

Université de Gafsa

Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de
Technologies de Gafsa



Projet de Fin d'Etudes

Présenté en vue de l'obtention de

**Licence en Technologie de L'information et de la
Communication**

**Etude et conception des nano-antennes de hautes
performances pour la collection de l'énergie solaire**

Présenté et soutenu par :

Saad Raja

Sous la Direction de :

Mm. AMARA Wided

Soutenu le ../06/2023

Devant le jury composé de :

Président :

Rapporter :

Membre de jury :

2022/2023

Table des matières

Chapitre 1	12
Etat de l'art sur les nano-antennes.....	12
1 Introduction.....	12
2 Les contextes	13
2.1 Le défi énergétique	13
3 Les Antennes.....	14
3.1 Définition de l'antenne	14
3.2 Antenne d'émission	15
3.3 Antenne de réception	15
3.4 Antenne réciproque.....	15
3.5 Onde électromagnétique	15
3.6 Caractéristiques de l'antenne.....	16
3.6.1 Le diagramme de rayonnement	16
3.6.2 La fonction caractéristique de rayonnement	17
3.6.3 La directivité	17
3.6.4 La densité de puissance	17
3.6.5 Le gain.....	17
3.6.6 Angle d'ouverture	18
3.7 Types d'antenne.....	18
3.7.1 Antenne dipôle	18
3.7.2 Antenne dipôle demi-onde	18
3.7.3 Dipôle magnétique ou antenne boucle	19
3.7.4 Antenne monopôle	19
3.7.5 Antenne planaire	19
4 La collection de l'énergie solaire	20

5	Les collecteurs électromagnétiques solaires à nano-antennes : une alternative prometteuse.	21
6	Les nano-antennes solaires.....	22
6.1	Les limites de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	22
6.2	Les propriétés physiques des nano-antennes	23
7	Exemples des designs des nano-antennes solaires (optiques).....	24
7.1	1. Exigences de conception	24
7.2	2.Exemple d'antennes optiques connues	25
8	Avantages et défis des nano-antennes.....	28
9	Problématique	29
10	Conclusion.....	30
Chapitre 2 : Conception et optimisation de Nano-antennes pour la collection de l'énergie solaire		31
1	Introduction.....	31
2	Méthodologie de conception d'antenne	31
2.1	Logiciel de simulation utilisé : CST Microwave Studio :	31
2.2	Méthodologie de conception d'antenne	32
2.3	Choix de matériel.....	33
2.4	Plage de fréquence et type d'excitation	34
3	Conception des nano-antennes dipôles	35
3.1	Nano-antenne dipôle rectangulaire	35
3.2	Nano-antenne bowtie courbé (à forme exponentielle).....	36
3.3	Nano-antenne dipôle elliptique.....	37
4	Optimisation et étude paramétrique des nano-antennes conçues.....	38
4.1	Etude de l'effet des paramètres géométriques des nano-antennes	39
4.1.1	Effet de la longueur de nano-antennes	39
4.1.2	Effet de la largeur de nano-antennes	40
4.1.3	Effet de la taille de la fente.....	41

4.1.4	Effet de l'épaisseur du dipôle	42
4.1.5	Effet de l'épaisseur du substrat	43
4.1.6	Effet de l'épaisseur du plan de masse	44
4.2	Etude de l'effet de l'angle de polarisation	46
5	Dipole rectangulaire	48
6	Conclusion	49
Chapitre 3 : Effet des propriétés des matériaux sur les performances des nano-antennes infrarouges pour la collecte d'énergie solaire		50
1	Introduction	50
2	Les propriétés des conducteurs dans la bande de fréquence terahertz	51
3	Conception des nano-antennes optimisées	53
3.1	Configuration	53
3.2	Conception des nano-antennes	53
4	Effet du conducteur sur le champ capturé	55
4.1	Propriétés des métaux à des fréquences infrarouges	55
4.2	Effet des différents conducteurs sur la distribution des champs capturés	57
4.2.1	Effet d'un seul type de conducteur pour les deux armatures de nano-antennes	57
4.2.2	Effet de deux types de conducteurs combinés pour les deux armatures de nano-antennes	59
5	Effet du type de substrat sur le champ capturé	61
6	Comparaison entre les trois types de nano-antennes	64
7	Conclusion	65

Table des figures

Figure 1 : Onde électromagnétique.	16
Figure 2 : Propagation d'onde électromagnétique transversale.	16
Figure 3 : Diagrammes de rayonnement	17
Figure 4 : Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.	18
Figure 5 : Répartition du courant le long d'un dipôle.	18
Figure 6 : Antenne Dipôle	19
Figure 7 : Exemples des antennes patch rectangulaire.....	19
Figure 8: Nano-antennes infrarouges fabriquées : (a) nano-antenne dipolaire, (b) nano-antenne nœud papillon, (c) nano-antenne log-périodique et (d) nano-antenne en spirale.....	26
Figure 9 : Principaux types de nano-antennes plasmoniques [31]	26
Figure 10 : Antennes optiques. (a) antenne log-périodique, (b) antenne en spirale carrée et (c) antenne en spirale d'Archimède [32].	27
Figure 11 : Nano-antenne Yagi-Uda entièrement diélectrique, composé du réflecteur (sphère 1 à gauche) et de quatre directeurs (sphères 2-5) [33].	28
Figure 12 : Méthodologie de conception d'une antenne.....	32
Figure 13: Variation de la partie réelle et imaginaire de la permittivité de l'or.	34
Figure 14 : Vue 3D de l'antenne optique dipôle avec une fente entre les deux pôles	35
Figure 15 : Antenne bowtie modifiée proposée	37
Figure 16 : Antenne dipôle elliptique proposée	38
Figure 17 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour différentes longueurs des structures conçues : (a) : dipôle rectangulaire, (b) : bowtie, (c) : dipôle elliptique.....	40
Figure 18 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour différentes largeurs des structures conçues : (a) : dipôle rectangulaire, (b) : bowtie, (c) : dipôle elliptique.	41
Figure 19 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs du gap : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie (c) antenne elliptique.....	42

Figure 20: Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs de l'épaisseur du dipôle en or : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie, (c) antenne elliptique	43
Figure 21: Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs d'épaisseur de substrat en quartz : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie, (c) antenne elliptique.	44
Figure 22 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs de l'épaisseur du plan de masse en or : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie, (c) antenne elliptique.	45
Figure 23 : Configuration des ondes planes incidentes pour les trois antennes proposées	47
Figure 24 : L'effet de la variation de l'angle de polarisation θ : (a) : dipôle rectangulaire, (d) : Bowtie et (c) : antenne elliptique.	48
Figure 25: La distribution de l'intensité électrique pour le nano-antenne(a) : dipôle rectangulaire, (b) : antenne bowtie à courbure, dipôle elliptique à la fréquence 28,3 THz	48
Figure 26: La variation des parties réelles et imaginaires de la permittivité pour différents métaux	52
Figure 27: Structure de nano-antennes optique dipôle proposée : (a) : rectangulaire, (b) : Bowtie, (c) : nano-antennes elliptiques en IR	54
Figure 28: Variation de la conductivité du métal en fonction de la bande de fréquence[0 ... 30THz]	57
Figure 29: L'effet du type de métal sur la variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour le dipôle : (a) rectangulaire, (b) : Bowtie à courbure et (c) elliptique.....	59
Figure 30: L'effet de deux types de métal sur la variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour le dipôle : (a) rectangulaire, (b) : Bowtie à courbure et (c) elliptique.....	60
Figure 31:Partie réelle et imaginaire de la permittivité relative des substrats étudiés	62
Figure 32:Effet du type de substrat sur la distribution du champ électrique pour les différentes structures étudiées	64
Figure 33: Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour le cas optimal de différentes formes d'antenne dipolaire.	65

Liste des tableaux

Tableau 1- représente les différentes dimensions de la structure 1 proposée :	36
Tableau 2- représente les différentes dimensions de la structure 2 proposée :	36
Tableau 3- représente les différentes dimensions de la structure 3 proposée :	38
Tableau 4- dimensions des structures optimisées	45
Tableau 5- Valeurs du champ maximal à la fréquence de résonance (28.3THz) pour différents angles de polarisation	48
Tableau 6- Les valeurs de la partie réelle et imaginaire de la permittivité à la fréquence 28,3 THz.....	52
Tableau 7- Partie réelle et imaginaire de la conductivité à 28,3 THz	57
Tableau 8- E-Max aux fréquences de résonance pour différents types de conducteurs.....	61
Tableau 9- E-Max aux fréquences de résonance pour trois types de substrat étudiés.	64

Dédicace

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chères : A celle qui m'a toujours appris comment réfléchir avant d'agir, à Celle qui m'a soutenu tout au long de ma vie scolaire, à Celle qui n'a jamais épargné un effort Pour mon bien, ma chère mère.

A celui qui m'a appris le vrai Sens de la vie, a celui qui n'a hésité aucun moment à m'encourager à celui qui est toujours à côté de moi mon cher père.

A mes proches de mon frère et mes sœurs , chacun à son nom ;

A toute ma famille grande et petite. Et bien sûr à tous mes amis les plus sincères.

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Je tiens à remercier mon encadreur Mm. WIDED AMARA d'avoir posé un sujet très intéressant et pour ses conseils, leur disponibilité et pour m'avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury :

Mr. , Mr. , Mr. pour l'intérêt porté sur mon travail.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'aidés dans ce travail de près ou de loin.

Introduction Générale

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication sans fil ont un rôle important dans notre société moderne, elles s'emploient dans différents domaines et sur le plan économique et social. Ce développement rapide est dû à des recherches et découvertes scientifiques pertinents et à long terme.

Les technologies d'identification font partie de ces nouvelles technologies de l'information et l'emploi des antennes est fondamental pour ces technologies d'identification. En fait, les premières antennes sont apparues à la fin du XIXe siècle où les recherches dans le domaine d'électromagnétisme ont connu une évolution et développement considérable.

Aujourd'hui, l'emploi des antennes est souligné pour répondre aux exigences des systèmes électroniques et aux demandes technologiques dans des domaines variés, l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable abondante qui peut fournir une alternative propre et durable aux combustibles fossiles pour répondre aux besoins en énergie de la société. Cependant, la conversion de l'énergie solaire en électricité efficace et rentable est un défi technologique majeur. Les cellules solaires traditionnelles sont limitées par l'absorption sélective de la lumière et la capacité de collecter les porteurs de charge. Les nano-antennes sont une technologie prometteuse pour améliorer la collecte de l'énergie solaire en exploitant les propriétés de résonance de plasmons de surface localisés à l'échelle nanométrique. Cette étude se concentre sur la conception et l'optimisation de nano antennes pour maximiser la collecte de l'énergie solaire en utilisant des matériaux à haut indice de réfraction et en exploitant les effets de couplage entre les nano antennes. L'objectif final est de développer des nano antennes de hautes performances pour améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité

Chapitre 1

Etat de l'art sur les nano-antennes

1 Introduction

Le monde a été témoin d'une demande croissante de sources d'énergie au cours des dernières décennies, où les combustibles fossiles sont la principale source d'énergie. Cette demande mondiale en énergie, ainsi que les effets environnementaux des sources d'énergie à base d'hydrocarbures, a conduit à un besoin important de sources alternatives d'énergie propre et renouvelable.

Les cellules solaires, qui permettent de collecter et de convertir l'énergie solaire en électricité, sont l'un des solutions possibles proposées [1].

L'énergie solaire, qui représente le flux d'énergie le plus important qui pénètre dans l'atmosphère, atteint la terre dans les régions visibles et infrarouges. Une partie de cette énergie est absorbée par les gaz atmosphériques et réémise à la surface de la terre dans les régions de l'infrarouge moyen et de l'infrarouge lointain.

Les autres parties de cette énergie sont absorbées par la surface ou les matières organiques et réirradiées [2]. La densité de puissance du rayonnement solaire qui atteint l'atmosphère terrestre est d'environ sur un large spectre. Ce spectre peut être classé dans trois bandes principales : rayonnement ultraviolet (UV) dont le contenu est inférieur à 9%, lumière visible avec une teneur d'environ 39% ; et les 52% restants consistant en infrarouge (IR) [3]. Tous les rayons solaires n'atteignent pas la terre, mais les rayons qui pénètrent dans l'atmosphère [ultraviolets (de 0,29 μm à 0,40 μm), visible (de 0,40 μm à 0,76 μm) et infrarouge (0,76 μm à 1 000 μm)] ont un contenu énergétique élevé.

Cette énergie est convertie en chaleur lorsqu'elle est absorbée par n'importe quel objet sur terre.

Cette énergie solaire représente une source d'énergie renouvelable utilisée par l'homme en exploitant les rayonnements solaires pour la production d'électricité.

Depuis la création de la première cellule photovoltaïque (PV) au début des années 50, le développement de la technologie photovoltaïque augmente rapidement. Toutefois, cette évolution ne peut pas toujours couvrir la demande du marché en panneaux solaires en raison de leur faible rendement.

Ainsi, l'industrie photovoltaïque aura besoin de technologies moins chères et plus efficaces pour répondre à ces exigences du marché de l'énergie solaire.

Des nano-antennes ont été suggérés pour remplacer les cellules solaires en incorporant un redresseur approprié dans l'espace d'alimentation de l'antenne formant une antenne redresseuse (recensa) en utilisant les ondes de la lumière, où elles présentent une efficacité supérieure (théoriquement 100%) par rapport aux cellules solaires actuelles [4].

2 Les contextes

Depuis la révolution industrielle, la demande mondiale en énergie a régulièrement augmenté à un rythme alarmant. Presque tous les secteurs d'activités anthropiques sont devenus fortement dépendants de l'utilisation de combustibles fossiles. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont actuellement les principales sources utilisées pour fournir l'énergie nécessaire aux activités humaines, représentant plus de 80% de l'approvisionnement total en énergie primaire [5]. Ces carburants sont des ressources finies et seront éventuellement épuisés. L'augmentation de la population mondiale impose une charge supplémentaire au système de production d'énergie dans le monde. Un changement majeur vers un approvisionnement en énergie plus durable est donc nécessaire. En outre, l'utilisation intensive des combustibles fossiles a suscité des inquiétudes quant à leur impact sur l'environnement et le climat.

2.1 Le défi énergétique

Le système énergétique mondial subit des pressions considérables et risque de ne pas répondre à la demande en énergie d'une population mondiale en croissance rapide et à urbanisation croissante. Avec une population mondiale estimée à 9 milliards et plus de 60% de la population vivant dans les villes d'ici 2040, il est évident que cette croissance aura des conséquences majeures sur la demande mondiale en énergie.

Selon un rapport sur les perspectives énergétiques mondiales publié par l'Agence internationale de l'énergie, la demande mondiale en énergie devrait augmenter de 37% d'ici 2040 [5]. L'approvisionnement total en énergie primaire a doublé entre 1971 et 2012, le pétrole demeurant le principal carburant, représentant actuellement une part de 40% de la consommation finale totale [5]. La demande croissante de pétrole dans les secteurs des transports et de la pétrochimie devrait faire passer la consommation de pétrole de 90 millions de barils par jour en 2013 à 104 millions de barils par jour en 2040 [5]. Cependant, les ressources en pétrole sont limitées et devraient diminuer de manière durable au cours des prochaines décennies [6].

Selon l'AIE dans les perspectives énergétiques mondiales 2014, l'électricité est la dernière forme la plus rapide d'énergie en croissance. En 2012, la production mondiale d'électricité a dépassé 20 000 TWh, soit une augmentation de 270% depuis 1971. On estime qu'il faut

environ 7 200 gigawatts de capacité pour combler l'écart entre la demande actuelle et prévue en électricité en 2040. Le vieillissement des centrales électriques constitue également un facteur supplémentaire à prendre en compte, car on estime que 40% des centrales actuelles seront fermées en 2040 [5].

Chaque année, de nombreuses conférences internationales sur l'environnement sont organisées pour débattre des problèmes liés à la limitation de l'impact du mode de vie moderne sur l'environnement. Certains de ces sommets ont conduit à la conclusion d'accords internationaux qui engagent leurs participants à agir dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Le « paquet climat et énergie 2020 » de l'Union européenne est un exemple de cette initiative. Compte tenu de la gravité de la situation, l'Union européenne a pris le défi énergétique au sérieux. À la suite des accords conclus lors du Conseil européen de 2007, les dirigeants de l'UE ont défini une série d'objectifs dans le cadre de la directive sur les énergies renouvelables, appelés objectifs 20-20-20, dans lesquels ils ont engagé l'Europe à devenir une économie hautement « efficace en énergie et sobre en carbone » d'ici 2020 [8]. Les trois objectifs clés de cet accord comprennent une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre de l'UE par rapport aux niveaux 1990, une augmentation de la part des énergies renouvelables à 20% de la consommation d'énergie finale brute de l'UE et une réduction de 20% du total de l'énergie primaire

3 Les Antennes

3.1 Définition de l'antenne

Une antenne est définie comme un dispositif qui a pour mission de rayonner des ondes électromagnétiques ou de les capter. Elle est utilisée pour la communication en grandes distances. Elle se présente comme un élément des transitions entre les circuits électriques et l'environnement. C'est un dipôle passif qui reçoit ou émet des ondes électromagnétiques. Elle permet la conversion de l'énergie électrique provenant de l'émetteur en énergie électromagnétique reçue par le récepteur à travers une onde électromagnétique (ou inversement)

[6].

L'émetteur ou le récepteur est relié à l'antenne par un câble coaxial ou par un guide d'onde. Ce câble permet le transfert de l'énergie électrique ou électromagnétique ça dépend de type

d'antenne soit d'émission soit de réception. Le transport d'énergie à travers une onde électromagnétique va permettre le transfert des informations sans support physique par un canal de transmission ou par une liaison radiofréquence. Une liaison radiofréquence est un support de transmission sans contact entre le récepteur et l'émetteur dont la communication est assurée à travers des ondes électromagnétiques.

3.2 Antenne d'émission

L'antenne d'émission reçoit le signal électrique provenant de l'émetteur et transmet d'onde électromagnétique. Elle tire sa puissance et son énergie de l'émetteur qui l'alimente comme une charge.

3.3 Antenne de réception

L'antenne fournit la puissance et l'énergie captée vers le récepteur. Elle transforme l'énergie reçue par les ondes en énergie utile.

3.4 Antenne réciproque

C'est une antenne qui reçoit bien et émet bien, elle a les mêmes caractéristiques et performance au niveau de la réception ou l'émission.

3.5 Onde électromagnétique

Pour les systèmes de communication les informations sont transmises par des ondes électromagnétiques. Toute charge et leur mouvement permettent de produire des champs magnétiques et électriques autour d'eux. Elle permet aussi de créer des rayonnements électromagnétiques qui se propagent librement dans l'espace.

Une onde électromagnétique englobe un champ électrique et un champ magnétique à la fois qui ont la même fréquence produite par une source. Ces deux champs sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre.

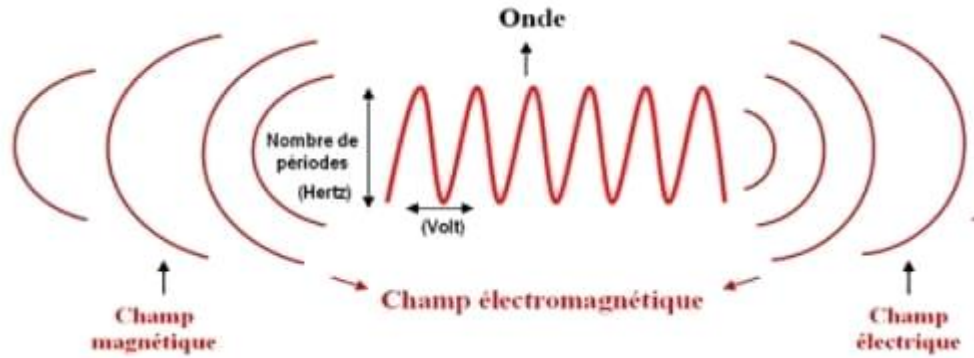


Figure 1- Onde électromagnétique.

On dit qu'une onde est une onde transversale électromagnétique lorsque les champs E et B sont perpendiculaires à la direction de propagation. (TEM)

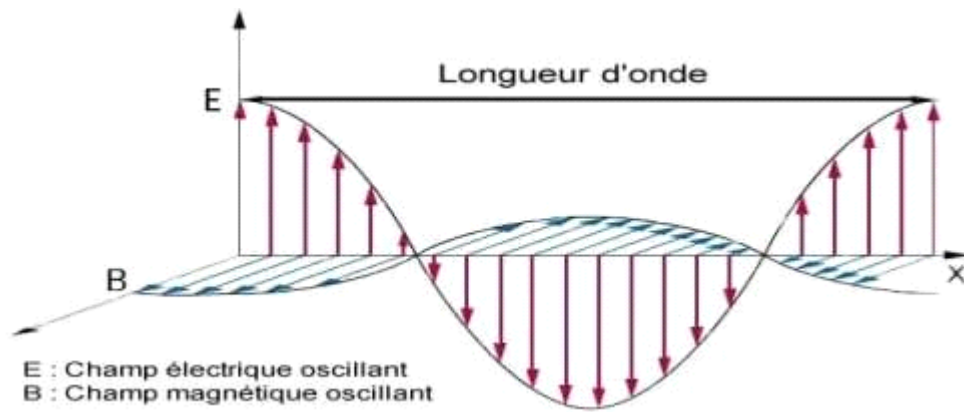


Figure 2-Propagation d'onde électromagnétique transversale.

3.6 Caractéristiques de l'antenne

Les caractéristiques de l'antenne sont les suivantes :

- Le diagramme de rayonnement.
- La directivité.
- Le gain.
- Le rendement de l'antenne.

3.6.1 Le diagramme de rayonnement

Il représente la variation de la puissance électromagnétique et des ondes électromagnétiques dans toutes les directions de l'espace. Les diagrammes de rayonnement peuvent être présentés en coordonnées polaires, bidimensionnelles ou en tridimensionnelles.

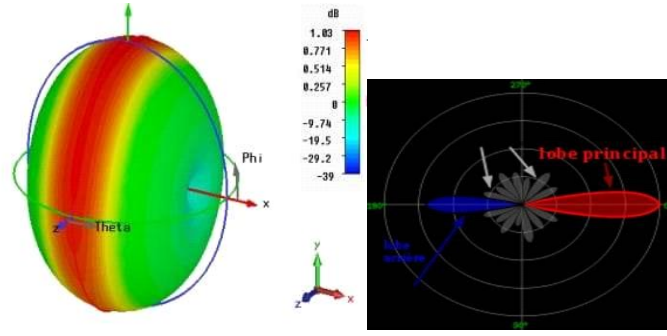


Figure 3-Diagrammes de rayonnement

3.6.2 La fonction caractéristique de rayonnement

Elle est définie par le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction quelconque et la puissance maximale.

$$R_{(\theta,\rho)} = \frac{P_{(\theta,\rho)}}{P_{max(\theta,\rho)}} \quad (1.1)$$

3.6.3 La directivité

Elle est définie par le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée sur la puissance de l'antenne isotrope [7]. Elle est caractérisée par l'angle d'ouverture.

$$D = \frac{P_{max(\theta,\rho)}}{P_{isotrope}} \quad (1.2)$$

3.6.4 La densité de puissance

La Densité de puissance pour une antenne isotrope est

$$Dp = \frac{p_e}{s} = \frac{P_e}{4\pi R_2^2} \quad (1.3)$$

Soit G le gain de l'antenne, la densité de puissance pour une antenne directive est

$$Dp = G \frac{p_e}{s} = G \frac{P_e}{4\pi R_2^2} \quad (1.4)$$

3.6.5 Le gain

Il est défini par le rapport entre la puissance rayonnée dans une direction donnée sur la puissance de l'antenne isotrope sans perte.

$$G = \frac{P_{max(\theta,\rho)}}{P_a} \quad (1.5)$$

3.6.6 Angle d'ouverture

Elle caractérise la largeur du lobe principal, L'angle d'ouverture à 3dB, $2\theta_3$ représente la portion de l'espace dans lequel la majeure partie de la puissance est rayonnée. Il s'agit de l'angle entre les 2 directions autour du lobe principal où la puissance rayonnée est égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de rayonnement maximal [8].

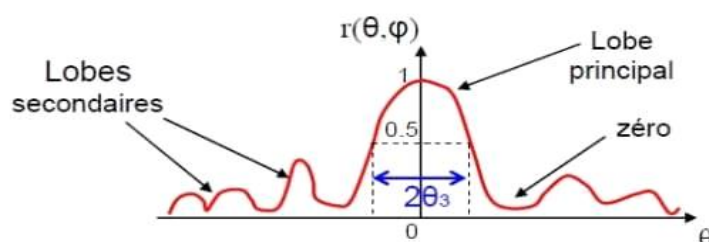


Figure 4-Diagramme de rayonnement et angle d'ouverture.

3.7 Types d'antenne

Dans cette section je veux présenter les types d'antennes fondamentaux, presque chaque antenne dans le monde peut être considérer comme une combinaison ou un dérivé de ces antennes présentés ci-dessous.

3.7.1 Antenne dipôle

C'est une antenne avec un rayon très mince. Elle est résonante, elle se comporte comme un circuit RLC série. Il est à noter que si la longueur de l'antenne est proche à la longueur d'onde, l'impédance d'entrée devient infinie.

3.7.2 Antenne dipôle demi-onde

C'est un cas particulier de l'antenne dipôle, mais elle a ses propres caractéristiques. Notez que le terme "demi-onde" signifie que la longueur de cette antenne dipôle est égale à la demi-longueur d'onde à une fréquence de fonctionnement.

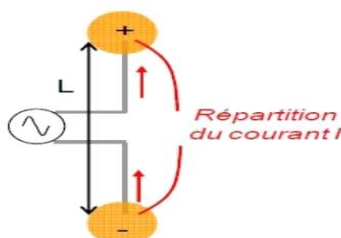


Figure 5-Répartition du courant le long d'un dipôle.

3.7.3 Dipôle magnétique ou antenne boucle

Ces sont le deuxième type des antennes les plus courants. Ces sont des antennes multi bandes. Si l'antenne boucle est circulaire, le rayon doit être inférieur à sa longueur d'onde. La résistance de rayonnement de ces antennes est faible et la réactance est haute. En conséquence, ces antennes sont le plus souvent utilisées comme antennes de réception, où la perte de désadaptation d'impédance peut être tolérée. Les antennes boucles sont très robustes et peuvent être implantées dans le corps humain. L'antenne boucle est principalement inductive, elle a une capacité propre faible.

La fonction caractéristique de rayonnement est égale à :

$$R(\theta) = \sin^2(\theta) \quad (1.6)$$

3.7.4 Antenne monopôle

C'est la moitié d'une antenne dipôle, elle est presque toujours montée sur un plan de masse. Il est à signaler que l'impédance d'une antenne monopôle est la moitié de celle l'antenne dipôle complète. Pour un monopôle quart d'onde, l'impédance est la moitié de celle d'un dipôle demi-onde. Pour alimenter un monopole on a besoin du même courant qu'un dipôle mais la moitié de la tension. La directivité d'une antenne monopôle est directement liée à celle d'une antenne dipôle.



Figure 6-Antenne Dipôle

3.7.5 Antenne planaire

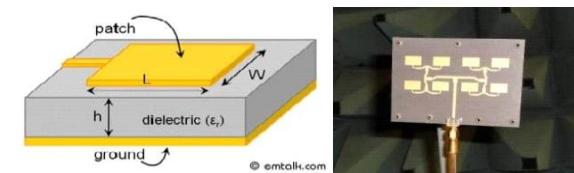


Figure 7-Exemples des antennes patch rectangulaire

L'antenne planaire ou patch (en anglais) est une antenne plane dont l'élément rayonnant est une surface conductrice généralement carrée, séparée d'un plan réflecteur conducteur par une lame diélectrique. Sa réalisation ressemble à un circuit imprimé double face, substrat, et est donc favorable à une production industrielle. Elle peut être utilisée seule ou comme élément d'un réseau. Une antenne patch est formée d'un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, Circulaire, à fente, ...) déposé sur un substrat diélectrique, l'autre face de substrat est un conducteur, c'est le plan de masse. Une antenne patch rectangulaire est l'antenne patch la plus courante. Ces antennes ont des caractéristiques plus particulières, par exemple le rayonnement est perpendiculaire, le diagramme de rayonnement est presque circulaire et l'angle d'ouverture est compris entre 50° et 80°. La directivité et donc le gain augmente avec le nombre des patches.

4 La collection de l'énergie solaire

Le rôle des sources d'énergie renouvelables est essentiel pour veiller à ce que les objectifs climatiques et la sécurité énergétique soient atteints.

Le soleil est la source permanente d'énergie renouvelable la plus abondante. La quantité de rayonnement solaire émise par le soleil qui atteint la surface de la terre en une heure est suffisante pour alimenter toutes les activités humaines pendant une année entière [7].

L'énergie solaire est disponible sous ses formes directe et indirecte : le rayonnement solaire peut être capté directement pour le chauffage, mais également indirectement sous forme d'éolien, d'hydroélectricité, de biomasse et d'électricité [8]. Le rayonnement solaire entrant joue un rôle majeur dans divers phénomènes climatiques et peut être exploité sous différentes formes. Par exemple, l'énergie solaire crée des vents, des vagues et pilote le cycle de l'eau. Les rayons du soleil sont également utilisés par les producteurs d'énergie primaire de la terre et des plantes. Les plantes absorbent l'énergie du soleil et la transforment en biomasse par le processus de la photosynthèse [9]. En fait, l'énergie solaire sous toutes ses formes (thermique, photovoltaïque, éolienne, marémotrice, biomasse, etc.) représente l'un des principaux contributeurs aux sources d'énergie renouvelables.

La conversion directe de l'énergie solaire en électricité est devenue possible par l'émergence de cellules solaires photovoltaïques (PV). Les dispositifs photovoltaïques sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs qui absorbent l'énergie du soleil pour exciter les électrons à leur surface, les faisant tomber de leur orbite et produisant un flux d'électrons se traduisant par un courant électrique. Les cellules solaires sont des structures robustes

nécessitant très peu de maintenance avec de tels avantages. Il est facile de comprendre pourquoi les cellules PV constituent une technologie attrayante qui se développe rapidement sur le marché mondial de l'énergie [10].

Cependant, les cellules solaires photovoltaïques ont diverses limites. Seule une petite partie du rayonnement solaire entrant peut-être convertie en électricité par des semi-conducteurs en raison des propriétés électriques intrinsèques des matériaux. Le rayonnement restant peut-être absorbé par la cellule mais celle-ci est convertie en chaleur [11]. Bien que les progrès technologiques importants aient été réalisés sur le terrain, les cellules solaires les plus efficaces actuellement produites ont montré des rendements de conversion d'énergie de 44%, mais leur structure est plus complexe que les cellules classiques à base de silicium et donc plus performante mais coûteux pour les produire à une échelle commerciale. Les cellules photovoltaïques à simple jonction traditionnelles ont généralement des rendements inférieurs allant de 10% à 20% [11]. De plus, les performances des cellules photovoltaïques dépendent en grande partie de facteurs météorologiques et d'autres conditions physiques, ce qui ajoute à l'imprévisibilité de tels dispositifs. La production d'électricité à partir de cellules photovoltaïques fluctue en fonction de la quantité de rayonnement solaire reçue au cours de la journée et ses performances peuvent être influencées par les changements de température [8].

5 Les collecteurs électromagnétiques solaires à nano-antennes :une alternative prometteuse.

La nano-antenne est une technologie relativement nouvelle qui doit encore faire ses preuves sur le marché mondial de l'énergie en tant que solution de remplacement prometteuse aux technologies classiques de conversion de l'énergie solaire.

Les collecteurs électromagnétiques à nano-antenne (NEC), ou nano-antennes, sont des dispositifs qui exploitent la nature ondulatoire de la lumière par opposition à sa nature particulaire utilisée dans la conception de cellules solaires photovoltaïques [12]. Les NEC sont de petites structures de l'ordre de quelques centaines de nanomètres à quelques microns qui convertissent directement l'énergie du rayonnement électromagnétique en courant dans un circuit [10].

Les NEC sont spécialement conçus pour capter le rayonnement infrarouge (IR) de longueurs d'onde comprises entre 0,7 et 100 μm , c'est une source d'énergie abondante représentant environ 50% du rayonnement solaire total entrant qui atteint la surface de la Terre [1]. À ces longueurs d'onde, les cellules photovoltaïques classiques se sont révélées inefficaces [11]. Il a

été rapporté que les nano-antennes présentent des rendements élevés qui dépassent de loin ceux des cellules photovoltaïques typiques dans certaines conditions [11].

6 Les nano-antennes solaires

Les antennes ne sont pas une nouvelle technologie. Elles sont utilisées sur une large gamme de fréquences dans le spectre électromagnétique et peuvent être considérées comme l'une des inventions les plus révolutionnaires pour la société moderne. Aujourd'hui, les antennes sont utilisées pour plusieurs systèmes de télécommunication tels que les téléviseurs, les radios, les téléphones cellulaires, les radars et les communications par satellite. Les antennes conventionnelles fonctionnent avec des fréquences radio (RF) et des signaux « transmis » ou « reçus ». En d'autres termes, une antenne radio est une structure dans laquelle une onde en espace libre est convertie en une onde guidée, ou inversement. La théorie et les principes des antennes RF sont bien connus et peuvent être partiellement appliqués aux nano-antennes [13].

6.1 Les limites de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La première cellule photovoltaïque a été créée au début des années 1950. Par la suite le développement de la photovoltaïque a augmenté rapidement. Cependant, la photovoltaïque a beaucoup des inconvénients qui ont conduit les scientifiques et les chercheurs à trouver des technologies alternatives qui peuvent surmonter ces inconvénients. Les principaux inconvénients des technologies à base de photovoltaïque sont leur faible efficacité de conversion et leur forte dépendance à la lumière du jour, qui les rend sensibles aux conditions météorologiques. En outre, ils nécessitent un système mécanique de suivi du soleil pour optimiser la conversion.

Pour utiliser l'énergie solaire, des panneaux solaires photovoltaïques ont été utilisés pour convertir la lumière solaire en énergie électrique, mais ces cellules solaires souffrent d'un faible rendement de conversion (environ 30%). En outre, les cellules solaires ne fonctionnent que par jour, elles sont sensibles aux conditions météorologiques et nécessitent un système de suivi du soleil mécanique [34] pour obtenir un rendement de conversion supérieur (inférieur à 30%). Actuellement, des efforts importants sont déployés pour améliorer les performances de la photovoltaïque en mettant en œuvre des conceptions complexes à multi-jonctions. Cependant, ces conceptions ne sont pas encore considérées comme une solution rentable pour surmonter les limitations d'efficacité [17].

En revanche, les nano-antennes redresseuses solaires font preuve de polyvalence par rapport aux appareils photovoltaïques en dépassant l'efficacité pendant la journée. De plus, les nano-

antennes solaires présentent des caractéristiques de réception angulaires plus larges que les cellules solaires traditionnelles. En outre elles ne nécessitent pas de système de suivi du soleil.

6.2 Les propriétés physiques des nano-antennes

Le comportement des métaux aux fréquences optiques est entièrement contrôlé par leurs propriétés diélectriques dépendantes de la fréquence,

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' + i\varepsilon''(\omega) \quad (1)$$

La partie imaginaire, est responsable des pertes ohmiques. Par conséquent, cette partie doit être aussi faible que possible pour obtenir des performances acceptables. Alternativement, nous pouvons garder des pertes ohmiques faibles en choisissant un métal avec une partie réelle négative et importante (c'est-à-dire).

Aux fréquences optiques, la conductivité des métaux change considérablement. À ces fréquences, les métaux ne se comportent plus comme des conducteurs parfaits et ne peuvent donc pas réagir immédiatement au champ électrique variant dans le temps. Dans ce cas, les propriétés diélectriques des métaux deviennent dépendantes de la fréquence. Cette propriété affecte la propagation des ondes dans le matériau [18, 19, 10].

L'interaction des nano-antennes avec le champ électromagnétique dans ce régime est déterminée par une fonction diélectrique complexe, qui peut être décrite à l'aide du modèle de Lorentz-Drude [10].

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r^F(\omega) + \varepsilon_r^b(\omega) \quad (2)$$

Où

ω est la fréquence de l'onde électromagnétique incidente, $\varepsilon_r(\omega)$ est la fonction diélectrique dépendante de la fréquence. $\varepsilon_r^F(\omega)$ Est la partie décrivant la contribution des électrons libres à la constante diélectrique relative. $\varepsilon_r^b(\omega)$ Est la partie décrivant la contribution des électrons liés à la constante diélectrique relative.

$\varepsilon_r^F(\omega)$ Décrit le degré de polarisation dans le matériau dû au champ électrique induit par une onde électromagnétique, tandis que $\varepsilon_r^b(\omega)$ reflète l'ampleur de l'absorption qui se produit dans le matériau en raison de propriétés de conduction non idéales (pertes dissipatives).

La contribution des effets d'électrons libres à la fonction diélectrique peut être décrite par le modèle de Drude :

$$\varepsilon_r^f(w) = 1 - \frac{\Omega_p^2}{w(w - i\Gamma_0)}$$

(3)

D'autre part, la contribution des électrons liés à la fonction diélectrique peut être décrite par un modèle similaire au résultat de Lorentz pour les isolateurs :

$$\varepsilon_r^b(w) = \sum_{j=1}^k \frac{f_j w \rho^2}{(w_j^2 - w^2) + i w \Gamma_j} \quad (4)$$

Où

w_p : est la fréquence du plasma

K : est le nombre d'oscillateurs de fréquence, d'intensité et de durée de vie

w_p : est la fréquence de plasma des transitions à électrons libres avec une force d'oscillateur et une constante d'amortissement.

La longueur de résonance de l'antenne n'étant pas proportionnelle à la fréquence incidente, la longueur d'onde effective à laquelle le nano-antenne est induit en mode de résonance peut être calculée comme suit :

$$\lambda_{eff} = n_1 + n_2 \frac{\lambda}{\lambda_p} \quad (4)$$

Où

λ : est la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique incident, est la longueur d'onde de plasma du métal.

7 Exemples des designs des nano-antennes solaires (optiques)

7.1 1. Exigences de conception

Afin de construire une structure d'antenne redresseuse (Rectenna) efficace pour la conversion d'énergie, plusieurs aspects clés liés au comportement électrique, au choix des matériaux et à la géométrie de l'antenne et de la diode doivent être abordés.

Premièrement, la nano-antenne est conçue pour pouvoir capturer efficacement toutes les polarisations de la lumière. Les nano-antennes devraient également être capables de concentrer efficacement le rayonnement entrant et de le guider dans la direction souhaitée. Idéalement, le matériau utilisé dans la construction du nano-antenne ne devrait présenter aucune perte lors de la collecte du rayonnement électromagnétique, mais ceci est difficilement réalisable en raison de la conductivité finie des métaux aux fréquences THz [19, 20]. Pour la diode de redressement, les considérations de conception à prendre en compte sont plus complexes que dans le cas du nano-antenne, car plusieurs aspects liés au circuit doivent être traités simultanément. En plus de la petite taille requise pour son incorporation réussie dans une structure d'antenne redresseuse, la diode devrait avoir une faible tension de mise sous tension et démontrer une rectification à grande vitesse [10].

Les aspects les plus critiques qui influencent ses performances sont la résistance de diode, la capacité et les fuites en polarisation inverse. L'impédance de la diode doit également correspondre à celle du nano-antenne pour un transfert de puissance efficace. De plus, la constante de temps RC doit être très inférieure à la constante de temps correspondant aux fréquences THz pour assurer une rectification efficace. Enfin, il est essentiel que la diode présente une fuite de polarisation inverse faible à négligeable et une faible résistance directe pour permettre le déplacement des porteurs de charge dans un seul sens. Concernant le choix des matériaux, la stabilité électrique sous une densité de courant élevée est cruciale [19].

La performance globale des réseaux de nano-antennes est influencée par plusieurs facteurs, tels que la configuration géométrique du réseau, l'espacement entre les éléments individuels du nano-antenne, l'amplitude et la phase d'excitation des éléments et le motif relatif de l'élément individuel [19].

7.2 2.Exemple d'antennes optiques connues

L'antenne redresseuse est constituée d'une nano-antenne, couplé à un redresseur. La recherche dans le domaine des nano-antennes est encore en phase d'exploration. Diverses configurations de nano-antenne ont récemment été proposées dans la littérature, telles que monopoles [21], dipôles [22] - [23], nœuds papillon (bowtie) [24], [25], spirales [26], Yagi-Uda [27], nano-anneau [28], nano-fils [29] (voir figure 2(a, b, c et d) ci-dessous). En ce qui concerne le redresseur, des recherches approfondies ont été menées récemment afin d'explorer les avantages des diodes : métal-isolant-métal (MIM) et les paramètres les affectant [30].

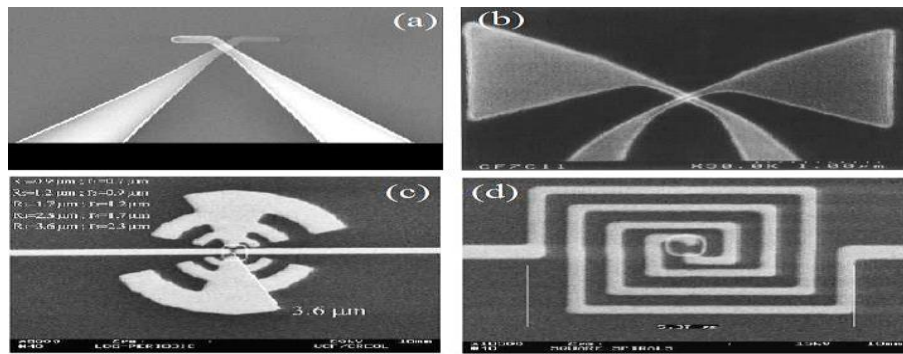


Figure 8: Nano-antennes infrarouges fabriquées : (a) nano-antenne dipolaire, (b) nano-antenne nœud papillon, (c) nano-antenne log-périodique et (d) nano-antenne en spirale.

Plusieurs types d'antennes plasmatiques des différentes propriétés sont utilisés pour divers objectifs. Par exemple, les nano-antennes dipôles ont un coefficient de localisation du champ électrique élevé et les nano-antennes à nœud papillon ont un spectre d'absorption à large bande. Par ailleurs, la haute directivité des antennes optiques Yagi-Uda peut être utile dans de nombreuses applications de communication sans fil ou sur une puce optique [31] (voir figure 3 ci-dessous).

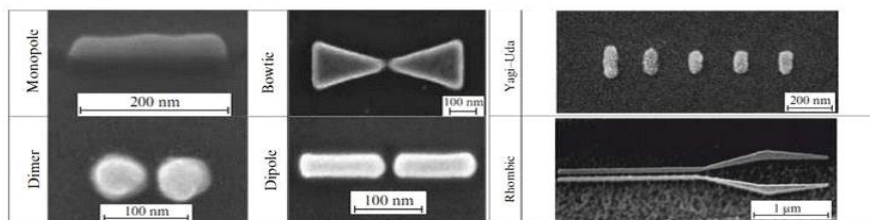


Figure 9 : Principaux types de nano-antennes plasmoniques [31]

Des structures plus complexes ont été également conçues pour obtenir des nano-antennes avec géométries et dimensions optimales. Par exemple, certaines de ces structures comprennent des nano-antennes à spirale carrée, des antennes log-périodiques et des antennes à spirale d'Archimède [1, 32] (voir figure 4 ci-dessous).

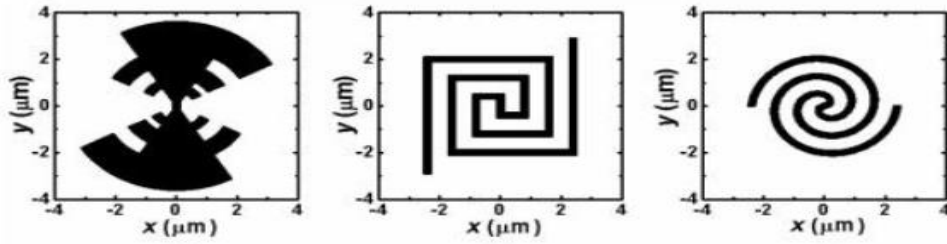


Figure 10 : Antennes optiques. (a) antenne log-périodique, (b) antenne en spirale carrée et (c) antenne en spirale d'Archimède [32].

Les antennes optiques en forme de spirale ont fait l'objet de nombreuses études dans le domaine de la conversion de l'énergie solaire en raison de leurs propriétés remarquables. Ce type de nano-antennes a généralement une large bande passante et peut concentrer la lumière efficacement. Ils démontrent également une haute directivité qui peut être encore améliorée en augmentant le nombre de bras. De plus, ils sont de bons résonateurs et devraient donc capturer un champ électrique important à la résonance [10, 1].

En plus des nano-antennes plasmatiques, il a récemment été suggéré que les nano-antennes optiques construites avec des matériaux entièrement diélectriques pourraient être de bons concurrents par rapport à leurs homologues métalliques en raison de caractéristiques uniques à celles des nano-antennes plasmatiques [31].

Les matériaux diélectriques utilisés dans la construction des nano-antennes optiques présentent plusieurs avantages par rapport à leurs équivalents métalliques, et ce pour deux raisons principales. Premièrement, les matériaux diélectriques présentent de très faibles pertes dissipatives aux fréquences optiques, ce qui indique que seule une partie minimale de l'onde électromagnétique est transformée en chaleur au lieu du courant. Les pertes dissipatives sont jusqu'à deux ordres de grandeur plus petite pour le silicium par rapport aux nanoparticules d'or ou d'argent [33].

Deuxièmement, les matériaux diélectriques ont généralement une très haute permittivité, qui supporte les modes de résonance électrique et magnétique dans le matériau et améliore ainsi l'efficacité du rayonnement et la directivité de l'antenne, élargissant ainsi le domaine d'application des structures de nano-antenne [31,33].

Une étude récente [31] a utilisé des nanoparticules de silicium pour démontrer les performances de nano-antennes entièrement diélectriques. La nano-antenne conçue Yagi-Uda entièrement diélectrique, était composée de quatre directeurs et d'un réflecteur en silicium.

Dans ce type de structure, les performances optimales sont obtenues lorsque les nanoparticules directrices subissent une résonance magnétique et que la nanoparticule de réflecteur subit une résonance électrique. Pour cette raison, les rayons des nanoparticules de directeur et de réflecteur ont été choisis avec soin pour obtenir l'interférence constructive maximale dans la direction avant, en supprimant le rayonnement dans la direction opposée. La figure 5 montre une représentation en 3D de l'antenne.

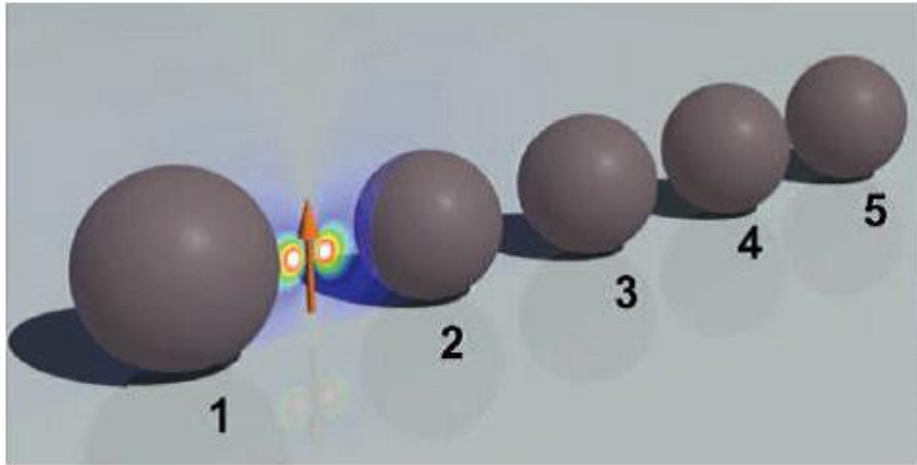


Figure 11 : Nano-antenne Yagi-Uda entièrement diélectrique, composé du réflecteur (sphère 1 à gauche) et de quatre directeurs (sphères 2-5) [33].

8 Avantages et défis des nano-antennes

Les cellules solaires ‘Rectenna’ ont le potentiel d’être compétitives par rapport aux cellules solaires conventionnelles grâce à plusieurs caractéristiques avantageuses. Premièrement, si les limitations techniques ont été surmontées, le rendement ultime de la conversion d’énergie est aussi élevé que celui d’une cellule solaire photovoltaïque.

L’efficacité de l’antenne redresseuse peut être améliorée en incorporant plusieurs tailles de nano-antennes dans la même structure afin d’obtenir une meilleure couverture du spectre solaire. Il s’agit d’une approche similaire aux cellules solaires à jonctions multiples pour augmenter l’efficacité de conversion de l’énergie, mais la procédure est relativement simple et moins coûteuse, car elle peut être obtenue en contrôlant uniquement la tension de fonctionnement et la taille des nano-antennes.

De plus, les matériaux nécessaires à la fabrication des ‘rectennas’ sont disponibles et, sous forme mince, ils sont économiques. De plus, la fabrication de nano-antennes peut être moins coûteuse que celle de cellules solaires photovoltaïques, car les matériaux n’ont pas besoin

d'être épitaxiaux [19]. Avec le développement de nouvelles méthodes de fabrication peu coûteuses, les 'rectennas' peuvent potentiellement constituer une alternative commercialement viable aux cellules solaires photovoltaïques et convenant à la production à grande échelle.

Cependant, avant que les 'rectennas' puissent faire partie de la scène énergétique mondiale, plusieurs défis essentiels à leur performance doivent être relevés. Pour le nano-antenne, ces défis sont essentiellement liés au choix des matériaux et à la géométrie de l'antenne. Le comportement de nano-antennes individuels est également affecté lorsqu'il est placé dans un réseau où l'espacement entre les éléments est essentiel à leurs propriétés d'absorption.

Un autre aspect à prendre en compte est que les nanostructures du monde réel ont généralement des propriétés optiques moins idéales comparées aux autres structures et ne sont donc pas aussi performantes que prévu. Cette différence peut être attribuée à des problèmes de fabrication, des effets de taille, une passivation de surface médiocre et la présence d'impuretés chimiques dans le matériau de nano-antenne [18]. Pour les diodes, le défi le plus important consiste à obtenir une rectification efficace aux fréquences THz.

9 Problématique

La densité de puissance du rayonnement solaire qui atteint l'atmosphère terrestre est d'environ 1370 W / m² sur un large spectre. Ce spectre peut être classé en trois bandes principales : le rayonnement ultraviolet (UV) ($\lambda < 400$ nm) dont la teneur est inférieure à 9%, lumière visible (400 nm $< \lambda < 700$ nm) avec une teneur d'environ 39% ; et les 52% restants consistant en infrarouge (IR) [2]. La collecte du rayonnement solaire peut être soit dans le domaine visible du spectre électromagnétique, soit dans le domaine infrarouge.

Concevoir des nano-antennes pour les systèmes photovoltaïques dans le domaine visible est assez difficile en raison du fait que la conductivité du métal à ces longueurs d'onde est très faible (c'est-à-dire des pertes élevées). La deuxième raison est la difficulté de concevoir des diodes ultra rapides capables de rectifier les signaux dans cette gamme de fréquences THz.

Ces contraintes ont motivé les chercheurs à exploiter la partie non utilisée du spectre solaire et aller jusqu'aux longueurs d'onde infrarouge (IR). Une partie de l'énergie infrarouge sera absorbée ou réfléchiée par l'atmosphère et le reste sera réémis à la surface de la Terre dans la gamme de longueurs d'onde de 4 à 25 μm [88]. La large gamme d'énergie IR réémise donne au concepteur la liberté de se déplacer dans cette plage lors du processus de conception.

Dans notre travail théorique, nous avons conçu nos antennes de manière qu'elles résonnent dans une plage de 26 à 30 THz, là où la plus grande partie de l'énergie est attendue [1].

10 Conclusion

Malgré que les nano-antennes n'ont pas encore prouvées leurs capacités de convertir l'énergie électromagnétique en l'électricité avec des efficacités qui permettent leur commercialisation industrielle, un grand progrès est en train de se concrétiser depuis leurs inventions afin d'améliorer leurs performances.

Les matériaux utilisés dans les nano-antennes sont relativement de faibles coûts et les procédés de fabrications peuvent être non chers si les techniques d'impression roll-to-roll seront utilisées. Avec une efficacité théorique qui atteint 44%, les nano-antennes pourraient être un contribuant important à la production d'énergie dans le future proche.

Actuellement, la performance des nano-antennes est limitée par des contraintes comme les pertes métalliques, la bande passante, la directivité et le circuit d'adaptation entre les composants et le circuit de conversion AC – DC. Si les défis technologiques rencontrés lors de la conception de nano-antennes efficaces, ces systèmes pourraient être des concurrents potentiels aux cellules photovoltaïques solaires.

Chapitre 2 : Conception et optimisation de Nano-antennes pour la collection de l'énergie solaire

1 Introduction

Le domaine des nano-antennes a suscité un intérêt considérable dans le monde entier de la part des chercheurs ces dernières années en raison des progrès des nanosciences et des nanotechnologies.

Les efforts de recherche ont visé principalement à traduire et à réduire les théories micro-ondes en région optique. La principale caractéristique intéressante des nano-antennes est leur capacité à améliorer et à localiser les champs dans une petite zone limitée, ce qui les a rendus préférables dans de nombreuses et différentes applications telles que la spectroscopie [1] la microscopie à haute résolution [2], la détection [3], le multiplexage [4], les applications médicales par exemple le traitement du cancer et la photovoltaïque [5] [6].

Récemment, plusieurs types de nano-antennes sont étudiés telles que l'antenne bowtie, dipôle [7], Vivaldi [8] pour la collection de l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, nous présentons la conception et la simulation de trois formes d'antennes imprimés sur un substrat diélectrique épais pour la récupération de rayonnement infrarouge. Ces antennes sont conçues afin de collecter le champ électrique maximal dans la fente entre les deux pôles de l'antenne à la bande de fréquences allant de 28 à 29 THz. Une étude paramétrique des trois formes de dipôles proposées est réalisée pour améliorer le champ électrique localisé ainsi que pour modifier la fréquence de résonance à 28,3 THz.

2 Méthodologie de conception d'antenne

2.1 Logiciel de simulation utilisé : CST Microwave Studio :

CST (Computer Simulation Technology) est un outil spécialisé pour la simulation 3D électromagnétique (EM) de composants de hautes fréquences [9]. Elle permet l'analyse rapide et précise de dispositif de haute fréquence telle que les antennes, les coupleurs, les filtres. Il donne rapidement un aperçu du comportement EM de la conception de haute fréquence. L'utilisation de ce logiciel de simulation électromagnétique est inéluctable dans la conception d'antennes. Elle permet d'analyser et d'optimiser la structure d'une antenne et d'examiner ce comportement. Elle permet aussi de vérifier si les résultats obtenus correspondent aux résultats théoriques souhaités afin de valider la simulation.

L'utilisation d'un tel logiciel demande beaucoup de maîtrise et d'expérience afin d'optimiser le temps de conception.

2.2 Méthodologie de conception d'antenne

La conception des antennes demande de mettre en œuvre une méthodologie de développement qui passe par plusieurs étapes :

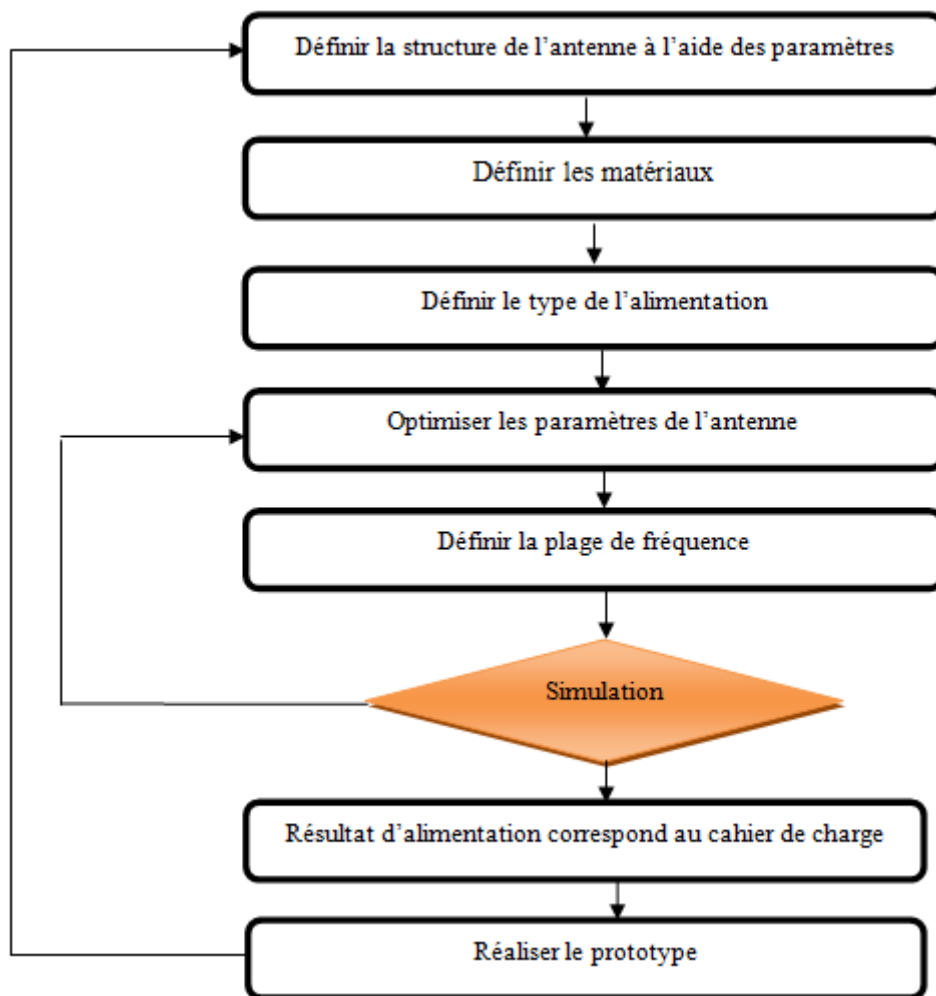


Figure 12 : Méthodologie de conception d'une antenne

La conception d'une antenne nécessite en premier lieu de déterminer les propriétés d'une antenne, l'impédance d'entrée optimale de l'antenne. Puis il est nécessaire de déterminer les propriétés des matériaux constituant l'antenne et de définir le type d'alimentation et la plage de fréquence

2.3 Choix de matériel

Il existe une différence significative entre les propriétés des matériaux en fréquences RF et en optique, ce qui nécessite une considération attentive et une caractérisation spéciale des propriétés optiques des matériaux utilisés. Dans la région RF, les métaux sont considérés comme des conducteurs électriques parfaits, cependant, dans le cas d'antennes de taille nanométrique fonctionnant sous les régimes optique et infrarouge, les métaux ne se comportent plus comme des conducteurs parfaits [10]. Ils présentent une conductivité inférieure (en particulier aux fréquences optiques) et ont des propriétés diélectriques dépendantes de la fréquence [11].

Ces propriétés diélectriques, ε et l'indice de réfraction, N , des métaux ont une forme complexe et peut être écrit comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' = N^2 = (n + ik)^2 \quad (1)$$

Où la partie réelle ε' est négative et supérieure à la partie imaginaire.

Les propriétés d'absorption sont très élevées dans les métaux nobles aux fréquences optiques, mais elles ont tendance à être plus faibles dans le régime infrarouge (IR) et disparaissent approximativement dans les radiofréquences. L'absorption ohmique est déterminée par ε'' qui est directement liée à la conductivité du métal $\sigma(\omega)$. Donc, nous devrions choisir un métal avec un ε'' faible afin de limiter les pertes ohmiques [12].

Les modèles classiques ont été largement utilisés pour caractériser les propriétés diélectriques des métaux aux régimes visibles et infrarouges tels que les modèles de Debye, Drude et Lorentz.

Certains de ces modèles classiques ne décrivent pas les propriétés diélectriques avec précision dans une certaine plage de fréquences [13]. Ainsi, ces modèles peuvent être modifiés en ajustant les données expérimentales dans la bande de fréquences souhaitée [12]. Une autre approche proposée pour résoudre le problème de l'inexactitude consiste à développer un modèle hybride tel que le modèle Drude-Lorentz.

Plusieurs nobles métaux ont été pris en compte dans les conceptions des nano-antennes récentes tels que l'or [14],[15] argent [16], nickel [7] et aluminium [7] aux longueurs d'onde visibles et infrarouges.

Le choix du matériau pour une application donnée a récemment fait l'objet et l'intérêt des plusieurs recherches afin de trouver le meilleur matériau optique à utiliser dans la conception de nano-antenne.

Il est démontré que l'or est le meilleur choix parmi les divers matériaux utilisés dans les nano-antennes en raison de sa stabilité chimique et du fait qu'il souffre d'une oxydation moindre par rapport à d'autres matériaux [12].

Dans ce travail, l'or sera donc adopté dans la conception de nos nano-antennes. Les propriétés diélectriques de l'or, utilisées dans les simulations, sont obtenues en ajustant les données expérimentales dans le modèle de Drude [17] :

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\omega_T} \quad (2)$$

Où ϵ_{∞} représente la contribution des électrons liés à la constante diélectrique relative,

ω_p Est la fréquence du plasma (oscillation rapide de la densité électronique dans les milieux conducteurs tels que les métaux) et ω_T est la fréquence d'amortissement. La Fig. 7 montre la variation de partie réelle et imaginaire de la permittivité de l'or dépendant de la fréquence

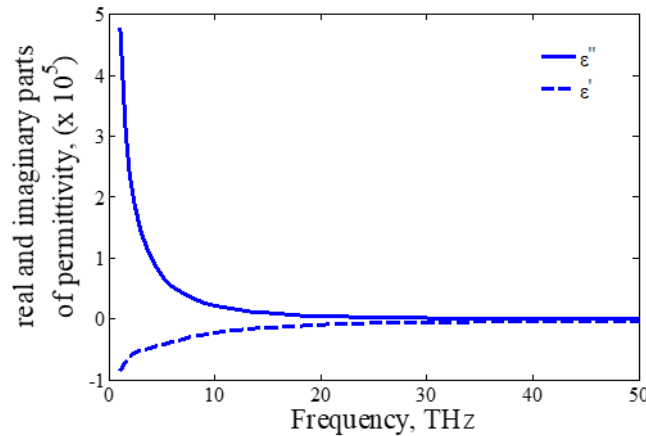


Figure 13: Variation de la partie réelle et imaginaire de la permittivité de l'or.

2.4 Plage de fréquence et type d'excitation

La collecte du rayonnement solaire peut être soit dans le domaine visible du spectre électromagnétique ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$), soit dans le domaine infrarouge ($\lambda > 800 \text{ nm}$).

Dans notre travail théorique, nous avons conçu nos antennes de manière à ce qu'elles résonnent dans une plage de 26 à 30 THz, là où la plus grande partie de l'énergie est attendue

L'antenne était éclairée par une onde plane polarisée linéaire ayant une intensité de champ de 1 V / m.

L'excitation de l'onde plane peut-être représentée par l'équation suivante [15] :

$$s_{y(y)} = E_0 e^{(-i\beta_0 y)} \quad (3)$$

Où le champ électrique incident est le long de l'axe de l'antenne (le long de y) et la direction de propagation perpendiculaire à l'antenne (le long de (-z)).

3 Conception des nano-antennes dipôles

3.1 Nano-antenne dipôle rectangulaire

Nous avons débuté notre travail avec une nano-antenne dipolaire rectangulaire. Elle est simple et facile à concevoir. Ce type d'antenne est très utilisé dans plusieurs applications. Il présente plus d'avantage tel que la faible dimension, le faible coût, la légèreté et la disponibilité.

Le nano-antenne dipolaire proposée est conçue pour capter le rayonnement infrarouge dans la bande de fréquence allant de 28 THz à 29 THz. Elle est constituée de deux bras rectangulaires métallique en or d'épaisseur $h_d = 0.08 \mu\text{m}$ imprimé sur un substrat diélectrique de type Quartz de permittivité $\epsilon_r = 3,75$ avec une tangente de perte de valeur 0,0004, et d'épaisseur $h_s = 100 \mu\text{m}$. Elle est placée sur un plan de masse en or d'épaisseur égale à $0,1 \mu\text{m}$ pour améliorer le couplage du substrat par l'antenne. Le modèle de Drude est utilisé pour étudier les propriétés du métal [17] utilisées pour caractériser les différents bras dipolaires métalliques de diverses antennes étudiées et conçues.

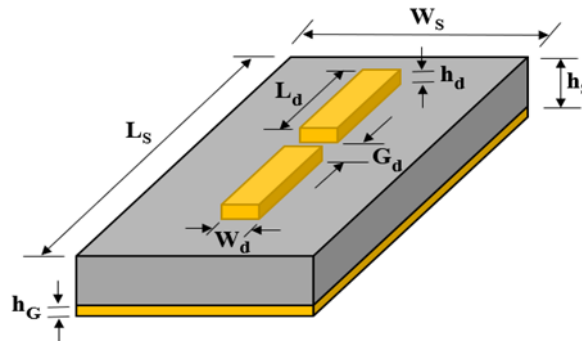


Figure 14 : Vue 3D de l'antenne optique dipôle avec une fente entre les deux pôles

Tableau 1- représente les différentes dimensions de la structure 1 proposée :

Les variables	Les Valeurs
L_{s1}	3.8
W_{s1}	1.2
L_d	1.7
W_d	0.2
G_d	0.05
h_d	0.1

3.2 Nano-antenne bowtie courbé (à forme exponentielle)

La 2ème structure proposée est une antenne Bowtie. Elle est constituée de deux bras placés l'un face à l'autre avec une fente appropriée pour former une configuration dipolaire. La structure est en or d'épaisseur $h_d = 0.1 \mu m$ imprimé sur un substrat diélectrique de type Quartz de permittivité $\epsilon_r = 3,75$ avec une tangente de perte de valeur 0,0004, et d'épaisseur $h_s = 100 \mu m$. Les performances des antennes bowtie dépendent de nombreux paramètres géométriques, notamment la taille de l'antenne, l'angle au sommet et la taille de la fente.

Tableau 2- représente les différentes dimensions de la structure 2 proposée :

Les variables	Les valeurs
L_{s2}	7
W_{s2}	4
L_b	2.5
W_b	2.52
G_b	0.05

h_b	0.1
-------	-----

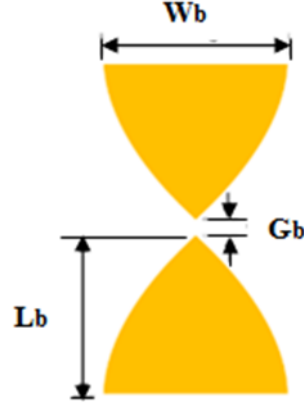


Figure 15 : Antenne bowtie modifiée proposée

Cette forme présente l'avantage d'être de large bande. Elle est conçue pour suivre une fonction exponentielle donnée par (1) et est utilisé pour définir le profil effilé de la fente. Alors que la constante B apparaît dans l'équation (1) est donnée par l'équation (2), Wmax est sa largeur maximale, Wmin est sa largeur minimale. De plus, dans (1) et (2), V est le coefficient de la courbure et L est la longueur de l'antenne. La figure 15 montre la forme proposée de la nano-antenne infrarouge, avec Wmax = 5,05 μm et V = 0,8 μm .

$$g(x) = B(e^{Vx} - e^{-Vx}) + \frac{w_{min}}{2} \quad (1)$$

$$B = \frac{\frac{w_{max}}{2} - \frac{w_{min}}{2}}{e^{V\frac{w_b}{2}} - e^{-V}} \quad (2)$$

3.3 Nano-antenne dipôle elliptique

Le troisième dipôle étudié a une forme elliptique. Elle est illustrée à la Fig. 16 Il comprend une mince antenne dipôle elliptique en or d'épaisseur h_e . Le dipôle elliptique a une longueur L_e et une largeur de W_e , et il est imprimé sur un substrat de longueur L_{s3} et de largeur W_{s3} , de type Quartz, de permittivité $\epsilon_r = 3,75$ avec une tangente de perte de valeur 0,0004, et d'épaisseur $h_s = 100 \mu\text{m}$.

Pour concevoir le dipôle elliptique, nous utilisons l'équation suivante :

$$\frac{x^2}{\left(\frac{W_e}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{L_e}{2}\right)^2} = 1 \quad (3)$$

Où $\frac{w_e}{2}$ et $\frac{L_e}{2}$ sont respectivement les rayons mineur et majeur de l'ellipse.

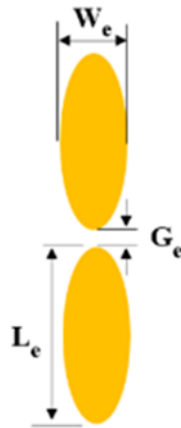


Figure 16 : Antenne dipôle elliptique proposée

Tableau 3- représente les différentes dimensions de la structure 3 proposée :

Les variables	Les valeurs
L_{s2}	17
W_{s2}	4
L_e	7.6
W_e	1.8
G_e	0.05
h_e	0.1

4 Optimisation et étude paramétrique des nano-antennes conçues

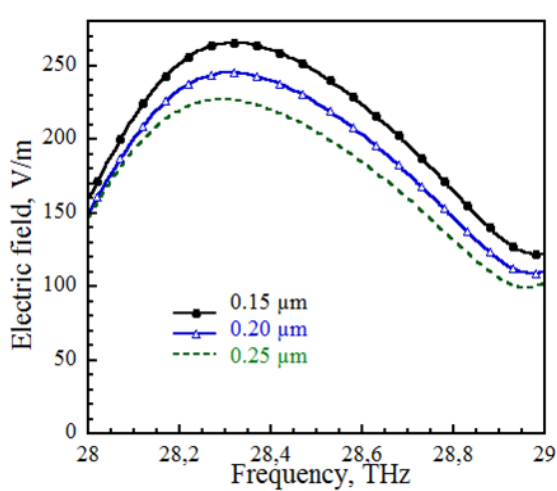
Une étude paramétrique minutieuse a été réalisée pour optimiser les antennes proposées afin de déterminer si elles fonctionnent sur une large bande de fréquence et ont un maximum de pic à 28,3 THz. Les antennes IR proposées sont conçues et optimisées à l'aide du progiciel CST (Computer Software Technology) [9]. L'objectif de l'étude paramétrique est d'améliorer le champ électrique collecté dans l'interstice entre les dipôles. Une onde plane incidente polarisée linéairement est utilisée pour le rayonnement infrarouge atteignant l'antenne.

4.1 Etude de l'effet des paramètres géométriques des nano-antennes

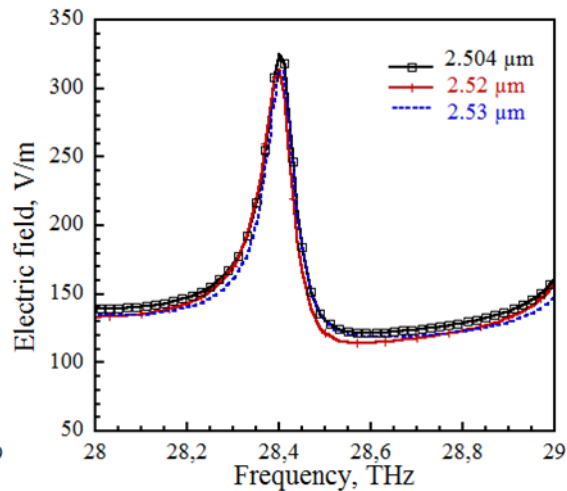
4.1.1 Effet de la longueur de nano-antennes

La longueur de l'antenne joue un rôle important dans l'amélioration de la performance de l'antenne. La figure 17 montre la variation du champ électrique en fonction de la fréquence au niveau de la fente dans la région proche de l'infrarouge, dans la bande de fréquences allant de 28 à 29 THz. Comme on peut le voir pour les figures 17 (a), (b) et (c), le champ électrique maximale concentré dans la fente apparaît à environ 28,3 THz. En outre, on peut voir que le champ électrique au niveau de la fente entre les deux pôles varie lorsque nous modifions la longueur de l'antenne pour les trois conceptions. La valeur de champ électrique la plus élevée pour l'antenne dipôle rectangulaire est de 245 V / m lorsque nous utilisons

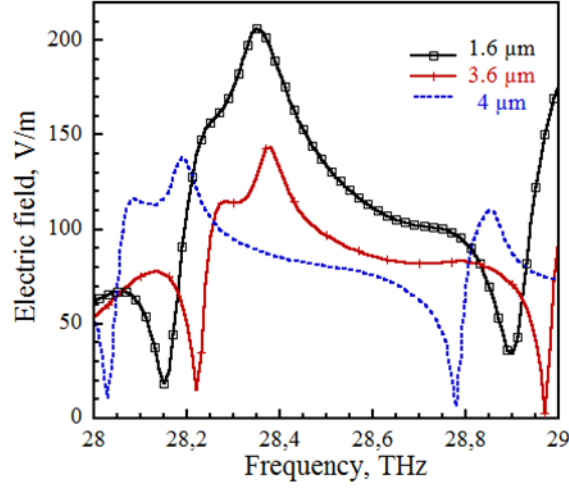
$L_d = 1,8 \mu\text{m}$ à 28,31 THz. Pour l'antenne bowtie, le champ électrique maximal se produit à 28,39 THz et est égal à 314 V / m, pour $L_b = 2,35 \mu\text{m}$. Enfin, l'antenne elliptique a un champ électrique maximal de 430 V / m pour $L_e = 8 \mu\text{m}$ à une fréquence de 28,42 THz.



(a)



(b)

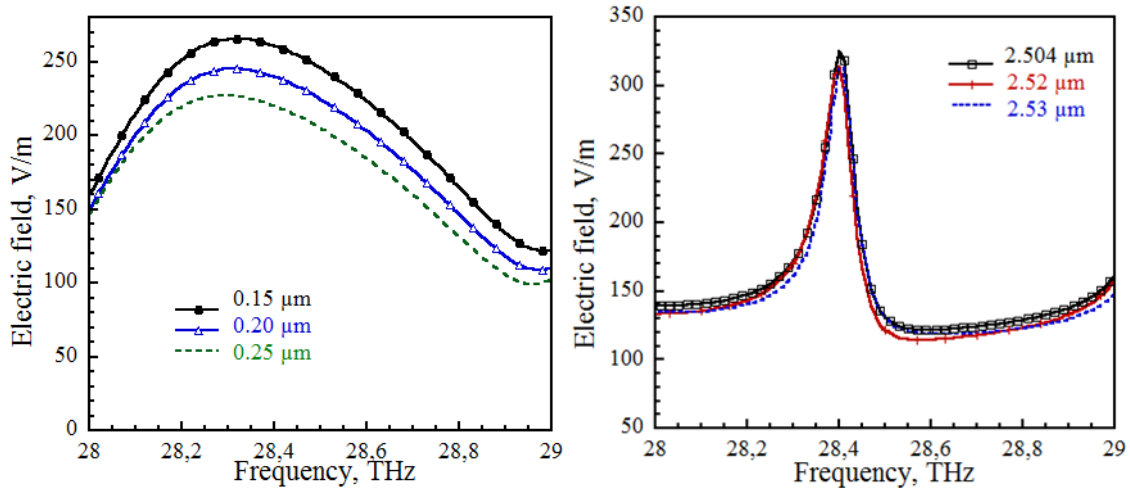


(c)

Figure 17 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour différentes longueurs des structures conçues : (a) : dipôle rectangulaire, (b) : bowtie, (c) : dipôle elliptique.

4.1.2 Effet de la largeur de nano-antennes

Afin d'étudier l'effet de la largeur des antennes sur la valeur du champ électrique collecté au niveau de l'écart entre les deux pôles, la largeur du dipôle est variée. Il est évident que le champ électrique le plus important est concentré au niveau du gap pour les dipôles rectangulaires, nœuds papillon et ellipse de $W_d = 0,15 \mu\text{m}$, $W_b = 2,504 \mu\text{m}$ et $W_e = 1,6 \mu\text{m}$, respectivement. Le champ électrique maximal est de 265 V/m pour le dipôle rectangulaire à $28,32 \text{ THz}$; 325 V/m pour le dipôle bowtie à $28,4 \text{ THz}$; et 206 V/m pour le dipôle elliptique à $28,35 \text{ THz}$, respectivement. Les figures 18 (a), (b) et (d) montrent l'effet de la largeur du dipôle sur le champ proche capturé pour les trois conceptions.



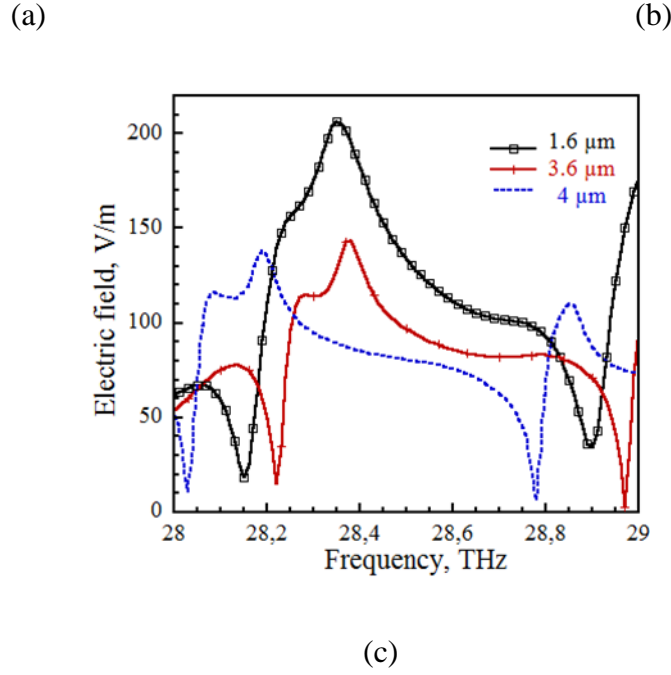


Figure 18 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour différentes largeurs des structures conçues : (a) : dipôle rectangulaire, (b) : bowtie, (c) : dipôle elliptique.

4.1.3 Effet de la taille de la fente

L'effet de la taille du gap sur le champ électrique concentré est étudié. Nous avons constaté que le champ électrique capturé au niveau du gap est changé avec l'évolution de la longueur de la fente et la modification de la forme des extrémités des deux bras. Pour ces trois modèles, il existe trois formes différentes de fente (gap), rectangulaire, nette et arrondie. Ces différentes formes de fentes sont obtenues en faisant varier le coefficient de courbure V de l'antenne bowtie. Ces formes jouent un rôle important dans la quantité d'énergie collectée entre les extrémités des deux bras. Comme le montre la figure 17, le champ maximum reçu augmente en diminuant la longueur de la fente. Pour l'antenne dipôle rectangulaire, la valeur maximale du champ électrique est de 329 V/m à $28,3 \text{ THz}$, lorsque nous utilisons la largeur de la fente $G_d = 0,03 \text{ μm}$. La Fig.19 (a) montre que, pour la forme du bowtie, la valeur du champ électrique est obtenue à $28,37 \text{ THz}$ pour $G_b = 0,05 \text{ μm}$, avec une valeur de 429 V/m , comme indiqué sur la figure 19(b). La figure 19 (c) montre que pour l'antenne dipôle elliptique, pour $G_e = 0,03 \text{ μm}$, la valeur maximale du champ électrique est de 327 V/m à $28,35 \text{ THz}$. Nous concluons donc que le champ collecté augmente en diminuant la taille de la fente et augmentons la surface de métal entourant la fente, comme cela est fait en ajustant la courbure de la forme du bowtie. Cependant, les dimensions de la structure ont un effet vital sur la valeur du champ électrique capturé.

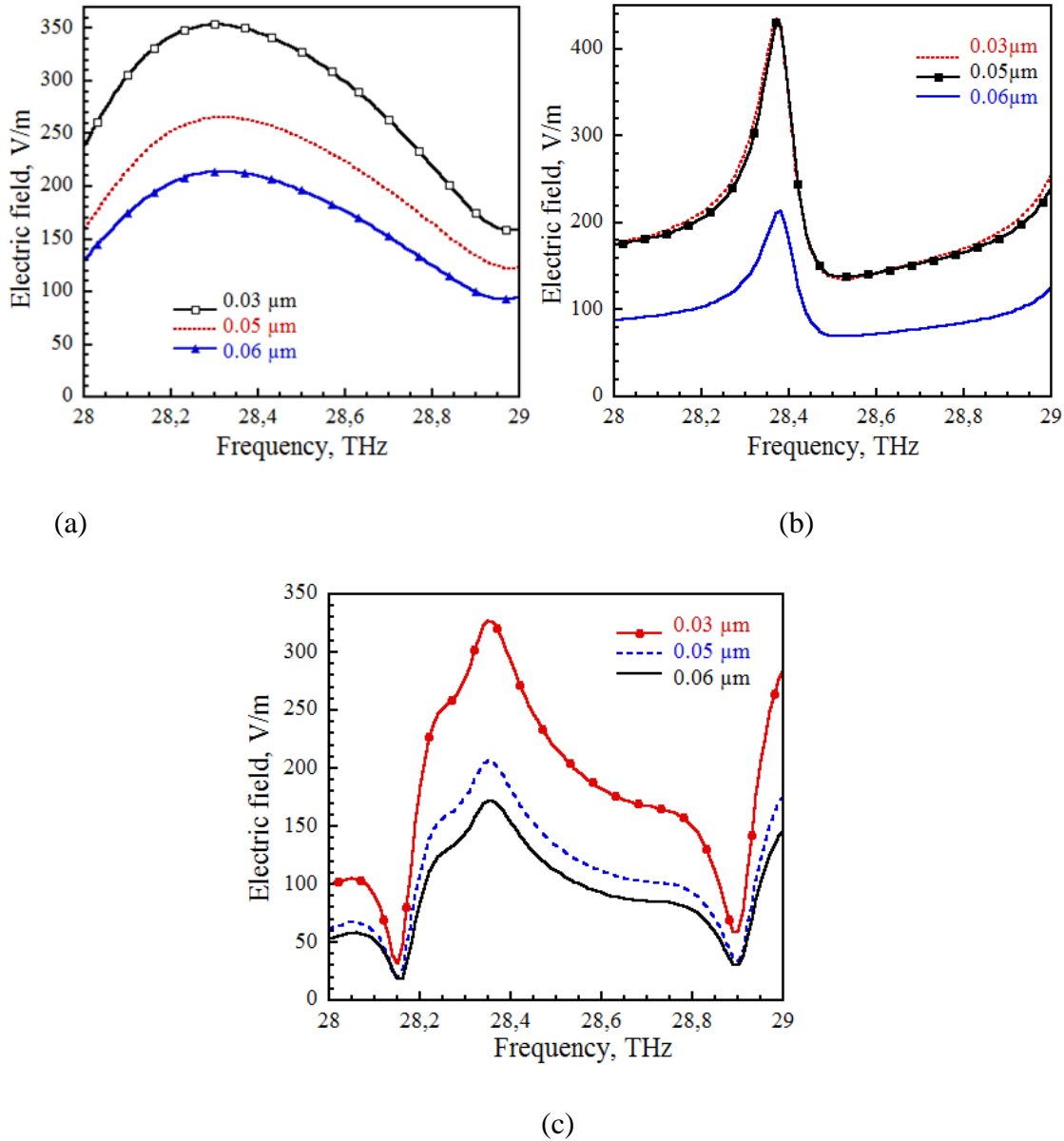


Figure 19 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs du gap : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie (c) antenne elliptique.

4.1.4 Effet de l'épaisseur du dipôle

La figure 13 présente l'effet de l'épaisseur du dipôle sur le champ collecté dans la fente. On peut constater que l'épaisseur du dipôle n'a pas d'effet sur le champ collecté, que ce soit pour les formes de dipôles rectangulaires ou elliptiques. Cependant, la forme en bowtie d'une épaisseur de 0,06 μm permet d'atteindre 487 V / m comme valeur maximale du champ électrique.

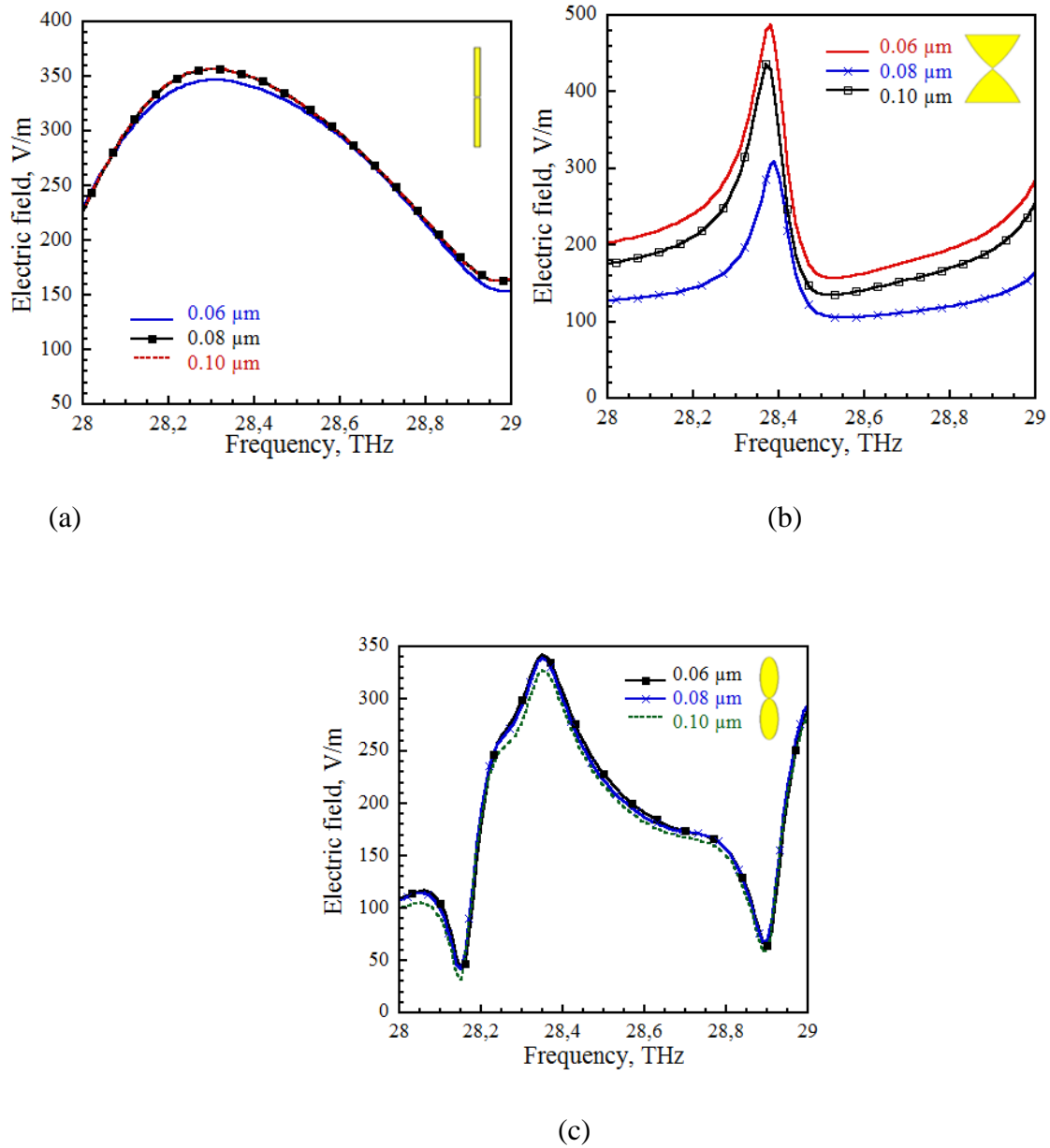


Figure 20: Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs de l'épaisseur du dipôle en or : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie, (c) antenne elliptique

4.1.5 Effet de l'épaisseur du substrat

L'effet de l'épaisseur du substrat diélectrique est étudié afin de déterminer l'épaisseur du substrat qui réalise la valeur la plus grande du champ capturé. La figure 21 montre l'effet de l'épaisseur du substrat sur la valeur collectée du champ électrique concentré dans la fente. Comme le montrent les figures 21 (a) et (b) pour les formes de dipôle rectangulaires et en bowtie, nous remarquons que le champ électrique capturé dans a la valeur la plus élevée à 28,3 THz lorsque l'épaisseur du substrat est de 100 μm. Toutefois, pour le dipôle

elliptique avec une épaisseur de substrat de 150 μm , le champ électrique maximal au niveau de la fente est réalisé à 28,3 THz.

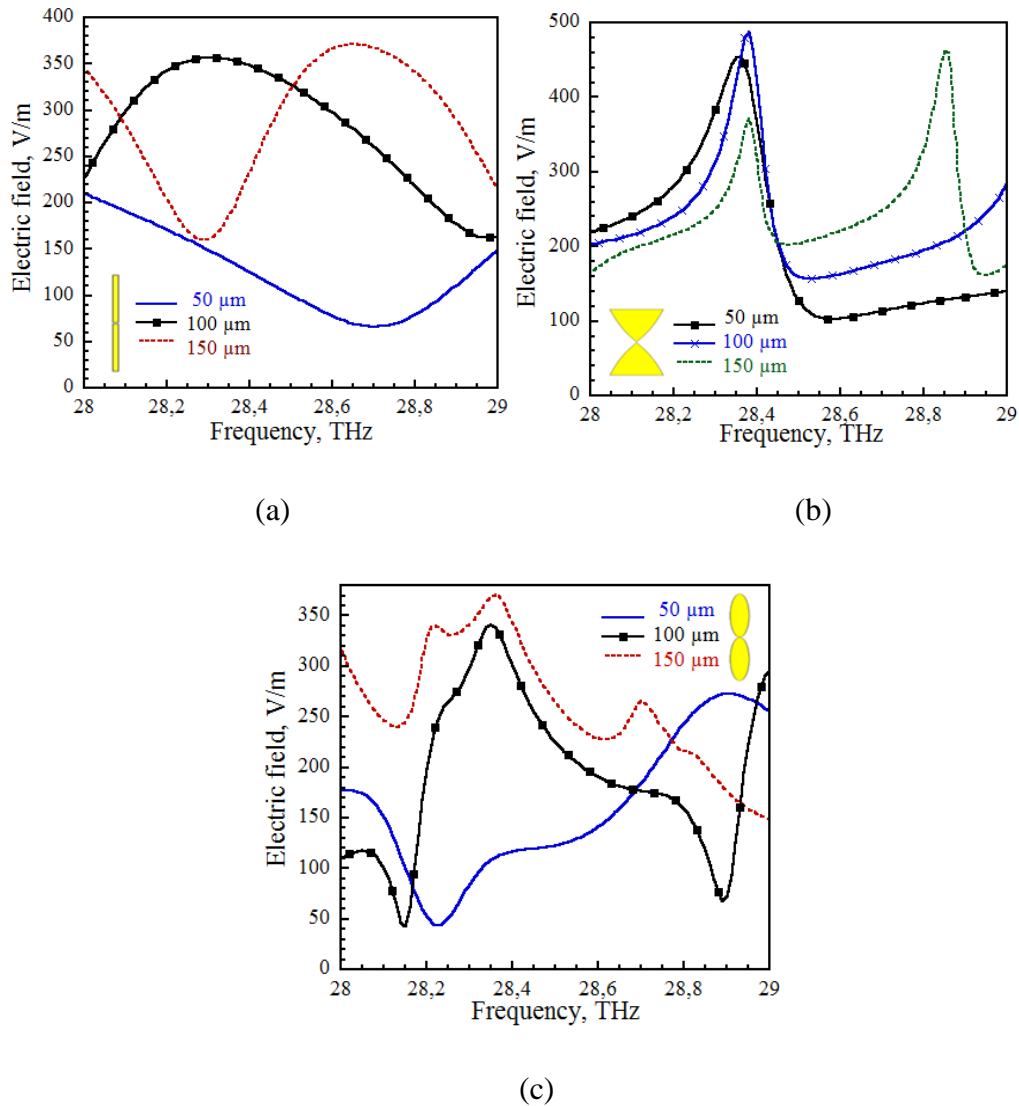


Figure 21: Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs d'épaisseur de substrat en quartz : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie, (c) antenne elliptique.

4.1.6 Effet de l'épaisseur du plan de masse

Nous pouvons voir sur la Fig.22 qu'une augmentation de l'épaisseur du plan de masse augmente le champ électrique collecté. Quatre valeurs des épaisseurs de plan de masse 0, 0.1, 0.2 et 0.3 μm sont utilisées. Les figures 22 (a), (b) et (c) montrent que le champ électrique maximal concentré est atteint lorsque l'épaisseur du plan de masse est de 0,2 μm et que l'on gagne peu en augmentant l'épaisseur au-delà.

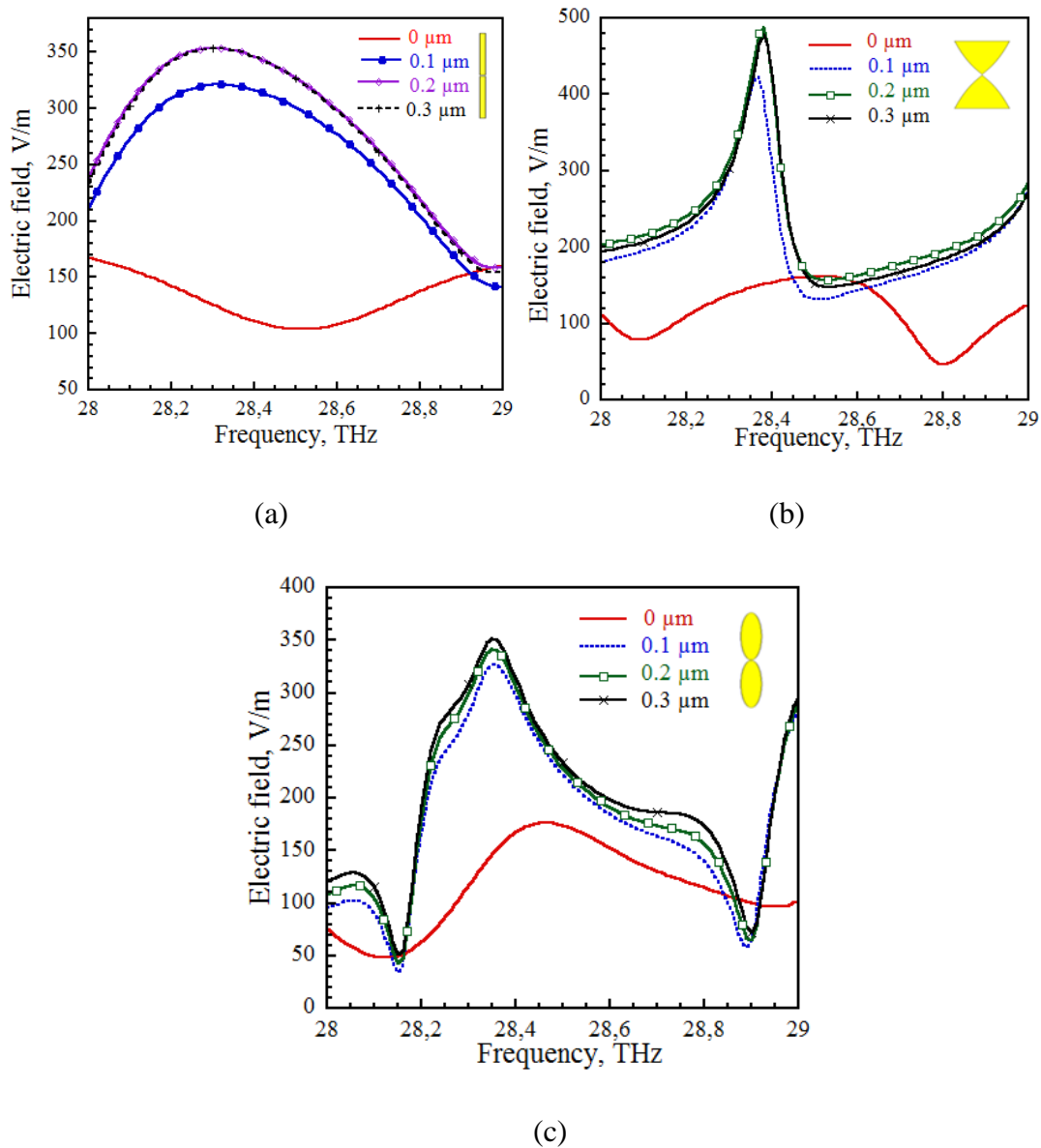


Figure 22 : Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les antennes conçues avec différentes valeurs de l'épaisseur du plan de masse en or : (a) dipôle rectangulaire, (b), bowtie, (c) antenne elliptique.

Tableau 4- dimensions des structures optimisées

Antenne dipôle	Valeurs(μm)	Antenne Bowtie modifiée	Valeurs (μm)	Antenne elliptique	Valeurs (μm)
L_{s1}	3.8	L_{s2}	7	L_{s3}	17
W_{s1}	1.2	W_{s2}	4	W_{s3}	4
L_d	1.8	L_b	2.5	L_e	8

W_d	0.15	W_b	2.504	W_e	1.6
G_d	0.03	$W_{min}=G_b$	0.05	G_e	0.03
-	-	W_{max}	5.05	-	-
-	-	V	0.72	-	-

Le tableau 4 représente les dimensions optimisées des trois antennes qui génèrent le maximum de champs électriques au niveau de la fente.

4.2 Etude de l'effet de l'angle de polarisation

Nous avons étudié l'effet de l'onde plane incidente avec différents angles de polarisation. La figure 23 montre la configuration des ondes planes incidentes pour les trois antennes que nous avons proposées. L'effet de l'angle θ a été étudié afin de réaliser le champ électrique maximal collecté au niveau de la fente dipolaire, où θ est l'angle incident de l'onde plane. Comme le montre la figure 23 (a, b), le champ électrique incident E est situé le long de l'axe du dipôle (le long de y) et la direction de propagation u est perpendiculaire au dipôle, c'est-à-dire (le long de $(-z)$) pour les trois antennes simulées. Les figures 24 (a, b, c) montrent la variation du champ capturé sur la bande de fréquences étudiée pour différentes valeurs de θ . Il est évident que le champ électrique maximal se produit lorsque $\theta = 0^\circ$ pour les trois formes. En effet, à $\theta = 0^\circ$, la direction du champ électrique est parallèle à l'axe des y , qui contient les dimensions les plus longues des antennes.

Le tableau 2 représente le champ maximal collecté, pour un rayonnement onde plane avec différents angles de polarisation. On conclut que pour différentes formes d'antennes dipôles et pour la polarisation linéaire avec $\theta = 0^\circ$, le meilleur résultat pour le champ capturé dans le gap est obtenu avec un substrat de quartz d'une épaisseur de $100 \mu m$ et un conducteur en or de $0,10 \mu m$ pour le dipôle rectangulaire, $0,06 \mu m$ pour l'antenne bowtie modifiée et l'antenne elliptique.

La figure 23 décrit la distribution du champ électrique capturé au niveau du gap à la fréquence 28,3 THz pour la nano-antenne dipolaire rectangulaire représentée sur la figure 24 (a) ; La nano-antenne bowtie courbée est montrée à la Fig.24 (b) et la nano-antenne dipôle elliptique est représentée à la Fig.24(c). Les valeurs maximales du champ électrique à travers la fente entre antennes sont de $370V / m$ (voir Fig.24 (a) ; $501 V / m$ (voir Fig.24 (b) ; et $354V / m$ (voir Fig24 (c)) à la fréquence de résonance de 28,3 THz.

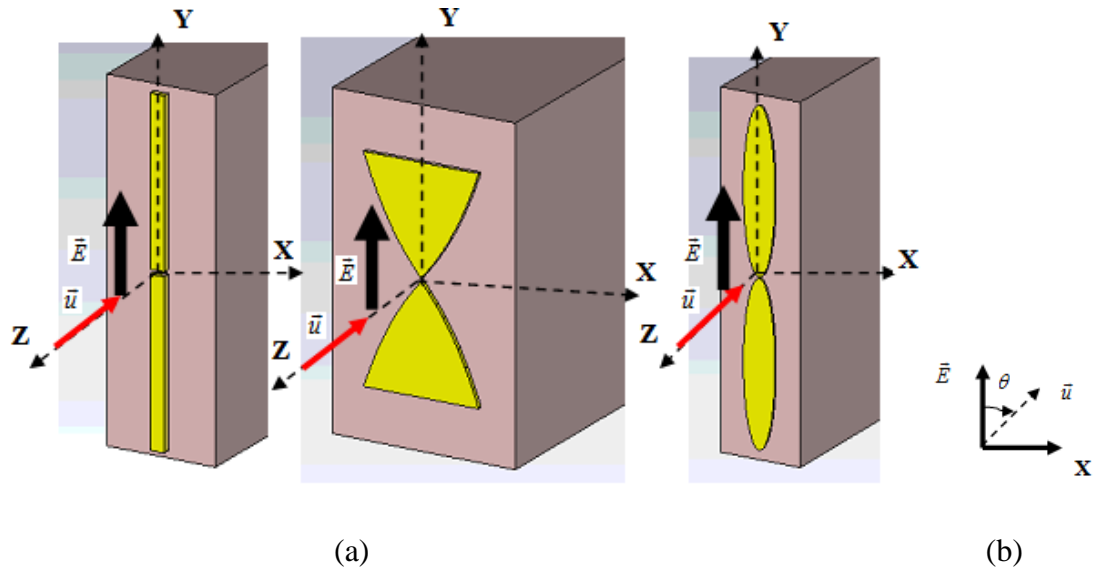
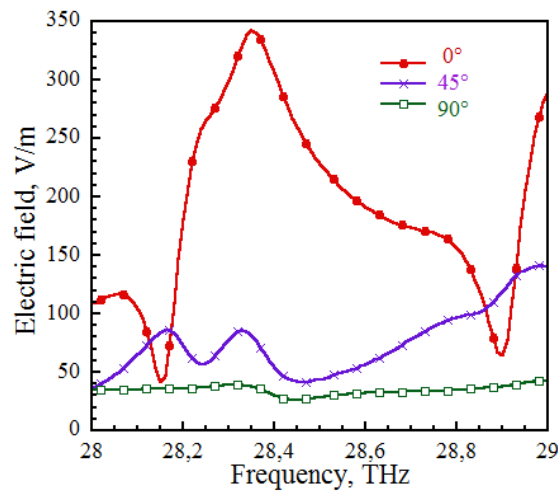
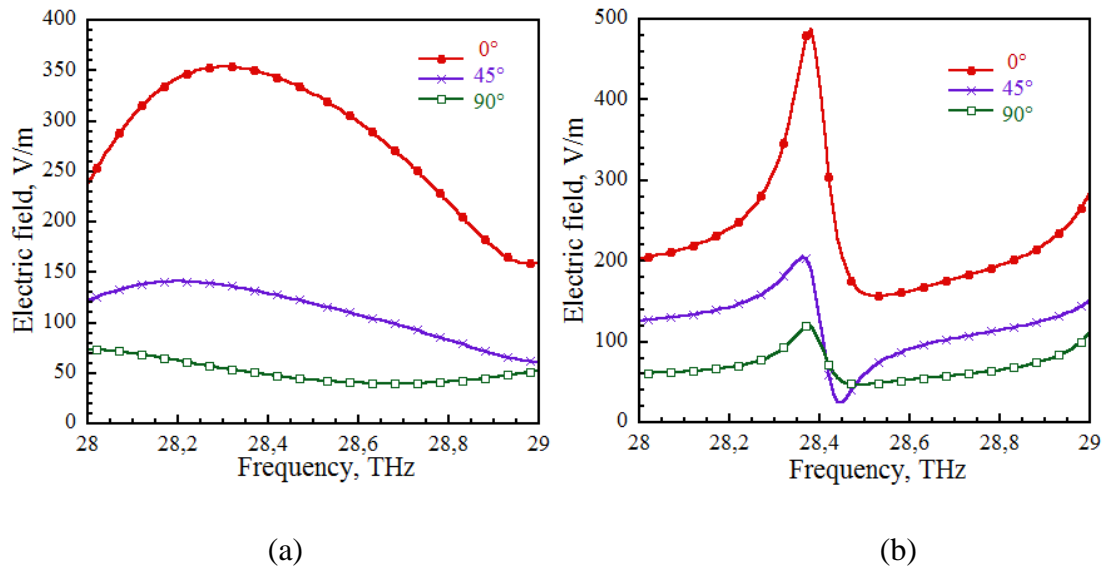


Figure 23 : Configuration des ondes planes incidentes pour les trois antennes proposées



(c)

Figure 24 : L'effet de la variation de l'angle de polarisation θ : (a) : dipôle rectangulaire, (d) : Bowtie et (c) : antenne elliptique.

Tableau 5- Valeurs du champ maximal à la fréquence de résonance (28.3THz) pour différents angles de polarisation

ϕ	E- Max(V/m)	Type d'antenne
0°	346	5 Dipole rectangulaire
45°	137	
90°	55	
0°	487	Bowtie modifiée
45°	194	
90°	85	
0°	342	Dipôle elliptique
45°	84	
90°	39	

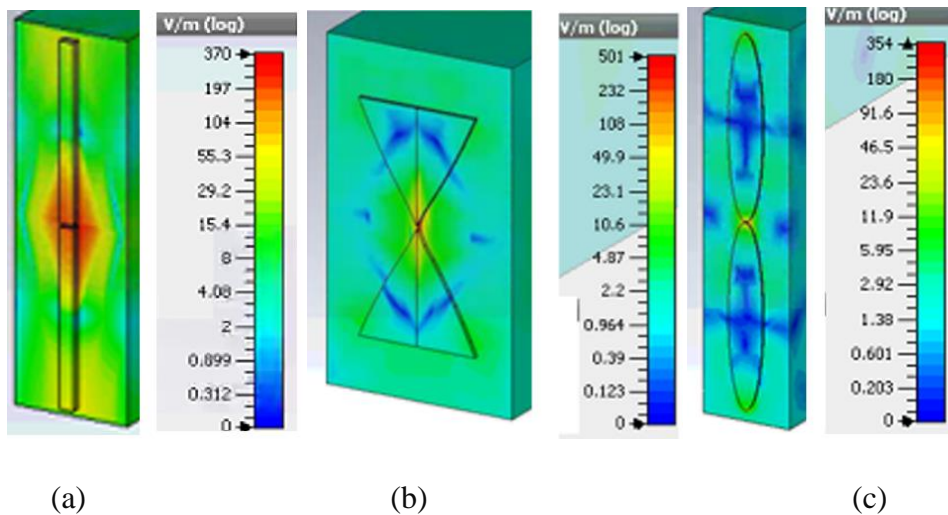


Figure 25: La distribution de l'intensité électrique pour le nano-antenne(a) : dipôle rectangulaire, (b) : antenne bowtie à courbure, dipôle elliptique à la fréquence 28,3 THz

6 Conclusion

Trois différentes formes de dipôle qui fonctionnent dans la région infrarouge sont introduites pour la récupération d'énergie IR dans la bande de fréquences de 28-29 THz, qui contient la valeur la plus élevée de l'énergie IR ambiante à 28,3 THz. Nos objectifs principaux sont la collecte du rayonnement électromagnétique IR en utilisant différentes formes d'antenne afin d'augmenter la valeur du champ électrique capturé au niveau de la fente. Nous concluons sur d'après les résultats des simulations que la valeur maximale du champ électrique capturé dans la fente dépend de différents paramètres tels que la géométrie, la dimension, l'épaisseur et la permittivité du substrat, le type de métal et la polarisation. Les trois antennes proposées ont été étudiées pour obtenir le champ électrique maximal collecté dans la fente entre les deux dipôles. L'étude paramétrique est réalisée en investissant l'effet de la longueur du dipôle, de sa largeur, de la taille de la fente, de l'épaisseur du substrat et de l'épaisseur du plan de masse. L'effet de la polarisation de l'onde plane incidente sur le champ électrique au niveau de la fente a également été étudié.

Chapitre 3 : Effet des propriétés des matériaux sur les performances des nano-antennes infrarouges pour la collecte d'énergie solaire

1 Introduction

L'énergie solaire a récemment été considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus accessibles [1] et peut être exploitée à l'aide d'antennes fonctionnant dans les bandes de fréquences infrarouges ou visibles [2]. Plusieurs antennes infrarouges de formes géométriques différentes ont été étudiées dans ce travail, notamment rectangulaires [3, 4] ; bowtie [5, 6, 7 et 8] ; dipôle [9, 10 et 11] ; elliptique [12] ; et Vivaldi [13].

Les antennes optiques sont actuellement utilisées pour diverses applications médicales telles que le traitement du cancer [14]. Pour le traiter, des antennes optiques sont mises en contact avec le sein malin. L'antenne est excitée par une onde plane proche de l'infrarouge. Le champ intense localisé dans la fente de l'antenne, résultant de l'excitation, provoque une augmentation de la distribution de la température locale, ce qui contribue à la destruction des cellules cancéreuses [15].

L'antenne redresseuse 'rectenna' infrarouge (antenne + redresseur) est composé d'une antenne réceptrice conçue pour les fréquences infrarouges, ainsi que d'une diode de redressement qui convertit les ondes infrarouges en une puissance appropriée. Les antennes redresseuses optiques et infrarouges sont supérieures aux cellules photovoltaïques dont les rendements de conversion sont limités par la bande interdite des semi-conducteurs. Contrairement aux cellules photovoltaïques, ces antennes utilisent l'énergie naturelle du soleil et leur efficacité de conversion peut atteindre jusqu'à 100% [7]. En règle générale, le 'rectenna' doit être conçu de telle sorte qu'il récupère le maximum d'énergie provenant de l'onde électromagnétique incidente. De plus, une bonne adaptation d'impédance entre le redresseur et l'antenne est nécessaire [7] pour obtenir un transfert de puissance maximal. Enfin, la nano-antenne doit être optimisée pour atteindre l'intensité maximale du champ pour la fréquence de fonctionnement spécifique.

Dans ce chapitre, on va essayer d'étudier en premier lieu l'effet des matériaux conducteurs afin de collecter le maximum d'énergie à la fréquence de résonance de 28,3 THz. En

deuxième lieu, l'effet du choix du couche diélectrique 'substrat' pour maximiser l'intensité du champ électrique collecté au niveau de la fente entre les deux bras dipolaires de l'antenne conçue.

2 Les propriétés des conducteurs dans la bande de fréquence terahertz

Le choix des matériaux et la géométrie de l'antenne et de la diode doivent être pris en compte le moment de la conception des nano-antennes. Dans le chapitre précédent, nous avons fait une étude paramétrique très détaillée afin d'optimiser les trois structures conçues pour avoir un champ capturé très amélioré.

Les matériaux utilisés dans la construction des nano-antennes sont généralement des métaux (par exemple, argent et or) pour la couche d'antenne, et un matériau diélectrique transparent pour le substrat, tels que du verre.

Tandis que le métal est considéré comme un conducteur électrique parfait à des fréquences plus basses, par exemple, RF. Ce n'est pas le cas aux fréquences infrarouges dans lesquelles il est de nature plasmonique [16] et est généralement représenté par le modèle de Drude pour décrire les propriétés le déplacement des électrons dans les matériaux [17]. La permittivité complexe ε_c est déterminée par :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (1)$$

Et le modèle de Drude est représenté par l'expression :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_{p1}^2}{\omega^2 - i\Gamma\omega} + \frac{\omega_{p2}^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (2)$$

Dans l'équation (2), où $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$, et ε_∞ est la contribution de l'électron lié à la permittivité, γ désigne la fréquence d'amortissement, ω_p est la fréquence du plasma, ω représente la fréquence angulaire et ω_0 correspond à la fréquence angulaire. Il a été montré dans [17] que l'expression dans (2) s'accorde bien avec les propriétés diélectriques du métal mesurées expérimentalement. Les figures 2 (a) et (b) montrent que la variation des parties réelle et imaginaire de la permittivité pour différents métaux tels que l'or, le cuivre, l'argent, le chrome et le titane a encore une bonne conductivité et de faibles pertes dans la gamme de fréquences 1 à 30 THz. On peut voir que la permittivité électrique varie d'un métal à l'autre et décroît à mesure que la fréquence augmente. Les trois antennes mentionnées ci-dessous sont simulées à l'aide du logiciel CST (Computer Simulation Technology) [18], dans lequel les propriétés du métal de l'or sont calculées à l'aide du modèle drude et insérées dans le CST Microwave Studio. La partie imaginaire de la permittivité est associée aux pertes ohmiques, qui devraient être aussi faibles que possible. Alternativement, nous pouvons maintenir les pertes ohmiques faibles en choisissant un métal ayant une partie négative réelle significative. Le tableau 1

montre les parties réelles et imaginaires de la permittivité complexe de cinq conducteurs en or, cuivre, argent, chrome et titane, la partie imaginaire représentant la conductivité du matériau. Il est évident que l'or a la conductivité la plus élevée et le titane, la conductivité la plus basse.

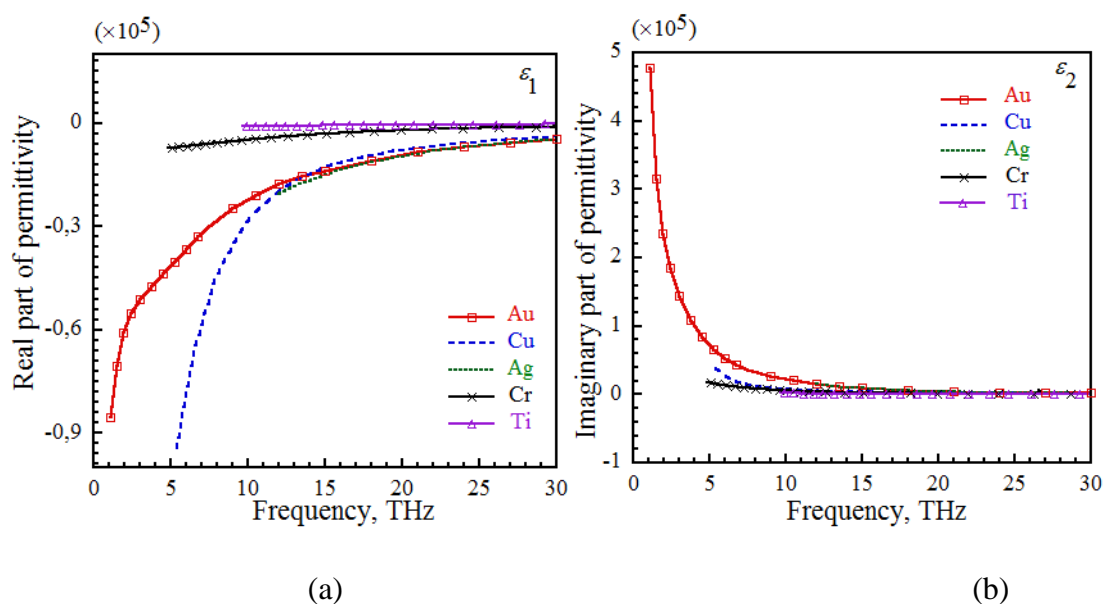


Figure 26: La variation des parties réelles et imaginaires de la permittivité pour différents métaux

Tableau 6- Les valeurs de la partie réelle et imaginaire de la permittivité à la fréquence 28,3 THz

Conductor	ϵ_1	ϵ_2
Gold (Au)	-5605.6	2243.2
Copper (Cu)	-4261.8	1186.2
Silver (Ag)	-5061.3	1566.1
Chromium (Cr)	-1132.5	563.18
Titanium (Ti)	-306.94	301.73

3 Conception des nano-antennes optimisées

3.1 Configuration

La capacité des nano-antennes à capturer le champ électrique dans une petite zone chaude a été largement étudié dans les dernières années.

La recherche dans le domaine des nano-antennes a commencé par l'étude de la diffusion de la lumière à partir de nanoparticules simples, puis développée et étendue pour coupler deux particules sous forme d'antenne.

Plusieurs types de structures ont été récemment utilisés comme nano-antennes, cependant, seules les structures simples ont été considérées dans les études théoriques en raison du problème de diffusion simple de ces structures dans le régime visible ainsi que dans le régime infrarouge. Cela comprend les dipôles, les bowtie, les spirales carrées, les spirales d'Archimède, les boucles et les disques.

Dans certains cas, plus de deux éléments ont été couplés dans une seule antenne pour augmenter le champ localisé dans la fente d'alimentation de l'antenne, tels que les nano-antennes croisés et la structure Yagi-Uda. De nombreuses tentatives ont étudié l'effet géométrique des structures sur la réponse de l'antenne en comparant les performances de différentes configurations pour trouver l'optimum et le meilleur résultat pour une application particulière.

Dans ce travail, une étude est menée sur les métaux des nano-antennes dipôles, bowtie et dipôle elliptique conçues afin de déterminer leur faisabilité de capturer le rayonnement solaire IR pour la récupération d'énergie.

Ces structures présentent la plupart des propriétés de rayonnement dans le domaine RF, cependant, le rôle de la fente d'alimentation et la dispersion des champs à des fréquences infrarouges doivent être soigneusement examinés.

3.2 Conception des nano-antennes

Les nano-antennes devraient également être en mesure de concentrer efficacement le rayonnement entrant et de le guider dans la direction souhaitée. Idéalement, le matériau utilisé dans la construction du nano-antenne ne devrait présenter aucune perte lors de la collecte du rayonnement électromagnétique, mais ceci est difficilement réalisable en raison de la conductivité finie des métaux aux fréquences THz.

Les nano-antennes infrarouges (IR) proposées ont été conçues pour la collecte de l'énergie solaire captée dans la gamme de fréquences infrarouges de 28 à 29 THz. Les trois formes d'antenne différentes sont optimisées pour atteindre un niveau maximal de l'intensité du champ électrique à 28,3 THz. Les trois formes de dipôle proposées sont rectangulaires, bowtie à forme exponentielle et elliptique. Les antennes sont imprimées sur un substrat diélectrique et placées sur un plan de masse conducteur. Le plan de masse a une épaisseur de $0,2\ \mu\text{m}$ afin d'améliorer le couplage de l'antenne avec le substrat. Chacune des trois formes est étudiée afin de déterminer l'effet du choix de la forme du dipôle ainsi que de ses propriétés matérielles sur le niveau d'énergie possible d'être collecter dans la fente entre les deux armatures des différentes antennes.

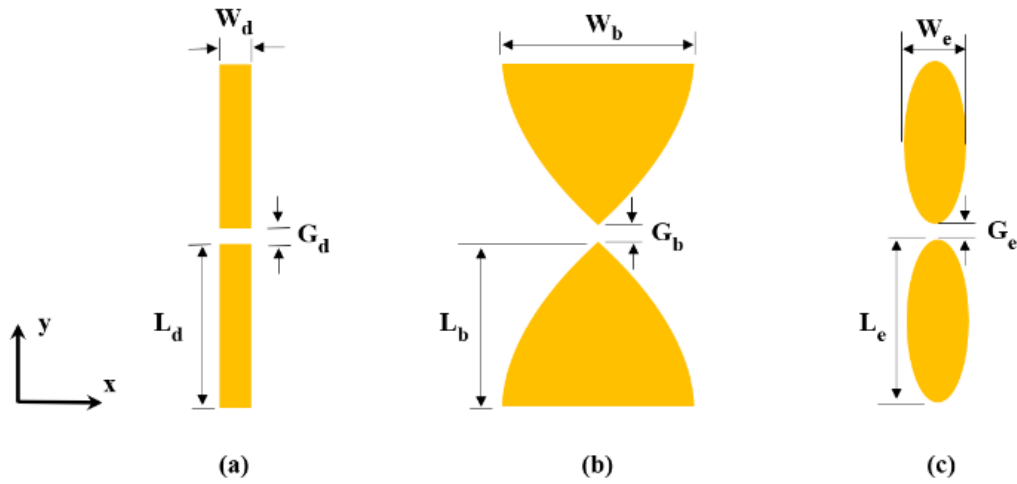


Figure 27: Structure de nano-antennes optique dipôle proposée : (a) : rectangulaire, (b) : Bowtie, (c) : nano-antennes elliptiques en IR

Nous commençons par la première structure, un dipôle en or de forme rectangulaire, qui présente non seulement ses avantages tels que : petite dimension, faible coût, légèreté et disponibilité, mais aussi très facile à concevoir. L'antenne dipôle rectangulaire proposée est illustrée à la Fig.27 (a). Nous notons que chaque bras rectangulaire a une longueur

$L_d = 1,8\ \mu\text{m}$, une largeur de $W_d = 0,15\ \mu\text{m}$, la largeur de la fente de séparation entre les deux bras du dipôle est $G_d = 0,05\ \mu\text{m}$ et son épaisseur est $0,08\ \mu\text{m}$. Le dipôle rectangulaire est imprimé sur un substrat de quartz (GaAs) dont la permittivité relative $\epsilon_r = 3,75$ et la tangente de perte diélectrique de $0,0004$. Le substrat a une superficie de $3,8 \times 0,2\ \mu\text{m}^2$ et son épaisseur est de $100\ \mu\text{m}$.

Nous passons ensuite au deuxième modèle, qui est une antenne Bowtie. En général, l'antenne Bowtie est constituée de deux bras de forme triangulaire. Cependant ici, les deux bras triangulaires du Bowtie sont conçus pour avoir une forme exponentielle courbée, représentée par l'équation (3), qui décrit le profil effilé de la fente, où B est donné par l'équation (4) et Wmax et Wmin sont les largeurs maximales et largeurs minimales de la fente conique respectivement ; V est le coefficient de la courbure ; et L est la longueur de l'antenne. En outre, ce dipôle Bowtie incurvé est imprimé sur un substrat de GaAs. La figure 27 (b) présente la nano-antenne Bowtie incurvée proposée. Elle est composée de couches d'or dont l'épaisseur est de 0,1 µm et la taille de sa fente est de 0,05 µm. Les paramètres géométriques de cette structure sont les suivants : Ws2 = 4 µm, Ls2 = 7 µm, Wb = 2,52 µm, Lb = 2,5 µm, Wmin = Gb = 0,05 µm, Wmax = 5,05 µm et V = 0,8 µm.

$$g(x) = B(e^{vx} - e^{-vx}) + \frac{w_{min}}{2} \quad (3)$$

$$B = \frac{\frac{w_{max}}{2} - \frac{w_{min}}{2}}{e^{v\frac{w_b}{2}} - e^{-v\frac{w_b}{2}}} \quad (4)$$

La troisième forme du dipôle proposé est elliptique. Elle est constituée en un mince dipôle elliptique en or de 0,1 µm d'épaisseur, imprimé sur un substrat en GaAs de 100 µm. Comme le montre la figure 2 (c), les dimensions de la structure du dipôle elliptique sont Ls3 = 17 µm, Ws3 = 4 µm, We = 1,6 µm, Le = 8 µm et la largeur de l'intervalle est Ge = 0,05 µm.

Pour concevoir le dipôle elliptique, nous utilisons l'équation suivante :

$$\frac{x^2}{\left(\frac{w_e}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{L_e}{2}\right)^2} = 1 \quad (5)$$

Où $\frac{w_e}{2}$ et $\frac{L_e}{2}$ sont respectivement les rayons mineur et majeur de l'ellipse.

4 Effet du conducteur sur le champ capturé

4.1 Propriétés des métaux à des fréquences infrarouges

L'or, l'argent, l'aluminium et le cuivre sont les trois matériaux largement utilisés dans les applications optiques [19]. L'or et le cuivre ont presque les mêmes propriétés diélectriques, avec des réponses similaires à celle prouvées par le modèle de Drude, inférieures à 2,1 eV et le début des transitions interbandes se produisant autour de 2,3 eV (530-550 nm). Ces deux types de matériaux ont généralement une bonne conductivité dans le domaine infrarouge,

alors que le titane a une conductivité faible par rapport aux autres métaux précédemment étudiés.

Dans la bande de fréquence térahertz, la conductivité du métal est une expression complexe est donnée par :

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (6)$$

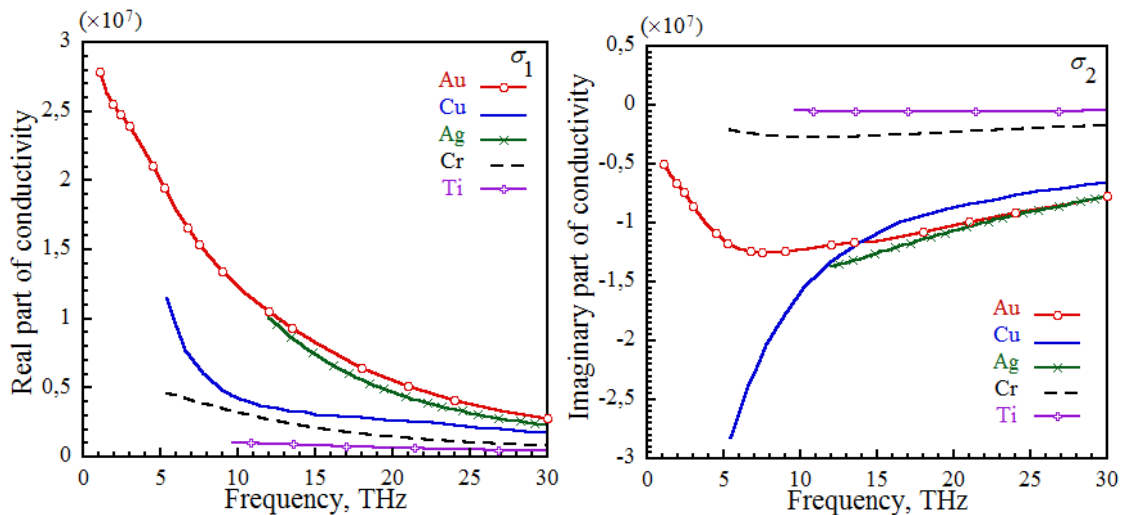
σ_1 et σ_2 peuvent être calculés en utilisant les équations suivantes :

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \omega \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \varepsilon_0 (\varepsilon_1 - 1) \omega \quad (8)$$

La conductivité de différents métaux est calculée pour différentes valeurs de fréquences en utilisant les expressions ci-dessus. Les figures 28 (a) et (b) montrent les variations de la conductivité de différents métaux en fonction de la fréquence. Il est évident que la conductivité des métaux diminue à mesure que la fréquence augmente. De plus, les valeurs réelles et imaginaires de la conductivité de l'or sont supérieures à celles des autres métaux, car l'or est caractérisé par sa forte absorption du rayonnement aux fréquences térahertz [7]. En outre, l'argent et le cuivre ont des valeurs proches en conductivité. Cela peut être noté dans le tableau 2.

Il est également évident de mentionner que la conductivité du titane est inférieure à celle de l'or, du cuivre, de l'argent et du chrome.



(a)

(b)

Figure 28: Variation de la conductivité du métal en fonction de la bande de fréquence[0 ... 30THz]

Tableau 7- Partie réelle et imaginaire de la conductivité à 28,3 THz

Type de conducteur	σ_1	σ_2
Or (Au)	0.33728×10^7	-0.84305×10^7
Cuivre (Cu)	0.18855×10^7	-0.67762×10^7
argent (Ag)	0.25012×10^7	-0.80856×10^7
Chrome (Cr)	0.088890×10^7	-0.17893×10^7
Titane (Ti)	0.047507×10^7	-0.048489×10^7

4.2 Effet des différents conducteurs sur la distribution des champs capturés

4.2.1 Effet d'un seul type de conducteur pour les deux armatures de nano-antennes

Une onde incidente à polarisation linéaire lancée sur la face supérieure du substrat et se propage le long de la direction négative (- z) avec un vecteur de champ électrique parallèle à l'axe des x, est utilisé pour exciter les trois nano-antennes conçues. Une étude paramétrique sur les types des matériaux utilisés a été réalisée pour avoir un champ électrique maximal à la fente dipolaire. Lorsque l'antenne est excitée dans un mode de résonance, elle induit un mouvement cyclique d'électrons libres dans le plasmon de la nano-antenne. Les électrons circulent le long de l'antenne, générant un courant alternatif à la même fréquence de l'onde incidente. Les dimensions des structures dipolaires infrarouges sont optimisées pour avoir un champ électrique le plus élevé à 28,3 THz (dans le chapitre2).

La capacité des nanoparticules d'or à confiner et à améliorer le champ électrique dans la région du champ proche a conduit à leur utilisation comme antennes pour de nombreuses applications en réduisant la théorie électromagnétique classique.

La figure 29 montre la distribution du champ capturé au centre des trois antennes, on a varié trois types de conducteurs tels que l'or, cuivre et titane. Nous avons évalué l'effet de la variation de ces trois types de conducteur sur le champ électrique concentré dans la fente.

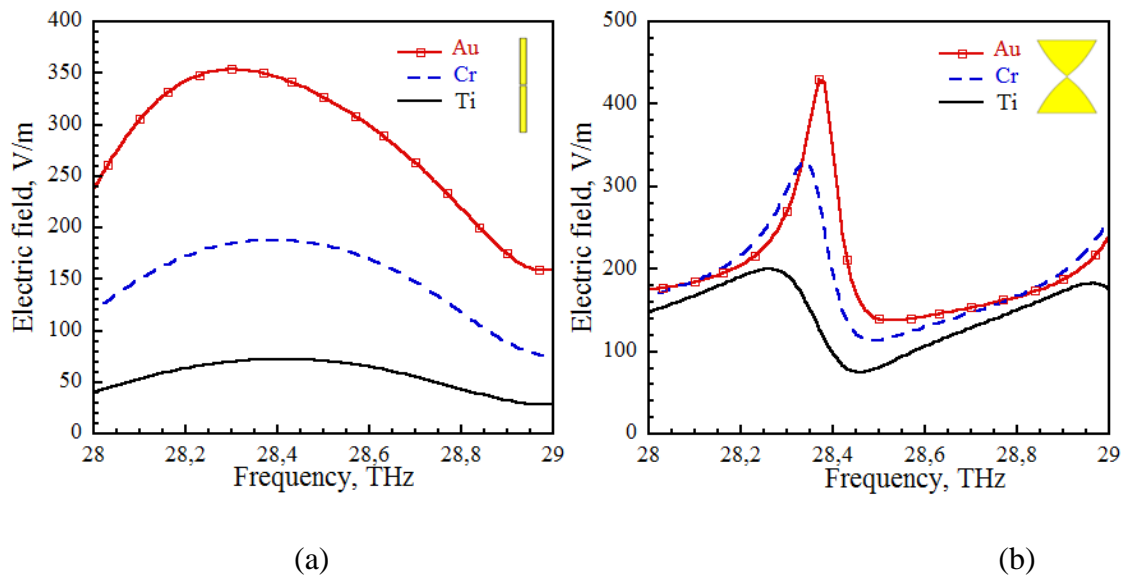
Nous remarquons que le champ électrique capturé à travers la fente est modifié avec la variation du type du conducteur utilisé. Comme le montre la figure 29, si la conductivité diminue, le champ maximal reçu augmente. Par conséquent, la variation de du métal utilisé a considérablement affecté la valeur du champ électrique capturé.

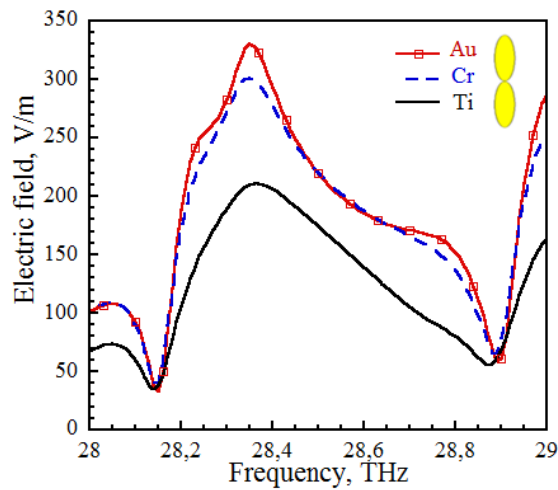
Le résultat de simulation (Fig.29) montre la variation de l'intensité du champ électrique du nano-antenne à deux bras à métal identique, où il peut être mentionné que la plus grande partie du champ électrique est concentrée dans la région de la fente d'alimentation entre les deux armatures à la fréquence de résonance 28.3 THz

Il est à noter que la configuration utilisée présente un rayonnement dipolaire lorsqu'elle est éclairée par une onde plane polarisée le long de l'axe de l'antenne.

Pour l'or, nous avons obtenu une valeur maximale du champ reçu optimale. Cette valeur est supérieure à celle fournie par la nano-antenne avec le cuivre et le titane à 28.3 Tz, qui atteint 184.67, 72.67 respectivement pour le dipôle rectangulaire, 328.32 V/m, 190 V/m pour le dipôle bowtie et 282.4, 210.56 V / m respectivement pour le dipôle elliptique, comme illustré à la Fig. 29.

L'or est choisi pour les trois antennes conçues : dipôle rectangulaires, bowtie incurvé et dipôle elliptique qui atteignent des intensités de champ de 350,75, 429,858 et 330,01 V / m, respectivement, à 28,35 THz. Ce choix est basé sur les résultats obtenus à partir de la simulation de ces antennes qui est illustré à la Fig. 29.





(c)

Figure 29: L'effet du type de métal sur la variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour le dipôle : (a) rectangulaire, (b) : Bowtie à courbure et (c) elliptique.

4.2.2 Effet de deux types de conducteurs combinés pour les deux armatures de nano-antennes

Un ensemble de conducteurs est utilisé pour chaque dipôle, au lieu d'un seul conducteur pour chaque bras. En combinant l'or avec le chrome, l'or avec le titane et le chrome avec le titane. Les figures 30 (a), (b) et (c) montrent l'effet des conducteurs sur le champ électrique collecté dans la fente entre les deux armatures pour les trois formes de dipôle différentes. On peut noter que les structures avec l'or collectent le champ électrique plus élevé que les autres structures. La combinaison de l'or avec le chrome donne le champ collecté le plus élevé pour les trois formes d'antennes.

En fait, ces types d'antennes offre une souplesse pour augmenter ou optimiser le champ électrique collecté dans le gap. Des approches consistent à faire varier la taille de la fente ou à augmenter la taille de structures étudiées comme nous avons fait dans chapitre 2. Aussi la variation du type de conducteur et du substrat peut augmenter et améliorer le champ capturé. Il existe d'autres techniques pour augmenter le champ électrique collecté au niveau du gap tel que les réseaux d'antennes.

Dans le cas de nano-antenne à deux bras, les charges de surface propagées vers les extrémités proches des deux bras seront confinées et concentrées au niveau de la fente, générant une intensité de champ proche fortement accrue à cause de l'oscillation harmonique des tiges.

L'amélioration du champ dans la fente peut être déterminée en déterminant la taille du gap. En outre, la résonance de la nano-antenne à deux bras peut être contrôlée en choisissant correctement les matériaux ainsi que les dimensions géométriques de l'antenne.

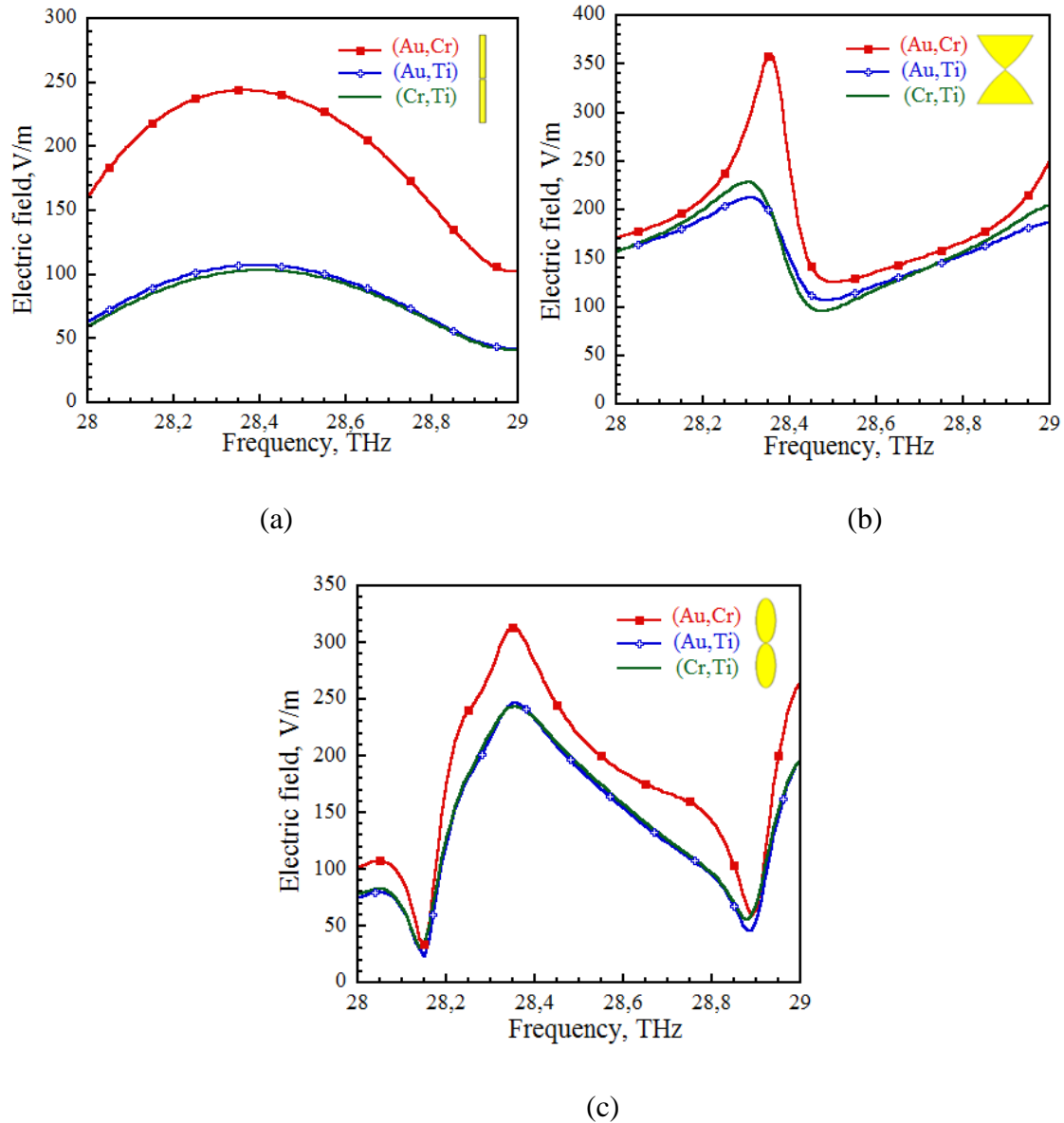


Figure 30: L'effet de deux types de métal sur la variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour le dipôle : (a) rectangulaire, (b) : Bowtie à courbure et (c) elliptique.

La Fig. 30 montre la variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour les trois nano-antennes étudiées. Toutes les nano-antennes présentent une fréquence de résonance de 28.3 THz, cependant, la magnitude du champ électrique capturé à la résonance est différente. Il est clair que l'antenne bowtie a la plus grande valeur comparée au nano-antenne dipolaire et

elliptique, tandis que la combinaison contenant le titane comme conducteur a la valeur la plus basse de champ électrique.

Il est démontré que l'or est le meilleur choix parmi les divers matériaux utilisés dans les nano-antennes en raison de sa stabilité chimique et du fait qu'il souffre d'une oxydation moindre par rapport à d'autres matériaux [3] [sabaoui 2015].

Le tableau ci-dessous résume les différentes valeurs maximales simulées du champ pour les trois antennes proposées par rapport à la fréquence avec la variation du type de conducteur utilisé afin d'analyser les performances de l'antenne. Comme vu, cette antenne offre de meilleures performances autour de la fréquence de 28,3 THz.

Tableau 8- E-Max aux fréquences de résonance pour différents types de conducteurs.

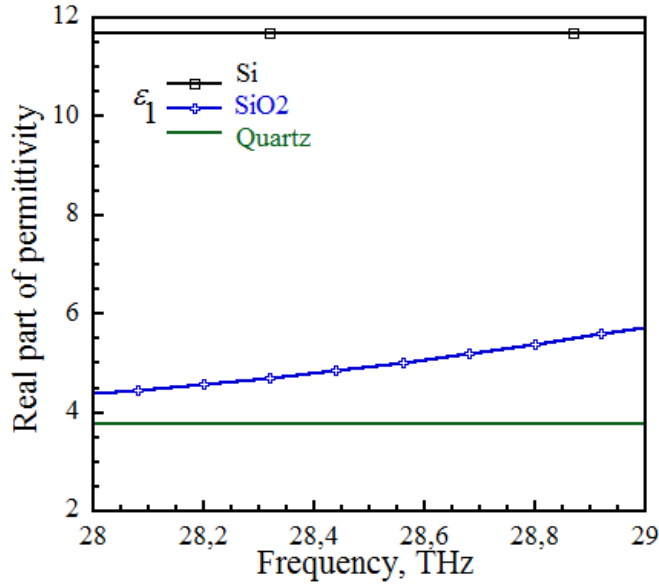
Forme dipolaire	Type de métal	Fréquence de résonance (THz)	E-Max(V/m)
rectangulaire	Au	28.30	353.75
	Cr	28.37	188.00
	Ti	28.42	72.67
	(Au, Cr)	28.36	244.032
Bowtie	Au	28.33	429.858
	Cr	28.34	331.529
	Ti	28.26	200.67
	(Au, Cr)	28.35	357.63
elliptique	Au	28.32	327.20
	Cr	28.35	301.39
	Ti	28.32	200.03
	(Au, Cr)	28.35	313.22

5 Effet du type de substrat sur le champ capturé

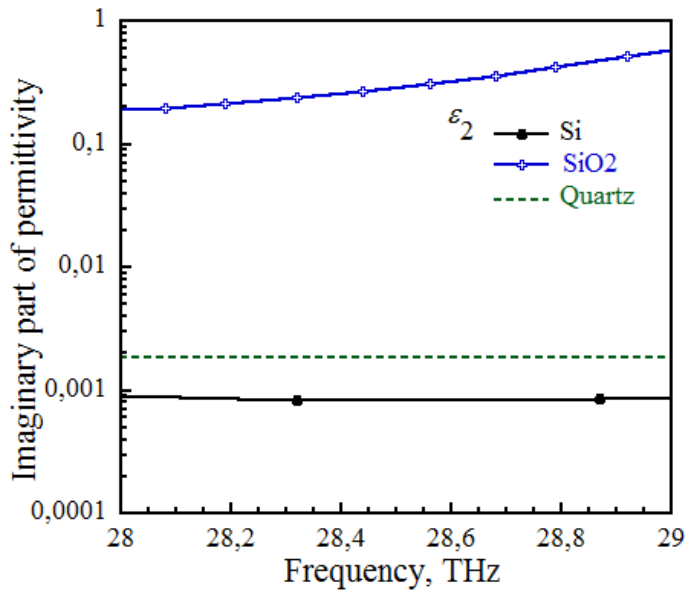
Le choix du matériau diélectrique joue également un rôle important dans la conception des antennes. La meilleure stratégie consiste évidemment à choisir un substrat à faible perte. En infrarouge, le type de substrat joue un rôle très important dans l'amélioration de l'amplitude du champ électrique dans l'espace de la structure de l'antenne. Nous avons étudié trois substrats différents pour déterminer lequel offre les meilleures performances. Les trois

substrats sont : Quartz (GaAs, $\epsilon_r = 3,75$, $\tan(\delta) = 0,0004$), silicium (Si, $\epsilon_r = 11,9$, $\tan(\delta) = 0,00025$) et oxyde de silicium (SiO₂, $\epsilon_r = 4,71$, $\tan(\delta) = 0,0506$ à 28,3 THz).

Les figures 6 (a) et (b) montrent les variations des parties réelle et imaginaire de la permittivité relative pour les trois matériaux de substrat différents par rapport à la plage de fréquences de 28-29 THz. Ces trois substrats différents permettent d'évaluer leur effet sur le champ électrique capturé dans les interstices des dipôles.



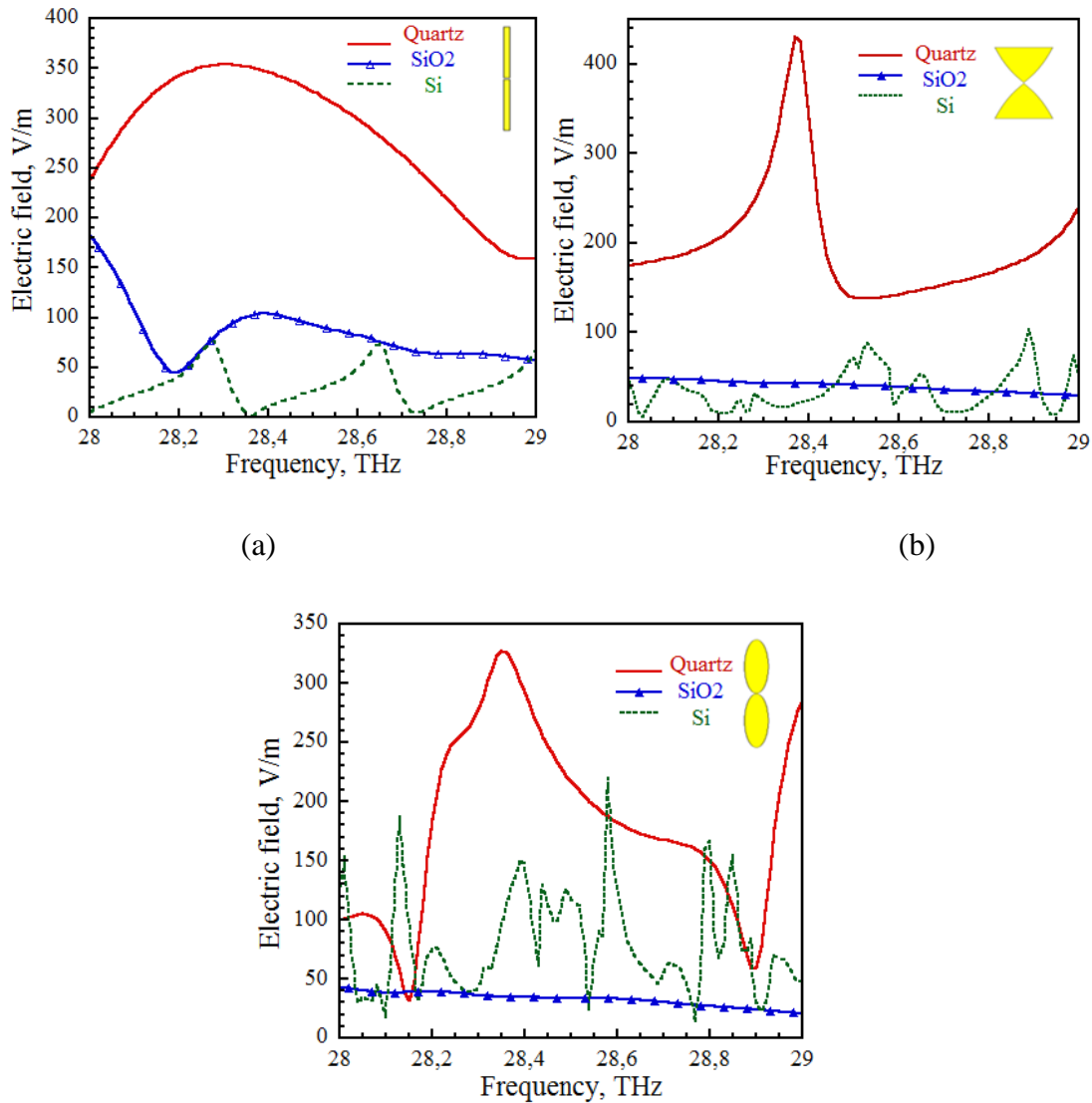
(a)



(b)

Figure 31: Partie réelle et imaginaire de la permittivité relative des substrats étudiés

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 31, où on peut observer que la nano-antenne avec substrat de type quartz a atteint le champ électrique le plus élevé au niveau de la fente entre les deux bras, car le quartz a la plus faible perte aux fréquences térahertz. La valeur de champ maximale obtenue pour l'antenne dipôle rectangulaire imprimé sur le substrat de type quartz est de 353,743 V / m à 28,3 THz ; pour l'antenne dipôle bowtie, la valeur maximale est de 429,858 V / m à 28,37 THz ; enfin, pour l'antenne dipôle elliptique, la valeur maximale du champ électrique atteint 327,202 V / m à 28,35 THz. Il convient de noter que la permittivité du substrat affecte à la fois la valeur maximale du champ capturé et la fréquence de résonance. De plus, nous notons, d'après la figure 31 (a, b, c) que le substrat de silicium permet de capturer un niveau plus élevé du champ dans toute la bande.



(c)

Figure 32: Effet du type de substrat sur la distribution du champ électrique pour les différentes structures étudiées

Le tableau suivant résume les différentes valeurs maximales simulées du champ pour les trois antennes proposées en fonction de la fréquence en variant le type du substrat utilisé afin d'analyser les performances de l'antenne. Comme vu, cette antenne offre de meilleures performances autour de la fréquence de 28,3 THz.

Tableau 9- E-Max aux fréquences de résonance pour trois types de substrat étudiés.

Forme dipolaire	Type de substrat	Fréquence de résonance (THz)	E-Max(V/m)
Rectangulaire	Quartz	28.30	353.75
	Di oxyde de silicium (SiO ₂)	28.41	103.66
	Silicium	28.65	73.25
Bowtie	Quartz	28.33	429.858
	Di oxyde de silicium	28	49.82
	Silicium	28.55	108.34
Elliptique	Quartz	28.32	327.20
	Di oxyde de silicium (SiO ₂)	28.2	39.47
	Silicium	28.01	153.16

6 Comparaison entre les trois types de nano-antennes

Nous comparons maintenant les trois formes différentes des antennes dipôles conçues après leur optimisation. Il est évident que l'antenne de type bowtie incurvé a la valeur la plus élevée du champ capturé à 28,3 THz, comparés par rapport aux antennes dipolaires de formes rectangulaire et elliptique (voir figure 32).

En comparant les courbes représentant la distribution du champ capturé de l'antenne bowtie avec ceux de la structure rectangulaire et elliptique, on peut observer une plus grande intensité de champ électrique pour la nano-antenne bowtie dans la bande de fréquence étudiée.

Les résultats montrent clairement que l'antenne bowtie offre plus d'énergie à la fente d'alimentation que les dipôles, et cela est due à plusieurs facteurs la géométrie de l'antenne, la forme de deux bras.

La nano-antenne bowtie est considérée comme un bon design utilisé pour remplacer les antennes nano-dipôles car elle produit un champ électrique plus puissant dans la fente de l'antenne.

Cette configuration donne au concepteur la liberté de faire varier plusieurs paramètres d'antenne afin d'augmenter le champ électrique capturé dans la fente, ce qui est un facteur clé dans cette application. Ces paramètres incluent la taille de la fente, l'angle au sommet et l'antenne, les dimensions et les épaisseurs.

Un autre avantage des nano-antennes bowtie est la possibilité de construire un réseau en couplant de nombreux éléments dans une configuration et en combinant le champ électrique de chaque élément au point d'alimentation du réseau, où un MIM diode peut être intégré

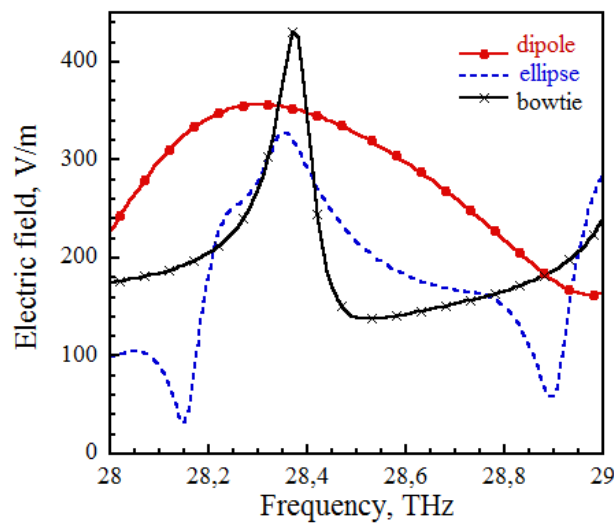


Figure 33: Variation du champ électrique en fonction de la fréquence pour le cas optimal de différentes formes d'antenne dipolaire.

7 Conclusion

Dans ce chapitre, un ensemble de nano-antennes optiques à ultra-large bande opérant dans la région infrarouge ont été proposés et optimisés pour collecter le maximum d'énergie. Une combinaison de trois formes dipolaires différentes, de trois métaux différents et de trois types de substrats a été étudiée. Il a été démontré que l'utilisation de l'or en tant que conducteur a permis d'atteindre l'intensité de champ électrique la plus grande entre toutes les combinaisons

dipôle / substrat, de même que le quartz pour toute combinaison dipôle / conducteur. Cela est dû à l'or ayant la conductivité la plus élevée et au quartz ayant la perte la plus faible. Nous proposons une étude similaire dans laquelle une diode métal-isolant-métal (MIM) avec une mince couche isolante en Al_2O_3 est insérée dans la fente séparant les deux armatures des antennes.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est la conception des nano-antennes de hautes performances pour la collection de l'énergie solaire pour améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en électricité.

En effet, nous avons exposé, dans une première étape des généralités sur les antennes état de l'art sur les nano-antennes.

Ensuite nous avons consacré un deuxième chapitre pour parler de la conception des nano-antennes et de présente les résultats de simulation utilisant le logiciel commercial CST MICRO-WAVE STUDIO.

Enfin le troisième chapitre constitue le cœur du travail réalisé. Il est consacré d'étudier l'effet des propriétés des matériaux sur les performances des nano-antennes infrarouges pour la collecte d'énergie solaire .

Nous avons étudié trois structures théoriquement et vérifiées pratiquement selon divers changement des paramètres géométriques avec des études paramétriques et d'optimisations tels que les vais pour atteindre des meilleures performances, et d'après les résultats que nous avons obtenus, nous pouvons conclure que cette conception est conçue avec succès.

Bibliographie

Chapitre 1

- [1] W. Amara, N. Elresty, A. Yahyaoui, H. Rmili, T. Aguilu et JM Floch, «Conception de nano-antennes ultra-large bande pour la récupération d'énergie solaire», Conférence de Loughborough sur les antennes et la propagation, LAPC, novembre 2017 .
- [2] D. Kotter, S. Novack, W. Slafer, and P. Pinhero, "Theory and manufacturing processes of solar nanoantenna electromagnetic collectors," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 132, no. 1, p. 011014, 2010.
- [3] P. Biagioni, J.-S. Huang, and B. Hecht, "Nanoantennas for visible and infrared radiation," *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, no. 2, p. 024402, 2012.
- [4] A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis, and B. S. Sharif," Infra-red nano-antennas for solar energy collection," *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, pp. 1-4, 14-15 Nov. 2011.
- [5] D. K. Kotter, S. D. Novack, W. D. Slafer, and P. J. Pinhero," Theory and manufacturing processes of solar nanoantenna electromagnetic collectors," *ASME J. Sol. Energy*, vol. 132, p. 011014, 2010.
- [6] Campbell, M. G. et al.," Preparation of Nanocomposite Plasmonic Films Made From Cellulose Nanocrystals or Mesoporous Silica Decorated with Unidirectionally Aligned Gold Nanorods", s.l, Scopus.2014.
- [7] Lewis, N. S. and Nocera, D. G., 2006. *Powering the Planet: Chemical Challenges in Solar Energy Utilization*, s.l.: HighWire Press.
- [8] AIE., 2013. *Perspectives des énergies renouvelables - Perspectives énergétiques dans le monde 2013*, voir: OCDE / AIE.
- [9] Hester, R., Harrison, R. and Bulkin, B., 2003. *Issues in Environmental Science and Technology, Volume 19: Sustainability and Environmental Impact of Renewable Energy Sources*. ProQuest ebrary ed. Cambridge: GBR: Royal Society of Chemistry.
- [10] Mescia, L. and Massaro, A.,"*New Trends in Energy Harvesting from Earth Long-Wave Infrared Emission*", s.l.: Hindawi Publishing Corporation. 2014.
- [11] Kotter, D. K., Slafer, W. D. and Steven D. Novack, P. P.," *Solar nantenna electromagnetic collectors*", Jacksonville, Florida USA: ASME. 2008.
- [12] Corkish, R., Green, M. A. andPuzzer, T., "Solar Energy Collection by Antennas". *Solar Energy*, Vol. 73(6), pp. 395-401. 2003.

- [13] Maradudin, A. A., Sambles, J. R. and Barnes, W. L., *Modern Plasmonics*. s.l.: Elsevier Science, 2014.
- [14] Fletcher, J. C. and Bailey, R. L., 1973, "Electromagnetic Wave Energy Converter", Gainesville, Florida, Patent No. 3,760,257.
- [15] Nazarov, A., Balestra Francis, K. V. D. F., "Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors and Energy Harvesting". s.l.: Springer.2014.
- [16] Sadashivappa, G., Sharvari, N. P., Nanoantenna - A review, Bangaore: "International Journal of Renewable Energy Technology Research".2015.
- [17] A. Alu and N. Engheta, "Theory, modeling and features of optical nanoantennas," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 4, pp. 1508–1517, April 2013.
- [18] Moddel, G. and Grover, S., «Rectenna Solar Cells. «New York, USA: Springer,2013.
- [19] A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis, and B. S. Sharif," Infra-red nano-antennas for solar energy collection," *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, pp. 1-4, 14-15 Nov. 2011.
- [20] Zhu, Z., Joshi, S., Pelz, B. andModdel, G., "Overview of optical rectennas for solar energy harvesting", Boulder, US: SPIE.2013.
- [21] M. Midrio, S. Boscolo, A. Locatelli, D. Modotto, C. De Angelis, and A. Capobianco, "Flared monopole antennas for 10 um energy harvesting," in *Proc. Eur. Microw. Conf.*, 2010, pp. 1496–1499.
- [22] N. A. Eltresy, H. A. Malha, S. H. Zainud-Deen, and K. H. Awadalla, Dual-Polarized Nanoantenna Solar Energy Collector, 33rd National radio science conference (NRSC 2016), Aswan, Egypt, Feb 2225, 2016
- [23] G. Hanson, "Radiation efficiency of nanoradius dipole antennas in the microwave and far-infrared regimes," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 66–77, Jun. 2008.
- [24] Gadalla, M. N., M. Abdel-Rahman, and Atif Shamim. "Design, optimization and fabrication of a 28.3 THz nanorectenna for infrared detection and rectification." *Scientific reports* 4, 2014.
- [25] A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis, and B. S. Sharif, "Bowtie nanoarray rectenna: Design and optimization," in *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propag.*, 2012, pp. 1975–1978.
- [26] A. M. A. Sabaawi, C. Tsimenidis, Bayan S. Sharif," Infra-red Spiral Nano-antennas", Loughborough, UK, 12-13 November 2012.
- [27] I. S. Maksymov, A. E. Miroshnichenko, and Y. S. Kivshar, "Actively tunable bistable optical Yagi–Uda nanoantenna," *Opt. Exp.*, vol. 20, pp.8929-8938, 2012.

- [28] E. A. Soliman, "Circularly polarized nanoring antenna for uniform overheating applications," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, pp. 2209–2214, 2012.
- [29] J. Dorfmueller, R. Vogelgesang, W. Khunsin, C. Rockstuhl, C. Etrich, and K. Kern, "Plasmonic nanowire antennas: Experiment, simulation, and theory," *Nano Lett.*, vol. 10, pp. 3596–3603, Sep. 8, 2010.
- [30] I. E. Hashem, N. H. Rafat, and E. A. Soliman, "Theoretical study of metal insulator-metal tunneling diode figures of merit," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 72–79, Jan. 2013.
- [31] Krasnok, A., Miroshnichenko, A., Belov, P. A. and Kivshar, Y., «All-dielectric optical nanoantennas», s.l.: Optical Society of America, 2012.
- [32] Briones, E., Alda, J. and González, F. J., " Conversion efficiency of broad-band rectennas for solar energy harvesting applications", San Luis Potosi, SLP, Mexico: Optical Society of America, 2013.
- [33] Maksymov, I. S., Staude, I., Miroshnichenko, A. E. & Kivshar, Y. S., "Optical Yagi-Udananoantennas", Canberra, Australia: s.n, 2012.
- [34] P. Bharadwaj, B. Deutsch, and L. Novotny, " Optical antennas," *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 1, Issue 3, pp. 438-483, 2009.
- [35] G. Jayaswal a, A. Belkadi b, A. Meredov a, B. Pelz b, G. Moddel b, A. Shamim a, "Optical rectification through an Al₂O₃ based MIM passive rectenna at 28.3 THz», Elsevier, 2017.

Chapitre 2

- [1] S. V. Boriskina and L. Dal Negro, "Multiple-wavelength plasmonic nanoantennas," *Optics letters*, vol. 35, no. 4, pp. 538–540, 2010.
- [2] P. Biagioni, J. Huang, L. Du'o, M. Finazzi, and B. Hecht, "Cross resonant optical antenna," *Physical review letters*, vol. 102, no. 25, p. 256801, 2009.
- [3] G. Moddel and S. Grover, "Rectenna Solar Cells" Ed. Springer, New York, 2013.
- [4] J. Simon and F. Gonz'alez, "Nanoantennas for polarization division multiplexing," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 2, pp. 120–121, 2011.
- [5] M. Midrio, M. Romagnoli, S. Boscolo, C. De Angelis, A. Locatelli, D. Modotto, and A. Capobianco, "Flared monopole antennas for 10- μ m radiation," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 47, no. 1, pp. 84–91, 2011.

- [6] V. Khoshdel, M. Shokooh-Saremi “Bow-Tie Infrared Antennas for Solar Energy Collection”, 7th International Symposium on Telecommunication, (IST’2014), pp. 189-192, Tehran, Iran, January 2015.
- [7] N. A. Eltresy, H. A. Malha, S. H. Zainud-Deen, and K. H. Awadalla, Dual-Polarized Nanoantenna Solar Energy Collector, 33rd National radio science conference (NRSC 2016), Aswan, Egypt, Feb 22-25, 2016.
- [8] Z. Iluz, Y. Yifat, D. Barlev, M. Eitan, A. Boag, “UWB Dual Vivaldi nano-antenna load effect on the reflection properties”, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), pp.276-279, Torino, Italy, 2013.
- [9] CST Microwave Studio, ver. 2012, Computer Simulation Technology, Framingham, MA, 2012.
- [10] C. De Angelis, A. Locatelli, D. Modotto, S. Boscolo, M. Midrio, F. Sacchetto, A.-D. Capobianco, F. Pigozzo, and C. Someda, “Extending antenna theory to the optical domain,” in Microwave Conference, 2009. EuMC 2009. European. IEEE, 2009, pp. 810–813.
- [11] F. J. Gonz’alez, J. Alda, J. Sim’on, J. Ginn, and G. Boreman, “The effect of metal dispersion on the resonance of antennas at infrared frequencies,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 48–51, 2009.
- [12] Alexander, Jr, and C. A. Ward, “Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared,” *Appl. Opt.*, vol. 22, p. 1099, 1983.
- [13] A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis, B. S. Sharif "Infra-red nano-antennas for solar energy collection." *Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2011 Loughborough. IEEE, 2011.
- [14] Wided Amara, Donia Oueslati, Hatem Rmili, Abdessalam Alghamdi, and Taoufik Aguil, “Ultra-wideband elliptical-dipole optical antenna for solar energy harvesting,” *Proc. 2018 International Conference on Sensors, Systems, Signals and Advanced Technologies, SSS*, May 10-12, Hammamet, Tunisia, 2018.
- [15] Wided Amara, Donia Oueslati, Hatem Rmili, Abdessalam Alghamdi, and Taoufik Aguil, “Numerical analysis of a modified-dipole optical antenna for solar energy harvesting,” *Proc. International Conference on Innovative Trends in Energy, ITE*, May 10-12, Hammamet, Tunisia, 2018.
- [16] Z. Fang, L. Fan, C. Lin, D. Zhang, A. J. Meixner, and X. Zhu, “Plasmonic coupling of bow tie antennas with Ag nanowire,” *Nano letters*, vol. 11, no. 4, pp. 1676–1680, 2011.

- [17] Johnson PB, Christy RW, 'Optical constants of the noble metals' Phys. Rev.B. 6:4370-9, 1972.

Chapter 3

- [1] P. Bosshard, W. Hermann, and E. Hung, R. Hunt, and A. Simon, "An assessment of solar energy conversion technologies and research opportunities," GCEP Energy Assessment Analysis, 2006.
- [2] G. Moddel and S. Grover, "Rectenna Solar Cells" Ed. Springer, New York, 2013.
- [3] A. M. A. Sabaawi, C. Tsimenidis, Bayan S. Sharif," Infra-red Nano-antennas for solar energy collection", Loughborough, UK, 14-15 November 2011.
- [4] A. M. A. Sabaawi, C. Tsimenidis, Bayan S. Sharif," Infra-red Spiral Nano-antennas", Loughborough, UK, 12-13 November 2012.
- [5] G. Jayaswal, A. Belkadi, A. Meredov, B. Pelz, G. Moddel, A. Shamim," Optical rectification through an Al₂O₃ based MIM passive rectenna at 28.3 THz", Materials Today Energy 7 (2018) 1-9.
- [6] Ahasanul Haque, Ahmed Wasif Reza, Narendra Kumar, Harikrishnan Ramiah, "Slotting Effect in Designing Circular Edge Bow-Tie Nano Antenna for Energy Harvesting", 2015 IEEE Conference on Open System (ICOS), August Melaka, Malaysia
- [7] Gadalla, M. N., M. Abdel-Rahman, and Atif Shamim. "Design, optimization and fabrication of a 28.3 THz nano rectenna for infrared detection and rectification." Scientific reports 4, 2014.
- [8] Ahmed M. A. Sabaawi, Charalampos C. Tsimenidis, and Bayan S. Sharif, "Planar Bowtie Nanoarray for THz Energy Detection", IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology
- [9] Islam E. Hashem, Nadia H. Rafat, and Ezzeldin A. Soliman, "Dipole Nantennas Terminated by Traveling Wave Rectifiers for Ambient Thermal Energy Harvesting", IEEE Transactions on Nanotechnology, VOL. 13, NO. 4, July 2014 767.
- [10] N. A. Eltresy, H. A. Malha, S. H. Zainud-Deen, and K. H. Awadalla, Dual-Polarized Nanoantenna Solar Energy Collector, 33rd National radio science conference (NRSC 2016), Aswan, Egypt, Feb 2225, 2016.
- [11] W. Amara, D. Oueslati, H. Rmili, A. Alghamdi and T. Aguil, "Numerical Analysis of a Modified-Dipole Optical Antenna for Solar Energy Harvesting", The 2018 International Conference on Innovative trends in Energy (ITE'18), May 10-12, Hammamet-Tunisia.
- [12] W. Amara, D. Oueslati, H. Rmili, A. Alghamdi and T. Aguil, "Ultra-Wideband Elliptical-Dipole Optical Antenna for Solar Energy Harvesting", The 2018 International

- Conference on Sensors, Systems, Signals, and advanced technologies, (SSS'18), May 10-12, Hammamet-Tunisia.
- [13] W. Amara, N. Elresty, A. Yahyaoui, H. Rmili, T. Aguili, and J. M. Floch, "Design of ultra-wideband nano-antennas for Solar Energy Harvesting" the Loughborough Antennas and Propagation Conference, LAPC, November 2017.
- [14] A. Vial, T. Laroche, and M. Roussey, "Crystalline structure's influence on the near-field optical properties of single plasmonic nanowires," *Applied Physics Letters* 91, 123101 (2007).
- [15] J. Schuller, R. Zia, and M. Brongersma, "Near-field characterization of guided polariton propagation and cutoff in surface plasmon waveguides," *Physical Review B* 74, 1–12 (2006).
- [1] [16] Alexander, Jr, and C. A. Ward, "Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared," *Appl. Opt.*, vol. 22, p. 1099, 1983.
- [2] [17] Johnson PB, Christy RW, 'Optical constants of the noble metals' *Phys. Rev.B.* 6:4370-9, 1972.
- [3] [18] CST Microwave Studio, ver. 2012, Computer Simulation Technology, Framingham, MA, 2012
- [19] Paolo Biagioni, Jer-Shing Huang, and Bert Hecht, "Nanoantennas for visible and infrared radiation", *Rep. Prog. Phys.* 75 (2012) 024402 (40pp) doi:10.1088/0034-4885/75/2/024402

