



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Télécommunications
Réseaux et télécommunications

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
HOUHOU Saber

Le :

Etude d'une antenne cylindrique : modélisation et simulation

Jury :

Mme. BARKAT Aicha	MCB	Université de Biskra	Président
M. BENAKCHA Abdelhamid	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mme. ATAMENA Nora	MAA	Université de Biskra	Examinateur

Année universitaire : 2024 / 2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Télécommunications
Réseaux et télécommunications

Réf. : Entrez la référence du document

Etude d'une antenne cylindrique : modélisation et simulation

Le : lundi 16 juin 2025

Présenté par :

HOUHOU Saber

Avis favorable de l'encadrant :

BENAKCHA Abdelhamid

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

Remerciements

Pour conclure cet humble travail, je tiens à exprimer ma sincère gratitude :

*Tout d'abord, à Dieu, qui m'a donné la force et la volonté d'atteindre cet objectif. Ensuite, à mes parents (**Mon père qu'Allah le préserve, et ma mère qu'Allah lui fasse miséricorde**), ainsi qu'à mes frères et ma sœur qui m'ont soutenu sans relâche au fil des ans. Sans leur soutien et leurs encouragements, je ne serais pas là où je suis aujourd'hui.*

*Je remercie sincèrement mon Directeur de mémoire, **Pr Benakcha Abdelhamid**, pour son soutien et ses conseils.*

Je remercie également les membres du Jury qui ont bien voulu évaluer cet humble travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu, de près ou de loin, tout au long de cette année.

Résumé

Cette étude, intitulée « *Etude d'une antenne cylindrique : modélisation et simulation* », a abordé la modélisation mathématique de l'antenne cylindrique. A partir de la théorie de champ de *Maxwell* et l'introduction de la notion de potentiel vecteur, une équation intégrale, dite de *Hallén*, est déduite. Sa résolution donne la distribution du courant le long de l'antenne. La méthode utilisée pour sa solution est dite « méthode des moments (MoM) ». Cette méthode numérique permet de transformer l'équation intégrale de *Hallén* en un système d'équations algébriques linéaires qu'il convient de résoudre par une méthode numérique de *Gauss-Seidel*. Les simulations, réalisées sous *MATLAB*, ont fourni pour l'antenne cylindrique les résultats suivants :

- Distribution de courant à la surface de l'antenne ;
- Impédance d'entrée de l'antenne ;
- Paramètre S_{11} (ou coefficient de réflexion) de l'antenne ;
- Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne ;
- Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne dans les plans E et H.

Mots clés :

Antenne cylindrique ; Equation intégrale de *Hallén* ; Méthode des moments ; Simulation sous Matlab.

الملخص

الكلمات المفتاحية

هوائي أسطواني؛ معادلة هالن التكاملية؛ المحاكاة باستخدام ماتلاب.

تناولت هذه الدراسة، المعنونة "دراسة هوائي أسطواني: النمذجة والمحاكاة"، النمذجة الرياضية للهوائي الأسطواني. واستناداً إلى نظرية ماكسويل للحقل ومفهوم الجهد المتجهي، تم استباقاً معادلة تكاملية تُعرف بمعادلة هالن. يُعطي حلها توزيع التيار على طول الهوائي. تُسمى الطريقة المستخدمة لحلها « طريقة العزوم (MoM) ». تحول هذه الطريقة العددية معادلة هالن التكاملية إلى نظام من المعادلات الجبرية الخطية التي يمكن حلها باستخدام طريقة غاوس-سيidel العددية. وقد أسفرت عمليات المحاكاة، التي أُجريت باستخدام *MATLAB*، عن النتائج التالية للهوائي الأسطواني:

- توزيع التيار على سطح الهوائي؛
- معاوقة دخل الهوائي؛
- معامل انعكاس الهوائي S_{11} ؛
- نمط الإشعاع ثلاثي الأبعاد للهوائي؛
- أنماط الإشعاع ثنائية الأبعاد للهوائي في المستويين E و H.

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Liste des figures	VI
Introduction générale.....	VII
Chapitre 1 : Considérations générales sur les antennes cylindriques.....	1
1.1 Introduction	1
1.2 Antennes cylindriques	1
1.2.1 Définition de l'antenne cylindrique	1
1.2.2 Principales caractéristiques.....	2
A- Forme géométrique	2
B- Bandes de fréquences	2
C- Polarisation	2
1.2.3 Types d'antennes fendues cylindriques	2
A- Antenne dipôle cylindrique.....	2
B- Antenne monopole cylindrique	3
C- Antenne fendue cylindrique.....	3
1.2.4 Applications des antennes cylindriques.....	4
A- Réseaux mobiles (4G/5G).....	4
B- Radiocommunications professionnelles.....	4
C- Systèmes radar et radiofréquence.....	4
D- Systèmes radar automobiles	5
E- Systèmes militaires	5
F- Recherches scientifiques	5
G- Systèmes d'instrumentation	5
H- Systèmes de navigation	6
1.3 Avantages des antennes cylindriques.....	6
1.4 Inconvénients des antennes cylindriques.....	6
1.5 Conclusion.....	7
Chapitre 2 : Modélisation de l'antenne cylindrique.....	9
2.1 Introduction	9
2.2 Modélisation mathématique de l'antenne cylindrique.....	9
2.2.1 Équation de <i>Hallén</i> pour une antenne cylindrique.....	9

A-	Potentiel vecteur magnétique	10
B-	Relation avec le champ électrique.....	11
C-	Condition sur le champ induit.....	12
2.4	Méthodes numériques de résolution de l'équation de <i>Hallén</i>.....	13
2.4.1	Méthode des différences finies dans le domaine Temporel (FDTD)	13
2.4.2	Méthode des éléments finis (FEM).....	13
2.4.3	Méthode des moments (MoM).....	13
2.5	Principe de la méthode des moments appliquée à une antenne cylindrique.....	14
2.5.1	Formulation du problème : Équation Intégrale de <i>Hallén</i>	14
2.5.2	Discrétisation de l'équation intégrale	14
2.5.3	Application de la technique de pondération	15
2.5.4	Résolution numérique	15
2.6	Détermination des paramètres de l'antenne	15
2.7	Application de la méthode des moments	15
2.6.1	Formulation de l'équation intégrale	15
2.7.1	Discrétisation avec des fonctions de base sinusoïdales	16
2.7.2	Application de la méthode de <i>Galerkin</i>.....	17
2.7.3	Mise sous forme matricielle	17
2.8	Conclusion.....	18
Chapitre 3 : Simulation de l'antenne cylindrique		20
3.1	Introduction	20
3.2	Présentation de Antenna Designer de Matlab	20
3.3	Fonctionnement de Antenna Designer Tool de Matlab	20
3.3.1	Modélisation géométrique de l'antenne.....	20
3.3.2	Simulation Électromagnétique	21
3.3.3	Analyse et visualisation	21
3.4	Organigramme d'application de la méthode des moments (MoM)	22
a.	Interprétation.....	23
3.5	Simulation de l'antenne cylindrique	24
3.5.1	Forme 3D d'une antenne cylindrique	25
a.	Interprétation.....	25
b.	Avantages de cette étude	25
3.5.2	Impédance d'entrée de l'antenne cylindrique.....	26
a.	Interprétation.....	26
b.	Avantages de cette étude	26
3.5.3	Paramètre S_{11} de l'antenne cylindrique.....	27
a.	Interprétation.....	27

b. Avantages de cette étude.....	27
3.5.4 Diagramme de rayonnement d'une antenne cylindrique.....	28
a. Interprétation.....	28
b. Avantages de cette étude.....	28
3.5.5 Directivités d'une antenne cylindrique	29
a. Interprétation.....	29
b. Avantages de cette étude	29
3.5.6 Distribution de courant d'une antenne cylindrique	30
a. Interprétation.....	30
b. Avantages de cette étude	30
3.4 Conclusion.....	31
Conclusion générale	32
Références	33

Liste des figures

Figure1-1: Antenne cylindrique	1
Figure 1-2 : Antenne dipôle cylindrique	2
Figure 1-3: Antenne monopole cylindrique	3
Figure 1-4: Antenne fendue cylindrique	3
Figure 2-1: modélisation de l'antenne cylindrique	11
Figure 3-1 : Organigramme d'application de la méthode des moments	22
Figure 3-2: Distribution de courant I d'une antenne cylindrique	23
Figure 3-3: Organigramme général de simulation	24
Figure 3-4: Forme 3D d'une antenne cylindrique	25
Figure 3-5: Impédance d'entrée de l'antenne cylindrique	26
Figure 3-6: Paramètre S_{11} de l'antenne cylindrique	27
Figure 3 -7: Diagramme de rayonnement d'une antenne cylindrique	28
Figure 3-8: Directivités d'une antenne cylindrique	29
Figure 3-9: Distribution de courant d'une antenne cylindrique.....	30

Introduction générale

Les antennes cylindriques constituent une catégorie essentielle dans le domaine des communications. Leur structure particulière leur confère des propriétés électromagnétiques remarquables. Grâce à leur géométrie spécifique, elles assurent une couverture omnidirectionnelle dans le plan horizontal, ce qui les rend particulièrement adaptées aux applications nécessitant une diffusion uniforme du signal, telles que les stations de base mobiles, les réseaux Wi-Fi à large portée, ainsi que les systèmes de communication maritimes et aéronautiques.

L'un de leurs atouts majeurs réside dans leur robustesse mécanique, qui facilite leur intégration dans des environnements variés, y compris les sites extérieurs soumis à des conditions climatiques rigoureuses. De plus, leur conception permet une polarisation modulable — verticale, horizontale ou circulaire — en fonction des exigences spécifiques de transmission et de réception.

L'analyse des antennes cylindriques est cruciale pour optimiser leurs performances en matière de gain, de directivité, d'adaptation d'impédance et de bande passante. Une compréhension approfondie de leur comportement électromagnétique permet de développer des systèmes de communication plus efficaces, réduisant les interférences et améliorant la qualité du signal. À l'ère de la 5G et de l'Internet des objets (IoT), la recherche sur les antennes innovantes, notamment cylindriques, prend une importance croissante pour répondre aux besoins grandissants en débit et en connectivité.

Ce mémoire est structuré autour de trois chapitres :

- Le chapitre 1, intitulé « *Considérations générales sur les antennes cylindriques* », résume quelques aspects généraux sur les antennes cylindriques.
- Le chapitre 2, intitulé « *Modélisation de l'antenne cylindrique* », présente une approche de modélisation basée sur l'équation intégrale de *Hallén* et sa résolution numérique par la méthode des moments.
- Le chapitre 3, intitulé « *Simulation de l'antenne cylindrique* », achève cette étude par la réalisation de quelques simulations numériques en utilisant Matlab et un utilitaire de Matlab, appelé « *Antenna Designer* ».

Chapitre 1 :

Considérations générales sur

les antennes cylindriques

Chapitre 1 : Considérations générales sur les antennes cylindriques

1.1 Introduction

Les antennes cylindriques constituent une classe fondamentale dans le domaine des systèmes de rayonnement électromagnétique, en raison de leur géométrie cylindrique unique. Leur conception leur confère des propriétés distinctes qui les rendent particulièrement adaptées à de nombreuses applications modernes, des communications filaires et sans fil aux systèmes de défense en passant par la recherche scientifique. Leur résistance mécanique, leur capacité à générer des diagrammes de rayonnement stables et leur adaptabilité à différents environnements en font un sujet d'étude et d'innovation continue.

Les antennes cylindriques ont été largement étudiées en raison de leur polyvalence et de leur adaptabilité à différentes applications. Ces antennes présentent une structure d'ingénierie simple, permettant une intégration facile dans des environnements complexes, tels que des véhicules ou des drones. Des travaux récents mettent en évidence leur capacité à générer des diagrammes de rayonnement omnidirectionnels, ce qui les rend idéales pour les communications mobiles et les réseaux sans fil. Cependant, leurs performances dépendent en grande partie de paramètres géométriques, tels que le rayon et la longueur du cylindre, ainsi que des propriétés des matériaux utilisés. (Jin , 2014)

1.2 Antennes cylindriques

1.2.1 Définition de l'antenne cylindrique

Une antenne cylindrique est une antenne dont la structure rayonnante principale a une forme géométrique cylindrique. L'antenne peut être conçue de différentes manières selon l'application. (Balanis , 2016, p. 548).



Figure 1-1: Antenne cylindrique

1.2.2 Principales caractéristiques

A- Forme géométrique

L'antenne possède une forme géométrique cylindrique, c'est-à-dire qu'elle est constituée d'un ou plusieurs éléments conducteurs de section circulaire et de longueur significative par rapport à la longueur d'onde opérationnelle. (Balanis , 2016, p. 548)

B- Bandes de fréquences

La conception géométrique de cette antenne lui permet de fonctionner sur une large gamme de fréquences, généralement de la haute fréquence (HF) à la super haute fréquence (SHF), en fonction de son diamètre et de sa longueur. Sa plage de fonctionnement est déterminée principalement par sa taille par rapport à sa longueur d'onde. (Balanis , 2016, p. 549)

C- Polarisation

La polarisation d'une antenne cylindrique dépend de sa structure et de son alimentation. Elle peut être linéaire (généralement verticale ou horizontale) ou circulaire/elliptique, selon la configuration des fentes des brins rayonnants. (Balanis , 2016, p. 555)

1.2.3 Types d'antennes fendues cylindriques

A- Antenne dipôle cylindrique

Une antenne dipôle cylindrique est une antenne filaire symétrique composée de deux conducteurs cylindriques identiques alignés axialement et alimentés en leur centre. (Balanis , 2016, p. 197).

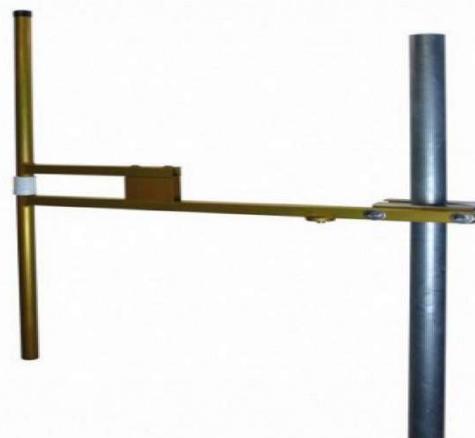


Figure 1-2 : Antenne dipôle cylindrique

B- Antenne monopole cylindrique

Une antenne monopole cylindrique est une antenne filaire constituée d'un conducteur métallique de forme cylindrique, monté perpendiculairement sur un plan de masse. L'antenne est alimentée à sa base. (Balanis , 2016, p. 198)

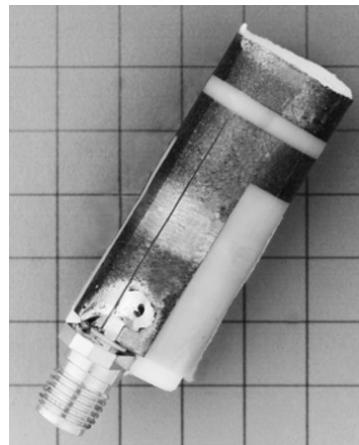


Figure 1-3: Antenne monopole cylindrique

C- Antenne fendue cylindrique

Une antenne cylindrique à fentes est une structure rayonnante constituée d'un conducteur métallique cylindrique dans lequel des ouvertures (fentes) sont pratiquées pour permettre le rayonnement d'ondes électromagnétiques. Cette antenne exploite la distribution des courants de surface pour générer son diagramme de rayonnement caractéristique. (Balanis , 2016, p. 715)



Figure 0-4: Antenne fendue cylindrique

1.2.4 Applications des antennes cylindriques

A- Réseaux mobiles (4G/5G)

Les antennes cylindriques, par leur conception simple et économique, jouent un rôle clé dans les réseaux des télécommunications mobiles modernes. Dans les réseaux 4G, elles sont principalement utilisées comme antennes omnidirectionnelles pour les stations de base, offrant une couverture uniforme à 360°, ainsi que dans les configurations de petites cellules urbaines. Pour la 5G, leur utilisation s'est étendue aux systèmes MIMO massifs où elles servent d'éléments rayonnants de base, particulièrement dans les bandes sub-6 GHz, tout en permettant des designs reconfigurables pour s'adapter dynamiquement aux besoins du réseau. (Zhang , 2023)

B- Radiocommunications professionnelles

Les antennes cylindriques occupent une place importante dans le domaine des radiocommunications professionnelles en raison de leur robustesse et de leur fiabilité. Ces antennes filaires sont particulièrement adaptées aux environnements exigeants grâce à leur conception simple et robuste. Dans le secteur maritime, elles équipent les navires pour les communications VHF et HF, assurant des liaisons stables même dans des conditions météorologiques difficiles. L'aviation civile et militaire les utilisent également pour les communications air-sol, où leur performance omnidirectionnelle est cruciale. (Johnson , 2019)

C- Systèmes radar et radiofréquence

Les antennes cylindriques jouent un rôle essentiel dans les systèmes radar et radiofréquence en raison de leur simplicité de conception, leur robustesse et leurs performances électromagnétiques adaptables. Dans les applications radar, elles sont couramment employées comme éléments rayonnants pour les radars de surveillance aérienne et maritime. Leur structure filaire permet une couverture omnidirectionnelle ou directionnelle selon la configuration. Leur capacité à fonctionner sur des bandes larges (HF à SHF) les rend idéales pour les radars météorologiques et les systèmes de détection à longue portée. (Volakis , 2007)

D- Systèmes radar automobiles

Les antennes cylindriques jouent un rôle important dans les systèmes radar automobiles, notamment pour les applications de courte et moyenne portée comme les aides à la conduite (ADAS). Leur conception filaire, souvent réalisée sous forme de dipôles ou de monopôles imprimés, permet une intégration compacte dans des espaces restreints (rétroviseurs, pare-chocs). (Stelzer, 2020)

E- Systèmes militaires

Les antennes cylindriques constituent une solution privilégiée pour les applications militaires en raison de leur robustesse, leur simplicité et leur adaptabilité aux conditions opérationnelles difficiles. Dans le domaine des communications tactiques, elles se présentent principalement sous forme d'antennes fouet compactes pour les radios portables individuelles (fonctionnant typiquement dans les bandes HF à UHF), offrant une bonne mobilité tout en maintenant des performances de transmission essentielles sur le terrain. (Burdic , 2021)

F- Recherches scientifiques

Les antennes cylindriques jouent un rôle important dans divers domaines de la recherche scientifique grâce à leur conception simple et leurs propriétés électromagnétiques bien caractérisées. En radioastronomie, elles sont utilisées comme éléments de base pour les radiotélescopes basse fréquence. Leur structure filaire permet une construction économique de grands réseaux d'antennes nécessaires pour les observations du ciel complet. (Ellingson , 2021)

G- Systèmes d'instrumentation

Les antennes cylindriques trouvent une application essentielle dans les systèmes d'instrumentation scientifique et industrielle, où leur conception simple et reproductible en fait des outils de mesure privilégiés. Ces antennes filaires sont particulièrement adaptées aux applications nécessitant une grande précision et une excellente reproductibilité des mesures. Dans les laboratoires et les installations industrielles, elles sont couramment employées comme antennes de référence pour l'étalonnage des chambres anéchoïques, servant de standard pour les mesures de champ lointain. (Hansen, 2022)

H- Systèmes de navigation

Les antennes cylindriques jouent un rôle clé dans divers systèmes de navigation en raison de leur robustesse et de leurs performances électromagnétiques stables. Dans les systèmes GNSS (GPS, Galileo, GLONASS), les antennes quadri cylindres sont largement utilisées pour leur couverture omnidirectionnelle et leur capacité à maintenir une polarisation circulaire droite - essentielle pour la réception des signaux satellites. (Bao , 2022)

1.3 Avantages des antennes cylindriques

- Résistance aux vibrations et aux chocs ;
- Durée de vie plus longue ;
- Caractéristiques électromagnétiques optimales ;
- Faible rapport d'ondes stationnaires ;
- Bande passante élevée ;
- Prise en charge multi bandes ;
- Facilité d'intégration ;
- Forme compacte ;
- Conception modulaire.
-

1.4 Inconvénients des antennes cylindriques

- Exigence d'un assemblage précis ;
- Détection difficile des défauts internes ;
- Rayonnement omnidirectionnel réduisant la portée utilisée ;
- Gain inférieur à celui des antennes paraboliques ;

1.5 Conclusion

Les antennes cylindriques représentent une solution polyvalente et robuste pour de nombreuses applications en ingénierie des télécommunications, des radars et des systèmes embarqués. Leur géométrie cylindrique leur confère des propriétés électromagnétiques uniques, comme un rayonnement omnidirectionnel ou une directivité ajustable, selon leur configuration. Leur robustesse mécanique et leur capacité à s'intégrer dans des environnements contraignants (aérospatial, militaire, médical) en font un choix privilégié pour les systèmes exigeants. Les différents types d'antennes cylindriques – fentes, monopoles, dipôles et réflecteurs – offrent des performances adaptées à des besoins spécifiques, leurs avantages en termes de fiabilité et de performance en font des composants clés dans les technologies modernes.

Chapitre 2 :

Modélisation de

l'antenne cylindrique

Chapitre 2 : Modélisation de l'antenne cylindrique

2.1 Introduction

La modélisation d'antenne est une étape fondamentale en électromagnétisme pour comprendre son comportement en termes de rayonnement, d'impédance d'entrée et de distribution de courant. L'équation intégrale de *Hallén* est un outil mathématique essentiel pour analyser cette antenne. Cette équation, dérivée des équations de *Maxwell*, décrit la distribution du courant le long de l'antenne, en tenant compte des conditions aux limites et des effets de rayonnement. Sa solution analytique précise reste complexe, voire impossible dans la plupart des cas pratiques. C'est là qu'intervient la modélisation numérique comme la méthode des moments (MoM) pour résoudre cette équation. Cette technique transforme l'équation intégrale en un système matriciel linéaire en divisant l'antenne en parties et en utilisant des fonctions de base pour approximer la distribution du courant.

2.2 Modélisation mathématique de l'antenne cylindrique

La modélisation mathématique des antennes cylindriques repose sur les équations fondamentales de l'électromagnétisme, notamment les équations de *Maxwell* qui décrivent la propagation des champs électriques et magnétiques dans l'espace. Ces équations sont souvent formulées en coordonnées cylindriques afin d'exploiter la symétrie de la structure. Les solutions de ces équations permettent de déterminer la distribution des courants sur la surface de l'antenne, ainsi que les caractéristiques de rayonnement, comme le diagramme de rayonnement et l'impédance d'entrée. Cependant, la complexité des équations nécessite souvent des approximations pour rendre les calculs réalisables. (Harrington, (2001))

2.2.1 Équation de *Hallén* pour une antenne cylindrique

L'équation de *Hallén* est l'équation principale pour la modélisation des antennes cylindriques. Elle permet la représentation du potentiel du champ magnétique dans un milieu homogène par l'équation de *Helmholtz* et l'équation d'intégration du courant, qui relie les courants de surface aux champs de rayonnement. Ces équations sont écrites en tenant compte des conditions aux limites de la géométrie cylindrique.

A- Potentiel vecteur magnétique

L'équation de *Maxwell-Ampère* dans le domaine fréquentiel, en régime sinusoïdal, s'écrit :

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.1)$$

Sachant que $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$ et $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$, l'équation de *Maxwell-Ampère* devient :

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.2)$$

Nous choisissons la jauge de *Lorenz* :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = -j\omega\epsilon\mu\Phi \quad (2.3)$$

Alors l'équation pour le potentiel vecteur \vec{A} devient :

$$\vec{\nabla}^2 \vec{A} - k^2 = -\vec{J}\mu \quad (2.4)$$

k^2 : nombre d'onde ($k^2 = \omega^2\mu\epsilon$)

C'est l'équation de *Helmholtz* vectorielle relative à \vec{A} .

L'équation de *Helmholtz* a une solution intégrale utilisant la fonction de *Green* :

$$A(r) = \mu \int_V \frac{J(r') e^{-jk|r-r'|}}{4\pi |r-r'|} dV' \quad (2.5)$$

Si le courant est confiné dans une surface S (courant surfacique J_ϕ) l'intégrale devient :

$$A_\phi(r) = \mu \int_S \frac{J_\phi(r') e^{-jk|r-r'|}}{4\pi |r-r'|} dS' \quad (2.6)$$

Lorsque A représente la distribuer un courant électrique sur une surface cylindrique de rayon a et longueur L avec :

- Coordonnées cylindriques (a, ϕ, z)
- Une densité de courant surfacique J_ϕ située sur la surface $r = a$

L'élément de surface sur le cylindre est donné par : $dS' = ad\phi' dz'$

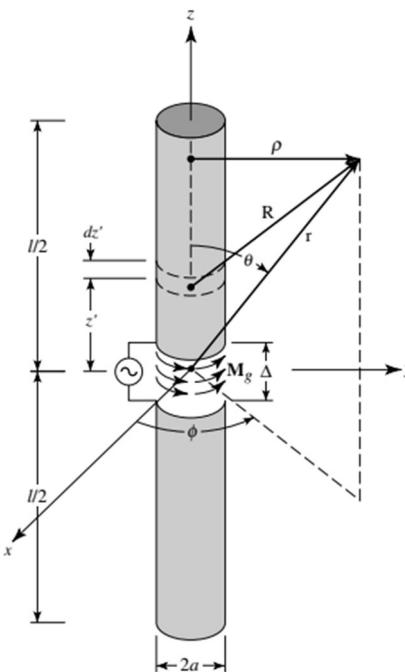


Figure 2-1: modélisation de l'antenne cylindrique

L'élément de surface sur le cylindre est donné par : $dS' = ad\phi' dz'$

L'intégration sur la surface cylindrique se fait sous la forme d'une intégrale double :

$$A_\phi(a, \phi, z) = \mu \int_S \frac{J_\phi(r') e^{-jkR}}{4\pi R} dS' \quad (2.7)$$

où $R = |r - r'|$ est la distance entre le point d'observation (a, ϕ, z) et le point source (a, ϕ, z) .

On obtient :

$$A_\phi(a, \phi, z) = \mu \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{J_\phi(a, \phi', z') e^{-jkR}}{4\pi} ad\phi' dz' \quad (2.8)$$

B- Relation avec le champ électrique

Dans une antenne cylindrique, la composante longitudinale du champ électrique E_z est reliée à la dérivée de A_ϕ par la relation :

$$E_z = -jk_\lambda A_\phi \quad (2.9)$$

k_λ La constante de propagation modifiée pour géométrie cylindrique, donnée par : $k_\lambda = k \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$

La relation avec le champ électrique s'écrit donc :

$$E_z = -j k \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} A_\phi \quad (2.10)$$

Nous avons précédemment l'équation (2.8) :

En multipliant cette expression par $-jk_\lambda$, on obtient :

$$E_z(a, \phi, z) = -jk_\lambda \mu \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{J_\phi(a, \phi', z') e^{-jkR}}{4\pi R} ad\phi' dz' \quad (2.11)$$

On remplace k_λ par $k \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$ dans l'équation pour obtenir :

$$E_z(a, \phi, z) = -jk \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \mu \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{J_\phi(a, \phi', z') e^{-jkR}}{4\pi R} ad\phi' dz' \quad (2.12)$$

C- Condition sur le champ induit

L'expression (2.12) montre que E_z est une intégrale pondérée de la densité de courant sur la surface du cylindre. Dans de nombreux cas d'analyse électromagnétique, une solution particulière peut être représentée par une combinaison de fonctions trigonométriques satisfaisant l'équation d'onde :

$$\Delta^2 E_z + k^2 E_z = 0 \quad (2.13)$$

Une solution typique pour une onde guidée dans un cylindre est une combinaison de sinus et cosinus :

$$E_z(z) = B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(|kz|) \quad (2.14)$$

où B_1 et C_1 sont des constantes déterminées par les conditions aux limites et la distribution du courant.

Le terme $k_\lambda = k \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}$ apparaît naturellement dans la relation entre le potentiel vecteur A_ϕ et le champ électrique E_z .

En insérant cette relation dans la solution trigonométrique :

$$E_z(a, \phi, z) = -jk \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(|kz|)] \quad (2.15)$$

L'équation finale de *Hallén* pour une antenne cylindrique creuse est :

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} J_\phi(z', \phi') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' dz' = -jk \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(|kz|)] \quad (2.16)$$

2.3 Méthodes numériques de résolution de l'équation de *Hallén*

La modélisation numérique des antennes est une approche de calcul qui consiste à simuler le comportement électromagnétique d'une antenne en résolvant numériquement les équations de *Maxwell* ou leurs formulations dérivées (équations intégrales, équations différentielles). Elle permet de prédire les caractéristiques de rayonnement, l'impédance d'entrée, le diagramme de rayonnement, la directivité et autres paramètres essentiels sans recourir systématiquement à des prototypes physiques. (Balanis , 2016)

2.3.1 Méthode des différences finies dans le domaine Temporel (FDTD)

La méthode FDTD est une technique numérique qui résout les équations de *Maxwell* directement dans le domaine temporel en divisant les dérivées spatiales et temporelles à l'aide de différences finies centrales. Elle calcule de manière répétée l'évolution des champ électrique (\vec{E}) et magnétique (\vec{H}) sur une grille spatiale, permettant de simuler la propagation des ondes électromagnétiques dans des structures complexes. (Taflove & Hagness , (2005))

2.3.2 Méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis (FEM) est une technique numérique qui approxime la solution des équations aux dérivées partielles (EDP) en partitionnant le domaine en sous-domaines plus simples (éléments finis) puis en construisant des fonctions de base polynomiales pour représenter la solution sur chaque élément. Elle est particulièrement adaptée aux problèmes de géométrie complexes et aux conditions aux limites diverses. (Zienkiewicz & Taylor , (2013)).

2.3.3 Méthode des moments (MoM)

La méthode des moments (MoM) est une technique numérique en électromagnétisme qui résout les équations intégrales de champ en divisant les courants sur la structure de l'antenne à l'aide de fonctions de base, puis en projetant le problème sur un ensemble de fonctions de test pour former un système linéaire pouvant être résolu. (Peterson, (2021))

2.4 Principe de la méthode des moments appliquée à une antenne cylindrique

Une antenne cylindrique est un conducteur de rayon a de longueur L , L'objectif est de déterminer le courant induit sur la surface de cette antenne lorsqu'elle est excitée par une source.

2.4.1 Formulation du problème : Équation Intégrale de *Hallén*

L'antenne cylindrique creuse est modélisée comme une surface conductrice et le champ électromagnétique est gouverné par les équations de *Maxwell*. On aboutit à une équation intégrale de la forme :

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') I(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' = V_{inc}(\mathbf{r}) \quad (2.17)$$

$I(\mathbf{r}')$: courant inconnu sur la surface de l'antenne.

$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$: fonction de *Green* qui décrit la propagation d'onde sphérique.

$V_{inc}(\mathbf{r})$: tension d'excitation appliquée à l'antenne.

2.4.2 Discréétisation de l'équation intégrale

La méthode des moments consiste à approximer le courant inconnu $I(\mathbf{r}')$ par une combinaison de fonctions de base :

$$I(\mathbf{r}') \approx \sum_{n=1}^N I_n f_n(r) \quad (2.18)$$

$f_n(r)$ Sont des fonctions de base choisies pour approximer le courant (ex. fonctions en escalier ou sinusoïdales),

I_n : coefficients inconnus à déterminer.

2.4.3 Application de la technique de pondération

Pour transformer l'équation intégrale en un système d'équations algébriques, on applique une technique de pondération (produit scalaire avec des fonctions tests $g_m(r)$)

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} g_m(r) \left[\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} G(r, r') I(r') dr' - V_{inc}(r) \right] dr = 0 \quad (2.19)$$

En prenant un nombre fini de fonctions tests $g_m(r)$ (souvent identiques aux fonctions de base $f_n(r)$ pour la méthode de *Galerkin*), on obtient un système linéaire sous forme matricielle :

$$[Z] \cdot [I] = [V] \quad (2.20)$$

- $[Z]$: matrice d'impédance formée à partir de la fonction de *Green*,
- $[I]$: vecteur des courants à déterminer I_n ,
- $[V]$: vecteur des tensions appliquées.

2.4.4 Résolution numérique

Le système linéaire $Z \cdot I = V$ est résolu numériquement par des méthodes comme la décomposition donnant les valeurs des coefficients I_n . Le courant $I(r')$ est ensuite reconstruit à partir de ces coefficients.

2.5 Détermination des paramètres de l'antenne

Une fois le courant trouvé, on peut en déduire :

- L'impédance d'entrée de l'antenne,
- Le diagramme de rayonnement,
- L'efficacité du rayonnement,
- La bande passante.

2.6 Application de la méthode des moments

2.6.1 Formulation de l'équation intégrale

L'équation intégrale est similaire à celle d'une antenne cylindrique pleine, mais avec une prise en compte spécifique du champ à l'intérieur et autour du cylindre.

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} J_\phi(z', \phi') G(z, z' ; \phi, \phi') d\phi' dz' = V(z, \phi) \quad (2.21)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} J_\phi(z', \phi') G(z, z' ; \phi, \phi') = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} J_\phi(z', \phi') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' dz' \quad (2.22)$$

$$V(z, \phi) = -jk \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(|kz|)] \quad (2.23)$$

2.6.2 Discréétisation avec des fonctions de base sinusoïdales

On approxime le courant sous la forme :

$$J_\phi(z', \phi') = \sum_{n=1}^N I_n \sin(k_n z') \quad (2.24)$$

Où

I_n Sont les coefficients inconnus et $\sin(k_n z')$ des fonctions de base adaptées à la symétrie du problème.

Avec les points de discréétisation :

$$z_n = -\frac{L}{2} + \frac{(N-1)L}{N} \quad N = 1, 2, \dots n \quad (2.25)$$

N : nombre de segments utilisés pour la discréétisation.

L : longueur totale de l'antenne.

On remplace (2.23) dans (2.20)

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \sum_{n=1}^N I_n \sin(k_n z') G(z, z' ; \phi, \phi') d\phi' dz' = V(z, \phi) \quad (2.26)$$

$$\sum_{n=1}^N I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \sin(k_n z') G(z, z' ; \phi, \phi') d\phi' dz' = V(z, \phi) \quad (2.27)$$

2.6.3 Application de la méthode de *Galerkin*

On multiplie par une fonction test $g_m = \sin(k_m z)$ (souvent prise égale à la fonction de base, ceci est la méthode de *Galerkin*) et on intègre sur le domaine pour obtenir un système linéaire :

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \sin(k_m z) \left[\sum_{n=1}^N I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \sin(k_n z') G(z, z' ; \phi, \phi') d\phi' dz' \right] = V(z, \phi) \quad (2.28)$$

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \sin(k_m z) \sum_{n=1}^N I_n \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \sin(k_n z') G(z, z' ; \phi, \phi') d\phi' dz' dz = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \sin(k_m z) V(z, \phi) \quad (2.29)$$

2.6.4 Mise sous forme matricielle

On obtient un système linéaire de la forme (2.20) : $[Z]. [I] = [V]$.

Où :

- Z : matrice d'impédances formée à partir de la fonction de *Green*,

$$[Z] = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \sin(k_m z) \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \sin(k_n z') G(z, z' ; \phi, \phi') d\phi' dz' dz \quad (2.30)$$

- $[I]$: vecteur I_n des courants à déterminer,
- $[V]$: vecteur des tensions appliquées.

$$[V] = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \sin(k_m z) V(z, \phi) \quad (2.31)$$

Pour déterminer I_n :

$$[Z_{mn}]. [I_n] = [V_m] \quad (2.32)$$

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{1,n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

On résout l'équation matricielle suivante :

$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} \cdot [V_m] \quad (2.34)$$

2.7 Conclusion

Ce chapitre aborde la modélisation mathématique de l'antenne cylindrique. A partir de la théorie de champ de *Maxwell* et l'introduction de la notion de potentiel vecteur, une équation intégrale, dite de *Hallén*, est déduite. Sa résolution donne la distribution du courant le long de l'antenne. La méthode utilisée pour sa résolution est dite « méthode des moments (MoM) ». Cette technique numérique permet de transformer l'équation intégrale de *Hallén* en un système d'équations algébriques linéaires qu'il convient de résoudre par une méthode numérique de *Gauss-Seidel*.

Le chapitre suivant sera l'objet de simulations numériques sous Matlab et en utilisant l'outil Antenna Designer de Matlab.

Chapitre 3 :

Simulation de

l'antenne cylindrique

Chapitre 3 : Simulation de l'antenne cylindrique

3.1 Introduction

Les logiciels de simulation d'antennes constituent des outils indispensables pour la conception et l'optimisation des systèmes de communication modernes. Ces programmes spécialisés, tels que HFSS, CST Studio Suite et Matlab (Antenna Designer), permettent de modéliser avec précision le comportement électromagnétique des antennes avant leur fabrication physique. En s'appuyant sur des méthodes numériques avancées comme la méthode des éléments finis (FEM) ou la méthode des moments (MoM), ces logiciels offrent des fonctionnalités complètes d'analyse des diagrammes de rayonnement, des paramètres S et de la distribution du champ électromagnétique. Ils facilitent ainsi l'optimisation des performances tout en réduisant considérablement les coûts et les délais de développement.

3.2 Présentation de Antenna Designer de Matlab

MATLAB Antenna Designer est un outil spécialisé de la boîte à outils d'antennes, intégré à la plateforme MATLAB, qui permet une conception, une modélisation et une analyse précises des antennes. Cet environnement complet offre une interface graphique intuitive pour la conception de structures d'antennes, y compris de géométries complexes comme les antennes cylindriques. Il utilise des algorithmes avancés de méthode des moments (MoM) pour réaliser des simulations électromagnétiques précises. Il permet également l'analyse de paramètres clés tels que les diagrammes de rayonnement, l'impédance et la matrice S, tout en offrant des capacités d'optimisation paramétrique. (Matlab , 2023)

3.3 Fonctionnement de Antenna Designer Tool de Matlab

Le processus d'utilisation de cet outil suit plusieurs étapes principales.

3.3.1 Modélisation géométrique de l'antenne

La première étape consiste à créer un modèle 3D de l'antenne à l'aide de fonctions prédéfinies ou en important des modèles personnalisés. Sa géométrie peut être modifiée grâce à des paramètres tels que la longueur, le rayon ou la forme du connecteur.

3.3.2 Simulation Électromagnétique

La boîte à outils utilise principalement la méthode des moments (MoM) pour résoudre les équations de *Maxwell* et calculer les paramètres suivants :

- L'impédance d'entrée ;
- Le diagramme de rayonnement ;
- Le paramètre S ;
- La distribution de courant sur l'antenne.

3.3.3 Analyse et visualisation

Les résultats sont affichés sous forme de graphiques :

- Courbes d'impédance en fonction de la fréquence ;
- Diagrammes de rayonnement 2D/3D.

3.4 Organigramme d'application de la méthode des moments (MoM)

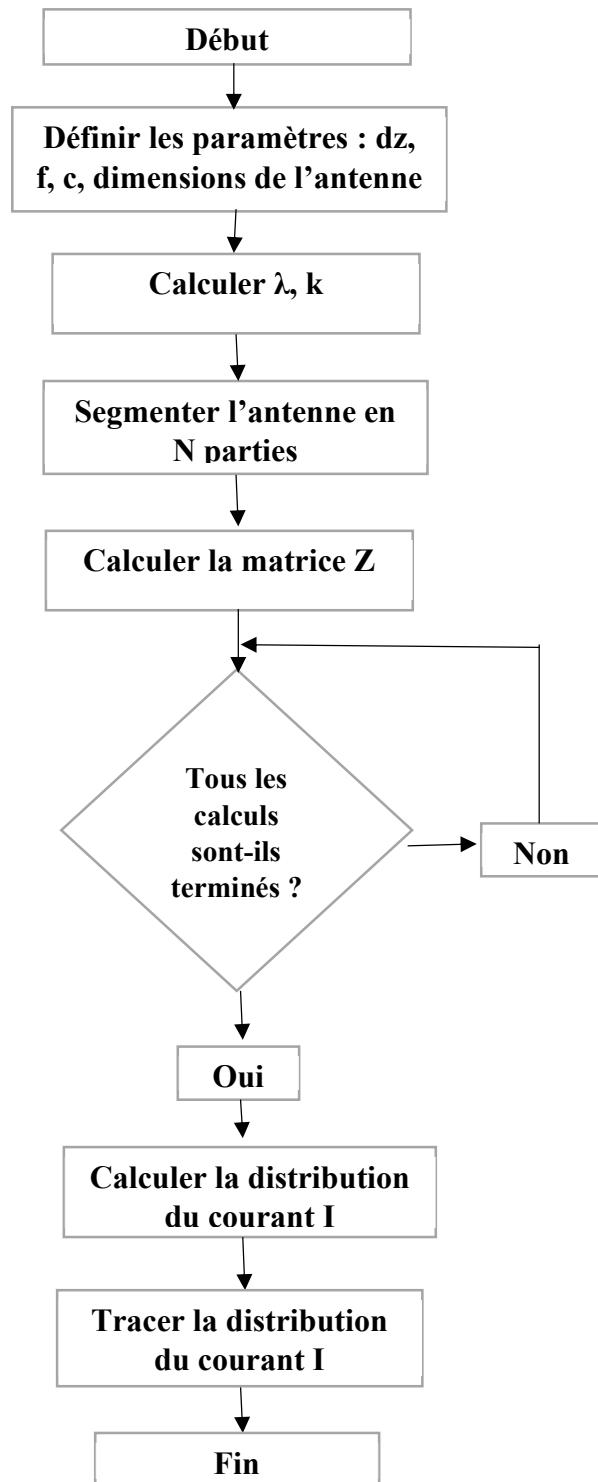


Figure 3-1 : Organigramme d'application de la méthode des moments

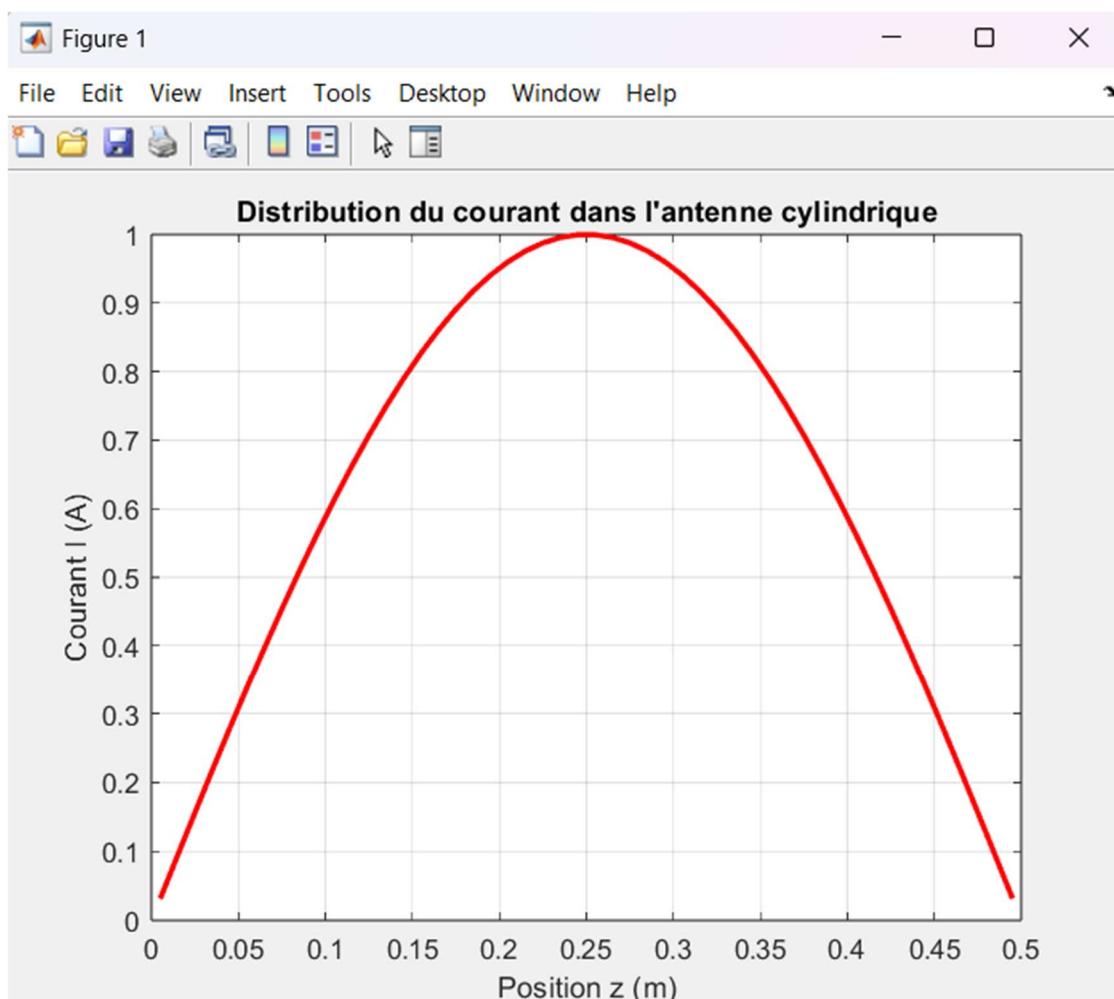


Figure 0-2: Distribution de courant I d'une antenne cylindrique

a. Interprétation

La figure représente la distribution du courant dans une antenne cylindrique le long de l'antenne. L'axe des y représente le courant en ampères (A), avec des valeurs allant de 0 à 1 A, tandis que l'axe des x indique la position longitudinale z sur l'antenne. La courbe du courant indique une distribution symétrique, où le courant est à son maximum au centre (milieu de l'antenne) et à son minimum aux extrémités.

3.5 Simulation de l'antenne cylindrique

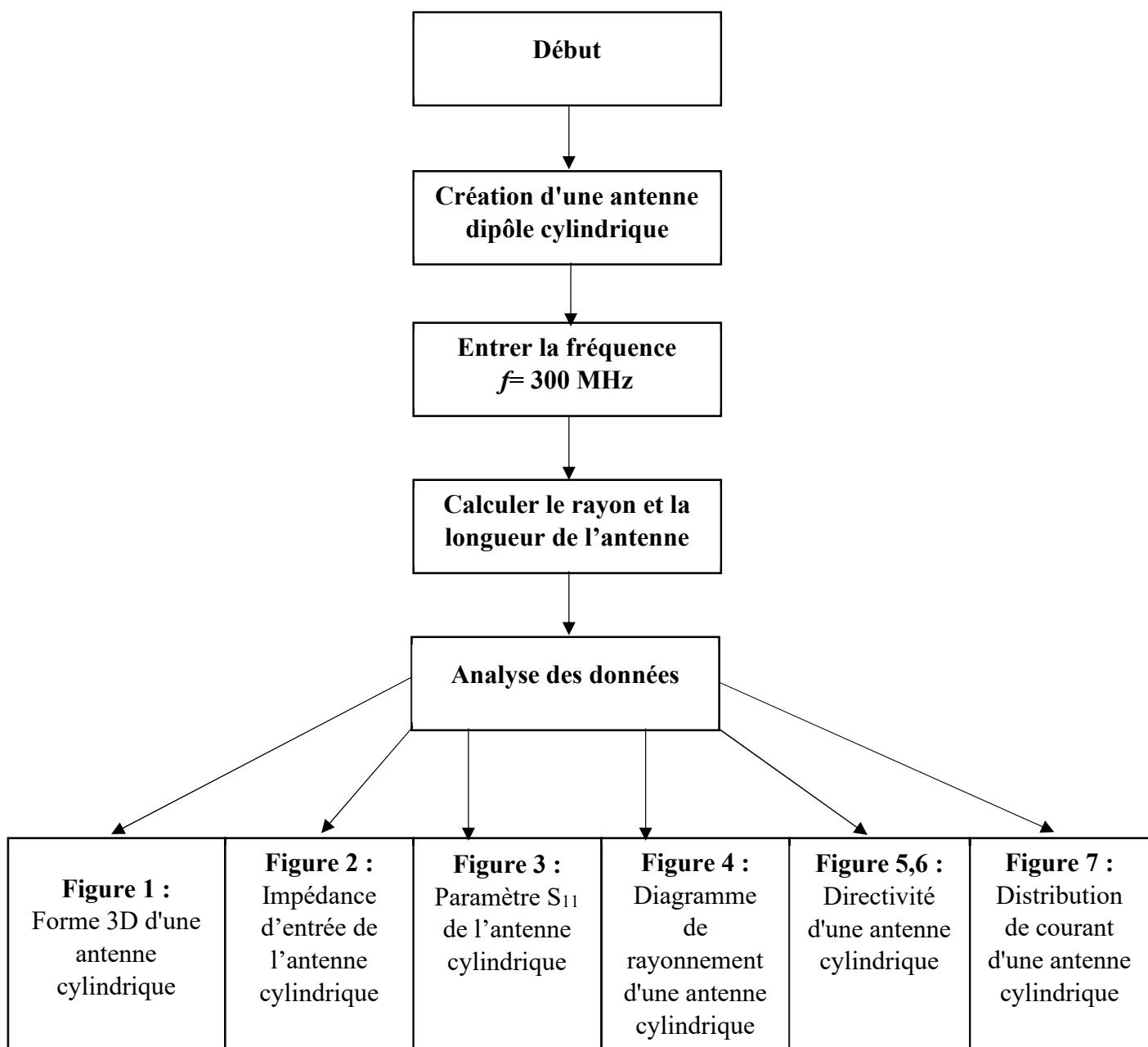


Figure 3-3: Organigramme général de simulation

3.5.1 Forme 3D d'une antenne cylindrique

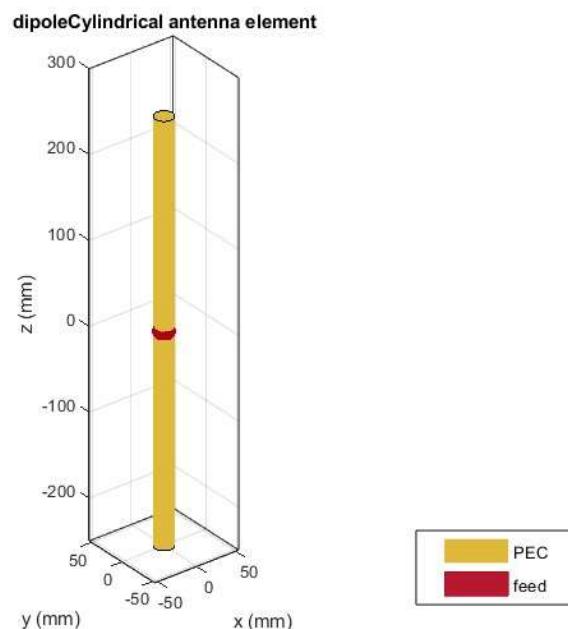


Figure 0-4: Forme 3D d'une antenne cylindrique

a. Interprétation

La figure présente une analyse bidimensionnelle d'une antenne cylindrique simulée numériquement. Elle illustre la distribution spatiale du coefficient électromagnétique autour de l'antenne. Le graphique utilise un système de coordonnées cartésiennes, où les axes x et y sont exprimés en millimètres, formant un plan de symétrie caractéristique des antennes dipôles. Les valeurs numériques indiquées, comprises entre -200 et +300 unités, représentent l'amplitude du champ, les maxima positifs (300) et les minima négatifs (-200) représentant les zones de fort rayonnement. Le paramètre PEC (conducteur électrique parfait) indique une modélisation idéale de la source.

b. Avantages de cette étude

- Montre les interactions électromagnétiques locales
- Identifie les zones de fort couplage
- Aide à prévenir les interférences

3.5.2 Impédance d'entrée de l'antenne cylindrique

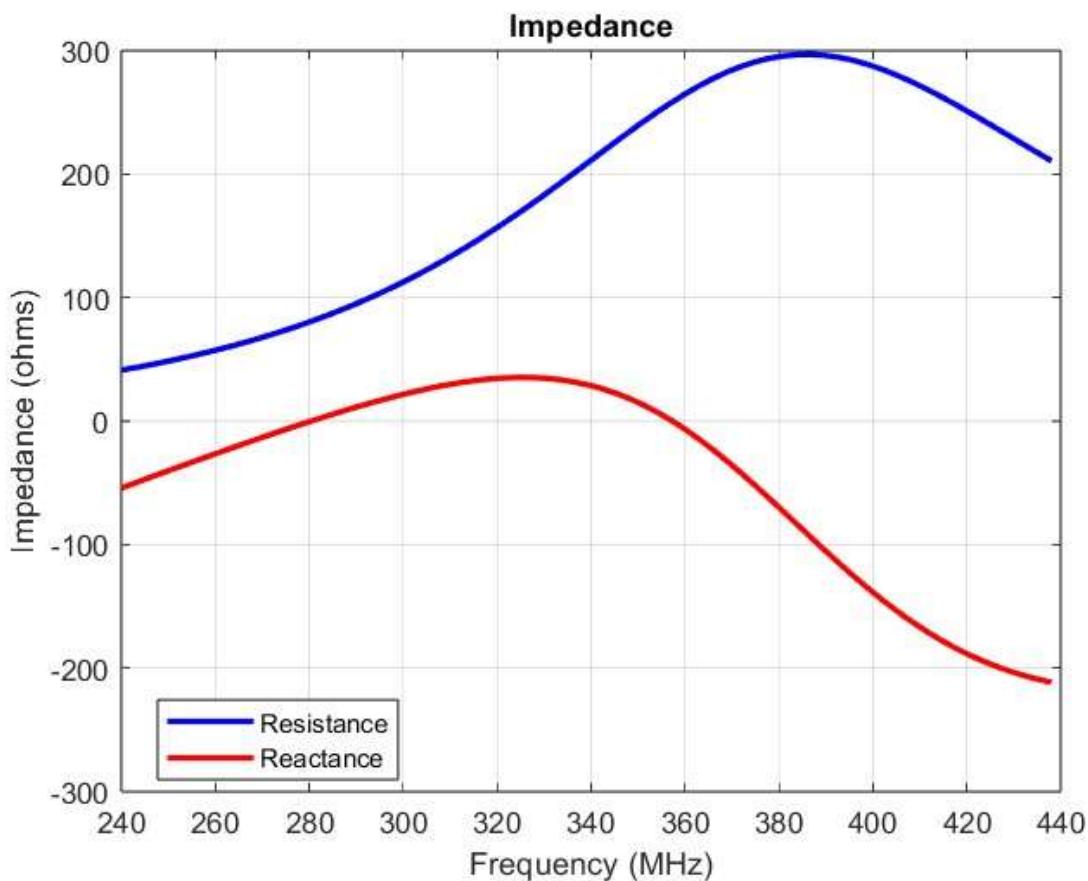


Figure 3-5: Impédance d'entrée de l'antenne cylindrique

a. Interprétation

La figure présente l'analyse de l'impédance d'une antenne, exprimée en ohms, avec des valeurs variantes entre 240 et 440 ohms. L'impédance est décomposée en deux composantes principales : la résistance (partie réelle, liée aux pertes et au rayonnement) et la réactance (partie imaginaire, associée au stockage d'énergie dans les champs électrique et magnétique). Cette représentation est essentielle pour évaluer les performances de l'antenne, notamment son adaptation d'impédance. Une bonne adaptation, généralement autour de 50 ou 75 ohms pour les systèmes standards, minimise les réflexions et maximise le transfert de puissance.

b. Avantages de cette étude

- Révélé les propriétés électriques fondamentales
- Permet d'évaluer l'adaptation d'impédance et les pertes
- Indique la nécessité éventuelle de circuits d'adaptation

3.5.3 Paramètre S_{11} de l'antenne cylindrique

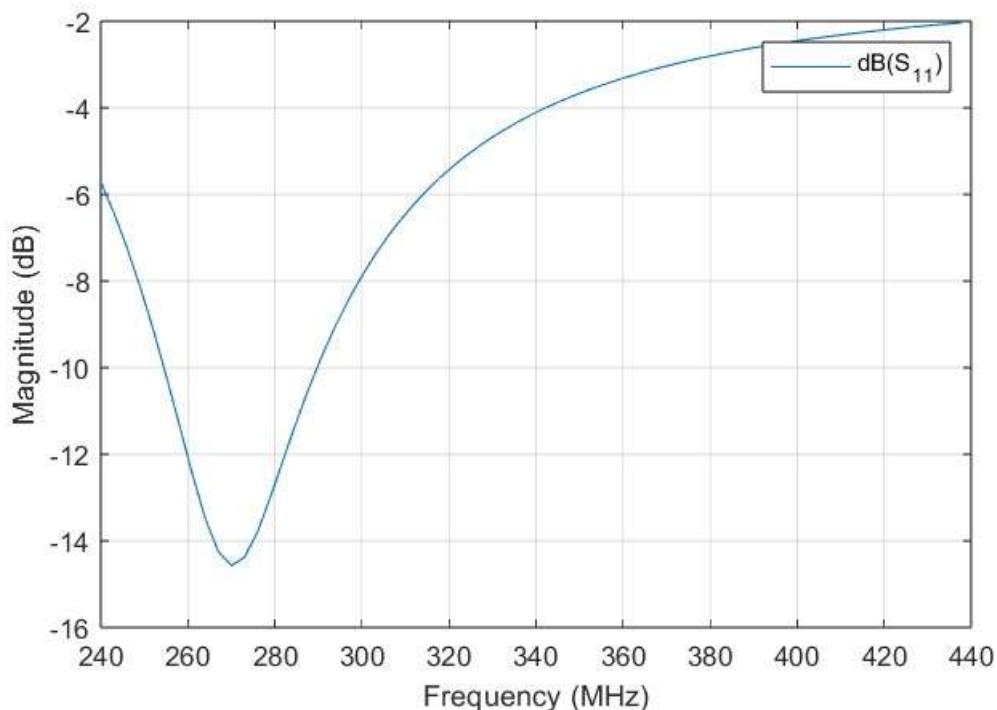


Figure 0-6: Paramètre S_{11} de l'antenne cylindrique

a. Interprétation

Cette figure présente une analyse fréquentielle du paramètre de réflexion (S_{11}) d'une antenne, exprimé en décibels (dB) sur une échelle allant de -2 dB à -16 dB, en fonction de la fréquence en MHz. Ce type de graphique est essentiel pour évaluer les performances d'une antenne, notamment son adaptation d'impédance et sa bande passante. Les valeurs négatives du S_{11} indiquent la quantité de puissance réfléchie vers la source : plus la valeur est faible (proche de -16 dB dans ce cas), meilleure est l'adaptation de l'antenne. Une valeur de -10 dB correspond généralement à un critère standard, indiquant que 90% de la puissance est transmise à l'antenne. La plage de fréquences où le S_{11} reste en dessous de ce seuil définit la bande passante opérationnelle de l'antenne. La visualisation claire de ces paramètres facilite les ajustements de conception et garantit une intégration efficace dans les systèmes de communication.

b. Avantages de cette étude

- Déterminer la bande passante effective ;
- Déterminer la fréquence de résonance de l'antenne ;
- Déetecter les réflexions indésirables.

3.5.4 Diagramme de rayonnement d'une antenne cylindrique

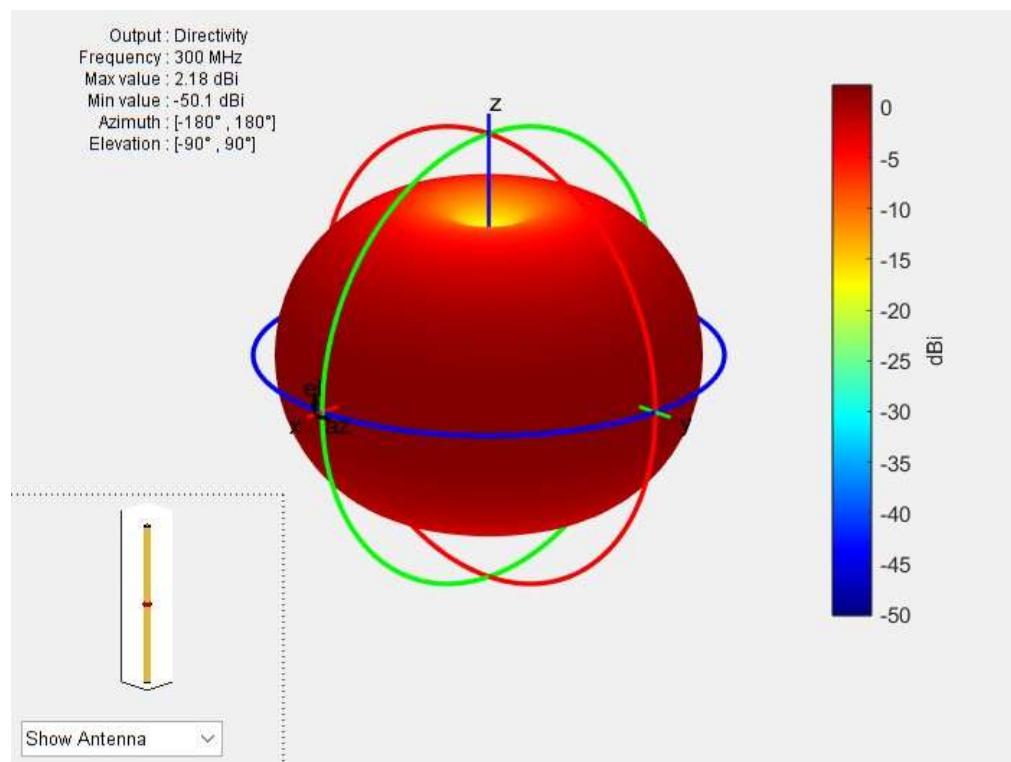


Figure 3 -7: Diagramme de rayonnement d'une antenne cylindrique

a. Interprétation

Cette figure illustre de manière exhaustive les caractéristiques de rayonnement d'une antenne cylindrique de 300 MHz, fournissant des données essentielles à son analyse et à son optimisation. Le diagramme de directivité, représenté en 3D, couvre toute la plage angulaire spatiale avec une grande précision : de -180° à $+180^\circ$ en azimut pour le plan horizontal, et de -90° à $+90^\circ$ en élévation pour le plan vertical. Les valeurs maximales de directivité, comprises entre 2,18 dB (maximum) et -50,1 dB (minimum), révèlent plusieurs aspects clés du comportement de l'antenne. Le pic à 2,18 dB correspond au lobe de rayonnement principal, tandis que les valeurs négatives indiquent des zones de rayonnement nul, où l'antenne est pratiquement insensible.

b. Avantages de cette étude

- Comparer les diagrammes dans différents plans ;
- Déetecter d'éventuelles asymétries de fabrication ;
- Déterminer les zones de couverture utile.

3.5.5 Directivités d'une antenne cylindrique

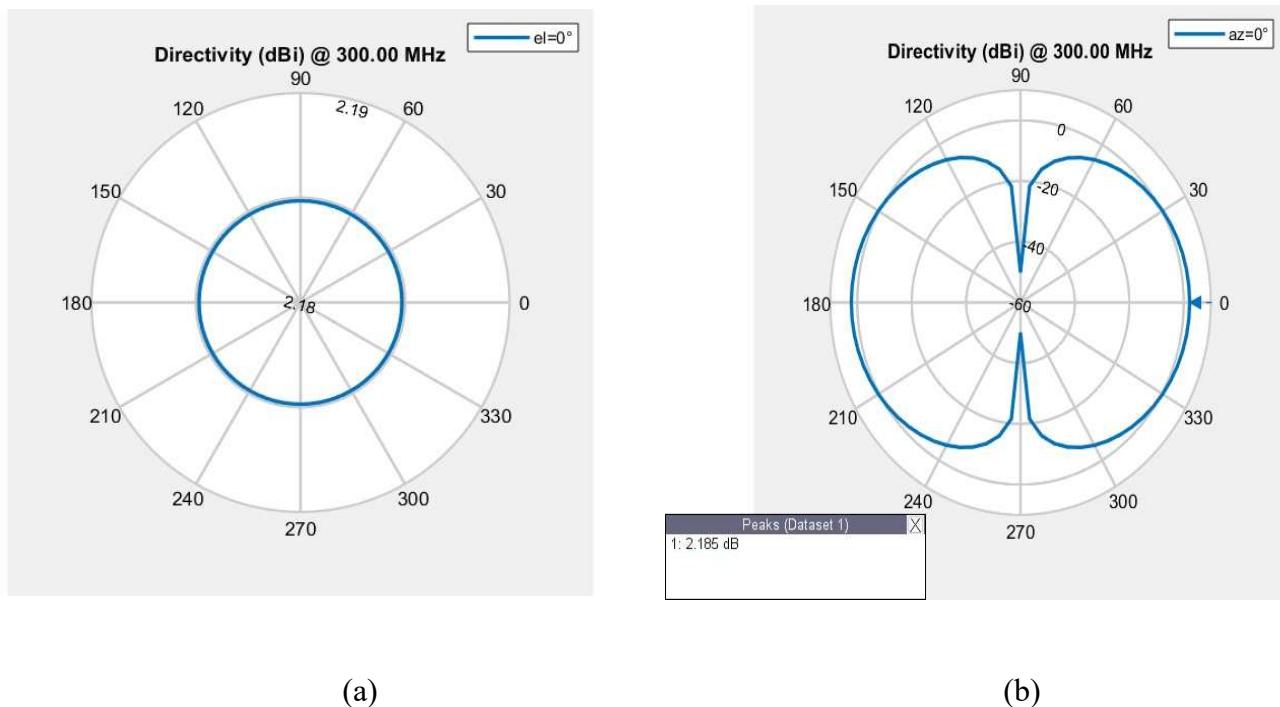


Figure 0-8: Directivités d'une antenne cylindrique

a. Interprétation

Ces deux figures complémentaires (a) et (b) offrent une caractérisation exhaustive des propriétés de rayonnement d'une antenne dipolaire cylindrique à 300 MHz. La première figure présente une visualisation 3D sphérique complète, couvrant l'ensemble des angles d'azimut (-180° à +180°) et d'élévation (-90° à +90°), révélant une plage de directivité extrême allant de 2.18 dB (lobe principal) à -50.1 dB (nuls profonds). Cette amplitude de 52.28 dB met en évidence le caractère fortement directionnel de certains lobes, tout en confirmant la symétrie axiale caractéristique des antennes cylindriques.

La seconde figure, un diagramme polaire 2D dans le plan horizontal, permet une analyse plus fine avec une résolution angulaire de 30°. Elle montre un pic principal à 2.185 dB (cohérent avec la mesure 3D) et des nuls à -20 dB.

b. Avantages de cette étude

- Illustrer la distribution spatiale du rayonnement ;
- Confirmer le caractère omnidirectionnel du rayonnement dans le plan horizontal ;
- Identifier les lobes secondaires et les nuls du rayonnement.

3.5.6 Distribution de courant d'une antenne cylindrique

Figure 0-9 détaille la distribution du courant de surface sur une antenne dipôle cylindrique, révélant des informations clés sur son fonctionnement électromagnétique.

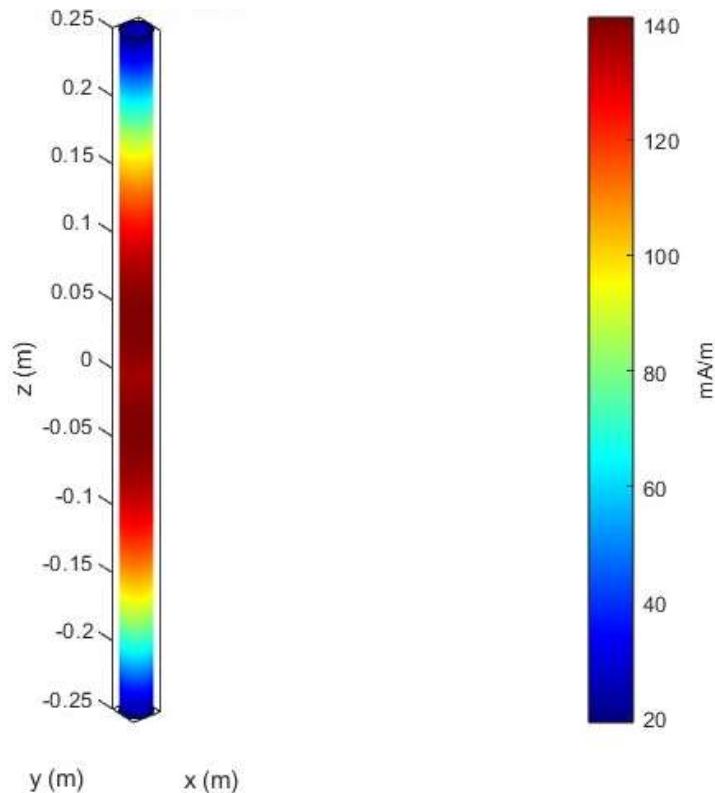


Figure 0-10: Distribution de courant d'une antenne cylindrique

a. Interprétation

La représentation tridimensionnelle montre clairement une distribution sinusoïdale, avec une intensité maximale de 140 mA/m au point d'alimentation central, qui diminue progressivement jusqu'à environ 20 mA/m en périphérie. Cette diminution progressive suit de près le modèle d'onde stationnaire théorique attendu pour ce type d'antenne, confirmant la conception. La symétrie axiale parfaite observée dans la distribution du courant est particulièrement remarquable et témoigne de la précision de fabrication de la structure cylindrique.

b. Avantages de cette étude

- Visualiser les zones actives de rayonnement ;
- Valider le modèle d'onde stationnaire ;
- Aider à optimiser la géométrie.

3.4 Conclusion

Ce chapitre montre la puissance des outils de simulation MATLAB et, particulièrement Antenna Designer, pour la conception et l'optimisation d'antennes dipolaires cylindriques. Les différentes analyses réalisées ont démontré la capacité de ces outils à modéliser avec précision le comportement électromagnétique de ces structures, depuis la distribution de courant jusqu'aux diagrammes de rayonnement.

Dans ce chapitre, des simulations, réalisées sous *MATLAB*, ont fourni pour une antenne cylindrique les résultats suivants :

- Distribution de courant à la surface de l'antenne ;
- Impédance d'entrée de l'antenne ;
- Paramètre S_{11} (ou coefficient de réflexion) de l'antenne ;
- Diagramme de rayonnement 3D de l'antenne
- Diagrammes de rayonnement 2D de l'antenne dans les plans E et H.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis l'étude de l'antenne cylindrique grâce à une double approche : modélisation théorique utilisant l'équation de *Hallén* et sa résolution via la technique dite « méthode des moments ». La simulation numérique est réalisée sous MATLAB et son outil dédié aux antennes « Antenna Designer ». La précision numérique de l'équation intégrale de *Hallén* nous a permis de comprendre la distribution du courant sur l'antenne, tandis que les simulations avec Antenna Designer nous ont permis d'étudier le comportement de l'antenne en générant des graphiques de ses différentes propriétés (diagramme de rayonnement, paramètres S, impédance d'entrée). Cette étude ouvre des perspectives intéressantes pour l'optimisation de ces antennes dans les systèmes 5G et MIMO, permettant l'intégration de la modélisation mathématique et des outils de simulation modernes.

Références

- Balanis , A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design (4th ed.)*. John Wiley & Sons, Inc.
- Bao , L. (2022). *Antenna Design for Navigation Systems*. Springer Nature.
- Burdic , S. (2021). *Military Antenna Systems Handbook (3rd ed)*. SciTech Publishing / IET.
- Ellingson , W. (2021). *Radio Astronomy Antennas: From Single Elements to Arrays* . Cambridge University Press.
- Hansen, E. (2022). *Measurement Antennas for Electromagnetic Compatibility* . Wiley-IEEE Press.
- Harrington. ((2001)). *Time-Harmonic Electromagnetic Fields* . Wiley-IEEE Press .
- Jin , M. (2014). *The Finite Element Method in Electromagnetics (3rd ed)*. Wiley-IEEE Press.
- Johnson , C. (2019). *Antenna Engineering Handbook (5th ed)*. McGraw-Hill Education.
- Matlab . (2023). Retrieved from Antenna Toolbox.
- Peterson, A. F. ((2021)). *Computational Methods for Electromagnetics* . Springer Nature.
- Stelzer, A. (2020). *Automotive Radar Sensors in Silicon Technologies*. Springer Nature.
- Taflove, A., & Hagness , S. ((2005)). *Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method (3rd ed.)* . Artech House.
- Volakis , L. (2007). *Antenna Engineering Handbook (4th ed)*. McGraw-Hill Education.
- Zhang , Y. (2023). *Advanced Antenna Systems for 5G and Beyond* . Springer Nature.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor , R. ((2013)). *The Finite Element Method : Its Basis and Fundamentals* . Butterworth-Heinemann (Elsevier).