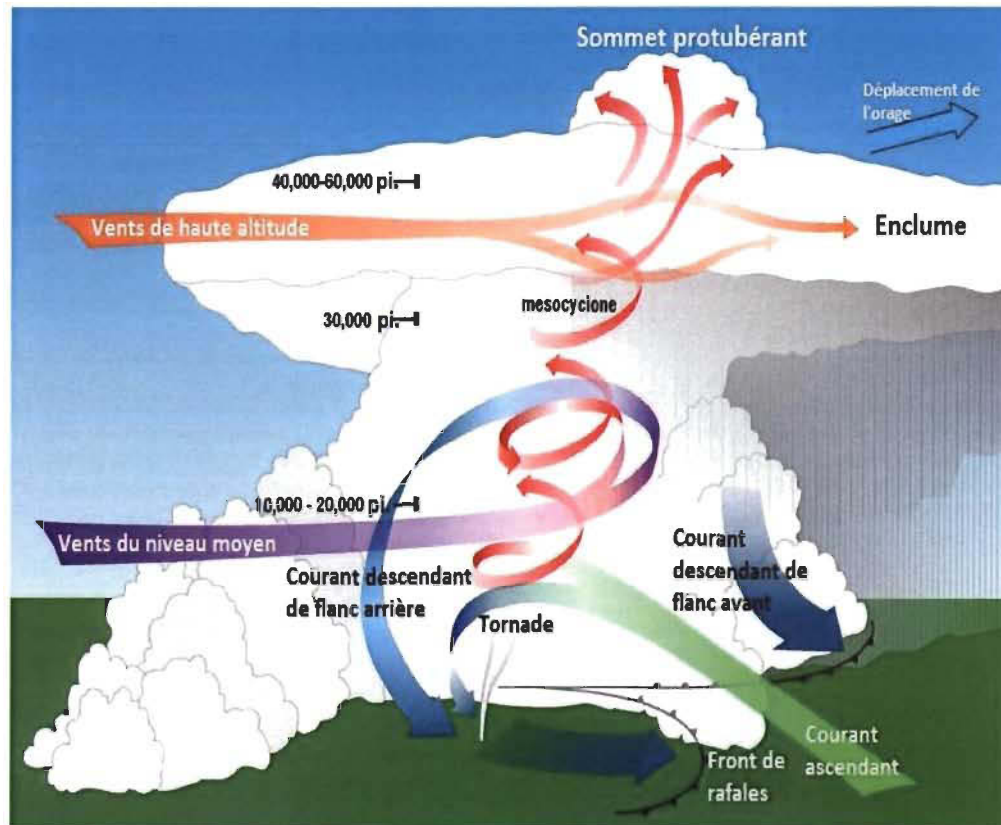


Figure 2-4 Cumulonimbus [13]

## 2.3 Effets de la foudre

### 2.3.1 Effet thermique

Lors d'une décharge électrique, le courant prend toujours le chemin le plus court donc passe toujours par le meilleur conducteur pour aller à la terre. Quand il s'agit de bon conducteur, à l'entrée et à la sortie, le matériau chauffe et il peut s'en suivre une fusion locale du métal tout dépend de l'importance de la décharge. Mais la foudre frappe n'importe où et



parfois des matériaux plein d'humidité comme les arbres, les mâts de bateau, il s'ensuit une pression élevée à l'intérieure du matériau ce qui provoque des explosions dû à la forte densité du courant et donc une mise à feu. Avec une décharge moyenne on peut enregistrer, avec la formule  $W = QU$  par exemple une énergie dissipée locale de  $W = 600 \text{ J}$  ce qui peut entraîner la fusion d'environ  $60 \text{ mm}^3$  d'acier correspondant à une pénétration de  $0.15$  à  $0.25 \text{ mm}$  [14].

### 2.3.2 Effets électrodynamiques

Dans un montage, deux fils parallèles très proches subissent chacun le champ magnétique produit par l'autre. On dit donc que chaque fils subit une force magnétique. Lorsque ces deux fils parallèles sont traversés par un courant de même sens alors ces deux fils sont attirés l'un vers l'autre sous l'effet de la force magnétique qui y règne. Alors des déformations, destructions peuvent donc être provoqués à cause de la force mécanique induite [15].

Forces s'exerçant sur deux fils :

$$F(1,2) = (B_1 I_2 L)(2-1)$$

$$F(2,1) = (B_2 I_1 L)(2-2)$$

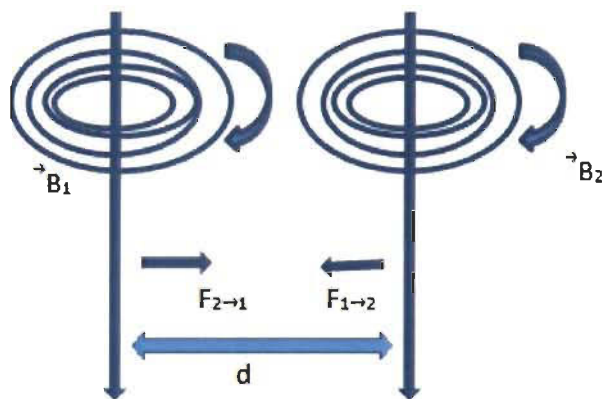


Figure 2-5 Proposition de schéma des forces sur deux fils

$$B = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} [16] \quad (2-3)$$

### 2.3.3 Effets électromagnétiques

Les effets électromagnétiques se traduisent par les champs rayonnés induisant des surtensions dangereuses dans les circuits électriques qui se propagent jusqu'aux équipements pouvant provoquer l'altération voire même la destruction de ces appareils ce qui rend le service indisponible.

### 2.3.4 Effets directe et indirecte de la foudre sur un avion

Comme expliqué dans le chapitre 1, l'atmosphère est très ionisée, quel que soit l'appareil qu'on mettrait dans l'air il serait susceptible de déclencher une décharge électrostatique. Les extrémités de l'avion amplifient le champ et déclenchent une décharge électrique. Vu les conditions que doit remplir un avion avant d'effectuer un vol, on constate très souvent que des conséquences mineures comme des trous millimétriques, peuvent entraîner la destruction de certains capteurs il est aussi possible que le champ électromagnétique qui émane de la foudre ou de l'orage agisse sur le système électronique et de communication de l'appareil. Car le foudroiement est aussi l'initiateur de fortes tensions engendrant des surtensions qui se propagent par conduction ou par rayonnement affectant ainsi les structures à protéger. Mais des précautions sont prises pour que les dégâts restent mineurs. Néanmoins, les points d'entrée et sortie peuvent être sérieusement atteints par le fait de l'augmentation subite et très élevée de la température (des dizaines de milliers de degrés Celsius). Ces parties peuvent être mécaniquement déformées. Si la température est très élevée et atteint la température de fusion de la structure principale de l'avion : le fuselage, peut à partir de ce moment

commencer à se détériorer. L'objectif dans cette recherche est de comprendre quelles seraient les conséquences sur le câblage d'un avion si ce dernier ne possédait aucune forme de protection.

#### **2.4 Processus d'accrochage de la foudre sur un avion**

Deux cas sont possibles dans le processus d'accrochage de la foudre sur un avion. Soit l'avion est un facteur de la décharge donc initie la décharge soit il l'intercepte lors de son passage.

- Premier cas : L'avion l'intercepte lors de son passage.

Lors que le cumulonimbus est trop chargé, il se produit soit des décharges inter nuageux soit des décharges nuage-sol, ces décharges créent un canal ionisé appelé traceur ou précurseur. Le traceur peut être soit ascendant soit descendant et peut être chargé soit négativement soit positivement. Le plus fréquent est que l'avion intercepte un traceur descendant négatif lors de son passage car ce dernier se charge positivement à cause de la proximité du canal ionisé chargé négativement. L'arc traverse donc l'avion et continue sa progression.

- Deuxième cas : L'avion est un facteur de la décharge donc initie la décharge  
La présence d'un avion dans l'atmosphère augmente la valeur du champ électrique. L'avion se charge positivement dans le cas où le champ électrique augmente jusqu'à son niveau de claquage il se produit alors un éclair dont la source est l'avion [11].

## 2.5 Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil ou d'un système électrique, ou électronique, à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement [19].

L'incompatibilité provient des systèmes et structure de plus en plus complexe. Elle est prise en compte lors de la conception et de la fabrication des matériaux électrotechniques mais nous distinguons plusieurs sources de perturbations électromagnétiques qui ne sont pas toujours des appareils qui peuvent être réglé et qui peuvent se propager via les câbles et fils conducteurs qui transmettent les signaux ou par rayonnement sous forme d'onde. Plus la tension  $U$  et le courant  $I$  croissent plus les perturbations sont importantes, engendrant des phénomènes indésirables tel que le brouillage des ondes radio[14][15].

La compatibilité électromagnétique vise donc la cohabitation de plusieurs appareils électronique dans un environnement sain on se concentre donc à étudier les différentes interactions possibles dans un système donné entre les ondes électromagnétiques. Le but premier étant de préserver l'intégrité des différents signaux tout en minimisant :

- Les couplages :

Couplage résistif

Couplage capacitif

Couplage par champ magnétique

- Les rayonnements cosmiques

- La décharge électrostatique

Pas vraiment dangereux pour les hommes mais pour les composants et appareils électroniques. C'est une charge électrique qui est au repos et qui est souvent créée par la friction, la séparation et le transfert d'électron. C'est une décharge courte mais qui introduit des tensions élevées et des courants d'une haute intensité. La miniaturisation des composants les rend plus sensibles aux décharges électrostatiques qui peuvent les mettre hors usage[16][17].

## 2.6 Types de perturbations

Tableau 2-1 Types de perturbations et leurs origines

<i><b>Origines</b></i>	<b>Classes</b>	<b>Source</b>	<b>Solutions</b>
<i>Naturelle</i>	Surintensités	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Coups de foudre directs ou indirects</li> <li>➤ Rayonnement cosmique</li> <li>➤ Décharge électrostatique</li> </ul>	Bien concevoir les appareils pour qu'ils résistent à d'éventuelles attaques

<i>Artificielle</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Radiocommunication</li> <li>➤ Radars</li> <li>➤ Équipements électroniques</li> </ul>	Agir sur la source ou la victime dans le but de réduire les émissions électromagnétique
---------------------	--	---	---

## 2.7 Les sources de perturbations et les mesures à prendre

Connaitre et identifier la source est indispensable car elle nous indique les gestes à poser et à quel niveau les poser. Les choix des solutions revient souvent soit à :

Tableau 2-2 Source de perturbations et mesures à prendre

Limiter les perturbations	Éradiquer les couplages	Protéger les victimes
Composant RC en parallèle avec la bobine CA	Éloigner les composants incompatibles	Utiliser les différentes sortes de blindage existant suivant le besoin
Diode en parallèle avec la bobine CC		

## **2.8 Effets du rayonnement cosmique et Biochamps**

Le corps humain est constamment traversé par des particules elles peuvent être neutre comme chargé. Toutes ces particules proviennent de très loin dans le cosmos suite à la destruction d'étoiles ou des cycles solaires. Entrant dans l'atmosphère les rayons cosmiques entrent en collision avec les noyaux de l'atmosphère il s'en suit la formation de particules secondaires. L'exposition au rayon cosmique dépend de l'altitude et de l'endroit où l'on se trouve. Plus on évolue en altitude plus la couche protectrice atmosphérique contre le rayonnement cosmique devient mince.

## **Chapitre 3 - Description et modélisation mathématique**

### **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre sera fait une description du choix du système mathématique ainsi qu'une modélisation mathématique de ce système. En premier lieu sera présenté les systèmes mathématiques qui traitent des perturbations électromagnétiques. Ensuite, s'ensuivra une description plus approfondie de la méthode des différences finies dans le domaine temporel du système de Maxwell. Étant donné l'étendue des domaines et des contextes dans lesquels peuvent être exploités le système de Maxwell une simplification de notre modèle sera nécessaire afin de le maintenir dans notre environnement qui a pour objectif d'observer les variations des caractéristiques des câbles face à l'influence d'un champ électromagnétique externe.

### **3.2 Description des systèmes**

Traiter des perturbations électromagnétiques implique l'utilisation de certaines méthodes pour la résolution des équations.

- La méthode des éléments finis
- La méthode des différences finies
- La méthode des volumes finis



- La méthode des équations intégrales de frontières
- La méthode des lignes de transmission
- La méthode des moments

### 3.2.1 *Finite Difference Time Domain (FDTD)*

Pour étudier certains phénomènes, tels que, les régimes transitoires, les systèmes non linéaires et surtout la variation dans le temps et dans l'espace de certaines structures on fait appel à la méthode des différences finies. Kane S. Yee en 1966 introduit la FDTD qui est la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Il s'agit de discrétiser les équations de Maxwell et de remplacer toutes les dérivations par des opérations équivalentes avec un pas temporel. Avec cette méthode on peut observer les structures qui varient dans le temps et l'espace notamment l'évolution temporelle du champ magnétique. Étant de très lourd calcul, le choix du maillage est très important afin de bien utiliser les ressources de l'ordinateur et de minimiser le temps de calcul. Au total, c'est six composantes qui sont calculées et cela en se basant sur les calculs précédents. Le calcul des six composantes de la période futur dépend du calcul des composantes de la périodes passée [18][15].

### 3.2.2 *Les équations de Maxwell avec FDTD*

On part d'une grille cubique donnée par le fait que

$$d_x = d_y = d_z \quad (3-1)$$

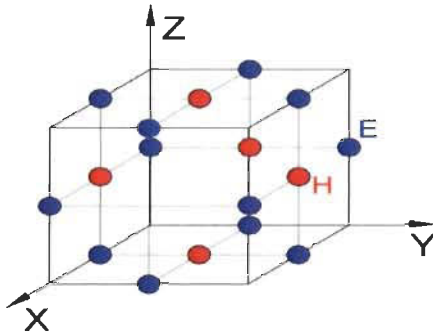


Figure 3-1 Maillages de E et H [19]

$V_{\max}$  étant la vitesse maximale de la propagation de l'onde, pour les meilleurs résultats il faut que :

$$V_{\max} \leq \frac{1}{\sqrt{(dx)^{-2} + (dy)^{-2} + (dz)^{-2}}} \quad (3-2)$$

$$\nabla \cdot E(x, y, z, t) = -\mu \cdot (\partial h(x, y, z, t)) / \partial t$$

$$\nabla \cdot H(x, y, z, t) = \sigma E(x, y, z, t) + \epsilon \cdot \partial h(x, y, z, t) / \partial t + j(x, y, z, t).$$

$$\nabla \cdot E(x, y, z, t) = \frac{\rho E(x, y, z, t)}{\epsilon}, \quad \nabla \cdot H(x, y, z, t) = 0. \quad [9][20][18] \quad (3-3)$$

Avec E l'intensité du champ électrique,

H l'intensité du champ magnétique et

$\rho$  la densité de la charge.

# Equations de Maxwell

## Forme différentielle

### FDTD

### Équations

Figure 3-2 Diagramme du processus d'évolution vers les équations de propagations

Équation quand l'avion est l'initiateur

$$E(x, a, b) = E_0 \left\{ 1 - \frac{a * r * \tanh\left(a * A^{\frac{1}{2}} / x\right) - a * A^{\frac{1}{2}} / x}{a * r * \tanh\left(A^{\frac{1}{2}}\right) - A^{\frac{1}{2}}} + \frac{A * a * A^{\frac{1}{2}} / x}{\left(x^2 / a^2 + b^2 / a^2 - 1\right) * (a * r * \tanh\left(A^{\frac{1}{2}}\right) - A^{\frac{1}{2}})} \right\} \quad (3-4) [21]$$

'x' étant la longueur de l'avion, 'a' la mi-hauteur et 'b' la demi-largeur.  $A = 1 - b^2/a^2$

### 3.3 Description du système et modèle choisi

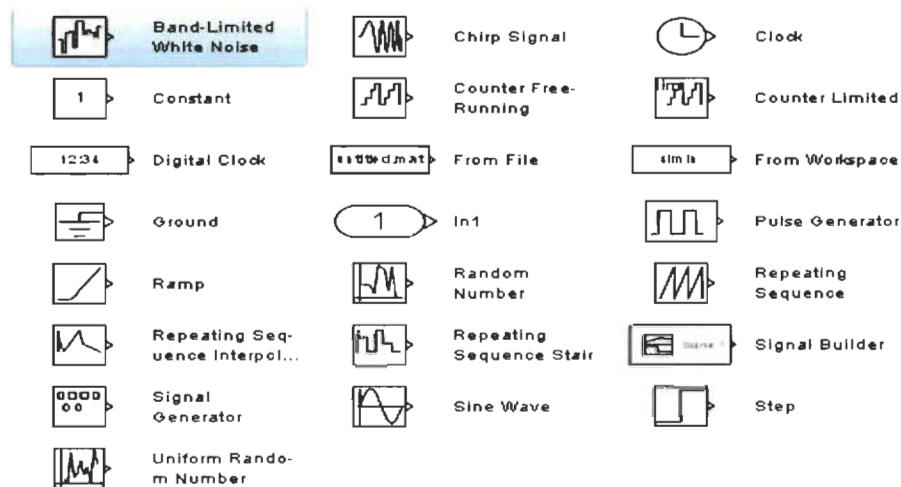
Notre système est axé autour de la conception d'un générateur de tension et de courant qui sera utilisé pour générer une forte tension ainsi qu'un fort courant qui seront appliqué à un câble de conduite comme on en trouve dans les avions. L'objectif est de pouvoir observer les variations que subissent les caractéristiques des câbles qui sont : la conductivité thermique, permittivité (isolant : la gaine), capacité linéique et son coefficient d'auto-inductance afin de

pouvoir traduire nos résultats et comprendre comment une perturbation électromagnétique externe dépendamment de sa puissance influence un circuit interne d'un avion en plein vol. Le système sera conçu sous le logiciel Matlab-Simulink. Simulink étant l'extension graphique de Matlab utilisé pour la modélisation et la simulation des systèmes multi-physique. Dans Simulink une hiérarchie sera suivie pour concevoir notre système et les paramètres choisis de manière à optimiser nos résultats. Les résultats obtenus de Simulink seront alors utilisé dans Matlab via des fonctions pour les intégrer au code. Le logiciel Matlab-Simulink a été choisi pour sa fluidité et aussi pour la possibilité de modéliser des données simples ou avec plusieurs canaux. Dans Simulink les blocs seront utilisés pour modéliser les équations.

Integrator	Integrate signal
Derivative	Output time derivative of input
Integrator Limited	Integrate signal
PID Controller	Simulate continuous- or discrete-time PID controllers
PID Controller (2 DOF)	Simulate continuous- or discrete-time two-degree-of-freedom PID controllers
Second-Order Integrator	Integrate input signal twice
Second-Order Integrator Limited	Integrate input signal twice
State-Space	Implement linear state-space system
Transfer Fcn	Model linear system by transfer function
Transport Delay	Delay input by given amount of time
Variable Time Delay	Delay input by variable amount of time
Variable Transport Delay	Delay input by variable amount of time
Zero-Pole	Model system by zero-pole-gain transfer function

Les blocs dans Simulink sont essentiellement utilisés pour simuler le courant et la tension lors d'un choc de foudre. Les Sources sont utilisées pour générer différents signaux, les oscilloscopes utilisés pour afficher les signaux, les blocs continu pour les éléments du système continu (fonctions de transfert, modèles d'espace d'état, contrôleurs PID, ...)

Les opérations mathématiques: contiennent de nombreuses opérations mathématiques courantes (gain, somme, produit, valeur absolue, etc.), les ports et sous-systèmes contiennent des blocs utiles pour créer un système.



### 3.4 Les générateurs de haute tension

#### 3.4.1 Les trois types de tensions conventionnelles

- *Tension alternative*

C'est la tension que nous avons quand nous nous branchons sur le secteur, c'est celle qui fait fonctionner la majorité des appareils électriques.

- *Tension continue*

Tension constante au cours du temps et toujours dans le même sens. C'est le cas de la tension fournie par une pile.

- *Tension de choc*

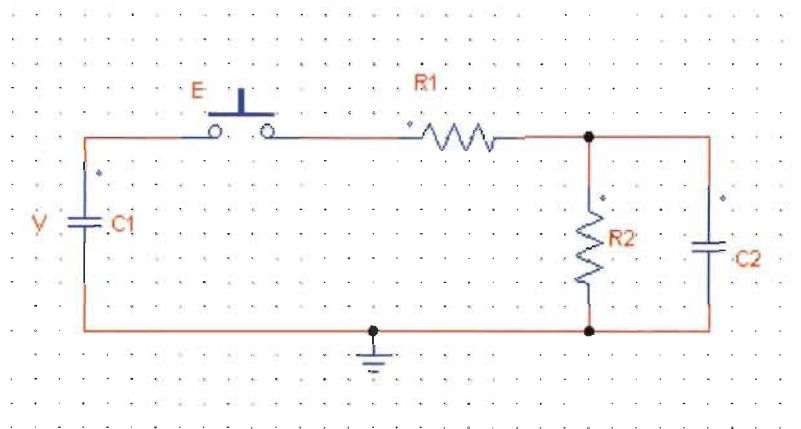


Figure 3-3 Proposition de montage d'un générateur choc à un étage

Considérée comme une impulsion, c'est une tension qui est appliquée en un très court moment nous parlons du temps de l'ordre de micro secondes. Elle est utilisée généralement pour simuler l'onde de la foudre et tester les appareils de protection contre les surtensions. La première capacité  $C_1$  lisse la tension d'entrée pendant que la capacité  $C_2$  sert de capacité de l'objet. La résistance  $R_1$  est une résistance de fuite et  $R_2$  la résistance de l'objet.

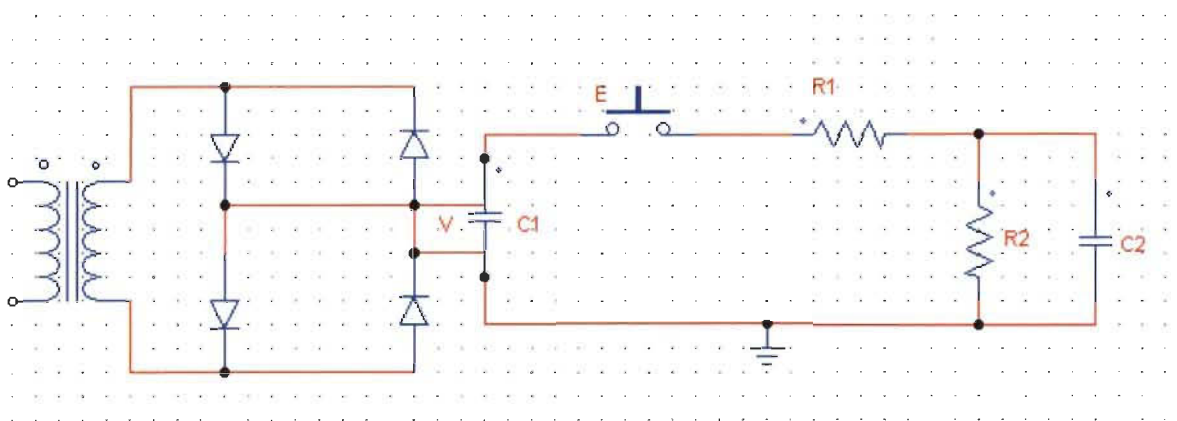


Figure 3-4 Proposition de montage d'un générateur choc à un étage avec redresseur de tension

La tension  $V$  doit être une tension continue il faut donc un redresseur afin de rendre continue la tension alternative. Pour y arriver on utilise un redresseur double alternance. Quatre diodes sont utilisées pour redresser la partie négative. Le nombre de diodes est choisi en fonction de la tension inverse à supporter pour 200 kV par exemple on mettra en série 200 diodes de 1000V chacune.

### 3.4.2 Générateur électrostatique ou générateur de Van de Graaff

Un générateur électrostatique est généralement composé de trois parties :

Une source d'excitation, un élément transporteur et un élément de stockage.

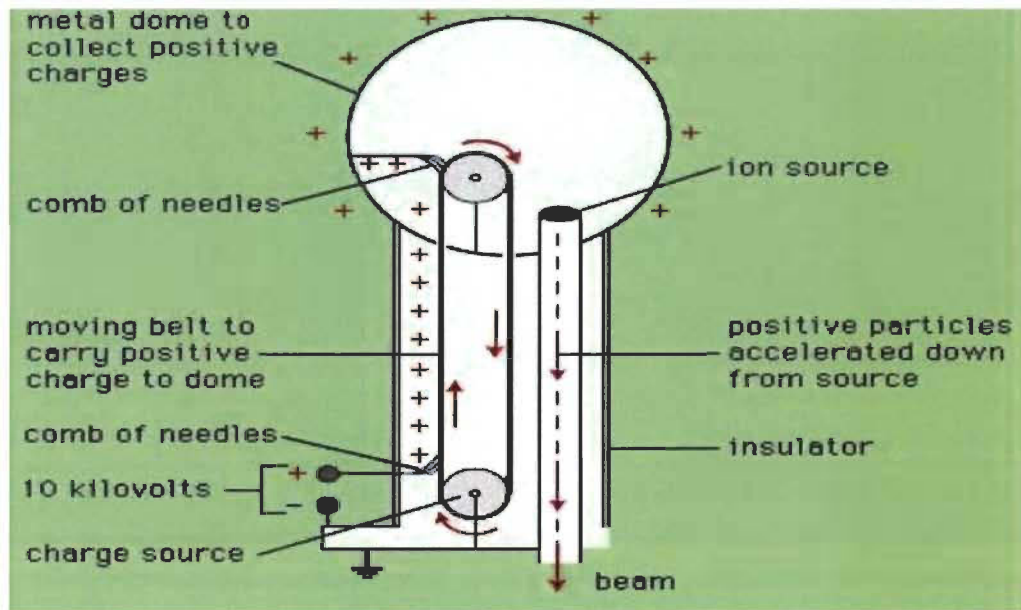


Figure 3-5 Schéma Générateur de Van de Graff [22]

### 3.4.3 Générateur de Marx

Les générateurs de haute tension sont communément utilisés pour tester les équipements ou faire des expériences. Le générateur de tension à plusieurs étages de Marx, est un générateur choc à plusieurs étages c'est une invention qui porte le nom de son inventeur Erwin Marx (1893-1980), le générateur est en fait un circuit électrique composé de condensateurs montés et chargés en parallèle et traversés par une tension continue, il agit comme un multiplicateur de tension. Ce circuit a pour objectif de produire une impulsion de haute tension. [3]

Puisse qu'il agît comme un multiplicateur de tension, le voltage obtenu à la fin découle du nombre d'étage qui compose notre générateur. Plus le générateur compte d'étage plus notre voltage de sortie sera élevé. Car le principe est d'emmagasiner de l'énergie dans les condensateurs en les mettant en parallèle puis de les décharger simultanément en les mettant en série on a donc une tension :  $U = nU_1$  ( $n$  étant le nombre d'étages du circuit et  $U$  la tension d'entrée).



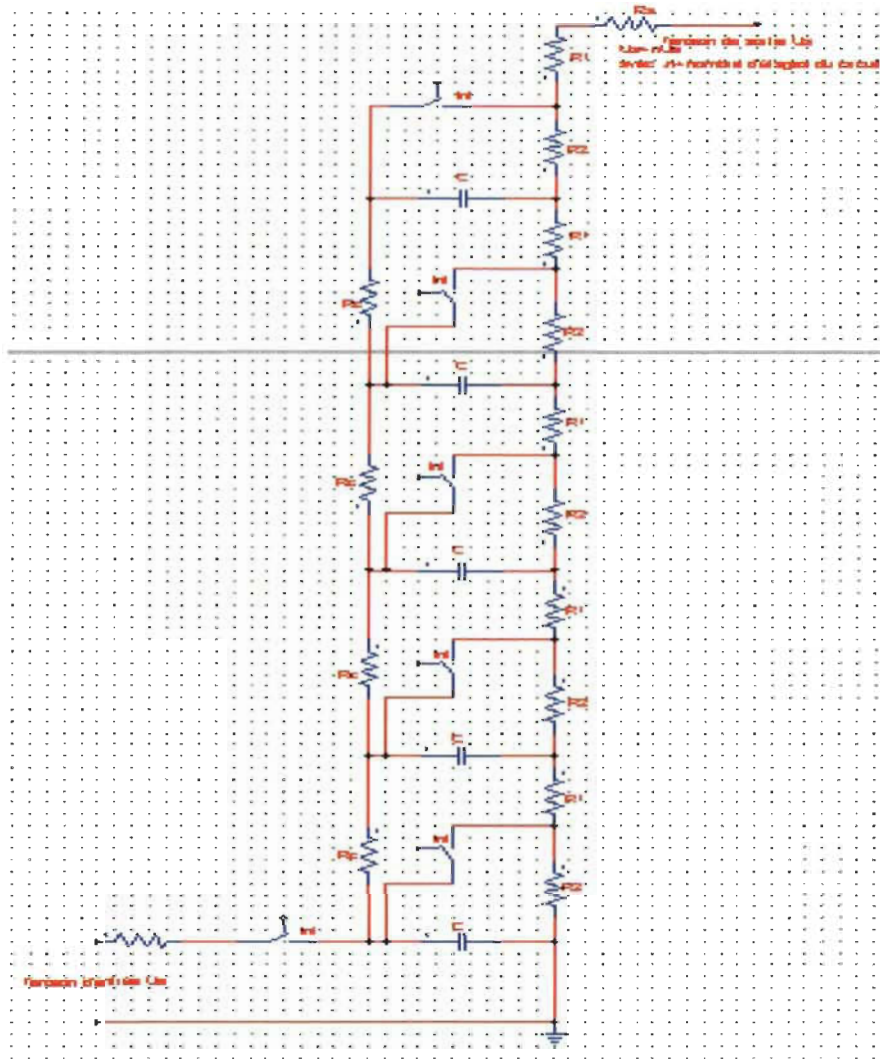


Figure 3-6 Proposition de montage d'un générateur de Marx

#### 3.4.4 Les différents chocs obtenus et leurs applications.

Le choc de manœuvre :  $T1/T2 = 250/2500 \mu s$

T1 est le temps de montée : 250 microsecondes,

T2 le temps de queue 2500 microsecondes.

Le choc de foudre :  $T1/T2 = 1.2/50 \mu s$

T1 est le temps de montée : 1,2 microseconde,

T2 le temps de queue 50 microsecondes.

Le choc de foudre

L'objectif de simuler un choc de foudre est de tester les composantes électroniques présents dans un avion notamment les câbles afin d'étudier leurs résistances ou leurs capacités de conductivité quand la foudre s'abat sur un avion en plein vol. Le travail revient à mettre sur pied un générateur d'impulsion qui fournira une tension précise.

### 3.5 Réflexion et guidage des ondes électromagnétique dans un conducteur parfait

Un conducteur parfait est un composé ou un matériel dont la conductivité tend vers l'infini et la résistivité tend vers zéro. Comme par exemple la cage de faraday qui constitue le squelette d'un avion.

H étant constante par rapport au temps, E représente le champ intérieure d'un conducteur parfait,  $\gamma$  la conductivité et j la conductivité volumique de conduction.

$$\gamma \rightarrow +\infty$$

$$P_{j,v} = j * E = \gamma E^2 \text{ car} \quad (3-5)$$

Donc il faut que  $E \rightarrow 0$  pour que le conducteur soit parfait.

Selon Maxwell Faraday:

$$\frac{dB}{dt} = -rot * E = 0 \quad (3-6)$$

Alors  $H = 0$

Il n'existe donc pas un champ électromagnétique interne dans un conducteur parfait.

Cela s'explique par le fait qu'une onde électromagnétique pénètre un conducteur métallique réel sur une petite profondeur

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\gamma\omega}} \text{ où}$$

$$\gamma \rightarrow +\infty \text{ Donc } \delta \rightarrow 0$$

En conclusion vu que l'onde ne parvient pas à pénétrer dans le conducteur alors le champ électromagnétique dans ce conducteur est nul.

Considérons un avion comme un conducteur parfait limité par une surface  $\Sigma$  et plongé dans le vide donc en plein vol. La relation au voisinage de  $\Sigma$  est  $E = 0$  et  $H=0$ .

Mais l'avion n'est pas un conducteur parfait car il n'est pas fait uniquement de la cage de Faraday de plus celle-ci tend à laisser sa place aux matériaux composite. Voilà comment est défini un champ électromagnétique à l'intérieure de l'avion.

## **Chapitre 4 - Modélisation numérique du modèle choisit**

### **4.1 Modélisation numérique**

Le but dans cette partie est d'aboutir à la reconstitution d'un environnement simulant l'effet de la foudre sur un avion et de vérifier nos calculs, exprimé sous forme de lignes de code et regroupées en fonctions. Partant de la modélisation du générateur de tension et du générateur électrostatique jusqu'au câble sur lequel sera observé l'action des intempéries. Une onde électromagnétique qui agit sur un câble, un matériau est à la fois absorbé, réfléchi et transmise. L'absorption signifie l'apparition d'un courant parasite dans le câble ou le matériau, il peut s'agir d'un couplage champ à boucle. Quand dans un circuit fermé survient un champ magnétique qui varie, on observe une différence de potentiel pour venir à bout de ce couplage, il faut réduire ce champ magnétique alors par un blindage magnétique.

### **4.2 Le câblage électrique dans un avion**

Plus les années passent plus la longueur totale des câbles électriques dans un avion ne cesse de croître. Les câbles sont regroupés en harnais ou torons et occupent des places réservées pour cela pour éviter de mettre dans un même toron des câbles qui sont incompatibles, d'un point de vue sécurité et surtout compatibilité électromagnétique. Des modules ont été développés pour contrôler les torons sur différents critères par exemple sur le plan volumique des torons, thermique et électromagnétique. Mais dans un toron lorsque des fils parallèles

sont proches, il en résulte une réplique de signaux. Il est alors important de vérifier et de diminuer les risques et perturbations quand on connaît l'élément perturbateur.

Les avions étant en moyenne frappés par la foudre deux à trois fois par année sont dotés d'une protection adaptée et efficace basée sur le principe de la cage de Faraday. Lorsqu'un appareil est touché, celui-ci étant en métal, la décharge se propage à la surface de l'avion suivant un axe avant de continuer. Ainsi donc une décharge pourrait endommager le système électrique, voir le système électronique de l'avion. Mais il est aussi vrai qu'un avion de ligne est doté d'un système quasiment doublé. Néanmoins lors de l'impact de la foudre sur un avion, il se produit une très forte augmentation de la température. La décharge est très vite évacuée quand on est en présence d'un avion fait d'alliage métallique. Qu'en est-il alors des avions conçus en partie avec des matériaux composites ?

Pour notre cas nous allons considérer l'impact que subissent les câbles d'un avion dépourvu de ses protections qui se fait frapper par la foudre[23][24].

### **4.3 Modélisation avec les outils choisis**

La modélisation finale choisie est basée sur des paramètres qui sont décrits dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 Les paramètres à considérer[25]

Paramètres	Matériel			
	Air	Siège	Wood	Aluminium
Permittivité( $\epsilon$ )	3	3	3	1.0005
Perméabilité( $\mu$ ) (H/m)	1	1	1	1
Conductivité électrique( $\sigma$ ) (S.m-1)	$5e^{-15}$	0.01	0.01	$4e^7$

L'avion est considéré comme un ellipsoïde sur lequel nous allons tester l'effet de la foudre en se basant sur les critères de Petrov et Waters. Il s'agit du cas où l'avion intercepte l'éclair lors de son passage. Les paramètres comme la hauteur, la largeur de l'avion sont des variables qui peuvent changer et qui sont déterminante par rapport aux résultats.

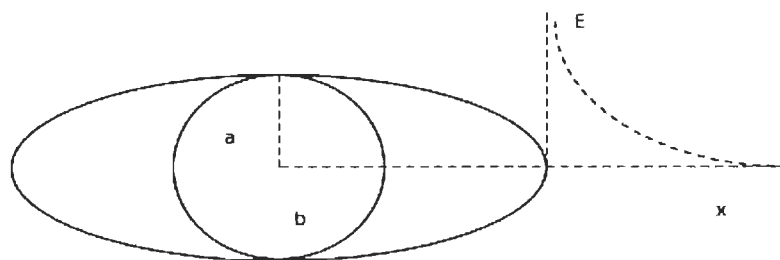


Figure 4-1 Modélisation d'un avion[21]

Tableau 4-2 Descriptif des paramètres pour la modélisation d'un avion

Paramètres	Fonction
a (m)	Mi-Hauteur
B(m)	Demi-Largeur
E (V.m-1)	Champ électrique
X (m)	La longueur de l'avion
$E_{cr}(kV/m^{-1})$	Champ électrostatique critique d'un avion

$$E_{cr}(kV/m^{-1}) = 570 * a^{-0.68} [21]$$

#### 4.3.1 Modélisation du câblage

Comme dit à la section 4.3, suivant leur utilisation, les câbles sont de natures différentes. Les deux grosses familles sont les câbles blindés et les câbles non blindés.

##### a) Les câbles blindés

Certains câbles selon leur utilité nécessitent un blindage spécial tandis que d'autres non.

- Blindage simple tresse

Constitué d'une simple tresse de fil métallique autour du câble.

- Blindage avec un ruban et une tresse métallisée

Meilleur blindage car offre la meilleure protection contre les perturbations électromagnétiques. Utilisé pour les hautes fréquences ce blindage peut être considéré comme double blindage car il fait intervenir deux types de blindages différents. Mais à la fin il revient très cher et augmente la masse du câblage chose qu'on aimerait minimiser au maximum possible pour alléger les avions.

- Blindage semi-rigide

Il s'agit d'un cylindre métallique protégeant le câble, très efficace contre les perturbations électromagnétiques.

- Blindage avec un ruban métallisé

Ce type de blindage est presque inefficace face aux fortes perturbations. Le seul avantage est qu'il est de moindre coût.

- Fibre optique

Constitué d'une gaine de fibre particulière qui protège une fibre de verre très résistant aux parasites électromagnétiques.

#### b) Les câbles non blindés

Généralement constitués de quatre paires de fils torsadé, ils sont utilisés dans les cas de bas courant et basse tension comme pour la téléphonie[26]  
[27][28]



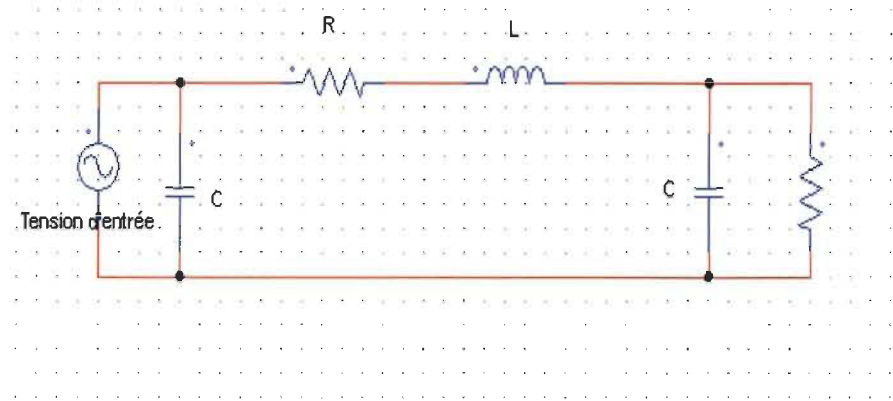


Figure 4-2 Proposition de montage d'un câble de conduction électrique

Ce circuit représente le modèle sur lequel on se base pour simuler un câble dans ce document. Seront considérés : en série une résistance  $R$  en série avec une inductance  $L$  et un couple  $(G, C)$ .  $Z = (R + jL\omega) + (G + jC\omega)$

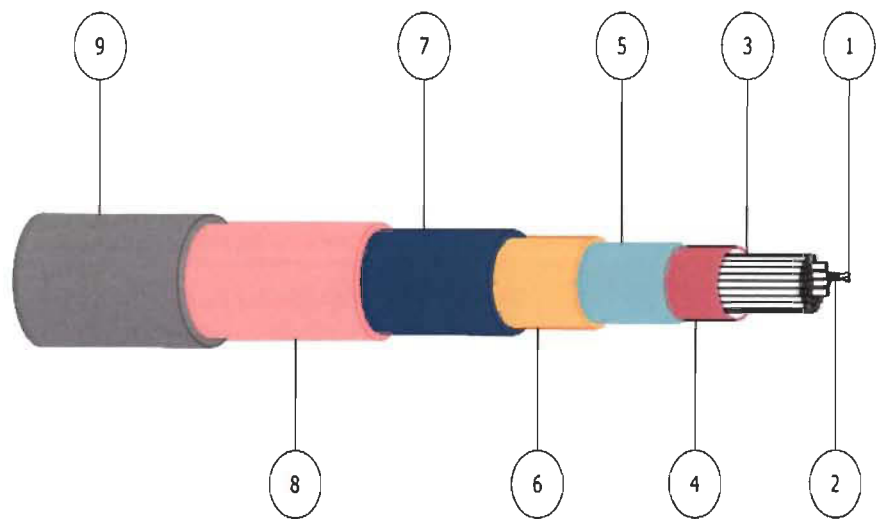


Figure 4-3 Constitution d'un câble adapté [29]

1. Âme conductrice
2. Isolant
3. Gaine intermédiaire sous blindage

4. Ruban séparateur
5. Drain de masse ou fil de continuité
6. Écran : Ruban ou tresse
7. Gaine intermédiaire sous armure
8. Blindage mécanique
9. Gaine extérieure

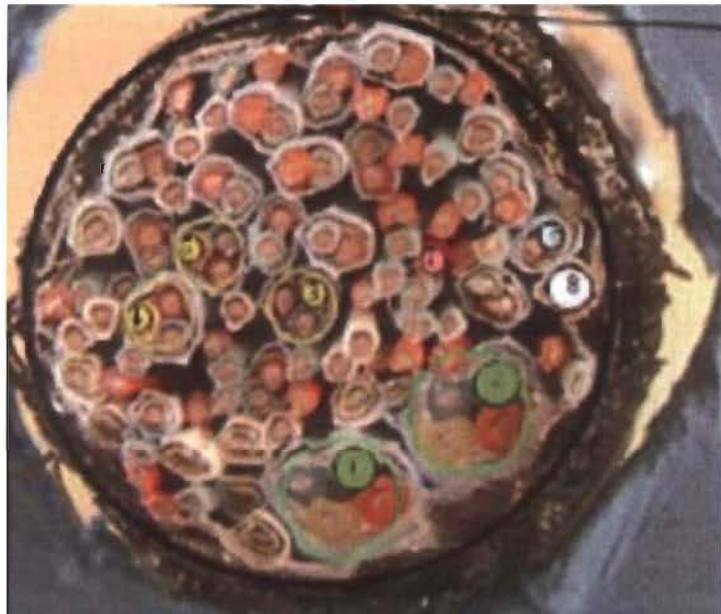


Figure 4-4 Exemple de toron présent dans un avion[24]

Tableau 4-3 Paramètres des câbles[11]

Type de câble	Diamètre (mm)	Résistance linéique ( $\Omega^3/\text{m}$ )
Fil simple	0.8 - 17	0.3 – 160
Fil simple blindé	1 - 4.5	4
Paire torsadée	1.6 - 4.5	6 – 160
Paire torsadée blindée	2 – 6	6 – 160
Tierce torsadée	1.7 – 6	6 – 160
Tierce torsadée blindée	2 – 6	6 – 160
Quatre torsadée	2 – 4	20 – 160
Quatre torsadée blindée	2 – 5	20 – 160
Coaxial	2 – 13	
Triaxial	4 - 5	

#### 4.4 Résultats

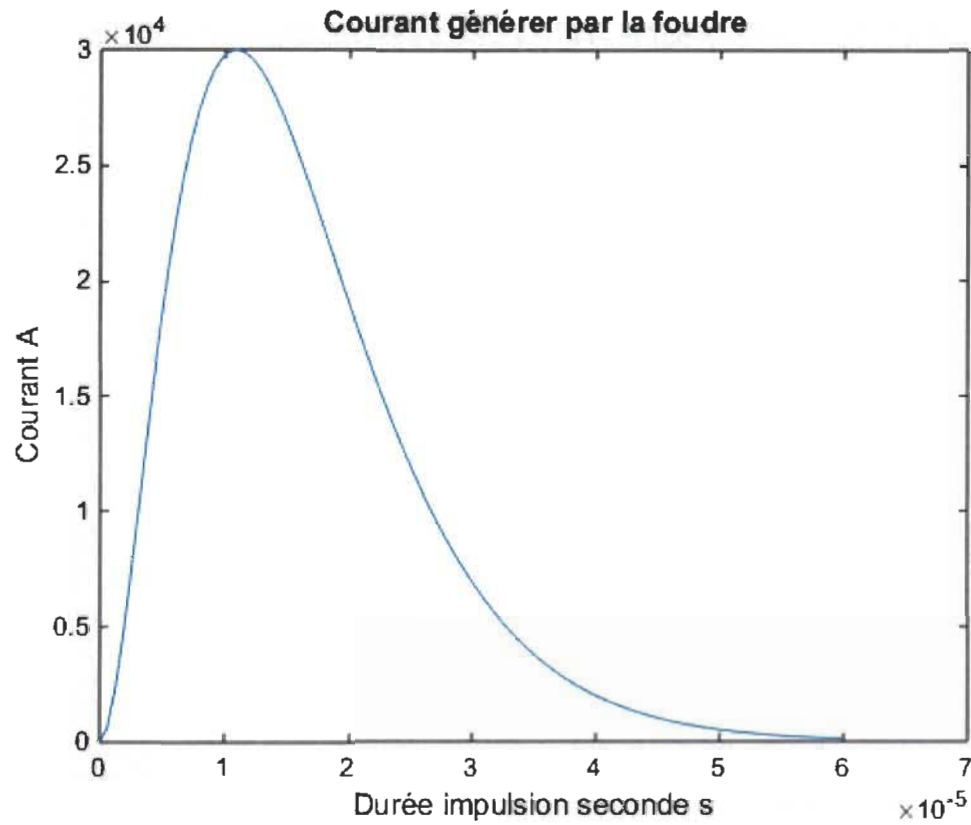


Figure 4-5 Résultat du courant généré lors du choc de foudre [30]

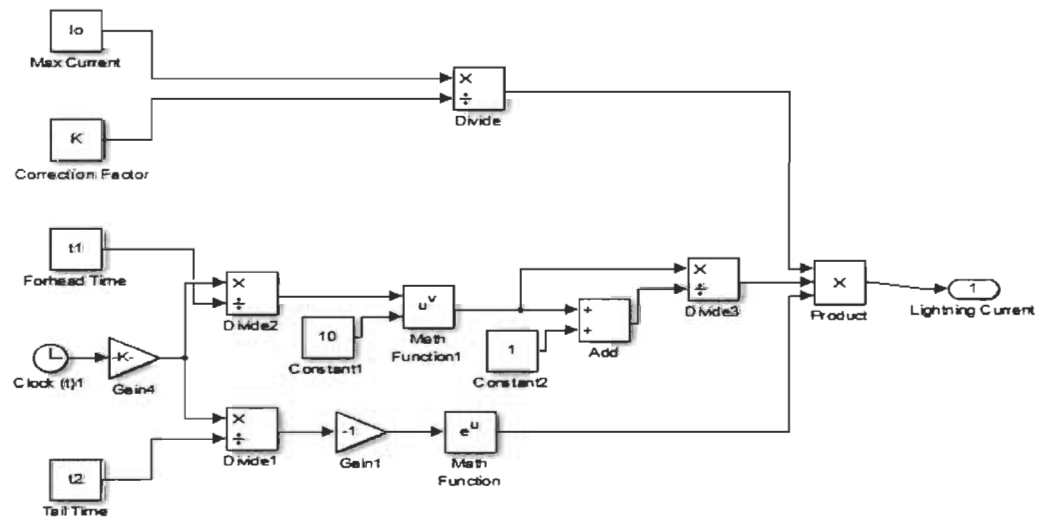


Figure 4-6 Montage proposé pour générer le courant de foudre [30]

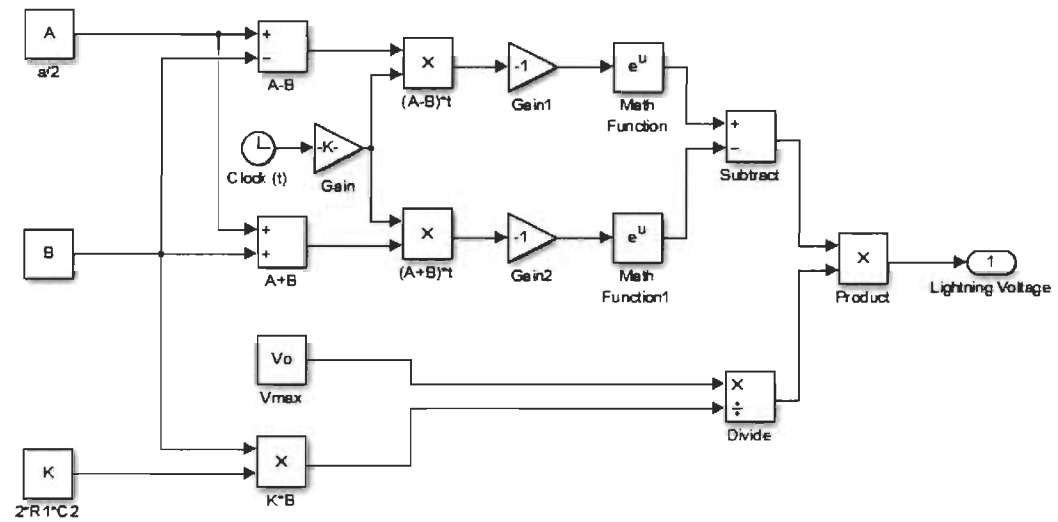


Figure 4-7 Montage proposé pour générer la tension de foudre [30]

Ces modélisations dans Simulink sont basées sur la figure 3.6 de ce document et l'équation :

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

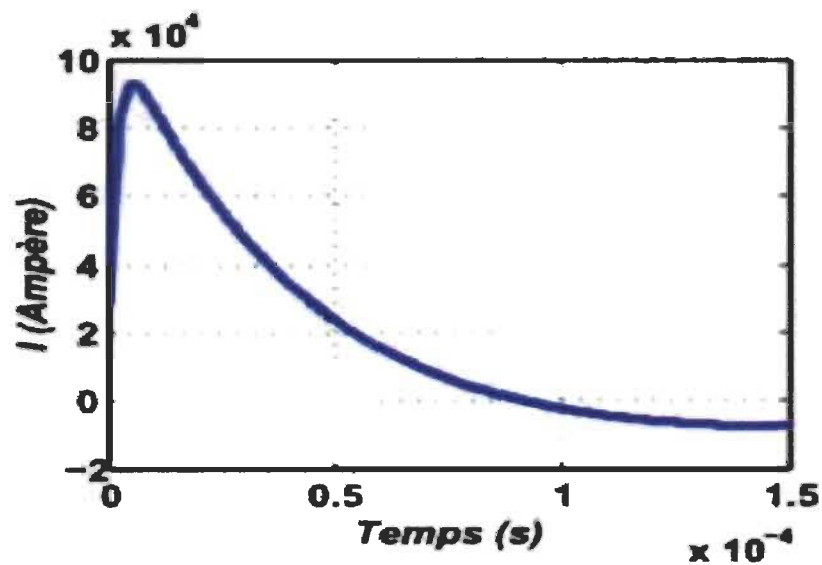


Figure 4-8 Résultat obtenu de référence [33]

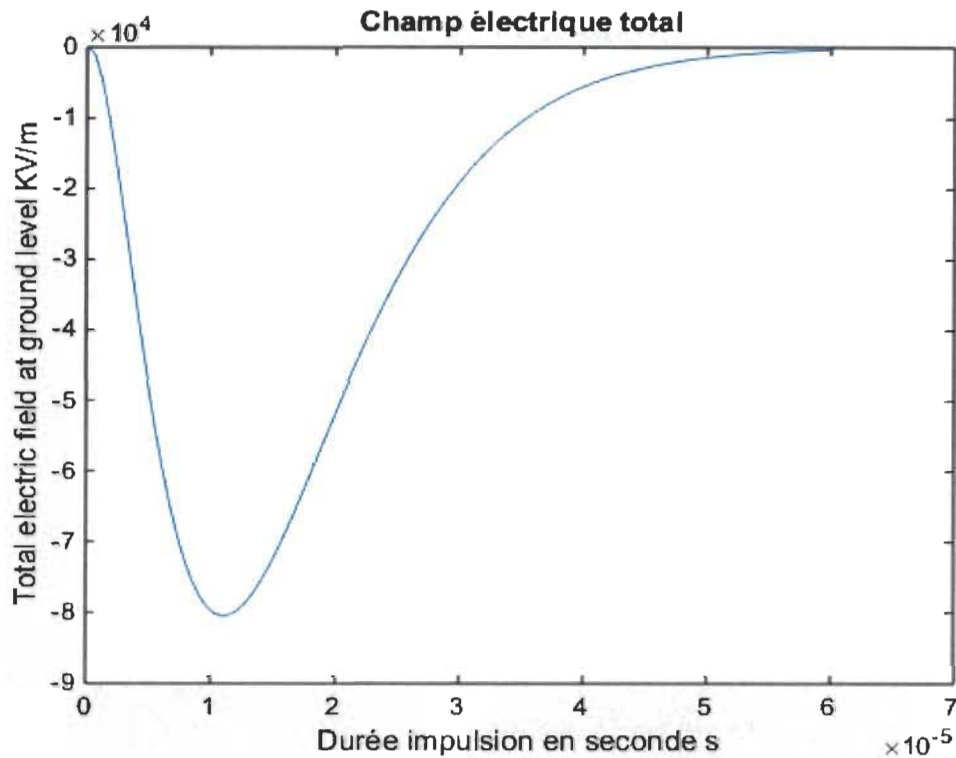


Figure 4-9 Champ électrique total [30]

En se basant sur cette équation :  $E = \sum_s dE = \int_S dE$  (s=surface),

et des calculs on obtient ce champ électrique qui traverse l'aéronef. Dans un avion, les radars et antennes de communication sont habituellement situées au nez ou à la queue de l'aéronef. Endroit où la foudre est le plus susceptible de frapper. Ainsi des bandes de dérivation ont été développées pour contourner ce problème. Les bandes de dérivation représentent des inducteurs permanents qui ont été utilisés à cet effet. Cependant, ils sont interférents avec le rayonnement des antennes et radars des aéronefs. Pour cette raison, des bandes de dérivation segmentées ont été suggérées pour réduire les effets d'interférences sur le rayonnement des antennes. Bien qu'ils aient une meilleure transparence électromagnétique pour les radars, les grappes segmentées nécessitent un gradient de tension importante.

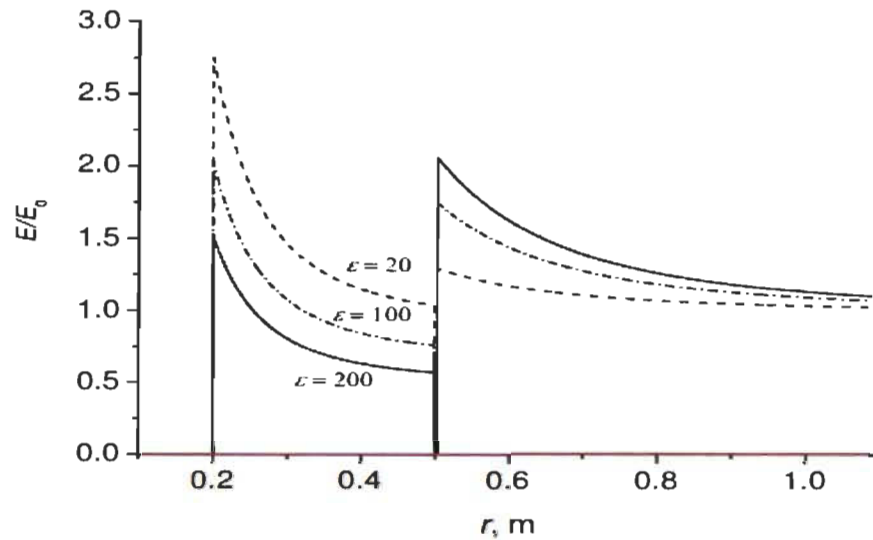


Figure4-10 Distribution de champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur du radôme [21]

$$E(x, a, b) = E_0 \left\{ 1 - \frac{a * r * \tanh\left(a * A^{\frac{1}{2}}/x\right) - a * A^{\frac{1}{2}}/x}{a * r * \tanh\left(A^{\frac{1}{2}}\right) - A^{\frac{1}{2}}} + \frac{A * a * A^{\frac{1}{2}}/x}{\left(x^2/a^2 + b^2/a^2 - 1\right) * \left(a * r * \tanh\left(A^{\frac{1}{2}}\right) - A^{\frac{1}{2}}\right)} \right\}$$

Avec  $a=25\text{m}, b=3\text{m}$

Les bandes de déviation créent les champs électriques induits par les éclairs sur la surface de l'antenne de l'aéronef, c'est-à-dire qu'ils déplacent les points internes d'initiation vers l'avant de sorte que les éléments de la bande de déviation produisent le champ électrique à l'intérieur du radôme (nez). Les calculs des distributions de champs électriques dans le cas de la glace et de l'eau sur la surface du radôme montrent que le thermomètre produit un effet de protection important (figure 4-10). Dans ce cas, le leader qui est l'éclair peut être lancé à

partir de la pointe du radôme, de sorte que les bandes ne fonctionneront pas normalement et un champ induit se propagera [21].

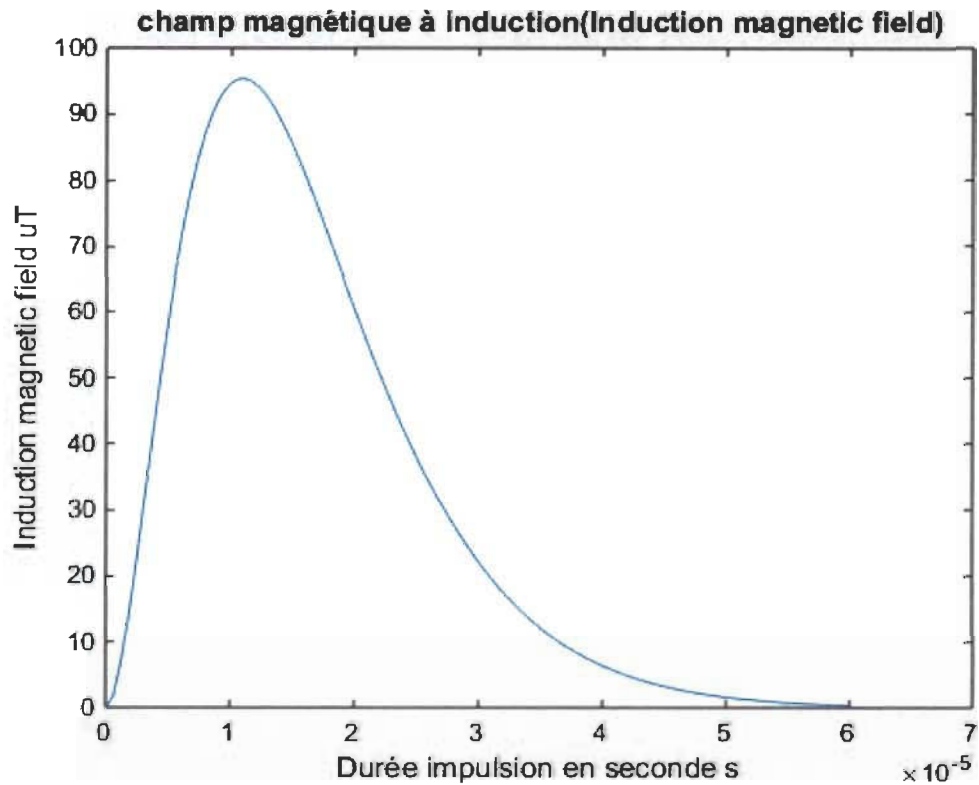


Figure 4-11 Champ d'induction magnétique (en micro tesla) [30]

Avec l'équation  $H = -\frac{d\varphi}{dr} = E\left(1 + \frac{2a}{r^3}\right)$ ,  $r > b$  or  $b = 3\text{m}$  on choisit alors  $r > 3\text{m}$

$$\Phi = -E_0 \cos\left(r - \frac{x^2}{r}\right), r > 3\text{m}$$

Le champ magnétique étant produit par des courants électriques eux-mêmes produit par le mouvement de la matière, il se crée également un effet d'induction magnétique, mais son mode d'action est différent de celui du champ électrique : le flux de champ magnétique qui traverse une boucle induite aux bornes de celle-ci une tension qui se propagera à travers



notre circuit électrique. Pour les installations terrestres il suffit d'une mise à la terre pour résoudre le problème. Pour les aéronefs on utilise des bandes de déviations.

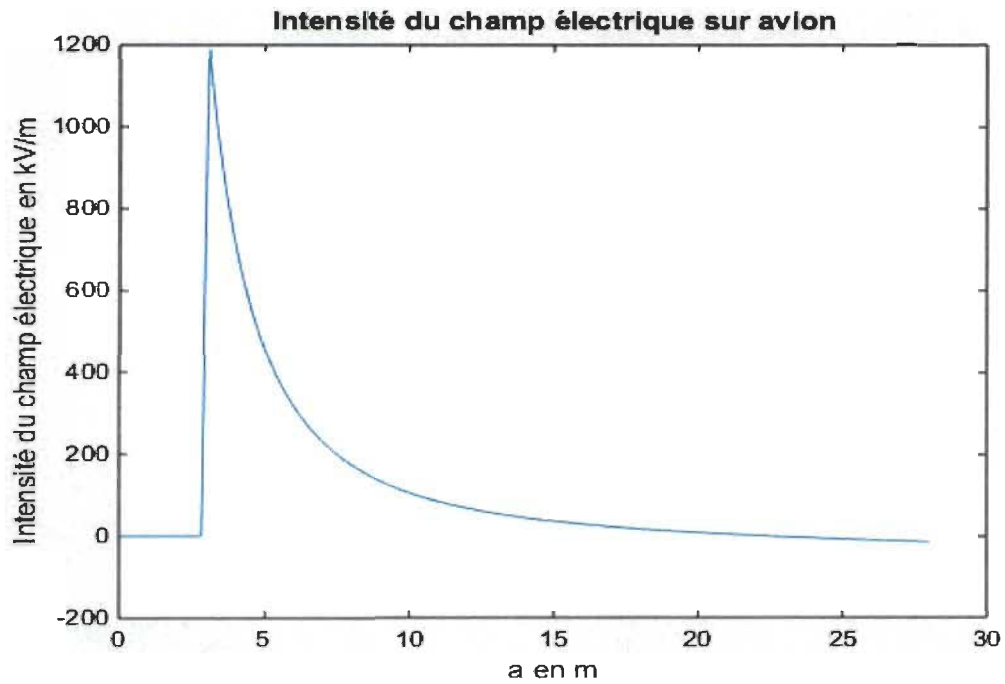


Figure 4-12 Champ électrique sur l'avion et les câbles dans l'avion [30]

$$E_{cr}(\text{kV/m}^{-1}) = 570 * a^{-0.68} [21]$$

Pour les paramètres ellipsoïde  $a=10\text{m}$ ,  $b=3\text{m}$  et une densité de l'air  $= 0.75$  Nous avons obtenu la valeur critique du champ électrique  $E_{cr} = 150\text{kV/m}$ .

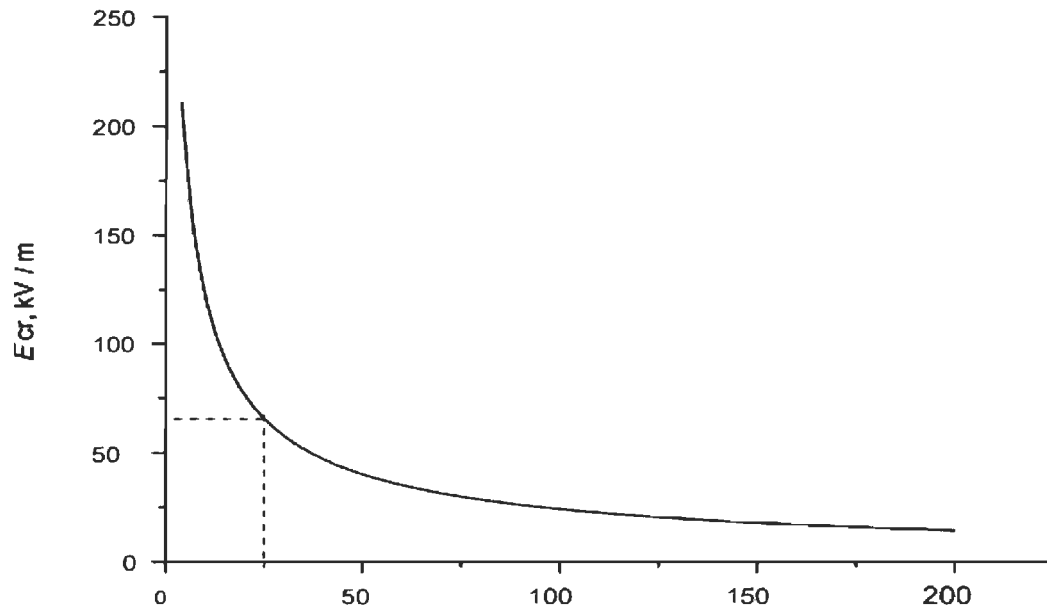


Figure 4-13 Champ électrique sur l'avion résultat obtenu par N. I. Petrov, A. Haddad, G. N. Petrova [21]

Pour les paramètres ellipsoïde données figure (4-1) et tableau (4-2), il est possible de déterminer la valeur critique du champ électrique en utilisant les critères de Petrov & Waters,  $E_{cr} = 65 \text{ kV/m}$   $a=25\text{m}$ ,  $b=3\text{m}$  à une altitude de 4000m, où la densité relative de l'air est d'environ 0,58.

```
% Modélisation de la structure d'un avion
t=linspace(0,60e-6,100);
a=25; % (m)
b=3; % (m)
Eo=1; % Champ électrique initiale
```

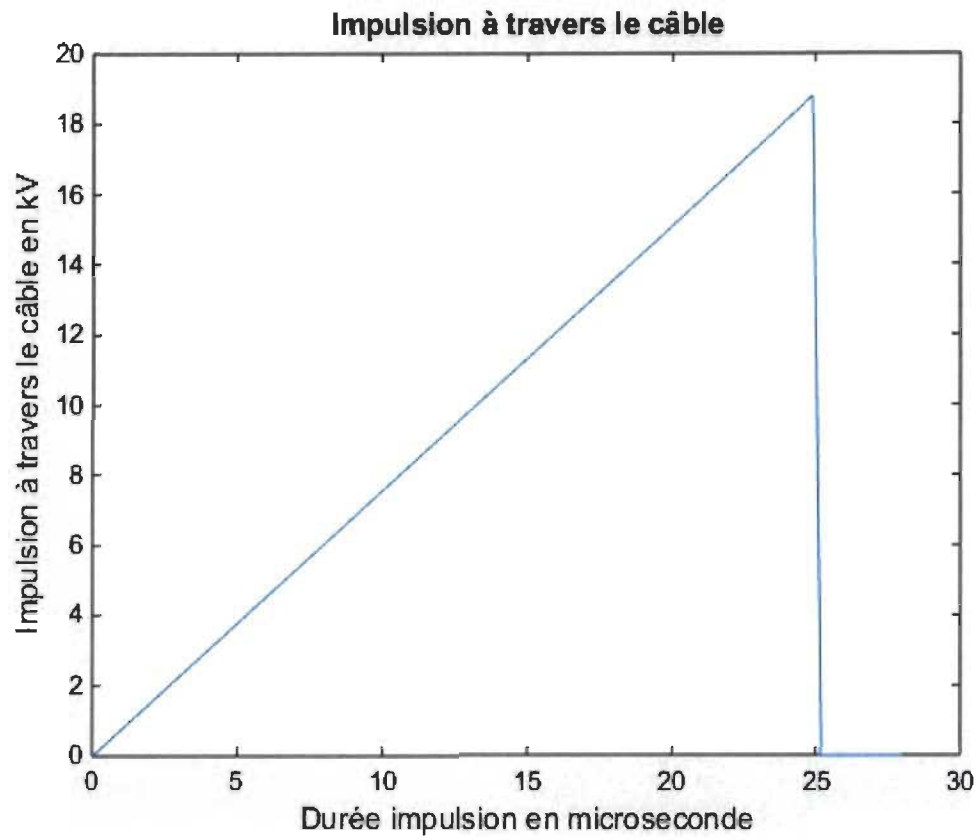


Figure 4-14 Schéma pour calcul de la durée d'impulsion [30]

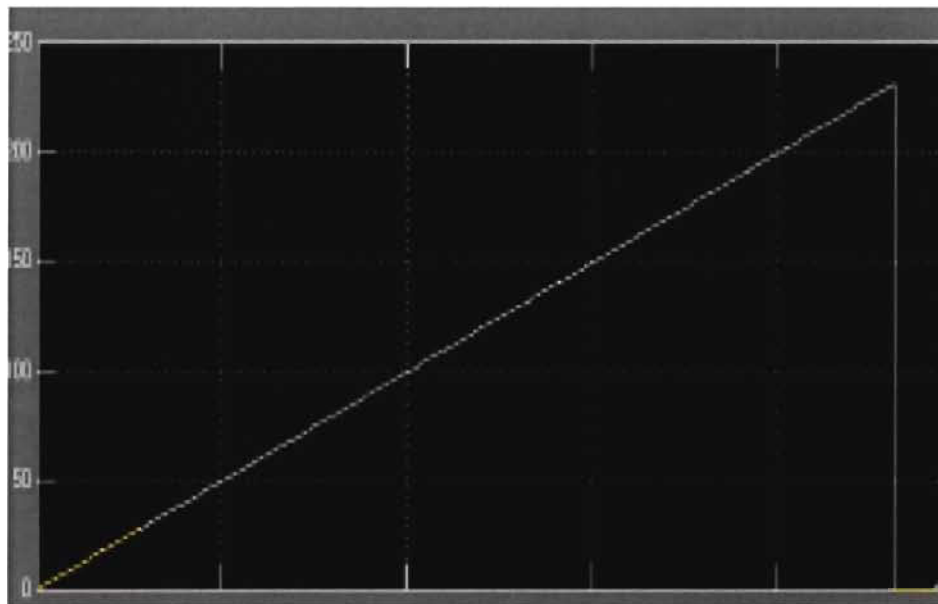


Figure 4-15 Résultat comparatif obtenu par d'autres chercheurs [31]

Lorsque le condensateur se décharge à travers celui-ci, il fournit l'impulsion nécessaire à travers le câble de 25 kV. On a une durée d'impulsion de 25μs

On se base sur ces équations pour mesurer l'impulsion à travers le câble.

$$i(x+dx,t) = i(x,t) - G'dxu(x,t) - Cdx \frac{du}{dt}$$

$$u(x+dx,t) = u(x,t) - R'dxi(x,t) - Ldx \frac{di}{dt}$$

En supposant que les ondes sont stationnaires on aboutit à l'équation différentielle :

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + [L'C'W^2 - jw(R'C' + L'G') - R'G']U(x) = 0$$

$$S^2 = (R' + jL'W)(G' + jC'w)$$

Les composants du circuit ont des caractéristiques par unité de longueur. Le câble est un câble coaxial. IL est constituée d'un conducteur linéaire puis d'un deuxième conducteur cylindrique coaxial, les deux conducteurs étant séparés par un isolant . Pour chaque élément on considère une longueur dx, la ligne est composée d'une résistance R'dx en série avec une self L'dx, en parallèle, par une G'dx en parallèle avec une capacité C'dx. Les quantités R' et G' représentent les pertes de la ligne [32].

Tableau 4-4 Température maximale de conduction en fonction des blindages

Blindage	Température maximale de conduction
Polychlorure de vinyle (PVC)	70 °C au conducteur
Polyéthylène réticulé (VPR) et éthylène-propylène (EPR)	90 °C au conducteur
Minéral (avec gaine en PVC ou nu et accessible)	70 °C à la gaine métallique

Tableau 4-5 Résistance par matériaux en fonction de la température

		Résistance en fonction de l'épaisseur du câble blindé au polychlorure (PVC) ( $\Omega$ )			
Température Épaisseur		1,5mm <sup>2</sup>	2,5 mm <sup>2</sup>	4 mm <sup>2</sup>	6 mm <sup>2</sup>
30°C		2,5	2,5	2,5	2,5
90°C (température maximale admise pendant 1h)		25	35	47,5	+47,5
100°C		30	42,5	+47,5	+50

On obtient pour le champ électromagnétique de la foudre des expressions approximatives sur un avion à des intervalles proches et lointains. Les expressions approximatives montrent que les formes d'onde des champs électriques et magnétiques peuvent être exprimées approximativement par la forme d'onde de courant et de tension dépendamment des distances entre l'avion et la source de l'impact.

La conductivité des câbles est influencée par le changement de la température, la compatibilité électromagnétique n'est plus respectée à cause de l'influence externe. Plus la température est élevée plus le message véhiculé sera erroné et il peut même en résulter la détérioration du matériel.

## Chapitre 5 - Conclusion

Pour la rédaction de ce document le travail a commencé par une revue littéraire, l'étude de tout ce qui concerne les phénomènes électromagnétiques. A partir des matériaux jusqu'aux différentes méthodes de propagations dépendamment de la couche de l'atmosphère.

Dans un second temps on s'est intéressé au phénomène naturel le plus redoutable soit la foudre. Comment se forme un orage, les étapes de la formation des nuages et les effets directes et indirectes qui peuvent en découler.

Puis fut entamé la description et modélisation du système vu qu'on est dans un domaine expérimentale il fallait trouver le moyen de reproduire la foudre du moins avoir des paramètres de tension et de courant qui s'approche de ceux qu'on pourrait enregistrer dans un vrai cas de foudre. C'est donc à ce niveau que furent abordés les différents générateurs possible : générateur de courant et de tension.

Enfin la modélisation numérique où sont exposés les modélisations de l'avion, du câble et les résultats.

Dépendamment de la description de la problématique à laquelle on fait face, il existe plusieurs moyens et méthodes pour l'aborder et le résoudre. La résolution numérique des équations avec la méthode des différences finis est envisageable et offre la possibilité

d'étudier et observer l'évolution du champ magnétique au cours du temps. Dans la modélisation des effets de la foudre sur un avion, il existe plusieurs paramètres en prendre en compte. Les matériaux composites, le fuselage de l'avion, les années de vol de l'avion, la longueur de l'avion et la hauteur à laquelle vol ce dernier puis si l'avion est l'initiateur de la foudre ou s'il fait juste parti du canal. Un autre paramètre très important à prendre en compte est le câblage.

Le type de blindage d'un câble est le moyen le plus important pour vérifier et contrôler comment celui-ci interagit dans son environnement. L'impédance de transfert est le critère sur lequel on se base pour faire les calculs. Ce dernier met en relation : la longueur du câble et un courant perturbateur. L'objectif est d'avoir l'impédance la plus faible possible ce qui qualifiera le blindage de bon ou mauvais.

Tout avion dépendamment de sa longueur et de ses matériaux de construction a un champ électrique critique qui est le champ maximal qu'il peut supporter. Analyser les perturbations de la foudre sur un avion demande un travail sur tous ce qui est couplage car tout joue entre la propagation de la source jusqu'à l'équipement. La difficulté la plus souvent rencontré est la modélisation du câblage car il faudrait prendre en compte le nombre de câble par faisceau, le diamètre de chaque faisceau de câble et la géométrie du cheminement des câbles, les connections avec le fuselage. Les calculs et simulations faits d'après les recherches donnent des résultats assez proches des travaux faits par nos prédécesseurs. Parfois des écarts sont dus à des paramètres pris différemment ou à des méthodes de calculs différentes. Tous les paramètres utilisés ont été considérés ont été identifiés dans le document.



## Bibliographie (ou Références)

- [1] C. Carimalo, “Aimantation , milieux aimantés.” pp. 257–301.
- [2] N. et S. Techniques, “Cahier Technique Fils et câbles.” .
- [3] Aimants, “Les matériaux aimantables,” pp. 2–3, 2016.
- [4] 2e BC, “Chapitre 1 : Champ magnétique,” pp. 1–10.
- [5] C. BOUVIER, “Chapitre n ° 8 : CHAMP MAGNETIQUE ET BOBINE,” pp. 87–100.
- [6] Hydro Québec, “Les champs électriques et magnétiques,” 2011.
- [7] Hydro Québec, “Les effets des champs électriques et la productivité du bétail.”
- [8] C. La and D. Coulomb, “Chapitre 1.2 –La loi de Coulomb,” pp. 1–9, 1806.
- [9] E. Rennes, “PROPAGATION des ONDES ELECTROMAGNETIQUES,” 2005.
- [10] B.I.A, “Météorologie.”
- [11] E. Perrin, “Modélisation des effets indirects de la foudre sur avion composite,” p. 181, 2010.
- [12] R. Otilia, “CUMULONIMBUS CLOUDS AND RELATED WEATHER PHENOMENA AT TÂRGU- MUREŞ , ROMANIA The followed meteorological data were collected from Târgu- Mureş,” pp. 293–298.
- [13] Wikipédia, “Courants descendants de flanc avant et arrière,” pp. 8–10, 2016.
- [14] M. Beltramini, “Contribution à l’optimisation de l’ensemble convertisseur / filtres de sortie vis à vis des contraintes CEM avion,” 2011.
- [15] A. Ch, G. Chargé, and D. Cnrs, “Simulation électromagnétique parallèle avec la méthode FDTD dédiée à la compatibilité électromagnétique,” pp. 1–22, 2014.
- [16] E. Cem, “Émission / Susceptibilité Phénoménologie CEM : le modèle « source / couplage / victime » Classifications des perturbations.”
- [17] P. Nayman, “de tous les jours Qu’est-ce la CEM ?,” pp. 1–87.

- [18] E. Et and D. D. Energie, "Equations locales Equations de Maxwell," pp. 1–27.
- [19] I. T. on A. and Propagations, "02.3 Théorie\_Fr.Pdf." pp. 302–307, 1966.
- [20] A. Malack *et al.*, "FDTD Calculation of Transient Pulse Propagation through a Nonlinear Magnetic Sheet," vol. 35, no. 4, pp. 36–38, 1993.
- [21] N. I. Petrov, A. Haddad, G. N. Petrova, H. Griffiths, and R. T. Waters, "Study of Effects of Lightning Strikes to an Aircraft," *Recent Adv. Aircr. Technol.*, 2012.
- [22] P. Ausset, "Panorama des accélérateurs de particules."
- [23] D. Pietquin, "Cables," 2005.
- [24] J. P.-L. JP PRULHIERE, "Essai-Modelisation.pdf." .
- [25] C. De Raffaele, C. J. Debono, and A. Muscat, "Simulating electromagnetic field inside small aircraft from wireless camera equipment," *LAPC 2012 - 2012 Loughbrgh. Antennas Propag. Conf.*, no. November, 2012.
- [26] T. Sur, L. E. S. Unit, D. E. Mesure, S. La, and V. En, "La section des câbles électriques," pp. 1–7.
- [27] E. N. V. U. E. D. E. L. Obtention, "Modélisation sous emtp de," 1998.
- [28] D. Seret, "Les transmissions et les supports," pp. 1–19.
- [29] E. France, "Cahier technique Fils et câbles."
- [30] source: les résultats obtenu par l'auteure
- [31] A. Patrick, B. Maxime, A. St-Pierre "conception d'un générateur d'impulsion."
- [32] Frédéric Élie, "foudre et tension de pas." pp. 30–34 novembre 2005
- [33] ALI JAZZAR, "Modélisation Électromagnétique d'un choc de foudre en Aéronautique," p. 53, 2012

## Annexe A – Programmation 1

```
function [Ei]=simul(Eo,Io)

% Temperature distribution in an electric wire

d=0.75;           % Diamètre du cable(m)
Rho=9.35e-8;      % Résistivité du cable(Ohm/m)
Courant=1000;     % Courant électrique(A)
lamda=13;         % Conductivité thermique Btu.ft/(h.ft^2.°F) = 22.5
                  % W/(K.m);
alpha=5;          % Btu/(h.ft^2.°F) = 28.4 W/(K.m2);
To=70;            % Température ambiante
theta=10;
angle=linspace(0,30,100); % angle d'impact

% Modélisation de la structure d'un avion
t=linspace(0,60e-6,100);
a=25;             % (m)
b=3;              % (m)
Eo=1;             % Champ électrique initiale
A=1-((b/a)^2);
% x=5;
r=1.5;
x=a*cos(angle*pi/180);

num1=a*r*tanh(a*(A^0.5)*pi/180./x)-a*(A^0.5)./x;
den1=a*r*tanh(pi/180*A^0.5)-A^0.5;

num2=A*a*(A^0.5)./x;
den2=((x./a).^2)+((b/a)^2)-1)*den1;

E=((num1./den1)+(num2./den2)).*Eo;

figure(1)
plot(t,E);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

%%

% Champ électrique critique pour l'avion
Ecr=570*a^-0.68; % (kV/m)
```

```

%% Charge d'impact de la foudre en fonction de la distance

%q=(Q/S)*io;
%q=(0.43e-6)*(io^(2/3));      % (C/m,A)

%% Electric field distribution at radome
r=linspace(0,28,100);
epsilon=2;
Anum=3*(1+2*epsilon+(epsilon-1)*(b/a)^3);
Aden=(epsilon+2)*(2*epsilon+1)-2*((epsilon-1)^2)*(b/a)^3;

A=(a^3)*Anum/Aden;
B=9*epsilon/Aden;
C=3*(2*epsilon-1)/Aden;
D=-(b^3)*(epsilon-1)/(2*epsilon+1);

% Champ hors de l'avion

for i=1:100;
    if r(i)>b
        phi1(i)=-Eo*cos(theta*pi/180).*(r(i)-A./r(i).^2); % [r>b]
        Er(i)=Eo*cos(theta)*(1+2*A./(r(i).^3));
        Etheta(i)=-Eo*sin(theta)*(1-2*A./(r(i).^2));
    else
        phi1(i)=0;
    end

    if r(i)<a
        phi3(i)=-B*Eo.*r(i).*cos(theta); % [r<a]
    else
        phi3(i)=0;
    end

    if r(i)>b
        if r(i)<a
            phi2(i)=-C*Eo*cos(theta*pi/180).*(r(i)-D./r(i).^2); % [a<r<b]
        else
            phi2(i)=0;
        end
    else
        phi2(i)=0;
    end
end

figure(2)
plot(r,phi1);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

```

```
figure(3)
plot(r,phi2);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')
```

```
figure(4)
plot(r,phi3);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')
```

```
figure(5)
plot(r,Er);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')
```

```
figure(6)
plot(r,Etheta);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')
```

```
%% 2-layer radome wall
```

```
epsilon1=2;
epsilon2=4;
epsilon3=6;
epsilon4=4;
c=linspace(0,40,100);
```

```
% for p=1:100
% G=(b^3)*(1-epsilon3/epsilon4)/(1+2*epsilon3/epsilon4);
% D2=(a^3)*(1-(epsilon2/epsilon3)*((a^3)-
G)/((a^3)+2*G))/(1+2*(epsilon2/epsilon3)*((a^3)-G)/((a^3)+2*G));
% C2(p)=3*epsilon1*(c(p).^3)/(2*epsilon1*((c(p).^3)-
D2)+epsilon2*((c(p).^3)-2*D2));
% A2(p)=(c(p).^3)-C2(p).*((c(p).^3)-D2);
% F(p)=C2(p).*((a^3)-D2)/((a^3)-G);
% B2(p)=F(p).*((b^3)-D2)./(b^3);
% end
```

```
for j=1:100
G=(b^3)*(1-epsilon3/epsilon4)/(1+2*epsilon3/epsilon4);
D2=(a^3)*(1-(epsilon2/epsilon3)*((a^3)-
G)/((a^3)+2*G))/(1+2*(epsilon2/epsilon3)*((a^3)-G)/((a^3)+2*G));
C2(j)=3*epsilon1*(c(j).^3)/(2*epsilon1*((c(j).^3)-
D2)+epsilon2*((c(j).^3)-2*D2));
A2(j)=(c(j).^3)-C2(j).*((c(j).^3)-D2);
F(j)=C2(j).*((a^3)-D2)/((a^3)-G);
B2(j)=F(j).*((b^3)-D2)./(b^3);
if r(j)>c(j)
    phi11(j)=-Eo*cos(theta*pi/180).*(r(1)-A2(j)./r(j).^2); % [r>c]
```

```

        Er2(j)=Eo*cos(theta).*(1+2*A2(j)/(r(j).^3)); % [r>b]
        Etheta2(j)=-Eo*sin(theta).*(1-2*A2(j)/(r(j).^2));
    else
        phi11(j)=0;
        Er2(j)=0;
        Etheta2(j)=0;
    end

    if r(j)>a
        if r(j)<c(j)
            phi22(j)=-C2(j)*Eo*cos(theta*pi/180).*(r(j)-D2./r(j).^2); % [a<r<c]
        else
            phi22(j)=0;
        end
    else
        phi22(j)=0;
    end

    if r(j)>b
        if r(j)<a
            phi33(j)=-F(j).*Eo.*r(j)*cos(theta*pi/180).*(r(j)-
G./r(j).^2); % [b<r<a]
        else
            phi33(j)=0;
        end
    else
        phi33(j)=0;
    end

    if r(j)<b
        phi44(j)=-1.*B2(j)*Eo.*r(j)*cos(theta*pi/180); % [r<b]
    end

end

figure(7)
plot(r,phi11);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

figure(8)
plot(r,phi22);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

figure(9)
plot(r,phi33);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

figure(10)

```

```

plot(r,Er2);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

```

```

figure(11)
plot(r,Etheta2);
title('Intensité du champ électrique sur avion')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Intensité du champ électrique en kV/m')

```

```

%-----
-%
% Génération d'un champ magnétique et électrique produit par la foudre
%
%-----
-%
clear all;
clc;
% Paramètre de simulation
t=linspace(0,60e-6,100);
Io=30e3; % Courant générer par la foudre
r=50; % Distance d'impact en (m)
c=3e8; % Vitesse de la lumière
epsilon_0=8.85418782e-12; % permittivité diélectrique du vide
v=1.3e8; %return stroke speed
tau_1=4.0e-5; % (s)
tau_2=6.25e-6; % (s)
n=2;
beta=v/c;
h=((c*t)-sqrt((beta*c*t).^2+(r^2)*(1-beta^2)))/(1-beta^2);

%-----Génération du courant produit par la foudre-----
-%
nn_1=n*tau_2/(tau_1+n*tau_2);
nn_2=tau_1/(tau_1+n*tau_2);
N=(nn_1^n)*(nn_2^(tau_1/tau_2));
I=(Io/N).*((1-exp(-t/tau_1)).^n).*exp(-t/tau_2);
figure(1)
plot(t,I);
title('Courant générer par la foudre')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Courant')

%%
%-----champ électrique à induction(Induction electric field)-----
-%
Ez=-(I/4*pi*r*c*epsilon_0).*(atan(h/r)-(3.*h*r)/((h.^2)+(r.^2)));
figure(2)
plot(t,Ez);

```

```

title('champ électrique à induction(Induction electric field)')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Induction electric field')

%%
%-----Rayonnement champ électrique(Radiation electric field)-----
~%
Ezr_den1=2*pi*epsilon_0*(c^2).*((h.^2)+(r^2)).^(3/2));
Ezr_den2=(1/v)+h./(c.*((h.^2)+(r^2)).^(1/2)));
Ezr=(I.*r^2)./(Ezr_den1.*Ezr_den2);
figure(3)
plot(t,Ezr);
title('Rayonnement champ électrique(Radiation electric field)')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Radiation electric field')

%%
%-----champ magnétique à induction(Induction magnetic field)
Hi=(I.*h)./(2*pi.*(r.*((h.^2)+(r^2)).^(1/2))));
figure(4)
plot(t,Hi);
title('champ magnétique à induction(Induction magnetic field)')
xlabel('Durée impulsion en microseconde')
ylabel('Induction magnetic field')

%%
%-----champ magnétique à induction(Induction magnetic field)

```